

การประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4  
อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4



นางสาวณัฐวรา บาร์ศรี

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENT OF RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 PREDICTION CAPABILITY  
BASED ON THE PBF SFD 1-4 TEST

Miss Nutwara Barisee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Engineering

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม  
RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF  
SFD 1-4

โดย

นางสาวณัฐรดา บาร์ศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมนิวเคลียร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. กัมปนาท ชิลวา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เพ็งวานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. กัมปนาท ชิลวา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัตยชัย นิลสุวรรณโมฆิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. แสนสุข เวชชการิณย์)

ณัฐวรา บาริศรี : การประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 (ASSESSMENT OF RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 PREDICTION CAPABILITY BASED ON THE PBF SFD 1-4 TEST) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมบูรณ์ รัศมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. กัมปนาท ชิลวา, 140 หน้า.

ในอดีตที่ผ่านมาได้เกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่สร้างความเสียหายร้ายแรงและส่งผลกระทบต่อผู้คนและสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิลและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟุกุชิมะ ด้วยเหตุนี้ปัญหาด้านความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงกลายเป็นประเด็นสำคัญและมีการริเริ่มดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกศึกษาประเด็นของการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายพฤติกรรมที่อาจจะเกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากโปรแกรมสามารถจำลองเหตุการณ์ ประเมินการเกิดอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และได้เลือกใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมของเชื้อเพลิงและระบบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ เช่น สามารถจำลองพฤติกรรมของระบบหล่อเย็น การปล่อยผลผลิตฟิชชัน อัตราการสร้างไฮโดรเจนภายใต้สภาวะชั่วคราว ความร้อน ความดัน อัตราการไหล การออกซิเดชันของแท่งเชื้อเพลิง การหลอมละลายของมัดเชื้อเพลิง ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างซึ่งเกิดจากการทรุดตัวและความไม่เสถียรในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยได้ทำการประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 (Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4) และใช้เงื่อนไขจากการทดลองในการวิเคราะห์พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ ซึ่งได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของเชื้อเพลิง ปลอกเชื้อเพลิง และโครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (shroud) และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน จากผลการคำนวณพบว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 สามารถทำนายผลการทดลองได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงและมีความแม่นยำในการคำนวณผล อย่างไรก็ตามยังมีบางช่วงที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งอาจเป็นผลมาจากวิธีการป้อนข้อมูลในไฟล์ข้อมูลนำเข้าหรือโมเดลบางส่วนที่จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อไป

ภาควิชา	วิศวกรรมนิวเคลียร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมนิวเคลียร์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5970164021 : MAJOR NUCLEAR ENGINEERING

KEYWORDS: RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4, SEVERE FUEL DAMAGE TEST 1-4, POWER BURST FACILITY, CODE VALIDATION

NUTWARA BARISEE: ASSESSMENT OF RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 PREDICTION CAPABILITY BASED ON THE PBF SFD 1-4 TEST. ADVISOR: ASST. PROF. SOMBOON RASSAME, Ph.D., CO-ADVISOR: KAMPANART SILVA, Ph.D., 140 pp.

The nuclear accidents at the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima Daiichi nuclear power plants were the three most severe accidents in the history of nuclear power. These accidents brought about an unavoidable adverse impact on humans and the environment. The issue of nuclear power plant safety has become the top priority for the technology developer and the current user countries but also for the new countries currently planning or building new nuclear power plants. For this reason, some research works related to the safety of nuclear power plant has been initiated and implemented in Thailand. In this study, the prediction capability of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 developed by Innovative Systems Software (ISS) is being assessed using the Severe Fuel Damage (SFD) Test 1-4 performed in the Power Burst Facility (PBF) at the Idaho National Engineering Laboratory. The objective of this work is to evaluate the effectiveness of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 to predict severe core behavior, fission product release and hydrogen generation rates during 1.3 hours transient. The calculated results were compared to the available experimental data and the calculated results from the SCDAP/RELAP MOD1, MOD3.2 and MOD3.3. In general, the obtained results indicated that RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 predicted reasonably well the experimental data and is more accurate than the SCDAP/RELAP MOD1, MOD3.2 and MOD3.3 prediction. Even though, some discrepancies, especially in the cladding temperatures during the beginning phase, were found from the comparison of the calculated results and test data, these discrepancies were due to the uncertainties in the boundary conditions and code nodalization.

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร.สมบูรณ์ รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.กัมปนาท ซิลวา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์จาก สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะดำเนินงาน พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือ และตรวจสอบข้อบกพร่องของงานวิจัยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พงษ์แพทย์ เพ่งวานิชย์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำในเรื่องวิธีการคำนวณผลของโปรแกรมและคำอธิบายเพิ่มเติมในเรื่อง code ที่ใช้ในการคำนวณ ตลอดจนให้แนวทางในการวิเคราะห์ผลผลงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆสิต กรรมการภายในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ในเรื่องทฤษฎีและระบบต่างๆภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการเขียน และการตรวจสอบ code งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. แสนสุข เวชชการันย์ กรรมการภายนอกการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการวิเคราะห์ผลและรายละเอียดเพิ่มเติมต่างๆที่จะทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบข้อบกพร่องงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นางสาวนพวรรณ รัตนเดโช ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ในด้านการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎี และช่วยอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าให้มีความรู้สามารถนำมาใช้ประกอบการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้การสนับสนุน และช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ผู้วิจัยได้นำมาอ้างอิงจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	18
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	18
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย .....	18
1.5 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	20
2.1 อุบัติเหตุระดับรุนแรง [6] .....	20
2.2 ลำดับเหตุการณ์และความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุระดับรุนแรง [4],[6].....	20
2.2.1 ช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase) [5],[6] .....	20
2.2.2 การออกซิเดชันและการผลิตไฮโดรเจน (Oxidation and Hydrogen generation) [4],[5],[6].....	21
2.2.3 อันตรกิริยาเคมี (Chemical interactions amongst core materials) [5],[6]..	22
2.2.4 ความเสียหายของเปลือกเชื้อเพลิง (Cladding failure) [5],[6].....	24
2.2.5 การย้ายตำแหน่งและการเกิดการอุดตัน (Relocation and blockage formation) [5],[6] .....	24
2.2.5.1 ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและเปลือกเชื้อเพลิง [5],[6],[7] .....	25
2.2.6 ช่วงปลาย (Late phase) [6],[7] .....	28
2.2.7 ช่วงเติมน้ำหรือดับความร้อน (Refill/Quench) [6],[7].....	29

2.2.8 การปล่อยผลผลิตฟิชชัน (Fission product release) [6],[7] .....	29
2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage Test .....	30
2.4 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 (SFD 1-4) [9],[10]..	31
2.5 การประเมินและการศึกษาการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่นๆ [6].....	36
2.6 โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง [6].....	37
2.6.1 ตัวอย่างโค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง [6] .....	37
2.6.1.1 โค้ดของการประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic risk assessment).....	38
2.6.1.2 โค้ดของพฤติกรรมของเชื้อเพลิง (Fuel behavior) [6].....	38
2.6.1.3 โค้ดของจลนศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor kinetics) [6].....	38
2.6.1.4 โค้ดของเทอร์มัลไฮดรอลิก (Thermal-hydraulic) [6] .....	39
2.6.1.5 โค้ดของอุบัติเหตุระดับรุนแรง (Severe accident) [6] .....	39
2.6.1.6 โค้ดของการป้องกันเชิงสารกัมมันตรังสี (Radionuclide) [6] .....	39
2.6.1.7 โค้ดของการขนส่งและการรื้อถอนของสารกัมมันตรังสี (Radionuclide transport) [6].....	40
2.7 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 .....	40
2.7.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 .....	40
2.7.1.1 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8].	41
2.7.2 แบบจำลองและโมเดลที่ใช้ในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM .....	42
2.7.2.1 โมเดลของ RELAP [6].....	42
2.7.2.2 โมเดลของ SCDAP [6],[11] .....	48
2.7.3 วิธีการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM [24] .....	52
2.7.3.1 RELAP model [24].....	53
2.7.3.1.1 ความสามารถของ RELAP [24] .....	53



2.7.3.1.2 แบบจำลองทางกายภาพและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Physical Models and Numerical Methods) [24].....	54
2.7.3.1.3 Hydrodynamic Components [24].....	56
2.7.3.2 SCDAP model [13] .....	57
2.8 ความแตกต่างของโปรแกรม .....	60
2.8.1 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP/MOD3.3 [6],[11],[12],[13].....	60
2.8.2 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[11],[12],[13].....	60
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
2.9.1 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 .....	62
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่ใช้ PBF SFD .....	65
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	74
3.1 การศึกษาข้อมูลขาเข้า [6],[8] .....	75
3.2 การใช้ขอบเขตเงื่อนไขในข้อมูลขาเข้า [6],[8] .....	76
3.2.1 การคัดลอกกราฟขอบเขตเงื่อนไข [6],[8] .....	76
3.2.2 การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลข (Digitizing) [6],[8].....	77
3.3 การคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8].....	78
3.3.1 ส่วนประกอบในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8] .....	79
3.3.2 การใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8] .....	80
3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8].....	82

3.4.1 การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล [6],[8].....	82
3.4.2 การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot [6],[8].....	84
3.5 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผล [6],[8].....	85
3.5.1 แผนภาพ (Nodalization) [12].....	85
3.5.2 ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) [9],[10].....	88
3.5.3 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์.....	90
บทที่ 4 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	92
4.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level).....	92
4.2 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Cladding).....	93
4.3 โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (Shroud).....	98
4.4 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Production).....	101
4.5 ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states).....	102
4.5 สรุปผลการคำนวณ.....	108
4.5.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level).....	108
4.5.2 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Cladding).....	109
4.5.3 โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (Shroud).....	110
4.5.4 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Production).....	110
4.5.5 ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states).....	111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	113
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

สารบัญรูป

รูปที่ 1 ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์ .....23

รูปที่ 2 ดัชนีความเสียหาย 3 .....27

รูปที่ 3 ดัชนีความเสียหาย 4 .....27

รูปที่ 4 ดัชนีความเสียหาย 5.....27

รูปที่ 5 ดัชนีความเสียหาย 6.....28

รูปที่ 6 แสดงรายละเอียด cross section ของมัดเชื้อเพลิงใน PBF SFD 1-4 .....33

รูปที่ 7 Bundle nuclear power .....34

รูปที่ 8 Axial Diagram ของ SFD 1-4 .....34

รูปที่ 9 Difference equation nodalization schematic .....55

รูปที่ 10 RELAP nodalization diagram of the Surry reactor core.....56

รูปที่ 11 ช่องการไหลในแกนปฏิกรณ์ใน SCDAP model.....57

รูปที่ 12 ส่วนประกอบของแท่งเชื้อเพลิงใน SCDAP model.....59

รูปที่ 13 ส่วนประกอบของแท่งควบคุมใน SCDAP model .....59

รูปที่ 14 การคำนวณใน SCDAP model.....59

รูปที่ 15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน .....74

รูปที่ 16 หน้าต่างของโปรแกรม Snagit 12 Editor .....76

รูปที่ 17 การบันทึกรูปภาพ.....77

รูปที่ 18 หน้าต่างโปรแกรม Digitize .....78

รูปที่ 19 ไฟล์ขาออกของข้อมูลกราฟ .....78

รูปที่ 20 หน้าต่างโปรแกรม Notepad++ .....80

รูปที่ 21 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 .....81

รูปที่ 22 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เมื่อเลือกข้อมูลขาเข้าแล้ว .....81

รูปที่ 23 หน้าต่างโปรแกรมเมื่อกด Run RELAP5 แล้ว.....	82
รูปที่ 24 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับการใช้ไฟล์ Strip.....	83
รูปที่ 25 หน้าต่างของ MS Excel ที่ทำการดึงข้อมูลออกมา.....	83
รูปที่ 26 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot เมื่อเลือกไฟล์ .r แล้ว.....	84
รูปที่ 27 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot และเลือก Export ASCII เพื่อนำไปพล็อต.....	85
รูปที่ 28 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ RELAP5 .....	87
รูปที่ 29 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ SCDAP .....	87
รูปที่ 30 Bundle Nuclear Power.....	88
รูปที่ 31 ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรง.....	89
รูปที่ 32 แสดง Fission Power, Power to bypass coolant, Steam oxidation power และ Net Bundle power SFD 1-4.....	90
รูปที่ 33 การเปรียบเทียบผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์.....	92
รูปที่ 34 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงบริเวณ inner surface cladding Rod 3B ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร.....	93
รูปที่ 35 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงบริเวณ inner surface cladding Rod 4D ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร.....	94
รูปที่ 36 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.4 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4 .....	95
รูปที่ 37 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.54 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.1, MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4.....	96
รูปที่ 38 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.74 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.1, MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4.....	96

รูปที่ 39 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.54 เมตร .....	98
รูปที่ 40 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.50 เมตร (90°).....	99
รูปที่ 41 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ shroud mid-wall ที่ระดับความสูง 0.91 เมตร .....	100
รูปที่ 42 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอัตราการเกิดไฮโดรเจน .....	101
รูปที่ 43 ผลการทดลองการเกิดไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 .....	101
รูปที่ 44 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 1 Irradiated rods, inner ring ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร .....	104
รูปที่ 45 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 2 Fresh rod3B ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร .....	104
รูปที่ 46 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 3 Fresh rod4D ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร .....	105
รูปที่ 47 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 4 Irradiated rods, middle ring ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร .....	105
รูปที่ 48 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 5 Control rods ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร .....	106
รูปที่ 49 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 6 Irradiated rods , outer ring ...	107

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ดัชนีความเสียหาย.....	26
ตารางที่ 2	เปรียบเทียบการทดลอง SFD Test.....	31
ตารางที่ 3	Boundary conditions of the bundle and the bypass region .....	33
ตารางที่ 4	การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่นๆ .....	37
ตารางที่ 5	ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 .....	42
ตารางที่ 6	โมเดลของ RELAP และชุดสมการ.....	42
ตารางที่ 7	โมเดลโครงสร้างความร้อนและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 .....	45
ตารางที่ 8	โมเดลพลังงานจลน์ของเครื่องปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 .....	47
ตารางที่ 9	โมเดลการนำความร้อนของแกนปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP.....	48
ตารางที่ 10	โมเดลการเกิดออกซิเดชันของวัสดุและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP .....	49
ตารางที่ 11	โมเดลแท่งเชื้อเพลิงและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP .....	51
ตารางที่ 12	งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4.....	62
ตารางที่ 13	งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4.....	65
ตารางที่ 14	แสดงค่าขอบเขตเงื่อนไขอุณหภูมิขาเข้า อัตราการไหลขาเข้าและความดัน.....	89
ตารางที่ 15	ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ .....	91
ตารางที่ 16	แสดงระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง .....	103
ตารางที่ 17	สรุปผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4.....	112

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าหลายประเภท ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าดีเซล และโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยกำลังการผลิตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 16,071.13 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 38.77 ซึ่งสถิติความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560 มีค่าเท่ากับ 26,747.20 เมกะวัตต์ จะเห็นได้ว่ากำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าหลัก (Base Load Plant) ไม่สอดคล้องกับอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการจัดซื้อพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นๆทั้งภายในและภายนอกประเทศเพื่อแก้ปัญหาความต้องการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งการซื้อพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตอื่นๆทำให้ค่าไฟปรับตัวเพิ่มขึ้น ทางออกในการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนจึงเป็นการวางแผนพัฒนาพลังงานทางเลือกที่เหมาะสม เพื่อนำมาเป็นกำลังหลักในการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ หนึ่งในแผนพัฒนาคือการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งการจัดหาทรัพยากรเพื่อมาเป็นกำลังหลักในการผลิตไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการพิจารณาความเหมาะสมในหลายด้าน เช่น ความมั่นคงด้านพลังงาน ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า แหล่งเชื้อเพลิง ข้อจำกัดต่างๆของการใช้พลังงาน ผลกระทบต่อประชาชน และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดทั้งในการดำเนินงานและอุบัติเหตุที่อาจเกิดจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการวางแผนและก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ คือปัญหาเรื่องความรู้ความเข้าใจด้านพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งยังไม่เป็นที่แพร่หลาย และเรื่องของการจัดการอุบัติเหตุเนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาได้เกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่สร้างความเสียหายร้ายแรงและส่งผลกระทบต่อผู้คนและสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์โรงที่สอง (Three Mile Island Unit 2, TMI-2) ในปี พ.ศ. 2522 [1] โดยสาเหตุเกิดจากความบกพร่องในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ จนทำให้เกิดการรั่วของน้ำที่จะนำเข้ามาในกระบวนการผลิตไอน้ำ เมื่อไม่มีน้ำเหลือเพียงพอเชื้อเพลิงจึงร้อนและหลอมละลาย ผลจากอุบัติเหตุดังกล่าว ทำให้แกนเครื่องปฏิกรณ์เสียหายทั้งหมดและมีการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ชั้นบรรยากาศภายนอก แต่เนื่องจากเจ้าหน้าที่ได้จำกัดบริเวณความเสียหายให้อยู่เฉพาะภายในโรงไฟฟ้าจึงทำให้ประชาชนในบริเวณใกล้เคียงได้รับรังสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2529 เกิดอุบัติเหตุขึ้นที่โรงไฟฟ้าเชอร์โนบิลโรงที่สี่ (Chernobyl) [2] ซึ่งไม่ได้เกิดจากการเดินเครื่อง

โรงไฟฟ้าตามปกติ แต่เป็นการเดินเครื่องเพื่อทดสอบระบบภายในโรงไฟฟ้า โดยเจ้าหน้าที่ได้ทำการตัดระบบความปลอดภัยออกทั้งหมด เมื่อเกิดความผิดพลาดในการทดสอบระบบหล่อเย็นและระบบทำความเย็นฉุกเฉิน เครื่องปฏิกรณ์ผลิตพลังงานความร้อนออกมาจำนวนมาก ปริมาณไอน้ำและความดันในถังเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการระเบิดน้ำแรงดันสูง และเกิดเพลิงไหม้ขึ้น สารกัมมันตรังสีเกือบทั้งหมดได้รั่วไหลออกมาสู่ชั้นบรรยากาศและขยายขอบเขตไปยังประเทศอื่นๆจนต้องมีการอพยพประชาชนในบริเวณที่เกิดอุบัติเหตุ เจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าและเจ้าหน้าที่ดับเพลิงได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก เมื่อเวลาผ่านไปองค์การอนามัยโลกได้สรุปผลการศึกษาระยะยาวที่เกิดขึ้นพบว่า มีอัตราการเกิดโรคมะเร็งต่อมไทรอยด์ในเด็กเพิ่มขึ้น โดยมีผู้เสียชีวิตซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการได้รับไอโอดีนรังสีเข้าสู่ร่างกาย ประชาชนซึ่งอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีผลกระทบทางรังสีต้องได้รับการเยียวยาจิตใจเนื่องจากมีอาการทางจิตซึ่งเกิดจากความหวาดกลัวอันตราย และในปี พ.ศ. 2554 เกิดอุบัติเหตุขึ้นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ (Fukushima Daiichi) ในโรงไฟฟ้าโรงที่ 1 ถึง 4 [3] โดยมีสาเหตุมาจากการสูญเสียแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Station blackout) เนื่องมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลฉุกเฉินได้รับความเสียหายจากน้ำท่วมขณะเกิดสึนามิจึงไม่สามารถจ่ายไฟให้กับปั๊มน้ำของระบบหล่อเย็นฉุกเฉินได้ เครื่องปฏิกรณ์เกิดความร้อนสูงและเกิดไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก ทำให้เชื้อเพลิงหลอมละลายและเกิดการระเบิดขึ้น เหตุการณ์เหล่านี้จัดเป็นอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่มีความรุนแรงมาก เนื่องจากการปลดปล่อยรังสีที่ส่งผลกระทบต่อผู้คนและสิ่งแวดล้อม ปัญหาความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงกลายเป็นประเด็นสำคัญสำหรับนักพัฒนาด้านเทคโนโลยีและประเทศผู้ใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ รวมไปถึงประเทศที่กำลังวางแผนสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ใหม่ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการริเริ่มและดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

จากการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าว พบว่าการศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การหลอมละลายของแท่งเชื้อเพลิงและการศึกษาลักษณะของการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงแบบต่างๆมีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ การวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกศึกษาประเด็นของการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายพฤติกรรมที่อาจจะเกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากโปรแกรมสามารถจำลองเหตุการณ์ ประเมินการเกิดอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ทำให้ผู้ศึกษาเกิดความรู้ความเข้าใจ สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการป้องกันอุบัติเหตุ และพัฒนาวิธีการจัดการกับอุบัติเหตุแบบไม่คาดคิดได้ อีกทั้งยังสามารถออกแบบการทดลองได้อย่างสะดวกและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการจำลองการเกิดอุบัติเหตุจริงอีกด้วย

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการยอมรับและมีความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์และประเมินผลการทดลองทางด้านอุบัติเหตุระดับรุนแรง มีอยู่เป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น MELCOR, MACCS, SCDAP/RELAP, VICTORIA, CONTAIN, และ IFCI เป็นต้น [6] ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้



โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Innovative System Software เนื่องด้วยโปรแกรมสามารถทำนายพฤติกรรมของเชื้อเพลิงและระบบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ เช่น สามารถจำลองพฤติกรรมของระบบหล่อเย็น การปล่อย fission product อัตราการสร้างไฮโดรเจนภายใต้สภาวะชั่วคราว ความร้อน ความดัน อัตราการไหล การออกซิเดชันของแท่งเชื้อเพลิง การหลอมละลายของมัดเชื้อเพลิง ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างซึ่งเกิดจากการหลุดตัวและความไม่เสถียรในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยโปรแกรมนี้อย่างเพิ่มความสะดวกในการออกแบบและลดต้นทุน เนื่องจากการจำลองการเกิดอุบัติเหตุแบบเต็มรูปแบบนั้นมีความซับซ้อนและใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมาก และมีความซับซ้อนในการดำเนินงาน โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จึงมีส่วนสำคัญในการช่วยพัฒนาด้านการจัดการอุบัติเหตุได้เป็นอย่างดีเยี่ยม อีกทั้งโปรแกรมยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุระดับรุนแรง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 (Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4) ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อทดสอบเกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงชั้นรุนแรง การทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 นี้ เป็นการทดลองลำดับที่ 4 ซึ่งผู้เชี่ยวชาญด้านนิวเคลียร์ได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และศึกษาผลกระทบหากเกิดอุบัติเหตุ โดยใช้เงื่อนไขจากการทดลองในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการคำนวณ ซึ่งได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของเชื้อเพลิง ปลอกเชื้อเพลิง โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เพื่อสามารถกำหนดขอบเขตในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 สำหรับใช้ในการวางแผนจัดการอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม แม้ว่าจะมีงานวิจัย SFD ST ที่ทำการประเมินอุบัติเหตุโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 ในลักษณะเดียวกันแล้ว แต่การวัดความสามารถในการประมวลผลด้วยการทดลอง SFD 1-4 จะเป็นการตรวจสอบว่า code ที่ใช้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือหรือไม่ สามารถใช้ในการประเมินอุบัติเหตุได้อย่างไร โดยการทดลองมีข้อแตกต่างกับ SFD ST อย่างชัดเจนในเรื่องขอบเขตเงื่อนไข การเลือกใช้เชื้อเพลิง เช่น SFD ST ใช้เชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด 32 แท่ง ส่วน SFD1-4 ใช้เชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง ใช้แท่งควบคุม Ag In Cd เป็นวัสดุดูดซับที่ใช้ในแท่งเชื้อเพลิง (control rod absorber material) การระบายความร้อนโดยใช้อาร์กอน และจำลองกรณีที่ไม่มีการเติมน้ำกลับเข้าไปใหม่ในระบบ (No reflood) ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่รุนแรงกว่ากรณีอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งการทดลอง SFD 1-4 นี้ จำลองเงื่อนไขต่างๆให้ใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์จริงขณะเกิดอุบัติเหตุ จึงช่วยทำให้การประเมินมีผลการคำนวณที่แม่นยำขึ้นสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานใน

การศึกษาย่างครอบคลุม เกิดความรู้ใหม่ และเสริมความเข้าใจด้านทฤษฎีจากการศึกษาค้นคว้า งานวิจัยนี้ อีกทั้งยังสามารถนำผลการคำนวณวิเคราะห์เพื่อพัฒนาการใช้งานโปรแกรมต่อไปได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 (Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4)

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 คือ กำลังความร้อนเชิงเส้นและ อัตราการไหลขาเข้าของสารหล่อเย็น
2. เปรียบเทียบผลการคำนวณและการทดลอง ได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของ เชื้อเพลิง ปลอกเชื้อเพลิง โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (shroud) และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน

## 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้แก่ การอ่านข้อมูลขาเข้า (Input desk) การประมวลผล และการอ่านข้อมูลขาออก (Output desk)
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4 และโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4
3. ทดลองใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยทำการประมวลผลด้วย โปรแกรมจากข้อมูลขาเข้าแบบพื้นฐาน
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างข้อมูลขาเข้าของการทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4
5. ประมวลผลด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยใช้ข้อมูลขาเข้าของการ ทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4
6. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ผลที่ ได้จากการทดลองจริงและผลที่ได้จากโปรแกรมอื่นๆที่มีความสามารถใกล้เคียงกัน
7. วิเคราะห์และสรุปผลการเปรียบเทียบ

### 1.5 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 (Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4)
2. สามารถกำหนดขอบเขตในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 เพื่อใช้วางแผนจัดการอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทที่ 2 เป็นการรวบรวมคำนิยาม ความรู้เบื้องต้น และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ คำจำกัดความของอุบัติเหตุระดับรุนแรง ลำดับเหตุการณ์ของการเกิดความเสียหายในแกนปฏิกรณ์ ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 (SFD 1-4) โปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุระดับรุนแรง ซึ่งเป็นข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ที่ใช้ในการคำนวณผลการทดลอง นอกจากนี้ยังรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 (SFD 1-4) และงานวิจัยที่ใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า วิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงงานวิจัยอีกด้วย

#### 2.1 อุบัติเหตุระดับรุนแรง [6]

International Atomic Energy Agency (IAEA) ได้บัญญัติความหมายของคำว่าอุบัติเหตุระดับรุนแรงหรือ Severe Accident (SA) ไว้ว่าเป็นอุบัติเหตุที่มีเงื่อนไขเกินกว่าการออกแบบอุบัติเหตุพื้นฐาน (Design Basis Accident) โดยที่อุบัติเหตุระดับรุนแรงจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์ การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงนั้นสามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวและสร้างความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์ ซึ่งก่อนการเกิดความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์นั้นจะเกิดเหตุการณ์เป็นลำดับดังนี้

#### 2.2 ลำดับเหตุการณ์และความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุระดับรุนแรง [4],[6]

การเกิดความเสียหายในแกนปฏิกรณ์สามารถแบ่งลำดับการเกิดเหตุการณ์เป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

##### 2.2.1 ช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase) [5],[6]

เมื่อเกิดอุบัติเหตุเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำหล่อเย็นในระบบหลักของแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของมัดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการรั่วไหลหรือการเกิดความเสียหายของระบบ น้ำที่จะเข้าไปหล่อเย็นในแกนปฏิกรณ์มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ช่วงความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ประกอบไปด้วยช่วงของการที่วัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รวมถึงช่วงของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีความซับซ้อน ช่วงการหลอมละลายและการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวของเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์ในช่วงความร้อนที่เพิ่มขึ้นอาจจะส่งผลให้แกนปฏิกรณ์หลอมเหลวและเกิดการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของเชื้อเพลิงได้ โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นคือการเกิดออกซิเดชันของไอน้ำกับปลอกเชื้อเพลิงเซอร์คาลอย (Zircaloy cladding)

## 2.2.2 การออกซิเดชันและการผลิตไฮโดรเจน (Oxidation and Hydrogen generation)

[4],[5],[6]

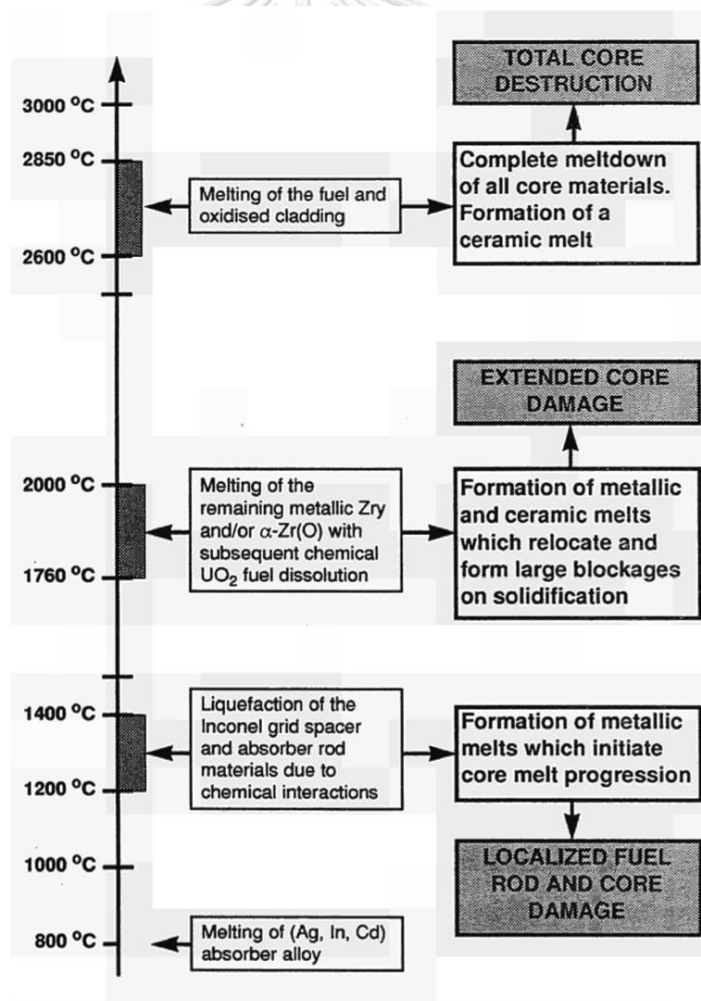
ปรากฏการณ์ที่สำคัญในช่วงเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงคือการสร้างไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ระหว่างการเกิดออกซิเดชันของส่วนประกอบต่างๆในแกนปฏิกรณ์และการเกิด molten core concrete interaction (MCCI) ในช่วงเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง น้ำในแกนปฏิกรณ์ลดลง ภายในเกิดความร้อนสูงขึ้น โดยไฮโดรเจนนั้นจะถูกผลิตขึ้นมาประมาณช่วงอุณหภูมิ 800-1000 K และจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในช่วง 1200-1500 K ด้วยความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อนนี้ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งระยะเวลาและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดการระเบิด เมื่ออุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้เกิดความร้อนในการผลิตไฮโดรเจน ยังมีปริมาณไฮโดรเจนจำนวนมาก ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิด เนื่องจากไฮโดรเจนมีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถรั่วไหลและกระจายตัวได้ง่าย หากไฮโดรเจนผสมกับอากาศในปริมาณที่เหมาะสมอาจเกิดการจุดระเบิดและเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยการใช้พลังงานต่ำ ปลอกเชื้อเพลิงที่ร้อนสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำและปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมาได้ อีกการเกิดออกซิเดชันของเซอร์โคเนียมกับไอน้ำถือเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนและผลกระทบต่อความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ เมื่อระบบหล่อเย็นไม่ทำงานและน้ำหล่อเย็นในแกนปฏิกรณ์ลดระดับลง โลหะเซอร์โคเนียมซึ่งใช้ทำแท่งบรรจุเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำหรือน้ำทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและให้พลังงานความร้อนออกมา ทำให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนรั่วไหลออกจากแกนปฏิกรณ์ไปผสมกับอากาศ (ก๊าซออกซิเจน) ที่ส่วนบนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจนเกิดการเผาไหม้และเกิดการระเบิดขึ้นในที่สุด ปริมาณไฮโดรเจนที่ปลดปล่อยออกสู่ระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor cooling system) ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเกิดออกซิเดชันของเซอร์คาลอย แม้ว่าการเกิดออกซิเดชันของโครงสร้าง

หลัก (เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม และ B<sub>4</sub>C) สามารถสร้างปริมาณไฮโดรเจนได้ อุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกซิเดชันของเซอร์คาลอย แม้ว่าอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์จะถูกจำกัดโดยการหลอมละลายของเชื้อเพลิงแต่อุณหภูมิสูงสุดจะถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงสุด อุณหภูมิสูงสุดของแกนปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการหลอมเหลวของเซอร์คาลอย

### 2.2.3 อันตรกิริยาเคมี (Chemical interactions amongst core materials) [5],[6]

ความหลากหลายของวัสดุส่วนประกอบของแกนปฏิกรณ์ก่อให้เกิดความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) หรือก่อให้เกิดความไม่เสถียรทางการแลกเปลี่ยนความร้อนกับปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 K รูปที่ 1 แสดงภาพของปฏิสัมพันธ์ทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์ ช่วงอุณหภูมิที่ 1 คือช่วงอุณหภูมิ 1,473 ถึง 1,673 K เป็นช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase) ของการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์ซึ่งเกิดขึ้นในแท่งควบคุมที่เริ่มเกิดการหลอมละลายของโลหะผสมของ Ag-In-Cd ที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 K เกิดความเสียหายของโครงเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) ของปลอกแท่งควบคุมทำให้ Ag-In-Cd alloy หลอมละลายและทำปฏิกิริยาเคมีกับท่อเซอร์คาลอย (Zircaloy guide tube) และบางส่วนของปลอกเซอร์คาลอยรอบแท่งเชื้อเพลิง การสัมผัสของโลหะผสม Ag-In-Cd ที่หลอมละลายร่วมกับเซอร์คาลอยหรือเหล็กไร้สนิมทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 1,470 K ซึ่งเป็นช่วงการเริ่มต้นของการหลอมละลายไปสู่แกนปฏิกรณ์ การเกิดอันตรกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการสร้างโครงสร้างแบบยูเทคติก (Eutectic Formation) หรือโครงสร้างที่ง่ายต่อการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำเช่นการทำอันตรกิริยาของอินโคเนล (Inconel) ซึ่งเป็นโลหะผสมพิเศษระหว่างนิกเกิลกับโครเมียม โดยมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน การออกซิเดชัน และทนต่อความดันสูง โดยอินโคเนล จะทำอันตรกิริยากับเซอร์คาลอย ที่อุณหภูมิประมาณ 1,470 K ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซฟิชชันและการหลอมละลาย ช่วงอุณหภูมิที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิประมาณ 2,033 ถึง 2,273 K เป็นช่วงที่สองของการหลอมละลาย เซอร์คาลอยที่ไม่เกิดการออกซิเดชันจะเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 2,033 K ช่วงนี้จะพบออกไซด์ที่หนาแน่นบนพื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิงซึ่งจุดหลอมเหลวของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์คือ 2,973 K เซอร์คาลอยที่ถูกหลอมเหลวจะไปละลายบางส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์ โดยที่การขึ้นรูปของเหลวผสมยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 K ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของยูเรเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียมได

ออกไซด์ ถ้าปลอกเซอร์คาลอยถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ก่อนถึงช่วงอุณหภูมิที่ 2 จะไม่มีการสลายตัวเกิดขึ้น ในมุมมองของการจัดการอุบัติเหตุ นั้น คุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันจะช่วยให้เกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างกัน โดยในบางวัสดุจำเป็นต้องเพิ่มความทนทานของการกัดกร่อน การทนต่อความดันและอุณหภูมิสูงได้ เพื่อไม่ให้เกิดการหลอมเหลวของเชื้อเพลิงหรือปลอกเชื้อเพลิงเร็วเกินไป ทำให้มีเวลาในการเข้าไปดำเนินการแก้ไขในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้ และสุดท้ายคือช่วงอุณหภูมิที่ 3 อุณหภูมิระหว่าง 2,873 ถึง 3,123 K ส่วนที่เหลืออยู่คือยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) และสารละลายยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) จะเริ่มหลอมละลายเนื่องจากเกิดความร้อนสูงเกินไปที่แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ส่งผลให้แกนเกิดการหลอมละลาย เกิดไฮโดรเจนในปริมาณมากและเกิดการระเบิดได้



รูปที่ 1 ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์

## 2.2.4 ความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding failure) [5],[6]

อุณหภูมิและความดันที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงเกิดการพองตัวและเกิดรอยแตก (Ballooning and rupture) ในปลอกเชื้อเพลิง ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของปลอกเชื้อเพลิงโดยตรง การเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงอาจทำให้เกิดการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของเหลวผสมยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) และทำให้เกิดการปล่อยผลผลิตฟิชชันจากเชื้อเพลิงเหลวที่เพิ่มขึ้นหากมีการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนาเพียงพอบนพื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิงแล้วจะสามารถป้องกันการเกิดการย้ายตำแหน่งของเซอร์โคลอยที่ถูกหลอมละลายหรือสามารถจำกัดช่องว่างระหว่างปลอกเชื้อเพลิงและเม็ดเชื้อเพลิงได้ ในทางปฏิบัติเกณฑ์ความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ไม่สามารถประเมินได้โดยการเปรียบเทียบโดยตรงกับผลการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถหาค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกละลายในตำแหน่งที่แตกต่างกันในช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง ข้อมูลเพียงอย่างเดียวที่สามารถใช้ได้คือผลจากการทดสอบหลังการทดสอบของสภาวะสุดท้าย (Post-test examination of final state)

## 2.2.5 การย้ายตำแหน่งและการเกิดการอุดตัน (Relocation and blockage formation) [5],[6]

เมื่อเฟสของเหลวเกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ทั้งจากอันตรกิริยาเคมีหรือเกิดเนื่องจากถึงจุดหลอมละลาย ของเหลวดังกล่าวจะเกิดการย้ายตำแหน่ง (Relocation) และเกิดการแข็งตัวในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิต่ำสุดที่หลอมละลาย แกนปฏิกรณ์จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการเกิดความเสียหายและจะขยายตัวเป็นวงกว้างเพิ่มขึ้น (Extended damage) การย้ายตำแหน่งเกิดขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของเซอร์โคเนียมที่ไม่ถูกออกไซด์ วัสดุที่หลอมละลายอาจเคลื่อนที่หรือไหลเป็นสาย (Rivulets) หรือเป็นฟิล์ม (Films) ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเสียหาย นอกจากนี้แกนปฏิกรณ์อาจเสียสมดุลทางโครงสร้างและตกลงเป็นเศษซากของแข็ง (Debris) ซึ่งอาจละลายในภายหลังเนื่องจากความร้อน

การออกซิเดชันและปฏิกิริยาทางเคมีอื่นๆ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิและพฤติกรรมเชิงกล ในบริเวณที่อุณหภูมิที่ต่ำการหลอมละลายจะเริ่มทำให้ของเหลวหรือวัสดุที่เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวแล้วเกิดการแข็งตัวและก่อตัวเป็นเปลือก (Crust) บนพื้นผิวของ



เชื้อเพลิง เปลือกที่เกิดขึ้นนี้จะไปลดพื้นที่ตัดของช่องระบายความร้อนและนำไปสู่การเกิดการอุดตัน (Blockage) การอุดตันนี้จะลดการไหลของน้ำหล่อเย็นในบริเวณนั้น เป็นผลทำให้เกิดการลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและอาจเกิดความเสียหายต่อวัสดุที่เหลืออยู่ในแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากส่วนผสมที่ย้ายตำแหน่ง (Relocating mixture) มีความร้อนจากการสลายตัว (Decay heat) ทำให้สามารถเกิดการหลอมและการเกิดการแข็งตัวขึ้นซ้ำๆได้ จนทำให้น้ำเดือดและเกิดการล่มสลายของแกนปฏิกรณ์ (Core meltdown) ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิง และปลอกในงานวิจัยนี้มีการพูดถึงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิง การเกิดออกซิเดชันของแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ ระหว่างการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น การเกิดการพองตัว (Ballooning) และรอยแตก (Rupture) ของปลอกเชื้อเพลิงอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความดันภายในแท่งเชื้อเพลิงที่สูงเกินไป และการเกิดออกซิเดชันอาจทำให้เกิดรอยแตกได้เช่นกัน ถ้าความร้อนของปลอกเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนโลหะของปลอกจะหลอมละลาย ถ้าไม่เกิดการพองตัวที่ปลอกเชื้อเพลิงส่วนที่เป็นโลหะที่หลอมละลายของปลอกจะยังคงเป็นรูปวงแหวน (Annulus) หากมีการพองเกิดขึ้นในส่วนโลหะของปลอกจะมีการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ไปบางส่วนในทิศทางเส้นรอบวงและเปลี่ยนเป็นส่วนเสี้ยวของรูปวงแหวน ต่อจากนั้นส่วนโลหะของปลอกเชื้อเพลิงจะเริ่มละลาย (Dissolve) และถูกลดความหนาของส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงที่อยู่ติดกัน หากปลอกเชื้อเพลิงยังอยู่ที่อุณหภูมิสูงเรื่อย ๆ ส่วนออกซิไดซ์ของปลอกอาจล้มเหลวได้เนื่องจากความเค้นหรือถูกลดความหนาของส่วนออกซิไดซ์จากนั้นส่วนโลหะของปลอกจะตกลงสู่ตำแหน่งที่ต่ำกว่า ถ้าปลอกที่ถูกย้ายตำแหน่งจากที่สูงกว่าไปต่ำกว่าและอยู่บนพื้นผิวด้านนอกของปลอกอาจทำให้ส่วนออกซิไดซ์ของปลอกอาจถูกเสริมแรงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของส่วนโลหะของปลอกและส่วนออกซิไดซ์ของปลอกมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับขนาดของพื้นที่ที่เกิดการออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิงและทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกนปฏิกรณ์

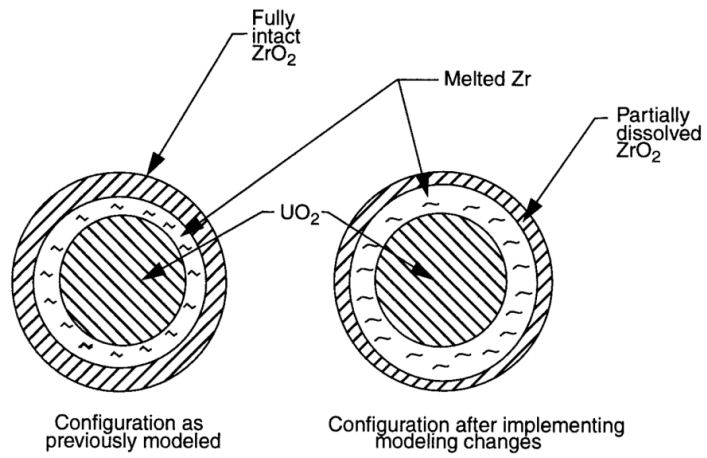
#### 2.2.5.1 ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง [5],[6],[7]

ในงานวิจัยนี้มีการพูดถึงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิง การเกิดออกซิเดชันของแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ ระหว่างการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ตารางที่ 1 แสดงดัชนีระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและ

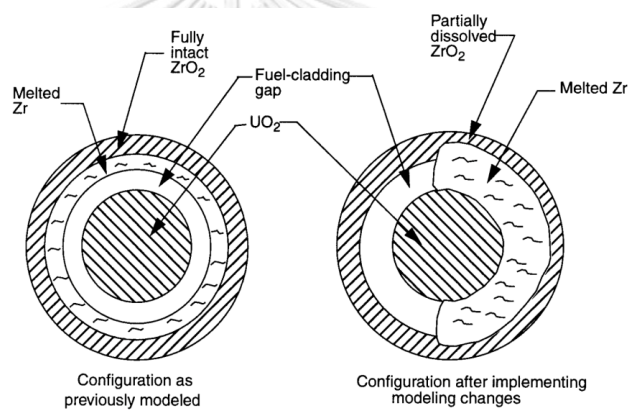
ปลอกเชื้อเพลิง สำหรับดัชนีความเสียหายที่ 1 เป็นส่วนโลหะและออกซิไดซ์ของปลอกยังไม่เกิดการพองหรือการขยายตัวออก และยังไม่มีการเกิดการออกซิเดชันและการหลอมละลาย สำหรับดัชนีความเสียหายที่ 2 เกิดการพองหรือการขยายตัวออกแต่ยังไม่เกิดการหลอมละลาย สำหรับดัชนีความเสียหายที่ 3, 4, 5 และ 6 แสดงไว้ในรูปที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยดัชนีความเสียหายที่ 3 (รูปที่ 2) เกิดการหลอมละลายที่ปลอกแต่ไม่เกิดการขยายตัว ดัชนีความเสียหายที่ 4 (รูปที่ 3) เกิดการหลอมละลายของปลอกเชื้อเพลิงของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ไปเป็นของเหลวเซอร์โคเนียมทำให้ปลอกเชื้อเพลิงมีความหนาลดลงและเกิดการพองหรือการขยายตัวของเชื้อเพลิง ดัชนีความเสียหายที่ 5 (รูปที่ 4) แสดงถึงการหลอมละลายของปลอกเชื้อเพลิงของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เข้าไปในช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงและปลอก อีกทั้งยังเกิดการหลอมละลายของเชื้อเพลิง และของเหลวเซอร์โคเนียม, ยูเรเนียม และออกซิเจน เกิดการรวมและย้ายตำแหน่ง (Relocation) ออกไปสู่พื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เป็นการอุดตันทางของไอน้ำ ตรงส่วนนี้อาจจะเกิดการพองหรือการขยายตัวของเชื้อเพลิงหรือไม่ก็ได้ ดัชนีความเสียหายที่ 6 (รูปที่ 5) แสดงถึงการแตกหรือการสึกหรอของชั้นส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงทำให้วัสดุที่หลอมเหลวไหลออกจากปลอกเชื้อเพลิงทั้งหมด

#### ตารางที่ 1 ดัชนีความเสียหาย [7]

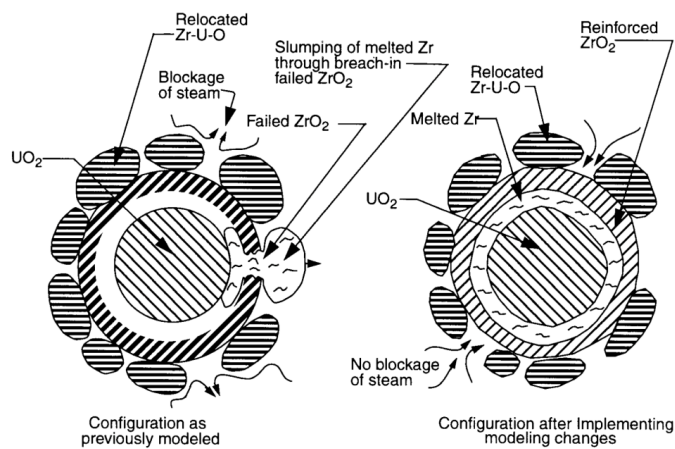
Damage Index	Definition
1	no cladding ballooning or melting
2	cladding ballooning but no melting
3	cladding melting but no ballooning
4	cladding melting and ballooning
5	cladding melting and ballooned or not ballooned, and presence of relocated material
6	breach or vanishing of oxidic part of cladding



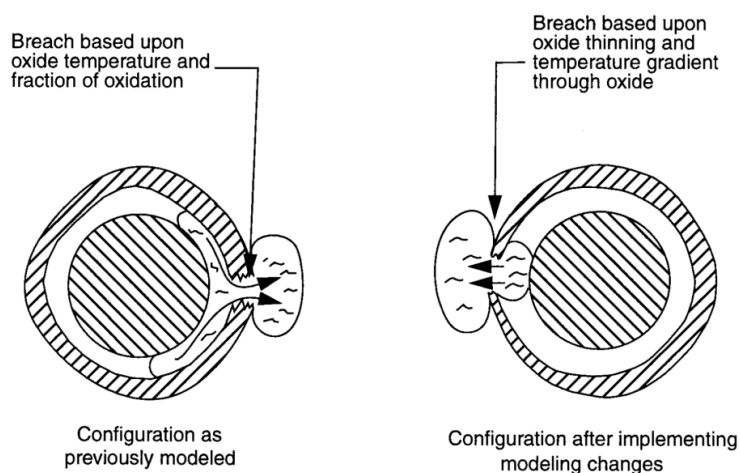
รูปที่ 2 ดัชนีความเสียหาย 3 [6],[7]



รูปที่ 3 ดัชนีความเสียหาย 4 [6],[7]



รูปที่ 4 ดัชนีความเสียหาย 5 [6],[7]



รูปที่ 5 ดัชนีความเสียหาย 6 [6],[7]

### 2.2.6 ช่วงปลาย (Late phase) [6],[7]

ช่วงปลายหรือเฟสปลายหมายถึงช่วงหนึ่งของขั้นตอนการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ที่อยู่ในถังบรรจุแกนปฏิกรณ์ (In-vessel core degradation) ที่เกี่ยวข้องกับการหลอมละลายและการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของวัสดุเชื้อเพลิงเซรามิกและนำไปสู่การสูญเสียรูปทรงของแกนปฏิกรณ์ วัสดุเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงที่ถูกออกซิไดซ์จะถูกย้ายตำแหน่งลงไป (Relocate downward) ในรูปของเศษซากของแข็ง เศษซากนี้อาจทำให้อุณหภูมิสูงไปถึงจุดหลอมละลายได้เนื่องจากแหล่งความร้อนภายในจากการเสื่อมสลาย (Decay heat) และการมีบ่อของเหลว (Liquid pool) ซึ่งเป็นการเก็บรักษาไว้โดยเปลือกของแข็งที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนโลหะที่หลอมและแข็งในช่วงต้น ความเสียหายของเปลือกในบางส่วนของช่วงการเกิดการแข็งตัวอาจทำให้เศษซากของแข็งสามารถแพร่กระจาย (Spread) และย้ายตำแหน่ง (Relocate) ไปอยู่ในที่อ่างที่ด้านล่างได้ (Lower vessel plenum)

วัสดุที่หลอมละลายอาจตกลงสู่น้ำด้านล่าง (Water pool) ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะเทอร์โมไฮดรอลิกนำไปสู่การเกิดอันตรายกิริยาของการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) คอเรียม (Corium) ที่เกิดขึ้นจากการหลอมละลายเป็นวัสดุที่เหมือนกับลาวานี้ อาจแข็งตัวคราวได้น้ำก่อนจะหลอมละลายอีกครั้ง ในระยะเวลาที่ยาวนั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ท่อด้านบนของแกนปฏิกรณ์ โดยเป็นผลกระทบจากความร้อนหรือทางเชิงกล การระเบิดด้วยไอน้ำมีผลทำให้ท่อปฏิกรณ์เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง

ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการเกิดอุบัติเหตุในถังบรรจุ แกนปฏิกรณ์จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความปลอดภัยของอุบัติเหตุระดับรุนแรง (Severe accident) ซึ่งเป็นขอบเขตเบื้องต้นในการประเมินความเป็นไปได้ในการจำกัดผลกระทบจากอุบัติเหตุ ภายในถังแรงดัน (Reactor pressure vessel) หรือเพื่อเป็นขอบเขตสำหรับการพิจารณาความเสียหายของท่อและความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Containment) ของ ส่วนประกอบแกนปฏิกรณ์ อาจเป็นภัยต่อตัวกักเก็บได้ การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) นั้น ไม่สามารถจำลองขั้นตอนการเกิดอุบัติเหตุในช่วงปลาย (Late phase) ของการทดลองได้ เนื่องจากมี ข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัดในการทดลอง

### 2.2.7 ช่วงเติมน้ำหรือดับความร้อน (Refill/Quench) [6],[7]

การฉีดน้ำ (Injection of water) จากระบบอุปกรณ์ต่างๆในการรักษาความปลอดภัยหรือ การดำเนินการของผู้ปฏิบัติงานมีผลกระทบที่สำคัญต่อกระบวนการหลอมละลายแกนปฏิกรณ์ ความ ร้อนที่ลดลงอย่างรวดเร็วอาจนำไปสู่การแตกหักหรือเกิดรอยแตกของพื้นผิวบริเวณปลอกเชื้อเพลิงและ อาจส่งผลต่อการขึ้นรูปใหม่ของพื้นผิวที่สัมผัสกับโลหะ การเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้น ของการเกิดออกซิเดชันของเซอร์คาลอย ระหว่างไอน้ำกับโลหะที่เกิดการขึ้นรูปใหม่และทำให้เกิดการ ย้ายตำแหน่งตามมาทำให้อุณหภูมิและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 2.2.8 การปล่อยผลผลิตฟิชชัน (Fission product release) [6],[7]

การประเมินอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่ถูกต้องมีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของ ผลิตรกัณฑ์ฟิชชัน แบบจำลองส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันของอุณหภูมิในการหาอัตราการปล่อย (Release rate) ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของก๊าซฟิชชันและการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเชื้อเพลิง การปล่อยผลิตรกัณฑ์ฟิชชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเพิ่ม ความร้อน (Heat-up phase) จะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นการเกิดออกซิเดชันของเชื้อเพลิง และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Mobility) การกลายเป็นของเหลว ของเชื้อเพลิง (Fuel liquefaction) โดยเซอร์คาลอยที่หลอมละลายมีผลต่ออัตราการปล่อยผลิตรกัณฑ์ ฟิชชันโดยการแพร่กระจายที่ของเหลวแพร่เร็วกว่าของแข็ง ละออง (Aerosol) จะปล่อยออกมาโดย

เกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุที่จุดหลอมเหลวต่ำกับเชื้อเพลิงเซรามิกที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง

### 2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage Test

การทดลอง Severe Fuel Damage (SFD) เป็นการทดลองที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงโดยเกิดจากความเสียหายของเชื้อเพลิงและเป็นการทดลองที่ทำให้เกิดการระเบิดต่อทั้งโรงไฟฟ้าได้ (Power Burst Facility, PBF) [6]

การทดลอง SFD มีการทดลองทั้งหมดสี่การทดลอง แต่ละการทดลองจะแตกต่างกันในเรื่องของการจัดเรียงเชื้อเพลิงและกระบวนการลดอุณหภูมิในช่วงปลายของการทดลอง (Cooldown procedure) ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2 การทดลอง Severe Fuel Damage Scoping Test (SFD-ST) [6] เป็นการทดลองแรกของการทดลองทั้งหมดของการทดลอง SFD โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นฐานข้อมูลเพื่อต่อยอดในการทดลองอื่นๆอีกต่อไป และอีกวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อเข้าใจและศึกษาในเรื่องของเทอร์โมไดนามิกของเชื้อเพลิงและการเกิดไฮโดรเจนระหว่างช่วงภาวะชั่วคราวของการทดลอง (Transient phase) และช่วงการเติมน้ำ (Reflood phase) แต่การใช้เชื้อเพลิงยังไม่เหมือนกับโมเดลในเครื่องปฏิกรณ์จริง จึงได้ทำการเปลี่ยนขอบเขตเงื่อนไขเพื่อศึกษาพฤติกรรมในแกนปฏิกรณ์มาจนถึงการทดลอง SFD 1-4 [9],[10] ที่ใช้เชื้อเพลิงและการจัดเรียงใกล้เคียงกับแกนปฏิกรณ์จริงมากที่สุด โดยในการจัดเรียงนั้น การทดลอง SFD-ST และการทดลอง SFD 1-1 [19] มีการจัดเรียงและจำนวนของแท่งเชื้อเพลิงที่เท่ากันคือใช้เชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด 32 แท่งแต่ต่างกันตรงกระบวนการลดอุณหภูมิกว่าคือ การทดลอง SFD-ST จะมีการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) และอัตราการไหลของน้ำขาเข้าจะเพิ่มขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์ แต่การทดลอง SFD 1-1 จะไม่มีการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แต่จะมีการลดกำลังและมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าเพื่อช่วยลดอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์ ส่วนการทดลอง SFD 1-3 [20] และ SFD 1-4 มีกระบวนการลดอุณหภูมิในช่วงปลายของการทดลองที่เหมือนกันคือกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกลดลงและมีกระบวนการลดอุณหภูมิโดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที แต่ของแตกต่างของสองการทดลองนี้คือการทดลอง SFD 1-4 จะมีแท่งควบคุม (Ag-In-Cd control rod)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการทดลอง SFD Test [6],[9],[10]

การทดลอง	การจัดเรียงของเชื้อเพลิง	กระบวนการลดอุณหภูมิ
SFD-ST	เชื้อเพลิงใหม่ 32 แท่ง	ใช้น้ำในการลดอุณหภูมิ โดยอัตราการไหลของน้ำที่เข้ามาลดอุณหภูมิเริ่มต้น 16 g/s และเมื่อเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์อัตราการไหลเพิ่มเป็น 30 g/s
SFD 1-1	เชื้อเพลิงใหม่ 32 แท่ง	ใช้การลดกำลังและใช้น้ำและอาร์กอนช่วยในการลดอุณหภูมิ โดยมีอัตราการไหล 17 g/s ใส่เข้าไปในระบบมากกว่า 20 นาที
SFD 1-3	เชื้อเพลิงใช้งานแล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง ท่อเซอร์คัลอย 4 ท่อ	มีการลดกำลังลงและมีการลดอุณหภูมิโดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที
SFD 1-4	เชื้อเพลิงใช้งานแล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง แท่งควบคุม 4 แท่ง (Ag-In-Cd)	มีการลดกำลังลงและมีการลดอุณหภูมิโดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

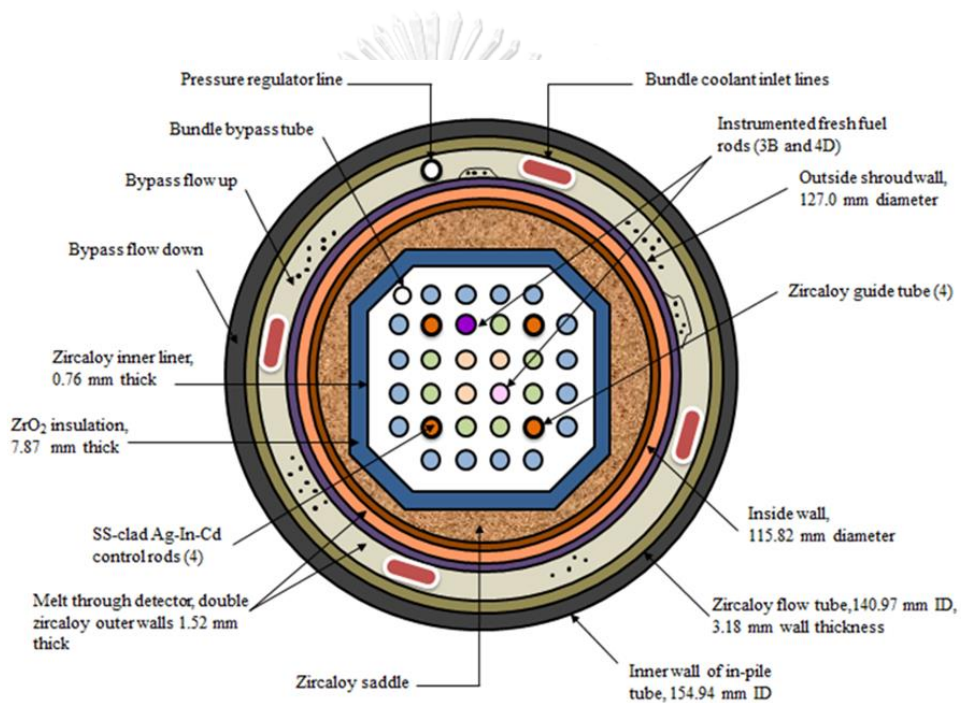
## 2.4 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 (SFD 1-4) [9],[10]

การทดลอง Severe Fuel Damage Test 1-4 (SFD 1-4) [3] เป็นหนึ่งในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ขั้นรุนแรง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 4 การทดลอง การทดลอง SFD 1-4 เป็นการทดลองลำดับที่ 4 ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาพฤติกรรมในแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ รวมถึงโครงสร้างของมัดเชื้อเพลิง จำลองอุณหภูมิในกรณีต่างๆที่สร้างความเสียหายให้แก่เชื้อเพลิง, ผลผลิตฟิชชันที่ถูกปลดปล่อยออกมา, การผลิตไฮโดรเจนและพฤติกรรมของแท่งเชื้อเพลิงควบคุมขณะเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหากับระบบน้ำหล่อเย็น ผลที่ได้จากการวัดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ Power Burst Facility แบบอื่นๆได้แก่ SFD-ST, SFD 1-1 และ SFD 1-3

การทดลอง SFD 1-4 ประกอบไปด้วยการจัดเรียงทั้งหมด 32 ตำแหน่ง ได้แก่ แท่งเชื้อเพลิง 28 แท่งและแท่งควบคุม Ag-In-Cd ซึ่งปลอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 4 ชุด ในท่อ Zircaloy guide tubes แท่งเชื้อเพลิง 26 แท่งเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว เสาใหม่ที่ 36,000 MWd/Mtu ส่วนอีก 2 แท่งเป็นแท่งเชื้อเพลิงใหม่ การวัดค่าต่างๆในการทดลองประกอบไปด้วย บริเวณผิวหน้าด้านในของปลอกหุ้มเชื้อเพลิง (Cladding), centerline เทอร์โมคัปเปิลของเชื้อเพลิง และ plenum pressure transducer 1 ใน 4 ของแท่งควบคุมสามารถวัดค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิล 3 ตัวที่อยู่บริเวณผิวหน้าด้านในของปลอกหุ้มเชื้อเพลิง (Cladding), centerline thermocouple และ pressure sensor สภาพการดำเนินงานระหว่างการทดสอบประกอบไปด้วยการ boildown และ dryout ของมัดเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์น้ำมวลเบาภายใต้สภาวะชั่วคราวและมีการปลดปล่อยความร้อนออกมา การทดสอบนี้ใช้อัตราการไหลของน้ำขาเข้าเท่ากับ 0.6 g/s ระหว่างการรั่วไหลของระบบหล่อเย็นขณะเกิดอุบัติเหตุ ก่อนเริ่มการทดสอบที่ระดับความสูงต่างๆ การทดสอบนี้ใช้ก๊าซอาร์กอนจำนวนหนึ่งไหลผ่านมัดเชื้อเพลิงเพื่อรักษาความดันในมัดเชื้อเพลิงไว้และเพื่อให้แน่ใจว่าการขนส่งก๊าซไฮโดรเจนและ fission products ในการทดสอบนี้มีความน่าเชื่อถือ กำหนดอัตราการให้ความร้อนที่ 0.4 K/s ถึง 1200 K และประมาณ 1.4 K/s จาก 1200 K ถึงประมาณ 1600 K ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มเกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว การออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเห็นได้ชัด การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนเข้าไป 1.4 K/s นี้เป็นการเพิ่มเข้าไปเพื่อให้สอดคล้องกับปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลอง ส่งผลให้ fuel bundle fission power เพิ่มขึ้นเป็น 30 kW และคงที่เป็นเวลา 224 วินาที จากปฏิกิริยาคายความร้อนของไอน้ำที่ปลอกหุ้มเชื้อเพลิงเซอร์คาลอย ความร้อนจากเชื้อเพลิงสูงขึ้นกว่า 1650 K อุณหภูมิเชื้อเพลิงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 1600 K เป็น 2400 K ในเวลาไม่ถึง 3 นาที ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงนั้นมากกว่า 2400 K หลังจากช่วงเวลา 224 วินาที กำลังในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงในอัตรา 0.05 kW/s และปิดตัวลงในที่สุด มัดเชื้อเพลิงที่แห้งแล้วถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆด้วยก๊าซอาร์กอนและจะถูกกำจัดออกไป และถูกแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน การทดลอง SFD 1-4 ได้มีการตรวจวัดค่าหลังจากการทดลองหลายครั้ง เพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของผลผลิตฟิชชันและการปลดปล่อยไฮโดรเจน การทดลองนี้ได้มีการสำรวจกัมมันตภาพรังสีและวัดค่า gamma spectral ของส่วนประกอบที่ได้เลือกไว้และนำตัวอย่างที่เก็บได้มาวิเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวอย่างของก๊าซในถัง และของเหลวอื่นๆ และ PBF loop coolant การวิเคราะห์นี้ได้ดำเนินการโดยเริ่มจากการเก็บตัวอย่างที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของชิ้นส่วนทดสอบต่างๆและวัดการสะสมตัว



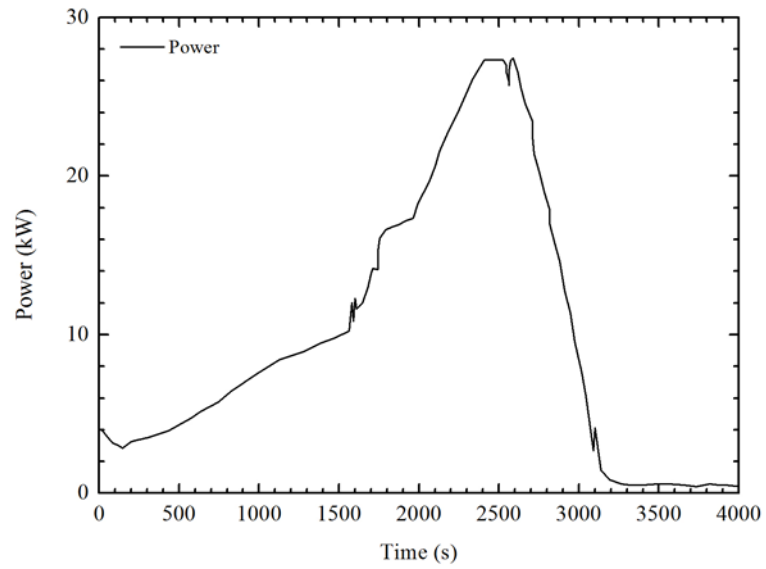
บริเวณผิวหน้าของแท่งเชื้อเพลิง และถูกดึงออกหลังจากที่ระบบทำการฉีดน้ำเข้าไป หลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างอีกบางส่วนเพื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคต่างๆมากมาย อาทิเช่น gamma-ray spectroscopy, radiochemistry, scanning electron microscopy, ion and electron microprobe analysis, inductively coupled plasma spectrometry, emission spectroscopy, Raman microprobe analysis, mass spectrometry, และ selective leaching จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ตัวอย่าง พบว่าสามารถสังเกตและสรุปผลที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยผลผลิตฟิชชัน, แท่งควบคุมและโครงสร้างในแกนปฏิกรณ์ในการทดลองได้



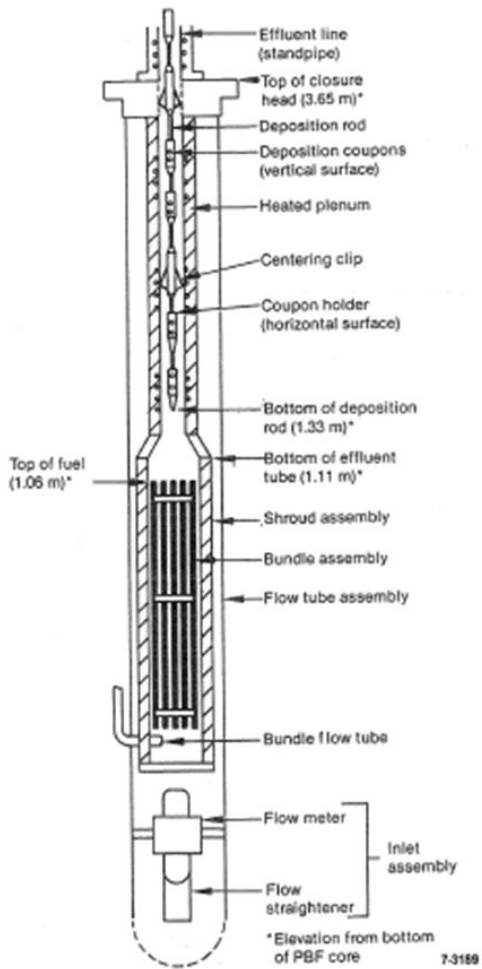
รูปที่ 6 แสดงรายละเอียด cross section ของมัดเชื้อเพลิงใน PBF SFD 1-4 [9],[10]

ตารางที่ 3 Boundary conditions of the bundle and the bypass region

Boundary condition	Inlet temperature (K)	Inlet mass flow rate (Kg/s)	Pressure (MPa)
Bundle	530	2.60	6.98
Bypass	530	2.60	8.00



รูปที่ 7 Bundle nuclear power [9],[10]



รูปที่ 8 Axial Diagram ของ SFD 1-4 [9],[10]

การศึกษาและทำความเข้าใจในเรื่องการทดลองการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงระดับรุนแรงในการทดลอง 1-4 (SFD 1-4) [9],[10] เริ่มทำการทดสอบที่ Idaho National Engineering Laboratory ในวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 (ปี ค.ศ.1985) การทดลอง SFD 1-4 เป็นการทดลองลำดับที่สี่ และเป็นลำดับสุดท้ายที่ทางผู้สนับสนุนงานวิจัยได้เลือกศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางด้านการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงในเครื่องปฏิกรณ์น้ำมวลเบา (Light Water Reactors) ซึ่งริเริ่มโดย U.S. Nuclear Regulatory Commission วัตถุประสงค์โดยรวมของการทดลองนี้คือเพื่อสร้างความเข้าใจในเรื่องเชื้อเพลิง, พฤติกรรมของแท่งควบคุม (control rod), ละอองลอย (aerosol), การผลิตไฮโดรเจน, การปลดปล่อยผลผลิตฟิชชัน (fission product) และการเคลื่อนที่ของสารขณะที่เกิดอุณหภูมิสูง และความเสียหายของเชื้อเพลิงขั้นรุนแรงในสภาวะชั่วคราวหรือสภาวะไม่คงตัว เพื่อพัฒนาข้อมูลพื้นฐานและพัฒนาตัวแบบจำลองให้สามารถทำนายผลของ (a) การตอบสนองทั้งหมดของแท่งเชื้อเพลิง แท่งควบคุม และ spacer grid (b) อัตราการเกิดไฮโดรเจนจากอันตรกิริยาระหว่างไอน้ำกับเชื้อเพลิง (c) อัตราการเกิดปฏิกิริยา ขนาด และรูปแบบทางเคมีของผลผลิตฟิชชันและละอองลอยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากแกนปฏิกรณ์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง นอกจากนี้ข้อมูลเหล่านี้ยังถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาด้านความปลอดภัยที่โดดเด่นของ NRC ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุในแกนปฏิกรณ์ขั้นรุนแรง

การทดลอง SFD 1-4 จะทดลองเกี่ยวกับมัดเชื้อเพลิงรวมไปถึงการจำลองปล่องลมด้านบนมัดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง ประกอบไปด้วย แท่งเชื้อเพลิง BR-3 ที่ใช้งานแล้ว ความยาว 1 เมตร จำนวน 26 แท่ง กำลังการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 36,000 megawatt-days per metric ton uranium แท่งเชื้อเพลิงใหม่จำนวน 2 แท่ง และแท่งควบคุมที่ทำจาก Ag-In-Cd จำนวน 4 แท่ง แท่งเชื้อเพลิงทั้งหมดจะมีฉนวนหุ้มที่ให้ไอน้ำระเหยออกไปได้ในอัตรา 0.6-1.3 g/s มีการใส่แก๊สอาร์กอนเข้าไปในมัดเชื้อเพลิงเพื่อทำให้เกิดความเสถียรของระบบความดันและตรวจสอบการเคลื่อนที่ของไฮโดรเจน ละอองลอยและผลผลิตฟิชชันจากมัดเชื้อเพลิง บริเวณปล่องลมด้านบนเหนือมัดเชื้อเพลิงแสดงถึงขอบเขตเส้นทางการไหลเพื่อการสูมตัวอย่างและการเผ้าสังเกตปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นในระบบ บางส่วนของปล่องลมด้านบนถูกให้ความร้อนและปล่อยออกมา มีการวัดอัตราการสะสมตัวกว่า 40 ชนิด เพื่อแสดงถึงลักษณะเฉพาะของผลผลิตฟิชชันและการสะสมตัวของละอองลอยบริเวณปล่องลมระหว่างการทดลอง ของเสียที่ถูกปล่อยออกมาทั้งหมดจากมัดเชื้อเพลิงทดลอง ประกอบด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ไฮโดรเจน ผลผลิตฟิชชัน และละอองลอยจะผ่านไปที่ปล่องลมด้านบนเพื่อการสูมตัวอย่างและการเผ้าสังเกตปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งใช้เครื่องมือที่หลากหลายในการทดสอบ ความเข้มข้นของ isotopic fission product ในของเสียที่ถูกปล่อยทิ้งได้มาจากการวัดออนไลน์ของแกมมาเรย์สเปคโตรมิเตอร์ ขณะเกิดการปลดปล่อยผลผลิตฟิชชันซึ่งจะถูกวัดโดยอาร์เรย์ของการตรวจสอบรังสีขั้นต้น ปริมาณความเข้มข้นของละอองลอยในของเสียที่ถูกปล่อยออกมาสามารถ

ดูได้จากการใช้เครื่องวัดความขุ่นของสารละลาย (turbidity meter) ความเข้มข้นของไฮโดรเจน เครื่องมือวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน การทดลองนี้มีการเก็บตัวอย่างที่หลากหลาย ได้แก่ ใอน้ำเสีย ที่ถูกปล่อยออกมาและตัวอย่างของเหลว ตัวอย่างถังเก็บ(collection tank sample) การวัดการสะสมตัว (deposition coupons) และของเสียที่ถูกปล่อยออกมาต่างๆ

การทดลองทำในช่วงสภาวะชั่วขณะ ใช้ระยะเวลา 1.3 ชั่วโมง โดยจำลองการทดลองให้มีลักษณะการเกิดอุบัติเหตุแบบท่อเกิดการรั่วไหลขนาดเล็ก (small break) เกิดอุบัติเหตุจากการสูญเสียระบบหล่อเย็นโดยปราศจากการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์แบบฉุกเฉิน (emergency core cooling) ในแกนปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง (PWR) มัดเชื้อเพลิงหลอมละลาย แห่ง เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น แห่งควบคุมเกิดการหลอมละลาย เกิดการแตกของปลอกหุ้มเชื้อเพลิง (cladding rupture) การเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเมื่อ fission power ที่มัดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเป็น 27 กิโลวัตต์ fission power ที่มัดเชื้อเพลิงคงที่ที่ 27 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 223 วินาที อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เซอร์คาลอยหลอมละลาย เชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (Fuel Liquefaction) เกิดการย้ายตำแหน่งของวัสดุ และเกิดอันตรกิริยาพร้อมด้วยไฮโดรเจน ละอองลอยและเกิดการปลดปล่อยผลผลิตฟิชชัน มัดเชื้อเพลิงในการทดลอง SFD 1-4 นี้ถูกระบายความร้อนอย่างช้าๆโดยการลดกำลังลงและเพิ่มอาร์กอนเข้าไปในมัดเชื้อเพลิง มัดเชื้อเพลิงและปล่องลมด้านบนจะถูกเก็บแบบแห้งที่สภาพแวดล้อมแบบเฉื่อย (inert environment) จนกระทั่งเชื้อเพลิงทดสอบนี้จะถูกเคลื่อนย้ายออกไป ซึ่งพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกสรุปไว้ในทอมของปรากฏการณ์การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง

การอธิบายและการประเมินการเกิดปรากฏการณ์หลักๆที่ถูกลำเสนอในงานวิจัยครั้งนี้ ขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากการวัดของเครื่องมือวัดที่ถูกติดตั้งไว้ในการทดลอง การวิเคราะห์ผลผลิตฟิชชัน และข้อมูลเรื่องละอองลอย การทดสอบผลหลังจากการแผ่รังสีที่มัดเชื้อเพลิงและการคำนวณโดยใช้โค้ดจาก SCDAP/RELAP5

## 2.5 การประเมินและการศึกษาการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่นๆ [6]

การประเมินและการศึกษาการทดลอง PBF SFD นี้เป็นการประเมินเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายผลการทดลองของแต่ละโปรแกรม ว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริงหรือไม่ หากมีข้อผิดพลาดควรปรับปรุงในส่วนใดของโปรแกรม จำเป็นต้องแก้ไขโมเดลในเรื่องใด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมจำลองในอนาคต

#### ตารางที่ 4 การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่นๆ [6]

โปรแกรม	PBF SFD-ST	PBF SFD 1-1	PBF SFD 1-3	PBF SFD 1-4
ATHLET-CD		√		
ICARE	√			√
KESS				√
MELCOR		√		√
SCDAP	√	√		
SCDAP/RELAP5	√		√	√

### 2.6 โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง [6]

ปัจจุบันมีการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ผลหลากหลายโปรแกรมในการวิเคราะห์และคำนวณผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ เช่นคำนวณเกี่ยวกับการทำงานและการเปลี่ยนของเชื้อเพลิง คำนวณเกี่ยวกับการเกิดความเสียหายในแกนปฏิกรณ์ หรือคำนวณเกี่ยวกับอุบัติเหตุอย่างรุนแรง เป็นต้น

#### 2.6.1 ตัวอย่างโค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง [6]

เนื่องจากโค้ดคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณผลมีอยู่ด้วยกันหลายโปรแกรม ยกตัวอย่างเช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) ได้ใช้โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองและประเมินพฤติกรรมของเชื้อเพลิง ปฏิริยาทางจลนศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ขอบเขตเงื่อนไขของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิก การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงเวลาที่ใช้ในการกระจายสารรังสีในการเกิดอุบัติเหตุจากการออกแบบ การเตรียมพร้อมและการตอบสนองต่อภาวะฉุกเฉิน ผลกระทบต่อสุขภาพ และขนส่งสารกัมมันตรังสี ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานต่าง ๆ และอุบัติเหตุระดับรุนแรง ผลลัพธ์จากการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ช่วยในการตัดสินใจสำหรับกิจกรรมที่มีความเสี่ยงและช่วยการแก้ปัญหาด้านเทคนิคอื่น ๆ การพัฒนาโค้ดมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความสมจริงและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์โค้ดและทำให้โค้ดง่ายต่อการแก้ไขโดยแบ่งโค้ดออกเป็น 7 ประเภทดังนี้

### 2.6.1.1 โค้ดของการประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic risk assessment)

Probabilistic Risk Assessment (PRA) [6] เป็นการประเมินความเสี่ยงด้วยการคำนวณตัวเลขจริงเพื่อพิจารณาความน่าจะเป็นว่าจะเกิดความเป็นไปได้อย่างไรขึ้นบ้าง และผลที่ตามมาเป็นอย่างไร ดังนั้น PRA จึงสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับจุดแข็งและจุดอ่อนของการออกแบบและการทำงานของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ โดย PRA สามารถประเมินความเสี่ยงได้ 3 ระดับ คือ

ระดับ 1 ประเมินความถี่ของอุบัติเหตุที่เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือที่เรียกว่า core damage frequency (CDF)

ระดับ 2 ซึ่งเริ่มต้นมาจากระดับ 1 เมื่อแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์เกิดความเสียหาย ระดับที่ 2 นี้จะประเมินความน่าจะเป็นของความเสี่ยงในการปล่อยสารกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ระดับ 3 ซึ่งเริ่มต้นด้วยอุบัติเหตุการปล่อยกัมมันตรังสีระดับ 2 ระดับนี้จะประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นในแง่ของการบาดเจ็บและความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.6.1.2 โค้ดของพฤติกรรมของเชื้อเพลิง (Fuel behavior) [6]

ใช้ในการประเมินพฤติกรรมของเชื้อเพลิงภายใต้สภาวะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ต่างโปรแกรมที่นิยมใช้คือโปรแกรม FRAPCON-3 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพการทำงานของแต่ละเชื้อเพลิงเดี่ยวภายใต้สภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบปกติ และ โปรแกรม FRAPTRAN เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์อุบัติเหตุและการเกิดอุบัติเหตุของแต่ละเชื้อเพลิงเฉพาะภายใต้สภาวะการทำงานปกติของเครื่องปฏิกรณ์

### 2.6.1.3 โค้ดของจลนศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor kinetics) [6]

โค้ดของจลนศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor kinetics) ใช้เพื่อหาค่าการกระจายตัวของนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โปรแกรมหนึ่งที่ใช้คือโปรแกรม PARCS ย่อมาจาก Purdue Advanced Reactor Core Simulator โปรแกรมนี้สามารถแก้สมการการแพร่ของนิวตรอนแบบสองกลุ่มที่ขึ้นกับเวลาได้โดยแกนปฏิกรณ์เป็นแบบคาร์ทีเซียนสามมิติ โปรแกรมนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเกิดอุบัติเหตุที่เกิดจากปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา

#### 2.6.1.4 โค้ดของเทอร์มัลไฮดรอลิก (Thermal-hydraulic) [6]

ใช้เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียอุบัติเหตุจากน้ำหล่อเย็น (LOCAs) การจำลองด้วยโค้ดนี้จะช่วยสร้างพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับการออกแบบการใช้งานและความปลอดภัยของโรงไฟฟ้า โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ โปรแกรม TRAC เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อรวมและขยายขีดความสามารถของความปลอดภัย 3 หลักของ USNRC ได้แก่ TRAC-P, TRAC-B และ RELAP

#### 2.6.1.5 โค้ดของอุบัติเหตุระดับรุนแรง (Severe accident) [6]

ใช้ในการจำลองความก้าวหน้าของการเกิดอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม MELCOR และ MACCS เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์อุบัติเหตุอย่างรุนแรงโดยใช้โมเดลพารามิเตอร์ที่มีลักษณะพิเศษทำให้อาจจะเกิดความซับซ้อนในการใช้และบวกกับโปรแกรมนี้ใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็วซึ่งอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ โปรแกรม SCDAP/RELAP5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองอุบัติเหตุระดับรุนแรง โดยใช้โมเดลที่ใช้ข้อมูลเชิงกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ผล โปรแกรม CONTAIN เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในอาคารปฏิกรณ์ โปรแกรม IFCI เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเกิดอันตรายกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและน้ำสารหล่อเย็น และโปรแกรม VICTORIA เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ผลของการการขนส่งและการรั่วไหลที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี

#### 2.6.1.6 โค้ดของการป้องกันเชิงสารกัมมันตรังสี (Radionuclide) [6]

ใช้เพื่อวิเคราะห์และพัฒนาคอมพิวเตอร์โค้ดของการป้องกันรังสี โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม RADTRAD ใช้ชุดของตารางและแบบจำลองเชิงตัวเลขของปรากฏการณ์เพื่อกำหนดปริมาณโดสที่ขึ้นอยู่กับเวลาในสถานที่ที่กำหนดไว้สำหรับสถานการณ์ที่กำหนด และยังสามารถนำมาใช้เพื่อประเมินความเสี่ยงจากรังสีในงานโดยทั่วไปอยู่ในห้องควบคุมได้ และโปรแกรม RASCAL ใช้ประเมินการปลดปล่อยสารต่าง ๆ จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และประเมินปริมาณรังสีอย่างเป็นอิสระในระหว่างการตอบสนองต่อภาวะฉุกเฉินทางรังสีวิทยา

### 2.6.1.7 โค้ดของการขนส่งและการรื้อถอนของสารกัมมันตรังสี (Radionuclide transport) [6]

ใช้วิเคราะห์ปริมาณในการสนับสนุนการยกเลิกใบอนุญาตและการรื้อถอนอุปกรณ์ โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม Probabilistic RESRAD 6.0 และ RESRAD-BUILD 3.0 ใช้กับงานด้านกฎระเบียบของ USNRC สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณความน่าจะเป็นเพื่อแสดงให้เห็นถึงการปฏิบัติตามข้อกำหนดของ USNRC

เนื่องจากผู้จัดทำได้ศึกษางานวิจัยจากการทดลองความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง ดังนั้นต้องเลือกใช้โค้ดของการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงและผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ในการเข้าถึงโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ผู้จัดทำได้เลือกใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล

## 2.7 ข้อมูลเบื้องต้นและการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

### 2.7.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นักพัฒนาโปรแกรมของ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) ได้ทำการออกแบบและพัฒนา Code มาเพื่อใช้กับเครื่องปฏิกรณ์น้ำมวลเบา (Light Water Reactor) โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เป็นเวอร์ชันที่มีผู้ใช้งานจำนวนมากในการศึกษาเกี่ยวกับความปลอดภัยในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [6],[11] RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถรันโปรแกรมได้รวดเร็วและน่าเชื่อถือมากกว่ารุ่นเดิม และเป็นรุ่นแรกที่สามารถทำงานได้เร็วกว่าเวลาจริง เวอร์ชันนี้ยังใช้สำหรับช่วยงานทางด้านการวิจัยในการศึกษาพฤติกรรมในแกนปฏิกรณ์และพัฒนากำลองความน่าจะเป็นของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าได้ [13] ใช้ในการฝึกอบรมสำหรับผู้ใช้งานทั่วไปที่ต้องการศึกษาในเรื่องแอปพลิเคชันที่ใช้ในการจำลอง (โดยปกติจะใช้ร่วมกับ RELSIM) สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุระดับรุนแรง RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ใช้ในการคำนวณผลร่วมกับ LOFT, PBF, TMI-2, CORA และการทดลอง TH/SA อื่นๆ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับ SCDAP/RELAP MOD1, SCDAP/RELAP MOD3.2 และ SCDAP/RELAP MOD3.3 การปรับปรุงโมเดลใหม่ทำให้โปรแกรมมีการคำนวณผลที่เร็วและเชื่อถือได้มากขึ้น RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถทำงานได้หลากหลายมากขึ้น [13] สามารถทำงานในช่วงที่เกิด



ความดันต่ำในระบบภายใต้สภาวะชั่วคราวซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซที่ไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) เช่นกรณีที่เกิดขึ้นที่ midloop ในระหว่างการดำเนินงานในเครื่องปฏิกรณ์ ประเภทน้ำมวลเบา (LWR) หรือในสถานที่เก็บเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว RELAP/SCDAPSIM ได้รับการออกแบบเพื่อนำมาใช้ในการตอบสนองของระบบทำความเย็น (RCS) และพฤติกรรมในแกนปฏิกรณ์ ภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง โปรแกรมนี้ได้รับการปรับปรุงโมเดลใหม่สำหรับการแสดงผลกราฟิกแบบสามมิติ พฤติกรรมของเชื้อเพลิง การขนส่งและการสะสมตัวของ สารกัมมันตรังสีและผลผลิตฟิชชัน การเก็บรักษาของเหลวในท่อและการอินทิเกรต RELAP/SCDAPSIM ยังประกอบไปด้วยรายละเอียดของแท่งเชื้อเพลิงและการปรับปรุงรูปแบบของ อุบัติเหตุระดับรุนแรงและคุณสมบัติพิเศษต่างๆ RELAP/SCDAPSIM ใช้ US NRC thermal hydraulic และโมเดลการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงจาก SCDAP/RELAP MOD3.3 และ SCDAP/RELAP MOD3.2 ร่วมกับ code และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูงในการพัฒนาโมเดลให้ดีขึ้น โดย Innovative Systems Software (ISS) และสมาชิกคนอื่นๆ ในโครงการได้ร่วมกันพัฒนา โปรแกรมให้มีความสามารถในการคำนวณผลที่ดีขึ้น

#### 2.7.1.1 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถวิเคราะห์และคำนวณถึงความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง โดยดัชนีความเสียหายแสดงในตารางที่ 5 ดัชนีความเสียหาย 0.0 คือยังไม่มีเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเปรียบได้กับดัชนีความเสียหายที่ 1 ดัชนีความเสียหาย 0.1 คือเกิดการแตกของปลอกเชื้อเพลิงเนื่องจากการพองตัวเปรียบได้กับดัชนีความเสียหายที่ 2 ดัชนีความเสียหาย 0.2 เชื้อเพลิงเกิดการแตกร้าว มีการหลอมเหลวที่ปลอกเชื้อเพลิงและเกิดการแทนที่ของของเหลวเซอร์โคเนียมเปรียบได้กับดัชนีความเสียหายที่ 3 ดัชนีความเสียหาย 0.4 คือเกิดการหลอมเหลวของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง เป็นการเกิดการหลอมเหลวบางส่วน มีการย้ายตำแหน่งของวัสดุซึ่งทำให้เกิดการอุดตันของทางไอน้ำ เปรียบได้กับดัชนีความเสียหายที่ 4 และดัชนีความเสียหาย 1.0 คือเกิดการแตกของส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เกิดของเหลวที่หลอมเหลวไหลออกจากปลอกเชื้อเพลิง ส่วนนี้เกิดการหลอมเหลวทั้งหมดเปรียบได้กับดัชนีความเสียหายที่ 5

## ตารางที่ 5 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

ดัชนีความเสียหาย	ลักษณะการเกิดความเสียหาย
0.0	Intact geometry
0.1	Rupture due to ballooning
0.2	Rubble (fragmented)
0.4	Cohesive debris
1.0	Molten pool

### 2.7.2 แบบจำลองและโมเดลที่ใช้ในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM

ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เป็นการนำเอาข้อดีของโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2 และ MOD3.3 ที่ได้พัฒนาไว้มารวมไว้ด้วยกัน ซึ่งโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้ปรับปรุงและแก้ไขโมเดลต่างๆ เพื่อให้มีความสามารถในการคำนวณผลมากขึ้น จะเห็นได้ว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีสมการการคำนวณที่คล้ายกันกับโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 โดยโปรแกรมนี้แบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนคือโมเดลของ RELAP5 และโมเดลของ SCDAP

#### 2.7.2.1 โมเดลของ RELAP [6]

##### ตารางที่ 6 โมเดลของ RELAP และชุดสมการ [6],[12]

โมเดล	ชุดสมการ
Hydrodynamic model: เป็นโมเดลแบบจำลองแบบหนึ่งมิติสำหรับการไหลของของผสม (Mixture) ผสมระหว่างไอน้ำและน้ำ โมเดลนี้ประกอบด้วยตัวเลือกหลากหลายสำหรับการอ้างอิงโมเดลพื้นฐานของไฮโดรไดนามิก และยังรวมถึงโมเดลการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และโมเดลการไหลที่มีแรงเสียดทาน ตัวเลือกนี้	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Field equations</li> <li>● Basic differential equations</li> <li>● Numerically convenient set of differential equations</li> <li>● Semi-implicit scheme differential equations</li> <li>● Time advancement for the semi-implicit scheme</li> </ul>

โมเดล	ชุดสมการ
<p>สามารถเลือกใช้งานได้ตามที่เราต้องการ</p> <p>โมเดล Homogeneous และโมเดลดุลยภาพ (Equilibrium) ถูกรวมไว้เป็นโมเดลหลักเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของโค้ดกับการคำนวณจากโค้ดเก่าที่อิงจากรูปแบบโมเดลเดียวกัน</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Difference equations and time advancement for the nearly-implicit scheme</li> <li>● Volume-average velocities</li> <li>● Implicit hydrodynamic and heat structure coupling</li> <li>● Numerical solution of boron transport equation</li> <li>- State relationships <ul style="list-style-type: none"> <li>● State equations</li> <li>● Single-component, two-phase mixture</li> <li>● Component, two-phase mixture</li> </ul> </li> <li>- Constitutive models <ul style="list-style-type: none"> <li>● Vertical volume flow regime map</li> <li>● Horizontal volume flow regime map</li> <li>● High mixing volume flow regime map</li> <li>● ECC mixer volume flow regime map</li> <li>● Junction flow regime map</li> <li>● Interphase friction</li> <li>● Coefficient of virtual mass</li> <li>● Wall friction</li> <li>● Wall heat transfer models</li> <li>● Wall heat transfer correlations</li> <li>● Interphase mass transfer</li> <li>● Direct heating</li> </ul> </li> <li>- Special process models</li> </ul>

โมเดล	ชุดสมการ
	<ul style="list-style-type: none"><li>● Choked flow</li><li>● Horizontal stratification     entrainment/pullthrough model</li><li>● Abrupt area change</li><li>● User-specified form loss</li><li>● Crossflow junction</li><li>● Water packing mitigation scheme</li><li>● Countercurrent flow limitation model</li> <li>● Mixture level tracking model</li><li>● Thermal stratification model</li><li>● Energy conservation at an abrupt     change</li><li>● Jet junction model</li></ul>
	- Component models <ul style="list-style-type: none"><li>● Branch</li><li>● Separator</li><li>● Jet mixer</li><li>● Pump</li><li>● Turbine</li><li>● Valves</li><li>● Accumulator</li><li>● ECC Mixer</li><li>● Annulus</li></ul>

### สมการสำคัญของ Hydrodynamic model

Mass continuity equations

For liquid phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f v_f A) = \Gamma_f$$

Where;

$\alpha_f$  = liquid void fraction

$\rho_f$  = liquid density (kg/m<sup>3</sup>)

$v_f$  = liquid velocity (m/s)

$A$  = cross-sectional area (m<sup>2</sup>)

$\Gamma_f$  = liquid mass transfer (kg/m<sup>3</sup>s)

For vapor phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g v_g A) = \Gamma_g$$

Where;

$\alpha_g$  = vapor void fraction

$\rho_g$  = vapor density (kg/m<sup>3</sup>)

$v_g$  = vapor velocity (m/s)

$A$  = cross-sectional area (m<sup>2</sup>)

$\Gamma_g$  = vapor mass transfer (kg/m<sup>3</sup>s)

### ตารางที่ 7 โมเดลโครงสร้างความร้อนและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 [6]

โมเดล	ชุดสมการ
Heat structure model: เป็นโมเดลที่ความร้อนที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของของแข็งของปริมาตรไฮโดรไดนามิกความสามารถของโมเดลนี้คือคำนวณเกี่ยวกับโครงสร้างความร้อน (Heat structure) ทั่วไปและรวมถึงคำนวณเกี่ยวกับหมุดหรือแผ่นเชื่อมต่อเพลิงที่มีความ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heat conduction numerical techniques</li> <li>- Mesh point and thermal property layout</li> <li>- Difference approximation at internal mesh points</li> <li>- Difference approximation at boundaries</li> <li>- Thermal properties and boundary condition parameters</li> </ul>

โมเดล	ชุดสมการ
<p>ร้อน, การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อไอน้ำ, และการถ่ายเทความร้อนจากท่อและผนัง</p> <p>โครงสร้างความร้อนถูกสมมติฐานว่าเป็น</p> <p>การนำความร้อนแบบหนึ่งมิติในรูปทรง</p> <p>สี่เหลี่ยม, ทรงกระบอก, หรือทรงกลม</p> <p>Surface multiplier จะถูกใช้ในการ</p> <p>แปลงพื้นผิวแบบหนึ่งมิติไปเป็นพื้นผิวที่</p> <p>แท้จริงของโครงสร้างความร้อน</p> <p>ความสามารถในการนำความร้อนขึ้นอยู่กับ</p> <p>กับอุณหภูมิและความจุปริมาตรความร้อน</p> <p>มาซึ่งถูกจัดให้อยู่ในรูปตารางหรือรูปการ</p> <p>ทำงานทั้งจากข้อมูลที่มีอยู่ภายในหรือผู้ใช้</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● RELAP5 specific boundary conditions</li> <li>● Correlation package conditions</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Insulated and tabular boundary conditions</li> <li>- Solution of simultaneous equations</li> <li>- Computation of heat fluxes</li> <li>- Two-dimensional conduction solution or reflood</li> <li>- Fine mesh rezoning scheme</li> <li>- Gap conductance model</li> <li>- Surface-to-surface radiation model</li> <li>- Metal-water reaction model</li> <li>- Cladding deformation model</li> </ul>

### สมการสำคัญของ Heat structure model

Integral form of heat conduction

$$\iiint_V \rho(T, \bar{x}) \frac{\partial T}{\partial t}(\bar{x}, t) dV = \iint_s k(T, \bar{x}) \nabla T(\bar{x}, t) \cdot d\bar{s} + \iiint_V S(\bar{x}, t) dV$$

Where;

k = thermal conductivity

s = surface

S = internal heat source

t = time

T = temperature

V = volume

x = space coordinates

$\rho$  = volumetric heat capacity

ตารางที่ 8 โมเดลพลังงานจลน์ของเครื่องปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 [6]

โมเดล	ชุดสมการ
Point reactor kinetic model: เป็นโมเดลที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	- Point reactor kinetics equations - Fission product decay model
ใช้กำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	- Actinide decay model
โมเดลนี้คำนวณทั้งพลังงานฟิชชันและพลังงานจากการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน	- Transformation of equations for solution - Initialization
พลังงานที่เพิ่มขึ้นทันทีคือเวลาที่เกิดการแยกตัวและรวมถึงพลังงานจลน์ของผลิตภัณฑ์ฟิชชันและการหน่วงนิวตรอน	- Reactivity feedback - Separable feedback model - Tabular feedback model - Reactor kinetics numerical procedures

### สมการสำคัญของ Point reactor kinetic model

Point kinetics equations

$$\frac{d}{dt} \varphi(t) = \frac{[\rho(t) - \beta]}{\Lambda} \varphi(t) + \sum_{i=1}^{N_d} \lambda_i C_i(t) + SS$$

$$\frac{d}{dt} C_i(t) = \frac{\beta f_i}{\Lambda} \varphi(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i=1, 2, \dots, N_d$$

$$\psi(t) = \Sigma_f \varphi(t)$$

$$P_f(t) = Q_f \psi(t)$$

Where;

$t$  = time

$\varphi$  = neutron flux

$C_i$  = number of delayed neutron precursors of group  $i$

$\beta$  = effective delayed neutron fraction

$\Lambda$  = prompt neutron generation time

$\rho$  = reactivity

$f_i$  = fraction of delayed neutrons of group  $i$

$\lambda_i$  = decay constant of group  $i$

$S$  = source

$\psi$  = fission rate in #/s

$\Sigma_f$  = macroscopic fission cross-section

$P_f$  = immediate fission power in MeV/s

$Q_f$  = immediate fission energy per fission in MeV

### 2.7.2.2 โมเดลของ SCDAP [6],[11]

ส่วนการคำนวณของ SCDAP เป็นการคำนวณเกี่ยวกับการคำนวณพฤติกรรมของโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ในสภาพการณ์ปกติและอุบัติเหตุ ตารางที่ 9 ถึง 11 ได้สรุปโมเดลและตัวอย่างสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของ SCDAP โดยมีโมเดลการนำความร้อนของแกนปฏิกรณ์ (Heat conduction model for core component), โมเดลการเกิดออกซิเดชันของวัสดุ (Material oxidation model) และโมเดลแท่งเชื้อเพลิง (Fuel rod model)

### ตารางที่ 9 โมเดลการนำความร้อนของแกนปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP [6],[13]

โมเดล	ชุดสมการ
Heat conduction model for core component: เป็นโมเดลที่อธิบาย	- Two-dimensional heat conduction governing equation
เกี่ยวกับการนำความร้อนและวิธีการ	- Finite difference
คำนวณผลการตอบสนองของอุณหภูมิ	- The alternating direction method
ของแท่งเชื้อเพลิง, แท่งควบคุม (Ag-In-	- Matrix method
Cd และ B <sub>4</sub> C) และปลอกเชื้อเพลิง	- OECR algorithm
	- Volume Averaging
	- Temperatures jump due to contact with slumped material



### สมการสำคัญของ Heat conduction model

Heat conduction equations

$$\int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_V \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) dV + \int_V \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V Q_V dV + \int_S Q_S dS$$

ซึ่ง

$Q_V$  = volumetric heat source ( $W/m^3$ )

$Q_S$  = surface heat flux ( $W/m^2$ ),

$T$  = temperature at location (K)

$\rho c_p$  = volumetric heat capacitance ( $J/m^3K$ )

ตารางที่ 10 โมเดลการเกิดออกซิเดชันของวัสดุและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP [6],[12],[13]

โมเดล	ชุดสมการ
Material oxidation model: เป็นโมเดลที่คำนวณเพื่อประเมินค่าการเกิดความร้อนและการเกิดไฮโดรเจนเนื่องจากส่งผลต่อการเกิดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ โมเดลนี้จะคำนวณเกี่ยวกับการเกิดออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิงและคำนวณการเกิดความร้อนที่ทำให้เกิดออกซิเจนและไฮโดรเจนของปลอกเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integral diffusion model               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Oxygen diffusion</li> <li>● Hydrogen uptake in cladding</li> <li>● Cladding embrittlement and hydrogen release</li> </ul> </li> <li>- Approximations to modeling of oxidation during meltdown and reflood               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Effect on oxidation of melting of cladding and dissolution of <math>UO_2</math></li> <li>● Effect of slumping of cladding on oxidation</li> <li>● Effect of reflood on oxidation</li> <li>● Effect of cladding rupture on oxidation</li> </ul> </li> <li>- Parabolic kinetic model for oxidation of control rods</li> </ul>

### สมการสำคัญของ Material oxidation model

Heatup due to hydrogen uptake

$$\dot{Q}_H = -2\pi r_o \xi_o \rho_M \Delta H_{HSI} (C_{H2} - C_{H1}) / \Delta t$$

Where;

$\dot{Q}_H$  = rate of heat generation at an axial node due to uptake of hydrogen  
(W/m)

$r_o$  = radius of external surface of cladding (m)

$\Delta z$  = height of axial node (m)

$\rho_M$  = molar density of Zr in zircaloy (kg·mole/m<sup>3</sup>)

$\xi_o$  = as-fabricated thickness of cladding (m)

$\Delta H_{HSI}$  = enthalpy of solution in SI units (J/(kg·mole))

$C_{H2}$  = H/Zr ratio in cladding at end of time step

$C_{H1}$  = H/Zr ratio in cladding at start of time step

$\Delta t$  = time step (s)

Oxidation driven release of hydrogen

$$W_{hroi} = 2\pi r_o \Delta z (\xi_1 - \xi_2) C_H \rho_m$$

Where;

$W_{hroi}$  = kg-mol of hydrogen released to bulk coolant at axial node i

$r_o$  = outer radius of cladding at axial node i (m)

$\Delta z$  = height of axial node i (m)

$\xi_1$  = thickness of metallic layer of cladding at axial node i at start of time step (m)

$\xi_2$  = thickness of metallic layer of cladding at axial node i at end of time step (m)

$C_H$  = Fractional hydrogen concentration at start of time step at axial node i (H/Zr ratio)

$\rho_m$  = Zr in Zircaloy (70.5 kg-mol/m<sup>3</sup>)

ตารางที่ 11 โมเดลแท่งเชื้อเพลิงและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP [6]

โมเดล	ชุดสมการ
<p>Fuel rod models: เป็นโมเดลที่คำนวณเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแท่งเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อแท่งเชื้อเพลิงโดยตรง อีกทั้งยังคำนวณเกี่ยวกับการเกิดผลิตภัณฑ์ฟิชชันและการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrical heat generation model for fuel rod component</li> <li>- Fission product release models               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Release model for intact fuel</li> <li>● Release during UO<sub>2</sub> liquefaction and fragmentation</li> <li>● Enthalpy of released gases</li> </ul> </li> <li>- Decay heat reduction due to fission product release               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Fission product decay heat methodology</li> <li>● Fission product Decay heat model results</li> </ul> </li> <li>- Fuel state models</li> <li>- Fuel rod cladding deformation model</li> <li>- Fuel rod internal gas pressure model</li> <li>- Liquefaction and Slumping of Fuel Rod Cladding               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Relocation of Melted Cladding in Circumferential Direction</li> <li>● Amount of Fuel Dissolved by Melted Metallic Portion of Cladding</li> <li>● Structural Failure of Oxide Layer Retaining Melted Metallic Cladding</li> <li>● Distance of Slumping of Melted Cladding</li> </ul> </li> </ul>

โมเดล	จุดสมการ
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liquefaction of Fuel Rod Cladding at Location of Inconel Grid Spacer               <ul style="list-style-type: none"> <li>● Impact of Grid Spacers on Damage Progression</li> <li>● Liquefaction of Cladding at Location of Grid Spacers</li> </ul> </li> </ul>

### สมการสำคัญของ Fuel rod models

Pecking factor equation

$${}_cF_{i+1}(z) = \begin{cases} 0 & \text{for } z > z_2 \\ \frac{A_a(z)}{A_t(z)} \int_{z_3}^{z_4} \frac{F_i(z)A_r(z)}{V_a(z)} dz + \frac{{}_cF_i(z)A_c(z)}{A_t(z)} & \text{for } z_1 < z < z_2 \end{cases}$$

Where;

${}_cF_{i+1}(z)$  = nuclear heating axial peaking factor for the crust at time i+1

${}_cF_i(z)$  = nuclear heating axial peaking factor for the crust at time i

$F_i(z)$  = nuclear heating average axial peaking factor for  $Z_3$  to  $Z$

$A_r(z)$  = local area of removed material ( $m^2$ )

$A_t(z)$  = total area of crust in the region at the end of time step ( $m^2$ )

$A_c(z)$  = crust area at the beginning of the tie step ( $m^2$ )

$z$  = axial elevation (m)

$V_a$  = total volume of crust added during the time step ( $m^3$ )

### 2.7.3 วิธีการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM [24]

จากการกล่าวถึงข้างต้น RELAP/SCDAPSIM ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็น RELAP model และส่วนของ SCDAP model

### 2.7.3.1 RELAP model [24]

RELAP model ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ของระบบหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ RELAP เป็น code จำลองระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบหนึ่งมิติพร้อมด้วยระบบเพิ่มเติมในการคำนวณ cross-flow โดยจะประกอบไปด้วย nodalization ที่แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆในการจำลอง RELAP model มีการพัฒนาเรื่อง high-resolution fluent model ในแกนปฏิกรณ์ มี 2 โมเดลที่ถูกพัฒนาการคำนวณ cross-flow โมเดลแรกคือ simple tube with axisymmetric non-uniform inlet flow velocities โมเดลที่ 2 คือ โมเดลที่ประกอบไปด้วยอัตราการผลิตกำลังที่แตกต่างกันทั้งภายในและภายนอกท่อ มีการนำเอาผลของอัตราการไหลตามแนวขวางมาใช้เพื่อเปรียบเทียบในการคำนวณภายใต้รูปทรงและขอบเขตเงื่อนไขที่คล้ายคลึงกัน การคำนวณ fluent ทั้งหมดใช้ simple orthogonal mesh และใช้ finer mesh ใช้โมเดล  $k-\epsilon$  turbulence ในการคำนวณ turbulent viscosity มีการปรับปรุงความหนาแน่นกำลัง (power density) เพื่อคำนวณการผลิตความร้อนภายในแกน ในการสร้างแบบจำลองของการไหล (cross-flow phenomenon) สิ่งแรกที่ใช้คือ code thermal hydraulics

#### 2.7.3.1.1 ความสามารถของ RELAP [24]

Hydrodynamics, Heat conduction, reactor kinetics, control systems, trip logic และส่วนประกอบอื่นๆในโมเดล เช่น ปัมและกังหัน จะอยู่ในส่วนของ RELAP Hydrodynamics จะถูกออกแบบโดยใช้เงื่อนไข non-equilibrium, six-equation และ two-fluid model โดยจะทำการใส่จำนวน volume junctions และ surfaces

RELAP เป็น code แบบหนึ่งมิติสามารถใช้กับ nodalization หลายมิติได้ โดยใช้ cross-flow junctions การถ่ายเทความร้อนใช้หลักการ 1D heat conduction สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทรงกระบอกหรือทรงกลม โดยการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาถึงผลกระทบของ non-condensable gases และใช้ radiative heat transfers, reactor kinetics โดยใช้ทฤษฎี point kinetics หรือ space dependent kinetics ในการออกแบบอีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้พื้นฐานการคำนวณทางคณิตศาสตร์ใช้ในการสร้างระบบควบคุม มีการกำหนดตัวแปรต่างๆโดยใช้ตรรกศาสตร์ and, "or" and "xor." เพื่อควบคุมการเปิดปิดวาล์วและปัม

### 2.7.3.1.2 แบบจำลองทางกายภาพและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Physical Models and Numerical Methods) [24]

RELAP เป็น code thermal hydraulic แบบหนึ่งมิติ ใช้ two fluid model โดย code นี้ จะทำการแก้สมการ โดยใช้สมการการอนุรักษ์พลังงาน 6 และสมการจำลองการไหลแบบ two phase RELAP แก้สมการการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม โดยตัวแปรที่พิจารณาในสมการได้แก่ ความดัน (P), พลังงานภายใน ( $U_g$  และ  $U_f$ ), void fraction ( $\alpha_g$ ), ความเร็ว ( $v_g$  และ  $v_f$ ), noncondensable quality ( $X_{ni}$ ) และ boron density ( $\rho_b$ ) ตัวแปรอิสระเป็นเวลา (t) และระยะทาง (x) นอกจากนี้ยังมี ตัวแปรตามระดับสอง ได้แก่ ความหนาแน่น ( $\rho_g, \rho_f$ ) อุณหภูมิ ( $T_g$  และ  $T_f$ ), อุณหภูมิอิ่มตัว ( $T_s$ ) และ noncondensable mass fraction ใน noncondensable gas phase ( $X_{ni}$ ) โดยมีสมการการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation equations) ที่ใช้คือ

1. Vapor mass conservation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_g \rho_g v_g A) = \Gamma_g$$

2. Liquid mass conservation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_f \rho_f v_f A) = \Gamma_f$$

3. Vapor momentum conservation

$$\alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g^2}{\partial t} = -\alpha_g A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x A - (\alpha_g \rho_g A) FWG(v_g) + \Gamma_g A (v_{gI} - v_g) - (\alpha_g \rho_g A) FIG(v_g - v_f) - C \alpha_g \alpha_f \rho_m A \left[ \frac{\partial (v_g - v_f)}{\partial t} + v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} - v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} \right]$$

4. Liquid momentum conservation

$$\alpha_f \rho_f A \frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_f \rho_f A \frac{\partial v_f^2}{\partial t} = -\alpha_f A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_f \rho_f B_x A - (\alpha_f \rho_f A) FWF(v_f) + \Gamma_f A (v_{fI} - v_f) - (\alpha_f \rho_f A) FIF(v_f - v_g) - C \alpha_f \alpha_g \rho_m A \left[ \frac{\partial (v_f - v_g)}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} - v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} \right]$$

5. Vapor energy conservation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g U_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g U_g v_g A) = -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g A) + Q_{wg} + Q_{tg} + \Gamma_{ig} h_g^* + \Gamma_w h_g' + DISS_g \{-Q_{gf}\}$$

6. Liquid energy conservation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f U_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f U_f v_f A) = -P \frac{\partial \alpha_f}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f A) + Q_{wf} + Q_{tf} + \Gamma_{if} h_f^* + \Gamma_w h_g' + DISS_f \{+Q_{gf}\}$$

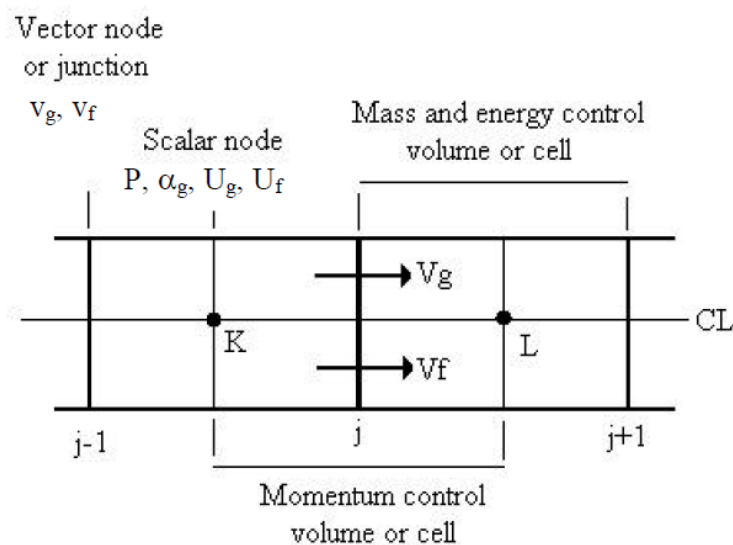
7. Noncondensable component mass conservation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g X_n) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g X_n v_g A) = 0$$

8. Boron concentration in the liquid field

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f C_b v_f A) = 0$$

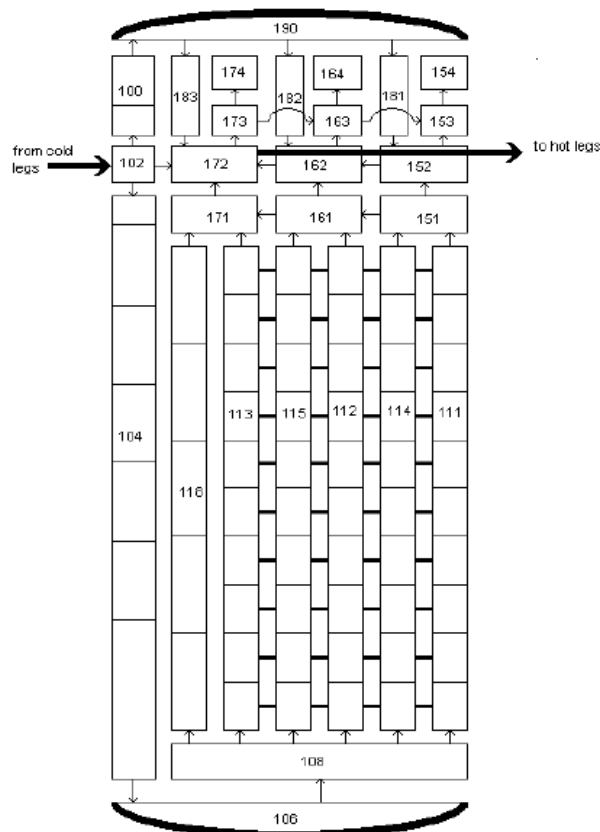
RELAP ใช้ชุดสมการเชิงอนุพันธ์ โดยจะกำหนดขนาด เช่น ความดัน พลังงาน void fraction ระหว่างเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ด้านล่างนี้



รูปที่ 9 Difference equation nodalization schematic [24]

### 2.7.3.1.3 Hydrodynamic Components [24]

แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยส่วนประกอบของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) โดยทั่วไปจะแทนชิ้นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ที่สารหล่อเย็นไหลผ่านและความร้อนที่เป็นตัวแทนของชิ้นส่วนที่เป็นของแข็งของเครื่องปฏิกรณ์ (ไม่มีการไหลใน heat structure) ความร้อนยังสามารถส่งผ่านไปยังพื้นที่อื่น ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์หรือสิ่งแวดล้อมได้ โดยโมเดลในแกนปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงแผนภาพของแกนปฏิกรณ์ มี 5 ช่อง แกนประกอบด้วย downcomer แทนด้วยตัวเลข 104 มาที่ส่วนล่าง lower head (106) และ lower plenum (108) ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงประกอบด้วย 5 ช่อง (111, 112, 113, 114 และ 115) และบริเวณบายพาส (118) ส่วนบนของแกน (upper plenum) มี 3 ช่อง (151-152-153-154, 161-162-163-164 และ 171-172-173-174) มี control assembly housing 3 ช่อง (181, 182 และ 183) ด้านบน upper head (190) Upper annulus (100), inlet annulus (102) upper annulus (100) และ upper plenum (172)

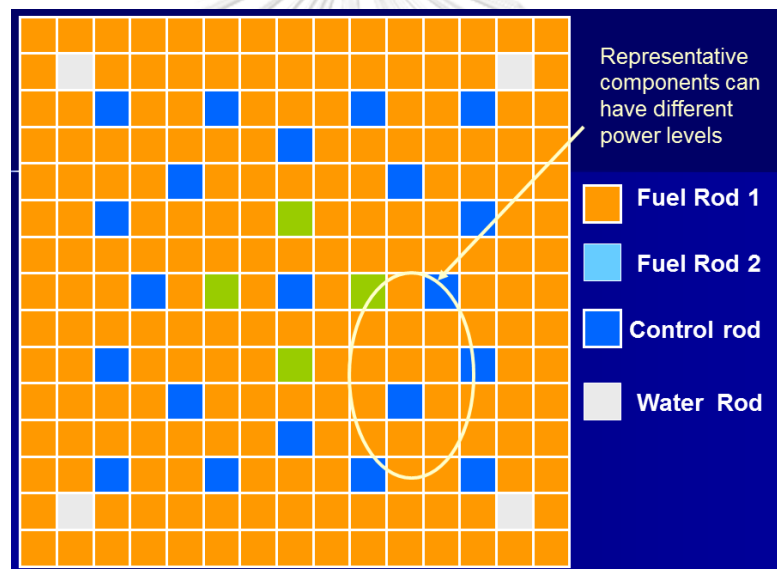


รูปที่ 10 RELAP nodalization diagram of the Surry reactor core [24]



### 2.7.3.2 SCDAP model [13]

SCDAP model จะอธิบายถึงพฤติกรรมของแกนปฏิกรณ์ ได้แก่ รายละเอียดของพฤติกรรมใน vessel และแกนปฏิกรณ์ ความเสียหาย ปฏิกิริยาทางเคมี และการปล่อยผลผลิตฟิชชัน รายละเอียดใน core components, upper plenum structures, core debris และ molten pools, lower plenum debris และ vessel structures รายละเอียดในส่วน core component ใช้แสดงถึงโครงสร้างแกนปฏิกรณ์เมื่อเกิดอุบัติเหตุทั่วไปหรือกรณีเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่จะส่งผลในการทำลายแกนปฏิกรณ์ (degradation) SCDAP core component จะแสดงความสูงทั้งหมดของแกนปฏิกรณ์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเกิด debris beds และ molten pool โดยรูปที่ 11 แสดงถึงช่องทางการไหลในแกนปฏิกรณ์ใน SCDAP model ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง แท่งควบคุมและช่องทางการไหลของน้ำ

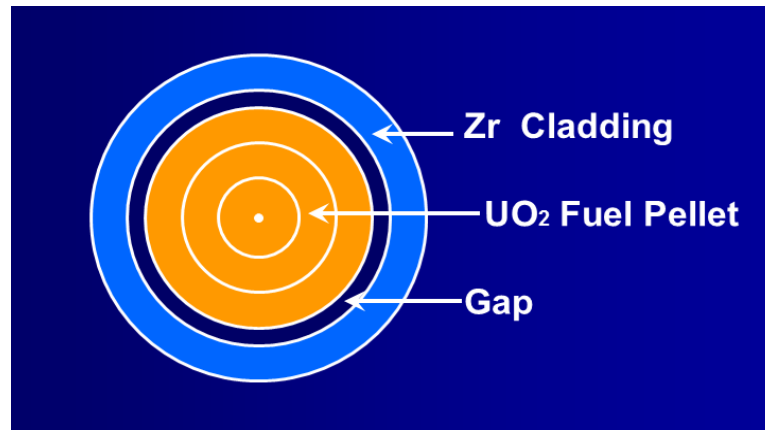


รูปที่ 11 ช่องทางการไหลในแกนปฏิกรณ์ใน SCDAP model

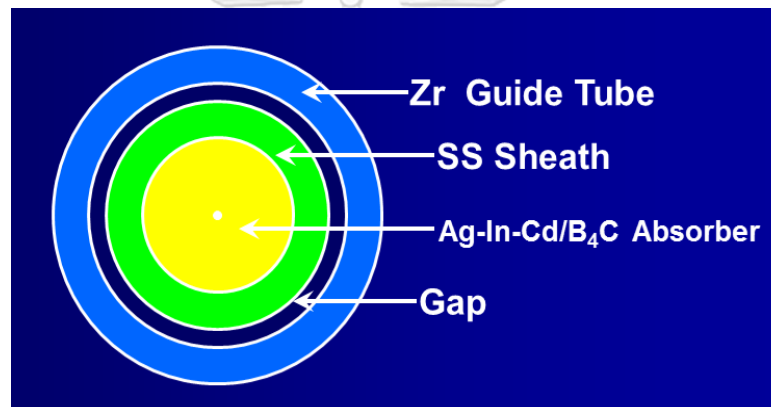
ส่วนประกอบของแท่งเชื้อเพลิงใน SCDAP model ใช้โมเดลที่เป็น 2 มิติในการแสดงเพื่อทำนายอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation), อันตรกิริยาเคมี (chemical interaction) และการหลอมละลาย รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของแท่งเชื้อเพลิงโดยตรงกลางเป็นเชื้อเพลิง  $UO_2$  มีช่องว่างและด้านนอกเป็นส่วนของปลอกเชื้อเพลิงที่ทำจากเซอร์คาลอยรูปที่ 13 แสดงถึงส่วนประกอบที่เป็นแท่งควบคุมที่ทำมาจาก Ag-In-Cd และรูปที่ 14 แสดงถึงลำดับการคำนวณในส่วนที่เป็นของ SCDAP ทั้งหมด โดย SCDAP จะเข้ามาช่วยประเมินพฤติกรรมของเชื้อเพลิงและเหตุการณ์ที่เกิดในแกนปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิสูงสุดได้มากกว่า 3000 K ซึ่ง RELAP heat structure

จะถูกจำกัดอุณหภูมิที่ปลอกเชื้อเพลิงน้อยกว่า 1500 K SCDAP model จึงสามารถเข้ามาช่วยเสริมในส่วนการคำนวณนี้ได้ ค่าที่ได้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมจึงมีค่าใกล้เคียงความจริงมากขึ้น ทั้งในส่วนของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการพองตัวของเชื้อเพลิง การเกิดออกซิเดชันที่ปลอกเชื้อเพลิงที่ทำให้เชื้อเพลิงเกิดความเสียหายในระดับต่างๆด้วย โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ส่วนประกอบดังต่อไปนี้ได้ เช่น Fuel  $\text{UO}_2$ , alternative fuels, Ag-In-Cd control rod,  $\text{B}_4\text{C}$ -SS control blade/channel box, Generic structure, Electrically heated fuel rod simulator, Upper plenum structures  $\text{UO}_2$ -Zr Fuel Rod Phenomenological Models

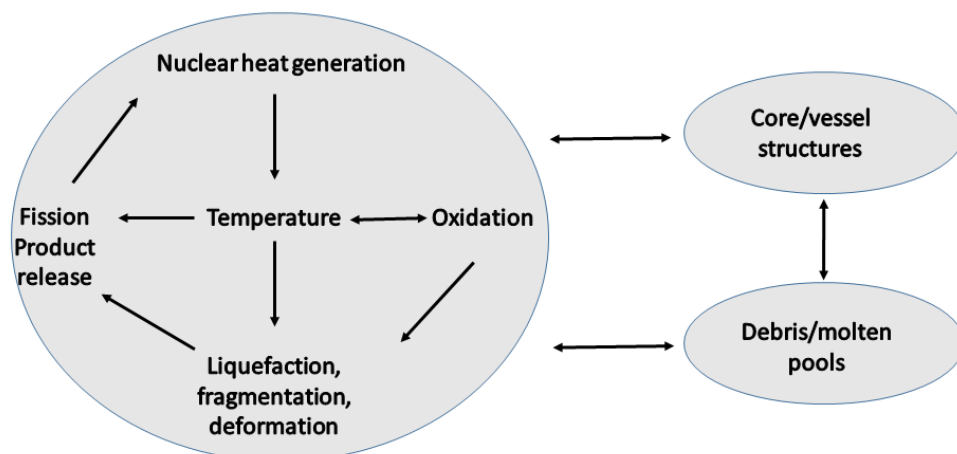
- Oxidation ใช้สมการการแพร่ Vapor diffusion/steam limited และ Inner/outer oxidation ซึ่งสมการที่ใช้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.7.2.2
- Nuclear heat generation ได้แก่ fission, decay heat ประกอบไปด้วยผลกระทบที่เกิดจากการปลดปล่อยผลผลิตฟิชชัน, Reactor kinetics
- Heat conduction (2D finite difference -axial/radial)
- Deformation (axisymmetric and non-axisymmetric, bundle effects)
- Fission product release (Cs, I, Noble gases)
- การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งหรือแก๊สเป็นของเหลว (Liquefaction) ได้แก่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง Inconel และเซอร์โคเนียม, การหลอมละลายของเซอร์โคเนียม, การละลายของ  $\text{UO}_2$  โดยการหลอมละลายของเซอร์โคเนียม, การหลอมละลายของ  $\text{ZrO}_2$ , การหลอมละลายของ  $\text{UO}_2$
- การเปลี่ยนรูปร่างของเศษซากวัสดุ (Transition to debris geometry) การหลอมละลายของ  $\text{UO}_2$ , Fragmentation, Fuel pellet collapse
- การย้ายตำแหน่งของวัสดุ (Material relocation) Inconel grid-Zr interactions, Ballooning effects, coupled mass, energy, and momentum equation ซึ่งใช้สมการดังแสดงในข้อ 2.7.2.2 , Droplet to fluid, Droplet to rod, Oxidation, Decay heat



รูปที่ 12 ส่วนประกอบของแท่งเชื้อเพลิงใน SCDAP model



รูปที่ 13 ส่วนประกอบของแท่งควบคุมใน SCDAP model



รูปที่ 14 การคำนวณใน SCDAP model

## 2.8 ความแตกต่างของโปรแกรม

งานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 กับผลที่ได้จากการทดลองจริง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, SCDAP/RELAP MOD3.2 และ SCDAP/RELAP MOD3.3 ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

### 2.8.1 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP/MOD3.3 [6],[11],[12],[13]

โปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 มีการปรับปรุงและพัฒนาโมเดลจากเดิมคือโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 หลากหลายโมเดลและมีโมเดลใหม่ๆ ได้แก่

1. สมการการแพร่กระจายที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนสำหรับกรณีขาดแคลนไอน้ำและกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
2. การคำนวณของการย้าย (Relocation) ในทิศทางตามแนวขวางของปลอกโลหะเชื้อเพลิงที่ถูกหลอมละลายโดยเป็นส่วนนอกไซด์ของปลอกเชื้อเพลิง
3. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในเศษของเชื้อเพลิงและปลอกที่มีรูพรุน
4. การคำนวณการสูญเสียของการไหลเศษที่มีรูพรุนตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) และ การใช้ความสามารถในการซึมผ่าน
5. การคำนวณการเกิดออกซิเดชันในช่วงสภาวะเติมน้ำ (Reflood)

### 2.8.2 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[11],[12],[13]

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เป็นโปรแกรมที่ใช้รูปแบบของโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 และ SCDAP/RELAP/MOD3.2 ที่พัฒนาโดย US Nuclear Regulatory Commission ซึ่งถูกพัฒนารุ่นโดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) การปรับปรุงและการพัฒนาโปรแกรมช่วยให้โปรแกรมสามารถทำงานได้รวดเร็วและน่าเชื่อถือได้ โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้ถูกพัฒนาในหลาย ๆ เรื่อง เช่น มีโมเดลใหม่ของการขนส่งและการสะสมของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน

พฤติกรรมของเชื้อเพลิงและการหลอมละลายภายในแกนปฏิกรณ์ มีการปรับปรุงของโปรแกรมและเทคนิคเชิงตัวเลข และสามารถแสดงผลทางกราฟได้

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีการพัฒนาโมเดลมาเรื่อย ๆ โมเดลที่ได้รับการปรับปรุงและได้รับการเปลี่ยนแปลง [13] ได้แก่

1. การปรับปรุงโมเดลในการจำลองแท่งเชื้อเพลิงที่ร้อน
2. การปรับปรุงความสัมพันธ์ที่ใช้แท่งควบคุม B<sub>4</sub>C ให้ดีขึ้น
3. การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนสำหรับแท่งเชื้อเพลิง
4. การปรับปรุงโมเดลที่สำคัญของโมเดลปลอกหุ้มแกนปฏิกรณ์ เช่นปรับปรุงความสามารถในการออกแบบรูปแบบที่หลากหลาย, การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี และการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น
5. การปรับปรุงโมเดลของการเกิดออกซิเดชันดีของเซอร์คาลอยและการดูดซับไนโตรเจน
6. การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่าง Zr กับ Nb (สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU และ VVER)
7. การปรับปรุงช่องทางการถ่ายเทความร้อน relative heat แบบแพร่ เป็นต้น

จะเห็นว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้รับการปรับปรุงในเรื่องของการแลกเปลี่ยนความร้อน โมเดลเชื้อเพลิงและการเกิดออกซิเดชัน ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองจึงมีความใกล้เคียงของจริงมากขึ้น ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและการใช้งานโปรแกรมอย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องและสนับสนุนงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP และกลุ่มที่เป็นการทดลองที่ใช้ PBF SFD

### 2.9.1 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4

#### ตารางที่ 12 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
2012	J. Hohorst	RELAP/SCDAPSIM Input Manual MOD 3.4 3.5 & 4.0[8]	ได้อธิบายรายละเอียดของการ์ดแต่ละตัวที่ต้องเขียนลงใน Input file ทั้งในส่วนของ Title, Time step, Trip, Hydrodynamic component, Heat structure component, General table, Plot request, Control system, และ General core ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เป็นต้น
2005	J. K. Hohorst และ C. M. Allison	An assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 using the Phebus FPT2 bundle heating and melting experiment [14]	ได้ทำงานวิจัยที่อธิบายถึงการประเมินผลของโค้ดเวอร์ชันใหม่ (RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4) โดยการใช้การทดลอง Phebus FPT-2 ซึ่งผลจากการคำนวณที่ shroud และ axial power profile ให้ค่าที่ไม่แน่นอนเนื่องจากคุณสมบัติทางความร้อนที่อยู่บริเวณ shroud ผลที่ได้จากการทดลองนี้จึงนำมาเป็นหัวข้อที่ต้องทบทวนและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบกับ PBF SFD 1-4 ว่าได้ผลสอดคล้องกันหรือไม่ ความไม่แน่นอนนี้เกิดจากสาเหตุใด

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
2010	Chris Allison, Larry Siefken, Judith hohorst และ J. birchley	Recent improvements in RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 resulting from quench and parameter bundle heating and quenching experiments [15]	อธิบายถึงโค้ดใหม่ที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับใช้ในการทดลอง Phebus FPT-2 ความรู้ที่ได้จากงานนี้คือกระบวนการในการพัฒนาแบบจำลองการประเมินใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยน input code ให้เหมาะสมกับการทดลองอื่นๆ นอกเหนือจาก SFD 1-4 ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองใหม่เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ระหว่างประเทศที่เรียกว่า SDTP มีการปรับปรุงตัวเลือกการสร้างแบบจำลองพิเศษที่จำเป็นเพื่อเป็นการนำเสนอผลของ electrically heated fuel rod simulators ที่ใช้ในQUENCH โมเดลใหม่นั้นนอกจากจะออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการใช้งานโปรแกรมกับ quenching experiments ยังได้ดำเนินการปรับปรุง PARAMETER ที่ใช้ใน MOD 4.0 อีกด้วย เป็นรุ่นทดลองล่าสุดที่มีการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน และอธิบายการปรับปรุงโมเดลใน MOD3.4 การปรับปรุงโมเดลประกอบด้วย การเติมแทนทาลัม และวัสดุที่ใช้ในการจำลองแท่งเชื้อเพลิงในตัวแปรอื่นๆ

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
2005	Anhar Riza Antariksawan, Tiancai Liu, Jelena Zmitkova และ J. K. Hohorst	Validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 for research reactor applications [16]	อธิบายคุณสมบัติของ input code สำหรับการออกแบบในการทดสอบ และการวิเคราะห์ภายใต้ความผิดปกติซึ่งนำมาสู่การเกิดอุบัติเหตุ งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบและประเมินการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ว่ามีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณในสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงหรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลอง สามารถยืนยันได้ว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์เหตุการณ์ในแกนปฏิกรณ์ขณะเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง เนื่องจากให้ค่าใกล้เคียงกับการผลที่ได้จากการทดลองจริงและได้รับการปรับปรุงโมเดลจากนักพัฒนาและผู้ใช้งาน
2014	Hiroshi Madokoro	Assessment of RELAP/SCDAPSIM with QUENCH and CORA Analyses [17]	ได้ศึกษาการเปรียบเทียบผลการทดลองของ QUENCH และ CORA เมื่อใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.5 ในงานวิจัยเล่มนี้กล่าวถึงตัวโปรแกรมทั้งในส่วนของ RELAP5 และ SCDAP ซึ่งส่วนประกอบของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.5 ว่ามีการคำนวณในส่วนใดบ้าง เช่น ส่วนของ RELAP5 จะ




ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
			<p>คำนวณในส่วนของ Hydrodynamic และ Heat structure เป็นต้น อีกทั้งงานวิจัยเล่มนี้ยังเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองแบบ Quench06 และ CORA ซึ่งมีการอธิบายและบอกรายละเอียดเกี่ยวกับ Facility, Bundle และ Initial condition เป็นต้น ผลการทดลองพบว่าการเกิด Uncertainty เกิดขึ้นซึ่งเกิดจาก Electrical resistance และ Shroud insulator อีกปัจจัยหนึ่งเกิดขึ้น Time step control และ Maximum time step ที่ปรากฏอยู่ใน Code</p>

## 2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่ใช้ PBF SFD

ตารางที่ 13 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
2016	R. Noppawan et al.	Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 with severe fuel damage scoping test [6]	<p>- ได้ศึกษา Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 with severe fuel damage scoping test</p> <p>ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ กระบวนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ซึ่งเป็นต้นแบบที่จะนำมาศึกษาในการทำงานวิจัยด้วยการทดลอง PBF SFD 1-</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
		 <p style="text-align: center;">จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	<p>4 เริ่มตั้งแต่การเลือกตัวแปร หลักการใช้งานโปรแกรมใน เงื่อนไขที่แตกต่างกัน การ ตรวจสอบความสมเหตุสมผล การวิเคราะห์และสรุปผลการ ทดลอง รวมไปถึงข้อแตกต่าง อื่นๆที่อาจจะมีจากการเลือก การทดลองที่ใช้ในการ เปรียบเทียบที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการ จำลองการเกิดอุบัติเหตุที่ ต่างกัน โค้ดที่ใช้ อัตราการ ไหลของอากาศขาเข้าในชุด ทดสอบและกระบวนการ ระบายความร้อน จากผลการ ทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ cladding, shroud และ อัตราการผลิตไฮโดรเจนมี แนวโน้มเป็นไปตามค่าที่วัดได้ จากการทดลองเช่นเดียวกับ SFD 1-4 ซึ่ง SFD-ST Test มี อัตราการให้ความร้อน 0.16 - 1600 K/s, อัตราการไหลขา เข้าเท่ากับ 16.4 g/s, มีแท่ง เชื้อเพลิง 32 แท่งเป็น fresh rods และระบายความร้อน โดยการปล่อยให้เย็นตัวลง อย่างช้าๆ</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
1986	A.D. Knipe, S.A. Ploger and D.J. Osetek.	PBF Server Fuel Damage Scoping Test- Test Results Report [18]	<p>- ได้การศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD-ST เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นต้นแบบ เพื่อหา เงื่อนไขที่อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมในการทำนายผลการทดลองของการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ในส่วนของการตอบสนองทั้งหมดของแกนปฏิกรณ์และโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เกิดจากอันตรกิริยาของระบบหล่อเย็นกับเชื้อเพลิง เป็นต้น อธิบายถึงรายละเอียดของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นในส่วนการจัดทำการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง รายละเอียดต่างๆ เช่นขนาดและความยาว ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ในส่วนของ Fuel bundle มี Fuel rod ทั้งหมด 32 แท่ง มีการจัดวางแบบ 6x6 เป็นต้น และมี อัตราของ Nominal inlet flow เท่ากับ 16 g/s และ ในส่วนของการวัดว่ามีตำแหน่งใดบ้าง ทั้งเป็นการวัด</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
			<p>อุณหภูมิ (Thermocouple) และความดัน (Gas pressure transducer) เป็นต้น อีกทั้งยังกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของพฤติกรรมของ Test bundle thermal, Hydraulic และ Mechanical เป็นต้น ในส่วนของการทดลองนั้นมีการเปรียบเทียบกราฟของข้อมูลทั้งที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม SCDAP version 18</p>
1986	Zoel R. Martinson, David A. Petti, Beverly และ A. Cook	Volume 1: PBF Severe Fuel Damage Test 1-1 Test Results Report [19]	<p>- ศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD 1-1 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นต้นแบบเพื่อหาเงื่อนไขที่อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมในการทำนายผลการทดลองของการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ในส่วนของการตอบสนองทั้งหมดของแกนปฏิกรณ์และโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เกิดจากอันตรกิริยาของการหล่อเย็นกับเชื้อเพลิง เป็นต้น บอกรายละเอียดของระบบ</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
		 <p data-bbox="539 1355 1054 1467" style="text-align: center;">จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	<p>ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการจัดทำทดลอง ตัวแปรต่างๆที่ใช้ การวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง ในส่วนของมัดเชื้อเพลิงในการทดลองนี้ใช้แท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด 32 แท่ง มีการจัดวางแบบ 6x6 และมีอัตราของ Nominal inlet flow น้อยกว่าการทดลอง PBF SFD-ST คือเท่ากับ 0.64 g/s และในส่วนของการวัดว่ามีตำแหน่งใดบ้างทั้งเป็นการวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และความดัน (Gas pressure transducer) เป็นต้นกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของพฤติกรรมของ Test bundle thermal, Hydraulic และ Mechanical มีการเปรียบเทียบกราฟของ ข้อมูลทั้งที่ได้จากการวัดกับ ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม SCDAP version 18</p>
1989	Z. R. Martinson, M. Gasparini, R. R. Hobbins, D.	PBF Severe Fuel Damage Test 1-3 Test Results Report [20]	- ศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD 1-3 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นต้นแบบเพื่อหาเงื่อนไข ที่อยู่ในช่วงที่

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
	A. Petti, C. M. Allison, J. K. Hohorst, D.L. Hagrman และ K. Vinjamuri	 <p style="text-align: center;">จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	<p>ครอบคลุมในการทำนายผล การทดลองของการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ในส่วนของการตอบสนองทั้งหมดในแกนปฏิกรณ์ และโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เกิดจากอันตรกิริยา ของการหล่อเย็น กับเชื้อเพลิง และศึกษาอัตราการเกิด fission product ปริมาณและ รูปร่างทางเคมีของ Fission product และ Aerosol เป็นต้น อีกทั้งยังกล่าวถึงรายละเอียดของระบบทั้งหมด เช่น การเตรียมการทดลอง ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ขนาด ชนิดและความยาวของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยการทดลองนี้แท่งเชื้อเพลิงที่เป็นเชื้อเพลิงใช้แล้วทั้งหมด 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง และ Zircaloy guide tube 4 แท่ง มีการจัดวางแบบ 6x6 เป็นต้น และมีอัตราของ Nominal inlet flow จะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2.4 g/s และในส่วนของการวัดว่ามีตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ และการวัดความดัน และได้</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
			<p>กล่าวถึงรายละเอียดในส่วน ของพฤติกรรมของ Test bundle thermal, Hydraulic และ Mechanical มีการ เปรียบเทียบกราฟของข้อมูล ทั้งที่ได้จากการทดลองกับ ข้อมูลที่ได้จากการใช้ โปรแกรม SCDAP/RELAP5/ MOD2</p>
1987	K. Vinjamuri, D.J. Osetek, D.A. Petti และ D.H. Meikrantz	Severe Fuel Damage Test 1-4 Test Report [9]	<p>- ศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD 1-4 เพื่อเป็นสร้าง เงื่อนไขของอุณหภูมิ, ระดับ ความเสียหายในแท่งเชื้อเพลิง , การปลดปล่อยของ Fission product, อัตราการเกิด ไฮโดรเจนและพฤติกรรมของ แท่งควบคุม บอกรายละเอียด ของระบบทั้งหมด การเริ่มต้น การทดลอง ตัวแปรที่ใช้ใน การทดลอง การวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง รายละเอียดของการใช้แท่ง เชื้อเพลิงซึ่งในการทดลองนี้ใช้ เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วทั้งหมด 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง และใช้ปลอกเชื้อเพลิงที่ทำ จาก Stainless steel Ag- In-Cd control rod 4 แท่ง</p>

ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
			<p>มีการจัดวางแบบ 6x6 เป็นต้น และมีอัตราการไหลขาเข้าเท่ากับ 0.6 g/s และใน ส่วนของการวัดว่ามีตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิและการวัดความดันเป็นต้น งานวิจัยเล่มนี้กล่าวถึงรายละเอียดใน ส่วนของพฤติกรรมของ Test bundle thermal, Hydraulic และ Mechanical มีการเปรียบเทียบกราฟของข้อมูล ทั้งที่ได้จากการทดลองกับ ข้อมูลที่ได้จากการใช้ โปรแกรม SCDAP/RELAP-MOD1</p>
2001	L. J. Siefken, E. W. Coryell, E. A. Harvego และ J. K. Hohorst	Assessment of Modeling of Reactor Core Behavior During Severe Accidents [21]	<p>- ได้ศึกษาการเปรียบเทียบ พฤติกรรมของ Reactor core ระหว่างการเกิด อุบัติเหตุระดับรุนแรง โดยใช้ โปรแกรม MOD 3.3 ในการ ประเมินผลของการทดลอง SFD test, CORA test และ PHEBUS test เป็นต้น โดย เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ จากตำแหน่งต่างๆ ของ Cladding จากการคำนวณ โดยโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD 3.3</p>



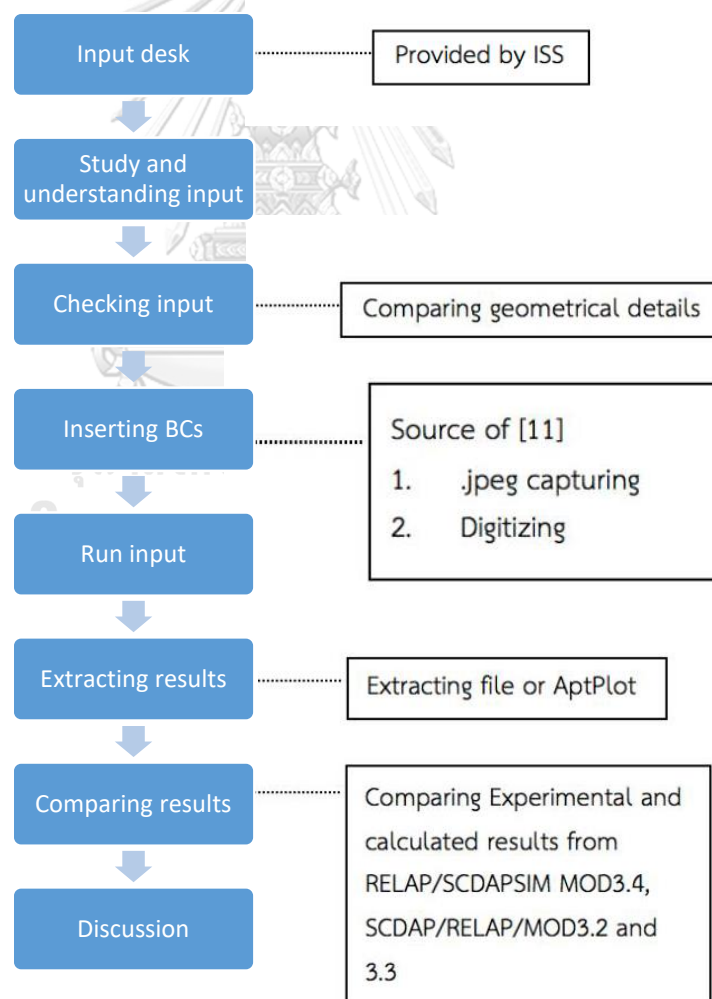
ปี	ชื่อผู้แต่ง	เรื่อง	รายละเอียด
			เทียบกับโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD 3.2 และผลที่ได้จากการทดลอง จริง



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน เริ่มตั้งแต่การศึกษารายละเอียดของข้อมูลขาเข้า (Input desk) ตามหนังสือคู่มือการเขียนข้อมูลขาเข้าของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [8] ให้เข้าใจถึงโครงสร้างและตรวจสอบการเขียนข้อมูลขาเข้าว่ามีตัวแปร ข้อมูลและเงื่อนไขตรงตามการทดลองหรือไม่ หากมีส่วนที่ผิดพลาดก็จะต้องมีการแก้ไขและตรวจสอบใหม่อีกครั้ง จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการใช้ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ในข้อมูลขาเข้า (Input desk) เริ่มการจำลองโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 คำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง และการดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ดังตามแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 การศึกษาข้อมูลขาเข้า [6],[8]

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จำเป็นต้องมีข้อมูลขาเข้า (Input desk) เพื่อเป็นแหล่งที่มาในการวิเคราะห์ โดยข้อมูลขาเข้านี้จะบอกถึงรายละเอียดต่างๆของการทดลอง เช่น ส่วนประกอบและขนาดของแกนปฏิกรณ์ อัตราการไหลขาเข้า อุณหภูมิขาเข้า ทิศทางการไหลของสารหล่อเย็น และข้อมูลขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ของการทดลอง SFD 1-4 ซึ่งเป็นรูปแบบของอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่ผู้วิจัยได้เลือกศึกษา ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และได้รับข้อมูลขาเข้าซึ่งถูกสร้างและพัฒนาโดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) โดยเริ่มต้นผู้วิจัยได้ศึกษาการใช้ข้อมูลขาเข้า (Input desk) ว่ามีโครงสร้าง ลักษณะการเขียน การเรียงลำดับตัวแปรต่างๆอย่างไร ตัวแปรต่างๆบ่งบอกถึงค่าอะไรบ้าง และจะต้องมีการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าว่าข้อมูลที่เรารับมานั้นเขียนได้ถูกต้องและสอดคล้องกับข้อมูลตามหนังสืออ้างอิงของการทดลอง SFD 1-4 หรือไม่ โดยหากตรวจสอบแล้วพบว่ามีข้อผิดพลาด จะต้องทำการแก้ไขก่อนแล้วจึงสามารถดำเนินงานตามขั้นตอนต่อไปได้

ตัวอย่างการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าที่กล่าวข้างล่างนี้เป็นการตรวจสอบจำนวนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงในส่วนประกอบ 1 (ตามรูปที่ 28 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ SCDAP) ข้อมูลอ้างอิงจากการทดลองพบว่า ในส่วนประกอบ 1 มีแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่ง และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 12.75 มิลลิเมตร จากข้อมูลขาเข้าแสดงว่าดังนี้

40010100 4 0.01275 0

โดยที่ การ์ด 400XXXX คือ ข้อมูลนี้เกี่ยวข้องกับข้อมูลแกนปฏิกรณ์

การ์ด 4001CC00 คือ ข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้นของแกนปฏิกรณ์ โดยที่ CC แทน เลขของส่วนประกอบ

4 คือ ข้อมูลของจำนวนแท่งเชื้อเพลิง

0.01275 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น SI

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลข้อมูลจากการทดลอง SFD 1-4 กับข้อมูลขาเข้าข้างต้นพบว่า ข้อมูลทั้งสองส่วนที่มีความสอดคล้องกัน แต่บางกรณีขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ อาจจะมีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นบ้าง ซึ่งข้อมูลที่คลาดเคลื่อนนี้อาจจะทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

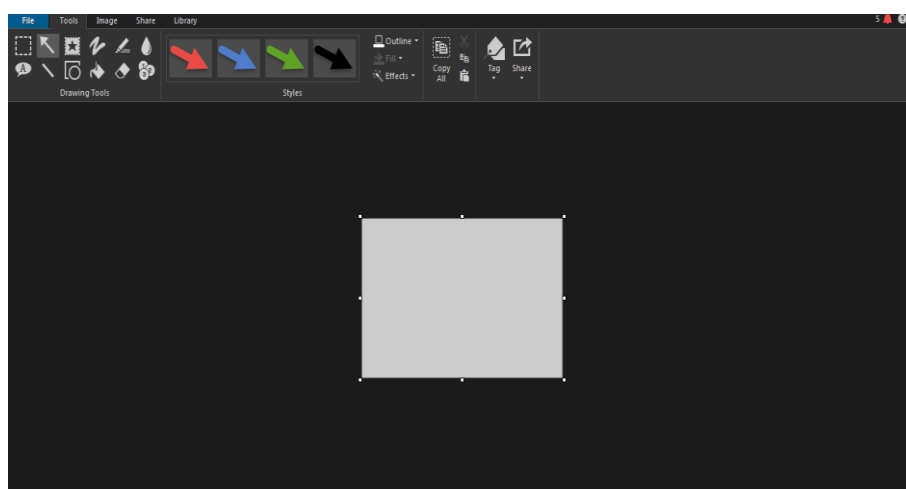
### 3.2 การใช้ขอบเขตเงื่อนไขในข้อมูลขาเข้า [6],[8]

หลังจากทำการศึกษาข้อมูลขาเข้าแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการใช้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลอง SFD 1-4 โดยจะต้องทำการใส่ข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองในข้อมูลขาเข้าของโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองนั้น ข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกราฟดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดึงข้อมูลออกมาโดยมีวิธีการดังนี้

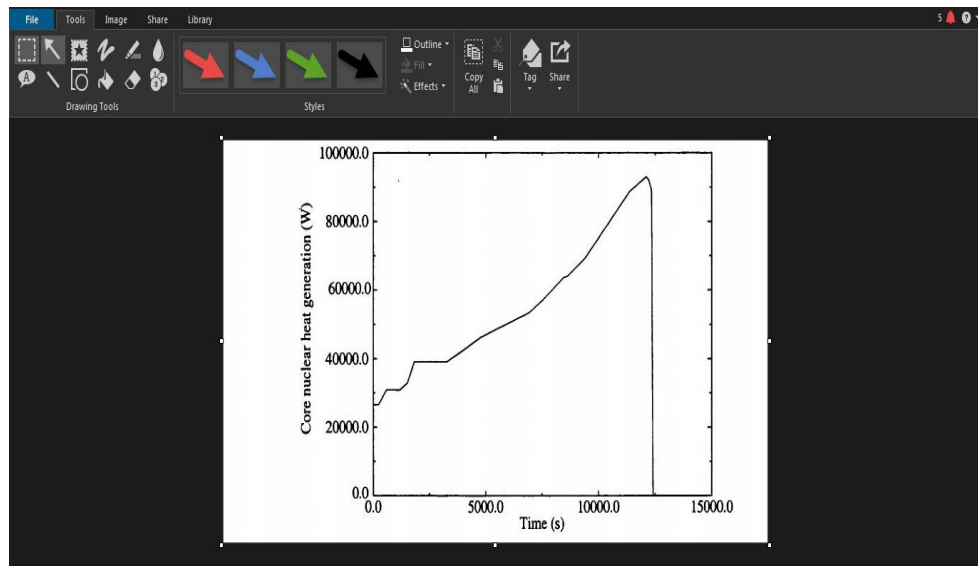
#### 3.2.1 การคัดลอกกราฟขอบเขตเงื่อนไข [6],[8]

การคัดลอกกราฟที่จะกล่าวถึงนี้เป็นกรการคัดลอกกราฟ โดยแปลงข้อมูลจากรูปให้เป็นข้อมูลตัวเลข หรือเรียกว่าการดิจิไทซ์ (Digitizing) แล้วนำไปใส่ลงในข้อมูลขาเข้าโดยในการคัดลอกรูปนั้นจะใช้โปรแกรม Snagit 12 Editor หน้าต่าง (Window) ของโปรแกรมนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 16 โปรแกรม Snagit เป็นโปรแกรมสำหรับการกรการคัดลอกภาพหน้าจอ ทั้งภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว โปรแกรมนี้ทำการจัดจำหน่ายโดยบริษัท TechSmith ซึ่งได้นำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1990 โดยโปรแกรมสามารถใช้งานได้ทั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows และ macOS มีรูปแบบภาษาทั้งเวอร์ชันภาษาอังกฤษ ภาษาเยอรมัน ภาษาเกาหลีและภาษาญี่ปุ่น

การคัดลอกกราฟสามารถเปิดรูปภาพที่เราต้องการและทำการเปิดหน้าต่างของโปรแกรมพร้อมๆ กันได้ และเมื่อต้องการทำการคัดลอกกราฟให้กดคำว่า “Capture” จะปรากฏลูกศรให้ลากขอบในการคัดลอกรูป หลังจากลากลูกศรเสร็จแล้วโปรแกรมจะทำการคัดลอกรูปมาที่หน้าต่างใหม่ กดเลือก “File” และเลือก “Save as” ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยในการบันทึกรูปภาพนั้น (Save as) ให้เลือกสกุลไฟล์เป็น .jpeg เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในการแปลงข้อมูลให้เป็นข้อมูลตัวเลขในขั้นตอนต่อไป



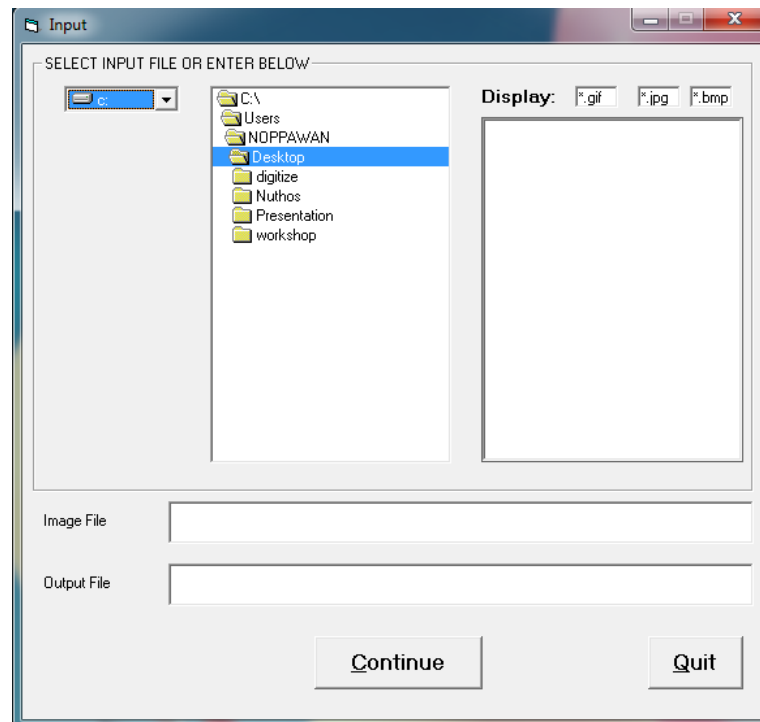
รูปที่ 16 หน้าต่างของโปรแกรม Snagit 12 Editor



รูปที่ 17 การบันทึกกราฟ

### 3.2.2 การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลข (Digitizing) [6],[8]

การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลขเป็นการแปลงข้อมูลจากรูปกราฟทั่วไปให้กลายเป็นข้อมูลในรูปแบบตัวเลข โดยจะต้องทราบค่าทุกจุดของกราฟที่ต้องการคัดลอกข้อมูล โปรแกรมที่สามารถคัดลอกหรือแปลงข้อมูลได้นั้น ปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายโปรแกรม เช่นโปรแกรม getdata226 หรือโปรแกรม Digitize โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Digitize ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เผยแพร่โดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) รูปที่ 18 แสดงภาพของหน้าต่างโปรแกรม Digitize หลังจกการคัดลอกรูปที่เราต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการแปลงข้อมูลโดยเข้าโปรแกรมแล้วกดเลือกไฟล์รูปที่เราได้คัดลอกไว้แล้ว หลังจากนั้นให้แก้ไขชื่อของไฟล์ขาออก (Output file) เป็นสกุล .text เมื่อโปรแกรมแสดงหน้าต่างที่มีรูปของกราฟที่เราต้องการแปลงข้อมูลให้กำหนดค่าแกน X และแกน Y ว่ามีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดเป็นเท่าไร เมื่อกำหนดเสร็จให้ทำการกดเลือกจุดตามเส้นกราฟตามที่แสดงเพื่อทำการแปลงข้อมูล เมื่อกดเลือกจุดเสร็จแล้วให้กดบันทึกแล้วไปให้ดูไฟล์ขาออกตามที่ได้บันทึกไว้ในตอนแรก ไฟล์ขาออกจะกฏและมีข้อมูลของกราฟอยู่ตามแสดงในรูปที่ 19 หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลเหล่านั้นไปใส่ในข้อมูลขาเข้าเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 18 หน้าต่างโปรแกรม Digitize

```

1 = Strip from SFDST
2 100 strip csv
3 103 0
4 *
5 *Card No. *Name *Parameter
6 1001 cadot 010101
7 1002 cadot 010201
8 1003 cadot 010301
9 1004 cadot 010401
10 1005 cadot 010501
11 1006 cadot 010601
12 1007 cadot 010701
13 1008 cadot 010801
14 1009 cadot 010901
15 1010 cadot 011001
16 1011 cadot 020101
17 1012 cadot 020201
18 1013 cadot 020301
19 1014 cadot 020401
20 1015 cadot 020501
21 1016 cadot 020601
22 1017 cadot 020701
23 1018 cadot 020801
24 1019 cadot 020901
25 1020 cadot 021001
26 1021 cadot 030101
27 1022 cadot 030201
28 1023 cadot 030301
29 1024 cadot 030401
30 1025 cadot 030501
31 1026 cadot 030601
32 1027 cadot 030701
33 1028 cadot 030801
34 1029 cadot 030901
35 1030 cadot 031001
36 1031 cadot 040101
37 1032 cadot 040201
38 1033 cadot 040301

```

รูปที่ 19 ไฟล์ขาออกของข้อมูลกราฟ

### 3.3 การคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลของการทดลองจริง อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลที่

ได้กับโปรแกรมอื่นๆ เมื่อทำการเตรียมข้อมูลขาเข้า (Input desk) เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยรูปที่ 21 เป็นหน้าต่างของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

### 3.3.1 ส่วนประกอบในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

การวิเคราะห์ผลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีส่วนประกอบหลัก ๆ ของโปรแกรม 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลขาเข้า (Input desk) ส่วนที่ 2 ข้อมูลขาออก (Output desk) และส่วนที่ 3 ข้อมูลเก็บผล (Restart desk)

ส่วนที่ 1 ข้อมูลขาเข้า (Input desk) เป็นข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยในส่วนนี้จะเป็นการบอกข้อมูลทั้งหมดของระบบว่าเป็นอย่างไร (ตัวอย่างและความหมายการ์ดแสดงในภาคผนวก ก) เช่น ขนาดและประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ เวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เช่น ปัมป์ วาล์ว ข้อต่อ เป็นต้น โดยที่ข้อมูลขาเข้านี้จะป้อนเป็นไฟล์สกุล .i ข้อมูลทั่วไปของข้อมูลขาเข้าประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- ชื่อของการวิเคราะห์ (Title card) เพื่อเป็นชื่อในการแสดงผลการวิเคราะห์ครั้งนี้
- การ์ดการควบคุม (Control card) เป็นการ์ดที่ใช้ในการบ่งชี้และควบคุมของระบบในการคำนวณ เช่น บอกถึงประเภทของระบบในการวิเคราะห์เช่นเป็นระบบแบบ Steady-state หรือเป็นระบบแบบ Transient เป็นต้น บอกถึงหน่วยในการคำนวณในครั้งนี้เช่น เป็นหน่วยแบบ SI หรือเป็นหน่วยแบบอังกฤษ บอกถึงเวลาในการคำนวณของระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้ เป็นต้น
- การ์ดของส่วนประกอบ (Component card) การ์ดนี้เป็นการบอกว่าในการวิเคราะห์ครั้งนี้มีส่วนประกอบแบบไฮดรอลิก (Hydraulic component) อะไรบ้าง เช่น ปัมป์ (Pipe) ปริมาตร (Volume) ข้อต่อ (Junction) และวาล์ว (Valve) เป็นต้น
- คำจบของข้อมูลขาเข้า (End of input) เป็นการ์ดเพื่อบ่งบอกว่าจบการการวิเคราะห์จบลงแล้ว ส่วนที่ 2 ข้อมูลขาออก (Output desk) เป็นข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ได้ทำการคำนวณตามข้อมูลที่เรทำได้ทำการเขียนลงไปข้อมูลขาเข้า (Input) ซึ่งข้อมูลขาเข้านี้เป็นไฟล์สกุล .o โดยในข้อมูลขาออกนี้จะมีการแสดงถึงข้อมูลขาเข้าทั้งหมดก่อนแล้วจึงแสดงถึงผลของการวิเคราะห์ออกทั้งหมดแต่เนื่องจากถ้าเราจะทำการนำข้อมูลตรงนี้มาใช้มันจะเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เพราะข้อมูลที่แสดงผลออกมานั้นเป็นผลที่แสดงออกมาไม่ได้เป็นรูปแบบที่อ่านง่าย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายเราต้องทำการดึงข้อมูลที่ได้จากข้อมูลขาออกออกมาโดยโปรแกรม AptPlot ซึ่งจะพูดขั้นตอนการดึงข้อมูลออกมาในหัวข้อต่อไป

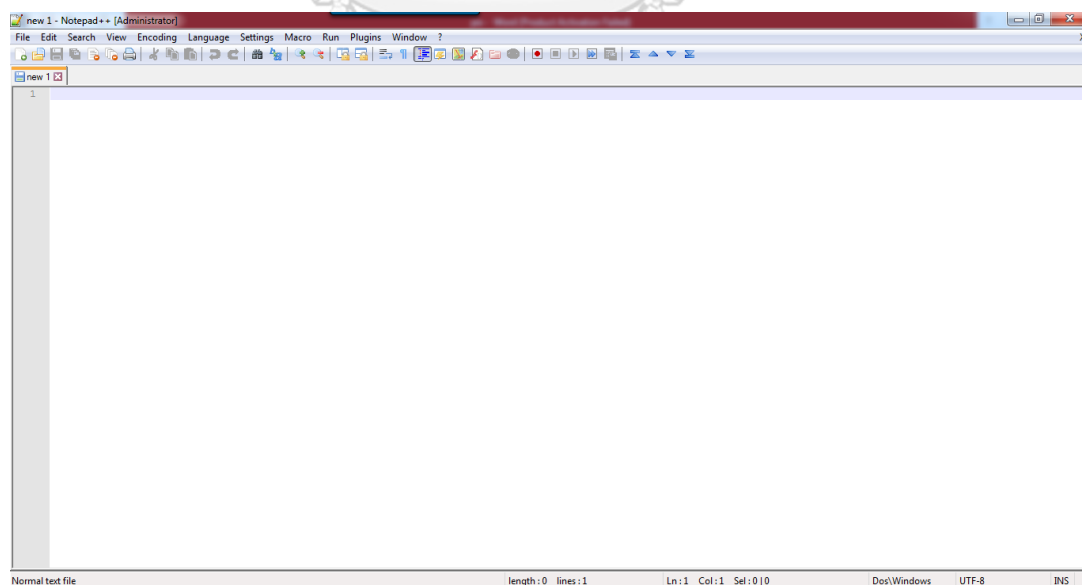
ส่วนที่ 3 ข้อมูลเก็บผล (Restart desk) เป็นข้อมูลการเก็บผลของการคำนวณเอาไว้เพื่อที่ว่า อาจจะมีการนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ใหม่อีกครั้ง โดยที่เราไม่ต้องไปเขียนข้อมูลขาเข้าอีก โดยที่ไฟล์สกุลของข้อมูลเก็บผลเป็น .r โดยการใช้ข้อมูลเก็บผลนี้จะใช้การโดยการประกาศจากในข้อมูลขาเข้า ซึ่งข้อมูลเก็บผลนี้เราไม่สามารถเปิดได้เลย ต้องเรียกเปิดจากโปรแกรมอื่น ๆ เช่น โปรแกรม AptPlot เป็นต้น ข้อมูลเก็บผลนี้เมื่อเปิดแล้วเราจะได้ผลของผลการคำนวณตามที่เราได้ประกาศไว้ในข้อมูลขาเข้า

### 3.3.2 การใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

งานวิจัยนี้ได้ทำการดำเนินงาน รวบรวม สร้างข้อมูลขาเข้า (Input desk) และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Window 7 ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ลงที่ไดร์ฟ C (Drive C) โดยใช้ชื่อแฟ้มข้อมูล (Folder) ว่า re34bil.exe เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาและการวิเคราะห์คำนวณ

ขั้นตอนที่ 2 เขียนข้อมูลขาเข้าโดยบันทึกไฟล์เป็นสกุล .i โดยทำการเขียนและรวบรวมไฟล์ (Compile file) ด้วยโปรแกรม WordPad เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขและการใช้งานซึ่งมีอยู่ใน Windows 7 หรือสามารถดาวน์โหลดโปรแกรม Notepad++ ได้ฟรีที่เว็บไซต์โดยตรงซึ่งโปรแกรมนี้ง่ายต่อการแก้ไขและการใช้งานของข้อมูลขาเข้าดังแสดงตามรูปที่ 20



รูปที่ 20 หน้าต่างโปรแกรม Notepad++

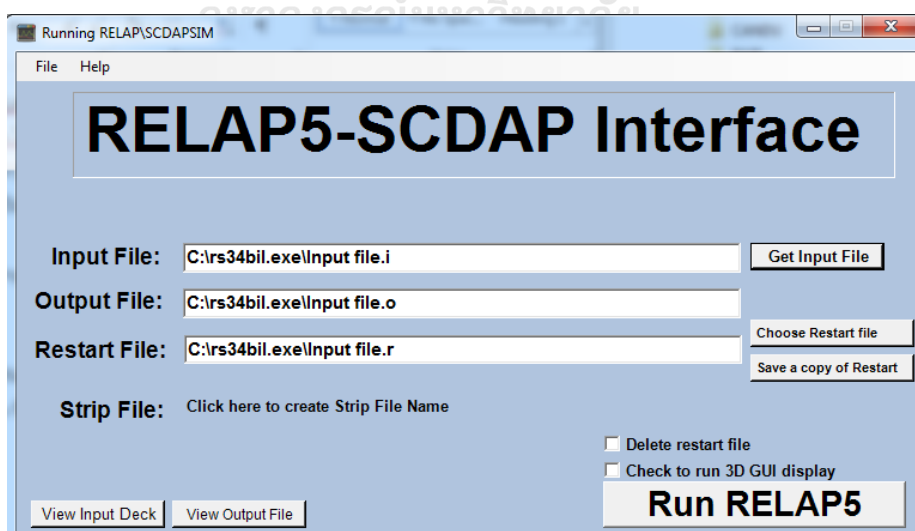


ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง (Run) ตัว โดยการเลือกไฟล์ re34bil.exe folder ที่มีชื่อว่า RunRELAP.exe เมื่อหน้าต่างของโปรแกรมปรากฏจะดังแสดงตามรูปที่ 21



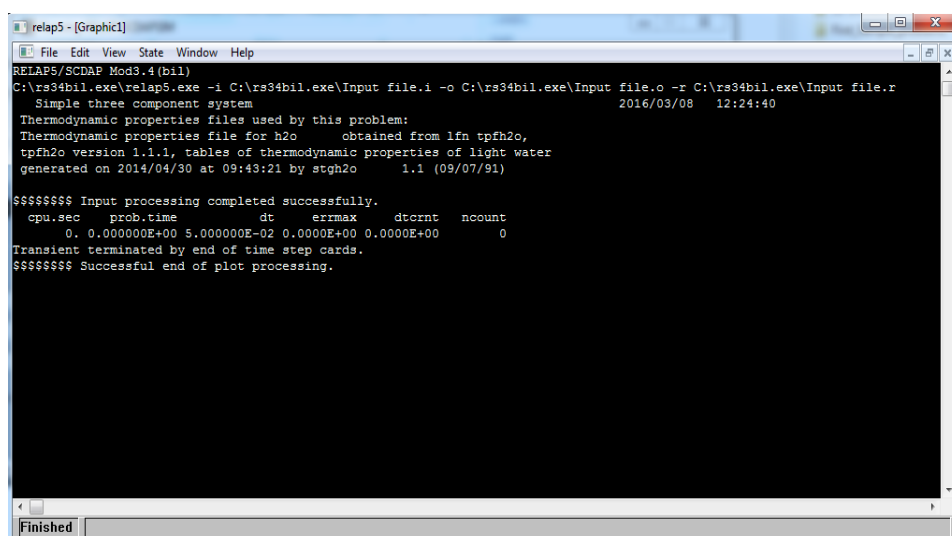
รูปที่ 21 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ขั้นตอนที่ 4 ทำการกดเลือกข้อมูลขาเข้า (Get Input File) เพื่อทำการเลือกไฟล์ที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์ หลังจากเลือกข้อมูลขาเข้าแล้วตัวโปรแกรมจะทำการเลือกตำแหน่งที่บันทึก (Location) ของข้อมูลขาออก (Output file) และข้อมูลเก็บผล (Restart file) ตามตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูลขาเข้าตามที่แสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เมื่อเลือกข้อมูลขาเข้าแล้ว

ขั้นตอนที่ 5 กติวิเคราะห์ผล (RUN RELAP5) แล้วตัวโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างใหม่ตามที่แสดงในรูปที่ 23 โดยหน้าต่างนี้แสดงเวลาและข้อมูลในการวิเคราะห์และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จจะมีคำว่า Successful end of plot processing ซึ่งหมายถึงว่าในการวิเคราะห์ของข้อมูลขาเข้านี้สำเร็จเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราสามารถปิดหน้าต่างนี้ได้เลย ข้อมูลขาออกและข้อมูลเก็บผลจะปรากฏในไฟล์ที่เราไม่บันทึกไว้ในขั้นตอนก่อนหน้าและหลังจากการวิเคราะห์เสร็จแล้วเราจะทำการอ่านข้อมูลของผลการวิเคราะห์ต่อไป



```

relap5 - [Graphic1]
File Edit View State Window Help
RELAP5/SCDAP Mod3.4(b11)
C:\rs34b11.exe\relap5.exe -i C:\rs34b11.exe\Input file.i -o C:\rs34b11.exe\Input file.o -r C:\rs34b11.exe\Input file.r
Simple three component system 2016/03/08 12:24:40

Thermodynamic properties files used by this problem:
Thermodynamic properties file for h2o obtained from lfn tpfh2o,
tpfh2o version 1.1.1, tables of thermodynamic properties of light water
generated on 2014/04/30 at 09:43:21 by stgh2o 1.1 (09/07/91)

$$$$$$$ Input processing completed successfully.
cpu.sec prob.time dt errmax dtcrnt ncount
0. 0.000000E+00 5.000000E-02 0.0000E+00 0.0000E+00 0
Transient terminated by end of time step cards.
$$$$$$$ Successful end of plot processing.
Finished
  
```

รูปที่ 23 หน้าต่างโปรแกรมเมื่อกด Run RELAP5 แล้ว

### 3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [6],[8]

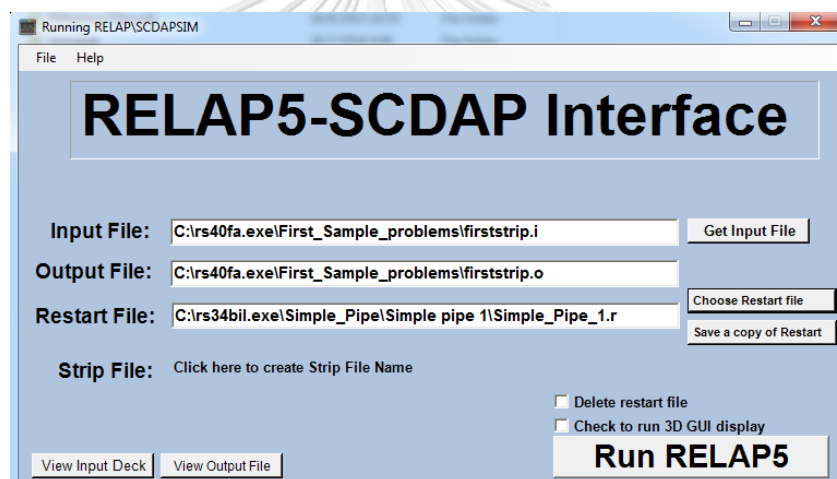
เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลขาเข้าแล้วจะได้ข้อมูลขาออกและข้อมูลเก็บผลออกมา ซึ่งงานวิจัยวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลอื่นๆด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ออกมาแสดงในรูปของกราฟ ซึ่งการดึงข้อมูลมี 2 วิธีหลักๆ คือ การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูลและการดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot

#### 3.4.1 การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล [6],[8]

การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูลนั้นต้องเขียนไฟล์ข้อมูลขาเข้าใหม่เพื่อเป็นการดึงข้อมูลออกมา ซึ่งเมื่อเขียนไฟล์ข้อมูลขาเข้าที่เป็นสกุล .i แล้วให้เราทำตัวเลือก Choose Restart File โดยมีวิธีการดึงข้อมูลดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เขียนไฟล์ตั้งข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการตั้งข้อมูลออกมาซึ่งเป็นสกุล .i การเขียนไฟล์นั้นจะเขียนตามข้อมูลที่ต้องการทราบซึ่งตัวอย่างของการเขียนไฟล์แสดงตามภาคผนวก ข

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวิเคราะห์ไฟล์ตั้งข้อมูล เมื่อเขียนไฟล์เสร็จแล้วให้ทำการวิเคราะห์ผลโดยการเลือกเปิดหน้าต่างของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ใหม่อีกครั้งโดยเลือกทำการกดเลือกข้อมูลขาเข้า (Get Input File) แล้วกดเลือกไฟล์ตั้งข้อมูลที่ได้เขียนไว้ หลังจากเลือกข้อมูลขาเข้าแล้วตัวโปรแกรมจะทำการเลือกตำแหน่งที่บันทึก (Location) ของข้อมูลขาออก (Output file) และข้อมูลเก็บผล (Restart file) ตามตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูลขาเข้า แต่ให้ทำการกดเลือกเลือกข้อมูลเก็บผล (Choose restart file) โดยให้เลือกไฟล์ที่เราได้ทำการวิเคราะห์ไว้แล้วตามที่แสดงในรูปที่ 24 หลังจากการให้กด Run RELAP5 เพื่อทำการตั้งข้อมูลออกมาโดยตำแหน่งที่ทำการบันทึกไฟล์ข้อมูลขาออกไว้จะมีไฟล์ใหม่เกิดขึ้นเป็นไฟล์ข้อมูลที่เราได้วิเคราะห์ไว้แล้วซึ่งสามารถเปิดโดยโปรแกรม MS Excel ได้ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 24 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับการใช้ไฟล์ Strip

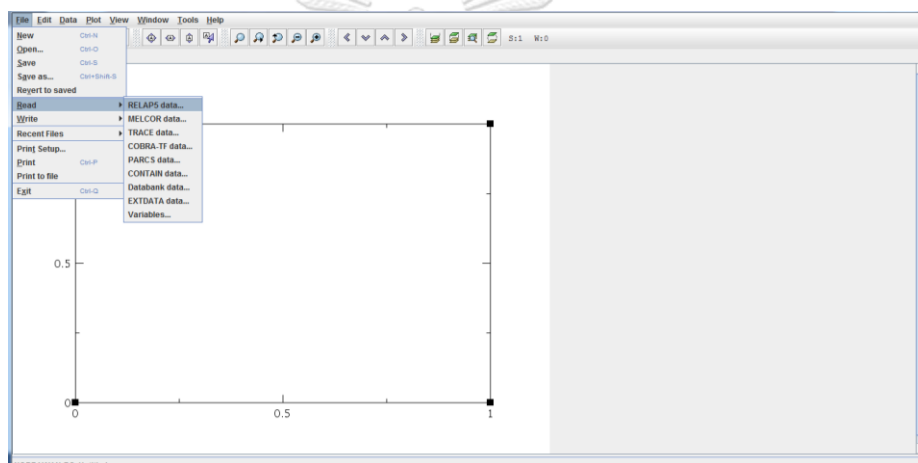
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	SCDAP/RS Mod3.4(b)strip file	2016/03/29	16:53:06						
2	Strip from simple three component system								
3	plotstr	9	0						
4	plotstr	tme	0	mfvjv	120000000	mfvjv	127000000	tempf	125010000
5	plotrec	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
6	plotrec	5.00E-02	4.63E+02	4.66E+02	3.08E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
7	plotrec	1.00E-01	9.22E+02	9.28E+02	3.13E+02	3.06E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
8	plotrec	1.50E-01	1.38E+03	1.38E+03	3.17E+02	3.09E+02	3.06E+02	3.05E+02	3.05E+02
9	plotrec	2.00E-01	1.82E+03	1.83E+03	3.20E+02	3.15E+02	3.08E+02	3.06E+02	3.05E+02
10	plotrec	2.50E-01	2.26E+03	2.27E+03	3.22E+02	3.19E+02	3.13E+02	3.08E+02	3.06E+02
11	plotrec	3.00E-01	2.69E+03	2.70E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.19E+02	3.13E+02	3.08E+02
12	plotrec	3.50E-01	3.10E+03	3.12E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.20E+02	3.14E+02
13	plotrec	4.00E-01	3.50E+03	3.51E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.20E+02	3.20E+02
14	plotrec	4.50E-01	3.89E+03	3.89E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
15	plotrec	5.00E-01	4.26E+03	4.26E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
16	plotrec	5.50E-01	4.62E+03	4.62E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
17	plotrec	6.00E-01	4.96E+03	4.96E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
18	plotrec	6.50E-01	5.28E+03	5.28E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
19	plotrec	7.00E-01	5.59E+03	5.59E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
20	plotrec	7.50E-01	5.88E+03	5.88E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
21	plotrec	8.00E-01	6.15E+03	6.15E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
22	plotrec	8.50E-01	6.41E+03	6.41E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
23	plotrec	9.00E-01	6.65E+03	6.65E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
24	plotrec	9.50E-01	6.87E+03	6.87E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
25	nitrec	1.00E+00	7.09E+03	7.09E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02

รูปที่ 25 หน้าต่างของ MS Excel ที่ทำการตั้งข้อมูลออกมา

### 3.4.2 การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot [6],[8]

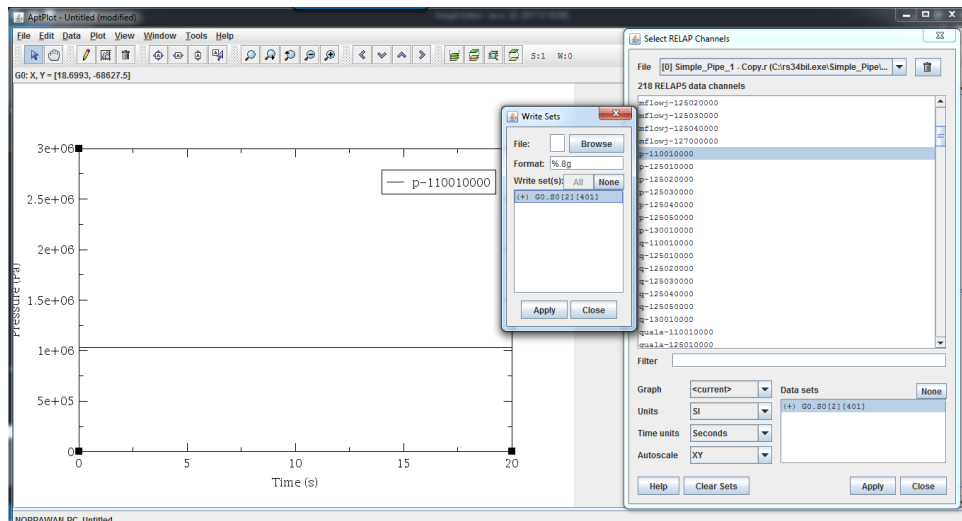
การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot เป็นวิธีที่ง่ายกว่าการดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล เนื่องจากเราไม่จำเป็นต้องเขียนไฟล์ใหม่ขึ้นมา ซึ่งการเขียนไฟล์ใหม่ขึ้นมานี้อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากกว่า การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot เป็นการดึงข้อมูลโดยการใส่ไฟล์ข้อมูลเก็บผล (Restart file) ในการดึงข้อมูลแต่อาจจะต้องมีการประกาศค่าที่ต้องการแสดงลงไปข้อมูลขาเข้า ก่อนโดยที่ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม AptPlot ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกไฟล์ข้อมูลเก็บผลที่ต้องการทราบผลการวิเคราะห์ โดยเพื่อเปิดหน้าต่างของโปรแกรม AptPlot แล้วให้เลือก Read แล้วเลือก RELAP5 data เพื่อเปิดไฟล์ข้อมูลเก็บผลหรือข้อมูลสกุล .r ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้แล้วหลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างรูปที่ 26



รูปที่ 26 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot เมื่อเลือกไฟล์ .r แล้ว

ขั้นตอนที่ 2 ให้เลือกข้อมูลตามที่แสดงทางขวามือเพื่อทำการดึงข้อมูลออกมา ข้อมูลทางขวาที่แสดงนั้นเป็นข้อมูลที่เราได้ทำการประกาศไว้ในข้อมูลขาเข้า เมื่อเลือกข้อมูลตามที่ต้องการแล้วให้กดเลือก Export ASCII เพื่อทำการนำข้อมูลที่ได้ออกไปพล็อตได้ต่อไปตั้งแสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 27 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot และเลือก Export ASCII เพื่อนำไปพล็อต

### 3.5 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผล [6],[8]

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 นั้นเป็นข้อมูลของค่าขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ (Boundary conditions) โดยที่ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ผล เช่น อุณหภูมิขาเข้า (Inlet temperature) อัตราการไหลขาเข้า (Inlet flow) และความดันขาเข้าของเชื้อเพลิง (Inlet pressure) เป็นต้น อีกทั้งยังบอกแผนภาพของระบบ (Nodalization) และตัวแปรที่สนใจในการทำการวิเคราะห์

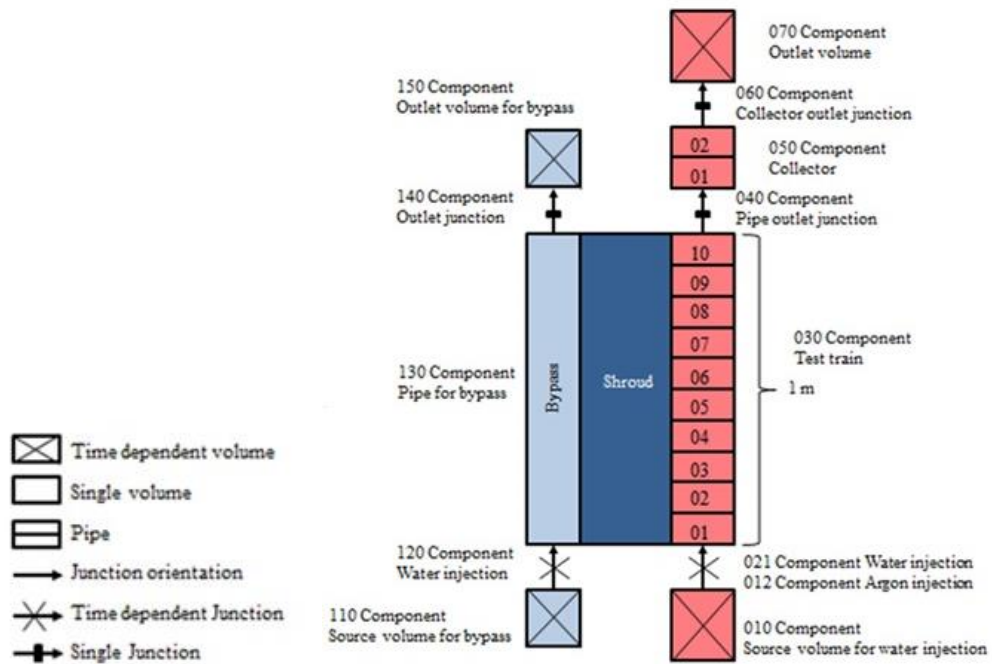
#### 3.5.1 แผนภาพ (Nodalization) [12]

แผนภาพ (Nodalization) เป็นแผนภาพที่แสดงถึงข้อมูลการจัดเรียงแกนปฏิกรณ์โดยนำมาจากข้อมูลขาเข้า (Input desk) แผนภาพจะแสดงส่วนต่างๆ ทั้งในส่วนประกอบของ RELAP5 และ SCDAP ของการทดลอง PBF SFD 1-4 ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 28 และ 29 ส่วนประกอบของ RELAP5 แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบเทอร์โมไฮดรอลิก (Thermohydraulic) และส่วนประกอบของ SCDAP แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบของแกนปฏิกรณ์

ส่วนประกอบของระบบ RELAP5 ดังแสดงในรูปที่ 28 เริ่มต้นจากส่วนประกอบ 010 เป็นปริมาตรเริ่มต้น (Source volume) เพื่อเป็นทางผ่านของน้ำในการหล่อเย็น ส่วนประกอบ 010 เชื่อมกับส่วนประกอบ 012 และ 021 ส่วนประกอบ 012 เป็นส่วนประกอบที่ใช้แทนการฉีดอาร์กอนเข้าไปในการทดลอง ซึ่ง SFD 1-4 ที่เป็นรูปแบบอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่ผู้วิจัยเลือกศึกษานั้น มีการฉีดอาร์กอนเข้าไปช่วยในการระบายความร้อนด้วย จึงต้องมีส่วนประกอบนี้เพิ่มเข้ามาใน Nodalization

ถัดมาจะเชื่อมต่อกับส่วนประกอบ 030 ซึ่งเป็นตัวชุดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ (Test train) โดยเชื่อมผ่านข้อต่อ (Junction) ซึ่งเป็นส่วนประกอบ 030 จะถูกแบ่งเป็น 10 ส่วนเท่ากันทุกอันโดยแต่ละส่วนมีความยาว 0.1 เมตร ส่วนประกอบชิ้นสุดท้ายซึ่งเป็นทางออกของส่วนประกอบ 030 เชื่อมต่อกับส่วนประกอบ 050 ซึ่งเป็นตัวเก็บ (Collector) โดยเชื่อมผ่านข้อต่อของส่วนประกอบ 040 (Pipe outlet junction) ตัวเก็บมีลักษณะเป็นท่อโดยประกอบด้วยท่อ 2 ท่อซึ่งแต่ละท่อยาว 0.5 เมตร ตัวเก็บเชื่อมต่อกับปริมาตรทางออก (Outlet volume) ซึ่งเป็นส่วนประกอบ 070 (Outlet volume) โดยเชื่อมผ่านข้อต่อของส่วนประกอบ 060 (Collector outlet junction) ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นส่วนประกอบของส่วนทางตรงที่มีน้ำและอาร์กอนไหลผ่านเพื่อหล่อเย็นไปยังเชื้อเพลิง (Bundle path) อีกส่วนที่เชื่อมกับส่วนนี้คือส่วนที่น้ำไม่ผ่านคือเป็นส่วนทางอ้อม (Bypass path) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมกันโดยปลอกกันฉนวน (Insulating shroud) ส่วนประกอบทางอ้อมเริ่มต้นจากปริมาตรเริ่มต้นเป็นส่วนประกอบ 110 ซึ่งเชื่อมต่อท่อของส่วนประกอบ 130 โดยผ่านข้อต่อที่เป็นส่วนประกอบ 120 ส่วนประกอบ 130 เป็นท่อมมีความยาวเท่ากับ 1 เมตร และท่อนี้เชื่อมต่อกับส่วนประกอบ 150 โดยเชื่อมผ่านส่วนประกอบ 140

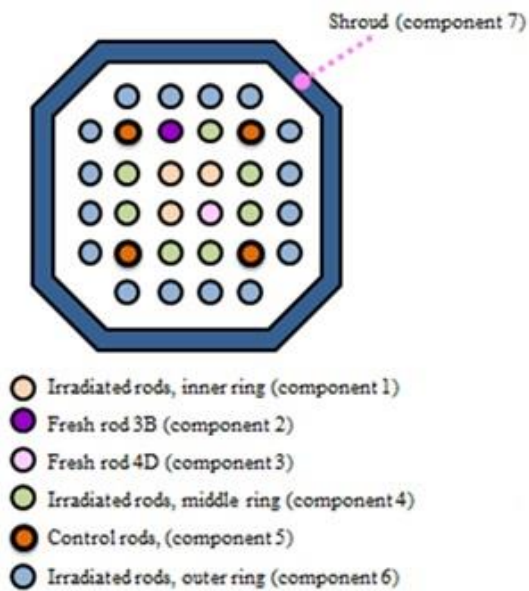
ส่วนประกอบของระบบ SCDAP ในรูปที่ 29 แสดงการจัดเรียงแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีทั้งหมด 32 แท่ง ถูกแบ่งออกเป็น 7 ส่วน ได้แก่ ส่วนประกอบที่ 1 แสดงถึงวงแหวนภายใน (Inner ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้ว (irradiated rods) จำนวน 3 แท่ง, ส่วนประกอบที่ 2 แท่งเชื้อเพลิงใหม่ จำนวน 1 แท่ง (fresh fuel rod 3B), ส่วนประกอบที่ 3 แท่งเชื้อเพลิงใหม่ จำนวน 1 แท่ง (fresh fuel rod 4D), ส่วนประกอบที่ 4 วงแหวนตรงกลาง (Middle ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้ว (irradiated rods) จำนวน 7 แท่ง ส่วนประกอบที่ 5 แท่งควบคุม (control rods) จำนวน 4 แท่ง ส่วนประกอบที่ 6 วงแหวนภายนอก (Outer ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้ว (irradiated rods) จำนวน 16 แท่ง และส่วนประกอบที่ 7 ปลอกมัดเชื้อเพลิง (Shroud) เชื้อเพลิงที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณเป็นเชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) ขนาดของเม็ดเชื้อเพลิง (Fuel pellet) และขนาดของรัศมีของปลอกแท่งเชื้อเพลิงภายในและภายนอก เท่ากับ 4.13, 4.22 และ 4.81 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 28 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ RELAP5



**SCDAP components**

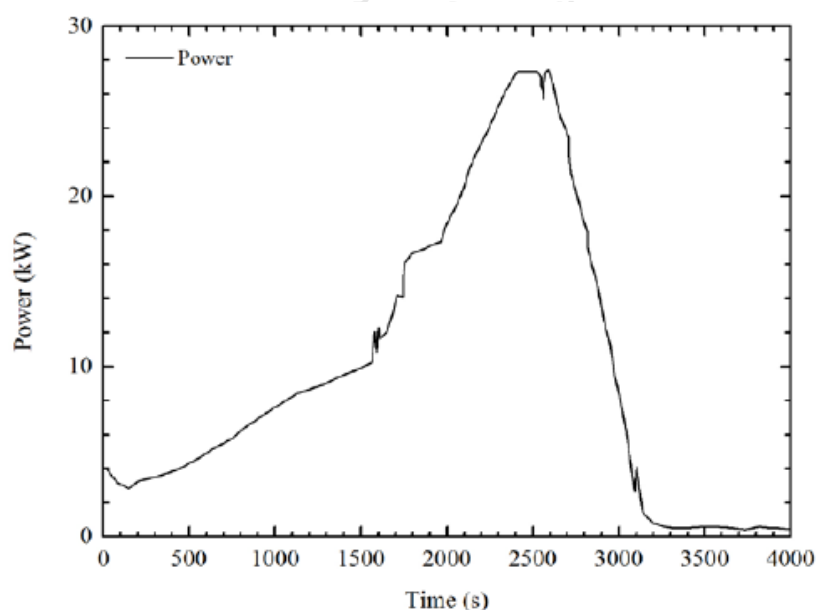


รูปที่ 29 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ SCDAP

### 3.5.2 ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) [9],[10]

ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ของการทดลอง PBF SFD 1-4 ที่แสดงในหัวข้อย่อนี้เป็นเงื่อนไขของส่วนประกอบของส่วนทางตรง (Bundle path) ที่มีน้ำและอาร์กอนไหลผ่านเพื่อหล่อเย็นไปยังเชื้อเพลิงและส่วนทางอ้อม (Bypass path) ขอบเขตเงื่อนไขของหัวข้อย่อนี้แสดงข้อมูลของความดัน อัตราการไหลขาเข้า และอุณหภูมิขาเข้า เป็นต้น

การทดลองทำในช่วงสภาวะชั่วขณะ ใช้ระยะเวลา 1.3 ชั่วโมง โดยจำลองการทดลองให้มีลักษณะการเกิดอุบัติเหตุแบบท่อเกิดการรั่วไหลขนาดเล็ก (small break) เกิดอุบัติเหตุจากการสูญเสียระบบหล่อเย็นโดยปราศจากการระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์แบบฉุกเฉิน (emergency core cooling) ในแกนปฏิกรณ์แบบน้ำความดันสูง (PWR) มัดเชื้อเพลิงหลอมละลาย แห่ง เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น แห่งควบคุมเกิดการหลอมละลาย เกิดการแตกของปลอกหุ้มเชื้อเพลิง (cladding rupture) การเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเมื่อ fission power ที่มัดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเป็น 27 กิโลวัตต์ fission power ที่มัดเชื้อเพลิงคงที่ที่ 27 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 223 วินาที ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 27 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เซอร์คาลอย หลอมละลาย เชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (Fuel Liquefaction) เกิดการย้ายตำแหน่งของวัสดุ และเกิดอันตรกิริยาร่วมด้วยไฮโดรเจน ละอองลอยและเกิดการปลดปล่อยผลผลิตฟิชชัน มัดเชื้อเพลิงในการทดลอง SFD 1-4 นี้ถูกระบายความร้อนอย่างช้าๆโดยการลดกำลังลงและเพิ่มอาร์กอนเข้าไปในมัดเชื้อเพลิง มัดเชื้อเพลิงและปล่องลมด้านบนจะถูกเก็บแบบแห้งที่สภาพแวดล้อมแบบเฉื่อย (inert environment) จนกระทั่งเชื้อเพลิงทดสอบนี้จะถูกเคลื่อนย้ายออกไป



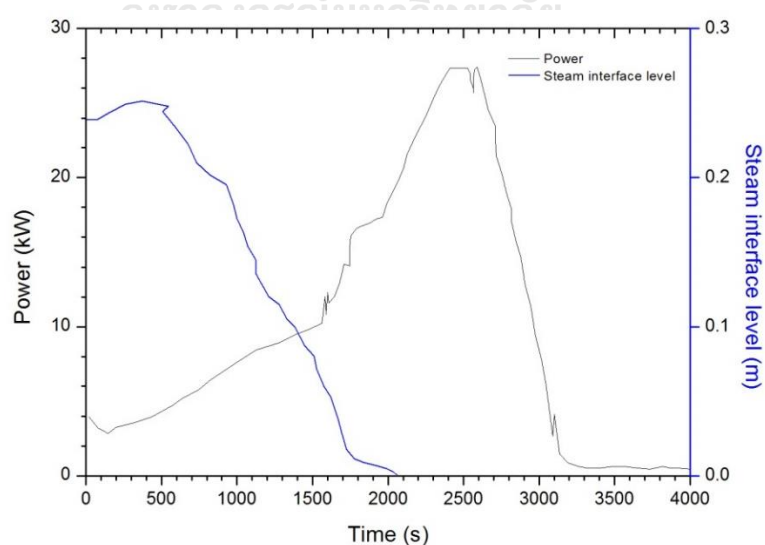
รูปที่ 30 Bundle Nuclear Power [10]



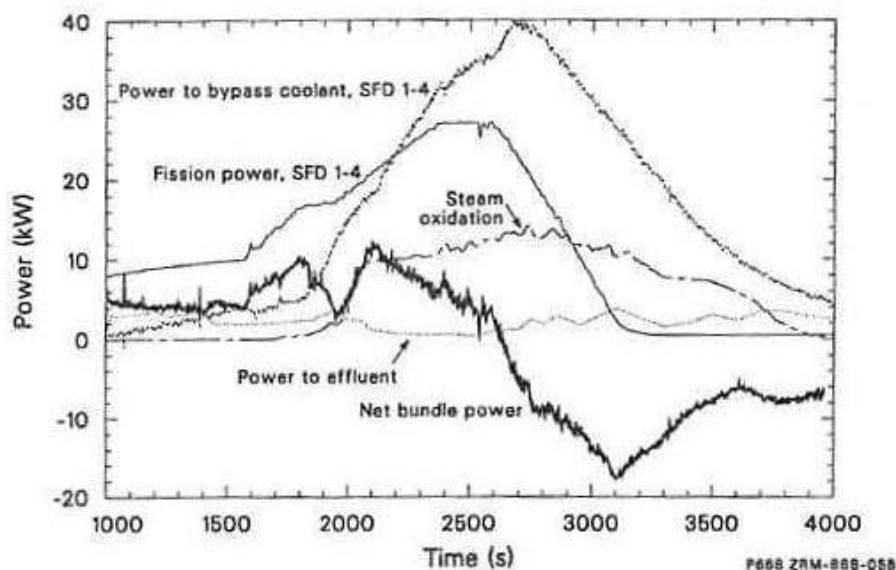
ความดันของสารหล่อเย็นอยู่ที่ 6.95 MPa ซึ่งการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้าในมัดเชื้อเพลิงถูกทำให้ลดลง 0.6 g/s ขณะที่กำลังการเกิดฟิชชันในมัดเชื้อเพลิงถูกทำให้เพิ่มขึ้นทีละน้อยและลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งมัดเชื้อเพลิงแห้งผาก ความร้อนเพิ่มขึ้น เกิดการแตกของปลอกหุ้มเชื้อเพลิงและเกิดออกซิเดชัน ด้วยการรักษากำลังในการเกิดฟิชชันและความร้อนจากการเกิดออกซิเดชัน อุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เซอร์คาลอยและแท่งควบคุมเกิดการหลอมละลาย เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งหรือแก๊สเป็นของเหลว ( Fuel liquefaction ) เกิดการย้ายตำแหน่งของวัสดุ การปล่อยไฮโดรเจน ละอองลอยและผลผลิตฟิชชัน การวัดได้สิ้นสุดลงในช่วงหลังจาก 2100 s ด้วยการลดกำลังในเครื่องปฏิกรณ์อย่างช้าๆและระบายความร้อนบริเวณมัดเชื้อเพลิงที่เกิดความเสียหายด้วยแก๊สอาร์กอน ในส่วนขอบเขตเงื่อนไขทางตรงและ Fission Power, Power to bypass coolant, Steam oxidation power และ Net Bundle power ของการทดลอง SFD 1-4 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 31 และ 32 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีขอบเขตเงื่อนไขในเรื่องข้อมูลระดับน้ำที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1 ต่อไป

ตารางที่ 14 แสดงค่าขอบเขตเงื่อนไขอุณหภูมิขาเข้า อัตราการไหลขาเข้าและความดัน

Boundary condition	Inlet temperature (K)	Inlet mass flow rate (Kg/s)	Pressure (MPa)
Bundle	530	2.60	6.98
Bypass	530	2.60	8.00



รูปที่ 31 ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรง



รูปที่ 32 แสดง Fission Power, Power to bypass coolant, Steam oxidation power และ Net Bundle power SFD 1-4 [10]

### 3.5.3 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินผลการทดลองของการทดลอง PBF SFD 1-4 โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมกับผลการทดลองจริง (Experimental results) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, SCDAP/RELAP MOD3.2 และโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 ตัวแปรที่สนใจในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่เป็นการร่วมกันของทั้งของเหลวและของแข็ง (Interface water level) อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding temperatures) การเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen production) การกระจายอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์ (Temperature distribution) และระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level)

ตารางที่ 15 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์

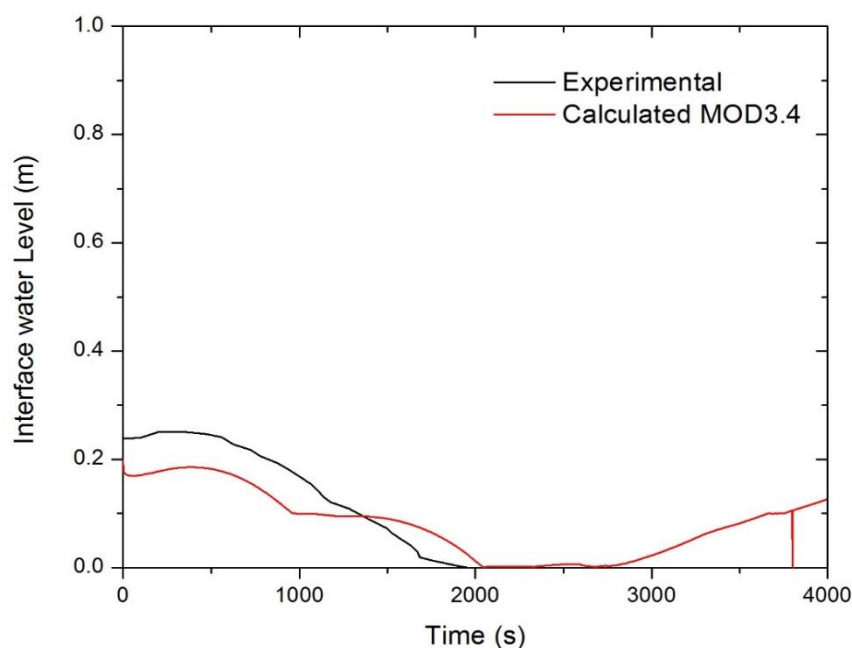
ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์	รายละเอียด	พารามิเตอร์
ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์	คำนวณตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง	voidf
อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง	คำนวณที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร	cadct
อุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์	คำนวณบริเวณ shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.54 เมตร outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.50 เมตร (90°) และ shroud mid-wall ที่ระดับความสูง 0.91 เมตร	cadct
อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน	คำนวณเป็นอัตราการเกิดไฮโดรเจน (kg/s) และไฮโดรเจนสะสม (kg)	bgth
ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิง	คำนวณที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร ทั้งหมด 7 ส่วนประกอบ	damlev

## บทที่ 4

### ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้แสดงรายละเอียดของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยใช้การทดลอง SFD 1-4 ในการจำลองพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลจากการทดลองจริงและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, SCDAP/RELAP MOD3.2, SCDAP/RELAP MOD3.3 และโปรแกรม MELCORE โดยแสดงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้ได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level) อุณหภูมิของเชื้อเพลิง (Fuel temperature) ปลายเชื้อเพลิง (Cladding temperature) โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (Shroud) อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน และระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states)

#### 4.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level)

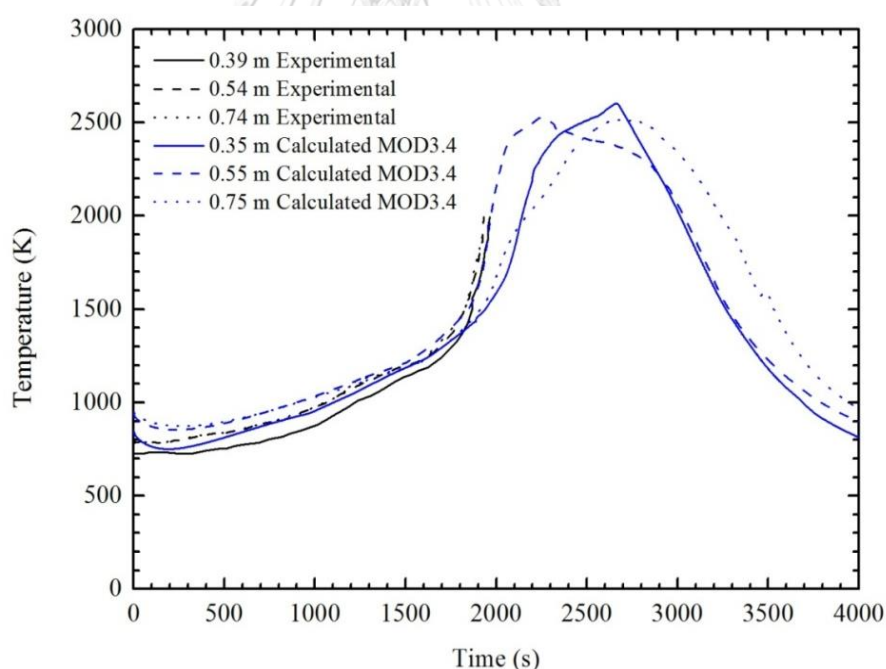


รูปที่ 33 การเปรียบเทียบผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์

รูปที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ระหว่างผลการทดลองกับผลที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เป็นส่วนที่เป็น liquid phase โดยระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์นี้มีความสำคัญในการคำนวณอุณหภูมิเป็นอย่าง

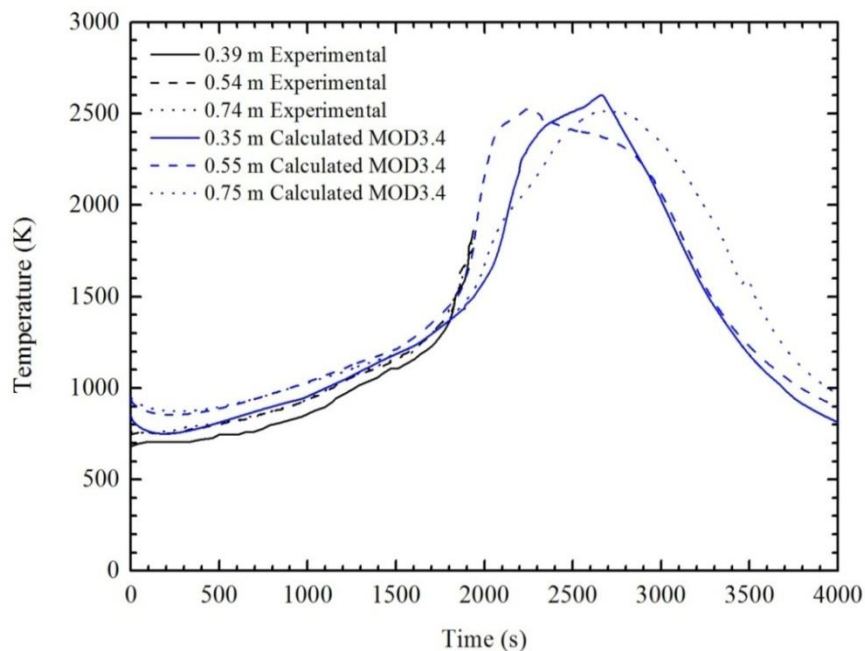
มาก จะเห็นได้ว่าผลจากการทดลองสามารถวัดค่าได้แค่ในช่วงเริ่มต้นการทดลองไปจนถึงช่วง 2000 วินาที หลังจากนั้นเครื่องมือไม่สามารถวัดค่าได้หรือค่าที่ได้อาจเป็นศูนย์ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถวิเคราะห์ที่ได้ตั้งแต่ต้นจนจบการทดลอง จากการคำนวณผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 พบว่าค่าที่ได้มีผลของระดับน้ำเกินกว่าการทดลองจริงในช่วง 1400 ถึง 2000 วินาที ประมาณ 15% และระดับน้ำลดลงมาต่ำสุดอีกครั้งในช่วง 2100 วินาที ในช่วง 2000 วินาทีถือเป็นช่วงที่อุณหภูมิในแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูงสุด ส่งผลให้ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ลดต่ำลง ความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณนี้อาจจะเกิดจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองหรือมีการระบุระดับน้ำในข้อมูลขาเข้าไม่เหมาะสม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้พยายามกำหนดขอบเขตระดับน้ำในข้อมูลขาเข้าที่ระบุไว้ในการทดลอง แต่เกิดปัญหาบางประการที่ทำให้ข้อมูลขาเข้าที่ใช้รันไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งข้อมูลขาเข้าของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์นี้จำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดต่อไปในอนาคต

#### 4.2 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Cladding)



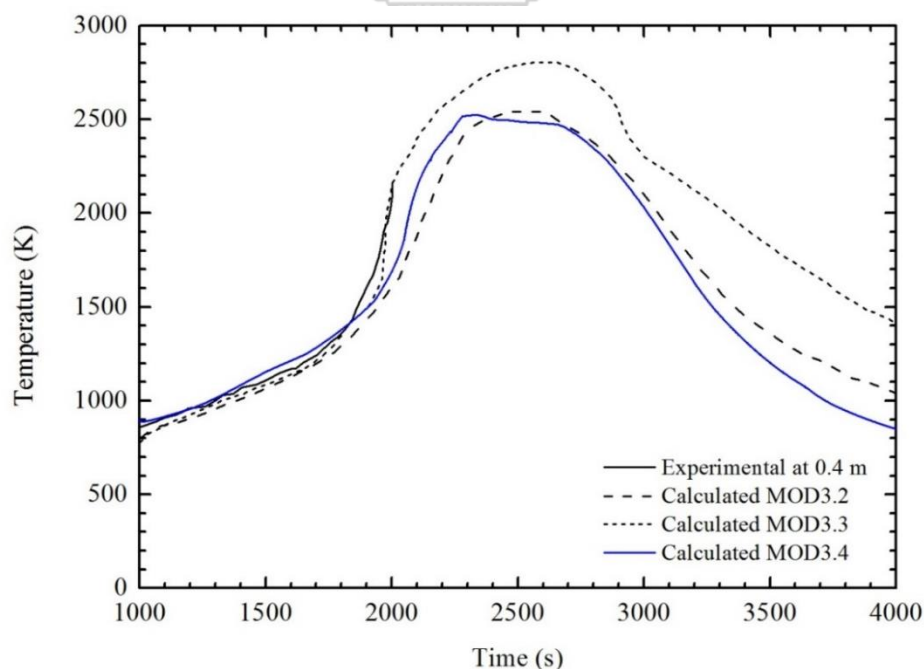
รูปที่ 34 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงบริเวณ inner surface cladding Rod 3B ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร

รูปที่ 34 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปลอกเชื้อเพลิงที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง SFD 1-4 ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร บริเวณพื้นผิวด้านในปลอกเชื้อเพลิง Rod 3B ในการทดสอบพบว่า เทอร์โมคัปเปิลสามารถบอกค่าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นได้ดีและแม่นยำถึงแค่ช่วง 1950 s แต่เมื่ออุณหภูมิเกิน 2000 K หรือหลังจาก 2000 วินาที เทอร์โมคัปเปิลก็ไม่สามารถบอกค่าอุณหภูมิได้ เนื่องจากเกิดความเสียหายจากความร้อนที่สูงเกินไป อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่ทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการออกซิเดชัน ในทางตรงกันข้าม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถคาดการณ์ผลลัพธ์ในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ เนื่องจากได้มีการปรับปรุงโมเดลและ input code ใหม่ เพื่อให้สามารถคำนวณผลบริเวณปลอกเชื้อเพลิงและชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ต้องการวิเคราะห์ได้ โดยจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง ผลการคำนวณอุณหภูมิด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 บริเวณ inner surface cladding Rod 3B มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง SFD 1-4 ที่ระดับความสูง 0.54 เมตร ผลการคาดการณ์ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ตรงกับข้อมูลจากการทดลอง และใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าที่ระดับความสูงอื่นๆ ในกราฟนี้ อัตราการคำนวณความร้อนที่ 0.74 เมตร มีข้อจำกัด เนื่องจากสภาวะการลดปริมาณของไอน้ำ (steam starvation)

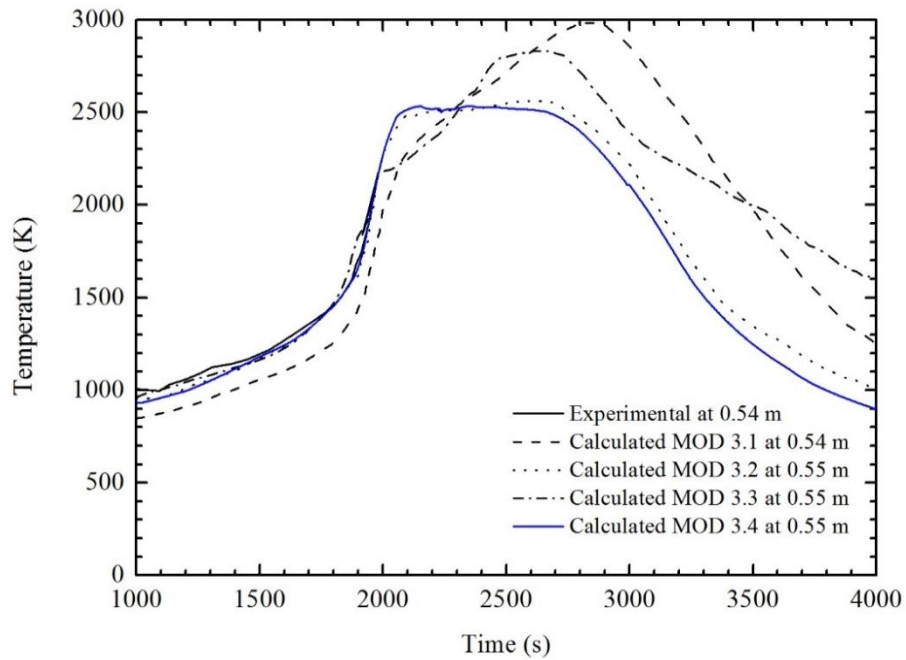


รูปที่ 35 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงบริเวณ inner surface cladding Rod 4D ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร

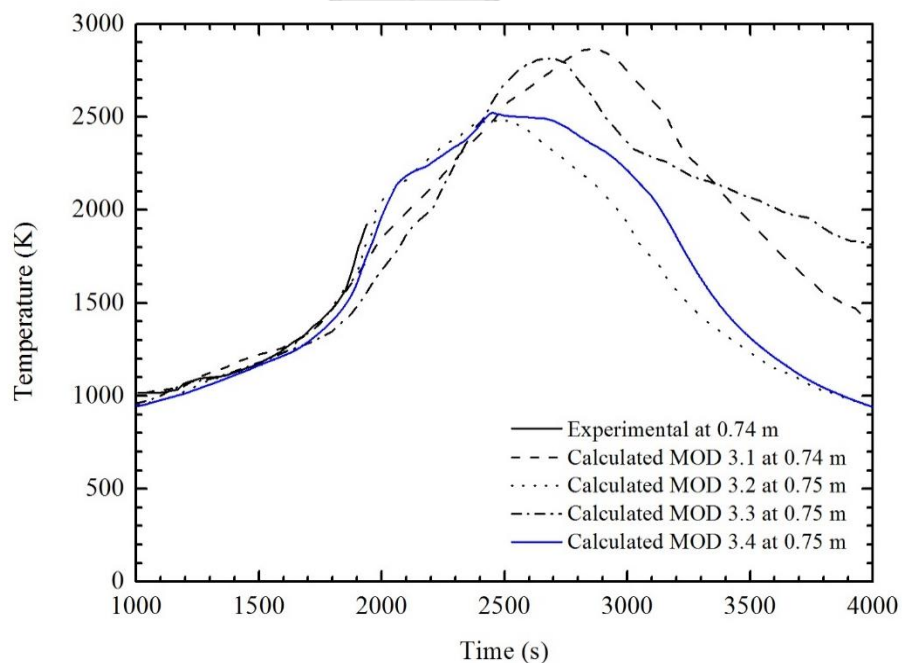
รูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวด้านในของ Cladding Rod 4D ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร ที่ระดับความสูง 0.54 และ 0.74 เมตร ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความสูง 0.39 เมตร จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการคาดการณ์พฤติกรรมของเชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความแม่นยำและสามารถประเมินค่าหลังจากที่เทอร์โมคัปเปิลเกิดความล้มเหลวได้ เนื่องจาก RELAP/SCDAPSIM สามารถคาดการณ์ค่าอุณหภูมิสำหรับชุดทดสอบเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 2000 K โดยในโมเดลได้นำเอากรณีศึกษาจากการเกิดอุบัติเหตุ เช่น TMI-2 การนำเอาผลจาก Loss of Fluid Test, Phebus FP Experiments, NRU FLHT Experiments, ACRR DF Experiments และ CORA Experiments เป็นต้น มาปรับปรุงโมเดลของ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ดังนั้นจึงสามารถเชื่อถือผลที่เกิดหลังจาก 2000 K ได้ แต่ควรจะมีการยืนยันโดยการทดลองกับ MOD3.5 และ MOD4 อีกครั้ง เนื่องจากได้เพิ่มเติมในเรื่องการออกแบบและการวิเคราะห์โมเดล เช่น European SA research programs, Phebus FP, KIT Quench และ Russian Parameter experimental programs นำข้อมูลมาปรับปรุงในการวิเคราะห์ผล ที่น่าจะให้ความแม่นยำในการให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองหลังจากเกิดความล้มเหลวของเทอร์โมคัปเปิลได้มากกว่า



รูปที่ 36 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.4 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4



รูปที่ 37 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.54 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.1, MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4



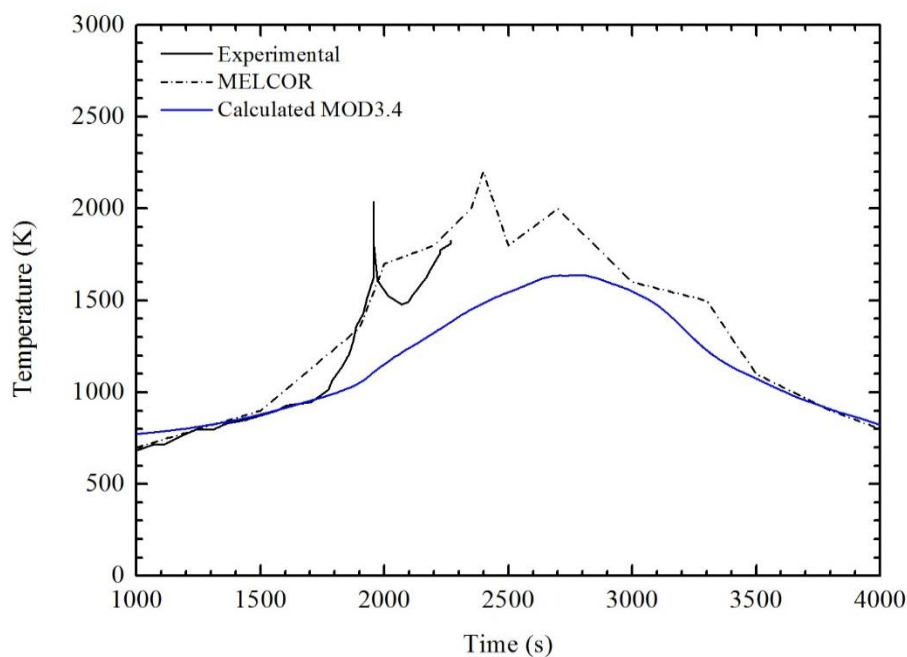
รูปที่ 38 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.74 เมตร ระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.1, MOD3.2, MOD3.3 และ MOD3.4



รูปที่ 36, 37 และ 38 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปลอกเชื้อเพลิงที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ที่ระดับความสูง 0.4, 0.54 และ 0.74 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากคำนวณด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เวอร์ชันอื่นๆ ผลการคาดการณ์อุณหภูมิของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ในรูปที่ 36 ที่ระดับความสูง 0.4 เมตรเริ่มตั้งแต่วินาทีที่ 1000-1400 ผลจาก RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, MOD3.2 และ MOD3.3 โดยเวอร์ชันอื่นๆ ให้ค่าที่ต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ช่วงวินาทีที่ 1400-1800 โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ผลการคำนวณที่สูงกว่าการทดลองจริงเล็กน้อย และให้ค่าที่ต่ำกว่าการทดลองจริงหลังวินาทีที่ 1800 ในรูปที่ 37 ที่ระดับความสูง 0.54 ผลจาก RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เริ่มตั้งแต่วินาทีที่ 1000-1400 ให้ผลต่ำกว่าการทดลองจริง แต่หลังจากวินาทีที่ 1400 เป็นต้นไปผลที่ได้จากโปรแกรมมีความใกล้เคียงกับการทดลองอย่างเห็นได้ชัดเจน เช่นเดียวกับ MOD3.2 และ MOD3.3 ยกเว้น MOD3.1 ที่ให้ค่าต่ำกว่าการทดลองจริง และในรูปที่ 38 ที่ระดับความสูง 0.74 ผลจาก RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เริ่มตั้งแต่วินาทีที่ 1000-1400 ให้ผลต่ำกว่าการทดลองจริง แต่กลับมาใกล้เคียงกับการทดลองอีกครั้งในช่วงวินาทีที่ 1400-1700 หลังจาก 1700 วินาที ให้ผลต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ จากกราฟที่ได้พบว่า MOD3.2 ให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลที่ได้ ทำให้ทราบว่าอาจจะมีบางโมเดลใน RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ที่ต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติม เช่น โมเดล Heat structure หรือโมเดล cross flow ที่อาจจะเป็นผลทำให้ได้ผลที่ไม่สอดคล้องกันในช่วงของการทดลอง

จากการทดลองพบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิบริเวณปลอกเชื้อเพลิงที่แต่ละระดับความสูงมีความสัมพันธ์กัน ช่วงกลางของมัดเชื้อเพลิงเกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับผลของ axial power ที่สูงขึ้น ความร้อนเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1800 วินาที สอดคล้องกับอัตราการเกิดออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งไอน้ำที่มัดเชื้อเพลิงระเหยไปจนหมด ในช่วงอุณหภูมิสูงสุดของมัดเชื้อเพลิง ประมาณ 1700 K ที่ 1900 วินาที ระหว่าง 1900-2800 วินาที

### 4.3 โครงท่หุ้มแกนปฏิกรณ์ (Shroud)

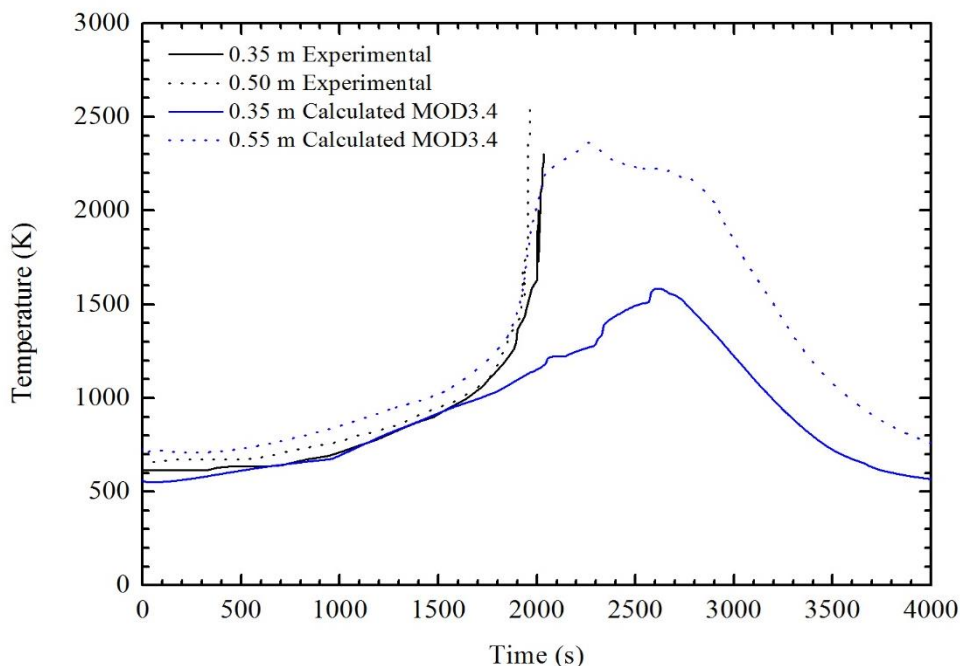


รูปที่ 39 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่หุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.54 เมตร

รูปที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของ shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.54 เมตร เปรียบเทียบผลที่ได้จาก MELCOR และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 กับข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง ผลการคำนวณจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 แสดงให้เห็นว่าหลังจากช่วง 1750 วินาที กราฟมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ในทางตรงกันข้ามผลที่ได้จาก MELCOR มีแนวโน้มที่สูงกว่าผลจากการทดลองจริงในช่วง 1500-1900 วินาที และกลับมาใกล้เคียงในช่วง 1800-2000 วินาที ความไม่แน่นอนในการทำนายผลใน shroud inner liner เกิดขึ้นเนื่องจากรัศมีของฉนวนที่มีขนาดใหญ่เกินไป และอีกปัจจัยหนึ่งคือการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในข้อมูลขาเข้าที่มีที่ป้อนข้อมูลระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ไม่สอดคล้องกัน โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะการใส่ข้อมูลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ของการทดลอง SFD ST ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องการประกาศตัวแปร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การทำนายผลมีความผิดพลาดได้

อุณหภูมิที่โครงท่หุ้มแกนปฏิกรณ์ด้านใน (shroud inner liner) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของ steam starvation ที่ด้านบนของมัดเชื้อเพลิง อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการให้ความร้อน (Heating rate) สัมพันธ์กับการเพิ่มการไหลของอาร์กอน ที่ 1966 วินาที และการ

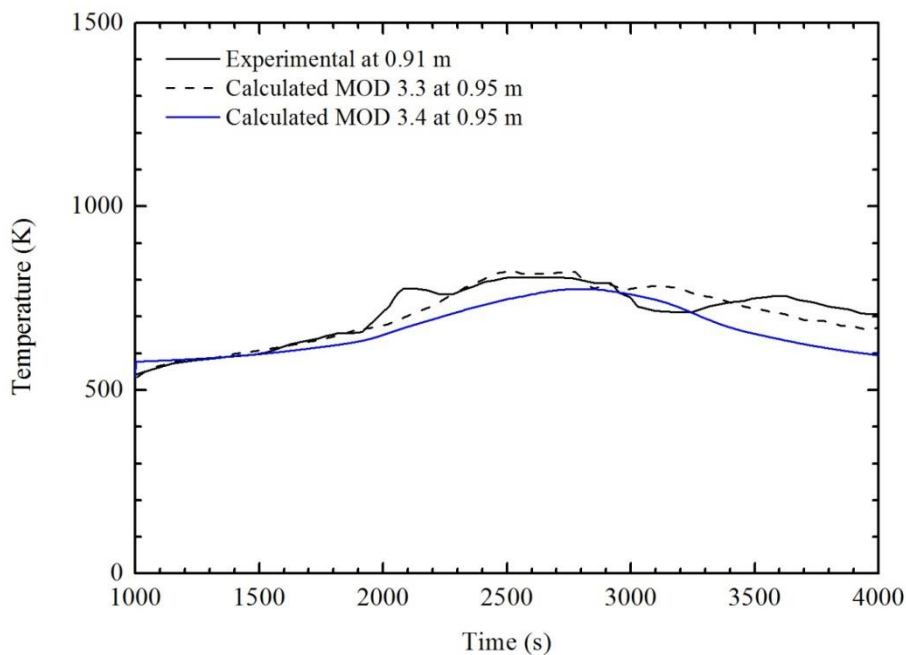
เคลื่อนย้ายตำแหน่งของ U-Zr-O ที่ 2500 วินาที รวมถึงการหลอมละลายและการย้ายตำแหน่งของ  $\text{UO}_2$  และ  $\text{ZrO}_2$  ที่ 2800 วินาที



รูปที่ 40 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.50 เมตร ( $90^\circ$ )

รูปที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่โครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ด้านนอก (outside of the shroud inner liner) ที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.50 เมตร ( $90^\circ$ ) เทอร์โมคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิที่ด้านนอกที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.50 เมตร เกิดความล้มเหลวเมื่อเวลาผ่านไปเกิน 2000 วินาที แนวโน้มที่คาดการณ์มีความคล้ายกับข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร อุณหภูมิที่คำนวณได้จากโปรแกรมสูงกว่าการทดลองจริงเล็กน้อยในช่วงวินาทีที่ 0-500 หลังจากนั้นก็กลับมาใกล้เคียงอย่างเห็นได้ชัดและให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริงที่ได้จากการวัดในช่วงหลัง 2000 วินาที ในขณะที่ความสูง 0.50 เมตรอุณหภูมิที่คำนวณได้ให้ค่าที่สูงกว่าการทดลองเล็กน้อยและกลับมาใกล้เคียงหลังวินาทีที่ 1800 ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นผลมาจากโมเดลที่แก้ปัญหาในเรื่องปลอกเชื้อเพลิงที่อาจจะยังไม่มีเพิ่มเติมในเรื่องการวิเคราะห์ผล และผลที่ได้นี้อาจเกิดจากการคำนวณผลที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับความสูง 0.35 เมตร อาจเกิดการหลอมละลายและย้ายตำแหน่งของเศษวัสดุต่างๆ ทำให้โมเดลที่ออกแบบกับผลที่ได้การวัดจริงมีความแตกต่างกัน อีกประการหนึ่งคือผลการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 33 มีความไม่สอดคล้องกับผล

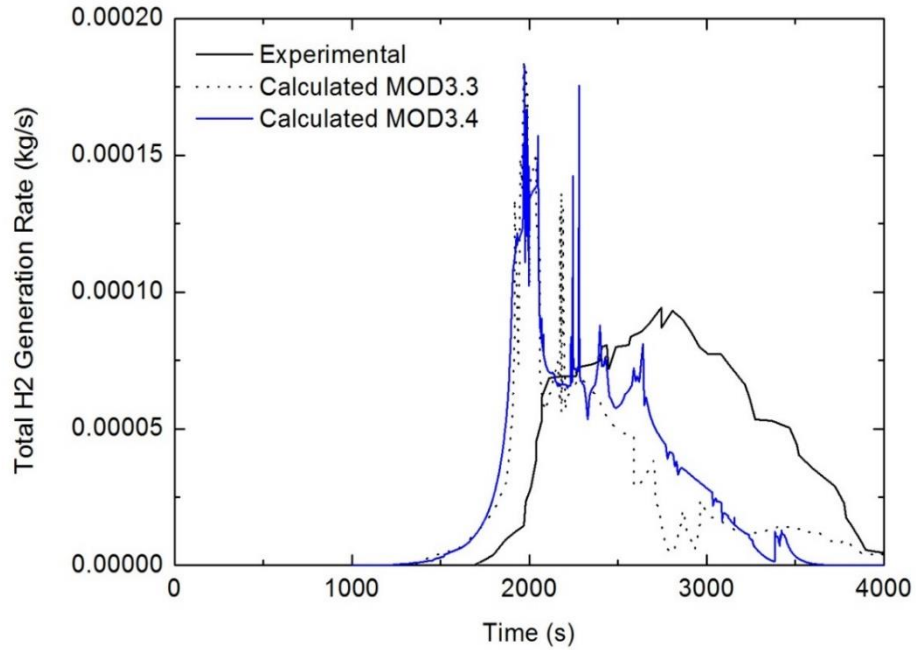
การทดลอง เมื่อวิเคราะห์ระดับน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ในแกนปฏิกรณ์นี้พบว่าระดับน้ำส่งผลให้การคำนวณค่าอุณหภูมิที่โครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์มีความคลาดเคลื่อนไป ผู้วิจัยได้พยายามตรวจสอบข้อมูลขาเข้าและทดลองกำหนดการป้อนข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขตาม การทดลอง SFD ST [6] แต่ข้อมูลขาเข้ายังไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งประเด็นนี้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียดต่อไป



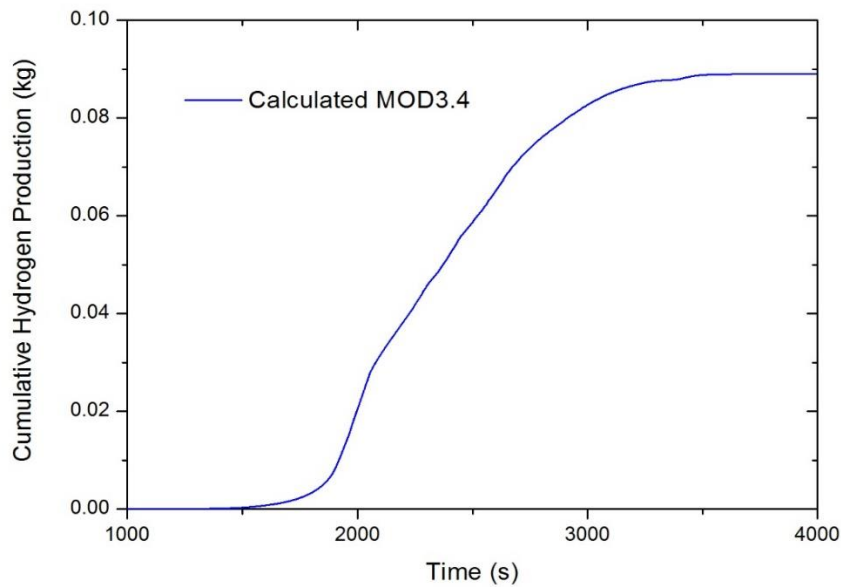
รูปที่ 41 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ shroud mid-wall ที่ระดับความสูง 0.91 เมตร

รูปที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่าง SCDAP/RELAP MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ใน shroud mid-wall ที่ระดับความสูง 0.91 เมตร ผลที่ได้จาก RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีแนวโน้มที่น่าพอใจในระยะเริ่มแรกและในช่วงระยะเวลา 1500-3000 วินาที การทำนายอุณหภูมิที่ผนังตรงกลางที่ระดับความสูง 0.95 เมตรไม่สอดคล้องกับข้อมูลจริงที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลในการทดลอง เนื่องจากในการทดลองจริงนั้นเทอร์โมคัปเปิลวัดค่าที่ระดับความสูง 0.91 เมตร จึงทำให้ค่าที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลจากการใช้โปรแกรมคำนวณ จึงจำเป็นต้องใช้การประมาณค่า (interpolation) มาช่วยในการวิเคราะห์อุณหภูมิบริเวณปลอกเชื้อเพลิงและโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์

#### 4.4 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Production)



รูปที่ 42 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอัตราการเกิดไฮโดรเจน



รูปที่ 43 ผลการทดลองการเกิดไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

รูปที่ 42 และรูปที่ 43 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราการเกิดไฮโดรเจนและการเกิดไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก

โปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากผลการคำนวณของโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 พบว่าปริมาณไฮโดรเจนจำนวนมากเกิดขึ้นในช่วง 2,100 ถึง 3,400 วินาที ผลการคำนวณให้ค่าที่ต่ำกว่าผลการทดลองจริงในช่วงเริ่มต้น และให้ค่าสูงกว่าความเป็นจริงในช่วงหลัง 2,500 วินาที จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 มีแนวโน้มไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และข้อมูลที่วัดได้จริง ขณะที่ผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ค่าที่มีความใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 เห็นได้จากผลที่ได้จากการวัดในการทดลอง โดยจากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดไฮโดรเจนเกิดขึ้นจำนวนมากในช่วง 2,000 ถึง 2,300 วินาที มีเพียงผลการคำนวณในช่วงหลัง 2,500 วินาที เท่านั้นที่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ค่าที่มากกว่าผลที่ได้จากการทดลองจริง ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3, RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และข้อมูลที่วัดได้จริง แสดงให้เห็นว่าการผลิตไฮโดรเจนส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 1,000 วินาที เมื่อเริ่มเกิดการออกซิเดชันและเกิดการหลุดตัวของปลอกเชื้อเพลิง อัตราการเกิดไฮโดรเจนที่คำนวณได้มีค่าลดลง ความแตกต่างของอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่คำนวณได้ระหว่างโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่ง downstream ของอุปกรณ์วัด รูปที่ 43 แสดงการเกิดไฮโดรเจนสะสม ผลที่ได้จากการวัดมีค่า  $0.086 \pm 0.012$  kg โดยวิเคราะห์ผลจาก collection tank โปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2 ให้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.094 kg โปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 ให้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.081 kg และโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.089 kg จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 และ MOD3.4 มีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดจากการทดลองมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดความร้อนในการผลิตไฮโดรเจน ยังมีปริมาณไฮโดรเจนจำนวนมาก ยิ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิดเนื่องจากไฮโดรเจนมีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถรั่วไหลและกระจายตัวได้ง่าย หากไฮโดรเจนผสมกับอากาศในปริมาณที่เหมาะสมอาจเกิดการจุดระเบิดและเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยการใช้พลังงานต่ำ ปลอกเชื้อเพลิงที่ร้อนสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำและปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมาได้อีก

#### 4.5 ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states)

การเกิดความเสียหายในมัดเชื้อเพลิงเป็นผลมาจากการหลอมละลายและการย้ายตำแหน่ง การเกิดออกซิเดชันที่เซอร์คาลอยและ fuel liquefaction จากการทดลอง bundle damage ใช้

วิธีการตรวจสอบ คือ Metallographic Examination และ Neutron radiography ซึ่งเป็นการตรวจสอบทางโลหะวิทยาที่นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ความเสียหาย

Metallographic Examination

- ตรวจสอบหลังจบการทดลอง
- ตรวจสอบส่วนที่เกิดการ oxidation ของโลหะ
- ตรวจสอบผิวที่มีการแตกหักโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
- การศึกษาโครงสร้างมหภาค ( Macrostructure) ถ่ายภาพที่กำลังขยายต่ำ (< 25 เท่า) ทำให้เห็นลักษณะภาพโดยรวมชิ้นงาน

ทำให้เห็นลักษณะภาพโดยรวมชิ้นงาน

- การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงกว่า 25-1,000เท่า ทำให้เห็นถึงลักษณะชนิดของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ

Neutron radiography

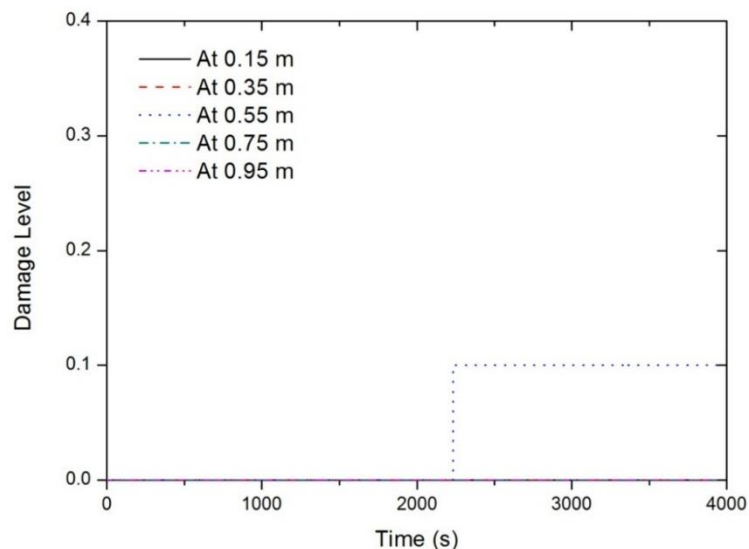
- ตรวจสอบหลังจบการทดลอง
- ตรวจสอบการ relocation ของวัสดุ

จากการทดลองพบความเสียหายในมัดเชื้อเพลิง 4 region คือ ด้านบนเชื้อเพลิง (เกิด rubble bed of fuel fragment) ขยายออกตั้งแต่ระดับ 0.95 เมตรลงไปถึง 0.6 เมตร ตรงกลางมัดเชื้อเพลิง ตั้งแต่ 0.6 เมตรถึง 0.3 เมตร ซึ่งเกิดความเสียหายรุนแรงสุด บางส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงหลอมละลาย Molten ceramic สะสมตัวอยู่ด้านล่างที่ระดับความสูง 0.3 เมตรถึง 0.17 เมตร Metallic melt ได้แก่ zircaloy , stainless steel, control rod และ spacer grid ซึ่งระดับความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงก็ยิ่งมากขึ้น อีกทั้งความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงยังขึ้นกับความดันภายในยิ่งความดันสูงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายยิ่งเพิ่มขึ้น โดยระดับการเกิดความเสียหายได้มีการแบ่งระดับไว้ ดังตารางที่แสดงด้านล่างนี้

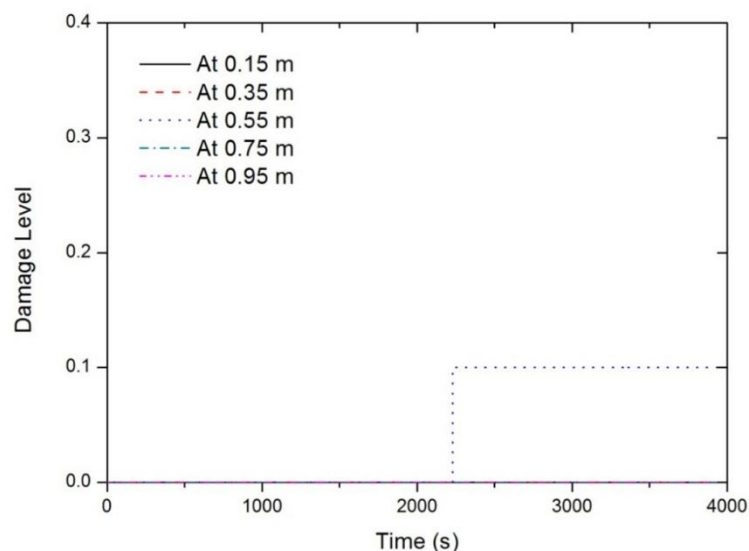
ตารางที่ 16 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง

ระดับความเสียหาย	ลักษณะการเกิดความเสียหาย
0.0	Intact geometry
0.1	Rupture due to ballooning
0.2	Rubble (fragmented)

ระดับความเสียหาย	ลักษณะการเกิดความเสียหาย
0.4	Cohesive debris
1.0	Molten pool



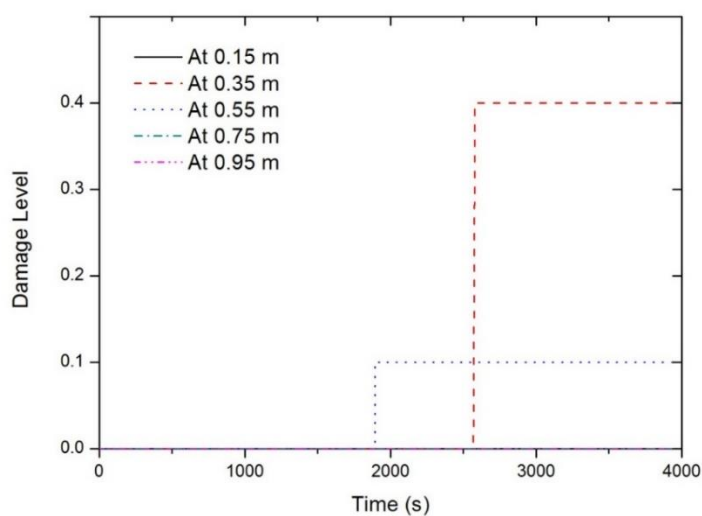
รูปที่ 44 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 1 Irradiated rods, inner ring ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร



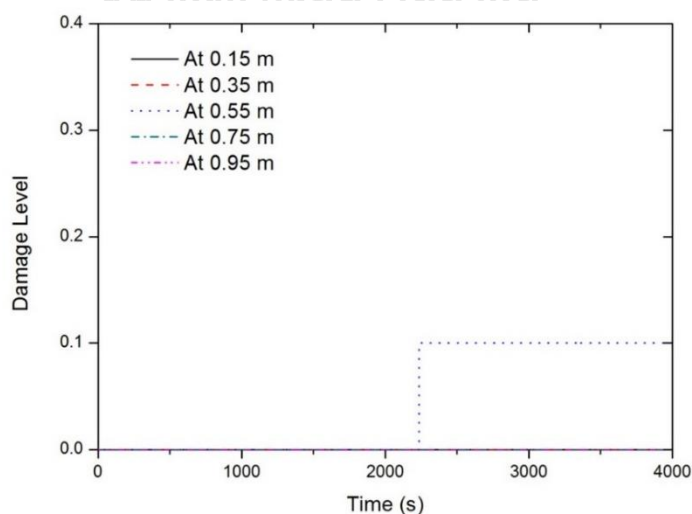
รูปที่ 45 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 2 Fresh rod3B ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร



รูปที่ 44 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 1 นั่นคือ irradiated rods, inner ring จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.75 และ 0.95 เมตร ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระดับความสูง 0.55 เมตร โดยเริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนถึงที่ 2230 วินาที เกิดรอยแตกเนื่องจากการบวมหรือพองของเชื้อเพลิง รูปที่ 45 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 2 นั่นคือ Fresh rod3B จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.75 และ 0.95 เมตร ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระดับความสูง 0.55 เมตร โดยเริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนถึงที่ 2232 วินาที เกิดรอยแตกเนื่องจากการบวมหรือพองของเชื้อเพลิง

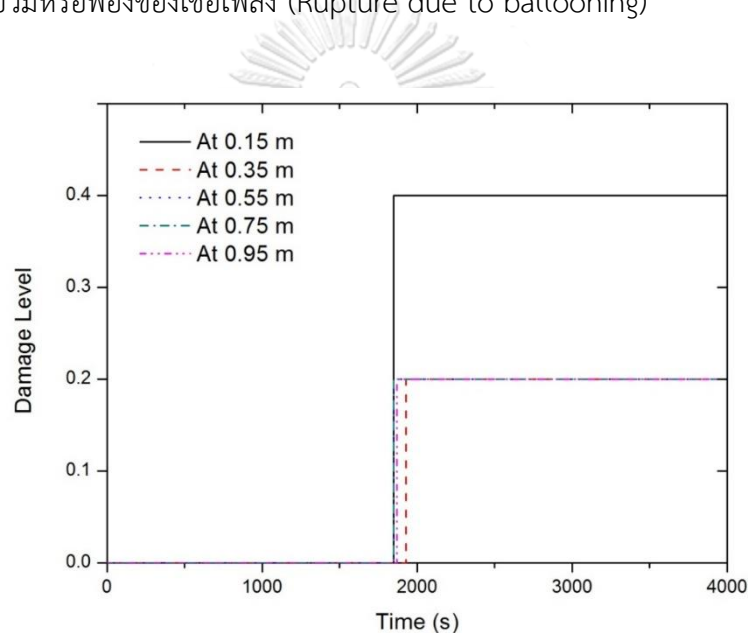


รูปที่ 46 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 3 Fresh rod4D ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร

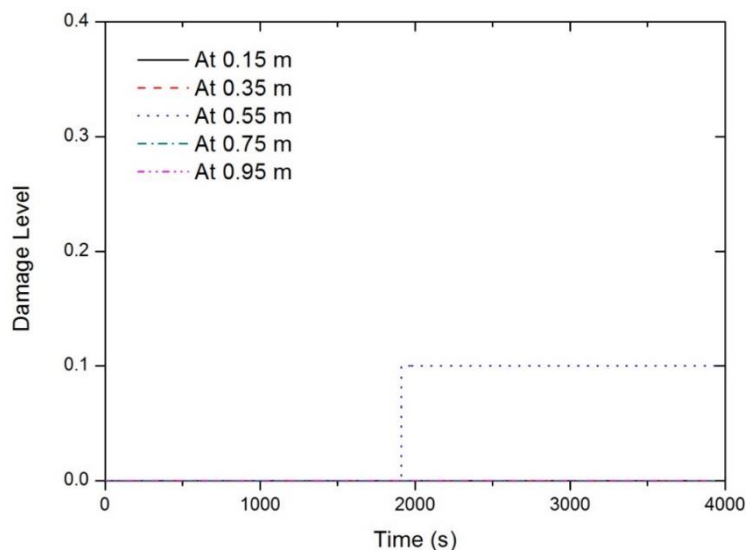


รูปที่ 47 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 4 Irradiated rods, middle ring ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร

รูปที่ 46 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 3 นั่นคือ Fresh rod4D จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูง 0.15, 0.75 และ 0.95 เมตร ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระดับความสูง 0.35 และ 0.55 เมตร โดยที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงที่ 2576 วินาที เกิด Cohesive debris ที่ระดับความสูง 0.55 เมตร เริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาจนถึงที่ 2230 วินาที เกิดรอยแตกเนื่องจากการบวมหรือพองของ เชื้อเพลิง (Rupture due to ballooning) รูปที่ 47 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่ง เชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 4 นั่นคือ Irradiated rods, middle ring จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง ที่ระดับความสูง 0.55 เมตร เท่านั้น เริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนถึงที่ 2236 วินาที เกิดรอยแตก เนื่องจากการบวมหรือพองของเชื้อเพลิง (Rupture due to ballooning)



รูปที่ 48 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 5 Control rods ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร



รูปที่ 49 แสดงผลการเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบที่ 6 Irradiated rods , outer ring ที่ระดับความสูง 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร

รูปที่ 48 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 5 นั่นคือ Control rods จะเห็นได้ว่าที่แท่งควบคุมนี้เกิดการเสียหายที่ทุกระดับความสูง ยกเว้นส่วนประกอบที่ 7 เริ่มที่ระดับความสูง 0.15 เมตร ช่วงเริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนถึงที่ 1848 วินาที เกิด Cohesive debris ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เชื้อเพลิงเกิดความเสียหายจากการแตกเป็นเศษเล็กเศษน้อยของวัสดุ Rubble (fragmented) ที่ 1929 วินาที ที่ระดับความสูง 0.55 และ 0.75 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงที่ 1848 วินาที เชื้อเพลิงเกิดการแตกเป็นเศษเล็กเศษน้อยเช่นเดียวกัน และที่ระดับความสูง 0.95 เมตร เริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงที่ 1870 วินาที เชื้อเพลิงเกิดการแตกเป็นเศษเล็กเศษน้อย ส่วนรูปที่ 49 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบที่ 6 นั่นคือ Irradiated rods , outer ring เกิดการเปลี่ยนแปลงแค่ที่ระดับความสูง 0.55 เมตร เท่านั้น โดยเริ่มต้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงที่ 1909 วินาที เกิดรอยแตกเนื่องจากการบวมหรือพองของเชื้อเพลิง (Rupture due to ballooning) และสุดท้ายคือส่วนประกอบที่ 7 โครงท่หุ้มแกนปฏิกรณ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

สรุปได้ว่าทุกส่วนประกอบเกิดการความเสียหายที่ระดับความสูง 0.3-0.6 เมตร สอดคล้องตามผลการทดลอง ยกเว้น component 7 โครงท่หุ้มแกนปฏิกรณ์ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ความเสียหายของเชื้อเพลิงเกิดมากที่สุดที่ component 5 Control rods เริ่มตั้งแต่ด้านบนที่ระดับความสูง 0.95 เมตร เกิดการแตกเป็นเศษเล็กเศษน้อยและย้ายตำแหน่งลงมาด้านล่างที่ระดับความสูง 0.15 เมตร จนเกิดการเกาะตัวกันของเศษซากวัสดุที่พังลงมาทางด้านบน

### สรุปผลของการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง

ที่ Upper bundle region ด้านบนของเชื้อเพลิง ที่ระดับ 0.95 เมตร ลงมาถึง 0.6 เมตร เกิด rubble bed of fuel fragment เศษซากปลอกเชื้อเพลิงที่หลอมละลาย ปลอกเชื้อเพลิงส่วนใหญ่หลอมละลายและย้ายตำแหน่งมาอยู่บริเวณด้านล่าง เม็ดเชื้อเพลิงแตกละเอียดกลายเป็นเศษเล็กเศษน้อย มีเพียงบางส่วนของเซอร์คาลอยเท่านั้นที่เกิดการออกซิเดชันและเกิดอันตรกิริยากับ  $UO_2$  fuel fragment การเกิดออกซิเดชันของเซอร์คาลอยที่หลอมเหลว แสดงให้เห็นว่าเม็ดเชื้อเพลิงเกิด steam starvation ซึ่งเกิดเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2200K เนื่องมาจากการหลอมละลายของปลอกเชื้อเพลิง ในช่วง mid bundle region เพิ่มพื้นที่การไหลของวัสดุให้ตกลงมาที่ด้านล่างประมาณ 7% เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่ยังเกิดการเปลี่ยนแปลง fuel debris ที่เหลือในระดับความสูงนี้ทำปฏิกิริยากับ molten zircaloy และ transition metal oxide เช่น  $Fe_3O_4$  กลายมาเป็น liquid phase บางส่วนติดอยู่กับเศษซากต่างๆ อุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 2800 K

ที่ Mid bundle region ตรงกลางเม็ดเชื้อเพลิงจากช่วง 0.3-0.6 เมตร เกิดความเสียหายขั้นรุนแรง แต่ยังเหลือ fuel pellet และเศษเชื้อเพลิงที่ละลายแล้วบางส่วน และมีเพียง 10% ของปลอกเชื้อเพลิงเท่านั้นที่ไม่ได้ถูกทำลายไป เซอร์คาลอยที่เหลืออยู่ถูกออกซิไดซ์กลายมาเป็น  $ZrO_2$  และมีเชื้อเพลิงที่หลอมละลายบางส่วนเคลื่อนย้ายตำแหน่ง

ที่ Lower bundle region Molten ceramic materials สะสมตัวอยู่บริเวณด้านล่างของเม็ดเชื้อเพลิง อยู่บริเวณช่วงระดับความสูง 0.3 ลงไปถึง 0.17 เมตร โลหะและเซรามิกเกิดการหลอมละลายจากด้านบน หลังจากเกิดออกซิเดชันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการละลายของ  $ZrO_2$  และ  $UO_2$  การหลอมละลายของเซรามิกหลังจากเกิดออกซิเดชันก็เกิดขึ้นบริเวณนี้เช่นเดียวกัน แต่ไม่ได้มีการทำอันตรกิริยากับ  $ZrO_2$  อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1900-2200 K

## 4.5 สรุปผลการคำนวณ

### 4.5.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level)

จากรูปที่ 33 จะเห็นได้ว่าผลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยในช่วงที่อุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์สูงสุด ผลที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ยังคงมีน้ำเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งตามการทดลองนั้นไม่มีน้ำเหลืออยู่ภายในแกนปฏิกรณ์แล้วเนื่องจากภายในเม็ดเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงส่งผลให้น้ำระเหยไปจนหมด เมื่อทำการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าแล้วพบว่าวิธีการระบุ interface water level ของ SFD 1-4 และ SFD ST มีความแตกต่างกัน โดย SFD 1-4 มีการระบุเงื่อนไขเริ่มต้นตามความดันและอุณหภูมิ ส่วน SFD ST ระบุเงื่อนไขเริ่มต้นตามความ

ต้นและค่า voidfraction เท่านั้น เมื่อพิจารณาที่ Test Train พบว่าเซลล์ 1 และ 2 ค่าอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิอิ่มตัว และระบุสถานะเป็นของเหลว ในขณะที่เซลล์ 3 อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวและมีสถานะเป็นไอ ความแตกต่างของขอบเขตเงื่อนไขเมื่อทำการทดลองปรับให้เท่ากันแล้ว พบว่าเกิดความไม่สอดคล้องกัน โดยระดับน้ำที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สูงกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์จากผลการคำนวณ ระดับน้ำที่มีมากกว่านี้ส่งผลทำให้อุณหภูมิไม่ขึ้นไปในจุดที่ควรจะเป็น เช่นในช่วง 2000 วินาที ในผลการคำนวณที่เปรียบเทียบผลการทดลองของ อุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร ในรูปที่ 40 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมคำนวณผลได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง จากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองหรือมีการระบุระดับน้ำในข้อมูลขาเข้าไม่เหมาะสมนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การคำนวณบางช่วงเกิดความคลาดเคลื่อนและอาจจะมีผลต่อการคำนวณเรื่องสมดุลความร้อนและมวล เนื่องจากโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์อยู่ติดกับ Test Train ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงโมเดลในส่วนนี้เพื่อให้การคำนวณผลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

#### 4.5.2 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Cladding)

ผลการคำนวณอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความสอดคล้องและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง อาจมีในบางช่วงที่ให้ผลที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าผลจากการทดลองจริง และผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, MOD3.2 และ MOD3.3 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณในช่วงต้นเข้าใกล้กราฟที่ได้จากการทดลองมากกว่า โดยช่วงกลางของมัดเชื้อเพลิงและช่วง 2,000 วินาที เป็นช่วงที่เกิดความร้อนสูงสุดเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน หลังจากนั้นอุณหภูมิก็ตกลงเนื่องจากการระบายความร้อนโดยการใส่อาร์กอนเข้าไปในระบบและปล่อยให้เชื้อเพลิงเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ผู้วิจัยได้เลือกทดลองและวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง ที่ระดับความสูง 0.39, 0.54 และ 0.74 เมตร เนื่องจากเป็นช่วงที่ทราบข้อมูลจากการทดลองจริงและเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เชื้อเพลิงมากที่สุด จะเห็นได้ว่าหลังจากช่วงที่เกิดความร้อนสูงสุด เครื่องมือวัดไม่สามารถวัดค่าอุณหภูมิหลังจากนี้ได้ แต่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM สามารถทำนายผลหลังจากนั้นได้ ซึ่งผลจากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2 มีค่าใกล้เคียงกับผลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

#### 4.5.3 โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (Shroud)

จากการทดลองได้ทำการคำนวณผลของอุณหภูมิบริเวณ shroud inner liner, outside of the shroud inner liner และ shroud mid-wall พบว่าผลของอุณหภูมิบริเวณโครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกับผลจากการทดลองมากกว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 แต่จะมีช่วงที่ให้ค่าต่ำกว่าการทดลองจริงในช่วง 1,700-2,000 วินาที ผลที่ได้จากโปรแกรม MELCOR ให้ค่าที่ใกล้เคียงมากกว่า RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ความไม่แน่นอนในการทำนายผลนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากรัศมีของฉนวนที่มีขนาดใหญ่เกินไป ประกอบกับผลการคำนวณให้ค่าที่ระดับความสูงที่แตกต่างกันเล็กน้อยกับผลการทดลอง จึงทำให้การทำนายผลมีความผิดพลาดได้ และจากผลการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ในรูปที่ 33 ที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ยังคงมีน้ำเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งตามการทดลองนั้นไม่มีน้ำเหลืออยู่ภายในแกนปฏิกรณ์แล้ว เนื่องจากภายในมัดเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงส่งผลให้น้ำระเหยไปจนหมด โดยระดับน้ำที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สูงกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์จากผลการคำนวณ ระดับน้ำที่มีมากกว่านี้ส่งผลทำให้อุณหภูมิไม่ขึ้นไปในจุดที่ควรจะเป็น เช่นในช่วง 2000 วินาที ในผลการคำนวณที่เปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร จะเห็นได้ว่าโปรแกรมคำนวณผลได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง จากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองหรือมีการระบุดระดับน้ำในข้อมูลเข้าไม่เหมาะสมนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การคำนวณบางช่วงเกิดความคลาดเคลื่อนและอาจจะมีผลต่อการคำนวณเรื่องสมดุลความร้อนและมวล เนื่องจากโครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์อยู่ติดกับ Test Train ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงโมเดลในส่วนนี้เพื่อทำให้การคำนวณผลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

#### 4.5.4 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Production)

อัตราการเกิดไฮโดรเจน (kg/s) และการเกิดไฮโดรเจนสะสม (kg) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความสอดคล้องกับการทดลองในช่วงต้น และมีค่าสูงกว่าการทดลองในช่วงหลัง 2,500 วินาที ค่าที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความแม่นยำมากกว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 ผลการเกิดไฮโดรเจนสะสมที่คำนวณด้วยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2 มีค่า 0.094 kg ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.3 มีค่า 0.081 kg และผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีค่า

0.089 kg โดยผลการวัดจากการทดลองมีค่า  $0.086 \text{ kg} \pm 0.012$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าเวอร์ชันอื่นๆ

ปริมาณไฮโดรเจนมีความสำคัญต่อการทำนายผลการทดลอง อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดความร้อนในการผลิตไฮโดรเจน เมื่อมีปริมาณไฮโดรเจนจำนวนมาก ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิด เนื่องจากไฮโดรเจนมีขนาดเล็กสามารถรั่วไหลและกระจายตัวได้ง่าย หากไฮโดรเจนผสมกับอากาศในปริมาณที่เหมาะสมอาจเกิดการจุดระเบิดและเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยการใช้พลังงานต่ำ ปลอกเชื้อเพลิงที่ร้อนสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำและปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมาได้

#### 4.5.5 ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states)

ผลของระดับความเสียหายที่คำนวณได้พบว่าทุกส่วนประกอบเกิดการความเสียหายที่ระดับความสูง 0.3 ถึง 0.6 เมตร สอดคล้องตามผลการทดลอง ยกเว้น ส่วนประกอบที่ 7 โครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ความเสียหายของเชื้อเพลิงเกิดมากที่สุดที่ ส่วนประกอบที่ 5 แห่งควบคุม เริ่มตั้งแต่ด้านบนที่ระดับความสูง 0.95 เมตร เกิดการแตกเป็นเศษเล็กเศษน้อยและย้ายตำแหน่งลงมาด้านล่างที่ระดับความสูง 0.15 เมตร จนเกิดการเกาะตัวกันของเศษซากวัสดุที่พังลงมาจากด้านบน

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษาและการวิเคราะห์การเกิดอุบัติเหตุ หากทราบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ การเกิดไฮโดรเจน และการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงก็จะทำให้เข้าใจเหตุการณ์หรือแนวโน้มที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จะเห็นได้ว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความสามารถในการทำนายระดับความเสียหายซึ่งไม่มีในผลการทดลอง และยังมีโมเดลอีกหลายส่วนที่เพิ่มเข้ามาดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

ตารางที่ 17 แสดงผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบกับผลการวัดจากการทดลองพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1, MOD3.2 และ MOD3.3

ตารางที่ 17 สรุปผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ตัวแปร	สรุปผลการคำนวณ
ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์	ไม่สอดคล้องกับการทดลอง ในช่วง 1600-2000 วินาที เนื่องจากยังมีน้ำเหลือในแกนปฏิกรณ์เล็กน้อย
อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง	-ช่วง 2,000 วินาที เป็นช่วงที่เกิดความร้อนสูงสุดเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน -หลังจากนั้นอุณหภูมิก็ตกลงเนื่องจากการระบายความร้อนโดยการใส่อาร์กอนเข้าไปในระบบและปล่อยให้เชื้อเพลิงเย็นตัวลงอย่างช้าๆ
อุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์	-ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงมากกว่า MOD3.2 และ MOD3.3
อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน	-ช่วงแรกของการทดลองยังไม่มีเกิดไฮโดรเจนเนื่องจากอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงยังไม่ถึงขีดจำกัด -อัตราการเกิดไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า MOD3.2
ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิง	-ทุกส่วนประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณ mid bundle -เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่แท่งควบคุม -การคำนวณที่บริเวณโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ผิดพลาด



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาบทนี้ประกอบด้วยสรุปผลการประเมินความสามารถในการทำนายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อ้างอิงกับการทดลอง PBF SFD 1-4 และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงงานวิจัยต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำนายความเสียหายของเชื้อเพลิงชั้นรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยใช้การทดลอง 1-4 (SFD 1-4) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมในแกนเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง การทำนายอุณหภูมิ การผลิตไฮโดรเจนและการหลอมเหลวของเชื้อเพลิงภายใน รวมถึงความเสียหายของเชื้อเพลิง ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพการทำนายความเสียหายของเชื้อเพลิงชั้นรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยใช้การทดลอง SFD 1-4 นี้ สามารถนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานและใช้ในการศึกษาอุบัติเหตุระดับรุนแรงในรูปแบบอื่นๆได้

ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เริ่มต้นคือการสร้างข้อมูลขาเข้า (Input desk) เพื่อประมวลผลการทดลอง ผู้วิจัยต้องทำการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขของการทดลอง SFD 1-4 โดยต้องใช้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองจริงประกอบกัน ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลจากกราฟที่เป็นค่าที่วัดได้จากการทดลองจริงมาแปลงเป็นข้อมูลตัวเลขเพื่อสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในข้อมูลขาเข้าได้ หากพบข้อมูลที่ผิดพลาดต้องทำการแก้ไขก่อนที่จะทำการรันโปรแกรมเพื่อคำนวณผล เมื่อทำการแก้ไขข้อมูลขาเข้าให้ถูกต้องแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณผลออกเป็นอยู่ในรูปของข้อมูลจัดเก็บ (Restart file) จากนั้นต้องทำการเขียนข้อมูลขาเข้าเพื่อดึงข้อมูลออกมาเป็นข้อมูลตัวเลขอีกครั้ง แล้วทำการคำนวณโดยโปรแกรมอีกครั้ง โดยเลือกใช้ข้อมูลขาเข้าอันใหม่ทำการเขียนเพื่อดึงข้อมูลกับข้อมูลจัดเก็บของการทดลองมาวิเคราะห์ใหม่ หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณออกมา

การวิจัยพบว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดจากการทดลอง PBF SFD 1-4 และยังสามารถคำนวณผลหลังจากที่เทอร์โมคัปเปิลเกิดความเสียหายได้ อีกทั้งยังสามารถคำนวณผลระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงได้อีกด้วย การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมกับผลการวัดจากการทดลอง ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ปลอกเชื้อเพลิงและโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ การเกิดไฮโดรเจนและการเกิดออกซิเดชันมี

ความความสัมพันธ์และให้ผลที่สอดคล้องกัน ผลการคำนวณอุณหภูมิที่มัดเชื้อเพลิงเกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน จนกระทั่งไอน้ำระเหยไปจนหมด เช่นเดียวกับ axial power ที่สูงขึ้น ผลจากการคำนวณมีความไม่สอดคล้องในช่วงของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์และช่วง 2000 วินาทีของการเกิดไฮโดรเจน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโมเดลเชื้อเพลิงบางส่วน หรืออาจเกิดจากการวัดหรือการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงที่มีการผสมกันของก๊าซในเครื่องแยกก๊าซ (separator) ในระบบ effluent system โดยผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบข้อมูลขาเข้า แล้วพบว่าวิธีการป้อน interface water level ของ SFD 1-4 และ SFD ST มีความแตกต่างกัน โดย SFD 1-4 มีการระบุเงื่อนไขเริ่มต้นตามความดันและอุณหภูมิ ส่วน SFD ST ระบุเงื่อนไขเริ่มต้นตามความดันและค่า void fraction เท่านั้น เมื่อพิจารณาที่ Test Train พบว่าเซลล์ 1 และ 2 ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมัดตัว และระบุสถานะเป็นของเหลว ในขณะที่เซลล์ 3 อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิมัดตัวและมีสถานะเป็นไอ ความแตกต่างของขอบเขตเงื่อนไขเมื่อทำทดลองปรับให้เท่ากันแล้ว พบว่าเกิดความไม่สอดคล้องกัน โดยระดับน้ำที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สูงกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์จากผลการคำนวณ ระดับน้ำที่มีมากกว่านี้ส่งผลทำให้อุณหภูมิไม่ขึ้นไปในจุดที่ควรจะเป็น เช่นในช่วง 2000 วินาทีในผลการคำนวณที่เปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์บริเวณ outside of the shroud inner liner ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร จะเห็นได้ว่าโปรแกรมคำนวณผลได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง การใส่เงื่อนไขเริ่มต้นและการระบุระดับน้ำที่ไม่เหมาะสมนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การคำนวณบางช่วงเกิดความคลาดเคลื่อนและอาจจะมีผลต่อการคำนวณเรื่องสมดุลความร้อนและมวล เนื่องจากโครงท่อหุ้มแกนปฏิกรณ์อยู่ติดกับ Test Train ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงโมเดลในส่วนนี้เพื่อทำให้การคำนวณผลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ยืนยันแล้วว่าโปรแกรม RELAP /SCDAPSIM MOD3.4 มีความสามารถในการทำนายผลการทดสอบ PBF SFD 1-4 ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ผลการคำนวณจาก RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 ทำนายข้อมูลได้สอดคล้องกับการวัดในการทดลองและมีความแม่นยำมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.1 และให้ค่าที่ใกล้เคียงกับโปรแกรม SCDAP/RELAP MOD3.2 และ SCDAP/RELAP MOD3.3 ผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงการในเรื่องการนำความร้อน (Heat conduction) และ thermal conductivity ของโมเดลของแท่งเชื้อเพลิงใน code รวมทั้งการแก้ไขข้อผิดพลาดและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง (Advanced numeric) ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า code เวอร์ชันก่อนหน้านี้ เมื่อมีการเพิ่มความสามารถใหม่ ๆ ลงใน code โปรแกรมสามารถประเมินผลได้อย่างครบถ้วนและถูกต้อง ความสำคัญของการพัฒนาโปรแกรมคือการศึกษา code และแก้ไขโดยศึกษาการจำลองอุบัติเหตุระดับรุนแรงในหลายรูปแบบเพื่อให้มั่นใจว่าโปรแกรมสามารถ

ทำนายพฤติกรรมในเงื่อนไขต่างๆได้และให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนลดความเสี่ยงจากการเกิดอุบัติเหตุทางอ้อมที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเงื่อนไขอุบัติเหตุรูปแบบอื่น เช่น SFD1-1 และ SFD 1-3 ให้ครอบคลุมเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลการศึกษามีความสอดคล้องหรือมีแนวโน้มการเกิดเหตุการณ์ใดขึ้นได้
2. โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จำเป็นต้องมีการพัฒนาโมเดลด้านอื่นๆเพิ่มขึ้น เช่น โมเดล Heat Structures ที่ shroud เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์ผล
3. ควรมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม MELCOR ในส่วนที่เป็นโครงห่อหุ้มแกนปฏิกรณ์ (shroud) ว่ามีการคำนวณผลอย่างไร เพื่อจะได้นำมาปรับปรุงโมเดลในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ต่อไป
4. บริษัท Innovative System Software ได้พัฒนาโปรแกรมอีกหลายเวอร์ชันเพื่อเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในผลการคำนวณและประเมินความแม่นยำในการทำนายผล จึงควรมีการทดลองกับ MOD อื่นๆเช่น MOD3.5 และ MOD4 ด้วย
5. ควรมีจัดอบรมการใช้งานโปรแกรมประเมินอุบัติเหตุเพื่อให้นิสิตในสาขาวิชาได้เข้าใจพฤติกรรมหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์
6. ควรนำการจำลองการเกิดอุบัติเหตุไปประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าจริง เช่น โรงไฟฟ้าในประเทศจีน เนื่องจากหากเกิดอุบัติเหตุขึ้นอาจจะส่งผลมายังประเทศไทยได้
7. ระดับความเสียหายในโปรแกรมและหลักการทางทฤษฎีนั้นยังไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงควรมีการปรับหรือกำหนดค่าให้ไปในทิศทางเดียวกัน
8. ควรมีการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในเรื่อง cross flow และ subchannel analysis ว่าส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณผลของโปรแกรม

## รายการอ้างอิง

- [1] USNRC. Backgrounder on the Three Mile Island Accident. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา แหล่งที่มา <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>. [3/01/2018].
- [2] world-nuclear. Chernobyl Accident 1986. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>. [3/01/2018].
- [3] Y.Joon-eon, “Fukushima dai-ichi accident: lessons learned and future actions from the risk perspectives” Nuclear Engineering and Technology, Volume 46, Issue 1, February 2014, Pages 27-38.
- [4] M. Hashim, Y. Ming and A.Saeed Ahmed, “Review of Severe Accident Phenomena in LWR and Related Severe Accident Analysis Codes,” Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, April 10(2013).
- [5] T.J. Haste, B.Adroguer, U.Brockmeier, P.Hofmann, K.Müller and M.Pezzilli, In-vessel core degradation in LWR severe accidents, PP.3-168, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1996.
- [6] R. Noppawan and R. Somboon, “Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 with severe fuel damage scoping test,” 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11), Gyeongju, Korea, October 9-13(2016).
- [7] L.J. Siefken, Models for the Configuration and Integrity of Partially Oxidized Fuel Rod Cladding at High Temperatures Final Design Report, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA (1999).
- [8] J. Hohorst, RELAP/SCDAPSIM Input Manual MOD 3.4 3.5 & 4.0, pp. 1-284, Innovative System Software, Idaho Falls, Idaho, USA (2012).
- [9] K. Vinjamuri, D.J. Osetek, D.A. Petti and D.H. Meikrantz, Server Fuel Damage Test 1-4 Test Report, pp. 1-27, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA (1987).

- [10] D.A. Petti, Z.R. Martinson, R.R. Hobbins, C.M. Allison, E.R. Carlson, D.L. Hagrman, T.C. Cheng, J.K. Hartwell, K. Vinjamuri and L.J. Seifken, Power Burst Facility (PBF) Server Fuel Damage Test 1-4 Test Result Report, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA (1989).
- [11] SCDAP/RELAP5 Development Team, "SCDAP/RELAP/MOD3.2 Code Manual," Vol. 1-5, NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, (July 1998).
- [12] RELAP5 Code Development Team, "RELAP5/MOD3.3 Code Manual," Vol. 1-8, NUREG/CR-5535 Rev 1 (December 2001).
- [13] C.M. ALLISON and J.K. HOHORST, Re-assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.X using historical integral experiments, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA.
- [14] J. K. Hohorst and C. M. Allison, "An assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 using the Phebus FPT2 bundle heating and melting experiment," Proceedings of ICAPP '05, Seoul, Korea, May 15-19(2005).
- [15] C.M. Allison, L.J. Siefken, J.K. Hohorst and J. Birchley, "Recent improvements in RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 resulting from quench and parameter bundle heating and quenching experiments," 8<sup>th</sup> International conference: nuclear option in countries with small and medium electricity grids, Dubrovnik, Croatia, May 16–20, 2010 pp. 75 (2010).
- [16] A.R. Antariksawan, T. Liu, J. Zmitkova and J. K. Hohorst, "Validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 for research reactor applications," International conference on nuclear engineering, Beijing (China), 16-20 May, Volume. 38, pp. 388 (2005).
- [17] Hiroshi Madokoro, Assessment of RELAP/SCDAPSIM with QUENCH and CORA Analyses, pp. 6-80, The University of Tokyo, Tokyo, Japan (2014).
- [18] A.D. Knipe, S.A. Ploger and D.J. Osetek, PBF Server Fuel Damage Scoping Test-Test Results Report, pp. 1-120, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA (1986).
- [19] Zoel R. Martinson, David A. Petti, Beverly A. Cook, Volume 1: PBF Severe Fuel Damage Test 1-1 Test Results Report, pp. 3-73 , EG&G Idaho Inc., Idaho falls,Idaho,USA (1986).

- [20] Z. R. Martinson, M. Gasparini, R. R. Hobbins, D. A. Petti, C. M. Allison, J. K. Hohorst, D.L. Hagrman, K. Vinjamuri, PBF Severe Fuel Damage Test 1-3 Test Results Report, pp.1-143, EG&G Idaho Inc., Idaho falls, Idaho,USA (1989).
- [21] L. J. Siefken, E. W. Coryell, E. A. Harvego, J. K. Hohorst, Assessment of Modeling of Reactor Core Behavior During Severe Accidents, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, USA (2001).
- [22] C. M. Allison and J. K. Hohorst, "Role of RELAP/SCDAPSIM in Nuclear Safety," Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2010 (2010).
- [23] L.J. Siefken, E.W. Coryell, E.A. Harvego and J.K. Hohorst, SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 Code Manual, pp. A3-17- A3-25, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho falls, Idaho,USA (2001).
- [24] VINCENT J.-P. ROUX, EVALUATION OF RELAP5 REACTOR CORE MODELING CAPABILITY, Master's Thesis, Faculty of science, University of Florida, 2001.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## 1. ตัวอย่างของข้อมูลขาเข้า

= Simple three component system

100 new transnt

102 british british

105 10.0 40.0 200.0

\*

201 20.0 1.0e-6 0.05 3 1 50 2000

\*

20300011 mflowj 120000000 1

20300012 mflowj 127000000 1

\*

1100000 "source" tmdpvol

\* fa l vol azi vert dz rough hyd d flags

1100101 1.0 1.0 0.0 0.0 -90.0 -1.0 0.0 0.0 0000000

\*Time dependent data to be pressure and temperature

1100200 003

\* time press temp

1100201 0.0 150.0 120.0

\*

1200000 "sngljuni" sngljun

\* from vol to vol fa f. loss r. loss flag

1200101 110010002 125010001 0.0 0.0 0.0 0000100

\* flag liq mass flow vap mass flow inter. veloc.

1200201 1 0.0 0.0 0.0

\*

1250000 "stmpipe" pipe

\* no. of vols

1250001 5

\* fa vol no.



1250101 1.0 5

\* l vol no.

1250301 5.0 5

\* az. ang vol no

1250501 0.0 5

\* vt. ang vol no

1250601 -90.0 5

\* rough hyd vol no.

1250801 0.0 0.0 5

\* f loss r loss jun. no.

1250901 0.0 0.0 4

\* vol flag vol no

1251001 0000000 5

\* jun flag jun. no

1251101 0000000 4

\* flag pres temp vol. no.

1251201 3 100.0 90.0 0.0 0.0 0.0 5

\* flag

1251300 0

\* liq. vel vap. vel int. vel jun no.

1251301 0.0 0.0 0.0 4

\*

1270000 "sngljuno" sngljun

\* from vol to vol fa f. loss r. loss flag

1270101 125050002 130010001 0.0 0.0 0.0 0000100

\* flag liq mass flow vap mass flow inter. veloc.

1270201 1 0.0 0.0 0.0

\*

1300000 "sink" tmdpvot

\* fa l vol azi vert dz rough hyd d flags

1300101 1.0 1.0 0.0 0.0 -90.0 -1.0 0.0 0.0 0000000



\*Time dependent data to be pressure and temperature

1300200 3

\* time press temp

1300201 0.0 50.0 90.0

. End of input.

## 2. รายละเอียดของการ์ดที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ชื่อการ์ด (Title card)

ชื่อของการ์ดเป็นการ์ดที่บอกชื่อของไฟล์ซึ่งจำเป็นต้องแสดงในแต่ละการวิเคราะห์ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ในการเขียนการ์ดนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ = ถ้ามีชื่อของการ์ดมากกว่าหนึ่งการ์ดนั้น การสุดท้ายจะถูกใช้ในการคำนวณการข้อมูลขาเข้านี้

### 2.2 การ์ด 100

การ์ด 100 เป็นการ์ดที่บอกถึงชนิดของปัญหาในการวิเคราะห์ (Problem type) รวมทั้งบอกถึงเงื่อนไขอื่นๆ ในการวิเคราะห์ผล (Option)

โดยที่ W1 คือ ชนิดของปัญหาในการวิเคราะห์โดยทำการเลือกหนึ่งชนิดตามนี้คือ new, restart, plot, in-cond, strip หรือ cmpcoms

โดยที่ new คือ กรณีที่เป็นการวิเคราะห์ครั้งใหม่ New simulation problem

restart คือ กรณีที่ต้องการข้อมูลเดิมจากปัญหาที่เคยมีการวิเคราะห์มาก่อนมาแล้ว

plot คือ กรณีที่ต้องการพล็อตผล (Plotting results) จากปัญหาที่เคยมีการวิเคราะห์มาก่อนมาแล้ว

in-cond คือ กรณีที่ต้องการค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของระบบของเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ (Thermal hydraulic)

strip คือ กรณีที่ต้องการข้อมูลผลการทดลองปัญหาที่เคยมีการวิเคราะห์มาก่อนมาแล้ว

cmpcoms คือ กรณีที่ต้องการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างไฟล์ทั้งสองของข้อมูลขาเข้า

W2 คือ บอกถึงเงื่อนไขของชนิดของปัญหา

โดยที่ ถ้า W1 เป็น New หรือ Restart ต้องทำการเลือกระหว่าง stdy-st ถ้าเป็นการวิเคราะห์แบบระบบคงที่ (Steady state) หรือ transnt ถ้าเป็นการวิเคราะห์แบบชั่วคราว (Transient)

ถ้า W1 เป็น strip ต้องทำการเลือกระหว่าง binary ถ้าต้องการให้ข้อมูลออกมาแบบไม่ต้องจัดรูป

กล่าวคือเมื่อทำการดึงข้อมูลออกมาโดยโปรแกรม MS Excel นั้นข้อมูลที่ได้จะปรากฏอยู่แค่

คอลัมน์แรกอย่างเดียว (Unformatted record) หรือ fmtout ถ้าต้องการให้ข้อมูลออกมาโดยที่

ข้อมูลแยกเป็นคอลัมน์ (Same information)

### 1.3 การ์ด 102

การ์ด 102 เป็นการ์ดที่บอกหน่วย (Unit) ของข้อมูลขาเข้า (Input desk) และข้อมูลขาออก (Output) โดยทำการเลือกว่าต้องการหน่วยแบบระบบอังกฤษ (British unit) หรือหน่วย SI (SI unit) ถ้าไม่มีการแสดง Card 102 โปรแกรมจะทำการเลือกให้เป็นหน่วย SI โดยที่ W1 คือ หน่วยของข้อมูลขาเข้า (Input unit)

W2 คือ หน่วยของข้อมูลขาออก (Output unit)

#### 1.4 การ์ด 201 ถึง 299

การ์ด 201 ถึง 299 เป็นการ์ดที่แสดงถึงบอกการควบคุมถึงเวลาในการวิเคราะห์ (Time step control) ซึ่งหน่วยของเวลาในการวิเคราะห์นั้นจะเป็นวินาที (s)

โดยที่ W1 คือ เวลาทั้งหมดในการวิเคราะห์ (Time end)

W2 คือ เวลาการคลาดเคลื่อนในการบันทึกข้อมูล (Minimum time step)

W3 คือ ทุก ๆ ระยะเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล (Maximum time step หรือ Requested time step)

W4 คือ เงื่อนไขการควบคุม (Control option) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ssdt โดยที่ ss คือ สัญลักษณ์แทนค่ามาตรฐานที่สำคัญ (Standard major) โดยใช้ในการควบคุมค่าการแสดงผลของข้อมูลขาออกซึ่งจะบ่งชี้ด้วยค่าของ ss โดยที่ถ้า

ss = 0 ค่าทุกตัวของค่ามาตรฐานที่สำคัญจะปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

ss = 1 ค่าอุณหภูมิของโครงสร้างเชิงความร้อนจะไม่ปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

ss = 2 ค่าในส่วนของลำดับที่สองข้อต่อจะไม่ปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

ss = 4 ค่าในส่วนของลำดับที่สี่ของตัวบรรจุ (Volume) จะไม่ปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

d คือ สัญลักษณ์แทนค่ามาตรฐานของข้อมูลขาออก (Standard output) โดยใช้ในการประกาศค่าพิเศษอื่น ๆ ของข้อมูลขาออก (Extra output) ที่ทุก ๆ เวลาการวิเคราะห์ผลของระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) โดยที่ถ้า

d = 0 ค่ามาตรฐานของข้อมูลขาออกที่ความถี่ที่ถูกกำหนด (Requested frequency) จะใช้เวลาการคลาดเคลื่อนในการบันทึกข้อมูล (Minimum time step) ในการประกาศ

d  $\neq$  0 ค่ามาตรฐานของข้อมูลขาออกจะถูกประกาศที่แต่ละช่วงเวลาต่าง ๆ โดยที่ถ้า

d = 1 ค่าที่ถูกกำหนดให้เป็นส่วนสำคัญ (Major edit) จะถูกประกาศที่ทุกๆ ช่วงเวลา d = 2 ค่าที่ถูกกำหนดให้เป็นส่วนรอง (Minor edits) จะถูกประกาศที่ทุกๆ ช่วงเวลา

d = 4 ค่าที่ถูกกำหนดให้บันทึกและพล็อต (Plot record) จะถูกประกาศที่ทุกๆ ช่วงเวลา

tt คือ การควบคุมช่วงเวลา (Control time step) โดยใช้ในการควบคุมตัวช่วงเวลา โดยที่ถ้า

tt = 0 คือไม่มีความคลาดเคลื่อนในการประเมินค่าการควบคุมช่วงเวลาในการวิเคราะห์ (Time step control) และเวลาการคลาดเคลื่อนในการบันทึกข้อมูล (Minimum time step) จะถูกใช้ในการคำนวณของทั้งระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) และระบบโครงสร้างเชิงความร้อน (Heat structure)

tt = 1 คือการคำนวณของระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) จะเกิดความคลาดเคลื่อนของมวล (Mass error) ในการวิเคราะห์ผลของการควบคุมระหว่างเวลาการคลาดเคลื่อนในการบันทึกข้อมูล (Minimum time step) และทุกๆระยะเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล (Maximum time step)

tt = 2 คือช่วงเวลาของการคำนวณระบบการนำความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเท่ากับช่วงเวลาของการคำนวณระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic)

tt = 3 คือการคำนวณจะถูกควบคุมโดยใช้ช่วงเวลาของการนำความร้อนและช่วงเวลาของระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) ที่เหมือนกัน

W5 คือ ค่าของควมถี่ในการพล็อต

W6 คือ ค่าของควมถี่ของข้อมูลหลัก

W7 คือ ค่าของควมถี่ของข้อมูลเก็บผล

2.5 การ์ด 20300000 ถึง 2030099

การ์ด 20300000 ถึง 20300999 เป็นการ์ดที่มีเพื่อแสดงความประสงค์ในการต้องการพล็อตโดยแทน

สัญลักษณ์เป็นการ์ด 20300nnm ซึ่ง nn คือกราฟลำดับที่ n และ m คือ ลำดับที่ m ของข้อมูลที่ต้องการพล็อต

โดยที่ W1 คือ ชื่อของข้อมูลที่ต้องการพล็อต เช่น

W1 = mflowj คือค่าอัตราการไหลของการรวมกันระหว่างของเหลวและไอ (Combined liquid and vapor flow rate) โดยที่หน่วยเป็น kg/s หรือ lbm/s

W1 = htemp คือค่าอุณหภูมิของจุดรวม (Mesh point temperature) โดยที่หน่วยเป็น K หรือ °F

W1 = cntrlvar คือการกำหนดตัวแปรควบคุมอื่น ๆ (Control variable) เป็นต้น

W2 คือ ชื่อของตัวแปรที่ต้องการพล็อต

W3 คือ ลำดับเลขของแกนที่ต้องการพล็อต

2.6 การ์ด CCC0000, Component name and type

การ์ด CCC0000 เป็นการ์ดที่แสดงถึงชื่อส่วนประกอบ (Component) และชนิดของ

ส่วนประกอบในระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) ซึ่ง CCC แสดงถึงเลขของส่วนนั้น

โดยที่ W1 คือ ชื่อของส่วนประกอบ

W2 คือ ชนิดของส่วนประกอบเช่น tmdpvol, sngljun, และ pipe เป็นต้น

2.7 Card แสดงข้อมูลของส่วนประกอบ

การ์ดต่อไปนี้จะเป็นการบ่งบอกถึงข้อมูลและรายละเอียดของส่วนประกอบโดยที่ขึ้นกับชนิดของส่วนประกอบนั้นโดยที่ขึ้นกับการ์ด CCC0000 คือจะขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบนั้นๆ ดังนั้นหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.7.1 กรณีที่ W2 ของการ์ด CCC0000 คือ tmdpvol ซึ่งคำว่า tmdpvol หมายถึง ส่วนประกอบนั้นเป็นตัวบรรจุที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent volume)

การ์ด CCC0101 ถึง CCC0109 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลรายละเอียดของรูปร่างของส่วนประกอบ

โดยที่ W1 คือพื้นที่การไหล ( $m^2, ft^2$ )

W2 คือความยาวของส่วนประกอบ (m,ft)

W3 คือปริมาตรของส่วนประกอบ ( $m^3, ft^3$ ) โดยที่ ถ้า  $W3 = 0$  คือ  $W3 = W1 \times W2$

W4 คือมุมการวางส่วนประกอบแนวราบ (degree)

W5 คือมุมการวางส่วนประกอบแนวเอียง โดยที่ถ้ามีเครื่องหมายเป็นบวกจะแสดงเป็นการไหลเป็นแบบไหลขึ้นและถ้ามีเครื่องหมายเป็นลบจะแสดงเป็นการไหลเป็นแบบไหลลง

W6 คือการเปลี่ยนแปลงของระดับการวาง (m,ft) โดยที่ถ้ามีเครื่องหมายเป็นบวกระดับจะเพิ่มสูงขึ้นและถ้ามีเครื่องหมายเป็นลบระดับจะลดต่ำลง

W7 คือความขรุขระของผนัง (m,ft)

W8 คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) (m,ft) โดยที่ถ้า  $W8 = 0$  ระบบจะคำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{Hydraulic diameter} = 2 (\text{Volume flow area})^{0.5}$$

W9 คือสัญลักษณ์แทนการควบคุมส่วนประกอบแทนด้วย tlpvbf โดยที่ t แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ (Thermal stratification model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

t = 0 คือไม่ใช่ Thermal stratification model ในการคำนวณ

t = 1 คือใช้ Thermal stratification model ในการคำนวณ

l แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแยกระดับของน้ำและไอในการวิเคราะห์ (Level tracking model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

l = 0 คือไม่ใช่ Level tracking model ในการคำนวณ

l = 1 คือใช้ Level tracking model ในการคำนวณ

p แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการบรรจุน้ำ (Water packing scheme) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$p = 0$  คือไม่ใช้ Water packing scheme ในการคำนวณ

$p = 1$  คือใช้ Water packing scheme ในการคำนวณ

$v$  แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแบ่งระดับชั้นแนวตั้ง (Vertical stratification model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$v = 0$  คือใช้ Vertical stratification model ในการคำนวณ

$v = 1$  คือไม่ใช้ Vertical stratification model ในการคำนวณ

$b$  แสดงถึงการใช้ค่าแรงเสียดทานของจุดร่วมกันของน้ำและไอ (Interphase friction) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$b = 0$  คือใช้ Interphase friction ในการคำนวณสำหรับท่อ

$b = 1$  คือใช้ Interface friction ในการคำนวณสำหรับแท่งเชื้อเพลิง

$f$  แสดงถึงการคำนึงของผลกระทบที่เกิดจากความเสียดทานของผนัง (Wall friction effect) ในการคำนวณแนวแกน X โดยที่ถ้า

$f = 0$  คือใช้ Wall friction effect ในการคำนวณแนวแกน X

$f = 1$  คือไม่ใช้ Wall friction effect ในการคำนวณแนวแกน X

$e$  แสดงถึงชนิดของสมการในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$e = 0$  คือใช้ สมการ Nonequilibrium ในการคำนวณ

$e = 1$  คือใช้สมการ Equilibrium ในการคำนวณ

การ์ด CCC0200 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลการควบคุมของตัวบรรจุที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent volume)

โดยที่  $W1$  คือตัวแปรที่บ่งบอกถึงการควบคุมของตัวบรรจุที่ขึ้นกับเวลา โดยแทนสัญลักษณ์ ebt โดยที่

$e$  แสดงถึงของไหลในระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) โดยที่ถ้า

$e = 0$  คือแทนด้วยของไหลที่ถูกกำหนดไว้แล้ว (Default fluid)

$e = 1$  คือแทนด้วย  $H_2O$

$e = 2$  คือแทนด้วย  $D_2O$

$b$  แสดงถึงการปรากฏของโบรอน (Boron) โดยที่ถ้า

$b = 0$  คือของไหลในระบบไม่มี Boron

$b = 1$  คือของไหลในระบบมี Boron

$t$  แสดงถึงข้อมูลของตัวบรรจุที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งค่า  $t$  นี้เป็นตัวกำหนดค่าในการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 โดยที่ถ้า

t = 1 ค่าใน W2 และ W3 ในการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นค่าอุณหภูมิ (K, °F) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality) ตามลำดับ

t = 2 ค่าใน W2 และ W3 ในการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in<sup>2</sup>) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality) ตามลำดับ

t = 3 ใน ค่าใน W2 และ W3 ในการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in<sup>2</sup>) และค่าอุณหภูมิ (K, °F) ตามลำดับ

การ์ด CCC0201 ถึง CCC0299, Time-dependent volume data card เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของตัวบรรจุที่ขึ้นกับเวลาและการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 ขึ้นกับการ์ด CCC0200 โดยที่ W1 คือ เวลา (s)

W2 – W3 ขึ้นกับการ์ด CCC0200

2.7.2 กรณีที่ W2 ของการ์ด CCC0000 คือ sngljun ซึ่งหมายถึงข้อต่อที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Single-junction)

การ์ด CCC0101 ถึง CCC0109 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลและรายละเอียดของรูปร่างข้อต่อที่ไม่ขึ้นกับเวลา

โดยที่ W1 คือ โค้ด (Code) ที่ต้องการเริ่มเชื่อมต่อ แทนสัญลักษณ์ CCCV000N โดยที่ VV แสดงถึงเลขของส่วนประกอบ

N แสดงถึงเลขของพื้นที่ที่เชื่อมต่อ โดยที่

N = 1,2 คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่หนึ่ง (First coordinate direction) ตามลำดับ

N = 3,4 คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่สอง (Second coordinate direction) ตามลำดับ

N = 5,6 คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่สาม (Third coordinate direction) ตามลำดับ

W2 คือ คือ โค้ด (Code) ที่ต้องการเชื่อมต่อไปยัง แทนสัญลักษณ์ CCCV000N โดยที่ VV แสดงถึงเลขของส่วนประกอบ

N แสดงถึงเลขของพื้นที่ที่เชื่อมต่อ โดยที่

N = 1,2 คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่หนึ่ง (First coordinate direction) ตามลำดับ

N = 3,4 คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่สอง (Second coordinate direction) ตามลำดับ

$N = 5,6$  คือพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมต่อขาเข้าและขาออกของทิศทางการหมุนลำดับที่สาม (Third coordinate direction) ตามลำดับ

$W3$  คือ พื้นที่ของข้อต่อ ( $m^2, ft^2$ ) โดยที่ถ้า  $W3 = 0$  พื้นที่ของข้อต่อเท่ากับพื้นที่การไหลที่เล็กที่สุดของตัวบรรจุที่ต้องการเชื่อมต่อ

$W4$  คือ เลข Reynolds ของค่าประสิทธิภาพการสูญเสียของการไหลแบบขาขึ้น (Forward flow energy loss efficient)

$W5$  คือ เลข Reynolds ของค่าประสิทธิภาพการสูญเสียของการไหลแบบขาลง (Upward flow energy loss efficient)

$W6$  คือ สัญลักษณ์แทนการควบคุมส่วนประกอบ แทนสัญลักษณ์ jefvcahs โดยที่

$j$  แสดงถึงการใช้โมเดลข้อต่อแบบการไหลอย่างรวดเร็ว (Jet junction model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$j = 0$  คือใช้ Jet junction model ในการคำนวณ

$j = 1$  คือใช้ Jet junction model ในการคำนวณ

$e$  แสดงถึงการว่าใช้เทอมของ PV ในการคำนวณโดยสมการพลังงาน (Energy equation) โดยที่ถ้า

$e = 0$  คือใช้ PV term ในการคำนวณ

$e = 1$  คือใช้ PV term ในการคำนวณ

$f$  แสดงถึงการใช้การจำกัดการไหลของกระแสนอนกลับ (Counter current flow limitation, CCFL) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$f = 0$  คือไม่ใช่ CCFL ในการคำนวณ

$f = 1$  คือใช้ CCFL ในการคำนวณ

$v$  แสดงถึงการใช้การแบ่งชั้นของการไหลแนวราบ (Horizontal stratification) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$v = 0$  คือไม่ใช่ Horizontal stratification ในการคำนวณ

$v = 1$  คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลขาขึ้น (Upward-oriented junction) ในการคำนวณ

$v = 2$  คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลขาลง (Downward-oriented junction) ในการคำนวณ

$v = 4$  คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลหมุนวน (Centrally located junction) ในการคำนวณ

$c$  แสดงถึงการใช้โมเดลการสั้น (Chocking model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า



$c = 0$  คือใช้ Chocking model ในการคำนวณ

$c = 1$  คือไม่ใช้ Chocking model ในการคำนวณ

$a$  แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหล (Area change) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$a = 0$  คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบราบเรียบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหล ในการคำนวณ

$a = 1$  คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบทันที (Full abrupt)

$a = 2$  คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบกึ่งทันที (Partial abrupt)

$h$  แสดงถึงว่าต้องใช้เงื่อนไขใดในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$h = 0$  คือใช้ Non-homogeneous ในการคำนวณสมการเชิงโมเมนตัม

$h = 1$  คือใช้ Homogeneous ในการคำนวณสมการเชิงโมเมนตัม

$s$  แสดงถึงว่าต้องใช้เงื่อนไขแบบใดของฟลักซ์เชิงโมเมนตัม (Momentum flux) แบบไหนในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$s = 0$  คือใช้ Momentum flux ในการคำนวณ

$s = 1$  คือไม่ใช้ Momentum flux ในการคำนวณ

การ์ด CCC0201 เป็นการ์ดที่แสดงถึงเงื่อนไขเริ่มต้นของข้อต่อที่ไม่ขึ้นกับเวลา

โดยที่  $W1$  คือ ตัวแปรควบคุม โดยที่ ถ้า

$W1 = 0$  ค่า  $W2$  และ  $W3$  จะแสดงค่าอัตราเร็ว

$W1 = 1$  ค่า  $W2$  และ  $W3$  จะแสดงค่าอัตราของมวลไหล

$W2$  คือ ค่าอัตราเร็วของของเหลว (m/s,ft/s) หรือ ค่าอัตราของมวลไหลของของเหลว

(kg/s,lbm/s) ขึ้นกับ  $W1$

$W3$  คือ ค่าอัตราเร็วของไอ (m/s,ft/s) หรือ ค่าอัตราของมวลไหลของไอ (kg/s,lbm/s) ขึ้นกับ

$W1$

$W4$  คือ ค่าอัตราเร็วของการรวมกันของของเหลวและไอ (Interface velocity) (m/s,ft/s)

2.7.3 กรณีที่  $W2$  ของการ์ด CCC0000 คือ pipe คือส่วนประกอบที่เลือกนี้ท่อ (Pipe)

การ์ด CCC0001 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลท่อ

โดยที่  $W1$  คือ จำนวนของตัวบรรจุ (Volume,  $n_v$ ) โดยที่  $n_v$  ต้องมีมากกว่า 0 แต่ต้องไม่เกิน

100 และจำนวนของข้อต่อภายในตัวบรรจุ (Internal junction) ของท่อจะเท่ากับ  $n_v - 1$

การ์ด CCC0101 ถึง CCC0199 เป็นการ์ดที่แสดงถึงพื้นที่แนวแกน X ของอัตราปริมาตรการไหล (X-coordinate volume flow)

โดยที่  $W1$  คือ พื้นที่ของอัตราปริมาตรการไหล ( $m^2, ft^2$ )

$W2$  คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นการ์ดที่แสดงถึงพื้นที่ของข้อต่อการไหลภายใน (Junction flow)

โดยที่ W1 คือ พื้นที่ของข้อต่อการไหลภายใน (Internal junction flow area) (m<sup>2</sup>,ft<sup>2</sup>) ถ้าไม่มีการ์ดนี้หรือ W1 = 0 ระบบจะถูกตั้งให้พื้นที่นี้เท่ากับพื้นที่ที่เล็กที่สุดของอัตราการไหลของตัวบรรจุ (Minimum area of volume) ที่เชื่อมต่อกับข้อต่อ

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0301 ถึง CCC0399 เป็นการ์ดที่แสดงถึงความยาวตามแกน X (X-coordinate volume)

โดยที่ W1 คือ ความยาวของท่อตัวบรรจุ (Pipe volume length) (m,ft)

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0401 ถึง CCC0499 เป็นการ์ดที่แสดงถึงปริมาตรของท่อบรรจุ (Pipe volume)

โดยที่ W1 คือ ปริมาตร (m<sup>3</sup>,ft<sup>3</sup>)

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0501 ถึง CCC0599 เป็นการ์ดที่แสดงถึงมุมการวางของท่อตามแนวราบ (Volume azimuthal angle)

โดยที่ W1 คือ มุมการวางของท่อตามแนวราบ โดยที่ W1 ≤ 360

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0701 ถึง CCC0799 เป็นการ์ดที่แสดงถึงมุมการวางของท่อตามแนวตั้ง (Volume vertical angles)

โดยที่ W1 คือ มุมตามแกนตั้ง

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0801 ถึง CCC0899 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของการเสียดทานตามแนวแกน X (Volume x-coordinate friction)

โดยที่ W1 คือ ความขรุขระของผนัง (Wall roughness) (m,ft)

W2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) (m,ft) ถ้า W2 = 0 ระบบจะคำนวณจากสูตรดังนี้

Hydraulic diameter = 2 (x-direction Volume flow area)0.5

W3 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0901 ถึง CCC0999 เป็นการ์ดที่แสดงถึงประสิทธิภาพสูญเสียของข้อต่อ (Junction loss coefficient)

โดยที่  $W1$  คือ เลข Reynolds ของค่าประสิทธิภาพการสูญเสียของการไหลแบบขาไป (Forward flow energy loss efficient)

$W2$  คือ เลข Reynolds ของค่าประสิทธิภาพการสูญเสียของการไหลแบบขากลับ (Reverse flow energy loss efficient)

$W3$  คือ เลขที่ของข้อต่อ

การ์ด CCC1001 ถึง CCC1099 เป็นการ์ดที่แสดงถึงการควบคุมของท่อตามแนวแกน X (Volume x-coordinate control)

โดยที่  $W1$  คือ สัญลักษณ์แทนการควบคุมส่วนประกอบแทนด้วย tlpvbf โดยที่ t แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ (Thermal stratification model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$t = 0$  คือไม่ใช้ Thermal stratification model ในการคำนวณ

$t = 1$  คือใช้ Thermal stratification model ในการคำนวณ

l แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแยกระดับของน้ำและไอในการวิเคราะห์ (Level tracking model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$l = 0$  คือไม่ใช้ Level tracking model ในการคำนวณ

$l = 1$  คือใช้ Level tracking model ในการคำนวณ

p แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการบรรจุน้ำ (Water packing scheme) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$p = 0$  คือไม่ใช้ Water packing scheme ในการคำนวณ

$p = 1$  คือใช้ Water packing scheme ในการคำนวณ

v แสดงถึงการใช้โมเดลแบบการแบ่งระดับชั้นแนวตั้ง (Vertical stratification model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$v = 0$  คือใช้ Vertical stratification model ในการคำนวณ

$v = 1$  คือไม่ใช้ Vertical stratification model ในการคำนวณ

b แสดงถึงการใช้ค่าแรงเสียดทานของจุดร่วมกันของน้ำและไอ (Interphase friction) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$b = 0$  คือใช้ Interphase friction ในการคำนวณสำหรับท่อ

$b = 1$  คือใช้ Interface friction ในการคำนวณสำหรับแท่งเชื้อเพลิง

f แสดงถึงการคำนึงของผลกระทบที่เกิดจากความเสียดทานของผนัง (Wall friction effect) ในการคำนวณแนวแกน X โดยที่ถ้า

$f = 0$  คือใช้ Wall friction effect ในการคำนวณแนวแกน X

$f = 1$  คือไม่ใช้ Wall friction effect ในการคำนวณแนวแกน X

e แสดงถึงชนิดของสมการในการคำนวณ โดยที่ถ้า

e = 0 คือใช้ สมการ Nonequilibrium ในการคำนวณ

e = 1 คือใช้สมการ Equilibrium ในการคำนวณ

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC1101 ถึง CCC1199 เป็นการ์ดที่แสดงถึงการควบคุมข้อต่อ (Junction control)

โดยที่ W1 คือ สัญลักษณ์แทนการควบคุมส่วนประกอบ แทนสัญลักษณ์ efvcahs โดยที่

e แสดงถึงการว่าใช้เทอมของ PV ในการคำนวณโดยสมการพลังงาน (Energy equation) โดยที่ถ้า

e = 0 คือใช้ PV term ในการคำนวณ

e = 1 คือใช้ PV term ในการคำนวณ

f แสดงถึงใช้การจำกัดการไหลของกระแสนอนกลับ (Counter current flow limitation, CCFL) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

f = 0 คือไม่ใช่ CCFL ในการคำนวณ

f = 1 คือใช้ CCFL ในการคำนวณ

v แสดงถึงการใช้การแบ่งชั้นของการไหลแนวราบ (Horizontal stratification) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

v = 0 คือไม่ใช่ Horizontal stratification ในการคำนวณ

v = 1 คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลขาขึ้น (Upward-oriented junction) ในการคำนวณ

v = 2 คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลขาลง (Downward-oriented junction) ในการคำนวณ

v = 4 คือใช้ Horizontal stratification แบบข้อต่อการไหลหมุนวน (Centrally located junction) ในการคำนวณ

c แสดงถึงการใช้โมเดลการสั้น (Chocking model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

c = 0 คือใช้ Chocking model ในการคำนวณ

c = 1 คือไม่ใช่ Chocking model ในการคำนวณ

a แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหล (Area change) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

a = 0 คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบราบเรียบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหล ในการคำนวณ

a = 1 คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบทันที (Full abrupt)

a = 2 คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบกึ่งทันที (Partial abrupt)

h แสดงถึงว่าต้องใช้เงื่อนไขใดในการคำนวณ โดยที่ถ้า

h = 0 คือใช้ Non-homogeneous ในการคำนวณสมการเชิงโมเมนตัม

h = 1 คือใช้ Homogeneous ในการคำนวณสมการเชิงโมเมนตัม

s แสดงถึงว่าต้องใช้เงื่อนไขแบบใดของฟลักซ์เชิงโมเมนตัม (Momentum flux) แบบไหนในการคำนวณ โดยที่ถ้า

s = 0 คือใช้ Momentum flux ในการคำนวณ

s = 1 คือไม่ใช่ Momentum flux ในการคำนวณ

W2 คือ เลขที่ของข้อต่อ

การ์ด CCC1201 ถึง CCC1299 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (Volume initial condition)

โดยที่ W1 คือตัวแปรที่บ่งบอกถึงการควบคุม ด้วยแทนสัญลักษณ์ ebt โดยที่

e แสดงถึงของไหลในระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) โดยที่ถ้า

e = 0 คือแทนด้วยของไหลที่ถูกกำหนดไว้แล้ว (Default fluid)

e = 1 คือแทนด้วย H<sub>2</sub>O

e = 2 คือแทนด้วย D<sub>2</sub>O

b แสดงถึงการปรากฏของโบรอน (Boron) โดยที่ถ้า

b = 0 คือของไหลในระบบไม่มี Boron

b = 1 คือของไหลในระบบมี Boron

t แสดงถึงข้อมูลของเงื่อนไขเริ่มต้นซึ่งค่า t นี้เป็นตัวกำหนดค่า W2 และ W3 โดยที่ถ้า

t = 1 ค่าใน W2 และ W3 เป็นค่าอุณหภูมิ (K, °F) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality)

ตามลำดับ

t = 2 ค่าใน W2 และ W3 เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in<sup>2</sup>) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality)

ตามลำดับ

t = 3 ใน ค่าใน W2 และ W3 เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in<sup>2</sup>) และค่าอุณหภูมิ (K, °F) ตามลำดับ

W2 และ W3 จะขึ้นกับค่า t ใน W1

W7 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC1300 เป็นการ์ดที่แสดงถึง การบ่งบอกถึงการควบคุมเงื่อนไขของข้อต่อ (Junction condition control)

โดยที่ W1 คือ เงื่อนไขการแสดงผลถ้า

W1 = 0 W1 และ W2 ในการ์ด CCC1301 จะเป็นค่าอัตราเร็ว (Velocity)

W1 = 1 W1 และ W2 ในการ์ด CCC1301 จะเป็นค่าอัตราการไหล (Mass flow)

การ์ด CCC1301 ถึง CCC1399 เป็นการ์ดที่แสดงถึงเงื่อนไขเริ่มต้นของข้อต่อ (Junction initial condition)

โดยที่ W1 คือ อัตราเร็วเริ่มต้นของของเหลว (Initial liquid velocity) (m/s,ft/s) หรืออัตราการไหลของของเหลว (Mass flow) (kg/s,lbm/s) ขึ้นกับ W1 ในการ์ด CCC1300

W2 คือ อัตราเร็วเริ่มต้นของไอ (Initial vapor velocity) (m/s,ft/s) หรืออัตราการไหลของไอ (Mass flow) (kg/s,lbm/s) ขึ้นกับ W1 ในการ์ด CCC1300

W3 คือ ค่าอัตราเร็วของการรวมกันของของเหลวและไอ (Interface velocity) (m/s,ft/s)

W4 คือ เลขที่ของข้อต่อ

## 2.8 การ์ด 1CCCGXN

การ์ด 1CCCGXNN เป็นการ์ดที่มีเพื่อแสดงข้อมูลต่าง ๆ ของโครงสร้างเชิงความร้อนของข้อมูลขาเข้า

โดยที่ CCC แสดงถึงเลขของส่วนประกอบ

G แสดงถึงลำดับที่ของโครงสร้างเชิงความร้อน

X แสดงถึงชนิดของการ์ด

XX แสดงถึงเลขของส่วนประกอบ

2.8.1 การ์ด 1CCCG000 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลทั่วไปของโครงสร้างเชิงความร้อน

โดยที่ W1 คือ จำนวนแกนของโครงสร้างเชิงความร้อน,  $n_h$  โดยที่  $0 < n_h < 100$

W2 คือ จำนวนแกนของจุดร่วม,  $n_p$  โดยที่  $n_p < 100$

W3 คือ ชนิดของรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง โดยที่

W3 = 1 เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular)

W3 = 2 เป็นแบบทรงกระบอก (Cylindrical)

W3 = 3 เป็นแบบทรงกลม (Spherical)

W4 คือ แสดงถึงสถานะของการใช้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น Steady-state โดยที่

W4 = 0 ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้นอุณหภูมิได้ถูกกำหนดไว้ในการ์ด 1CCCG401 ถึง 1CCCG499

W4 = 1 ถ้าเงื่อนไขของที่เริ่มต้นอุณหภูมิได้ถูกนำไปคำนวณโดยใส่ข้อมูลลงไปในการ์ด 1CCCG402 ถึง 1CCCG499

W5 คือ พิกัดขอบเขตจากทางซ้าย (Left boundary coordinate) (m,ft)

2.8.2 การ์ด 1CCCG100 เป็นการ์ดที่แสดงถึงเงื่อนไขของจุดร่วมของโครงสร้างเชิงความร้อน

โดยที่ W1 คือ บอกรหัสของตำแหน่งของจุดร่วมของโครงสร้างเชิงร้อน โดยที่ถ้า

W1 = 0 ข้อมูลของรูปร่างลักษณะจะรวมทั้งช่วงของจุดร่วม (Mesh interval), วัสดุผสม (Composition) และจุดกำเนิด (Source) ของโครงสร้างเชิงร้อน

$W1 \neq 0$  ข้อมูลจะถูกดึงมาจากข้อมูลของรูปร่างลักษณะจากของการ์ด 1CCCG000

2.8.3 การ์ด 1CCCG101 ถึง 1CCCG19 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของช่วงของจุดร่วมของโครงสร้างเชิงร้อน (Heat Structure Mesh Interval) นี้จำเป็นต้องมีเมื่อ  $W1 = 0$  ในการ์ด 1CCCG100

โดยที่  $W1$  คือ จำนวนของช่วง (Interval)

$W2$  คือ ขอบเขตทางขวา (Right coordinate) (m,ft)

2.8.4 การ์ด 1CCCG201 ถึง 1CCCG299 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของวัสดุผสมของโครงสร้างเชิงร้อน (Heat Structure Composition) การ์ดนี้จำเป็นต้องมีเมื่อ  $W1 = 0$  ในการ์ด 1CCCG100

โดยที่  $W1$  คือ เลขของวัสดุผสม ถ้ามีค่าเป็นบวกบริเวณนั้นจะถูกรวมในการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ย และถ้ามีค่าเป็นลบบริเวณนั้นจะไม่ถูกรวมในการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ย

$W2$  คือ เลขของช่วง

2.8.5 การ์ด 1CCCG301 ถึง 1CCCG39 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของการกระจายของแหล่งกำเนิดของโครงสร้างเชิงความร้อน การ์ดนี้จำเป็นต้องมีเมื่อ  $W1 = 0$  ในการ์ด 1CCCG100 โดยที่  $W1$  คือ ค่าของแหล่งกำเนิด

$W2$  คือ เลขของช่วงจุดร่วม

2.8.6 การ์ด 1CCCG401 ถึง 1CCCG499 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของอุณหภูมิเริ่มต้น โดยที่  $W1$  คือ อุณหภูมิ (K,°F)

$W2$  คือ เลขของจุดร่วม

2.8.7 การ์ด 1CCCG501 ถึง 1CCCG599 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของพิกัดขอบเขตทางซ้าย (Left boundary condition)

โดยที่  $W1$  คือ เลขของตัวบรรจุทางพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic volume number) แทนสัญลักษณ์ CCCNN000F โดยที่

CCC คือ เลขของส่วนประกอบ

NN คือ ลำดับที่ของเลขบรรจุ

F คือ เลขบ่งบอกทิศทางของอัตราเร็ว

$F = 0$  คืออัตราเร็วเกิดขึ้นทาง x-coordinate

$F = 1$  คืออัตราเร็วเกิดขึ้นทาง z-coordinate

$F = 2$  คืออัตราเร็วเกิดขึ้นทาง y-coordinate

$W2$  คือ จำนวนที่เพิ่มของโครงสร้างเชิงความร้อน

$W3$  คือ ชนิดขอบเขตเงื่อนไข โดยที่ถ้า

W3 = 0 จะใช้ขอบเขตเงื่อนไขสมมาตร (Symmetry) หรือขอบเขตเงื่อนไขฉนวน (Insulated) ในการคำนวณ

W3 = 1 จะใช้ขอบเขตเงื่อนไขการพาความร้อน (Convective) ในการคำนวณ

W4 คือ Surface area code โดยที่ถ้า

W4 = 0 คือ W5 เป็นพื้นที่ผิวทางซ้าย (Left surface area) ( $m^2, ft^2$ )

W4 = 1 คือ W5 ขึ้นกับรูปร่างลักษณะของการ์ด 1CCCG000 โดยที่ถ้า

เป็นทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) ค่า W5 คือพื้นที่ผิว (Surface area) ( $m^2, ft^2$ )

เป็นทรงกระบอก (Cylindrical) ค่า W5 คือความสูงของทรงกระบอก (Cylinder height) ( $m, ft$ )

เป็นทรงกลม (Spherical) ค่า W5 คือค่าเศษส่วนของทรงกลม (Spherical fraction)

W5 คือ ค่าขึ้นกับ W4

W6 คือ เลขของโครงสร้างเชิงร้อน

2.8.8 การ์ด 1CCCG601 ถึง 1CCCG699 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของพิกัดขอบเขตทางขวา (Right boundary condition) โดยที่ค่าอื่น ๆ เหมือนกันกับการ์ด 1CCCG501 ถึง 1CCCG599

2.8.9 การ์ด 1CCCG701 ถึง 1CCCG799 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของจุดกำเนิดซึ่งเป็นการ์ดที่จำเป็นต้องมีสำหรับข้อมูลของโครงสร้างเชิงร้อน

โดยที่ W1 คือ ชนิดของจุดกำเนิด ถ้า  $W1 = 0$  ไม่มีการใช้จุดกำเนิดในการคำนวณ และถ้ามีค่าเป็นบวก กำลัง (Power) จากตารางทั่วไป (General table) จะถูกใช้เป็นจุดกำเนิด

2.8.10 การ์ด 1CCCG801 ถึง 1CCCG899 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลอื่น ๆ

โดยที่ W1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m, ft$ )

W2 คือ ระยะทางของการไหลเข้าไป ( $m, ft$ )

W3 คือ ระยะทางของการไหลกลับ ( $m, ft$ )

W4 คือ เลขของโครงสร้างเชิงความร้อน

2.9 การ์ดอื่น ๆ

2.9.1 การ์ด 210MMM00 เป็นการ์ดที่แสดงชนิดของวัสดุผสม (Composition) โดยที่ MMM

แสดงถึงเลขของ Composition

โดยที่ W1 คือ ชนิดของวัสดุ เช่น

c-steel แสดงถึงเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

s-steel แสดงถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

UO<sub>2</sub> แสดงถึงยูเรเนียมไดออกไซด์ (Uranium dioxide)

Zr แสดงถึงเซอร์โคเนียม (Zirconium)



tbl/fctn แสดงถึงมีการใช้ข้อมูลจากตารางหรือฟังก์ชัน

W2 คือ บอกถึงข้อมูลการใช้ตารางหรือฟังก์ชัน ซึ่ง W2 จะปรากฏเมื่อ  $W1 = \text{tbl/fctn}$  โดยที่  $W2 = 1$  ใช้ข้อมูลแบบตารางโดยแสดงข้อมูลระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

W2 = 2 ใช้ข้อมูลแบบฟังก์ชัน

W2 = 3 ใช้ข้อมูลแบบตารางโดยแสดงข้อมูลระหว่างชื่อของส่วนประกอบของแก๊ส (Gas component) และสัดส่วนของโมล (Mole fraction)

2.9.2 การ์ด 201MMM01 ถึง 201MMM49 คือการ์ดที่แสดงข้อมูลของค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยที่รูปแบบจะขึ้นกับ W1 ในการ์ด 201MMM00 ถ้าเป็นตาราง

W1 คือ อุณหภูมิ (K, °F) หรือชื่อของแก๊ส

W2 คือ ค่าการนำความร้อน (W/m·K, Btu/s·ft·°F) หรือสัดส่วนของโมล (Mole fraction) ถ้าเป็นฟังก์ชันจะอยู่ในรูปดังนี้

$$k = A_0 + A_1(TX) + A_2(TX)^2 + A_3(TX)^3 + A_4(TX)^4 + A_5(TX)^{-1}; TX = T - C$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิ

C คือ ค่าคงที่

W1 คือ อุณหภูมิขั้นต่ำสุด (Lower limit temperature) (K, °F)

W2 คือ อุณหภูมิขั้นสูงสุด (Upper limit temperature) (K, °F)

W3 คือ  $A_0$  (W/m·K, Btu/s·ft·°F)

W4 คือ  $A_1$  (W/m·K<sup>2</sup>, Btu/s·ft·°F<sup>2</sup>)

W5 คือ  $A_2$  (W/m·K<sup>3</sup>, Btu/s·ft·°F<sup>3</sup>)

W6 คือ  $A_3$  (W/m·K<sup>4</sup>, Btu/s·ft·°F<sup>4</sup>)

W7 คือ  $A_4$  (W/m·K<sup>5</sup>, Btu/s·ft·°F<sup>5</sup>)

W8 คือ  $A_5$  (W/m, Btu/s·ft)

W9 คือ C (K, °F)

2.9.3 การ์ด 201MMM51 ถึง 201MMM99 คือการ์ดที่แสดงข้อมูลของค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (Volumetric heat capacity) โดยที่รูปแบบจะขึ้นกับ W2 ใน Card 201MMM00

ถ้าเป็นตาราง

W1 คือ อุณหภูมิ (K, °F)

W2 คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (Volumetric heat capacity)  
( $J/m^3 \cdot K, Btu/ft^3 \cdot F$ )

ถ้าเป็นฟังก์ชันจะอยู่ในรูปดังนี้

$$\rho C_p = A_0 + A_1(TX) + A_2(TX)^2 + A_3(TX)^3 + A_4(TX)^4 + A_5(TX)^{-1} ; TX = T - C$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิ

C คือ ค่าคงที่

$\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $kg/m^3, lbm/ft^3$ )

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) ( $J/kg \cdot K, Btu/lbm \cdot ^\circ F$ )

W1 คือ อุณหภูมิขั้นต่ำสุด (Lower limit temperature) ( $K, ^\circ F$ )

W2 คือ อุณหภูมิขั้นสูงสุด (Upper limit temperature) ( $K, ^\circ F$ )

W3 คือ  $A_0$  ( $J/m^3 \cdot K, Btu/ft^3 \cdot ^\circ F$ )

W4 คือ  $A_1$  ( $J/m^3 \cdot K^2, Btu/ft^3 \cdot ^\circ F^2$ )

W5 คือ  $A_2$  ( $J/m^3 \cdot K^3, Btu/ft^3 \cdot ^\circ F^3$ )

W6 คือ  $A_3$  ( $J/m^3 \cdot K^4, Btu/ft^3 \cdot ^\circ F^4$ )

W7 คือ  $A_4$  ( $J/m^3 \cdot K^5, Btu/ft^3 \cdot ^\circ F^5$ )

W8 คือ  $A_5$  ( $J/m^3, Btu/ft^3$ )

W9 คือ C ( $K, ^\circ F$ )

2.10 การ์ด End of input

การ์ด “. End of input.” เป็นการแสดงถึงการจบการวิเคราะห์ของข้อมูลขาเข้านี้

## ภาคผนวก ข

แสดงรายละเอียดของไฟล์ตั้งข้อมูล

ตัวอย่างของไฟล์ตั้งข้อมูล

= Strip from simple three component system

100 strip csv

103 0

\*

1001 mflowj 120000000

1002 mflowj 127000000

1003 tempf 125010000

1004 tempf 125020000

1005 tempf 125030000

1006 tempf 125040000

1007 tempf 125050000

. End of input.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล นางสาวณัฐวรา บาร์ศรี

วัน/เดือน/ปีเกิด วันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2533

สถานที่เกิด มหาสารคาม

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ.2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2558-2559 วิศวกรเครื่องกล บริษัท บริษัท เอ แอล เค พีซีซีเอ็น เวอร์ค จำกัด

พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 รับการจ้างเหมาจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในโครงการยกระดับความสามารถในการวิจัยของ สทท.เพื่อเป็นผู้นำของ เครือข่ายอาเซียนเพื่องานวิจัยด้านความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ผู้ช่วยวิจัยโครงการการสำรวจรอยเลื่อนมีพลังในภาคเหนือด้วย เทคนิคการตรวจวัดก๊าซเรดอน

มีนาคม พ.ศ. 2561 ผู้ช่วยวิจัยโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมทางศุลกากรด้วย ระบบเอ็กซ์เรย์ตู้คอนเทนเนอร์สินค้าและระบบเอ็กซ์เรย์สัมภาระและหีบห่อสินค้าของผู้เดินทาง รองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน(AEC)

ผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่ N. Barisri, N. Rattanadecho, S. Rassame, K. Silva, C. Allison and J. Hohorst. Assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Prediction Capability Using Power Burst Facility Severe Fuel Damage Test 1-4. September 3 - 8, 2017 at Qujiang Int'l Conference Center, Xi'an, China



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**