

การประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิง
แบบรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4



นางสาวนพวรรณ รัตนเดโช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel
Damage Scoping Test

Miss Noppawan Rattanadecho



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อ
กำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรง
ด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

โดย

นางสาวนพวรรณ รัตนเดโช

สาขาวิชา

วิศวกรรมนิวเคลียร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. กัมปนาท ชิลวา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. กัมปนาท ชิลวา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. แสนสุข เวชชการัญญ์)

นพวรรณ รัตนเดโช : การประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 (Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมบูรณ์ รัศมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. กัมปนาท ชิลวา, 122 หน้า.

ในอดีตมีเหตุการณ์อุบัติเหตุอย่างรุนแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หลายเหตุการณ์ เช่น อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์ที่สอง โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิล และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ ทุกครั้งที่เกิดเหตุการณ์อุบัติเหตุอย่างรุนแรงจะเกิดผลกระทบและความเสียหายตามมา เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ที่เคยเกิดแล้วในอดีตจำเป็นต้องมีการเตรียมพร้อมและศึกษาถึงเหตุการณ์และสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง โดยที่งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทดลองการเกิดอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ก่อให้เกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรงแบบกำหนดขอบเขต (Severe Fuel Damage Scoping Test, SFD-ST) ทำขึ้นที่ Power Burst Facility (PBF) ใน Idaho National Engineering Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ผลการทดลองของการทดลอง SFD-ST ถูกทำนาย โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองและผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ที่ได้จากงานวิจัยในอดีต โดยตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง ปริมาณและการเกิดไฮโดรเจน การกระจายอุณหภูมิและระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง จากผลการเปรียบเทียบโดยทั่วไปจากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณพบว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่บ้างในบางตัวแปรและเงื่อนไข ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870177021 : MAJOR NUCLEAR ENGINEERING

KEYWORDS: RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 / SFD-ST / POWER BURST FACILITY

NOPPAWAN RATTANADECHO: Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test. ADVISOR: ASST. PROF. DR. SOMBOON RASSAME, CO-ADVISOR: DR. KAMPANART SILVA, 122 pp.

In the past, there were several severe accidents of nuclear power plants such as Three-Mile Island power plant, Chernobyl power plant, and Fukushima Daiichi power plant. Each accident had caused severe accident with the large scale effect and damage. To prevent the severe accidents, it is necessary to prepare and study the events and causes of these severe accidents. The simulation on the Severe Fuel Damage Scoping Test (SFD-ST) at Power Burst Facility (PBF) in the Idaho National Engineering Laboratory, USA, using RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 code was performed in this study. The calculated results by RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 were compared to the experimental and the calculated results from SCDAP/RELAP5/MOD3.2 and SCDAP/RELAP5/MOD3.3 obtained from the previous studies. The compared results were the water level in the bundle, the cladding temperatures, the hydrogen production rate, the quantity, the temperature distribution and the damage level of the cladding and the fuel rod. From the comparison, it was generally found that RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 gave the better prediction compared with those from SCDAP/RELAP5/MOD3.2 and SCDAP/RELAP5/MOD3.3. There were some discrepancies between those from the calculated and experimental results, which were possibly due to some error of the input initial boundary conditions.

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study: Nuclear Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยในหัวข้อการประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรูนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ครั้งนี้ได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่ายจนทำให้งานครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนและคอยให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.สมบุญ รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาหลักในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ แนะนำและให้คำปรึกษาในการทำงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้รวมทั้งปรับปรุงและแก้ไขการเขียนงานวิจัยให้ออกมาดีที่สุด และขอขอบพระคุณที่คอยให้ความรู้ทั้งด้านการเรียนและการใช้ชีวิต

ขอขอบพระคุณ ดร.กัมปนาท ซิลวา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังช่วยแก้ไขและช่วยปรับปรุงการเขียนงานวิจัยให้ออกมาดีที่สุด รวมไปถึงการคอยสนับสนุนการทำงานให้ผ่านสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ Dr. Chris Allison จากบริษัท Innovative Systems Software ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าถึงและใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสำหรับคำแนะนำทุกอย่างเพื่อให้งานนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พงษ์แพทย์ เพ่งวาณิชย์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สัญชัย นิลสุธรรมโฆสิต กรรมการภายในในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.แสนสุข เวชชการัญญ์ กรรมการภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุบัติเหตุอย่างรุนแรง.....	5
2.2 ลำดับเหตุการณ์ของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง.....	5
2.2.1 ช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase).....	5
2.2.2 การออกซิเดชัน/การผลิตไฮโดรเจน (Oxidation/Hydrogen generation).....	6
2.2.3 อันตรกิริยาเคมี (Chemical interactions amongst core materials).....	8
2.2.4 ความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding failure).....	10
2.2.5 การย้ายตำแหน่งและการเกิดการอุดตัน (Relocation and blockage formation). ..	11
2.2.6 ช่วงปลาย (Late phase).....	15
2.2.7 ช่วงเติมน้ำหรือดับความร้อน (Refill/Quench).....	16

2.2.8 การปล่อยของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (Fission product release)	16
2.3 การทดลองของการจำลองอุบัติเหตุอย่างรุนแรง	17
2.3.1 ตัวอย่างการทดลองของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง	17
2.3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage.....	18
2.3.3 การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ	23
2.4 โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง	23
2.4.1 ตัวอย่างโค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง	23
2.4.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM.....	26
2.4.3 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4.....	27
2.4.4 แบบจำลองและโมเดลที่ใช้ในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM	27
2.4.5 ความแตกต่างของโปรแกรม.....	37
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.6.1. งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง PBF SFD	39
2.6.2. งานวิจัยในส่วนโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1 การศึกษาข้อมูลขาเข้า.....	50
3.2 การใช้ขอบเขตเงื่อนไขในข้อมูลขาเข้า	51
3.2.1 การคัดลอกกราฟขอบเขตเงื่อนไข.....	51
3.2.2 การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลข (Digitizing).....	52
3.3 การคำนวณและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	54
3.3.1 ส่วนประกอบในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4.....	54
3.3.2 การใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	55
3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4.....	57

3.4.1 การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล	57
3.4.2 การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot	59
3.5 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผล.....	60
3.5.1 แผนภาพ (Nodalization).....	60
3.5.2 ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions).....	63
3.5.3 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์.....	65
บทที่ 4 การคำนวณและวิจารณ์ผลการคำนวณ	68
4.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level)	69
4.2 อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding temperature).....	70
4.3 การเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen Production)	74
4.4 การกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution).....	76
4.5 ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Damage state levels).....	81
4.6 สรุปผลการคำนวณ	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง	89
ภาคผนวก.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	122

สารบัญรูป

รูปที่ 1 ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์	10
รูปที่ 2 ดัชนีความเสียหาย 2.....	13
รูปที่ 3 ดัชนีความเสียหาย 3.....	14
รูปที่ 4 ดัชนีความเสียหาย 4.....	14
รูปที่ 5 ดัชนีความเสียหาย 5.....	15
รูปที่ 6 ภาพตัดขวางของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงของการทดลอง PBF SFD-ST	21
รูปที่ 7 ภาพมุมแนวตั้งของการทดลอง PBF SFD-ST.....	21
รูปที่ 8 แผนภาพของการดำเนินงาน.....	49
รูปที่ 9 หน้าต่างของโปรแกรม Snagit 12 Editor	51
รูปที่ 10 การบันทึกรูปภาพ.....	52
รูปที่ 11 หน้าต่างการใช้งานโปรแกรม Digitize	53
รูปที่ 12 ไฟล์ خروجของข้อมูลกราฟ.....	53
รูปที่ 13 หน้าต่างโปรแกรม Notepad++	55
รูปที่ 14 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	56
รูปที่ 15 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เมื่อเลือกข้อมูลขาเข้าแล้ว	56
รูปที่ 16 หน้าต่างโปรแกรมเมื่อกด Run RELAP5 แล้ว.....	57
รูปที่ 17 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับการใช้ไฟล์ Strip.....	58
รูปที่ 18 หน้าต่างของ MS Excel ที่ทำการดึงข้อมูลออกมา	59
รูปที่ 19 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot เมื่อเลือกไฟล์ .r แล้ว.....	59
รูปที่ 20 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot และเลือก Export ASCII เพื่อนำไปพล็อต	60
รูปที่ 21 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ RELAP5	62
รูปที่ 22 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ SCDAP	62

รูปที่ 23	ขอบเขตเงื่อนไขที่แบ่งการทดลองเป็นสองช่วง.....	64
รูปที่ 24	ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรง.....	64
รูปที่ 25	ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางอ้อม.....	65
รูปที่ 26	การเปรียบเทียบผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์.....	70
รูปที่ 27	การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.35 เมตร	72
รูปที่ 28	การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.5 เมตร	73
รูปที่ 29	การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.7 เมตร	73
รูปที่ 30	การเปรียบเทียบผลการทดลองของอัตราการเกิดไฮโดรเจน	75
รูปที่ 31	การเปรียบเทียบผลการทดลองของการเกิดไฮโดรเจนสะสม	75
รูปที่ 32	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 80.....	77
รูปที่ 33	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 180.....	78
รูปที่ 34	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 190.....	78
รูปที่ 35	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 200.....	79
รูปที่ 36	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 210.....	79
รูปที่ 37	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 220.....	80
รูปที่ 38	การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 80 (สเกลละเอียด).....	80
รูปที่ 39	ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง	82
รูปที่ 40	หน้าต่างโปรแกรม Digitize	116
รูปที่ 41	บันทึกไฟล์ขาออกเป็นสกุล .text	117
รูปที่ 42	เลือกจุด $X_{max}, 0$ และ $0, Y_{max}$	117
รูปที่ 43	กด Exit เพื่อจบการแปลงข้อมูล	118

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ดัชนีความเสียหาย.....	13
ตารางที่ 2	การทดลองความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง	20
ตารางที่ 3	ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรงของการทดลอง PBF SFD-ST	22
ตารางที่ 4	การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ.....	23
ตารางที่ 5	ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	27
ตารางที่ 6	โมเดลไฮโดรไดนามิกและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5.....	28
ตารางที่ 7	โมเดลโครงสร้างความร้อนและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5	31
ตารางที่ 8	โมเดลพลังงานจลน์ของเครื่องปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5	32
ตารางที่ 9	โมเดลการนำความร้อนของแกนปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP.....	33
ตารางที่ 10	โมเดลการเกิดออกซิเดชันของวัสดุและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP	34
ตารางที่ 11	โมเดลแท่งเชื้อเพลิงและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP	36
ตารางที่ 12	ตำแหน่งของตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์	67
ตารางที่ 13	ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ผล	68
ตารางที่ 14	ผลการทดลองของการเกิดไฮโดรเจนของการทดลองจริงและการคำนวณโดยโปรแกรม.....	76
ตารางที่ 15	อุณหภูมิและเวลาการเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง	82
ตารางที่ 16	สรุปผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม ด้านครัวเรือน ด้านธุรกิจ ด้านกิจการขนาดเล็ก หรือแม้แต่ทางด้านเกษตรกรรม และมีอัตราความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มอัตราการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการและเพื่อสร้างความมั่นคงของประเทศ แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan, PDP) เป็นแผนแม่บทในการผลิตไฟฟ้าของประเทศและเป็นการจัดการหาพลังงานไฟฟ้าในระยะยาวประมาณ 15-20 ปี ตามแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศปี พ.ศ. 2558 [1] มีแผน การเพิ่มจำนวนโรงไฟฟ้าโดยคำนึงถึงความยั่งยืนทางพลังงานของประเทศ ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า การกระจายแหล่งเชื้อเพลิง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตามแผนพัฒนานี้มีความต้องการลดจำนวนโรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ส่วนจำนวนโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น และแผนการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่มีขนาด 2,000 เมกะวัตต์ หรือเทียบได้กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 2 โรง ซึ่งจะเริ่มเดินกำลังในการผลิตไฟฟ้าภายในปี พ.ศ. 2579

เหตุการณ์ในอดีตมีอุบัติเหตุอย่างรุนแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นใหญ่ ๆ สาม เหตุการณ์คือปี พ.ศ. 2522 เกิดอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์โรงที่สอง (Three Mile Island Unit 2, TMI-2) [2] โดยสาเหตุเกิดจากเครื่องปฏิกรณ์หยุดการทำงานทันทีเนื่องจากปั๊มน้ำที่เกี่ยวข้องกับกังหันไอน้ำหยุดทำงานและผู้ปฏิบัติงานได้ตัดระบบควบคุมการจ่ายน้ำอัตโนมัติ ทำให้ไม่มีน้ำหล่อเย็นในแกนปฏิกรณ์ที่เพียงพอจึงเกิดความร้อนสะสมขึ้นจนเชื้อเพลิงหลอมละลายและทำให้แกนปฏิกรณ์เสียหายทั้งหมด ในปี พ.ศ. 2529 เกิดอุบัติเหตุโรงไฟฟ้าเชอร์โนบิล (Chernobyl) [3] เป็นอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการทดลองระบบหล่อเย็นและระบบทำความเย็นฉุกเฉินของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของโรงไฟฟ้าเชอร์โนบิลโรงที่ 4 ขณะทำการทดลองมีการปิดระบบหล่อเย็นฉุกเฉินของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์และระบบอัตโนมัติอื่น ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการทดสอบนี้หยุดเดิน หลังเกิดสถานการณ์ฉุกเฉินขึ้นคือปฏิกิริยาฟิชชันมากขึ้นและความร้อนสูงขึ้นมาก เพื่อต้องการหยุดปฏิกิริยาฟิชชันจึงมีการเคลื่อนที่แท่งควบคุมลงสู่เครื่องปฏิกรณ์ แต่เนื่องจากในช่วงกำลังต่ำมีค่า Void Reactivity เป็นบวก ดังนั้นทำให้ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นอย่างทวีคูณและเกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลจนไม่สามารถหยุดได้ ส่งผลให้แกนปฏิกรณ์เริ่มแตกออกและไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลส่งผลให้เกิดการระเบิดและไอน้ำจากแกนปฏิกรณ์กระจายออกสู่บรรยากาศ และในปี พ.ศ. 2554 เกิด

อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ (Fukushima Daiichi) [4] ในโรงไฟฟ้าโรงที่ 1 ถึง 4 มีสาเหตุมาจากสถานีสูญเสียแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Station blackout) ก่อนเกิดอุบัติเหตุได้เกิดแผ่นดินไหวและเกิดคลื่นสึนามิความสูงขนาด 13 เมตรทำให้น้ำสามารถผ่านกำแพงเข้ามาในตัวห้องเก็บเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เนื่องจากกำแพงสูง 10 เมตรทำให้เกิดน้ำท่วมห้องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฉุกเฉิน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าฉุกเฉินเพื่อจ่ายไฟให้กับปั๊มน้ำของระบบหล่อเย็นฉุกเฉินเพื่อหล่อเย็นแกนปฏิกรณ์หยุดทำงาน ทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีความร้อนสูงขึ้นมากทำให้เกิดไฮโดรเจนเกิดมากขึ้นและส่งผลให้เกิดการระเบิดจากก๊าซไฮโดรเจน

จากเหตุการณ์อุบัติเหตุอย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นนั้น ทำให้จำเป็นต้องมีการเตรียมพร้อมทางด้านเทคโนโลยีและต้องศึกษาความปลอดภัยเพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ การศึกษาความปลอดภัยเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบหรือวิธีการแก้ไขและบรรเทาผลกระทบจากอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น โดยจะศึกษาการเกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้าที่เคยเกิดขึ้น เพื่อเป็นกรณีศึกษาของความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำกรณีศึกษาของการทดลองการเกิดอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง (Severe Fuel Damage, SFD) เป็นการศึกษาที่ใกล้เคียงกับกรณีของการเกิดอุบัติเหตุที่ TMI-2 การทดลองความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรงเป็นการทดลองที่อาจจะทำให้เกิดการระเบิดได้ (Power Burst Facility, PBF) ในการศึกษาครั้งนี้จะทำวิเคราะห์การทดลองความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรงแบบกำหนดขอบเขต (SFD-ST) เนื่องจากเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจที่สามารถนำไปต่อยอดในการทดลองที่ตามมา

การทดลอง SFD-ST เป็นการทดลองของ Idaho National Engineering Laboratory (INEL) ได้ทำการทดลองเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2525 การทดลอง SFD-ST เป็นการทดลองแรกจากการทดลองทั้งหมดของสี่การทดลอง SFD และเป็นการจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา วัตถุประสงค์ของการทดลอง SFD-ST คือเพื่อสนับสนุนความเข้าใจพฤติกรรมเชื้อเพลิงและการเกิดไฮโดรเจนระหว่างช่วงอุณหภูมิสูงชั่วคราว (High temperature transient) การทดลอง SFD-ST แบ่งการทดลองเป็นสองช่วงคือช่วงก่อนเติมน้ำ (Pre-reflood) และช่วงเติมน้ำ (Reflood) ซึ่งทั้งสองช่วงจะแบ่งจากการเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) แต่เนื่องจากการความจำกัดทางการวัดและเครื่องมือวัดทำให้ผลการทดลองสามารถวัดค่าผลการทดลองได้แค่ในช่วงก่อนเติมน้ำเท่านั้น

ในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวนมากที่ได้รับความนิยมและมีความน่าเชื่อถือในวิเคราะห์และประเมินผลการทดลองทางด้านอุบัติเหตุอย่างรุนแรง [5] เช่น MELCOR, MACCS, SCDAP/RELAP, CONTAIN, IFCI และ VICTORIA เป็นต้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่กล่าวมาเป็น

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เป็นที่ยอมรับของ U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) โปรแกรม MELCOR, MACCS และ SCDAP/RELAP5 เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์อุบัติเหตุอย่างรุนแรง โปรแกรม CONTAIN และ โปรแกรม VICTORIA เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในอาคารปฏิกรณ์และการรั่วถอน และ โปรแกรม IFCI เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเกิดอันตรายกิริยาของแกนปฏิกรณ์

ผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ในการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ทำให้สามารถเข้าถึงโปรแกรมได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ผลการคำนวณ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดย ISS โดยโปรแกรมสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงและระบบที่เกี่ยวข้องของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในการจำลองการทดลอง SFD ใช้ค่าขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Boundary Condition) ที่ได้จากการทดลองนำมาคำนวณและประเมินผลการทดลองในพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง อัตราการเกิดไฮโดรเจน ระดับความสูงระหว่างน้ำและไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยตรงหรือผลการคำนวณจากโปรแกรมอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงกัน เพื่อจะสามารถบอกได้ถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการทำนายผลของโปรแกรม และผลการทดลองจะนำไปสู่ความรู้ความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ในอุบัติเหตุร้ายแรงที่เกิดขึ้น และพัฒนาขีดความสามารถของประเทศไทยในการทำนายเหตุการณ์อุบัติเหตุร้ายแรงในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ และผลกระทบที่ตามมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ตัวแปรควบคุมในการคำนวณสำหรับประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบบรุนแรง คือ กำลังความร้อนเชิงเส้น และอัตราการไหลขาเข้าของสารหล่อเย็น โดยอ้างอิงจากการทดลองและการคำนวณอื่น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ในเรื่องการอ่านข้อมูลขาเข้า (Input desk) การประมวลผล และการอ่านข้อมูลขาออก (Output desk)
2. ศึกษางานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง PBF SFD-ST และโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4
3. ทดลองใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมจากข้อมูลขาเข้าแบบพื้นฐาน
4. ศึกษาข้อมูลขาเข้าของการทดลอง SFD-ST ว่ามีโครงสร้างอย่างไร
5. ประมวลผลด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยใช้ข้อมูลขาเข้าของการทดลอง SFD-ST
6. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากโปรแกรมอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงกัน
7. วิเคราะห์และสรุปผลการเปรียบเทียบ

1.5 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

ช่วยให้เข้าใจผลที่ได้จากการทำนายที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงทางโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และทำให้สามารถนำไปสู่การจัดการความปลอดภัยของอุบัติเหตุร้ายแรงอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 เป็นบทที่บรรยายเนื้อหาความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยแบ่งเป็นหัวข้อหลัก ๆ คือ ความหมายของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง ลำดับเหตุการณ์ของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง การทดลองเพื่อจำลองอุบัติเหตุอย่างรุนแรง และโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณการทดลองคือโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 นอกจากนี้บทที่ 2 ยังกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

2.1 อุบัติเหตุอย่างรุนแรง

ตามความหมายที่บัญญัติของ International Atomic Energy Agency (IAEA) ของคำว่า อุบัติเหตุอย่างรุนแรงหรือ Severe accident (SA) หมายถึง อุบัติเหตุที่มีเงื่อนไข (Condition) เกินกว่าการออกแบบโดยอุบัติเหตุพื้นฐาน (Design Extension Accident) โดยที่อุบัติเหตุระดับรุนแรงจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์อย่างมีนัยสำคัญ [6]

การประเมิน ประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน งานวิจัย และการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุอย่างรุนแรงเป็นประโยชน์เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงและเพื่อลดผลกระทบจากอุบัติเหตุดังกล่าว อุบัติเหตุอย่างรุนแรงที่เคยเกิดขึ้นที่สำคัญคือ อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์ครั้งที่สอง อุบัติเหตุโรงไฟฟ้าเซอร์โนบิลและอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ ซึ่งอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทุกครั้งนั้นย่อมมีผลเสียต่อธรรมชาติและมนุษย์ทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาและทำให้เข้าใจอุบัติเหตุอย่างรุนแรงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อช่วยลดโอกาสในการเกิดผลเสียและความเสียหายที่ตามมา

2.2 ลำดับเหตุการณ์ของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง

การเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงนั้นสามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวและเกิดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ ก่อนการเกิดความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์นั้นจะเกิดเหตุการณ์ลำดับเป็น 8 หัวข้อ [7] ดังนี้

2.2.1 ช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase)

เมื่ออุบัติเหตุที่เกี่ยวกับการรั่วไหลหรือความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับน้ำหล่อเย็นในระบบปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์น้ำมวลเบาเกิดขึ้นจะทำให้ น้ำที่จะเข้าไปหล่อเย็นแกนปฏิกรณ์ลดลง [7] ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงนำไปสู่สาเหตุที่อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ช่วง

ความร้อนเพิ่มขึ้นนี้จะรวมถึงช่วงของการยังไม่เปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุบางประเภทของโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ อีกทั้งยังรวมถึงช่วงของการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างซับซ้อน ช่วงการหลอมละลายและการเปลี่ยนเป็นของเหลวของเชื้อเพลิง และอุบัติเหตุช่วงนี้จะดำเนินไปถึงช่วงที่แกนปฏิกรณ์หลอมเหลว และเกิดย้ายตำแหน่ง (Relocation) อุณหภูมิชั่วคราวของแกนปฏิกรณ์ในช่วงความร้อนเพิ่มขึ้นอาจจะส่งผลให้แกนปฏิกรณ์หลอมเหลว

การเกิดออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิงจากวัสดุ Zircaloy ทำให้เกิดแหล่งความร้อนที่สำคัญ ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น กล่าวคือความสามารถในการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังส่งผลต่อการเกิดออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิงและการเปลี่ยนแปลงรูปของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding deformation)

2.2.2 การออกซิเดชัน/การผลิตไฮโดรเจน (Oxidation/Hydrogen generation)

ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,300 K ความร้อนที่เกิดจากการออกซิเดชันของ Zircaloy นั้นทำให้ความร้อนของแกนปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น การใช้ปริมาณไอน้ำและความหนาของชั้นออกซิเจนส่งผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นกราฟพาราโบลา ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,850 K การเปลี่ยนเฟสในโครงสร้างโมเลกุลออกไซด์ด้วยการกระจายตัวของออกซิเจนส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว [7]

ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นใน Zircaloy เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันจะเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเชิงกลและการแตกตัวของชั้นภายนอกออกไซด์อาจมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของปลอกเชื้อเพลิง [8] การเปลี่ยนแปลงเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนที่สูงของความเป็นออกไซด์กับความเป็นโลหะสามารถอธิบายและสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างได้ การออกซิเดชันและการแผ่รังสีความร้อนมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดพอง (Ballooning) การแตกตัว (Rupture) และความเสียหาย (Failure) ของแท่งเชื้อเพลิง พฤติกรรมการเกิดย้ายตำแหน่งที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความไวต่อการเกิดออกซิเดชันในปลอกเชื้อเพลิงนั้นพิจารณาจากปริมาณที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ของ Zircaloy ที่อยู่ในกระบวนการเกิดการละลายของยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และความหนาของ ZrO_2 ถูกแทนที่ด้วยของเหลวผสมของยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) การผลิตไฮโดรเจนเป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งระยะเวลาและขอบเขตการผลิตไฮโดรเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความปลอดภัยของบริเวณอาคารเครื่องปฏิกรณ์ (Containment) การทำนายการเกิดไฮโดรเจนจากอัตราการเกิดออกซิเดชันในขณะที่โครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นค่อนข้างจะได้ผลที่ตรงไปตรงมา ในทางกลับกันจะเกิดผลของ

ความไม่แน่นอนเพิ่มขึ้นอย่างมากถ้าทำนายการเกิดออกซิเดชันตอนเกิดความเสียหายของ Zircaloy การออกซิเดชันของโครงสร้างที่เป็นโลหะเหล็กอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตไฮโดรเจนทั้งหมด

การเกิดออกซิเดชันของวัสดุแกนปฏิกรณ์เป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาอุบัติเหตุอย่างรุนแรง เนื่องจากความร้อนสูงที่ได้จากการสลายตัว [9] ที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 K อัตราการปลดปล่อยความร้อนของการเกิดออกซิเดชันของการเปลี่ยนแปลงของโลหะเซอร์โคเนียม (Zr) นั้นเทียบเท่ากับความร้อนจากการสลายตัว นอกจากนี้ยังนำไปสู่การผลิตไฮโดรเจนและก๊าซซึ่งอาจทำให้เกิดการเผาไหม้อื่น ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของความเสียหายของการระเบิดถ้าก๊าซเหล่านั้นถูกผสมกับอากาศ การเกิดออกซิเดชันของเซอร์โคเนียมกับไอน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนและผลกระทบต่อความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ เมื่อระบบหล่อเย็นไม่ทำงานและน้ำหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์มีระดับต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1,500 K โลหะเซอร์โคเนียมซึ่งใช้ทำแท่งบรรจุเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำหรือน้ำทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและให้พลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนรั่วไหลออกจากแกนปฏิกรณ์ไปผสมกับอากาศ (ก๊าซออกซิเจน) ที่ส่วนบนของอาคารคลุมปฏิกรณ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจนเกิดการเผาไหม้และเกิดการระเบิดขึ้นในที่สุด ดังสมการนี้



การเกิดออกซิเดชันของโครงสร้าง Zircaloy มีผลต่อพฤติกรรมโดยรวมของแกนปฏิกรณ์ การเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันของ Zircaloy นั้นทำให้อุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 1,500 K และจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จากการทดลอง LOFT-FP-2 พบว่าอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงและโครงสร้างหลักที่ยังคงอยู่จะมีอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าจุดหลอมเหลวของ Zircaloy (2,100 K) ความร้อนของแกนปฏิกรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดออกซิเดชันของ Zircaloy ในขณะที่ความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันของ Zircaloy ก็เพียงพอที่จะผลักดันอุณหภูมิสูงสุดของแกนปฏิกรณ์ให้สูงถึงจุดหลอมเหลวของเชื้อเพลิงได้ (3,138 K) ปริมาณการเกิดออกซิเดชันทั้งหมดในแกนปฏิกรณ์จะถูกจำกัดด้วยผลกระทบหลายอย่างเช่น

- 1.) ปริมาณของไอน้ำในแกน
- 2.) การแพร่กระจายของไอน้ำผ่านชั้นขอบเขตไฮโดรเจนตามแนวเปลือก และ
- 3.) อัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนผ่านระดับเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ภายนอกและโลหะ Zircaloy เป็นต้น

สำหรับอัตราการความร้อนเริ่มต้นที่ค่อนข้างสูง (คือมากกว่า 0.5 K/s) จะมีการจำกัดของการสร้างและสะสมชั้นป้องกันออกไซด์บนพื้นผิวด้านนอกของปลอก Zircaloy (สูงกว่าจุดหลอมเหลวของ Zircaloy) ความล้มเหลวของปลอกและการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของ Zircaloy จากการหลอมละลายจะตกลงไปยังบริเวณด้านล่างของแกนปฏิกรณ์ แม้ว่าการย้ายตำแหน่งของ Zircaloy ยังเกิดการออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องแต่การระบายความร้อนขณะหลอมละลายจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เย็นกว่าของแกนซึ่งมีแนวโน้มที่อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้กระบวนการออกซิเดชันลดลง อัตราความร้อนที่ต่ำกว่า 0.3 K/s นั้นจะสร้างชั้นป้องกันออกไซด์ที่หนาขึ้นซึ่งจะช่วยป้องกันการย้ายตำแหน่งของ Zircaloy ที่หลอมละลายและทำให้ Zircaloy สามารถถูกออกซิไดส์ได้อย่างสมบูรณ์

ปริมาณไฮโดรเจนที่ปลดปล่อยออกสู่ระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor coolant system) และอาคารควบคุมส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเกิดออกซิเดชันของ Zircaloy แม้ว่าการเกิดออกซิเดชันของโครงสร้างหลัก (เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม และ B4C) สามารถสร้างปริมาณไฮโดรเจนได้ อุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกซิเดชันของ Zircaloy แม้ว่าอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์จะถูกจำกัดโดยการหลอมละลายของเชื้อเพลิงแต่อุณหภูมิสูงสุดจะถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงสุด อุณหภูมิสูงสุดของแกนปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการหลอมเหลวของ Zircaloy

2.2.3 อันตรกิริยาเคมี (Chemical interactions amongst core materials)

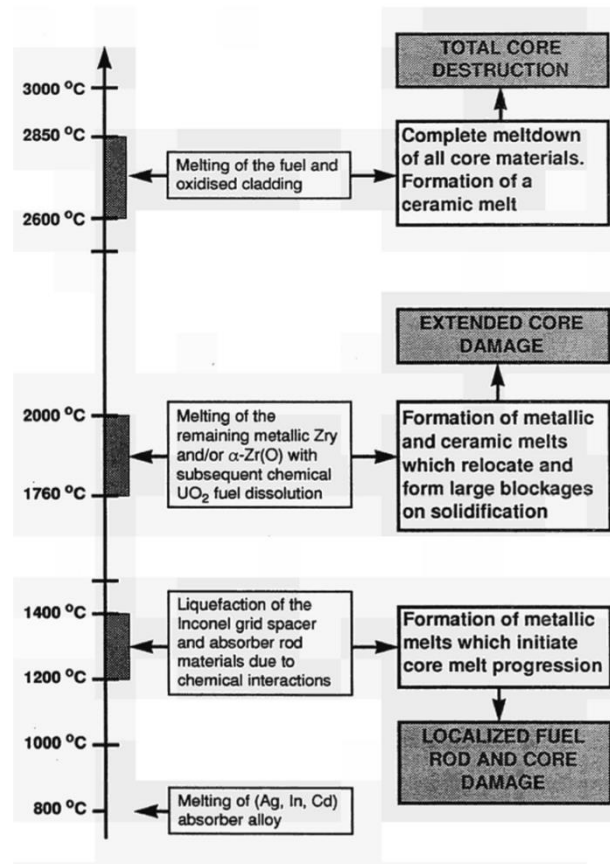
ความหลากหลายของวัสดุส่วนประกอบของแกนปฏิกรณ์ก่อให้เกิดความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) หรือก่อให้เกิดความไม่เสถียรทางการแลกเปลี่ยนความร้อนกับปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 K รูปที่ 1 แสดงภาพของปฏิสัมพันธ์ทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์ [7]

ช่วงอุณหภูมิที่ 1 คือช่วงอุณหภูมิ 1,473 ถึง 1,673 K เป็นช่วงความร้อนเพิ่มขึ้น (Heat up phase) ของการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์ซึ่งเกิดขึ้นในแท่งควบคุมที่เริ่มเกิดการหลอมละลายของโลหะผสมของเงินอินเดียมและแคดเมียม (Ag-In-Cd alloy) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 K เกิดความเสียหายของโครงเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) ของปลอกแท่งควบคุมทำให้ Ag-In-Cd alloy ถูกหลอมละลายและทำปฏิกิริยาเคมีกับท่อนำ Zircaloy (Zircaloy guide tube) และบางส่วนของปลอก Zircaloy รอบแท่งเชื้อเพลิง การสัมผัสของโลหะผสม Ag-In-Cd alloy ที่ถูกหลอมละลายกับ Zircaloy หรือเหล็กไร้สนิมทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 1,470 K ซึ่งเป็นช่วงการเริ่มต้นหลอมละลายไปสู่แกนปฏิกรณ์ การเกิดอันตรกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการสร้าง

โครงสร้างแบบยูเทคติก (Eutectic Formation) หรือโครงสร้างที่ง่ายต่อการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เช่นการทำอันตรกิริยาของอินโคเนล (Inconel) กับ Zircaloy ที่อุณหภูมิประมาณ 1,470 K ซึ่งจะนำไปสู่การปลดปล่อยก๊าซฟิชชันและการหลอมละลาย

ช่วงอุณหภูมิที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิประมาณ 2,033 ถึง 2,273 K เป็นช่วงที่สองของการหลอมละลาย Zircaloy ที่ไม่เกิดการออกซิเดชันจะเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 2,033 K ถ้าการย้ายตำแหน่งของ Zircaloy ถูกยับยั้งโดยชั้นออกไซด์ที่หนาмаกบนพื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิง ซึ่งจุดหลอมเหลวของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์คือ 2,973 K Zircaloy ที่ถูกหลอมเหลวจะไปละลายบางส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์และเปลือกออกไซด์ โดยที่การขึ้นรูปของเหลวผสมยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 K ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของยูเรเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ถ้าปลอก Zircaloy ถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ก่อนถึงช่วงอุณหภูมิที่ 2 จะไม่มีการสลายตัวเกิดขึ้น จากมุมมองของการจัดการอุบัติเหตุ นั้นคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันช่วยให้มีเวลามากขึ้นสำหรับการดำเนินการกู้คืนให้กลับไปสู่เหตุการณ์ปกติ

ช่วงอุณหภูมิที่ 3 คือช่วงอุณหภูมิระหว่าง 2,873 ถึง 3,123 K ส่วนที่เหลืออยู่คือยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO₂) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO₂) และสารละลายยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) จะเริ่มหลอมละลายซึ่งจะนำไปสู่การล่มสลาย (Meltdown) ที่สมบูรณ์ของวัสดุทั้งหมดของแกนปฏิกรณ์



รูปที่ 1 ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์ [7]

2.2.4 ความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding failure)

ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง การเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อความดันในช่องว่างของแท่งเชื้อเพลิง (Fuel rod gap) ทำให้ความดันของช่องระบายความร้อนสูงเกินไปซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแข็งแรง (Strength) ของปลอกเชื้อเพลิงลดลง การเกิดพองและการรอยแตก (Ballooning and rupture) อาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีความดันมากเกินไปในช่องว่าง การเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงทำให้เกิดการไหลในช่องระบายความร้อนซึ่งเป็นการลดการออกซิเดชันและทำให้เกิดไฮโดรเจน และการเปลี่ยนรูปเป็นการปรับเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนภายในของแกนและโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ นอกจากนี้ในแท่งเชื้อเพลิงที่มีรอยแตกทำให้เกิดการเข้าของไอน้ำไปในช่องว่างเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของการปลอกเชื้อเพลิงสำหรับการเกิดออกซิเดชัน การสร้างชั้นออกไซด์บนพื้นผิวด้านในและการขยายตัวของช่องว่างอาจเป็นการลดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง [7]

เมื่อถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ Zircaloy ที่ไม่ถูกออกซิไดซ์คืออุณหภูมิประมาณ 2,033 K ความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงและอันตรกิริยาทางเคมีเป็นสิ่งที่เกี่ยวข้องกับ ความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ (Core degradation) อย่างยิ่ง ทำให้มีความเป็นไปได้ในการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของ หลอมผสมยูเรเนียมเซอร์โคเนียมและออกซิเจน (U-Zr-O) ที่อุณหภูมิต่ำและทำให้เกิดการปล่อย ผลิตภัณฑ์ฟิชชันจากเชื้อเพลิงเหลวที่เพิ่มขึ้น ถ้ามีการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนาเพียงพอบนพื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิงแล้วจะสามารถป้องกันการเกิดการย้ายตำแหน่งของ Zircaloy ที่ถูกหลอมละลายหรือสามารถจำกัดช่องว่างระหว่างปลอกเชื้อเพลิงและเม็ดเชื้อเพลิง ในทางปฏิบัติเกณฑ์ ความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ไม่สามารถประเมินได้โดยการเปรียบเทียบโดยตรงกับผลการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถหาค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกละลายในตำแหน่งที่แตกต่างกันในเวลาที่เกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง ข้อมูลเพียงอย่างเดียวที่สามารถใช้ได้คือผลจากการทดสอบหลังการทดสอบของสภาวะสุดท้าย (Post-test examination of final state)

2.2.5 การย้ายตำแหน่งและการเกิดการอุดตัน (Relocation and blockage formation)

เมื่อเฟสของเหลวเกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์ทั้งจากอันตรกิริยาเคมีหรือเมื่อถึงจุดหลอมละลาย จะเกิดการย้ายตำแหน่ง (Relocation) และการแข็งตัวในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าแกนปฏิกรณ์ ในช่วงอุณหภูมิต่ำ วัสดุของแท่งควบคุมที่หลอมละลายจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ ความเสียหายเพิ่มขึ้น (Extended damage) กับการย้ายตำแหน่งเกิดขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของเซอร์โคเนียมที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ วัสดุที่หลอมละลายอาจเคลื่อนไหลเป็นสาย (Rivulets) หรือเป็นฟิล์ม (Films) ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเสียหาย นอกจากนี้แกนปฏิกรณ์อาจเสียดูดทาง โครงสร้างและตกลงเป็นเศษซากของแข็ง (Debris) ซึ่งอาจละลายในภายหลังเนื่องจากความร้อน [7]

การออกซิเดชันและปฏิกิริยาทางเคมีอื่น ๆ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิและพฤติกรรมเชิงกล ในบริเวณที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าหลอมละลายจะเริ่มทำให้แข็งขึ้น และก่อตัวเป็นเปลือก (Crust) บนพื้นผิวของเชื้อเพลิง เปลือกที่เพิ่มขึ้นจะไปลดพื้นที่ตัดขวางของช่องระบายความร้อนและนำไปสู่การเกิดการอุดตัน (Blockage) การอุดตันนี้จะลดการไหลของน้ำหล่อเย็นในบริเวณนั้นและเป็นการลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและอาจเกิดความเสียหายต่อวัสดุที่เหลืออยู่ในแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากส่วนผสมที่ย้ายตำแหน่ง (Relocating mixture) มีความร้อนจากการเสื่อมสลาย (Decay heat) ทำให้สามารถเกิดการหลอมและการเกิดการแข็งตัวขึ้นซ้ำ ๆ ได้จนทำให้น้ำเดือดจนเกิดการล่มสลายของแกนปฏิกรณ์ (Core meltdown)

2.2.5.1 ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก [10], [11]

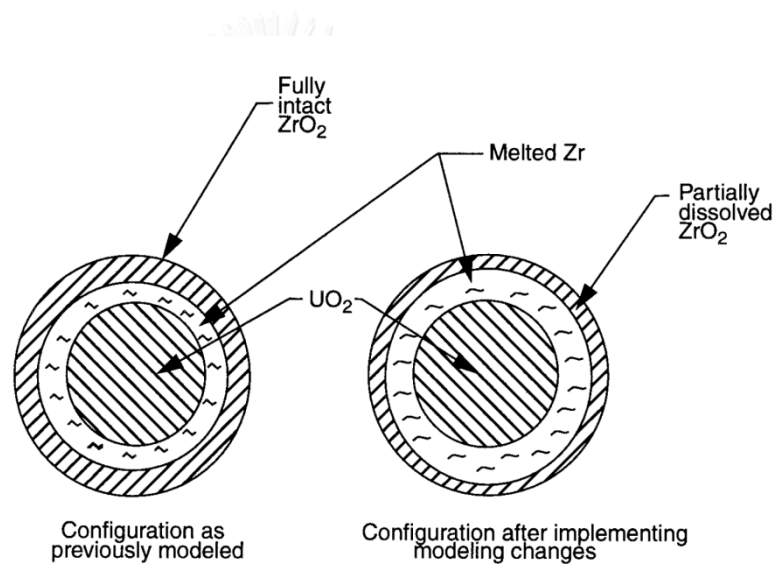
ในงานวิจัยนี้มีการพูดถึงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิง การเกิดออกซิเดชันของแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ระหว่างการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง

ความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น การเกิดพอง (Ballooning) และรอยแตก (Rupture) ของปลอกเชื้อเพลิงอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความดันภายในแท่งเชื้อเพลิงที่สูงเกินไป และการเกิดออกซิเดชันอาจทำให้เกิดรอยแตกได้เช่นกัน ถ้าความร้อนของปลอกเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนโลหะของปลอกจะหลอมละลาย ถ้าไม่มีพองเกิดขึ้นที่ปลอกเชื้อเพลิงส่วนโลหะที่หลอมละลายของปลอกจะยังคงเป็นรูปร่างแหวน (Annulus) หากมีพองเกิดขึ้นส่วนโลหะของปลอกจะมีการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ไปบางส่วนในทิศทางเส้นรอบวงและเปลี่ยนเป็นส่วนเสี้ยวของรูปร่างแหวน ต่อจากนั้นส่วนโลหะของปลอกเชื้อเพลิงจะเริ่มละลาย (Dissolve) และถูกลดความหนาของส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงที่อยู่ติดกัน หากปลอกเชื้อเพลิงยังอยู่ที่อุณหภูมิสูงเรื่อย ๆ ส่วนออกซิไดซ์ของปลอกอาจล้มเหลวได้เนื่องจากความเค้นหรือถูกลดความหนาของส่วนออกซิไดซ์จากนั้นส่วนโลหะของปลอกจะตกลงสู่ตำแหน่งที่ต่ำกว่า ถ้าปลอกที่ถูกย้ายตำแหน่งจากที่สูงกว่าไปต่ำกว่าและอยู่บนพื้นผิวด้านนอกของปลอกอาจทำให้ส่วนออกซิไดซ์ของปลอกอาจถูกเสริมแรงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของส่วนโลหะของปลอกและส่วนออกซิไดซ์ของปลอกมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับขนาดของพื้นที่ที่เกิดการออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิงและทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกนปฏิกรณ์

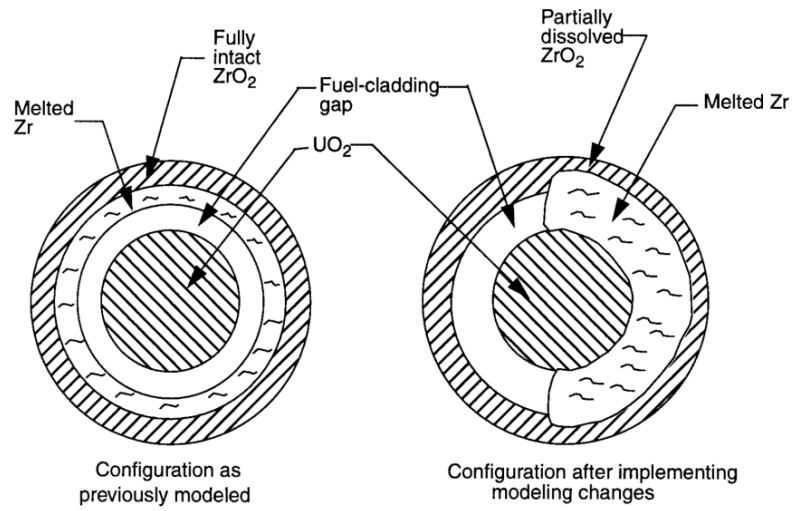
ตารางที่ 1 แสดงดัชนีระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก สำหรับดัชนีความเสียหาย 1 เป็นส่วนโลหะและออกซิไดซ์ของปลอกยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปและไม่มี การเกิดการออกซิเดชันของส่วนโลหะของปลอก สำหรับดัชนีความเสียหาย 2 มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2 รูปแบบสำหรับดัชนีความเสียหาย 3, 4 และ 5 แสดงไว้ในรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ รูปเหล่านี้แสดงการกำหนดดัชนีความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงปลอกที่หลอมละลาย รูปที่ 3 แสดงถึงว่าเกิดการหลอมละลายของปลอกเชื้อเพลิงของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ไปเป็นของเหลวเซอร์โคเนียมทำให้ปลดความหนาของปลอกเชื้อเพลิงและเริ่มเกิดการหลอมละลายของเชื้อเพลิง รูปที่ 4 แสดงถึงว่าการหลอมละลายของปลอกเชื้อเพลิงของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เข้าไปในช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงและปลอก อีกทั้งยังเกิดการหลอมละลายของเชื้อเพลิง และของเหลวเซอร์โคเนียม, ยูเรเนียม และออกซิเจน เกิดการรวมและย้ายตำแหน่ง (Relocation) ออกไปสู่พื้นผิวด้านนอกของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เป็นการอุดตันทางของไอน้ำ รูปที่ 5 แสดงถึงว่าการแตกหรือการสึกหรอของชั้นส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เกิดหลอมเหลวไหลออกจากปลอกเชื้อเพลิงทั้งหมด

ตารางที่ 1 ดัชนีความเสียหาย [10]

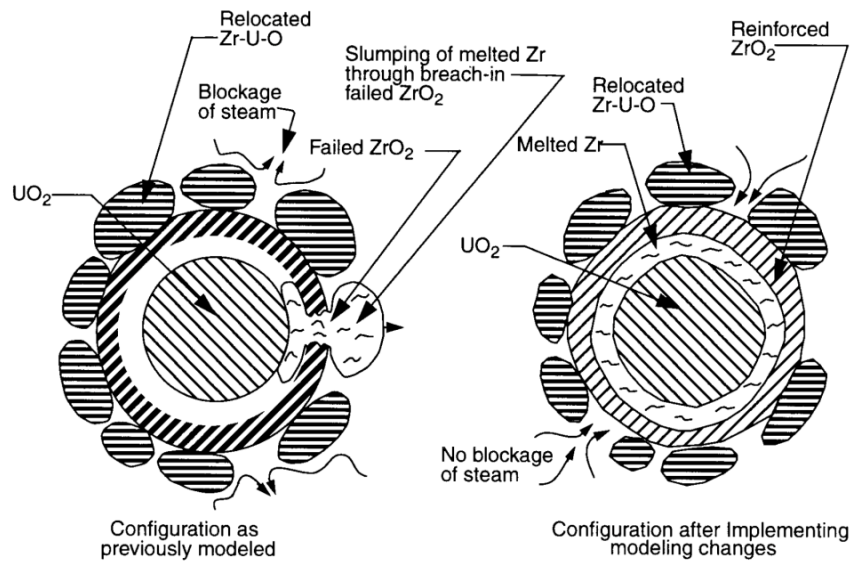
ดัชนีความเสียหาย	เหตุการณ์
1	ไม่มีการหลอมเหลวของปลอกเชื้อเพลิง
2	เกิดการหลอมเหลวของปลอกเชื้อเพลิง
3	เกิดการหลอมเหลวของเชื้อเพลิง
4	เกิดการย้ายตำแหน่งของวัสดุ
5	การแตกของส่วนออกไซด์ชั้นของปลอกเชื้อเพลิง



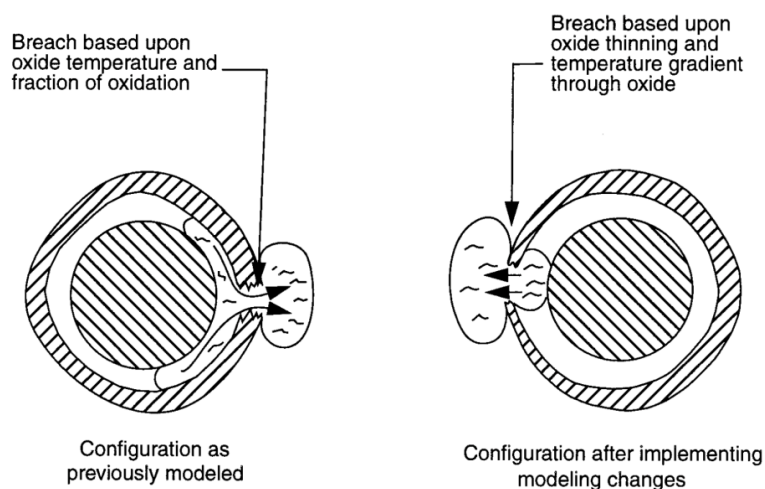
รูปที่ 2 ดัชนีความเสียหาย 2 [10]



รูปที่ 3 ดัชนีความเสียหาย 3 [10]



รูปที่ 4 ดัชนีความเสียหาย 4 [10]



รูปที่ 5 ดัชนีความเสียหาย 5 [10]

2.2.6 ช่วงปลาย (Late phase)

ช่วงปลายหรือเฟสปลายหมายถึงช่วงหนึ่งของขั้นตอนการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ที่อยู่ในถังบรรจุแกนปฏิกรณ์ (In-vessel core degradation) ที่เกี่ยวข้องกับการหลอมละลายและการย้ายตำแหน่ง (Relocation) ของวัสดุเชื้อเพลิงเซรามิกและนำไปสู่การสูญเสียรูปทรงของแกนปฏิกรณ์ วัสดุเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงที่ถูกออกซิไดซ์จะถูกย้ายตำแหน่งลงไป (Relocate downward) ในรูปของเศษซากของแข็ง เศษซากนี้อาจทำให้อุณหภูมิสูงไปถึงจุดหลอมละลายได้เนื่องจากแหล่งความร้อนภายในจากการเสื่อมสลาย (Decay heat) และการมีอยู่ของเหลว (Liquid pool) ซึ่งเป็นการเก็บรักษาไว้โดยเปลือกของแข็งที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนโลหะที่หลอมและแข็งในช่วงต้น ความเสียหายของเปลือกในบางส่วนของช่วงการเกิดการแข็งตัวอาจทำให้เศษซากของแข็งสามารถแพร่กระจาย (Spread) และย้ายตำแหน่ง (Relocate) ไปอยู่ในที่อ่างที่ด้านล่างได้ (Lower vessel plenum) [7]

วัสดุที่หลอมละลายอาจตกลงสู่บ่อน้ำด้านล่าง (Water pool) ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะเทอร์โมไฮดรอลิกนำไปสู่การเกิดอันตรายกิริยาของการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) คอร์เรียม (Corium) ที่เกิดขึ้นจากการหลอมละลายเป็นวัสดุที่เหมือนกับลาวานี้ อาจแข็งตัวชั่วคราวได้น้ำก่อนจะหลอมละลายอีกครั้ง ในระยะเวลาที่ยาวนั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ท่อด้านบนของแกนปฏิกรณ์โดยเป็นผลกระทบจากความร้อนหรือทางเชิงกล การระเบิดด้วยไอน้ำมีผลทำให้ท่อปฏิกรณ์เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง

ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการเกิดอุบัติเหตุในถังบรรจุแกนปฏิกรณ์จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความปลอดภัยของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง (Severe accident) ซึ่งเป็นขอบเขตเบื้องต้นในการประเมินความเป็นไปได้ในการจำกัดผลกระทบจากอุบัติเหตุภายในถังบรรจุความดันเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor pressure vessel) หรือเพื่อเป็นขอบเขตสำหรับการพิจารณาความเสียหายของท่อและการตกลงในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Containment) ของส่วนประกอบแกนปฏิกรณ์ อาจเป็นภัยต่อตัวกักเก็บได้ การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) นั้นไม่สามารถจำลองขั้นตอนการเกิดอุบัติเหตุในช่วงปลาย (Late phase) ของการทดลองได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัด

2.2.7 ช่วงเติมน้ำหรือดับความร้อน (Refill/Quench)

การฉีดน้ำ (Injection of water) จากอุปกรณ์ความปลอดภัยหรือการดำเนินการของผู้ปฏิบัติงานมีผลกระทบต่อกระบวนการหลอมละลายแกนปฏิกรณ์ ความร้อนที่ลดลงอย่างรวดเร็วอาจนำไปสู่การแตกหักหรือรอยแตกของพื้นผิวของเปลือกเชื้อเพลิงและอาจส่งผลกระทบต่อารขึ้นรูปใหม่ของพื้นผิวที่สัมผัสกับโลหะ การเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเกิดออกซิเดชันของ Zircaloy ระหว่างไอน้ำกับโลหะที่เกิดการขึ้นรูปใหม่และทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งตามมาทำให้อุณหภูมิและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [7]

2.2.8 การปล่อยของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (Fission product release)

การประเมินอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่ถูกต้องมีความสำคัญสำหรับกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน แบบจำลองส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันของอุณหภูมิในการหาอัตราการปล่อย (Release rate) ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของก๊าซฟิชชันและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเชื้อเพลิง การปล่อยผลิตภัณฑ์ฟิชชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเพิ่มความร้อน (Heat-up phase) จะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นการเกิดออกซิเดชันของเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Mobility) การกลายเป็นของเหลวของเชื้อเพลิง (Fuel liquefaction) โดย Zircaloy ที่หลอมละลายมีผลต่ออัตราการปล่อยผลิตภัณฑ์ฟิชชันโดยการแพร่กระจายที่ของเหลวแพร่เร็วกว่าของแข็ง ละออง (Aerosol) จะปล่อยออกมาโดยเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุที่จุดหลอมเหลวต่ำกับเชื้อเพลิงเซรามิกที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง [7]

2.3 การทดลองของการจำลองอุบัติเหตุอย่างรุนแรง

การทดลองของการจำลองอุบัติเหตุอย่างรุนแรงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาและทำความเข้าใจต่อการทดลองนั้น โดยแต่ละการทดลองมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไปเช่น เพื่อศึกษาระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ (RCS) เพื่อศึกษาการเกิดไฮโดรเจนเพื่อป้องกันการเกิดระเบิดไฮโดรเจน หรือเพื่อศึกษาความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ เป็นต้น

2.3.1 ตัวอย่างการทดลองของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง

การทดลองของอุบัติเหตุอย่างรุนแรงที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงและเกิดความเสียหายภายในแกนปฏิกรณ์ (In-pile test) นั้นมีหลายการทดลองเช่น การทดลอง Loss of Fluid Test (LOFT), การทดลอง Power Burst Facility Severe Fuel Damage (PBF SFD), การทดลอง Annular Core Research Reactor (ACRR) และการทดลอง Source Terms Experimental Project (STEP) เป็นต้น การทดลองที่เป็น In-pile test ส่วนใหญ่จะเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง [12]

การทดลอง LOFT ตั้งอยู่ที่ Idaho National Engineering Laboratory (INEL) การทดลอง LOFT มีสองการทดลองโดยที่การทดลอง LOFT LP-FP-1 เป็นการทดลองแรกเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2527 และการทดลอง LOFT LP-FP-2 เป็นการทดลองที่สองเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 การทดลอง LOFT ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์ฟิชชันจากช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงกับปลอกเชื้อเพลิงสู่สภาพแวดล้อมแบบไอน้ำในภายใต้เงื่อนไขแบบจำลองการสูญเสียอุบัติเหตุทางน้ำหล่อเย็นขนาดใหญ่ (LOCA) ซึ่งการฉีดยาน้ำหล่อเย็นในกรณีฉุกเฉินจะถูกทำให้ช้าจนกระทั่งเชื้อเพลิงเกิดความเสียหายโดยปลอกเชื้อเพลิงเกิด Ballooning อีกทั้งการทดลอง LOFT ยังออกแบบเพื่อศึกษาการขนส่งผลิตภัณฑ์ฟิชชัน

การทดลอง PBF SFD ถูกทดสอบที่ Idaho National Engineering Laboratory (INEL) การทดลองนี้มีสี่การทดลองคือการทดลอง SFD-S, SFD 1-1, SFD 1-3 และ SFD 1-4 การทดลองนี้เริ่มดำเนินการโดย US Nuclear Regulatory Commission (USNRC) และได้รับการสนับสนุนจากกลุ่มประเทศต่าง ๆ เช่น เบลเยียม แคนาดา เยอรมนี อิตาลี ญี่ปุ่น เนเธอร์แลนด์ อเมริกา เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของเชื้อเพลิงและพฤติกรรมแห่งควบคุมในช่วงของเงื่อนไขโดยทั่วไปและของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง โดยการทดลองนี้ยังเกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนและปล่อยผลิตภัณฑ์ฟิชชัน เงื่อนไขในการทดลองของทั้งสี่การทดลองจะครอบคลุมถึงปรากฏการณ์ความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ เช่นการหลอมละลายของ Zircaloy การเกิดออกซิเดชัน และการ

เปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิง วัตถุประสงค์อีกประการคือการตรวจสอบความสามารถในการทำให้เย็นตัวของเชื้อเพลิงที่ได้รับความเสียหายหลังจากผ่านการเติมน้ำ (Reflood phase)

การทดลอง ACRR ได้ดำเนินการทดลองที่ Sandia National Laboratories (SNLA) การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีภายใต้เงื่อนไขของความดันสูง สันามรังสีสูง และความเข้มข้นไฮโดรเจนสูง วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อศึกษาถึงผลความแตกต่างระหว่างผลกระทบของความร้อนที่เกิดฟิชชันและความร้อนในการเหนี่ยวนำ อีกทั้งการทดลองนี้ยังศึกษาถึงการปลดปล่อยของผลิตภัณฑ์ฟิชชันจากการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง

การทดลอง STEP ได้รับการสนับสนุนโดยกลุ่มประเทศที่จัดตั้งและดำเนินการโดย Electric Power Research Institute และรวมถึง US Department of Energy, Ontario Hydro of Canada, US Nuclear Regulatory Commission และ Belgonucleaire การทดลอง STEP มีการทดลองทั้งหมดสี่การทดลองคือ STEP 1, STEP 2, STEP 3 และ STEP 4 การทดลองนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ช่วงการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งมีผลต่อผลิตภัณฑ์ฟิชชัน อีกทั้งยังศึกษาเกี่ยวกับการเกิดออกซิเดชันของปลอกเชื้อเพลิง

ผู้จัดทำได้เลือกการทดลอง PBF SFD-ST ในการศึกษาและประเมินผลการทดลองเนื่องจากการทดลอง PBF SFD-ST เป็นการทดลองที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแกนปฏิกรณ์โดยศึกษาจากการความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง อีกทั้งยังศึกษาการเกิดออกซิเดชันเพื่อประเมินการผลิตไฮโดรเจน กล่าวคือการทดลอง PBF SFD-ST เป็นการทดลองที่ครอบคลุมการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง และอีกสาเหตุที่ผู้จัดทำได้เลือกการทดลองนี้เนื่องจากการทดลองนี้สามารถเข้าถึงและมีข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ มีสามารถนำมาประเมินผลการทดลองได้

2.3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง Severe Fuel Damage

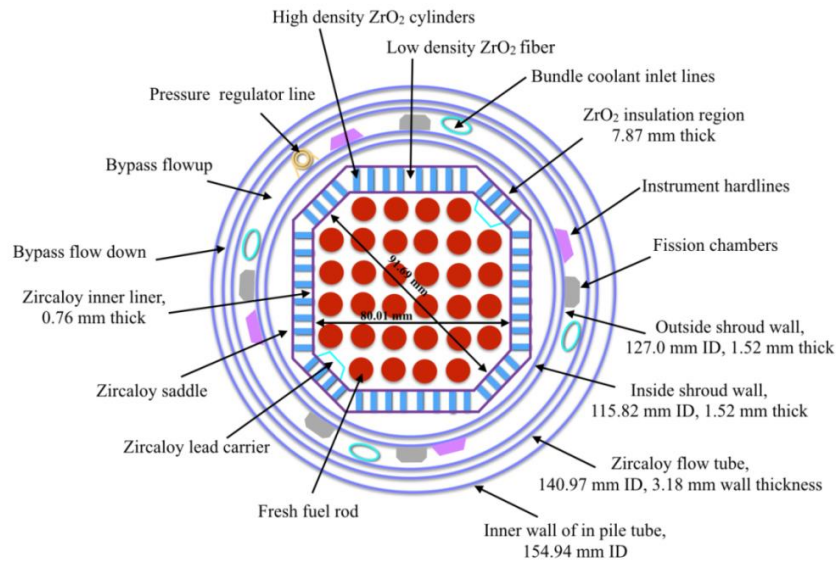
การทดลอง Severe Fuel Damage (SFD) [13] เป็นการทดลองที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงโดยเกิดจากความเสียหายของเชื้อเพลิงและเป็นการทดลองที่ทำให้เกิดการระเบิดต่อทั้งโรงไฟฟ้าได้ (Power Burst Facility, PBF) การทดลอง Severe Fuel Damage Scoping Test (SFD-ST) เป็นการทดลองแรกของการทดลองทั้งหมดของการทดลอง SFD โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นฐานข้อมูลเพื่อต่อยอดในการทดลองอื่น ๆ อีกต่อไป และอีกวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อเข้าใจและศึกษาในเรื่องของเทอร์โมไดนามิกของเชื้อเพลิงและการเกิดไฮโดรเจนระหว่างช่วงภาวะชั่วคราวของการทดลอง (Transient phase) และช่วงการเติมน้ำ (Reflood phase) การทดลอง SFD มีการทดลองทั้งหมดสี่การทดลอง แต่ละการทดลองจะแตกต่างกันในเรื่องของการจัดเรียงเชื้อเพลิงและ

กระบวนการลดอุณหภูมิในช่วงปลายของการทดลอง (Cooldown procedure) ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2 การทดลอง SFD-ST และการทดลอง SFD 1-1 มีการจัดเรียงและจำนวนของแท่งเชื้อเพลิงที่เท่ากันคือใช้เชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด 32 แท่งแต่ต่างกันตรงกระบวนการลดอุณหภูมิกว่าคือ การทดลอง SFD-ST จะมีการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) และอัตราการไหลของน้ำขาเข้าจะเพิ่มขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์ แต่การทดลอง SFD 1-1 จะไม่มีการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แต่จะมีการลดกำลังและมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าเพื่อช่วยลดอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์ ส่วนการทดลอง SFD 1-3 และ SFD 1-4 มีกระบวนการลดอุณหภูมิในช่วงปลายของการทดลองที่เหมือนกันคือกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกลดลงและมีกระบวนการลดอุณหภูมิโดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที แต่ของแตกต่างของสองการทดลองนี้คือการทดลอง SFD 1-4 จะมีแท่งควบคุม (Ag-In-Cd control rod)

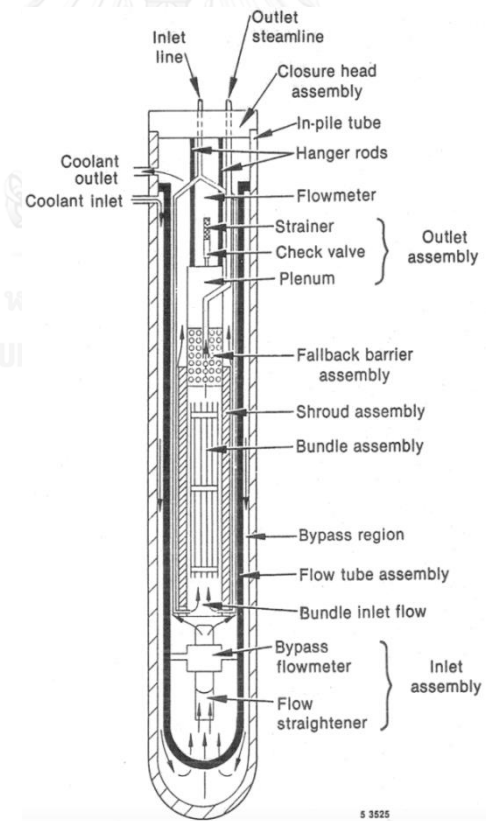
วัตถุประสงค์ของการทดลอง SFD-ST คือเพื่อพัฒนาฐานข้อมูลและโมเดลเพื่อกำหนดขอบเขตให้ครอบคลุมการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงเพื่อสามารถทำนายการตอบสนองของแกนปฏิกรณ์และโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์, อัตราการเกิดไฮโดรเจน และความสามารถในการหล่อเย็นของเชื้อเพลิงภายใต้สภาวะการเติมน้ำ (Reflood) เครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบและสร้างโดย Pacific Northwest Laboratory (PNL) และได้ประกอบโครงสร้างที่ Idaho National Engineering Laboratory (INEL) การทดลอง SFD-ST ประกอบด้วยแกนปฏิกรณ์แบบวงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.3 เมตรและมีความสูงเท่ากับ 0.91 เมตร การทดลอง SFD-ST ประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด 32 แท่ง โดยที่แต่ละแท่งยาว 0.9144 เมตรและชนิดของแท่งเชื้อเพลิงถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำอัดความดัน (Pressurized water reactor, PWR) โดยมีการจัดเรียงแบบ 6x6 โดยที่ตัดขอบมุมออกไปดังแสดงตามรูปที่ 6 มัดเชื้อเพลิงถูกล้อมรอบด้วยเปลือกเชื้อเพลิงเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยทำจาก Zircaloy รูปที่ 7 แสดงภาพมุมมองตั้งของเครื่องปฏิกรณ์ของการทดลอง PBF SFD-ST ซึ่งบอกถึงอุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 2 การทดลองความเสียหายของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรง [13]

การทดลอง	การจัดเรียงของเชื้อเพลิง	กระบวนการลดอุณหภูมิ
SFD-ST (28 ตุลาคม พ.ศ. 2525)	เชื้อเพลิงใหม่ 32 แท่ง	อัตราการไหลของน้ำที่เข้ามาลดอุณหภูมิ เริ่มต้น 0.016 L/s และเมื่อเกิดการหยุด ทำงานของเครื่องปฏิกรณ์อัตราการไหล เพิ่มเป็น 0.030 L/s
SFD 1-1 (8 กันยายน พ.ศ. 2526)	เชื้อเพลิงใหม่ 32 แท่ง	กำลังจะถูกลดลงและอัตราการไหลเพิ่ม เป็น 17 0.0L/s จากเริ่มต้น 0.00.6 L/s
SFD 1-3 (3 สิงหาคม พ.ศ. 2527)	เชื้อเพลิงใช้งานแล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง ท่อ Zircaloy 4 ท่อ	กำลังจะถูกลดลงและจะมีการลดอุณหภูมิ โดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที
SFD 1-4 (7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528)	เชื้อเพลิงใช้งานแล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง แท่งควบคุม 4 แท่ง (Ag- In-Cd)	กำลังจะถูกลดลงและจะมีการลดอุณหภูมิ โดยใช้อาร์กอนอย่างน้อยเป็นเวลา 50 นาที



รูปที่ 6 ภาพตัดขวางของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงของการทดลอง PBF SFD-ST [13]



รูปที่ 7 ภาพมุมมองแนวตั้งของการทดลอง PBF SFD-ST [13]

โดยสถานะเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของการทดลองนั้นเริ่มต้นโดยการตั้งอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้า (Inlet coolant flow) ประมาณ 0.016 L/s โดยป้อนน้ำเข้าไปในระบบ และทำการเพิ่มกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เป็น 93 kW ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกำลังหลังจากนั้นเกิดการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) หลังจากเกิดการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ หรือประมาณเวลาที่ 205 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้าถูกปรับให้เพิ่มขึ้นประมาณ 0.030 L/s เพื่อทำการลดความร้อนที่เกิดขึ้นของเชื้อเพลิง ข้อมูลของการทดลองแสดงในตารางที่ 3 โดยในบทที่ 3 จะกล่าวถึงข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองที่ต้องใช้สำหรับการวิเคราะห์อีกครั้ง

การทดลองนี้มีอุปกรณ์ในการวัดดังนี้ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples), สวิตช์ความดัน (Pressure switch) และเครื่องวัดอัตราการไหล (Flowmeter) เป็นต้น การวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงคือทำการวัดจุดกึ่งกลางของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง 0.35, 0.5 และ 0.7 เมตรโดยจุดอ้างอิงอยู่จุดล่างสุดของแท่งเชื้อเพลิง ในการทดลองวัดอุณหภูมินั้นเทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดที่ประมาณ 1200 ถึง 1600 K

ตารางที่ 3 ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรงของการทดลอง PBF SFD-ST [13]

ขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น	รายละเอียด
จำนวนของเชื้อเพลิง	32 แท่ง
กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (kW)	35 - 90
ความดัน (MPa)	6.6 - 6.7
อัตราการไหลเริ่มต้น (L/s)	0.02
อัตราความร้อน (K/s)	0.1 to 0.15
กระบวนการลดอุณหภูมิ (Cooldown procedure)	หลังเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์น้ำที่ เข้ามาลดอุณหภูมิจะเพิ่มเป็น 0.030 L/s

2.3.3 การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ

ในอดีตการทดลอง PBF SFD เป็นการทดลองที่น่าสนใจมากซึ่งมีการศึกษาและประเมินการทดลองนี้โดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ ในการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4 ดังที่กล่าวมาข้างต้นการทดลอง PBF SFD มีทั้งหมด 4 การทดลองคือ การทดลอง SFD-ST, SFD 1-1, SFD 1-3 และ SFD 1-4 การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD นี้เป็นการประเมินเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถของแต่ละโปรแกรมว่ามีความสามารถในหารทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงหรือไม่ ถ้าไม่ควรที่จะปรับปรุงโมเดลใด เรื่องใด จะเห็นว่ายังไม่เคยที่การประเมินการทดลอง PBF SFD โดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM มาก่อน

ตารางที่ 4 การประเมินและการศึกษาของการทดลอง PBF SFD โดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ [7]

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

2.4 โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

ปัจจุบันมีการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์วิเคราะห์หลากหลายโปรแกรมในการวิเคราะห์และคำนวณผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ เช่นคำนวณเกี่ยวกับการทำงานและการเปลี่ยนของเชื้อเพลิง คำนวณเกี่ยวกับการเกิดความเสียหายในแกนปฏิกรณ์ หรือคำนวณเกี่ยวกับอุบัติเหตุอย่างรุนแรง เป็นต้น

2.4.1 ตัวอย่างโค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) ได้ใช้โค้ดคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองและประเมินพฤติกรรมของเชื้อเพลิง ปฏิริยาทางจลนศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ขอบเขตเงื่อนไขของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิก [14] การเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงเวลาที่ใช้ในการกระจายสารรังสี

ในการเกิดอุบัติเหตุจากการออกแบบ การเตรียมพร้อมและการตอบสนองต่อภาวะฉุกเฉิน ผลกระทบต่อสุขภาพ และขนส่งสารกัมมันตรังสี ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานต่าง ๆ และอุบัติเหตุอย่างรุนแรง ผลลัพธ์จากการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ช่วยในการตัดสินใจสำหรับกิจกรรมที่มีความเสี่ยงและช่วยการแก้ปัญหาด้านเทคนิคอื่น ๆ การพัฒนาโค้ดมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความสมจริงและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์โค้ดและทำให้โค้ดง่ายต่อการแก้ไขโดยทั่วไปแบ่งโค้ดออกเป็น 7 ประเภทดังนี้

2.4.1.1 โค้ดของการประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic risk assessment) ใช้ในการประเมินโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง เช่น โปรแกรม SAPHIRE ซึ่งเป็นโปรแกรมประเมินความเสี่ยงที่เป็นไปได้ในการเกิดอุบัติเหตุ

2.4.1.2 โค้ดของพฤติกรรมของเชื้อเพลิง (Fuel behavior) ใช้ในการประเมินพฤติกรรมของเชื้อเพลิงภายใต้สภาวะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ต่าง โปรแกรมที่นิยมใช้คือโปรแกรม FRAPCON-3 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพการทำงานของแท่งเชื้อเพลิงเดี่ยวภายใต้สภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบปกติ และ โปรแกรม FRAPTRAN เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์อุบัติเหตุและการเกิดอุบัติเหตุของแท่งเชื้อเพลิงเฉพาะภายใต้สภาวะการทำงานปกติของเครื่องปฏิกรณ์

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

2.4.1.4 โค้ดของเทอร์มัลไฮดรอลิก (Thermal-hydraulic) ใช้เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียอุบัติเหตุจากน้ำหล่อเย็น (LOCAs) การจำลองด้วยโค้ดนี้จะช่วยสร้างพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับการออกแบบการใช้งานและความปลอดภัยของโรงไฟฟ้า โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ โปรแกรม TRAC เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อรวมและขยายขีดความสามารถของความปลอดภัย 3 หลักของ USNRC ได้แก่ TRAC-P, TRAC-B และ RELAP โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์ LOCAs ที่มีขนาดใหญ่และเล็กและระบบชั่วคราวในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั้งแบบแรงดันสูงและแบบน้ำเดือดได้ และโปรแกรม RELAP5 ใช้วิเคราะห์การรั่วไหลของเครื่องปฏิกรณ์ (LOCAs) ที่มีขนาดเล็กและความผิดปกติของระบบได้

2.4.1.5 โค้ดของอุบัติเหตุอย่างรุนแรง (Severe accident) ใช้ในการจำลองความก้าวหน้าของการเกิดอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม MELCOR และ MACCS เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์อุบัติเหตุอย่างรุนแรงโดยใช้โมเดลพารามิเตอร์ที่มีลักษณะพิเศษทำให้อาจจะเกิดความซับซ้อนในการใช้และบวกกับโปรแกรมนี้ใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็วซึ่งอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ โปรแกรม SCDAP/RELAP5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองอุบัติเหตุอย่างรุนแรงโดยใช้โมเดลที่ใช้ข้อมูลเชิงกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ผล โปรแกรม CONTAIN เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในอาคารปฏิกรณ์ โปรแกรม IFCI เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและน้ำสารหล่อเย็น และโปรแกรม VICTORIA เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ผลของการการขนส่งและการรั่วไหลที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี

2.4.1.6 โค้ดของการป้องกันเชิงสารกัมมันตรังสี (Radionuclide) ใช้เพื่อวิเคราะห์และพัฒนาคอมพิวเตอร์โค้ดของการป้องกันรังสี โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม RADTRAD ใช้ชุดของตารางและแบบจำลองเชิงตัวเลขของปรากฏการณ์เพื่อกำหนดปริมาณโดสที่ขึ้นอยู่กับเวลาในสถานที่ที่กำหนดไว้สำหรับสถานการณ์ที่กำหนด และยังสามารถนำมาใช้เพื่อประเมินความเสี่ยงจากรังสีในงานโดยทั่วไปอยู่ในห้องควบคุมได้ และโปรแกรม RASCAL ใช้ประเมินการปลดปล่อยสารต่าง ๆ จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และประเมินปริมาณรังสีอย่างเป็นอิสระในระหว่างการตอบสนองต่อภาวะฉุกเฉินทางรังสีวิทยา

2.4.1.7 โค้ดของการขนส่งและการรื้อถอนของสารกัมมันตรังสี (Radionuclide transport) ใช้วิเคราะห์ปริมาณในการสนับสนุนการยกเลิกใบอนุญาตและการรื้อถอนอุปกรณ์ โปรแกรมที่นิยมใช้คือ โปรแกรม Probabilistic RESRAD 6.0 และ RESRAD-BUILD 3.0 ใช้กับงานด้านกฎระเบียบของ USNRC สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณความน่าจะเป็นเพื่อแสดงให้เห็นถึงการปฏิบัติตามข้อกำหนดของ USNRC

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

2.4.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM

งานวิจัยเล่มนี้ได้ใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM [15] ในการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบเป็นหลักโดยที่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาเพื่อวิเคราะห์และศึกษาผลการทดลองในเรื่องของการทำนายผลของพฤติกรรมของแกนปฏิกรณ์และการตอบสนองของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ (Thermal hydraulic)

โปรแกรม RELAP5 เป็นโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์และพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา (Light water reactor, LWR) ถูกพัฒนาโดย U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) เพื่อใช้ในการคำนวณการตรวจสอบใบอนุญาต (License audit), การประเมินการทำงานของผู้ปฏิบัติ (Operator guideline) และเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โปรแกรม RELAP5 เป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณถึงพฤติกรรมของระบบการหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor coolant system) อีกทั้งยังสามารถใช้ในการจำลองระบบเทอร์มัลไฮดรอลิก (Thermal-Hydraulic) ของทั้งระบบได้

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ถูกพัฒนาโดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาและฝึกอบรม SCDAP ระหว่างประเทศ (SDTP) และเริ่มพัฒนามาตั้งแต่กลางปี ค.ศ. 1990 วัตถุประสงค์ของโปรแกรมนี้คือเพื่อทำนายพฤติกรรมและการทำงานของแกนปฏิกรณ์และการตอบสนองของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิกเช่น ระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor coolant system, RCS) เป็นต้นในช่วงการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนของ RELAP ซึ่งวิเคราะห์การตอบสนองของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิกของระบบ RCS และส่วนที่สองคือส่วนของ SCDAP ไว้เพื่อทำนายและวิเคราะห์พฤติกรรมของแกนปฏิกรณ์ และการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เป็นเวอร์ชันปัจจุบัน รุ่นทดลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนกิจกรรมการออกแบบและวิเคราะห์ของผู้ใช้ RELAP/SCDAPSIM ได้แก่ MOD3.5 และ MOD3.6 โมเดลใหม่เหล่านี้กำลังได้รับการประเมินจากบริษัท ISS และนักศึกษามหาวิทยาลัยและคณาจารย์ที่เข้าร่วมโครงการ SDTP University Support

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เป็นการรวมกันของโปรแกรม RELAP5/MOD3.3 และโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 ซึ่งโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้ปรับปรุงและแก้ไขโมเดลต่าง ๆ เพื่อให้มีความสามารถที่มากขึ้นเช่น แก้ไขโมเดลและเทคนิคเชิงตัวเลขขั้นสูง (Advanced numerical techniques) และแก้ไขบางโมเดลเพื่อให้คำนวณผลได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว เป็นต้น

2.4.3 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถวิเคราะห์และคำนวณถึงความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง โดยดัชนีความเสียหายแสดงในตารางที่ 5 [15] ดัชนีความเสียหาย 0.0 คือยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเปรียบได้กับดัชนีความเสียหาย 1 ดัชนีความเสียหาย 0.1 คือเริ่มเกิดการหลอมเหลวของปลอกเชื้อเพลิงเปรียบได้กับดัชนีความเสียหาย 2 ดัชนีความเสียหาย 0.2 คือเกิดการหลอมเหลวของปลอกเชื้อเพลิงและเกิดการแทนที่ของของเหลวเซอร์โคเนียมซึ่งทำให้เกิดรอยแตก ร้าวของปลอกเชื้อเพลิงเปรียบได้กับดัชนีความเสียหาย 3 ดัชนีความเสียหาย 0.4 คือเกิดการหลอมเหลวของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงอีกทั้งยังเกิดการย้ายตัวของวัสดุซึ่งทำให้เกิดการอุดตันของทางไอน้ำได้ เปรียบได้กับดัชนีความเสียหาย 4 และดัชนีความเสียหาย 1.0 คือเกิดการแตกของส่วนออกซิไดซ์ของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เกิดของเหลวที่หลอมเหลวไหลออกจากปลอกเชื้อเพลิงเปรียบได้กับดัชนีความเสียหาย 5

ตารางที่ 5 ดัชนีความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [15]

ดัชนีความเสียหาย	เหตุการณ์
0.0	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
0.1	เกิดความเสียหายเนื่องจากการเกิดฟอง
0.2	เกิดการแตกหักของปลอกเชื้อเพลิง
0.4	เกิดซากของปลอกเชื้อเพลิงเกาะติดที่รอบพื้นที่ผิว
1.0	เกิดการหลอมเหลวทั้งหมดของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง

2.4.4 แบบจำลองและโมเดลที่ใช้ในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM

ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เป็นการรวมกันของโปรแกรม RELAP5/MOD3.3 และโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 ซึ่งโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้ปรับปรุงและแก้ไขโมเดลต่าง ๆ เพื่อให้มีความสามารถที่มากขึ้น แสดงว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีสมการการคำนวณที่คล้ายกันกับโปรแกรม RELAP5/MOD3.3 โดยโปรแกรมนี้แบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนคือโมเดลของ RELAP5 และโมเดลของ SCDAP

2.4.4.1 โมเดลของ RELAP5 [16]

ส่วนการคำนวณของ RELAP5 เป็นการคำนวณเกี่ยวกับการตอบสนองไฮดรอลิกโดยรวมของระบบหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ พฤติกรรมของระบบควบคุมจลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์และพฤติกรรมของส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์พิเศษเช่นวาล์วและปั๊ม ตารางที่ 6 ถึง 8 ได้สรุปโมเดลและตัวอย่างสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของ RELAP5 ซึ่งแบ่งออกเป็นสามโมเดลคือ โมเดลไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic model), โมเดลโครงสร้างความร้อน (Heat structure model) และโมเดลพลังงานจลน์ของเครื่องปฏิกรณ์ (Point reactor kinetics model) ตามลำดับ

ตารางที่ 6 โมเดลไฮโดรไดนามิกและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 [16]

โมเดล	ชุดสมการ
Hydrodynamic model: เป็นโมเดลแบบจำลองแบบหนึ่งมิติสำหรับการไหลของของผสม (Mixture) ผสมระหว่างไอน้ำและน้ำ โมเดลนี้ประกอบด้วยตัวเลือกหลากหลายสำหรับการอ้างอิงโมเดลพื้นฐานของไฮโดรไดนามิก และยังรวมถึงโมเดลการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และโมเดลการไหลที่มีแรงเสียดทาน ตัวเลือกนี้สามารถเลือกใช้งานได้ตามที่เราต้องการ โมเดล Homogeneous และโมเดลดุลยภาพ (Equilibrium) ถูกรวมไว้เป็นโมเดลหลักเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของโค้ดกับการคำนวณจากโค้ดเก่าที่อิงจากรูปแบบโมเดลเดียวกัน	<ul style="list-style-type: none"> - Field equations <ul style="list-style-type: none"> ● Basic differential equations ● Numerically convenient set of differential equations ● Semi-implicit scheme differential equations ● Time advancement for the semi-implicit scheme ● Difference equations and time advancement for the nearly-implicit scheme ● Volume-average velocities ● Implicit hydrodynamic and heat structure coupling ● Numerical solution of boron transport equation - State relationships <ul style="list-style-type: none"> ● State equations ● Single-component, two-phase mixture ● Component, two-phase mixture - Constitutive models <ul style="list-style-type: none"> ● Vertical volume flow regime map

-
- Horizontal volume flow regime map
 - High mixing volume flow regime map
 - ECC mixer volume flow regime map
 - Junction flow regime map
 - Interphase friction
 - Coefficient of virtual mass
 - Wall friction
 - Wall heat transfer models
 - Wall heat transfer correlations
 - Interphase mass transfer
 - Direct heating

Special process models

- Choked flow
- Horizontal stratification
 entrainment/pullthrough model
- Abrupt area change
- User-specified form loss
- Crossflow junction
- Water packing mitigation scheme
- Countercurrent flow limitation model
- Mixture level tracking model
- Thermal stratification model
- Energy conservation at an abrupt change
- Jet junction model

- Component models

- Branch
 - Separator
 - Jet mixer
 - Pump
 - Turbine
 - Valves
 - Accumulator
-

-
- ECC Mixer
 - Annulus
-

สมการสำคัญของ Hydrodynamic model

Mass continuity equations

For liquid 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,

α_g = vapor void fraction

ρ_g = vapor density (kg/m³)

v_g = vapor velocity (m/s)

A = cross-sectional area (m²)

Γ_g = vapor mass transfer (kg/m³s)

For vapor 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,

α_f = liquid void fraction

ρ_f = liquid density (kg/m³)

v_f = liquid velocity (m/s)

A = cross-sectional area (m²)

Γ_f = liquid mass transfer (kg/m³s)

ตารางที่ 7 โมเดลโครงสร้างความร้อนและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 [16]

โมเดล	ชุดสมการ
Heat structure model: เป็นโมเดลที่ความร้อนที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของของแข็งของปริมาตรไฮโดรไดนามิกความสามารถของโมเดลนี้คือคำนวณเกี่ยวกับโครงสร้างความร้อน (Heat structure) ทั่วไปและรวมถึงคำนวณเกี่ยวกับหมุดหรือแผ่นเชื้อเพลิงที่มีความร้อน, การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อไอน้ำ, และการถ่ายเทความร้อนจากท่อและผนังโครงสร้างความร้อนถูกสมมติฐานว่าเป็นการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติในรูปทรงสี่เหลี่ยม, ทรงกระบอก, หรือทรงกลม Surface multiplier จะถูกใช้ในการแปลงพื้นผิวแบบหนึ่งมิติไปเป็นพื้นผิวที่แท้จริงของโครงสร้างความร้อน ความสามารถในการนำความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความจุปริมาตรความร้อนมาซึ่งถูกจัดให้อยู่ในรูปตารางหรือรูปการทำงานทั้งจากข้อมูลที่มีอยู่ภายในหรือผู้ใช้	<ul style="list-style-type: none"> - Heat conduction numerical techniques - Mesh point and thermal property layout - Difference approximation at internal mesh points - Difference approximation at boundaries - Thermal properties and boundary condition parameters <ul style="list-style-type: none"> ● RELAP5 specific boundary conditions ● Correlation package conditions - Insulated and tabular boundary conditions - Solution of simultaneous equations - Computation of heat fluxes - Two-dimensional conduction solution/reflood - Fine mesh rezoning scheme - Gap conductance model - Surface-to-surface radiation model - Metal-water reaction model - Cladding deformation model

สมการสำคัญของ Heat structure model

Integral form of heat conduction

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

where,

k = thermal conductivity

s = surface

S = internal heat source

t = time

T = temperature

V = volume

x = space coordinates

ρ = volumetric heat capacity

ตารางที่ 8 โมเดลพลังงานจลน์ของเครื่องปฏิกรณ์และตัวอย่างสมการในการคำนวณของ RELAP5 [16]

โมเดล	ชุดสมการ
Point reactor kinetic model: เป็น	- Point reactor kinetics equations
โมเดลที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมการใช้	- Fission product decay model
กำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โมเดลนี้	- Actinide decay model
คำนวณทั้งพลังงานฟิชชันและพลังงานจาก	- Transformation of equations for solution
การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน พลังงาน	- Initialization
ที่เกิดขึ้นทันทีคือเวลาที่เกิดการแยกตัวและ	- Reactivity feedback
รวมถึงพลังงานจลน์ของผลิตภัณฑ์ฟิวชัน	- Separable feedback model
และการหน่วงนิวตรอน	- Tabular feedback model
	- Reactor kinetics numerical procedures

สมการสำคัญของ Point reactor kinetic model

Point kinetics equations

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

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

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

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

where,

t = time

φ = neutron flux

C_i = number of delayed neutron precursors of group i

β = effective delayed neutron fraction

Λ = prompt neutron generation time

ρ = reactivity

f_i = fraction of delayed neutrons of group i

λ_i = decay constant of group i

S = source

ψ = fission rate in #/s

Σ_f = macroscopic fission cross-section

P_f = immediate fission power in MeV/s

Q_f = immediate fission energy per fission in MeV

2.4.4.2 โมเดลของ SCDAP [17]

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 [17]

โมเดล	ชุดสมการ
Heat conduction model for core component: เป็นโมเดลที่อธิบายเกี่ยวกับการนำความร้อนและวิธีการคำนวณผลการตอบสนองของอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง, แท่งควบคุม (Ag-In-Cd และ B_4C) และปลอกเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> - Two-dimensional heat conduction governing equation - Finite difference - The alternating direction method - Matrix method - OECR algorithm - Volume Averaging - Temperatures jump due to contact with slumped material

สมการสำคัญของ Heat conduction model

Heat conduction equations

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

where,

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

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

T = temperature at location (K)

ρc_p = volumetric heat capacitance (J/m^3K)

ตารางที่ 10 โมเดลการเกิดออกซิเดชันของวัสดุและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP [17]

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

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)

Δz = height of axial node (m)

ρ_M = molar density of Zr in zircaloy (kg·mole/m³)

ξ_o = as-fabricated thickness of cladding (m)

ΔH_{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

Δt = 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)

Δz = height of axial node i (m)

ξ_1 = thickness of metallic layer of cladding at axial node i at start of time step (m)

ξ_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)

ρ_m = Zr in Zircaloy (70.5 kg-mol/m³)

ตารางที่ 11 โมเดลแท่งเชื้อเพลิงและตัวอย่างสมการในการคำนวณของ SCDAP [17]

โมเดล	ชุดสมการ
Fuel rod models: เป็นโมเดลที่คำนวณเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแท่งเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อแท่งเชื้อเพลิงโดยตรงอีกทั้งยังคำนวณเกี่ยวกับการเกิดผลิตภัณฑ์ฟิชชันและการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> - Electrical heat generation model for fuel rod component - Fission product release models <ul style="list-style-type: none"> ● Release model for intact fuel ● Release during UO_2 liquefaction and fragmentation ● Enthalpy of released gases - Decay heat reduction due to fission product release <ul style="list-style-type: none"> ● Fission product decay heat methodology ● Fission product Decay heat model results - Fuel state models - Fuel rod cladding deformation model - Fuel rod internal gas pressure model - Liquefaction and Slumping of Fuel Rod Cladding <ul style="list-style-type: none"> ● Relocation of Melted Cladding in Circumferential Direction ● Amount of Fuel Dissolved by Melted Metallic Portion of Cladding ● Structural Failure of Oxide Layer Retaining Melted Metallic Cladding ● Distance of Slumping of Melted Cladding - Liquefaction of Fuel Rod Cladding at Location of Inconel Grid Spacer <ul style="list-style-type: none"> ● Impact of Grid Spacers on Damage Progression ● Liquefaction of Cladding at Location of Grid Spacers

สมการสำคัญของ Fuel rod models

Pecking factor equation

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

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)

2.4.5 ความแตกต่างของโปรแกรม

งานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 กับผลที่ได้จากการทดลองจริงและอีกทั้งยังเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP/MOD3.3 ซึ่งแต่ละโปรแกรมนี้อาศัยรายละเอียดดังนี้

2.4.5.1 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP/MOD3.3

[18]

โปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 มีการปรับปรุงและพัฒนาโมเดลจากเดิมคือโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 หลากหลายโมเดลและมีโมเดลใหม่ ๆ ได้แก่

1. สมการการแพร่กระจายที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนสำหรับกรณีขาดแคลนไอน้ำและกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
2. การคำนวณของการย้าย (Relocation) ในทิศทางตามแนวขวางของปลอกโลหะเชื้อเพลิงที่ถูกหลอมละลายโดยเป็นส่วนนอกไซด์ของปลอกเชื้อเพลิง
3. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในเศษของเชื้อเพลิงและปลอกที่มีรูพรุน

4. การคำนวณการสูญเสียของการไหลเศษที่มีรูพรุนตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) และ การใช้ความสามารถในการซึมผ่าน

5. การคำนวณการเกิดออกซิเดชันในช่วงสภาวะเติมน้ำ (Reflood)

ความสามารถและการปรับปรุงใหม่ของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 ทำให้มีผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่าเวอร์ชันเก่า

2.4.5.2 ความแตกต่างของโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [19]

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 [16] ได้แก่

1. การปรับปรุงโมเดลในการจำลองแท่งเชื้อเพลิงที่ร้อน
2. การปรับปรุงความสัมพันธ์ที่ใช้แกนควบคุม B4C ให้ดีขึ้น
3. การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนสำหรับแท่งเชื้อเพลิง
4. การปรับปรุงโมเดลที่สำคัญของโมเดลปลอกหุ้มแกนปฏิกรณ์ เช่นปรับปรุงความสามารถในการออกแบบรูปแบบที่หลากหลาย, การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี และการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น
5. การปรับปรุงโมเดลของการเกิดออกซิเดชันดีของ Zircaloy และการดูดซับไนโตรเจน
6. การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่าง Zr กับ Nb (สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU และ VVER)
7. การปรับปรุงช่องทางการถ่ายเทความร้อนด้วยรังสี เป็นต้น

จะเห็นว่าโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้รับการปรับปรุงในเรื่องของการแลกเปลี่ยนความร้อน โมเดลเชื้อเพลิงและการเกิดการออกซิเดชัน ดังนั้นผลการคำนวณของโปรแกรม

RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีแนวโน้มที่ให้ค่าข้อมูลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คืองานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง PBF SFD เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทั้งในการทดลอง SFD ST, SFD 1-1, SFD 1-3 และ SFD 1-4 และงานวิจัยในส่วนโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เป็นการรวบรวมงานวิจัยที่ได้ใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM วิเคราะห์ผลซึ่งส่วนใหญ่เน้นพบว่าการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM วิเคราะห์ผลนั้นให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าโปรแกรมอื่น ๆ

2.6.1. งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง PBF SFD

1. PBF Severe Fuel Damage Scoping Test-Test Results Report [13] (by A.D. Knipe et al.,1986)

ศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD-ST เพื่อเป็นฐานข้อมูล (Data base) และเป็นแบบจำลอง (Model) เพื่อหาเงื่อนไข (Condition) ที่อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมในการทำนายของการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงที่เกี่ยวข้องกับแกนปฏิกรณ์และโครงสร้าง และอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เกิดจากอัตราการเกิดของน้ำหล่อเย็นกับเชื้อเพลิงเป็นต้น งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดระบบทั้งหมดของการทดลอง PBF SFD เช่นขนาดของแกนปฏิกรณ์ ความยาวของเชื้อเพลิง การจัดเรียงและจำนวนของเชื้อเพลิง เป็นต้น อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้แสดงผลการทดลองและเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงกับผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP version 18 ผลที่ได้เปรียบเทียบเช่น อุณหภูมิเฉลี่ยของเชื้อเพลิง (Bundle temperatures) อุณหภูมิตรงเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง (Centerline temperatures) ความดันของเชื้อเพลิง (Bundle pressure) อัตราการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen rate) เป็นต้น

2. PBF Severe Fuel Damage Test 1-1 Test Result Results Report [20] (by Z.R. Martinson et al., 1986), PBF Severe Fuel Damage Test 1-3 Test Results Report [21] (by Z.R. Martinson et al., 1989) และ Severe Fuel Damage Test 1-4 Data Report [22] (by K. Vinjamuri et al., 1987)

ศึกษาเกี่ยวกับการทดลอง PBF SFD 1-1, SFD 1-3 และ SFD 1-4 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการทดลองลำดับต่อมาของการทดลอง PBF SFD เพื่อเป็นฐานข้อมูลและเป็นแบบจำลองเพื่อหาเงื่อนไขที่อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมในการทำนายการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแกนปฏิกรณ์และโครงสร้าง อีกทั้งยังอธิบายผลของอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่เกิดจากอัตราปฏิกิริยาระหว่างน้ำหล่อเย็นกับเชื้อเพลิง การทดลอง PBF SFD 1-1 มีเชื้อเพลิง 32 แท่งและมีการจัดวางแบบ 6x6 อัตราไหลของน้ำขาเข้าเท่ากับ 0.64 g/s ซึ่งน้อยกว่าของการทดลอง PBF SFD-ST การทดลอง PBF SFD 1-1 เปรียบเทียบกราฟของข้อมูลทั้งที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม SCDAP version 18 การทดลอง PBF SFD 1-3 มีการจัดเรียงของเชื้อเพลิงแบบ 6x6 และเชื้อเพลิงแบบใช้แล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง และท่อ Zircaloy (Zircaloy guide tube) 4 แท่ง อัตราไหลของน้ำขาเข้าจะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2.4 g/s การทดลอง PBF SFD 1-3 เปรียบเทียบกราฟของข้อมูลทั้งที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม SCDAP/RELAP5/ MOD2 การทดลอง PBF SFD 1-4 มีการจัดเรียงของเชื้อเพลิงแบบ 6x6 และเชื้อเพลิงแบบใช้แล้ว 26 แท่ง เชื้อเพลิงใหม่ 2 แท่ง และแท่งควบคุม (Stainless steel clad Ag-In-Cd control rod) 4 แท่ง อัตราไหลของน้ำขาเข้าเท่ากับ 0.6 g/s

3. Experimental and Computational Results of the QUENCH-06 Test [23] (by L. Sepold et al., 2004)

ศึกษาการเปรียบเทียบพฤติกรรมของแกนปฏิกรณ์ระหว่างการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงโดยใช้โปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 ในการประเมินผลของการทดลอง PBF SFD, CORA และ PHEBUS เป็นต้น การทดลองทั้งหมดนั้นเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจากตำแหน่งต่าง ๆ ของปลอกเชื้อเพลิง ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 เทียบกับโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD 3.2 และผลที่ได้จากการทดลองจริง

2.6.2. งานวิจัยในส่วนโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM

1. RELAP5-3D Code Manual [24] (by R.R. Schultz, 2005)

ศึกษาโปรแกรม RELAP5 series ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย Idaho National Laboratory โปรแกรม RELAP5 จะจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา (Light water reactor) ในช่วงชั่วคราว (Transient) โดยศึกษาการเกิดสูญเสียของน้ำหล่อเย็นในช่วงชั่วคราว (Loss of coolant) โดยไม่มีการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Scram) อีกทั้งยังคำนึงถึงการสูญเสียของน้ำ (Loss of feedwater) และกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (Power) เป็นต้น โปรแกรม RELAP5 จะทำการคำนวณถึงพฤติกรรมของระบบหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor coolant) ในช่วง Transient โดยในงานวิจัยเล่มนี้จะบอกถึงรายละเอียดและระบบของการคำนวณเกี่ยวกับการคิดวิเคราะห์ของเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ (Thermal hydraulic) และในส่วนของพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic model) ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนั้นได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 1 และเนื้อหาที่เกี่ยวข้องอีกบทหนึ่งคือบทที่ 3 ซึ่งอธิบายถึงการคำนวณเกี่ยวกับการคิดวิเคราะห์เทอร์มัลไฮดรอลิกส์ อีกทั้งยังกล่าวถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ (Component) ที่ใช้ในการคำนวณและการเขียน Nodalization ในส่วนของเทอร์มัลไฮดรอลิกส์, ทริปส์ (Trips), ตัวแปรควบคุม (Control variable) และโครงสร้างเชิงความร้อน (Heat structure) เป็นต้น และในบทที่ 2 ยังกล่าวถึงการเขียนข้อมูลขาเข้าอีกทั้งยังบอกถึงความหมายของข้อมูลขาเข้าอีกด้วย

2. RELAP/SCDAPSIM Input Manual MOD 3.4 3.5 & 4.0 [15] (by J. Hohorst et al., 2012)

อธิบายรายละเอียดความหมายและการใช้รหัส (Card code) ทุกตัวที่ต้องเขียนลงในข้อมูลขาเข้าทั้งในส่วนของชื่อ (Title), เวลาในการประมวล (Time step), ทริปส์ (Trips), ตัวประกอบของพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic component), ส่วนประกอบของโครงสร้างเชิงความร้อน (Heat structure component), ตารางทั่วไปอื่น ๆ (General table), ความต้องการในการแสดงกราฟ (Plot request), ระบบควบคุม (Control system), และแกนปฏิกรณ์ทั่วไป (General core) เป็นต้นของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM

3. Validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 for Research Reactor Applications [25] (by C.M. Chris et al., 2005)

วิเคราะห์และตรวจสอบโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เพื่อศึกษาการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์วิจัย งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และการใช้ข้อมูลขาเข้า (Input desk) ซึ่งจำเป็นต้องใช้เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้วิเคราะห์โดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีผลการทำนายที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีคือเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากการทดลองแล้วมีความใกล้เคียงกัน

4. An assessment of effectiveness of core exit temperatures with respect to PWR core damage state using RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 [26] (by C.M. Chris et al., 2007)

ประเมินประสิทธิผลของอุณหภูมิขาออกของแกนปฏิกรณ์โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 การวัดอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์มีความสำคัญในการพัฒนาและใช้หลักเกณฑ์ในการจัดการกับอุบัติเหตุอย่างรุนแรง งานวิจัยนี้วิเคราะห์ถึงอุบัติเหตุการสูญเสียแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Station blackout transient) ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เซอร์รี ประเทศสหรัฐอเมริกา (Surry nuclear power plant) และอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นที่ทรีไมล์ไอส์แลนด์ (Three Mile Island) ผลการประเมินพบว่าอุณหภูมิขาออกของแกนปฏิกรณ์มีผลเกี่ยวข้องกับผลความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์และต้องมีช่วงการเติมน้ำ (Reflood phase) เพื่อช่วยลดการเกิดเหตุการณ์ที่เป็นผลความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์

5. Development and testing of RBMK-1500 model for BDBA analysis employing RELAP/SCDAPSIM code [27] (by A. Kaliatka et al., 2008)

ทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดช่องทางกำลังสูง (Large-power channel-type reactor, RBMK) โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ในการวิเคราะห์นี้ใช้การเกิดอุบัติเหตุทั่วไปนอกเหนือจากตามแบบฉบับการออกแบบพื้นฐาน (Beyond Design Basis Accident: BDBA) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ RBMK-1500 โมเดลที่ถูกใช้เป็นโมเดลระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ (Full Reactor

Cooling System: Full RCS) และโมเดลช่องเชื้อเพลิงเดี่ยวแบบง่าย โดยที่โมเดล Full RCS ถูกนำมาใช้เพื่อรองรับระดับอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่เกิดการหลอมเหลวและโมเดลเชื้อเพลิงเดี่ยว ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์เหตุการณ์ต่าง ๆ หลังการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงขึ้น ผลการคำนวณของ BDBA ที่ทำการวิเคราะห์โดยให้เครื่องปฏิกรณ์แบบ RBMK-1500 นั้นเป็นที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับข้อมูลการวัดและผลการทดสอบจริง

6. SCDAP/RELAP5 application to CANDU6 fuel channel analysis under postulated LLOCA/LOECC conditions [28] (by M. Mladin et al., 2008)

ศึกษาการตั้งสมมติฐานขอบเขตเงื่อนไขของโมเดลเพื่อประเมินช่องเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบแคนาดาควิวเทอเรียมยูเรเนียม (CANDU6) ที่เกิดอุบัติเหตุเกี่ยวกับการสูญเสียของน้ำหล่อเย็น (LLOCA) และการสูญเสียการหล่อเย็นแบบฉุกฉิน (LOECC) โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงความสามารถโมเดลของโปรแกรม SCDAP ซึ่งเกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์และการแก้ไขการเกิดความเสียหายของช่องเชื้อเพลิง

7. Generic CANDU 6 plant severe accident analysis employing SCDAPSIM/RELAP5 code [29] (by D. Dupleac et al., 2009)

ประเมินความสามารถของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำหล่อเย็นและการเกิดเหตุไฟดับของสถานีในอุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าประเภท CANDU และเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการปรับปรุงโมเดล ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM เปรียบเทียบกับโปรแกรม MAAP4 CANDU สรุปผลพบว่าความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ดีกว่าโปรแกรม MAAP4 CANDU ผลที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากโมเดลของเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ (Thermal hydraulic)

8. Influence of Modelling Options in RELAP5/SCDAPSIM and MAAP4 Computer Codes on Core Melt Progression and Reactor Pressure Vessel Integrity [30] (by S. Sadek et al., 2009)

เปรียบเทียบผลจากการคำนวณของพฤติกรรมเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ (Thermal hydraulics) ที่ทำให้ความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.3 และโปรแกรม MAAP4 การทดลองที่นำมาวิเคราะห์เป็นอุบัติเหตุที่สถานีไฟดับของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เครสโค (Krsko nuclear power plant) เนื่องจากการรั่วไหลจากเครื่องปัมน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ ผลการทดลองพบว่าโปรแกรม MAAP4 มีความไวต่อสภาวะความร้อนแบบต่าง ๆ แต่พารามิเตอร์ของโมเดลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณและผลการทดลองของทั้งสองโปรแกรมมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน และความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเล็กน้อย

9. Simulation of air oxidation during a reactor accident sequence: Part 2 – Analysis of PARAMETER-SF4 air ingress experiment using RELAP5/SCDAPSIM [31] (by L. Fernandez et al., 2011)

จำลองการเกิดออกซิเดชันของอากาศในอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้โมเดล PARAMETER-SF4 โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การตอบสนองทางความร้อนและผลของการขาดออกซิเจนของช่วงเติมน้ำ (Reflood phase) โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 สามารถคำนวณการเกิดออกซิเดชันของอากาศของโมเดล PARAMETER-SF4 ได้ดี

10. Insertion of lead lithium eutectic mixture in RELAP/SCDAPSIM Mod 4.0 for Fusion Reactor Systems [32] (by A. Tiwari et al., 2012)

ประเมินผลการใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD4.0 โดยที่ใช่ของเหลวตะกั่วลิเทียมยูเทคติก (Liquid lead lithium eutectic, LLE) เป็นสารหล่อเย็น คุณสมบัติของของเหลว LLE คือสามารถขยายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน นำความร้อนและมีความหนืดเป็นต้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าสมบัติทางอุณหพลศาสตร์และการขนส่งของ

คุณสมบัติของของเหลว LLE เป็นผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับการทดลองจริงและโปรแกรมสามารถวิเคราะห์สารหล่อเย็นแบบของเหลว LLE ในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้

11. Preliminary Assessment of the Possible BWR Core/Vessel Damage States for Fukushima Daiichi Station Blackout Scenarios Using RELAP/SCDAPSIM [33] (by C.M. Chris et al., 2012)

ประเมินความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นที่โรงไฟฟ้าฟูกูชิมะไดอิจิ โรงที่ 1 ถึง 3 (Fukushima Daiichi unit 1-3) งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงการทดลอง อุบัติเหตุอย่างรุนแรงและใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 ในการวิเคราะห์ โมเดลที่ใช้คำนวณคือเครื่องปฏิกรณ์น้ำเดือดแบบลากูนาเวอร์ดี (Laguna Verde BWR) ถูกพัฒนาโดยหน่วยงานกำกับดูแลด้านนิวเคลียร์ของเม็กซิโก การประเมินนี้ถูกนำเสนออย่างเป็นทางการที่สำนักงานพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และพัฒนาโมเดลและโค้ดของโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะไดอิจิ

12. RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 Analysis of the Influence of Water Addition on the Behavior of a BWR during a Fukushima-like Severe Accident [34] (by A.K. Trivedi et al., 2013)

วิเคราะห์อิทธิพลของการเติมน้ำ (Water addition) ต่อพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์น้ำเดือด (BWR) ในช่วงเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 งานวิจัยนี้เน้นการเติมน้ำที่มีอิทธิพลต่อความร้อนและการหลอมของแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์ระหว่างการเติมน้ำจะอยู่ที่อัตราสูงสุดและเชื้อเพลิงอาจเริ่มละลาย ดังนั้นการเติมน้ำให้กับแกนปฏิกรณ์จึงมีอิทธิพลมากที่สุดในการลดปัญหาการเกิดการละลายของเชื้อเพลิง

13. Modelling of QUENCH-03 and QUENCH-06 Experiments Using RELAP/SCDAPSIM and ASTEC Codes [35] (by T. Kaliaatka et al., 2014)

ทำการวิเคราะห์การทดลอง QUENCH-03 ซึ่งเป็นการทดลองการสูญเสียอุบัติเหตุจากน้ำหล่อเย็นโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.2, 3.5 และ 4.0 และโปรแกรม ASTEC การทดลอง QUENCH-03 อัตราการฉีกน้ำในไปในแกนปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยนี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ทั้งโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 และ 4.0 ให้ผลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่คำนวณได้กับข้อมูลจริง

14. Assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.5 against the BWR core degradation experiment CORA-17 [36] (by H. Madokoro et al., 2014)

ประเมินความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ของการทดลอง CORA-17 โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 การทดลอง CORA-17 ประกอบด้วยอัตราการให้ความร้อนเริ่มต้นที่ประมาณ 1 kg/s และสิ้นสุดที่ตำแหน่งการรวมไอน้ำจากอาร์กอนที่ถูกฉีกเข้าไปในช่วงก่อนการทำความร้อนและน้ำหล่อเย็นที่ถูกเพิ่มเข้ามาในช่วงการดับความร้อน (Quench phase) ผลของการคำนวณจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM พบว่าผลการคำนวณที่แนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองแม้ว่ามีความคลาดเคลื่อนบ้าง

15. SCDAP Model Improvement with QUENCH06 analysis [37] (by H. Madokoro et al., 2014)

วิเคราะห์การทดลอง QUENCH-06 โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 วัตถุประสงค์ของการทดลอง QUENCH-06 ซึ่งเป็นการทดลองที่หกของการทดลองคือ การศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องในช่วงการดับความร้อน (Quench phase) ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง ผลจากการคำนวณพบว่าข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับผลการทดลองและมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

16. Incorporation of lithium lead eutectic as a working fluid in RELAP5 and preliminary safety assessment of LLCs [38] (by A. K. Trivedi et al., 2014)

ทำการคำนวณทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (Thermal hydraulic) โดยใช้โปรแกรม RELAP ของโปรแกรม RELAP / SCDAPSIM MOD4.0 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ระบบระบายความร้อนด้วยตะกั่วแบบลิเทียม (LLCS) สำหรับการทดสอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เชิงความร้อนนานาชาติ (International Thermonuclear Experimental reactor, ITER) จุดประสงค์หลักของงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับสภาวะคงที่และสภาวะที่เหมาะสม

17. AP1000 station blackout study with and without depressurization using RELAP5/SCDAPSIM [39] (by A. K. Trivedi et al., 2015)

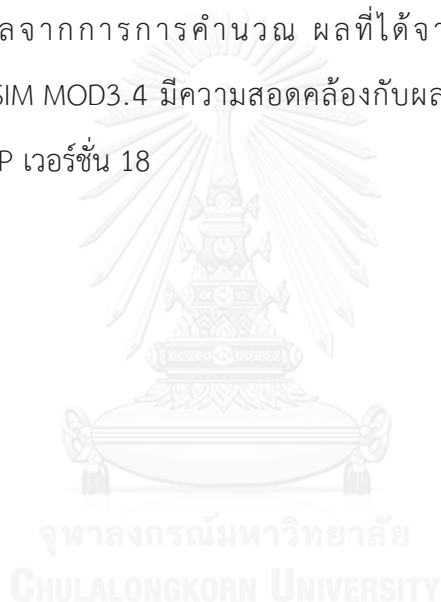
ศึกษาการไฟดับของสถานี AP-1000 ทั้งกรณีความดันสูงและความดันต่ำโดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.5 อุบัติเหตุความดันต่ำนำไปสู่ความล้มเหลวของปลอกเชื้อเพลิงโดยอาจทำให้เกิดการเกิดฟอง (Ballooning) และการแตกหัก (Rupturing) และอุบัติเหตุความดันสูงนำไปสู่การยุบของปลอกเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ของทั้งสองกรณีได้เปรียบเทียบกับผลของการทดลองจริงและผลการทดลองของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกันตียกเว้นช่วงแรกของวินาทีที่ 1800 ของการคำนวณมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของความเสียหายในสองกรณี

18. Reactor core isolation cooling system analysis of the Fukushima Daiichi Unit 2 accident with RELAP/ ScdapSIM [40] (by H. Lopez et al., 2016)

วิเคราะห์ระบบระบายความร้อนแบบแยกกับแกนปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ (RCIC) จากอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะไดอิจิโรงที่ 2 (Fukushima Daiichi Unit 2) โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยคือประเมินผลกระทบของระบบ RCIC การวิเคราะห์แสดงความสามารถในการตอบรับของระบบ RCIC ที่อนุญาตนั้นต้องควบคุมขอบเขตของโรงไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่ต้องมีมนุษย์มาเกี่ยวข้อง

19. Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test: Focusing on Reactor Core Temperatures and Hydrogen Production [41] (by N. Rattanadecho et al., 2016)

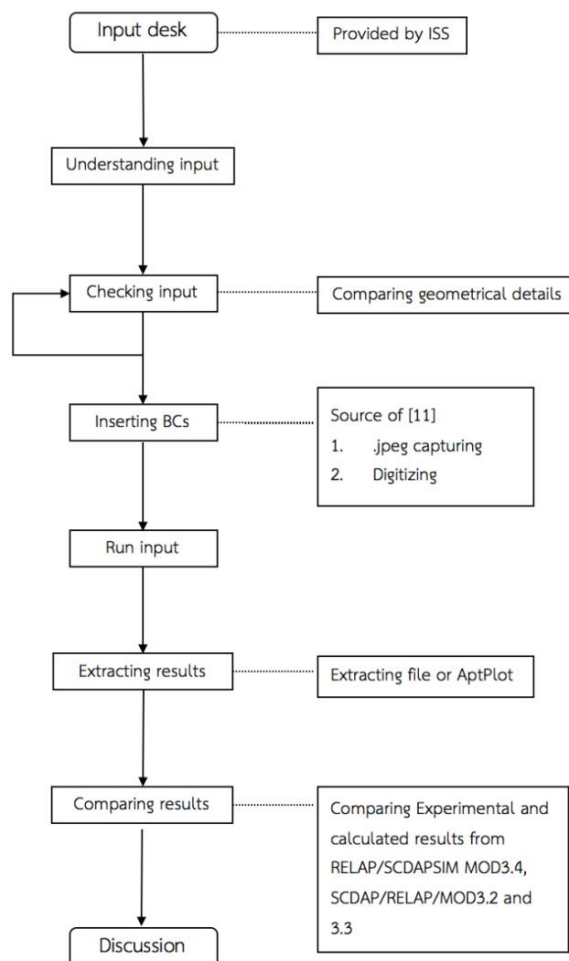
ประเมินความสามารถการทำนายกับการทดลอง SFD-ST โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และมุ่งเน้นไปที่อุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์และการผลิตไฮโดรเจน การประเมินของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงและผลจากการคำนวณโปรแกรม SCDAP เวอร์ชัน 18 และโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ผลการประเมินนี้มีผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่มีความแตกต่างบางอย่างระหว่างผลการทดลองและผลจากการคำนวณ ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าผลที่ได้จากโปรแกรม SCDAP เวอร์ชัน 18



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มตั้งแต่การเริ่มศึกษาข้อมูลขาเข้า (Input desk) ว่ามีโครงสร้างอย่างไรตามหนังสือคู่มือการเขียนข้อมูลขาเข้าของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 [15] อีกทั้งยังศึกษาและตรวจสอบการเขียนของข้อมูลขาเข้าว่ามีลักษณะตามการทดลองหรือหรือไม่ ถ้าไม่จะกลับไปแก้ไขแล้วไปตรวจสอบใหม่อีกครั้ง หลังจากการจึงเข้าสู่ขั้นตอนการใช้ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ในข้อมูลขาเข้า (Input desk) และการคำนวณและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และการดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ดังตามแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพของการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาข้อมูลขาเข้า

ในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จำเป็นต้องมีข้อมูลขาเข้า (Input desk) เพื่อเป็นแหล่งที่มาในการวิเคราะห์วิเคราะห์โดยที่ในข้อมูลขาเข้าจะบอกถึงรายละเอียดต่าง ๆ ของการทดลอง เช่น ส่วนประกอบและขนาดของแกนปฏิกรณ์ ทิศทางการไหลของสารหล่อเย็น และข้อมูลขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ของการทดลอง SFD-ST ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่าผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และใช้ข้อมูลขาเข้าซึ่งถูกสร้างและพัฒนาโดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ขั้นตอนการดำเนินขั้นตอนนี้ได้ศึกษาการใช้ข้อมูลขาเข้า (Input desk) ว่ามีโครงสร้างโครงสร้างและการเขียนอย่างไร และมีการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าว่าที่ข้อมูลการเขียนสอดคล้องกันกับข้อมูลตามหนังสืออ้างอิงของการทดลอง SFD-ST หรือไม่ โดยเมื่อตรวจสอบแล้วถ้ามีความผิดพลาดต้องทำการแก้ไขก่อนแล้วจึงสามารถดำเนินตามขั้นตอนต่อไปได้

ตัวอย่างการตรวจสอบข้อมูลขาเข้าที่กล่าวข้างล่างนี้เป็นการตรวจสอบจำนวนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงในส่วนประกอบ 1 (ตามรูปที่ 22 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

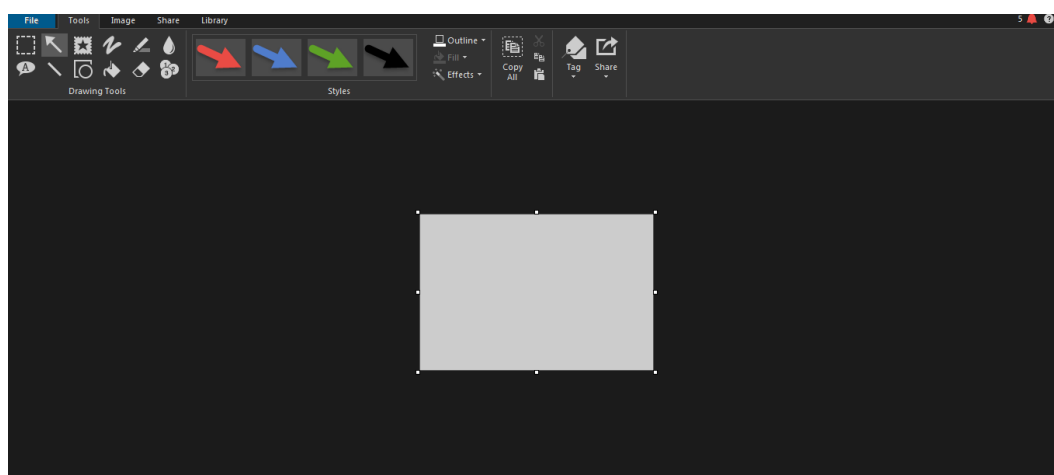
เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลข้อมูลจากการทดลอง SFD-ST กับข้อมูลขาเข้าข้างต้นพบว่า ข้อมูลทั้งสองส่วนที่มีความสอดคล้องกัน แต่บางกรณีขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ อาจจะไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นบาง ซึ่งข้อมูลที่คลาดเคลื่อนนี้อาจจะทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

3.2 การใช้ขอบเขตเงื่อนไขในข้อมูลขาเข้า

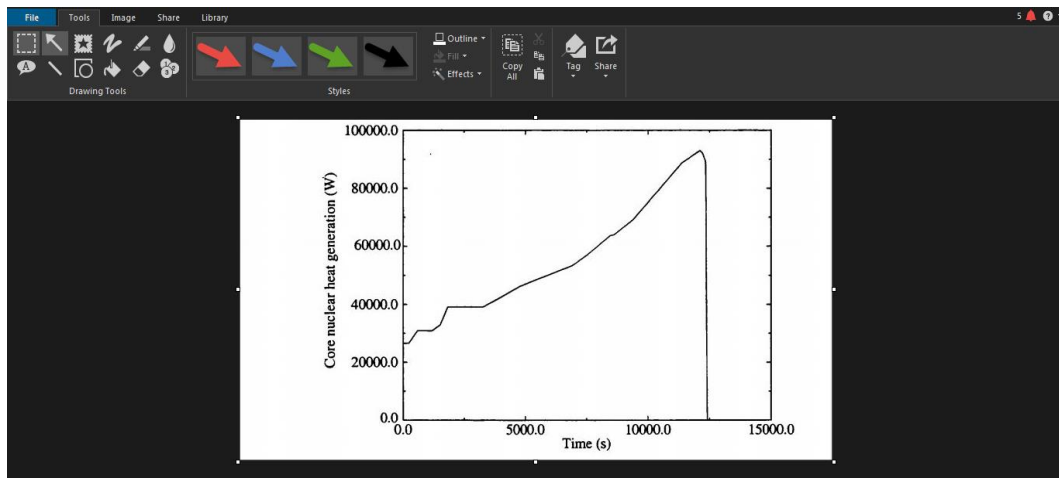
หลังจากทำการศึกษาข้อมูลขาเข้าแล้ว ขั้นตอนการดำเนินงานต่อมาจะทำการใช้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลอง SFD-ST ใส่ในข้อมูลขาเข้าของโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ผลและคำนวณขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองนั้นเป็นข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกราฟดังนั้นจำเป็นต้องมีการดึงข้อมูลออกมาจากกราฟโดยมีวิธีดังนี้

3.2.1 การคัดลอกรูปภาพขอบเขตเงื่อนไข

การคัดลอกรูปที่กล่าวนี้เป็นการคัดลอกรูปภาพของข้อมูลค่าเงื่อนไขขอบเขตของการทดลองเพื่อนำรูปที่ได้ไปแปลงให้เป็นข้อมูลตัวเลข (Digitizing) แล้วนำไปใส่ลงในข้อมูลขาเข้าโดยในการคัดลอกรูปนั้นจะใช้โปรแกรม Snagit 12 Editor หน้าต่าง (Window) ของโปรแกรมนี้แสดงในรูปที่ 9 โปรแกรม Snagit เป็นโปรแกรมสำหรับการคัดลอกภาพหน้าจอ การคัดลอกภาพนั้นจะรวมไปถึงภาพเคลื่อนไหวและเสียงอีกด้วย โปรแกรมนี้เป็นการจัดจำหน่ายโดยบริษัท TechSmith ซึ่งได้จำหน่ายหน่วยครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1990 โดยโปรแกรมนี้สามารถใช้งานได้ทั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows และ macOS โปรแกรมนี้มีทั้งเวอร์ชันภาษาอังกฤษ เยอรมัน เกาหลีและญี่ปุ่น การคัดลอกรูปภาพนั้นเราสามารถเปิดรูปภาพที่เราต้องการและทำการเปิดหน้าต่างของโปรแกรมพร้อม ๆ กัน และเมื่อต้องการทำการคัดลอกรูปภาพให้กดคำว่า “Capture” จะปรากฏลูกศรให้ลากขอบในการคัดลอกรูปหลังจากลากลูกศรเสร็จแล้วโปรแกรมจะทำการคัดลอกรูปมาที่หน้าต่างใหม่ กดเลือก “File” และเลือก “Save as” ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยในการบันทึกรูปภาพนั้น (Save as) ให้เลือกสกุลไฟล์เป็น .jpeg เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในการแปลงข้อมูลให้เป็นข้อมูลตัวเลขในขั้นตอนต่อไป



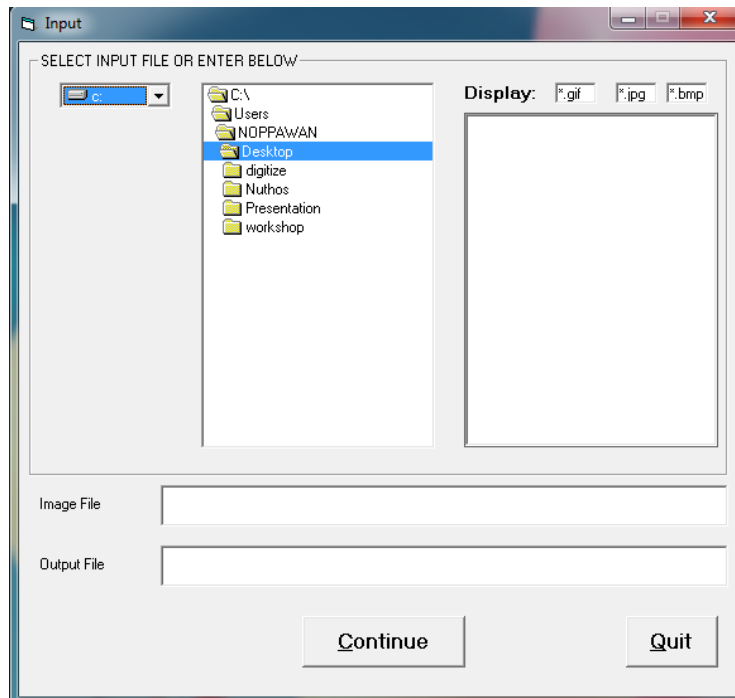
รูปที่ 9 หน้าต่างของโปรแกรม Snagit 12 Editor



รูปที่ 10 การบันทึกกราฟ

3.2.2 การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลข (Digitizing)

การแปลงกราฟให้เป็นข้อมูลตัวเลขนั้นเป็นการแปลงข้อมูลจากรูปกราฟทั่วไปให้ทราบถึงค่าทุกจุดของกราฟที่ต้องการทราบ โดยการใช้โปรแกรม Digitize ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เผยแพร่โดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) รูปที่ 11 แสดงรูปของหน้าต่างโปรแกรม Digitize หลังจากการคัดลอกรูปที่เราต้องการแล้วจะทำการแปลงข้อมูลโดยเข้าโปรแกรมแล้วกดเลือกไฟล์รูปที่เราได้คัดลอกไว้แล้ว หลังจากนั้นให้แก้ไขชื่อของไฟล์ขาออก (Output file) เป็นสกุล .text เมื่อโปรแกรมแสดงหน้าต่างที่มีรูปของกราฟที่เราต้องการแปลงข้อมูลให้กำหนดค่าแกน X และแกน Y ว่ามีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดเป็นเท่าไร เมื่อกำหนดเสร็จให้ทำการกดเลือกจุดตามเส้นกราฟตามที่แสดงเพื่อทำการแปลงข้อมูล เมื่อกดเลือกจุดเสร็จแล้วให้กดบันทึกแล้วไปให้ดูไฟล์ขาออกตามที่ได้บันทึกไว้ในตอนแรก ไฟล์ขาออกจะกฏและมีข้อมูลของกราฟอยู่ตามแสดงในรูปที่ 12 หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลเหล่านั้นไปใส่ในข้อมูลขาเข้าเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 11 หน้าต่างการใช้งานโปรแกรม Digitize

```

1 Scrap from SF05T
2 100 strstrip csv
3 103 0
4
5 *Card No. *Name *Parameter
6 1001 cadet 010101
7 1002 cadet 010201
8 1003 cadet 010301
9 1004 cadet 010401
10 1005 cadet 010501
11 1006 cadet 010601
12 1007 cadet 010701
13 1008 cadet 010801
14 1009 cadet 010901
15 1010 cadet 011001
16 1011 cadet 020101
17 1012 cadet 020201
18 1013 cadet 020301
19 1014 cadet 020401
20 1015 cadet 020501
21 1016 cadet 020601
22 1017 cadet 020701
23 1018 cadet 020801
24 1019 cadet 020901
25 1020 cadet 021001
26 1021 cadet 030101
27 1022 cadet 030201
28 1023 cadet 030301
29 1024 cadet 030401
30 1025 cadet 030501
31 1026 cadet 030601
32 1027 cadet 030701
33 1028 cadet 030801
34 1029 cadet 030901
35 1030 cadet 031001
36 1031 cadet 040101
37 1032 cadet 040201
38 1033 cadet 040301

```

รูปที่ 12 ไฟล์ขาออกของข้อมูลกราฟ

3.3 การคำนวณและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมนี้กับผลของการทดลองจริง อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรมอื่น ๆ เมื่อทำการเตรียมข้อมูลขาเข้า (Input desk) เสร็จแล้วก็ถึงขั้นตอนในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยรูปที่ 14 เป็นหน้าต่างของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งโปรแกรมนี้ถูกเผยแพร่โดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS)

3.3.1 ส่วนประกอบในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

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) เป็นข้อมูลที่เราต้องใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยในส่วนนี้จะเป็นการบอกข้อมูลทั้งหมดของระบบว่าเป็นอย่างไร (ตัวอย่างและความหมายการ์ดแสดงในภาคผนวก ก) เช่น ขนาดและประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ เวลาในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เช่น บั้ม วาล์ว ข้อต่อ เป็นต้น โดยที่ข้อมูลขาเข้านี้จะเก็บเป็นไฟล์สกุลไฟล์ .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) การ์ดนี้เป็นการบอกว่าการวิเคราะห์ครั้งนี้มีส่วนประกอบแบบไฮดรอลิก (Hydraulic component) อะไรบ้าง เช่น บั้ม (Pipe) ปริมาตร (Volume) ข้อต่อ (Junction) และวาล์ว (Valve) เป็นต้น
- คำจบของข้อมูลขาเข้า (End of input) เป็นการ์ดเพื่อบ่งบอกว่าจบการวิเคราะห์จบลงแล้ว

ส่วนที่ 2 ข้อมูลขาออก (Output desk) เป็นข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ได้ทำการคำนวณตามข้อมูลที่เราได้ทำการเขียนลงไปข้อมูลขาเข้า (Input) ซึ่งข้อมูลขาเข้านี้เป็นไฟล์สกุล .o โดยในข้อมูลขาออกนี้จะมีการแสดงถึงข้อมูลขาเข้าทั้งหมดก่อนแล้วจึงแสดงถึงผลของการวิเคราะห์ออกทั้งหมดแต่เนื่องจากถ้าเราจะทำการนำข้อมูลตรงนี้มาใช้มันจะเป็น

เรื่องที่ยุ่งยาก เพราะข้อมูลที่แสดงผลออกมานั้นเป็นผลที่แสดงออกมาไม่ได้เป็นรูปแบบที่อ่านง่าย ดังนั้นเพื่อให้เราต้องทำการดึงข้อมูลที่ได้จากข้อมูลขาออกออกมาโดยโปรแกรม AptPlot ซึ่งจะพูดขั้นตอนการดึงข้อมูลออกมาในหัวข้อต่อไป

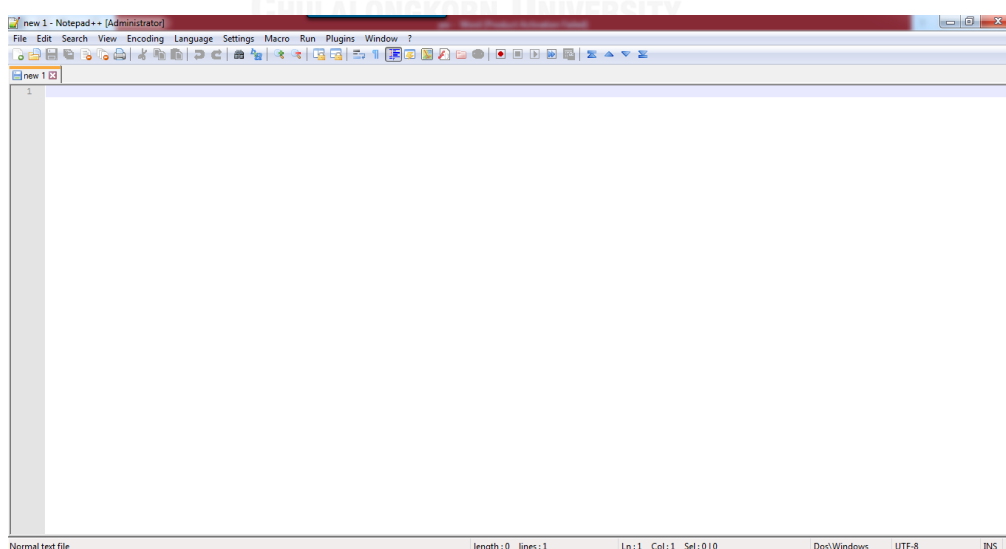
ส่วนที่ 3 ข้อมูลเก็บผล (Restart desk) เป็นข้อมูลการเก็บผลของการคำนวณเอาไว้เพื่อที่ว่าอาจจะมีการนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ใหม่อีกครั้ง โดยที่เราไม่ต้องไปเขียนข้อมูลขาเข้าอีก โดยที่ไฟล์สกุลของข้อมูลเก็บผลเป็น .r โดยการใช้ข้อมูลเก็บผลนี้จะใช้การโดยการประกาศจากในข้อมูลขาเข้า ซึ่งข้อมูลเก็บผลนี้เราไม่สามารถเปิดได้เลย ต้องเรียกเปิดจากโปรแกรมอื่น ๆ เช่น โปรแกรม AptPlot เป็นผล ข้อมูลเก็บผลนี้เมื่อเปิดแล้วเราจะได้ผลของผลการคำนวณตามที่เราได้ประกาศไว้ในข้อมูลขาเข้า

3.3.2 การใช้งานโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการรวมและสร้างข้อมูลขาเข้า (Input desk) และทำงานวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Window 7 ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลดังนี้

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 เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขและการทำงานซึ่งมีอยู่ใน Windows 7 หรือสามารถดาวน์โหลดโปรแกรม Notepad++ ได้ฟรีที่เว็บไซต์โดยตรงซึ่งโปรแกรมนี้ง่ายต่อการแก้ไขและการทำงานของข้อมูลขาเข้าดังแสดงตามรูปที่ 13



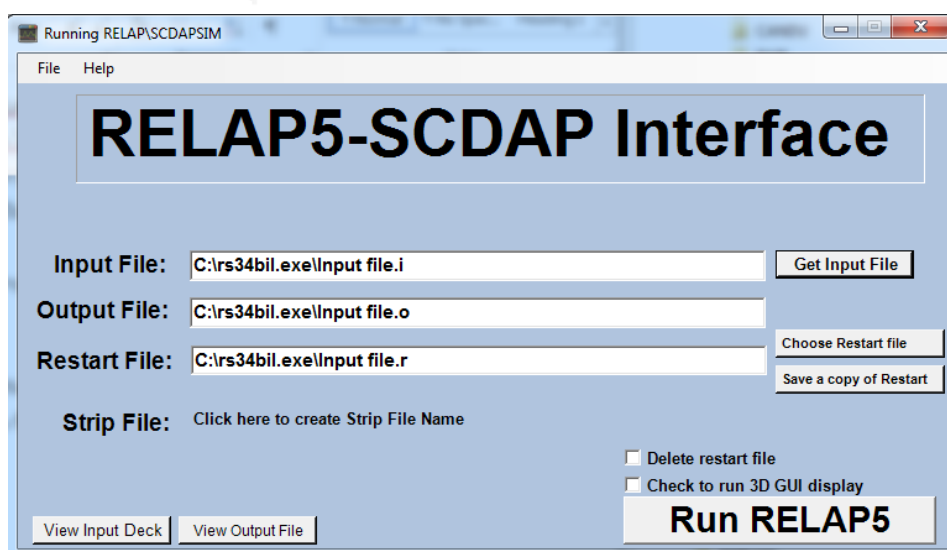
รูปที่ 13 หน้าต่างโปรแกรม Notepad++

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง (Run) ตัว โดยการเลือกไฟล์ re34bil.exe folder ที่มีชื่อว่า RunRELAP.exe เมื่อหน้าต่างของโปรแกรมปรากฏจะดังแสดงตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ขั้นตอนที่ 4 ทำการกดเลือกข้อมูลขาเข้า (Get Input File) เพื่อทำการเลือกไฟล์ที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์ หลังจากเลือกข้อมูลขาเข้าแล้วตัวโปรแกรมจะทำการเลือกตำแหน่งที่บันทึก (Location) ของข้อมูลขาออก (Output file) และข้อมูลเก็บผล (Restart file) ตามตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูลขาเข้าตามที่แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 หน้าต่างโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เมื่อเลือกข้อมูลขาเข้าแล้ว

ขั้นตอนที่ 5 กติวิเคราะห์ผล (RUN RELAP5) แล้วตัวโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างใหม่ตามที่แสดงในรูปที่ 16 โดยหน้าต่างนี้แสดงเวลาและข้อมูลในการวิเคราะห์และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จจะมีคำว่า Successful end of plot processing ซึ่งหมายถึงว่าในการวิเคราะห์ของข้อมูลขาเข้านี้สำเร็จเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราสามารถปิดหน้าต่างนี้ได้เลย ข้อมูลขาออกและข้อมูลเก็บผลจะปรากฏในไฟล์ที่เราไม่บันทึกไว้ในขั้นตอนก่อนหน้าและหลังจากการวิเคราะห์เสร็จแล้วเราจะทำการอ่านข้อมูลของผลการวิเคราะห์ต่อไป

```

relap5 - [Graphic1]
File Edit View State Window Help
RELAP5/SCDAP Mod3.4 (b11)
C:\rs34bil.exe\relap5.exe -i C:\rs34bil.exe\Input file.i -o C:\rs34bil.exe\Input file.o -r C:\rs34bil.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)

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

```

รูปที่ 16 หน้าต่างโปรแกรมเมื่อกด Run RELAP5 แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

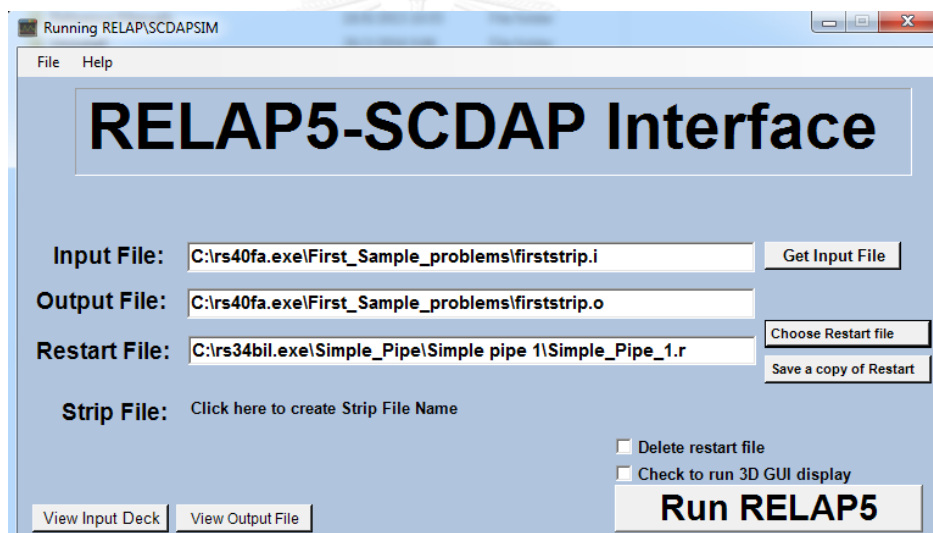
เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลขาเข้าแล้วจะได้ข้อมูลขาออกและข้อมูลเก็บผลออกมาซึ่งงานวิจัยวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลอื่น ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นในการดึงข้อมูลจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ออกมาแสดงในรูปของกราฟ การดึงข้อมูลมี 2 วิธีหลัก ๆ คือ การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูลและการดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot

3.4.1 การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล

การดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูลนั้นต้องเขียนไฟล์ข้อมูลขาเข้าใหม่เพื่อเป็นการดึงข้อมูลออกมา ซึ่งเมื่อเขียนไฟล์ข้อมูลขาเข้าที่เป็นสกุล .i แล้วให้เราทำคลิกเลือก 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 17 หลังจากการให้กด Run RELAP5 เพื่อทำการตั้งข้อมูลออกมาโดยตำแหน่งที่ทำการบันทึกไฟล์ข้อมูลขาออกไว้จะมีไฟล์ใหม่เกิดขึ้นเป็นไฟล์ข้อมูลที่เราได้วิเคราะห์ไว้แล้วซึ่งสามารถเปิดโดยโปรแกรม MS Excel ได้ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับการใช้ไฟล์ Strip

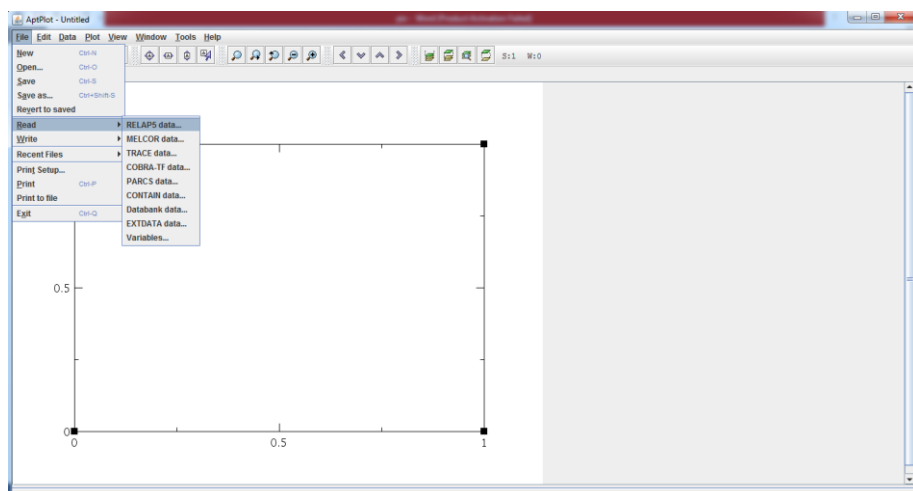
time	mflojw 120000000	mflojw 127000000	tempf 125010000	tempf 125020000	tempf 125030000	tempf 125040000	tempf 125050000
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
5.00E-02	4.63E+02	4.66E+02	3.08E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
1.00E-01	9.23E+02	9.28E+02	3.13E+02	3.06E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.05E+02
1.50E-01	1.38E+03	1.38E+03	3.17E+02	3.09E+02	3.06E+02	3.05E+02	3.05E+02
2.00E-01	1.82E+03	1.83E+03	3.20E+02	3.15E+02	3.08E+02	3.06E+02	3.05E+02
2.50E-01	2.26E+03	2.27E+03	3.22E+02	3.19E+02	3.13E+02	3.08E+02	3.06E+02
3.00E-01	2.69E+03	2.70E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.19E+02	3.13E+02	3.08E+02
3.50E-01	3.10E+03	3.12E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.20E+02	3.14E+02	3.14E+02
4.00E-01	3.50E+03	3.51E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.20E+02
4.50E-01	3.89E+03	3.89E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
5.00E-01	4.26E+03	4.26E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
5.50E-01	4.62E+03	4.62E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
6.00E-01	4.96E+03	4.96E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
6.50E-01	5.28E+03	5.28E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
7.00E-01	5.59E+03	5.59E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
7.50E-01	5.88E+03	5.88E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
8.00E-01	6.15E+03	6.15E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
8.50E-01	6.41E+03	6.41E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
9.00E-01	6.65E+03	6.65E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
9.50E-01	6.87E+03	6.87E+03	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
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 18 หน้าต่างของ MS Excel ที่ทำการดึงข้อมูลออกมา

3.4.2 การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot

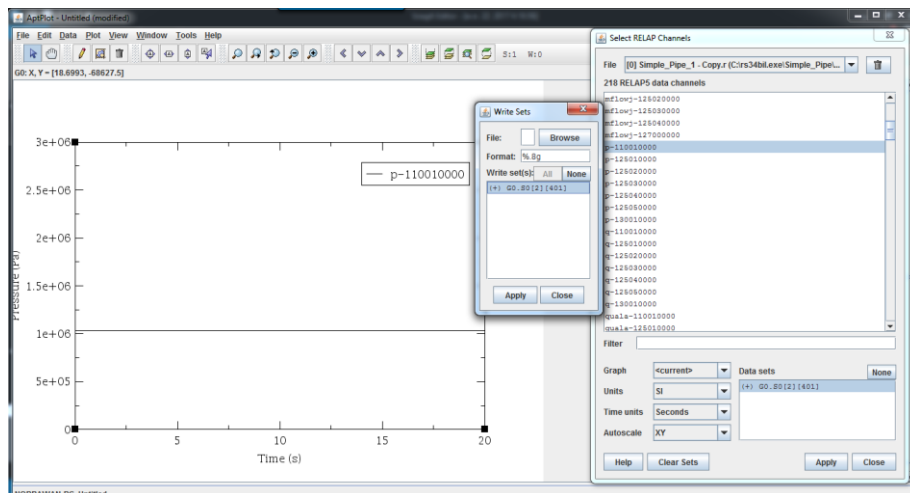
การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot เป็นวิธีที่ง่ายกว่าการดึงข้อมูลโดยใช้ไฟล์ดึงข้อมูล เนื่องจากเราไม่จำเป็นต้องเขียนไฟล์ใหม่ขึ้นมา ซึ่งการเขียนไฟล์ใหม่ขึ้นมานี้อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากกว่า การดึงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AptPlot เป็นการดึงข้อมูลโดยการใช้ไฟล์ข้อมูลเก็บผล (Restart file) ในการดึงข้อมูลแต่อาจจะต้องมีการประกาศค่าที่ต้องการแสดงลงไปข้อมูลขาเข้าก่อนโดยที่ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม AptPlot ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกไฟล์ข้อมูลเก็บผลที่ต้องการทราบผลการวิเคราะห์ โดยเพื่อเปิดหน้าต่างของโปรแกรม AptPlot แล้วให้เลือก Read แล้วเลือก RELAP5 data เพื่อเปิดไฟล์ข้อมูลเก็บผลหรือข้อมูลสกุล .r ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้แล้วหลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot เมื่อเลือกไฟล์ .r แล้ว

ขั้นตอนที่ 2 ให้เลือกข้อมูลตามที่แสดงทางขวามือเพื่อทำการดึงข้อมูลออกมา ข้อมูลทางขวาที่แสดงนั้นเป็นข้อมูลที่เราได้ทำการประกาศไว้ในข้อมูลขาเข้า เมื่อเลือกข้อมูลที่ต้องการแล้วให้กดเลือก Export ASCII เพื่อทำการนำข้อมูลที่ได้ออกไปแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 หน้าต่างโปรแกรม AptPlot และเลือก Export ASCII เพื่อนำไปพล็อต

3.5 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 นั้นเป็นข้อมูลของค่าขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ (Boundary conditions) โดยที่ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ผล เช่น อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง (Bundle inlet temperature) และความดันขาเข้าของเชื้อเพลิง (Bundle inlet pressure) เป็นต้น อีกทั้งยังบอกแผนภาพของระบบ (Nodalization) และตัวแปรที่สนใจในการทำการวิเคราะห์

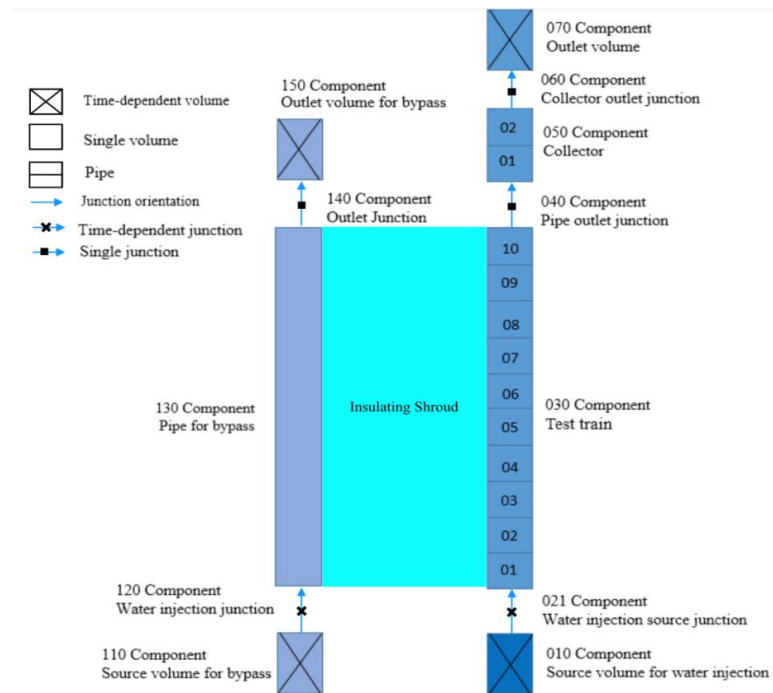
3.5.1 แผนภาพ (Nodalization)

แผนภาพ (Nodalization) เป็นแผนภาพที่แสดงถึงข้อมูลที่นำมาแสดงเป็นแผนภาพจากการจัดเรียงแกนปฏิกรณ์โดยนำจากข้อมูลขาเข้า (Input desk) ข้อมูลที่นำมาเขียนเป็นข้อมูลขาเข้าและแผนภาพของระบบนั้นเป็นข้อมูลขาเข้าโดยรับการสนับสนุนจากบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ประเทศสหรัฐอเมริกา แผนภาพแสดงส่วนต่าง ๆ ของทั้งในส่วนประกอบของ RELAP5 และ SCDAP ของการทดลอง PBF SFD-ST ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 21 และ 22 ส่วนประกอบ

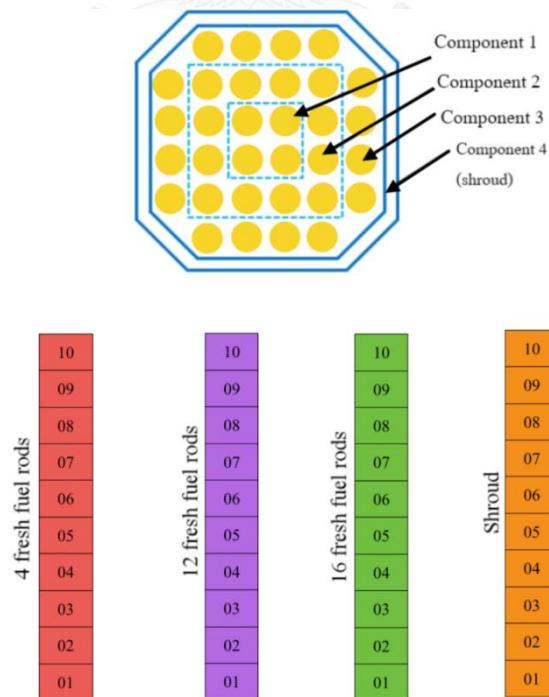
ของ RELAP5 แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบเทอร์โมไฮดรอลิก (Thermohydraulic) และ ส่วนประกอบของ SCDAP แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบของแกนปฏิกรณ์

ส่วนประกอบของระบบ RELAP5 ดังแสดงในรูปที่ 21 เริ่มต้นจากส่วนประกอบ 010 เป็น ปริมาตรเริ่มต้น (Source volume) เพื่อเป็นทางผ่านของน้ำในการหล่อเย็น ส่วนประกอบ 010 เชื่อม กับส่วนประกอบ 030 เป็นปริมาตรแบบท่อ (Test train) โดยเชื่อมผ่านข้อต่อ (Junction) ซึ่งเป็น ส่วนประกอบ 021 ส่วนประกอบ 030 ถูกแบ่งเป็น 10 ส่วนเท่ากัน ๆ กันโดยแต่ละช่องยาว 0.1 เมตร ส่วนประกอบชิ้นสุดท้ายซึ่งเป็นทางออกของส่วนประกอบ 030 เชื่อมต่อ กับส่วนประกอบ 050 ซึ่งเป็น ตัวเก็บ (Collector) โดยเชื่อมผ่านข้อต่อของส่วนประกอบ 040 ตัวเก็บมีลักษณะเป็นท่อโดย ประกอบด้วยท่อ 2 ท่อซึ่งแต่ละท่อยาว 0.5 เมตร ตัวเก็บเชื่อมต่อกับปริมาตรทางออก (Outlet volume) ซึ่งเป็นส่วนประกอบ 070 โดยเชื่อมต่อกับข้อต่อของส่วนประกอบ 060 ซึ่งส่วนประกอบ ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นส่วนประกอบของส่วนทางตรงที่มีน้ำผ่านมาหล่อเย็นเข้าไปยังเชื้อเพลิง (Bundle path) อีกส่วนที่เชื่อมกับส่วนนี้คือส่วนที่น้ำไม่ผ่านคือเป็นส่วนทางอ้อม (Bypass path) ซึ่ง ทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมกันโดยปลอกกันฉนวน (Insulating shroud) ส่วนประกอบทางอ้อมเริ่มต้นจาก ปริมาตรเริ่มต้นเป็นส่วนประกอบ 110 ซึ่งเชื่อมต่อท่อของส่วนประกอบ 130 โดยผ่านข้อต่อที่เป็น ส่วนประกอบ 120 ส่วนประกอบ 130 เป็นท่อมี่ความยาวเท่ากับ 1 เมตร และท่อนี้เชื่อมต่อกับ ส่วนประกอบ 150 โดยเชื่อมผ่านส่วนประกอบ 140

ส่วนประกอบของระบบ SCDAP ดังแสดงในรูปที่ 22 ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนประกอบ 1, 2, 3 และ 4 แสดงถึงวงแหวนภายใน (Inner ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง (Fresh rod) 4 แท่ง, วงแหวนตรงกลาง (Middle ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง (Fresh rod) 12 แท่ง, วงแหวนภายนอก (Outer ring) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง (Fresh rod) 16 แท่งและปลอกมัด เชื้อเพลิง (Shroud) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละส่วนประกอบถูกแบ่งเป็น 10 ส่วนแต่ละส่วนยาว 0.1 เมตร เชื้อเพลิงที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณเป็นเชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO₂) ขนาดของเม็ดเชื้อเพลิง (Fuel pellet) และขนาดของรัศมีของปลอกแท่งเชื้อเพลิงภายในและภายนอก เท่ากับ 4.13, 4.22 และ 4.81 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 21 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ RELAP5

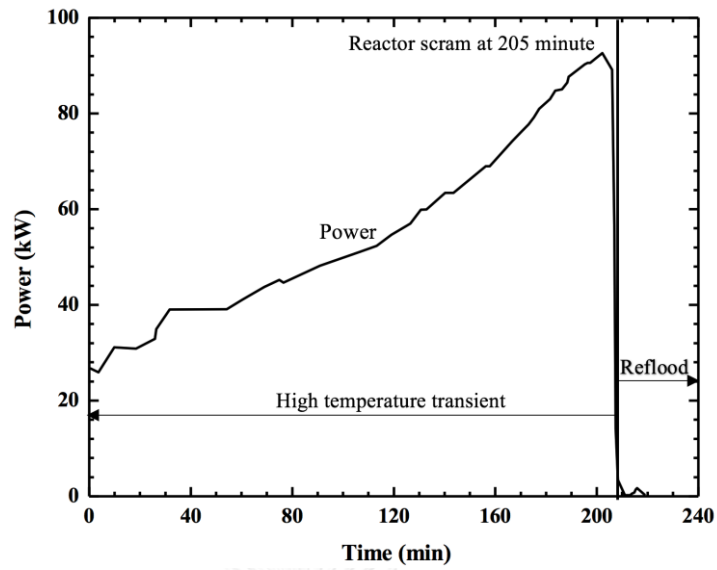


รูปที่ 22 แผนภาพของส่วนประกอบของระบบ SCDAP

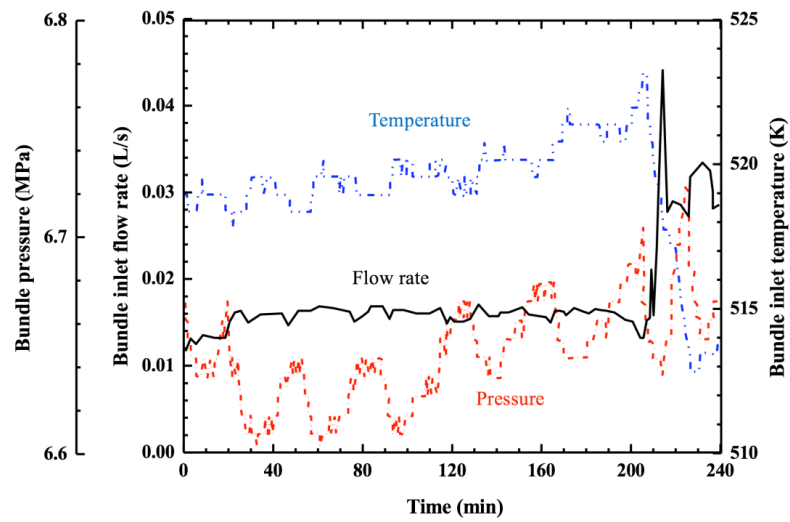
3.5.2 ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions)

ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) ของการทดลอง PBF SFD-ST ที่แสดงในหัวข้อย่อๆนี้เป็นเงื่อนไขของส่วนประกอบของส่วนทางตรง (Bundle path) ที่มีน้ำผ่านมาหล่อเย็นเข้าไปยังเชื้อเพลิงและส่วนทางอ้อม (Bypass path) ขอบเขตเงื่อนไขของหัวข้อย่อๆนี้แสดงข้อมูลของความดัน อัตราการไหลขาเข้า และอุณหภูมิขาเข้า เป็นต้น

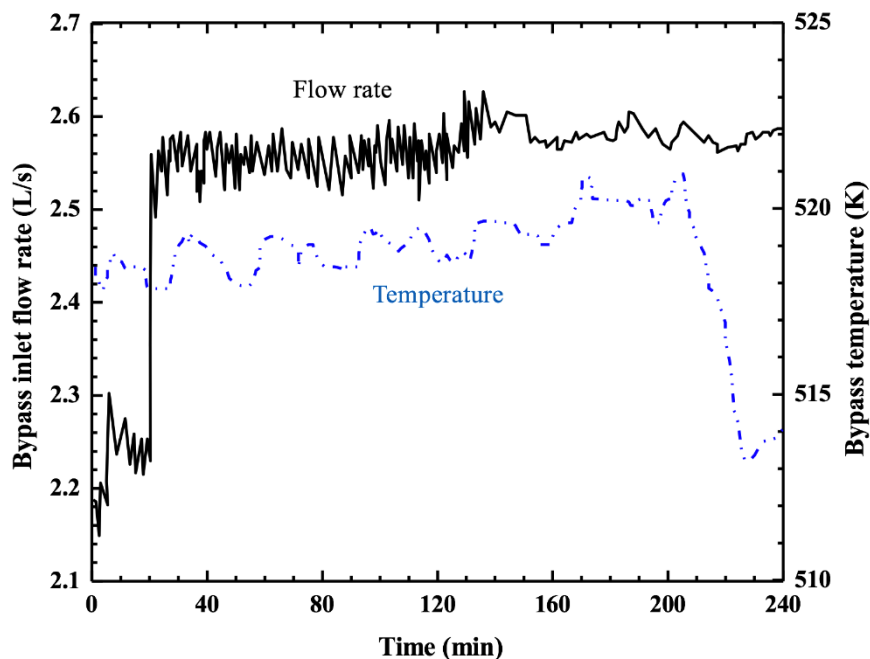
รูปที่ 23 แสดงข้อมูลขอบเขตของการแบ่งช่วงของการทดลอง (Phase) และแสดงข้อมูลของกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (Power) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่ากำลังเท่ากับ 35 กิโลวัตต์ขึ้นเป็นกำลังสูงสุดที่ 93 กิโลวัตต์หลังจากนี้กำลังของเครื่องปฏิกรณ์จะลดลงอย่างทันทีเมื่อเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) ณ เวลาที่ 205 นาทีซึ่งถือว่าช่วงตั้งแต่เริ่มต้นของการทดลองจนถึงช่วงก่อนเกิดเป็นช่วงชั่วคราว (Transient phase) และตั้งแต่ช่วงเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์จนถึงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0 กิโลวัตต์หรือเครื่องปฏิกรณ์หยุดทำงานเรียกว่าช่วงดับความร้อน (Quench phase) หรือเป็นช่วงที่เติมน้ำเพิ่ม (Reflood phase) เพื่อช่วยดับความร้อนที่เกิดขึ้น รูปที่ 24 แสดงข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขโดยที่อัตราการไหลขาเข้า (Inlet flow rate) ประมาณ 0.016 L/s ที่อุณหภูมิ 525 K ของช่วงชั่วคราวจากเริ่มต้นการทดลองจนถึง ณ เวลาที่ 205 นาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงช่วงดับความร้อนซึ่งช่วงนี้อัตราการไหลขาเข้าสูงขึ้นเป็น 0.030 L/s เพื่อช่วยลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิง อุณหภูมิขาเข้าของน้ำที่เข้ามาหล่อเย็นจะค่อนข้างคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 525 K ในช่วงชั่วคราวและอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยประมาณ 514 K ณ เวลาที่ 205 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ รูปที่ 25 แสดงข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขของส่วนทางอ้อม (Bypass path) แนวโน้มของเส้นอุณหภูมิจะคล้าย ๆ แนวโน้มของอุณหภูมิของส่วนทางตรงคือช่วงชั่วคราวอุณหภูมิก่อนข้างคงที่จะช่วงดับความร้อนอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นค่อนข้างคงที่ที่ 2.55 L/s



รูปที่ 23 ขอบเขตเงื่อนไขที่แบ่งการทดลองเป็นสองช่วง



รูปที่ 24 ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางตรง



รูปที่ 25 ขอบเขตเงื่อนไขของระบบทางอ้อม

3.5.3 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์

งานวิจัยเล่มนี้ทำการประเมินผลการทดลองของการทดลอง PBF SFD-ST ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลอง (Experimental results) และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 และโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 ตัวแปรที่สนใจในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรงได้แก่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่เป็นการร่วมกันของ ทั้งของเหลวและของแข็ง (Interface water level) อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding temperatures) และการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen production)

ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการเกิดไฮโดรเจนและอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงโดยตรง ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์มีผลต่อการทำนายอุณหภูมิโดยตรง การเกิดไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเซอร์โคเนียม (Zirconium) ของปลอกเชื้อเพลิงเซอร์คาลอย (Zircalloy cladding) กับไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 1273 K [42] ซึ่งการเกิดไฮโดรเจนนั้นนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง การทำนายผลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ถูกต้องนำไปสู่การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่แม่นยำ ไฮโดรเจนเป็นฟองชั้นของอุณหภูมิดังนั้นอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญของตัวแปรไฮโดรเจน โดยทั่วไปความเสียหายของแกนปฏิกรณ์เป็นเรื่องที่น่าสนใจในการ

วิเคราะห์และศึกษาแต่ปัญหาของการทดลองนั้นคือความจำกัดของเครื่องมือวัดกล่าวคือ เมื่อต้องการทราบค่าของอุณหภูมิต้องใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ซึ่งโดยปกติแล้วขีดความจำกัดของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลสูงสุดที่ 2000 K จากความจำกัดของการทดลองทำให้ผลที่ได้ไม่ชัดเจนแต่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM สามารถวิเคราะห์ผลโดยประมาณได้ งานวิจัยเล่มนี้ยังกล่าวถึงเรื่องของการกระจายอุณหภูมิของแกนปฏิกรณ์ (Temperature distribution) และระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level)

จากการทดลองแท่งเชื้อเพลิงมีความสูงเท่ากับ 0.9144 เมตร แต่ข้อมูลที่ใส่แต่ใช้ในข้อมูลขาเข้าคือแท่งเชื้อเพลิงมีความสูงเท่ากับ 1 เมตร เพื่อให้ไม่เกิดความซับซ้อนของการคำนวณดังนั้นผลการคำนวณที่อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากการทดลอง SFD-ST มีความสนใจในการวัดตัวแปรต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง 0.35, 0.5 และ 0.7 เมตร อ้างอิงจากจุดต่ำสุดของแท่งเชื้อเพลิง เนื่องจากทั้งสามตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากที่สุด โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM มีการคำนวณค่าอุณหภูมิของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จุดกึ่งกลางความสูงของส่วนประกอบนั้น กล่าวคือเนื่องจากการแบ่งแท่งเชื้อเพลิงออกเป็น 10 ส่วนและสูงส่วนละ 0.1 เมตร ทำให้เมื่อต้องการคำนวณอุณหภูมิของส่วนประกอบที่ 6 ค่าอุณหภูมิที่ได้จะเป็นอุณหภูมิตำแหน่งที่ 0.55 เมตร เป็นต้น

ตารางที่ 12 แสดงตำแหน่งของตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM โดยที่ตัวแปรระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์จะคำนวณที่ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงหลังการเกิดช่วงเติมน้ำ (Reflood) ตัวแปรอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงคำนวณที่ระดับตำแหน่ง 0.35 0.55 และ 0.75 เมตรโดยอ้างอิงจากจุดต่ำสุดของแท่งเชื้อเพลิงตามแนวแกนความสูงของปลอกเชื้อเพลิง ตัวแปรการเกิดไฮโดรเจนเป็นการคำนวณการเกิดไฮโดรเจนทั้งหมดโดยมีการคำนวณทั้งแบบเป็นอัตราการเกิดและปริมาณสะสม การกระจายของอุณหภูมิเป็นการคำนวณทุกระดับของแท่งเชื้อเพลิงเทียบกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปลอกเชื้อเพลิงไปจนถึงปลอกนอกของปลอกเชื้อเพลิง (0 ถึง 48.635 มิลลิเมตร) ตามแนวพื้นที่หน้าตัดที่เวลาต่าง ๆ และตัวแปรระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกคำนวณที่ระดับตำแหน่ง 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตร เพื่อให้สอดคล้องกันกับตัวแปรอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง ซึ่งตารางที่ 12 ยังแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยที่ ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ใช้พารามิเตอร์ voidf, อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงและการกระจายอุณหภูมิใช้พารามิเตอร์ cadct การเกิดไฮโดรเจนใช้พารามิเตอร์ bgrh และระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกใช้พารามิเตอร์ damlev

ตัวอย่างการคำนวณระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง 0.35 เมตร ในโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM พารามิเตอร์ที่ใช้แทนระดับความเสียหายคือ damglev ในการดึงข้อมูล โดยมีลักษณะการประกาศค่าดังนี้

1001 damglev 0004

โดยที่ การ์ด 1001 คือ การดึงข้อมูลของกราฟที่ 1 ออกมา
 damglev คือ พารามิเตอร์ที่ใช้แทนระดับความเสียหาย
 0004 คือ ค่าที่ส่วนประกอบที่ 4 ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 0.35 เมตร

ตารางที่ 12 ตำแหน่งของตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์	รายละเอียด	พารามิเตอร์
ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์	คำนวณตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงจุดสิ้นสุดของการทดลอง	viodf
อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง	คำนวณที่ระดับตำแหน่ง 0.35 0.55 และ 0.75 เมตรตามแนวความสูงของปลอกเชื้อเพลิง	cadct
การเกิดไฮโดรเจน	คำนวณเป็นอัตราการเกิดไฮโดรเจนและไฮโดรเจนสะสม	bgth
การกระจายอุณหภูมิ	คำนวณทุกระดับของแท่งเชื้อเพลิงเทียบกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปลอกเชื้อเพลิงไปจนถึงปลอกนอกของปลอกเชื้อเพลิง (0 ถึง 48.635 mm)	cadct
ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก	คำนวณที่ระดับตำแหน่ง 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตรตามความสูงของปลอกเชื้อเพลิง	damlev

บทที่ 4

การคำนวณและวิจารณ์ผลการคำนวณ

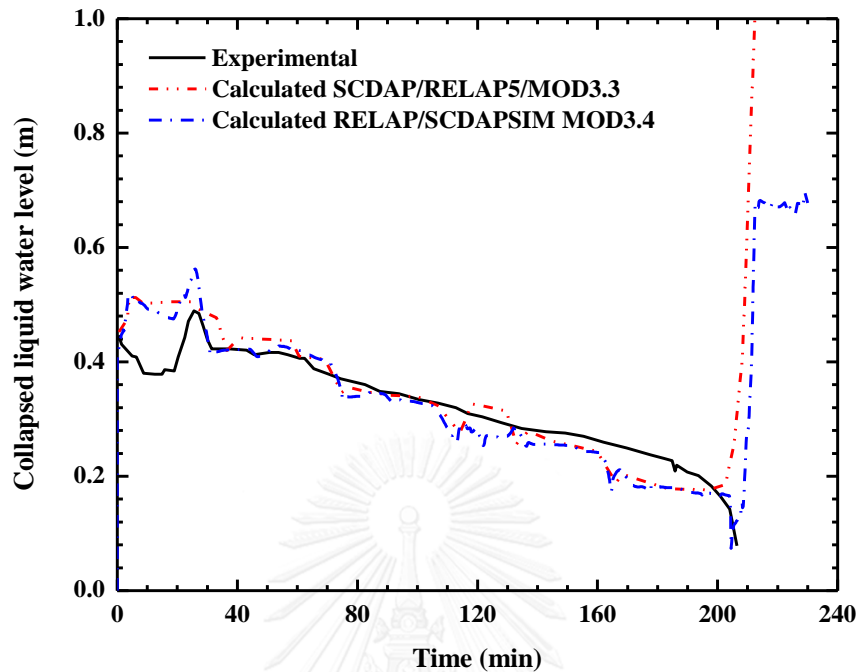
บทที่ 4 อธิบายถึงการคำนวณและวิจารณ์ผลการคำนวณของงานวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การทดลอง SFD-ST โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 วิเคราะห์และนำผลที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [13] และได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรมSCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 [18] โดยมีการเปรียบเทียบของข้อมูลดังตารางที่ 13 ข้อมูลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level) เปรียบเทียบผลจากผลการทดลอง (Experimental results) และโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ข้อมูลของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding temperatures) และการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen production) จะเปรียบเทียบผลจากผลการทดลองและโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2, SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และการกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution) และข้อมูลของระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก (Damage level states) จะแสดงผลได้แก่โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ตารางที่ 13 ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ผล

ผลข้อมูลจาก	ผลการทดลอง	SCDAP/RELAP5/MOD3.2	SCDAP/RELAP5/MOD3.3	RELAP/SCDAPSIM
	[13]	[18]	[18]	MOD3.4
ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์	✓		✓	✓
อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง	✓	✓	✓	✓
การเกิดไฮโดรเจน	✓	✓	✓	✓
การกระจายอุณหภูมิ				✓
ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง				✓

4.1 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ (Interface water level)

ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เป็นการร่วมน้ำของทั้งของเหลวและไอซึ่งระดับน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิโดยตรง ในรูปที่ 26 แสดงผลการทดลองและผลจากการคำนวณของโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ผลของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เป็นการวัดระดับของการร่วมน้ำของของเหลวและไอซึ่งช่วงบนของแกนปฏิกรณ์เป็นไอและช่วงล่างของแกนปฏิกรณ์เป็นน้ำหรือของเหลว ผลจากการทดลองสามารถทดลองได้เฉพาะช่วงภาวะชั่วคราว (Transient phases) ซึ่งเป็นช่วงตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงช่วง ระยะเวลาที่ 205 ก่อนการเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor scram) เท่านั้น ผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสองช่วงคือทั้งช่วงภาวะชั่วคราวและช่วงดับความร้อน (Quench phase) หรือช่วงเติมน้ำ (Reflood phase) จากรูปที่ 26 แนวโน้มของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์มีผลอย่างมากต่อผลของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงจากการพบว่าช่วงแรกของการทดลองผลการคำนวณของทั้งสองโปรแกรมทำนายได้ผลที่มากเกินไป ผลการทดลองอาจเกิดเนื่องจากการวัดผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เกิด Bubble ทำให้ในการวัดผลการทดลองนั้นระดับที่วัดได้เป็นการวัดรวมถึง Bubble แต่ในขณะเดียวผลจากการคำนวณเป็นการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เท่านั้น และจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผลการคำนวณและผลการทดลองมีความแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการทดลองนี้เป็น การวัดผลในช่วงที่ระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะเสถียร หลังจาก ระยะเวลาที่ 40 แนวโน้มผลการคำนวณของทั้งสองมีผลที่ใกล้เคียงกันกับผลของการทดลองจริง ช่วงการดับความร้อนโปรแกรมทั้งสองสามารถทำนายผลการคำนวณของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ได้แต่การทดลองจริงไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากเกิดความเสียหายของเครื่องวัด ช่วงการดับความร้อนนี้จะเห็นว่าระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นผลมาจากการเพิ่มน้ำเข้าตามอัตราการไหลขาเข้าเริ่มต้นเนื่องจากการช่วยทำให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นลดลง หลังจากช่วงเติมน้ำผลการคำนวณของโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ขึ้นสูงไปมาก แต่ผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จะขึ้นสูงไปประมาณที่ตำแหน่ง 0.7 เมตร จากผลการคำนวณของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์มีผลต่อการทำนายอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงกล่าวคือถ้าผลการคำนวณที่ได้จากระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์มีความแม่นยำมากจะส่งผลให้ความถูกต้องของการทำนายผลของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงมากขึ้นด้วย



รูปที่ 26 การเปรียบเทียบผลการทดลองของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์

4.2 อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง (Cladding temperature)

ผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2, SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ถูกนำมาเปรียบเทียบเป็นการวัดอุณหภูมิที่ระดับของปลอกเชื้อเพลิงที่ความสูง 0.35, 0.5 และ 0.7 เมตรโดยวัดจากด้านล่างของปลอกเชื้อเพลิง ผลอุณหภูมิที่ระดับทั้งสามที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมนั้นเป็นการประมาณค่าของระดับของปลอกเชื้อเพลิงของทุกระดับของปลอกเชื้อเพลิง เนื่องจากปลอกเชื้อเพลิงยาว 1 เมตรและแบ่งออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กันทำให้แต่ละส่วนย่อยเท่ากับ 0.1 เมตร กล่าวคืออุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.5 เมตรเป็นการประมาณค่าที่ส่วนย่อยที่ 6 ซึ่งจุดกึ่งกลางของส่วนย่อยที่ 6 มีความสูงเท่ากับ 0.55 เมตรทำให้การใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณนั้นเป็นการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ระดับความสูง 0.55 เมตร ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของผลเกิดขึ้นได้ การวัดคำนวณอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.7 เมตรเป็นการประมาณค่าที่ส่วนย่อยที่ 8 ทำให้การใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณนั้นเป็น

การวัดค่าอุณหภูมิที่ระดับความสูง 0.75 เมตร รูปที่ 27 ถึงรูปที่ 29 แสดงรูปที่เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.35, 0.5 และ 0.7 เมตรตามลำดับ

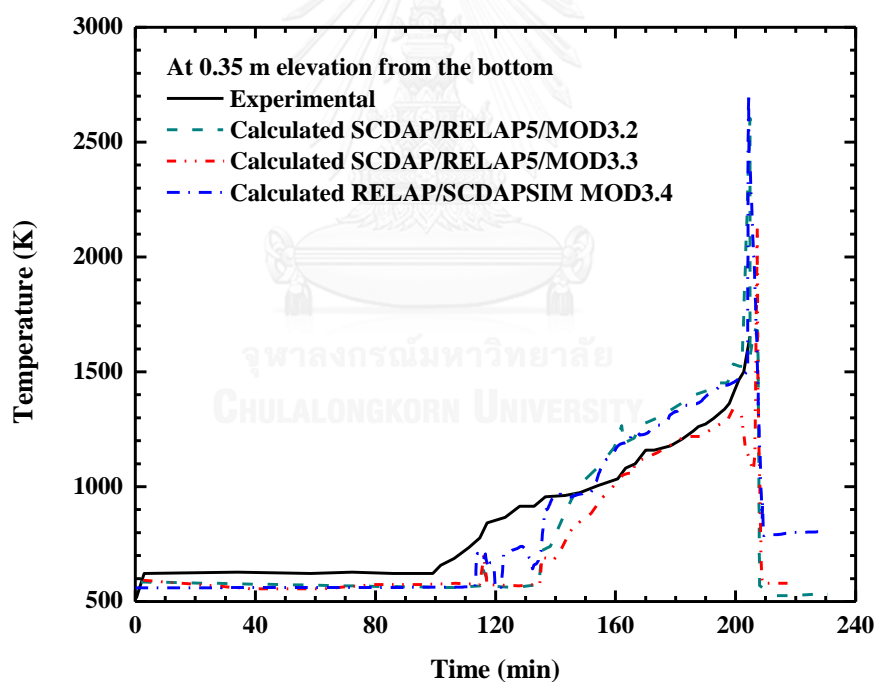
รูปที่ 27 แสดงอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.35 เมตรช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงประมาณช่วงเวลาที่ 120 อุณหภูมิที่คำนวณได้คงที่ประมาณ 525 K ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นในแกนปฏิกรณ์เนื่องจากที่ระดับ 0.35 เมตรและช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงประมาณช่วงเวลาที่ 120 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ตามรูปที่ 26 สูงกว่าระดับนี้ทำให้ช่วงนี้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและหลังจากช่วงนี้ไปแนวโน้มของอุณหภูมิมิแนวโน้มไปในทางเดียวกันผลการทดลองจนถึงช่วงเวลาที่ 205 ผลการทดลองจะไม่สามารถทำการวัดได้อีกต่อไปเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือวัดของการทดลอง ส่วนผลการคำนวณของโปรแกรมสามารถคำนวณได้ไปจนถึงช่วงดับความร้อนหลังจากช่วงนี้อุณหภูมิลดลงเป็นผลมาจากการการเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้ ผลการทำนายของทุกโปรแกรมในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงช่วงเวลาที่ 140 เป็นการทำนายค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าจากการทดลองและหลังจากช่วงนี้เป็นการทำนายที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลอง

รูปที่ 28 แสดงอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.5 เมตรช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงประมาณช่วงเวลาที่ 40 อุณหภูมิที่คำนวณได้คงที่เนื่องจากเป็นผลมาจากระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ ผลการทำนายของทุกโปรแกรมในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงช่วงเวลาที่ 80 เป็นการทำนายค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าจากการทดลองและหลังจากช่วงนี้ผลการทำนายที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลอง แนวโน้มการทำนายคล้ายกันกับการทำนายอุณหภูมิที่ระดับ 0.35 เมตร รูปที่ 29 แสดงอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.7 เมตรจากรูปพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้ไม่มีการคงที่ในช่วงเริ่มต้นเหมือนกับระดับ 0.3 และ 0.5 เมตรเนื่องจากรูปที่ 26 ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ในช่วงเริ่มต้นสูงประมาณ 0.5 เมตรทำให้เมื่อคำนวณอุณหภูมิที่ระดับความสูง 0.7 เมตรอุณหภูมิจึงสูงกว่าอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นเริ่มต้น แนวโน้มของทุกโปรแกรมในการคำนวณค่อนข้างทำนายได้ค่าที่ต่ำกว่าผลการทดลอง

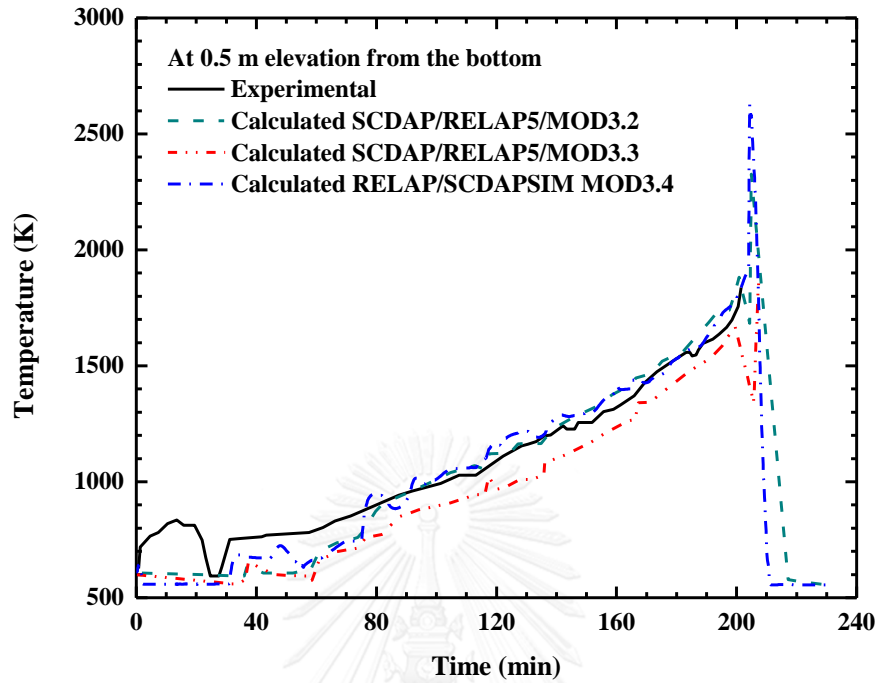
หลังจากช่วงภาวะชั่วคราว (Transient phase) หรือนาทีที่ 205 ช่วงเติมน้ำ (Reflood phase) เริ่มต้นขึ้นดังที่กล่าวมาการทดลองไม่สามารถวัดและทดลองผลที่เกิดขึ้นช่วงนี้ได้เนื่องจากความจำกัดทางเครื่องมือวัดแต่การคำนวณทางโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงทุกระดับมีแนวโน้มที่คล้ายกันคืออุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเติมน้ำเพื่อลดอุณหภูมิที่สูงลงเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายต่อเครื่องปฏิกรณ์

จากรูปที่ 27 ถึงรูปที่ 29 พบว่าผลการคำนวณของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงโดยทั้งสองโปรแกรมมีผลการคำนวณที่ต่ำกว่าผลการทดลองเป็นผลมาจากการคำนวณผลระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ต่ำกว่าผลการทดลอง จากผลการคำนวณสามารถกล่าวได้ว่าในช่วงก่อนเติมน้ำผลการคำนวณโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 อุณหภูมิของเปลือกเชื้อเพลิงให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลของการทดลอง ผลการคำนวณโดยโปรแกรม

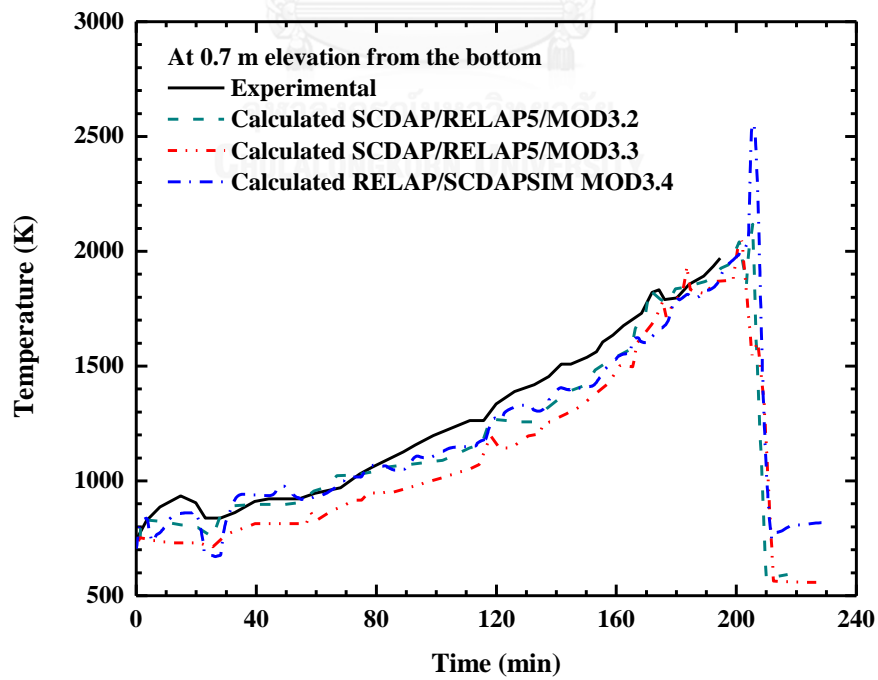
SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 มีผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.2 เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 และผลการคำนวณโดย SCDAP/RELAP/MOD3.3 ที่อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.35 m ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลการคำนวณโปรแกรมอื่น แต่ผลการคำนวณของอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.5 และ 0.7 m ผลการทดลองค่อนข้างไม่สอดคล้องกับการทดลองและผลการคำนวณโดย SCDAP/RELAP/MOD3.2 และ RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3 ถึงผลการคำนวณในช่วงก่อนเติมน้ำจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD 3.4 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดแต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอาจเกิดเนื่องจากผลการทำนายระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์และอาจจะเกี่ยวข้องกับโมเดลการคำนวณเช่น โมเดลของการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer model) เป็นต้น



รูปที่ 27 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.35 เมตร



รูปที่ 28 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.5 เมตร



รูปที่ 29 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับ 0.7 เมตร

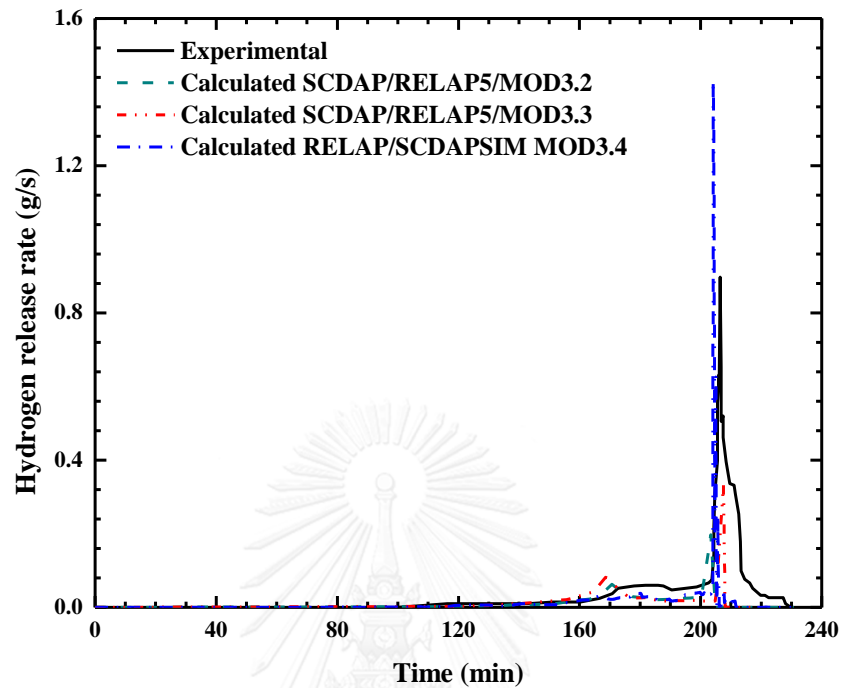
4.3 การเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen Production)

อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงมีผลต่อการเกิดไฮโดรเจน ความคลาดเคลื่อนผลการทำนายของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายของการเกิดไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงนั้นเป็นผลทำให้เกิดความร้อนในการผลิตไฮโดรเจน รูปที่ 30 และรูปที่ 31 แสดงผลการเปรียบเทียบของการเกิดไฮโดรเจนระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณของโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2, SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 โดยรูปที่ 30 แสดงอัตราการเกิดไฮโดรเจนและรูปที่ 31 แสดงปริมาณสะสมของการเกิดไฮโดรเจน จากรูปที่ 30 พบว่าอัตราการเกิดไฮโดรเจนตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงช่วงก่อนการเติมน้ำ (Pre-reflood phase) ผลการคำนวณทั้งสามโปรแกรมมีแนวโน้มที่เหมือนกันแต่หลังนี้ผลการคำนวณจากโปรแกรมทั้งสามค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนอย่างมากโดยที่ผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สูงกว่าโปรแกรมอื่น ๆ และสูงกว่าผลการทดลองอย่างมาก จากรูปที่ 31 แสดงปริมาณการเกิดไฮโดรเจนสะสมของผลการทดลองจาก [13] และ [43] เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทั้งสามโปรแกรม พบว่าผลการทดลองจาก [13] เป็นผลมาจากการอินทิเกรตอัตราการเกิดไฮโดรเจน ซึ่งเกิดปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุดเนื่องจากปริมาณการเกิดไฮโดรเจนสะสมที่เกิดเป็นการผลการทดลองของการทำอัตราปฏิกิริยาของทุกวัสดุ ขณะที่ผลการทดลองจาก [43] และผลการคำนวณจากโปรแกรมเป็นการคำนวณของอัตราการเกิดไฮโดรเจนจากการทำอัตราปฏิกิริยาของ Zircaloy เท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณจากทั้งสามโปรแกรมให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลอง [43]

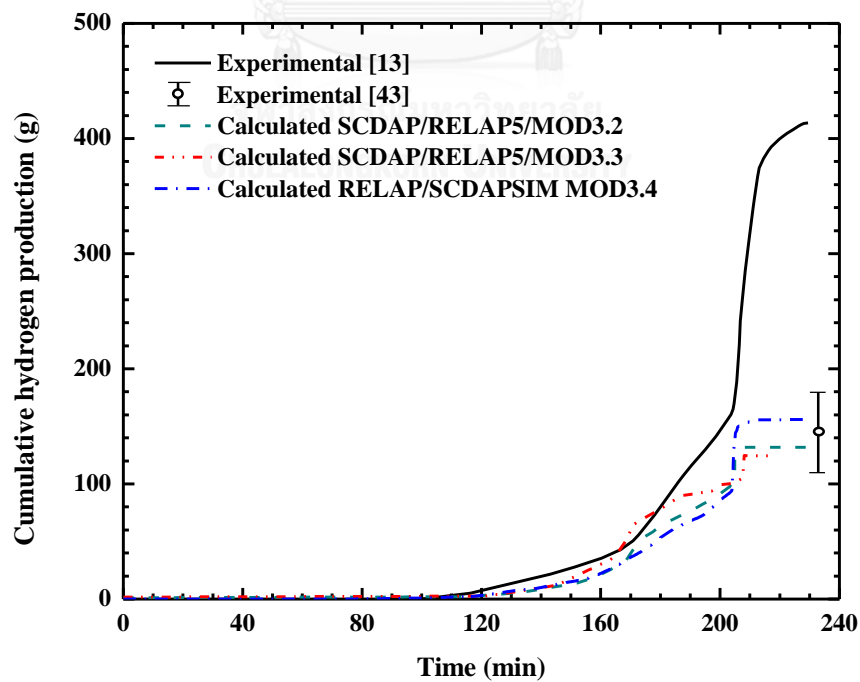
ตารางที่ 14 แสดงค่าของการเกิดไฮโดรเจนหน่วยกรัม จากตารางที่ 14 แบ่งผลการทดลองเป็นสองช่วงคือช่วงภาวะชั่วคราวหรือช่วงก่อนการเติมน้ำ (Pre-reflood phase) และช่วงที่รวมทั้งช่วงก่อนและหลังการเติมน้ำ (Total phase) ผลการทดลอง [43] พบว่าการเกิดไฮโดรเจนวิเคราะห์แต่ช่วงภาวะชั่วคราวแค่ช่วงเดียวตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ปริมาณการเกิดไฮโดรเจนของผลการทดลองประมาณ 150 ± 35 กรัม โดยที่โปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2, SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ทำนายว่าปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเท่ากับ 131, 125 และ 155 กรัม ปริมาณการเกิดไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมเป็นการคำนวณช่วงที่รวมทั้งช่วงก่อนและหลังการเติมน้ำ

จากผลการคำนวณข้างต้นพบว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมทั้งสามโปรแกรมสอดคล้องกันกับผลการทดลอง แต่จะเห็นว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 พบว่าการเกิดไฮโดรเจนสะสมจะมีแค่ช่วงก่อนเติมน้ำเท่านั้น ผลจากการคำนวณโดย RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 พบว่าผลการคำนวณของการเกิดไฮโดรเจนเป็นผลมาจากการทำนายอุณหภูมิของปลอก

เชื้อเพลิงและยังเป็นผลมาจากโมเดลการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ได้มีการแก้ไขและปรับปรุงโมเดลการเกิดออกซิเดชันด้วย



รูปที่ 30 การเปรียบเทียบผลการทดลองของอัตราการเกิดไฮโดรเจน



รูปที่ 31 การเปรียบเทียบผลการทดลองของการเกิดไฮโดรเจนสะสม

ตารางที่ 14 ผลการทดลองของการเกิดไฮโดรเจนของการทดลองจริงและการคำนวณโดยโปรแกรม

Experiment	Hydrogen production (g)							
	Measured [43]		SCDAP/RELAP5/ MOD3.2		SCDAP/RELAP5/ MOD3.3		RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	
	Pre-reflood	Total	Pre-reflood	Total	Pre-reflood	Total	Pre-reflood	Total
PBF SFD-ST	N/A	150 ± 35	131	131	98	125	145	155

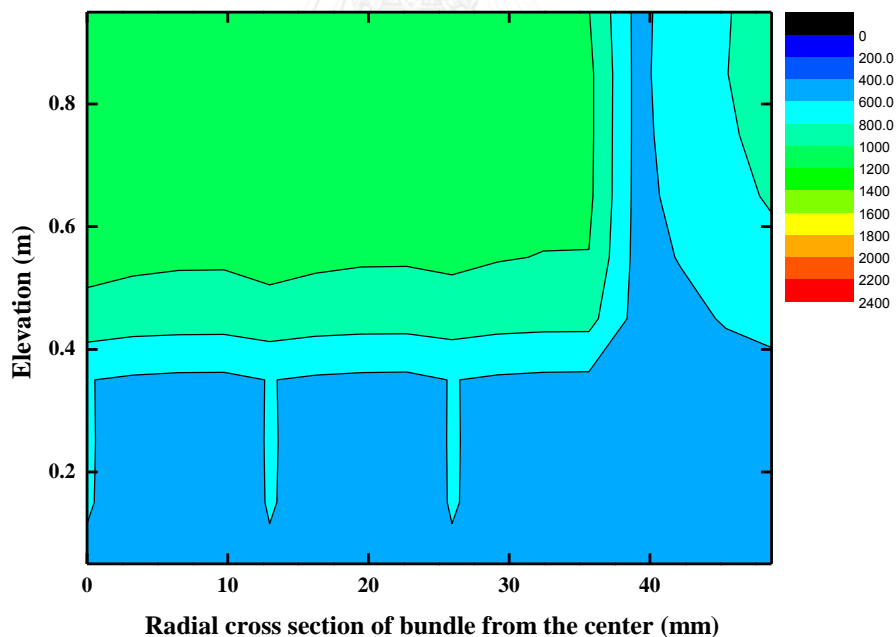
4.4 การกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution) แสดงถึงการเปลี่ยนอุณหภูมิของทุกระดับความสูงซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮโดรเจน การกระจายอุณหภูมิเป็นข้อมูลจากอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงในหัวข้อ 4.1 ที่คำนวณจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 นำมาพล็อตเพื่อให้เห็นถึงอุณหภูมิทุกระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงโดยวัดอุณหภูมิจากจุดศูนย์กลางของมัดเชื้อเพลิงหรือส่วนประกอบ 1 (Component 1) ของส่วนประกอบ SCDAP ในรูปที่ 22 โดยให้จุดนี้เป็นจุดอ้างอิงหรือ 0 มิลลิเมตรไปถึงจุดขอบนอกของปลอกเชื้อเพลิงหรือส่วนประกอบ 4 (Component 4) ของส่วนประกอบ SCDAP ในรูปที่ 22 โดยให้จุดนี้เป็นจุดสุดท้ายในการแสดงการกระจายอุณหภูมิหรือ 48.635 มิลลิเมตร โดยที่ส่วนประกอบ 1 ถึง 3 มีระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงที่เท่ากัน โดยส่วนประกอบ 3 มีรัศมีประมาณ 40 มิลลิเมตร และส่วนประกอบ 4 มีขนาดรัศมี 48.63 มิลลิเมตร โดยแสดงในรูปที่ 32, 33, 34 และ 35 แสดงการกระจายอุณหภูมินาทีที่ 80, 180, 190 และ 200 ตามลำดับ หรือเป็นช่วงก่อนเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ รูปที่ 36 และ 37 แสดงการกระจายอุณหภูมินาทีที่ 210 และ 220 ซึ่งเป็นช่วงหลังเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 5 และ 10 นาทีตามลำดับ

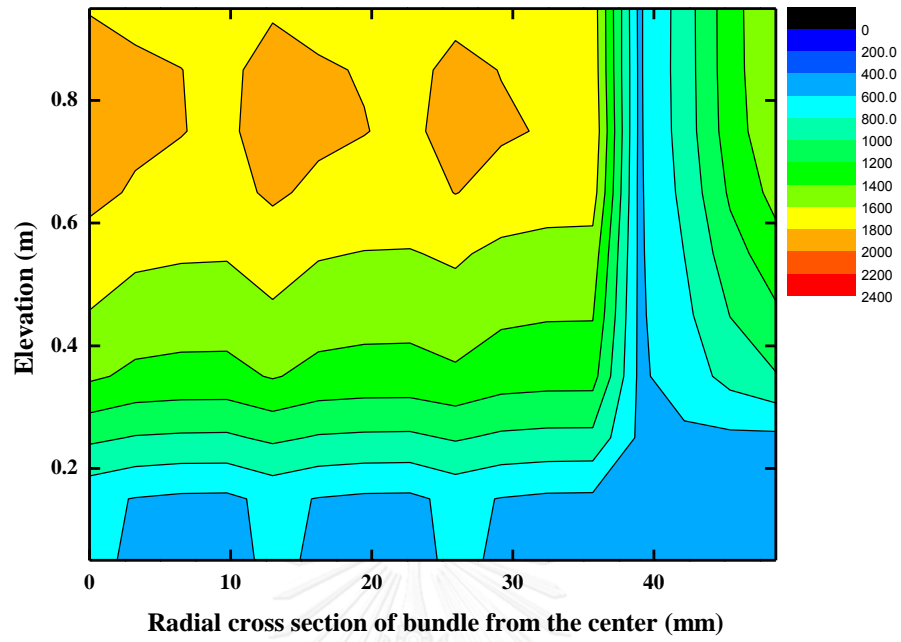
จากรูปที่ 22 อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่สูงสุดจะอยู่บริเวณระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิง ณ จุดตำแหน่งที่ 0.7 ถึง 0.8 เมตร เนื่องจากอุณหภูมิลดลงจากระดับความสูงที่ต่ำกว่าและเวลาที่เข้าในการหล่อเย็นเนื่องจากการป้อนน้ำหล่อเย็นจากทางด้านของระดับความสูงต่ำสุด ระยะที่ประมาณ 38 ถึง 40 มิลลิเมตร จะมีช่องว่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงและแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Shroud) จึงทำให้ในบริเวณของทุกช่วงของการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า นาทีที่ 80 อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงสูงสุดประมาณ 1130 K ที่บริเวณตำแหน่งความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.7 ถึง 0.8 เมตร ช่วงนาทีที่ 180, 190, และ 200 อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงสูงสุดประมาณ 1850 K, 1959 K และ

2163 K ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นที่จุดตำแหน่งตามความสูงของปลอกเชื้อเพลิง เมื่อเวลาผ่าน นาที่ที่ 210 และ 220 ซึ่งเป็นช่วงหลังการเกิดการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงในช่วงนี้ลดลงเนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนของน้ำหล่อเย็นโดยเพิ่มขึ้นเป็น 0.035 L/s และช่วงนี้อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงสูงสุดอยู่บริเวณตำแหน่งความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.1 ถึง 0.2 เมตร เนื่องจากความร้อนสะสมของการหลอมละลายที่ตกลงอยู่บริเวณด้านล่าง จากข้อมูลข้างต้นของการกระจายอุณหภูมิเป็นผลทำให้เกิดไฮโดรเจนตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 1300 K

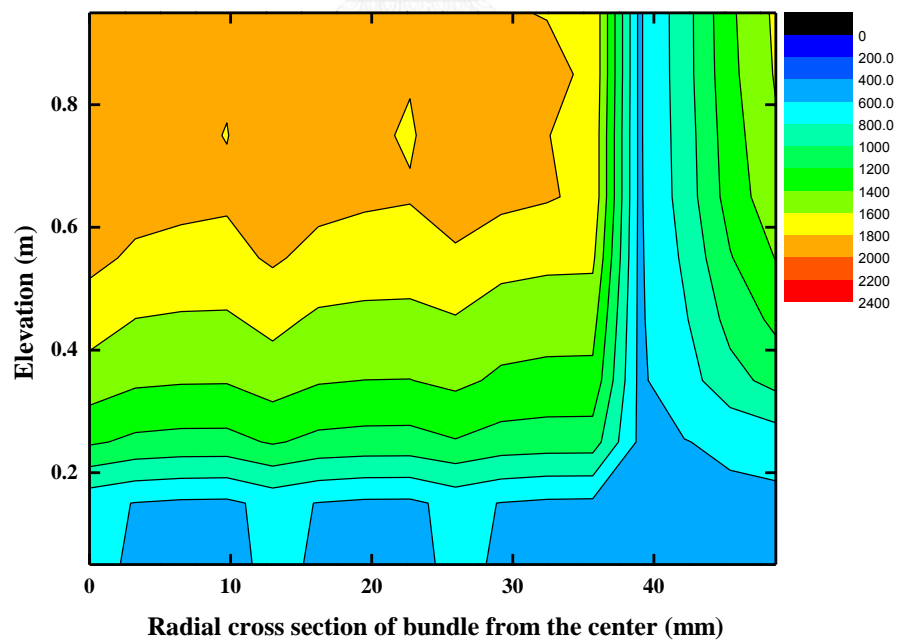
จากรูปที่ 38 แสดงการกระจายอุณหภูมินาทีที่ 80 ซึ่งแสดงในสเกลอุณหภูมิที่ละเอียดขึ้น ช่วงตำแหน่งความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0 ถึง 0.35 เมตร ตามรูปที่ 32 จะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ระยะจุดศูนย์กลางของมัดเชื้อเพลิงจนถึงระยะประมาณ 40 เมตร อุณหภูมิค่อนข้างจะเท่ากันแต่มีส่วนที่มีความแตกต่างกับบริเวณอื่น ๆ เกิดขึ้น แต่เมื่อสังเกตตามรูปที่ 38 ส่วนต่างของบริเวณนี้ค่อนข้างที่จะมีช่วงอุณหภูมิเดียวกัน และช่วงนี้แตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากที่โปรแกรมที่คำนวณเป็นโปรแกรมที่ใช้โมเดล 1 มิติในการคำนวณจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น



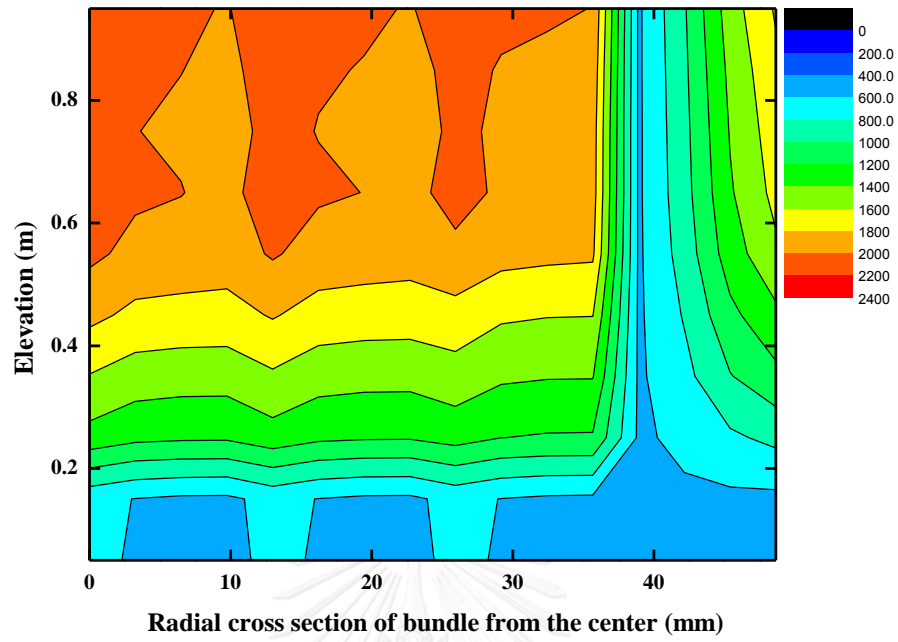
รูปที่ 32 การกระจายอุณหภูมินาทีที่ 80



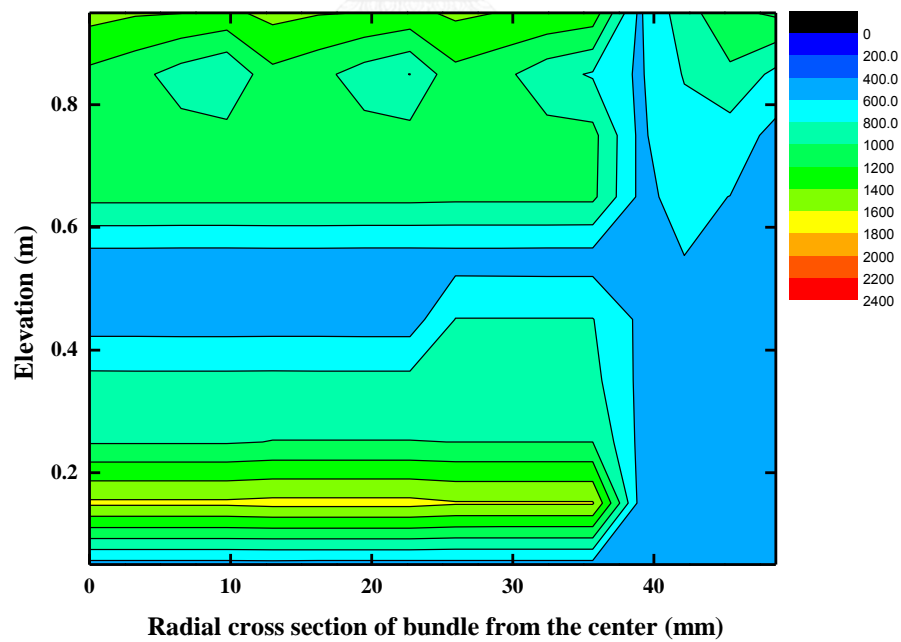
รูปที่ 33 การกระจายอุณหภูมิที่ 180



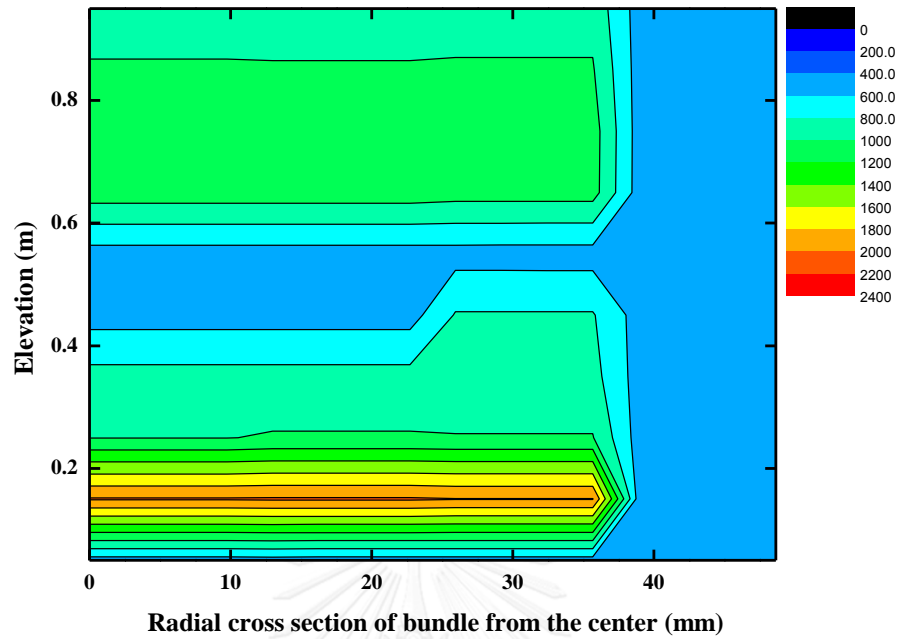
รูปที่ 34 การกระจายอุณหภูมิที่ 190



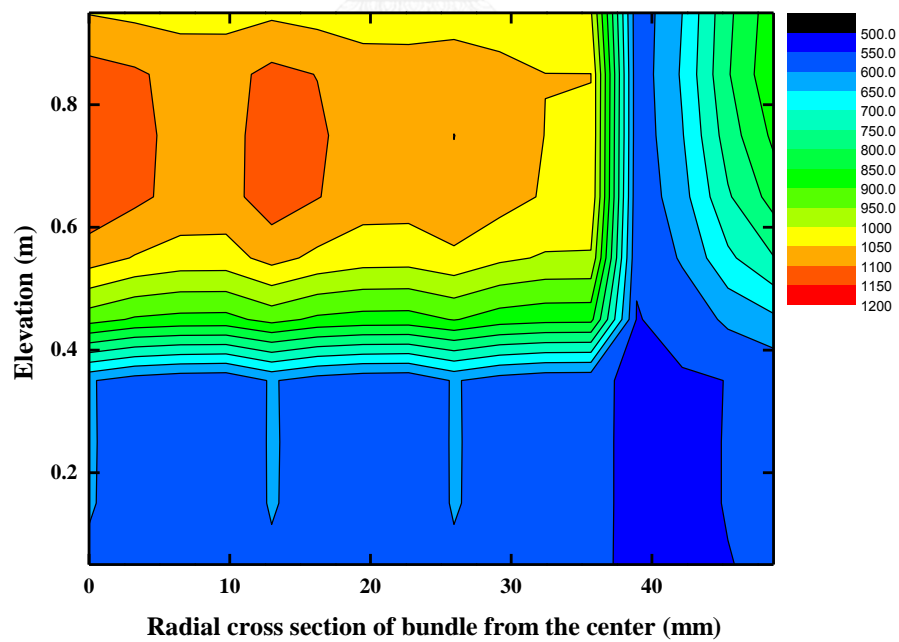
รูปที่ 35 การกระจายอุณหภูมิที่ 200



รูปที่ 36 การกระจายอุณหภูมิที่ 210



รูปที่ 37 การกระจายอุณหภูมิที่ 220



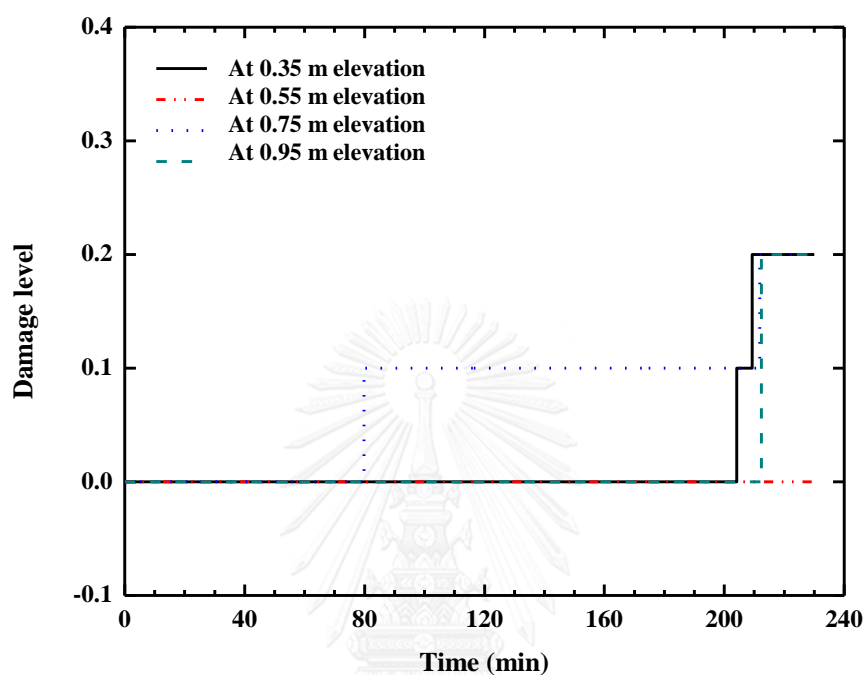
รูปที่ 38 การกระจายอุณหภูมิที่ 80 (สเกลละเอียดย)

4.5 ระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง (Damage state levels)

ระดับความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิคือเมื่อยังอุณหภูมิสูงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิงก็ยิ่งมากขึ้น อีกทั้งความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงยังขึ้นกับความดันภายในยิ่งความดันสูงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายยิ่งเพิ่มขึ้น รูปที่ 32 แสดงระดับการเกิดความเสียหายของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.35, 0.55, 0.75 และ 0.95 เมตรซึ่งเป็นการแสดงผลโดยเทียบกับอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง ตารางที่ 5 ในบทที่ 2 แสดงระดับการเกิดความเสียหายซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิงในรูปที่ 39 ค่าที่มากที่สุดของระดับการเกิดความเสียหายของทุกระดับความสูงคือ 0.2 ซึ่งหมายถึงเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้ของเหลวที่หลอมละลายไหลไปอยู่ช่องว่างของแท่งเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง ที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เกิดการเริ่มเกิดการหลอมเหลวของปลอกเชื้อเพลิงใกล้กับช่วง ณาที่ที่ 205 หรือช่วงการเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์และหลังจากนั้นจะเกิดการหลอมละลายของเชื้อเพลิง ที่ระดับความสูง 0.55 เมตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดความเสียหายเลย ที่ความสูง 0.75 เมตร เริ่มเกิดความเสียหายซึ่งเกิดจากการเกิดฟองตั้งแต่ณาที่ที่ 80 จนถึงณาที่ที่ 205 และหลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะเริ่มหลอมละลาย และที่ระดับความสูง 0.95 เมตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดความเสียหายเลยจนณาที่ที่ 210 หรือหลังจากเกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ 10 นาที จะเกิดการหลอมละลายของเชื้อเพลิง ความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงเกิดขึ้นครั้งแรกที่บริเวณตำแหน่งระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.75 เมตร ณาที่ที่ 80 ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่อุณหภูมิสูงที่สุดของทุกระดับความสูง ระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.35, 0.75 และ 0.95 เมตร จะเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงในช่วงตั้งแต่เกิดการเกิดการหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากการอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.55 ตำแหน่งเดียวที่ไม่เกิดความเสียหายเลยอาจเกิดเนื่องจากเกิดการอุดตัน (Blockage) ที่หลอมจากปลอกเชื้อเพลิงที่มาเกาะบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ผิวของปลอกเชื้อเพลิงเกิดขึ้นทำให้อุณหภูมิลดลง

ตารางที่ 15 แสดงผลสรุปอุณหภูมิและเวลาการเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง จากข้อมูลอ้างอิง [13] พบว่าปลอกเชื้อเพลิงเกิดการหลอมละลายณาที่ที่ 78 ถึง 87 เป็นต้นไปและอุณหภูมิสูงสุดของปลอกเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 1000 ถึง 1200 K ข้อมูลอ้างอิงของแหล่งอ้างอิงอื่น [43] พบว่าปลอกเชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย ณาที่ที่ 90 ถึง 104 และอุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้เกิดการหลอมละลายคือ 1150 ถึง 1200 K จากรูปที่ 33 ผลการคำนวณจากโปรแกรม SDAP/RELAP/MOD3.3 พบว่าปลอกเชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย ณาที่ที่ 100 ถึง 106 และอุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้เกิดการหลอมละลายประมาณ 1050 K ผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 พบว่าปลอกเชื้อเพลิงเริ่มเกิดความเสียหายที่ณาที่ที่ 80 และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดความเสียหายคือ 1130 K

ซึ่งการจากเปรียบเทียบผลการคำนวณพบว่า ทั้งอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงและเวลาที่เกิดความเสียหายของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ใกล้เคียงกับผลที่นำมาอ้างอิง และมีค่าสอดคล้องกับอ้างอิงกว่าผลจากโปรแกรม SDAP/RELAP/MOD3.3



รูปที่ 39 ระดับการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 15 อุณหภูมิและเวลาการเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิง

	ช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายของ ปลอกเชื้อเพลิง (นาที)	อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่เกิด ความเสียหาย (K)
ผลข้อมูลอ้างอิงจาก [43]	90-104	1150-1200
ผลข้อมูลอ้างอิงจาก [13]	78-87	1000-1200
ผลจากโปรแกรม SCDAP/RELAP/MOD3.3	100-106	1050
ผลคำนวณจากโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4	80	1130

4.6 สรุปผลการคำนวณ

ตารางที่ 16 แสดงผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เปรียบเทียบกับผลของการทดลองและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ผลการคำนวณของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ที่ค่าจากโปรแกรม LAP/SCDAPSIM MOD3.4 ในช่วงก่อนเติมน้ำ (Pre-reflood phase) ค่อนข้างจะสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ช่วงเติมน้ำผลที่ได้จากการทดลองไม่สามารถทำการวัดได้เนื่องจากข้อจำกัดทางเครื่องมือวัด อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่คล้ายกันของทั้งสามโปรแกรมแต่มีความคลาดเคลื่อนต่างกันบ้างโดยทั้งสามโปรแกรมสามารถคำนวณผลของอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงได้ตลอดการทำการทดลอง การกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงบริเวณที่ระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.75 เมตร ให้ค่าอุณหภูมิที่สูงสุด และการประเมินความเสียหายของเชื้อเพลิงพบว่าการทดลอง SFD-ST นำไปสู่การหลอมละลายของทั้งเชื้อเพลิงและปลอกเชื้อเพลิง

ตารางที่ 16 สรุปผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4

ตัวแปร	สรุปผลการคำนวณ
ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงแรกของการคำนวณ ผลการคำนวณค่อนข้างจะน้อยกว่าผลการทดลองมาก - หลังจากช่วงเวลาที่ 40 ถึง 200 ผลการคำนวณการคำนวณมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการทดลอง - หลังจากเวลาที่ 200 เกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์และเกิดความจำกัดของเครื่องมือวัดทำให้ไม่สามารถวัดได้ โปรแกรมสามารถคำนวณได้ในช่วงนี้ <p>ผลการคำนวณพบว่าผลการคำนวณแต่ละโปรแกรมมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่ผลการคำนวณโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ผลการคำนวณในช่วงก่อนเติมน้ำที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า</p>
อุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงแรกของการคำนวณน้อยกว่าผลการทดลองเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ในช่วงแรก - ช่วงต่อมาผลการคำนวณค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง

	<p>- หลังจากนาทิตี่ 200 เกิดการหยุดทำงานของเครื่องปฏิกรณ์การทดลองไม่สามารถทำการสกัดค่าได้แต่โปรแกรมสามารถคำนวณได้ในขณะนี้</p> <p>ผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ของอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.35 m ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโปรแกรมอื่น แต่ผลการคำนวณอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงที่ระดับความสูง 0.5 และ 0.7 m กลับให้ผลที่แย่สุดในทั้งสามโปรแกรม ซึ่งผลการคำนวณอีกสองโปรแกรมมีผลการคำนวณใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลการคำนวณจาก RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ผลการคำนวณในช่วงก่อนเติมน้ำมีผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด</p>
<p>การเกิดไฮโดรเจน</p>	<p>- ช่วงแรกไม่มีการเกิดไฮโดรเจนเกิดขึ้นเพราะเนื่องจากอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงยังไม่ถึงอุณหภูมิขีดจำกัด</p> <p>- ผลการคำนวณการเกิดไฮโดรเจนสะสมของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เท่ากับ 155 กรัม</p> <p>- ผลการคำนวณการเกิดไฮโดรเจนสะสมของโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 เท่ากับ 131 และ 125 กรัม ตามลำดับ</p> <p>ผลการทดลองของการเกิดไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 150 ± 35 กรัม ผลจากการคำนวณของทั้งสามโปรแกรมให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับการทดลอง</p>
<p>การกระจายอุณหภูมิ</p>	<p>จากรูปการกระจายอุณหภูมิมพบว่าอุณหภูมิที่มากที่สุดก่อนช่วงก่อนเติมน้ำ อุณหภูมิจะอยู่ในช่วงระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.7 ถึง 0.8 เมตร และในช่วงเติมน้ำอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ในช่วงความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.1 ถึง 0.2 เมตร</p>
<p>ระดับความเสียหายระดับความเสียหายของเชื้อเพลิงและปลอก</p>	<p>- ระดับตำแหน่งความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.75 เมตร เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แรก ณ นาทิตี่ 80</p> <p>หลังช่วงการเติมน้ำระดับตำแหน่งระดับความสูงของปลอกเชื้อเพลิงที่ 0.35, 0.75 และ 0.95 เมตร เกิดการทั้งการหลอมละลาย ซึ่งระดับความสูงที่ 0.55 เมตร ไม่เกิดการหลอมละลาย</p>

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของผลจากงานวิจัยการประเมินความสามารถการทำนายผลการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรงด้วยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงต่องานวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเล่มนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์การทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตความเสียหายของเชื้อเพลิงแบบรุนแรง (Severe Fuel Damage, SFD-ST) และเป็นการศึกษาที่ใกล้เคียงกับการเกิดอุบัติเหตุที่ Three Mile Island Unit 2 (TMI-2) และการทดลอง SFD-ST เป็นการทดลองเพื่อนำผลไปต่อยอดการทดลอง SFD อื่น ๆ ที่ตามมา การทดลอง SFD-ST มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิงและการเกิดไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง การทดลอง SFD-ST แบ่งการทดลองเป็นสองช่วงคือช่วงก่อนเติมน้ำ (Pre-reflood phase) หรือช่วงก่อนเกิดเครื่องปฏิกรณ์หยุดทำงาน และช่วงเติมน้ำ (Reflood phase) การทดลองนี้สามารถวัดผลการทดลองได้แค่ช่วง Pre-reflood phase เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัด

งานวิจัยนี้ประเมินความสามารถการทำนายการทดลองโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์และคำนวณการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงและระบบที่เกี่ยวข้องของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุอย่างรุนแรง โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ถูกพัฒนาโดยบริษัท Innovative Systems Software (ISS) ซึ่ง ประกอบด้วยสองส่วนการคำนวณคือส่วนของ RELAP ซึ่งวิเคราะห์การตอบสนองของระบบเทอร์มัลไฮดรอลิกของระบบหล่อเย็นแกนปฏิกรณ์และส่วนที่สองคือส่วนของ SCDAP ไว้เพื่อทำนายและวิเคราะห์พฤติกรรมของแกนปฏิกรณ์และการเกิดความเสียหายของเชื้อเพลิง โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ถูกพัฒนาจากรูปแบบโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ซึ่งมีการพัฒนาในส่วนทฤษฎีโมเดลคณิตศาสตร์ โมเดลการแลกเปลี่ยนความร้อนและมีการแสดงรูปเป็นสามมิติ เป็นต้น

การคำนวณการทดลองโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 จะจำเป็นต้องมีการสร้างข้อมูลขาเข้า (Input desk) เพื่อประมวลผลการทดลอง ผู้จัดทำได้ตรวจสอบข้อมูลขาเข้าเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลขอบเขตเงื่อนไขของการทดลอง SFD-ST โดยต้องใช้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองด้วย ดังนั้นจึงต้องดึงข้อมูลจากกราฟมาแปลงเป็นข้อมูลตัวเลขเพื่อสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในข้อมูลขาเข้าได้ เมื่อทำการคำนวณข้อมูลขาเข้าแล้ว โปรแกรมจะคำนวณผลคำนวณออกเป็นอยู่

ในรูปของข้อมูลจัดเก็บ (Restart file) จำเป็นต้องมีการเขียนข้อมูลขาเข้าเพื่อทำการดึงข้อมูลออกมาเป็นข้อมูลตัวเลขอีกครั้ง แล้วทำการคำนวณโดยโปรแกรมอีกครั้ง โดยเลือกใช้ข้อมูลขาเข้าอันใหม่ทำการเขียนเพื่อดึงข้อมูลกับข้อมูลจัดเก็บของการทดลองมาวิเคราะห์ใหม่ หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงข้อมูลของการคำนวณของการทดลองออกมา

งานวิจัยเล่มนี้ได้เปรียบเทียบผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 กับ ผลการทดลอง SFD-ST และ ผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 พบว่าในช่วง Pre-reflood phase ระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ของช่วงแรกที่คำนวณโดย RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีค่าเกินกว่าผลการทดลองเล็กน้อย หลังจากช่วงนี้ผลการคำนวณค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งมีการสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ทั้งนี้ และช่วง Reflood phase ไม่สามารถหาข้อสรุปว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมไหนดีกว่าเนื่องจากไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ ผลการคำนวณอุณหภูมิของปลอกเชื้อเพลิงที่ความสูงของแท่งเชื้อเพลิงตำแหน่ง 0.35, 0.5 และ 0.7 เมตร มีผลการคำนวณที่คล้ายกันกล่าวคือช่วงแรกของการทดลองจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นและหลังจากนั้นผลการคำนวณค่อนข้างสอดคล้องกันกับผลการทดลอง โดยที่ผลการคำนวณของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความสามารถในการทำนายผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2 และ SCDAP/RELAP5/MOD3.3 ผลการคำนวณการเกิดไฮโดรเจนของทั้งสามโปรแกรมมีผลการคำนวณที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลอง ผลการคำนวณการเกิดความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง

ผลการคำนวณของระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ อุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิง การเกิดไฮโดรเจน และความเสียหายของปลอกเชื้อเพลิงโดยโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับการทดลองมาก ผลการคำนวณจากโปรแกรม SCDAP/RELAP5/MOD3.2, SCDAP/RELAP5/MOD3.3 และ RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีผลการคำนวณของการเกิดไฮโดรเจนที่สอดคล้องและใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณบางส่วนของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากผลการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์มีผลต่อการทำนายผลของอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิง และผลการทำนายอุณหภูมิปลอกเชื้อเพลิงยังส่งผลต่อการทำนายผลการเกิดไฮโดรเจน อีกทั้งโมเดลการเกิดออกซิเดชันก็ยังส่งผลต่อการเกิดไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์เกิดขึ้น จะส่งผลต่อการคำนวณของผลอื่น ๆ สาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจเกิดเนื่องจากการใช้ขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีความไม่แน่นอน หรืออาจเกิดจากบางโมเดลของโปรแกรม

RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 เช่น โมเดลของการแลกเปลี่ยนความร้อนและโมเดลของสมการการคำนวณระดับน้ำในแกนปฏิกรณ์ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากมีการสันนิษฐานว่าผลการคำนวณแตกต่างจากผลการทดลองเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการใช้ขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ อาจจะทำให้การวิเคราะห์และคำนวณว่าการใช้ขอบเขตเงื่อนไขที่มีความคลาดเคลื่อนจะส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณผลการทดลองหรือไม่
2. การทดลอง SFD-ST เป็นการทดลองแรกของการทดลอง SFD เพื่อเป็นขอบเขตของการทดลองโดยมีการทดลองอีกสามการทดลองคือ การทดลอง SFD 1-1, SFD 1-3 และการทดลอง SFD 1-4 ดังนั้นควรทำการวิจัยต่อเพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกับการทดลองความเสียหายเชื้อเพลิงอย่างรุนแรงให้ดียิ่งขึ้น โดยใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4
3. เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการคำนวณและการทำนายผลการทดลองของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 สามารถนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมอื่น ๆ อีกได้



รายการอ้างอิง

1. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579. 2558: กระทรวงพลังงาน.
2. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *Three Mile Island accident*. [cited 2560 22/03]; Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/>.
3. ฝ่ายบริหารงานวิศวกรรมโรงไฟฟ้าและพลังงานนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *Chernobyl accident*. [cited 2560 22/03]; Available from: <http://www.ned.egat.co.th/>.
4. ฝ่ายบริหารงานวิศวกรรมโรงไฟฟ้าและพลังงานนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *Fukushima Daiichi accident*. [cited 2560 22/03]; Available from: <http://www.ned.egat.co.th/>.
5. U.S.NRC. *Computer code*. [cited 2560 19/05]; Available from: <https://www.nrc.gov/>.
6. IAEA, *Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants*. 2009, Vienna.
7. T. J. Haste, et al., *In-vessel core degradation in LWR severe accidents*. 1996, Luxembourg: European commission.
8. Ing. G. Mazzini, *Introduction to Severe Accident Phenomenology*. 2012, Prague: Research Centre Rez.
9. ฝ่ายบริหารงานวิศวกรรมโรงไฟฟ้าและพลังงานนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *Hydrogen production*. [cited 2560 05/04]; Available from: <http://www.ned.egat.co.th/>.
10. L. J. Siefken, *Models for the configuration and integrity of partially oxidized fuel rod cladding at high temperatures*. 1999, Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory and Lockheed Martin Idaho Technologies Company.
11. R. E. Einziger, et al. *Damage in Spent Nuclear Fuel Defined by Properties*.

12. N. F. Harman and P. N. Clough, *A review of radionuclide release and transport in recent in-pile experiments*. 1992, United Kingdom AEA Technology and SRD Culcheth.
13. A. D. Knipe, S.A. Ploger, and D.J. Osetek, *PBF Server Fuel Damage Scoping Test-Test Results Repor*, E.G.I. Inc., Editor. 1986: USA.
14. Nuclear Safety Analysis Division, *RELAP5/MOD3.3 Code Manual*, I.S. Laboratories, Editor. 2003: Idaho.
15. J. Hohorst, *RELAP/SCDAPSIM Input Manual MOD 3.4 3.5 & 4.0*, I.S. Software, Editor. 2012: USA.
16. L. J. Siefken, et al., *SCDAP/RELAP5/MOD3.3 Code Manual*, I.N.E.a.E. Laboratory, Editor. 2000: USA.
17. L. J. Siefken, et al., *Assessment of Modeling of Reactor Core Behavior During Severe Accidents*. 2001.
18. L. J. Siefken, et al., *SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 Code Manual Volume II*, I.N.E.a.E. Laboratory, Editor. 2001.
19. Chris M. Allison and Judith K. Hohorst, *RE-ASSESSMENT OF RELAP/SCDAPSIM/MOD3.X USING HISTORICAL INTEGRAL EXPERIMENTS*.
20. Zoel R. Martinson, David A. Petti, and Beverly A. Cook, *Volume 1: PBF Severe Fuel Damage Test 1-1 Test Result Results Report*, E.G.I. Inc., Editor. 1986: USA.
21. Z. R. Martinson, et al., *PBF Severe Fuel Damage Test 1-3 Test Results Report*, E.G.I. Inc., Editor. 1989: USA.
22. Krishna Vinjamuri, et al., *Severe Fuel Damage Test 1-4 Data Report*, E.G.I. Inc., Editor. 1987: USA.
23. L. Sepold, et al., *Experimental and Computational Results of the QUENCH-06 Test*. 2004.
24. R. R. Schultz, *RELAP5-3D Code Manual: Code Structure, System Models and Solution Methods*. 2005(Idaho National Laboratory).
25. C. M. Allison et al. *Validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 for Research Reactor Applications*. in the *13th International Conference on Nuclear Engineering*. 2005. Beijing, China.

26. C. M. Allison and J.K. Hohorst, *An assessment of effectiveness of core exit temperatures with respect to PWR core damage state using RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4*. 2007.
27. A. Kaliatka and E. Uspuras, *Development and testing of RBMK-1500 model for BDBA analysis employing RELAP/SCDAPSIM code*. 2008.
28. M. Mladin, D. Dupleac, and I. Prisecaru, *SCDAP/RELAP5 application to CANDU6 fuel channel analysis under postulated LLOCA/LOECC conditions*. 2008.
29. D. Dupleac, M. Mladin, and I. Prisecaru, *Generic CANDU 6 plant severe accident analysis employing SCDAPSIM/RELAP5 code*. 2009.
30. S. Sadek, S. Spalj, and B. Glaser, *Influence of Modelling Options in RELAP5/SCDAPSIM and MAAP4 Computer Codes on Core Melt Progression and Reactor Pressure Vessel Integrity*. 2009.
31. L. Fernandez-Moguel and J. Birchley, *Simulation of air oxidation during a reactor accident sequence: Part 2 – Analysis of PARAMETER-SF4 air ingress experiment using RELAP5/SCDAPSIM*. 2011.
32. A. Tiwari, et al., *Insertion of lead lithium eutectic mixture in RELAP/SCDAPSIM Mod 4.0 for Fusion Reactor Systems*. 2012.
33. C. M. Allison, et al., *Preliminary Assessment of the Possible BWR Core/Vessel Damage States for Fukushima Daiichi Station Blackout Scenarios Using RELAP/SCDAPSIM*. 2012.
34. A. K. Trivedi and C. Allison. *RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 Analysis of the Influence of Water Addition on the Behavior of a BWR during a Fukushima-like Severe Accident*. in *34th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society and 37th Annual CNS/CNA Student Conference*. 2013.
35. T. Kaliatka, et al., *Modelling of QUENCH-03 and QUENCH-06 Experiments Using RELAP/SCDAPSIM and ASTEC Codes*. 2014.
36. H. Madokoro et al. *Assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.5 against the BWR core degradation experiment CORA-17*. in *10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety*. 2014. Okinawa, Japan.
37. H. Madokoro et al., *SCDAP Model Improvement with QUENCH06 analysis*. 2014.

38. A. K. Trivedi, et al., *Incorporation of lithium lead eutectic as a working fluid in RELAP5 and preliminary safety assessment of LLCS*. 2014.
39. A.K. Trivedi, et al., *AP1000 station blackout study with and without depressurization using RELAP5/SCDAPSIM*. 2015.
40. Hector Lopez, Nejdet Erkan, and Koji Okamoto, *Reactor core isolation cooling system analysis of the Fukushima Daiichi Unit 2 accident with RELAP/ScdapSIM*. Nuclear of Science and Technology, 2016.
41. N. Rattanadecho, et al. *Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test: Focusing on Reactor Core Temperatures and Hydrogen Production*. in *11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety*. 2016. Gyeongju, Korea.
42. A. L. Camp, et al., *Light Water Reactor Hydrogen Manual*. 1983.
43. L. J. Siefken, *Models for the Configuration and Integrity of Partially Oxidized Fuel Rod Cladding at High Temperatures Final Design Report*, I.N.E.a.E. Laboratory, Editor. 1999: USA.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก : แสดงรายละเอียดของข้อมูลขาเข้า (Input desk) และความหมายของการ์ด [15]

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" tmdpvol

* 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 ชื่อของการ์ด (Title card)

ชื่อของการ์ดเป็นการ์ดที่บอกชื่อของไฟล์ซึ่งจำเป็นต้องแสดงในแต่ละการวิเคราะห์ของโปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ในการเขียนการ์ดนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ = ถ้ามีชื่อของการ์ดมากกว่าหนึ่งการ์ดนั้นการสุดท้ายจะถูกใช้ในการคำนวณการข้อมูลขาเข้านี้

2.2 การ์ด 100

การ์ด 100 เป็นการ์ดที่บอกถึงชนิดของปัญหาในการวิเคราะห์ (Problem type) รวมทั้งบอกถึงเงื่อนไขอื่น ๆ 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 ถ้าต้องการให้ข้อมูลออกมาแบบไม่ต้องจัดรูปกล่าวคือเมื่อทำการดึงข้อมูลออกมาโดยโปรแกรม MS Excel นั้นข้อมูลที่ได้จะปรากฏอยู่แค่

คอลัมน์แรกอย่างเดียว (Unformatted record) หรือ fmtout ถ้าต้องการให้ข้อมูลออกมาโดยที่ข้อมูลแยกเป็นคอลัมน์ (Same information)

2.3 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)

2.4 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 ค่าในส่วนของลำดับที่สองขี้อต่อจะไม่ปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

ss = 4 ค่าในส่วนของลำดับที่สี่ของตัวบรรจุ (Volume) จะไม่ปรากฏในการแสดงผลของข้อมูลขาออก

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

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

$d \neq 0$ ค่ามาตรฐานของข้อมูลขาออกจะถูกประกาศที่แต่ละช่วงเวลาต่าง ๆ โดยที่ถ้า

$d = 1$ ค่าที่ถูกระบุให้เป็นส่วนสำคัญ (Major edit) จะถูกประกาศที่ทุก ๆ ช่วงเวลา

$d = 2$ ค่าที่ถูกระบุให้เป็นส่วนรอง (Minor edits) จะถูกประกาศที่ทุก ๆ ช่วงเวลา

$d = 4$ ค่าที่ถูกระบุให้บันทึกและพล็อต (Plot record) จะถูกประกาศที่ทุก ๆ ช่วงเวลา

tt คือ การควบคุมช่วงเวลา (Control time step) โดยใช้ในการควบคุมตัวช่วงเวลา โดยที่ถ้า

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

tt = 1 คือ การคำนวณของระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) จะเกิดความคลาดเคลื่อนของมวล (Mass error) ในการวิเคราะห์ผลของการควบคุมระหว่างเวลาการคลาดเคลื่อนในการบันทึกข้อมูล (Minimum time step) และทุก ๆ ระยะเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล (Maximum time step)

tt = 2 คือ ช่วงเวลาของการคำนวณระบบการนำความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเท่ากับช่วงเวลาของการคำนวณระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic)

tt = 3 คือ การคำนวณจะถูกควบคุมโดยใช้ช่วงเวลาของการนำความร้อนและช่วงเวลาของระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) ที่เหมือนกัน

W5 คือ ค่าของความถี่ในการพล็อต

W6 คือ ค่าของความถี่ของข้อมูลหลัก

W7 คือ ค่าของความถี่ของข้อมูลเก็บผล

2.5 การ์ด 20300000 ถึง 20300999

การ์ด 20300000 ถึง 20300999 เป็นการ์ดที่มีเพื่อแสดงความประสงค์ในการต้องการพล็อต โดยแทนสัญลักษณ์เป็นการ์ด 20300nnm ซึ่ง nn คือ กราฟลำดับที่ 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 = httmp 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) และชนิดของส่วนประกอบในระบบพลศาสตร์ของเหลว (Hydrodynamic) ซึ่ง CCC แสดงถึงเลขของส่วนนั้น

โดยที่ W1 คือ ชื่อของส่วนประกอบ

W2 คือ ชนิดของส่วนประกอบเช่น tmdpvol, sngljun, และ pipe เป็นต้น

2.7 Card แสดงข้อมูลของส่วนประกอบ

การ์ดต่อไปนี้จะเป็นการบ่งบอกถึงข้อมูลและรายละเอียดของส่วนประกอบโดยที่ขึ้นกับชนิดของส่วนประกอบนั้นโดยที่ขึ้นกับการ์ด CCC0000 คือจะขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบนั้น ๆ ดังนั้นหัวข้อย่อยต่อไปนี้

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

การ์ด CCC0101 ถึง CCC0109 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลรายละเอียดของรูปร่างของส่วนประกอบ

โดยที่ W1 คือพื้นที่การไหล (m²,ft²)

W2 คือความยาวของส่วนประกอบ (m,ft)

W3 คือปริมาตรของส่วนประกอบ (m³,ft³) โดยที่ ถ้า W3 = 0 คือ W3 = W1×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

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

W9 คือสัญลักษณ์แทนการควบคุมส่วนประกอบแทนด้วย 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 โดยที่

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 แสดงถึงการใช้ค่าแรงเสียดทานของจุดรวมกันของน้ำและไอ (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

$f = 1$ คือไม่ใช่ 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 H₂O

$e = 2$ คือแทนด้วย D₂O

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/in²) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality) ตามลำดับ

$t = 3$ ใน ค่าใน W2 และ W3 ในการ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in²) 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 แสดงถึงเลขของพื้นที่หน้าที่เชื่อมต่อ โดยที่

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

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

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

W2 คือ โค้ด (Code) ที่ต้องการเชื่อมต่อไปยัง แทนสัญลักษณ์ CCCV000N โดยที่

VV แสดงถึงเลขของส่วนประกอบ

N แสดงถึงเลขของพื้นที่หน้าที่เชื่อมต่อ โดยที่

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

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

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

W3 คือ พื้นที่ของข้อต่อ (m²,ft²) 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 jefvcchs 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 แสดงถึงใช้การจำกัดการไหลของกระแสย้อนกลับ (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 คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบราบเรียบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลในการคำนวณ

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

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, nv) โดยที่ nv ต้องมีมากกว่า 0 แต่ต้องไม่เกิน 100 และจำนวนของข้อต่อภายในตัวบรรจุ (Internal junction) ของท่อจะเท่ากับ nv-1

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

โดยที่ W1 คือ พื้นที่ของอัตราปริมาตรการไหล (m²,ft²)

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0201 ถึง CCC0299 เป็นการ์ดที่แสดงถึงพื้นที่ของข้อต่อการไหลภายใน (Junction flow)

โดยที่ W1 คือ พื้นที่ของข้อต่อการไหลภายใน (Internal junction flow area) (m²,ft²) ถ้าไม่มีการ์ดนี้หรือ W1 = 0 ระบบจะถูกตั้งให้พื้นที่นี้เท่ากับพื้นที่ที่เล็กที่สุดของอัตราการไหลของตัวบรรจุ (Minimum area of volume) ที่เชื่อมต่ออยู่กับข้อต่อ

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0301 ถึง CCC0399 เป็นการ์ดที่แสดงถึงความยาวตามทางแกน 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 (m³,ft³)

W2 คือ เลขที่ของตัวบรรจุ

การ์ด CCC0501 ถึง CCC0599 เป็นการ์ดที่แสดงถึงมุมการวางของท่อตามแนวราบ (Volume azimuthal angle)

โดยที่ W1 คือ มุมการวางของท่อตามแนวแนวราบ โดยที่ $W1 \leq 360$

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

$$\text{Hydraulic diameter} = 2 \left(\frac{\text{x-direction Volumeflow area}}{\pi} \right)^{0.5}$$

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 โดยที่

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 แสดงถึงการจำกัดการไหลของกระแสย้อนกลับ (Counter current flow limitation, CCFL) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$f = 0$ คือไม่ใช้ CCFL ในการคำนวณ

$f = 1$ คือใช้ CCFL ในการคำนวณ

v แสดงถึงการแบ่งชั้นของการไหลแนวราบ (Horizontal stratification) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$v = 0$ คือไม่ใช้ 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 107

c แสดงถึงการใช้โมเดลการสั่น (Chocking model) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$c = 0$ คือใช้ Chocking model ในการคำนวณ

$c = 1$ คือไม่ใช้ Chocking model ในการคำนวณ

a แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหล (Area change) ในการคำนวณ โดยที่ถ้า

$a = 0$ คือใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลแบบราบเรียบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การไหลในการคำนวณ

$a = 1$ 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

$W2$ 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 H₂O

$e = 2$ คือแทนด้วย D₂O

b แสดงถึงการปรากฏของโบรอน (Boron) โดยที่ถ้า

$b = 0$ คือของไหลในระบบไม่มี Boron

$b = 1$ คือของไหลในระบบมี Boron

t แสดงถึงข้อมูลของของเงื่อนไขเริ่มต้นซึ่งค่า 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/in²) และคุณสมบัติค่าคงที่ (Static quality) ตามลำดับ

$t = 3$ ใน ค่าใน $W2$ และ $W3$ เป็นค่าความดัน (Pa, lbf/in²) และค่าอุณหภูมิ (K, °F) ตามลำดับ

W2 และ W3 จะขึ้นกับค่า t ใน W1

W4 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 จำนวนแกนของจุดรวม, 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 ถ้าเงื่อนไขคงที่เริ่มต้นอุณหภูมิได้ถูกนำไปคำนวณโดยใส่ข้อมูลลงไปในการ์ด 1CCCG402 ถึง 1CCCG499

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

2.8.2 การ์ด 1CCCG100 เป็นการ์ดที่แสดงถึงเงื่อนไขของจุดร่วมของโครงสร้างเชิงความร้อน

โดยที่ W1 คือ บวกเงื่อนไขของตำแหน่งของจุดร่วมของโครงสร้างเชิงร้อน 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 เลขของช่วงจุดรวม

2.8.6 การ์ด 1CCCG401 ถึง 1CCCG499 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของอุณหภูมิเริ่มต้น

โดยที่ W1 คือ อุณหภูมิ (K, °F)

W2 คือ เลขของจุดรวม

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 เป็นพื้นที่หน้าผิวทางซ้าย (Left surface area) (m²,ft²)

W4 = 1 คือ W5 ขึ้นกับรูปร่างลักษณะของการ์ด 1CCCG000 โดยที่ถ้า

เป็นทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) ค่า W5 คือพื้นที่หน้าผิว (Surface area) (m²,ft²)

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 เป็นการ์ดที่แสดงถึงข้อมูลของจุดกำเนิดซึ่งเป็นการจัดที่จำเป็นต้องมีสำหรับข้อมูลของโครงสร้างเชิงร้อน

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 ระยะทางของการไหลขาไป (m,ft)

W3 คือ ระยะทางของการไหลขากลับ (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)

uo2 แสดงถึงยูเรเนียมไดออกไซด์ (Uranium dioxide)

zr แสดงถึงเซอร์โคเนียม (Zirconium)

tbl/fctn แสดงถึงมีการใช้ข้อมูลจากตารางหรือฟังก์ชัน

W2 คือ บอกรหัสข้อมูลการใช้ตารางหรือฟังก์ชัน 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 A0 (W/m·K, Btu/s·ft·°F)

W4 คือ A1 (W/m·K², Btu/s·ft·°F²)

W5 คือ A2 (W/m·K³, Btu/s·ft·°F³)

W6 คือ A3 (W/m·K⁴, Btu/s·ft·°F⁴)

W7 คือ A4 (W/m·K⁵, Btu/s·ft·°F⁵)

W8 คือ A5 (W/m, Btu/s·ft)

W9 คือ C (K, °F)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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/m³·K, Btu/ft³·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

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m³, lbm/ft³)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) (J/kg·K,Btu/lbm·°F)

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

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

W3 คือ A0 (J/m³·K,Btu/ft³·°F)

W4 คือ A1 (J/m³·K²,Btu/ft³·°F²)

W5 คือ A2 (J/m³·K³,Btu/ft³·°F³)

W6 คือ A3 (J/m³·K⁴,Btu/ft³·°F⁴)

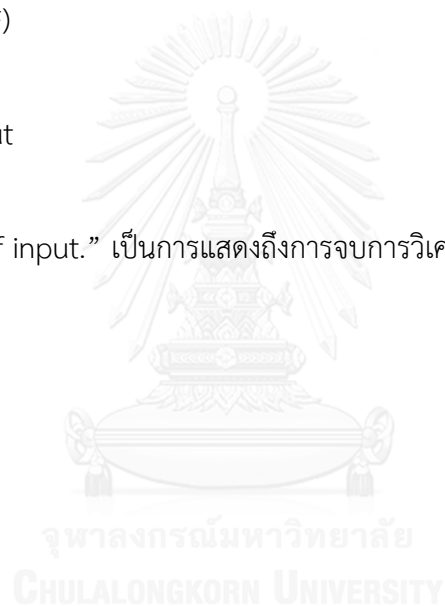
W7 คือ A4 (J/m³·K⁵,Btu/ft³·°F⁵)

W8 คือ A5 (J/m³,Btu/ft³)

W9 คือ C (K,°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.



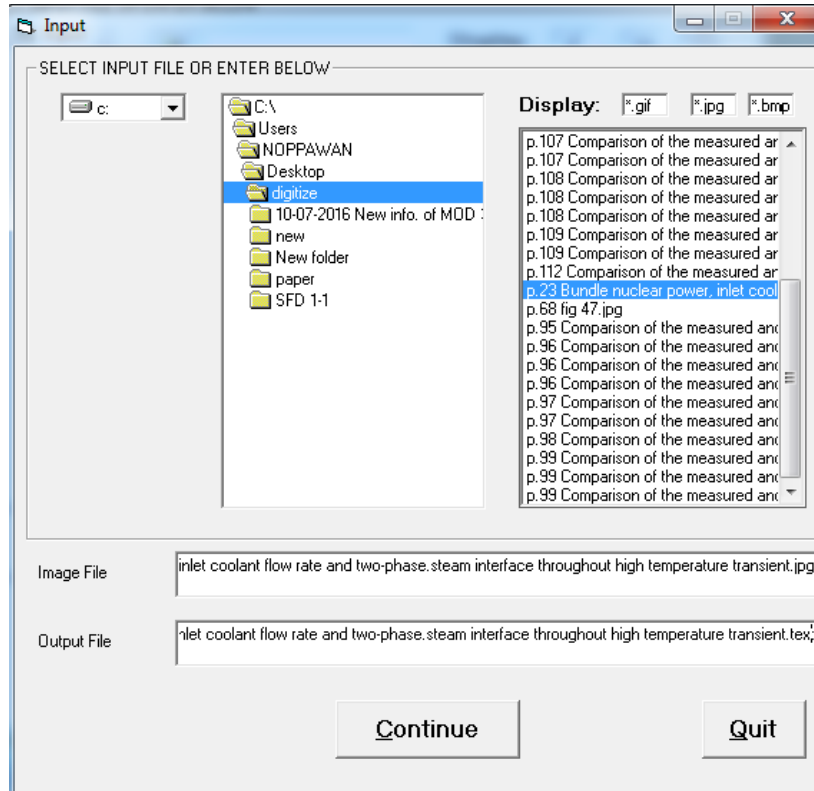
ภาคผนวก ค : แสดงข้อมูลการแปลงข้อมูลกราฟเป็นข้อมูลตัวเลข

รูปที่ 24 แสดงขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้นซึ่งเป็นรูปเดียวกันกับบทที่ 3 โดยการแปลงข้อมูลกราฟเป็นข้อมูลตัวเลขนั้น ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ใช้โปรแกรม Digitize ซึ่งผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Innovative Systems Software ซึ่งโปรแกรมนี้ง่ายต่อการดึงข้อมูลออกมาใช้ โดยรูปที่ 40 โดยวิธีใช้งานมีขั้นตอนดังนี้

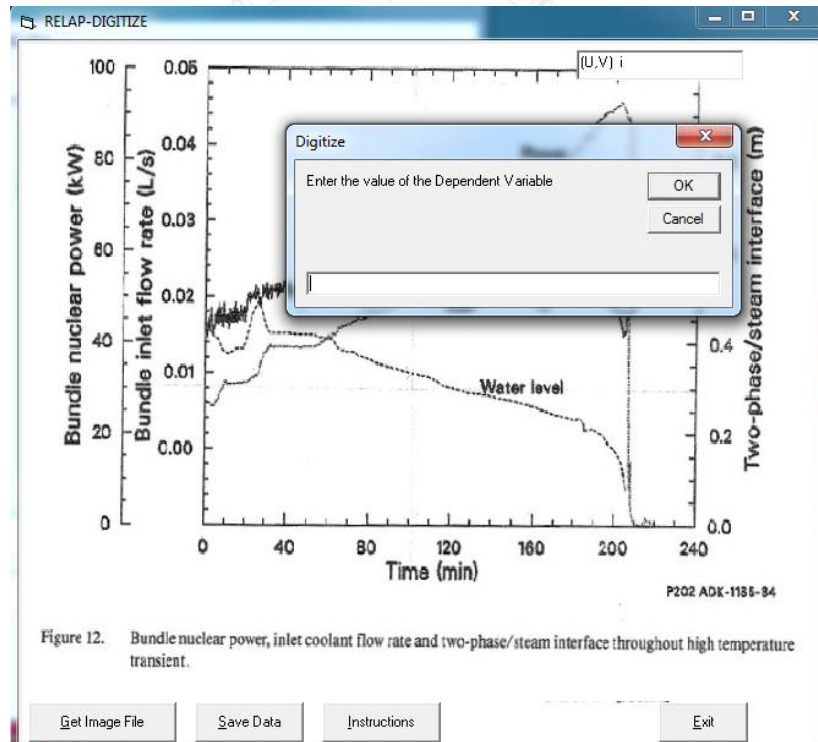
1. เลือกไฟล์รูปภาพสกุล .gif หรือ .jpg หรือ bmp ที่ต้องการแปลงข้อมูลแล้วทำการใส่ Location ของข้อมูลขาออกที่ต้องการให้อยู่ โดยข้อมูลขาออกให้บันทึกเป็นไฟล์สกุล .text ดังแสดงในรูปที่ 41 แล้วจึงกด Continue เพื่อทำขั้นตอนต่อไป
2. คลิกเลือกจุด $X_{max},0$ แล้วจะมีกล่องข้อความแสดงขึ้นมาโดยให้ใส่ข้อมูลตามที่ปรากฏ เช่น ชื่อของแกน X และ ค่าของจุด $X_{max},0$ เป็นต้น ดังแสดงตามรูปที่ 42
3. คลิกเลือกจุด $0,Y_{max}$ แล้วจะมีกล่องข้อความแสดงขึ้นมาโดยให้ใส่ข้อมูลตามที่ปรากฏ ทำตามขั้นตอนข้อ 2
4. เลือกจุดตามเลขที่ต้องการแปลงข้อมูลเมื่อเลือกเสร็จแล้วให้กด Save Data
5. หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าดังรูปที่ 43 โดยที่หน้าต่างนี้จะแสดงข้อมูลของ แกน X, แกน Y และข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้กรอกไป หลังจากนั้นให้กด Exit หรือ Next curve ถ้าต้องการทำการแปลงข้อมูลต่อ
6. หลังจากนั้นให้ไปเปิดข้อมูลขาออกจาก Location ที่บันทึกไว้ โดยไฟล์นี้จะแสดงข้อมูลที่เราได้ทำการแปลง



รูปที่ 40 หน้าต่างโปรแกรม Digitize



รูปที่ 41 บันทึกไฟล์ขาออกเป็นสกุล .text



รูปที่ 42 เลือกจุด $X_{max}, 0$ และ $0, Y_{max}$

Labels and Description of Curve

Edit if necessary

X - Axis Label and Units: Time (min)

Y-Axis Label and Units: Bundle power (kW)

Description: Power

Data

X Minimum: -1.813602 X Maximum: 220.0504

Y Minimum: 27.39362 Y Maximum: 92.55319

Number of Points: 18

Output File: C:\Users\NOPPAWAN\Desktop\digitize\p.23 Bundle nuclear power.jpg

Next Curve Exit

รูปที่ 43 กด Exit เพื่อจบการแปลงข้อมูล

ตัวอย่างของการแปลงข้อมูลกราฟเป็นข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้คือกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (จากรูปที่ 24) การแปลงข้อมูลนี้ในขั้นตอนข้อที่ 4 ซึ่งเป็นการเลือกจุดของข้อมูลกราฟนั้น สามารถเลือกได้อย่างมากที่สุด 99 จุด เท่านั้น เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม เราไม่จำเป็นต้องเลือกทุกจุดของได้ ให้เลือกที่เป็นจุดเลี้ยวเปี้ยว จุดโค้ง จุดที่มีการเปลี่ยนแปลง เกิดขึ้น จะสังเกตเห็นว่าคอลัมน์แรกจะเป็นข้อมูลของแกน X และคอลัมน์ที่สองเป็นข้อมูลแกน Y โดยในที่นี้แกน X หรือ Independent variable คือ เวลา (Time) หน่วยวินาที และแกน Y หรือ Dependent variable คือ กำลัง (Power) หน่วยวัตต์ โดยการแสดงข้อมูลของกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จากรูปที่ 24 จะได้ข้อมูลตัวเลขดังแสดงนี้

***** Beginning of reference data*****

* Power

*

*

* Time(s)	Power(W)
20299900 reac-t	
20299901 0.94813E+1	2.51949E+4
20299902 1.21592E+2	2.63383E+4
20299903 4.86369E+2	3.21199E+4
20299904 9.03257E+2	3.10493E+4
20299905 1.25066E+3	3.19058E+4
20299906 1.42437E+3	3.25482E+4
20299907 1.51122E+3	3.51178E+4
20299908 1.56333E+3	3.68308E+4
20299909 1.84125E+3	3.96146E+4
20299910 3.12666E+3	3.89722E+4
20299911 3.66514E+3	4.197E+4
20299912 4.23836E+3	4.43255E+4
20299913 4.77684E+3	4.53961E+4
20299914 5.41954E+3	4.79657E+4
20299915 5.87117E+3	4.94647E+4
20299916 6.30543E+3	5.18201E+4

20299917	6.65283E+3	5.26767E+4
20299918	6.86128E+3	5.33191E+4
20299919	7.17394E+3	5.50321E+4
20299920	7.64294E+3	5.76017E+4
20299921	7.97298E+3	5.99572E+4
20299922	8.38987E+3	6.2955E+4
20299923	8.51146E+3	6.38116E+4
20299924	8.73727E+3	6.35974E+4
20299925	9.0152E+3	6.55246E+4
20299926	9.29312E+3	6.7666E+4
20299927	9.62316E+3	6.98073E+4
20299928	9.88371E+3	7.19486E+4
20299929	1.01616E+4	7.49465E+4
20299930	1.04743E+4	7.73019E+4
20299931	1.0648E+4	7.92291E+4
20299932	1.08391E+4	8.17987E+4
20299933	1.10823E+4	8.394E+4
20299934	1.11691E+4	8.52248E+4
20299935	1.13081E+4	8.52248E+4
20299936	1.1447E+4	8.67238E+4
20299937	1.15339E+4	8.80086E+4
20299938	1.18813E+4	8.99358E+4
20299939	1.20897E+4	9.10064E+4
20299940	1.23156E+4	9.20771E+4
20299941	1.24545E+4	1.43469E+4
20299942	1.25066E+4	8.80086E+4
20299943	1.2663E+4	6.42398E+2
20299944	1.28888E+4	1.07066E+3
20299945	1.29409E+4	1.9272E+3
20299946	1.31841E+4	6.42398E+2
20599900	table999	function 1.0 0.0 0

20599901 time 0 999

20300992 cntrlvar 999 1

***** 1 *****



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว นพวรรณ รัตนเดโช

เกิดวันที่ 19 เมษายน 2536

สถานที่เกิด ปัตตานี

วุฒิการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. เครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประสบการณ์การทำงาน

ก.พ. - มิ.ย. 2559 : ฝึกอบรบการใช้โปรแกรม RELAP/SCDAPSIM ณ Innovative Systems Software ที่ Idaho, USA

ก.พ. - ต.ค. 2559 : รับจ้างเหมาทำงานวิจัยโครงการวิจัย การประเมินการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีในอุบัติเหตุร้ายแรงของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อพัฒนากลยุทธ์การจัดการอุบัติเหตุ ของหน่วยงานสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ก.พ. - ก.ค. 2560 : ผู้ช่วยวิจัย : Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test

ผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่

N. Rattanadecho, S. Rassame, K. Silva, C. Allison and J. Hohorst, “Assessment of RELAP/SCDAPSIM MOD3.4 Prediction Capability with Severe Fuel Damage Scoping Test: Focusing on Reactor Core Temperatures and Hydrogen Production”, in Proceeding the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, Gyeongju, Korea, October 9-13, 2016.