

การจำลองการขนส่งซีซีเอ็มไอโอได้สำหรับ ESBWR ในกรณีหลีกเลี่ยงการกักกัน

โดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

นางสาวพัฒนสุรางค์ กิตติวรภาพล



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)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF CsI TRANSPORTATION IN THE ESBWR'S CONTAINMENT BYPASS  
CONDITION

Miss Pinsurang Kittiwarapon



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University





# # 5670310021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: CONTAINMENT BYPASS / ECONOMIC SIMPLIFIED BOILING WATER REACTOR  
/ ACCIDENT MANAGEMENT / PRIMARY CONTAINMENT VESSEL / RADIONUCLIDES

PINSURANG KITTIWARAPON: SIMULATION OF CsI TRANSPORTATION IN THE  
ESBWR'S CONTAINMENT BYPASS CONDITION. ADVISOR: SOMBOON RASSAME,  
Ph.D., 175 pp.

The primary containment vessel (PCV) is the last barrier of the nuclear power plant that protects release of radionuclides to environment. If the containment fails, radionuclides are released and the environment is contaminated that affects health, life and possession. This research is study the behavior of CsI in the ESBWR's containment. The containment bypass (BYP) is one of the radionuclides release categories of Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) which occurs due to the containment isolation system failure was used as a simulation case of accident. ART Mod2 program was used to simulate the behavior of CsI in the ESBWR's containment under containment bypass condition (BYP) when there is an accident management, by feeding water inside the containment, and no accident management. In case of accident management, the sensitivity study was studied by varying gas temperature, wall temperature, water temperature of the containment, mass range of aerosol distribution, the form of CsI proportion (vapor : aerosol ratio), the positions of the containment leak and the ESBWR nodalization. The research found that release of CsI obviously decrease when accident management applied. In part of the sensitivity study, increasing of gas temperature reduced the accumulated CsI. When wall temperature increased, the the accumulated CsI decreased. By changing the positions of the containment leak, the accumulated CsI changed while the remainder variables had minor effect on CsI accumulation.

Department: Nuclear Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Technology      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่ายจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ทุ่มเทสนับสนุนข้าพเจ้า ทั้งทางด้านร่างกาย จิตใจ และทุนทรัพย์ เพื่อการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์นี้ตลอดมาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สมบุญ รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ แนะนำและให้คำปรึกษา แก้ปัญหา ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งปรับปรุงแก้ไขการเขียนงานวิจัยซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาความสามารถในการเขียนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ. สมยศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษา แก้ปัญหาในการเขียนโปรแกรมเตรียมข้อมูลทำงานวิจัยซึ่งส่งผลต่อการทำงานวิจัยที่รวดเร็วขึ้นและได้กรุณาเข้าร่วมฟังการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. กัมปนาท ซิลวา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำ แนวทางแก้ปัญหาในการทำงานวิจัย รวมทั้งปรับปรุงแก้ไขการเขียนเอกสารเผยแพร่ งานวิจัย และได้กรุณาเข้าร่วมฟังการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่งได้ให้โอกาสทำงานวิจัยในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ รวมถึงความอนุเคราะห์ให้สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2 ได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้อบรมสั่งสอนความรู้เกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และกรุณาเข้าร่วมฟังการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ Dr. Nakamura Jinichi และ Mr. Jun Ishikawa ผู้ปฏิบัติงานของ Japan Atomic Energy Agency ที่กรุณาให้คำแนะนำเรื่องโปรแกรม ART Mod2

ขอขอบพระคุณ Mr. Surip Widodo ผู้ปฏิบัติงานของ Indonesia's National Nuclear Energy Agency ที่ได้ให้คำแนะนำ และแก้ไขปัญหของโปรแกรม ART Mod2 จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนความรู้ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณน้องวศิน เวชกามา ที่ช่วยเหลือในเรื่องของข้อมูล และการใช้งานโปรแกรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	17
1.3 ขอบเขต .....	17
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
2.1 ทฤษฎี และความรู้ที่เกี่ยวข้อง .....	19
2.1.1 อุบัติเหตุระดับรุนแรง (Severe Accident : SA).....	19
2.1.2 ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) [3] .....	19
2.1.3 การรั่วไหลประเภทต่างๆ และเหตุการณ์จำลองที่ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของ ซีเซียมไอโอดีนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR [5] .....	20
2.1.4 ระบบป้องกันและลดการเกิด containment bypass และ overpressurization ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR.....	24
2.1.5 ซีเซียมไอโอดีน (CsI).....	26
2.1.6 ไอโอดีน [7] .....	26
2.1.7 ซีเซียม Cesium [8].....	27
2.1.8 Computer Code Program [10] .....	28
2.1.9 ART Mod2 Program [11].....	32

2.1.9.1 พฤติกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	33
2.1.9.2 กลุ่มสมการที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.2 บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	60
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	69
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย .....	69
3.1.1 ข้อมูลขาเข้า (Input), ข้อมูลออก (Output) และการใช้งานโปรแกรม ART Mod2 ...	69
3.1.2 การจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการ กักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	72
3.1.3 ข้อมูลเข้าโปรแกรมจำลองอุบัติเหตุ (input data) และสมมติฐาน [5] .....	75
3.1.4 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 [22] .....	79
3.1.5 การเตรียมข้อมูลเข้า.....	87
บทที่ 4 ผล และการอภิปรายผลการคำนวณ .....	92
4.1 ผลการคำนวณของกรณีที่ใช้อ้างอิง (base case).....	92
4.2 ผลการศึกษาความไวของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง .....	94
4.2.1 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	94
4.2.2 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	97
4.2.3 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	100
4.2.4 ผลการคำนวณที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csl) ที่เป็นไอต่อแอโรซอล ต่างๆ.....	102
4.2.5 ผลการคำนวณเมื่อแอโรซอลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน.....	104
4.2.6 ผลการคำนวณเมื่อตำแหน่งบริเวณที่เกิดรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน .....	108
4.2.7 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จาก 7 ปริมาตรควบคุมเป็น 19 ปริมาตรควบคุม .....	111



4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสาร กัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี และไม่มีการ จัดการอุบัติเหตุ .....	114
4.4 สรุปผลของตัวแปรต่อการสะสม Csi .....	117
4.5 การสะสม Csi เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุจากการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod2 และ ผลของโปรแกรม MAAP .....	119
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	120
5.1 สรุปผล .....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	123
รายการอ้างอิง .....	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	175



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ประเภทของการปลดปล่อย source term และความถี่ในการเกิด .....	21
ตารางที่ 2.2 ปริมาณไอโอดีน และซีเซียมที่สะสมในแกนปฏิกรณ์แบบ ESBWR.....	26
ตารางที่ 2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แบบน้ำมวลเบา .....	28
ตารางที่ 2.4 กลุ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี .....	32
ตารางที่ 2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม ART Mod2 .....	35
ตารางที่ 3.1 ข้อมูล และสมมติฐานที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์.....	75
ตารางที่ 3.2 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวของมวลแอโรซอล .....	76
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางตรีโกณมิติของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี 7 ปริมาตรควบคุม .....	77
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางตรีโกณมิติของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี 19 ปริมาตรควบคุม .....	78
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดข้อมูลเข้า (input) ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3.....	80
ตารางที่ 4.1 ผลของตัวแปรที่มีต่อการสะสม CsI .....	117

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ระบบความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR (ไม่ตามขนาดจริง) .....	19
รูปที่ 2.2 Progression of major severe accident .....	31
รูปที่ 2.3 นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่และการสะสมในโปรแกรม ART Mod2 .....	34
รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ภายในและระหว่างปริมาตรและการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี .....	35
รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของแอรโซลในโดย Sectional Method ที่ compartment ที่ 1 .....	37
รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ในช่วง Knudsen, Strok และ Newton ตามลำดับ .....	52
รูปที่ 2.7 Diffusiophoresis .....	53
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากพื้นผิวโครงสร้างของผลิตผลฟิชชัน, ก๊าซที่ไม่ ควบแน่น และความดันย่อยของเหตุการณ์ Diffusiophoresis.....	53
รูปที่ 2.9 การสะสมแอรโซลโดย Thermophoresis .....	55
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของพื้นผิวโครงสร้างและอุณหภูมิ.....	55
รูปที่ 2.11 แบบจำลองการควบแน่นของไอน้ำและชั้นฟิล์มเสมือน .....	57
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากพื้นผิวโครงสร้างของผลิตผลฟิชชัน, ก๊าซที่ไม่ ควบแน่น และความดันย่อย ของการควบแน่น .....	57
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนย้ายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีระหว่างของเหลวและก๊าซ .....	58
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการ Compile โปรแกรม ART Mod2 .....	71
รูปที่ 3.2 ESBWR Drywell Nodalization .....	72
รูปที่ 3.3 Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่ใช้ในการจำลอง เหตุการณ์ในโปรแกรม RELAP5MOD3.3 .....	81
รูปที่ 3.4 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 ที่ติดตั้งไว้ .....	81
รูปที่ 3.5 การบันทึก input ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ไว้ใน folder ที่ติดตั้งไว้ .....	82
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการแก้ไข compile file ของ RELAP5MOD3.3 เพื่อเตรียม compile .....	83
รูปที่ 3.7 การแก้ไขรายละเอียด compile file ของ RELAP5MOD3.3 เพื่อเตรียม compile .....	83

รูปที่ 3.8 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 ขณะกำลัง Compile .....	84
รูปที่ 3.9 ไฟล์ output ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ปรากฏที่ folder RELAP5 ที่เราติดตั้ง ....	84
รูปที่ 3.10 การอ่านค่า RELAP5MOD3.3 output ด้วยโปรแกรม AptPlot .....	85
รูปที่ 3.11 เลือกไฟล์ output ของ RELAP5MOD3.3 ที่ต้องการ .....	85
รูปที่ 3.12 การเลือกข้อมูล output ที่ต้องการ 1.....	86
รูปที่ 3.13 การเลือกข้อมูล output ที่ต้องการ 2.....	86
รูปที่ 3.14 การเริ่มใช้งานโปรแกรม Visual Basic .....	87
รูปที่ 3.15 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 1 .....	87
รูปที่ 3.16 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 2 .....	88
รูปที่ 3.17 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 3 .....	88
รูปที่ 3.18 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 4 .....	88
รูปที่ 3.19 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 5 .....	89
รูปที่ 3.20 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 1 .....	89
รูปที่ 3.21 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 2 .....	89
รูปที่ 3.22 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 3 .....	90
รูปที่ 3.23 การเริ่มเขียนโปรแกรม Visual Basic .....	90
รูปที่ 3.24 การรันไฟล์ input ของโปรแกรม Visual Basic 1 .....	90
รูปที่ 3.25 การรันไฟล์ input ของโปรแกรม Visual Basic 2 .....	91
รูปที่ 4.1 การสะสมของ Csi ในกรณีอ้างอิง .....	93
รูปที่ 4.2 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในอาคารเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	94
รูปที่ 4.3 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	95
รูปที่ 4.4 สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่ อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ .....	95



รูปที่ 4.18 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแอร์โซล ลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน .....	105
รูปที่ 4.19 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแอร์โซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน.....	105
รูปที่ 4.20 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อ แอร์โซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน.....	106
รูปที่ 4.21 สัดส่วน Csi แบบแอร์โซลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแอร์โซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน .....	106
รูปที่ 4.22 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่ง รอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน.....	108
รูปที่ 4.23 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน .....	108
รูปที่ 4.24 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อ ตำแหน่งรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน .....	109
รูปที่ 4.25 สัดส่วน Csi แบบแอร์โซลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน .....	109
รูปที่ 4.26 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	111
รูปที่ 4.27 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	112
รูปที่ 4.28 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อ เปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	112
รูปที่ 4.29 สัดส่วน Csi แบบแอร์โซลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	113
รูปที่ 4.30 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มี การจัดการอุบัติเหตุ.....	114

รูปที่ 4.31 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ.....	114
รูปที่ 4.32 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อ มีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ.....	115
รูปที่ 4.33 สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ.....	115
รูปที่ 4.34 สัดส่วน Csi ที่สะสมอยู่ใน Drywell จากผลการคำนวณของโปรแกรม MAAP.....	119



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาในบทนำประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัยโดยได้กล่าวคร่าวๆ ถึงอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ความปลอดภัย และการจำลองอุบัติเหตุ รวมทั้งจุดประสงค์ของการทำงานวิจัย ขอบเขตของการทำงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัยนี้

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อาจเริ่มจากการทำงานที่บกพร่องของระบบหรือฟังก์ชันการทำงานภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรืออาจเกิดจากปัจจัยจากภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นมีโอกาสที่แกนปฏิกรณ์จะหลอมเหลวและหากไม่สามารถจัดการอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นได้จะกลายเป็นอุบัติเหตุระดับรุนแรงซึ่งอาจส่งผลให้สารกัมมันตรังสีรั่วไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์สู่ภายนอก สำหรับอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่เกิดขึ้นในอดีต เช่น อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Chernobyl, อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นิวเคลียร์ Three Mile Island (TMI) และอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Fukushima Daiichi ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีซึ่งจะปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมในบริเวณกว้างเป็นผลให้สามารถได้รับปริมาณรังสีเกินกว่าค่ามาตรฐานส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ของประชาชนในบริเวณโดยรอบ ดังนั้นความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง

วัตถุประสงค์สูงสุดของความปลอดภัยคือการจำกัดการปลดปล่อยผลิตผลฟิชชันออกสู่สิ่งแวดล้อม [1] การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์นี้ต้องมีความเข้าใจในปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ทำให้ผลิตผลฟิชชันเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และพฤติกรรมของ source term ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยความเข้าใจนี้ประกอบด้วยเรื่องของ เวลา, ปริมาณ, เอกลักษณะ, และรูปแบบของผลิตผลฟิชชันที่ถูกปลดปล่อยรวมถึงการเคลื่อนที่และการกักเก็บในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และผลของการนำผลิตผลฟิชชันออกโดยลักษณะการจัดการอุบัติเหตุในแบบต่างๆ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor : BWR) ออกแบบโดย GE Hitachi Nuclear Energy ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR มีการปรับปรุงมาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ BWR ซึ่งมีการปรับปรุงระบบความปลอดภัยให้ดีขึ้นโดยใช้ระบบความปลอดภัยแบบที่สามารถทำงานได้ด้วยตนเอง (passive) อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ยังคงมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุได้โดยในระหว่างเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นเครื่องขวางกั้นสำคัญสุดท้ายที่ป้องกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม



ดังนั้นหากมีอุบัติเหตุที่สร้างความเสียหายแก่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สารกัมมันตรังสีที่ถูกเก็บกักอยู่ จะรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมแต่งงานศึกษาวิจัยเพื่อจัดการอุบัติเหตุของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีจำนวนไม่มาก อีกทั้งการรั่วไหลประเภท Containment Bypass (BYP) ซึ่งเป็นหนึ่งในประเภทการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีจากอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทถัดไป เป็นการรั่วไหลที่มีสาเหตุเนื่องมาจากการทำงานของ Containment Isolation System (CIS) ล้มเหลว โดยการเกิด BYP เหมือนมีทางผ่านจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ผ่านออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลออกสู่บรรยากาศเมื่อเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง เช่น ซีซีเอ็มไอโอไดต์ (Csi) จะออกจากระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ BWR เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่ง 95 เปอร์เซ็นต์ของไอโอดีนที่เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะอยู่ในรูปของ Csi [2] ดังนั้นการศึกษา และจำลองการเคลื่อนที่ของ Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ภายใต้การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการหามาตรการจัดการอุบัติเหตุเพื่อสามารถบรรลุถึงวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัยสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อจำลอง และศึกษาการขนส่งซีซีเอ็มไอโอไดต์ (Csi) ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ภายใต้การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงทำให้เกิดการหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Containment Bypass, BYP) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2

## 1.3 ขอบเขต

- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณและการปล่อยสารกัมมันตรังสีในอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- ศึกษาและออกแบบข้อมูลเพื่อจำลองการปลดปล่อย Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเกิดอุบัติเหตุ และมีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- ศึกษาพฤติกรรมของ Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเกิดอุบัติเหตุ และมีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2
- เปรียบเทียบพฤติกรรมของ Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเกิดอุบัติเหตุ และมีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการ

กักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมีวิธีการจัดการอุบัติเหตุอย่างน้อย 1 วิธี และเปรียบเทียบ ผลกับกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

#### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษา และรวบรวมเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์, การรั่วไหล และปริมาณที่สะสมของสารกัมมันตรังสี, เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR และโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ
2. จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
3. จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ
4. เปรียบเทียบผลการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในข้อ 3 และ 4
5. สรุปผลการวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับการจำลองการขนส่งซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เมื่อเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง
2. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบการจัดการอุบัติเหตุที่เหมาะสมสำหรับการเกิดอุบัติเหตุนิวเคลียร์ระดับรุนแรงต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

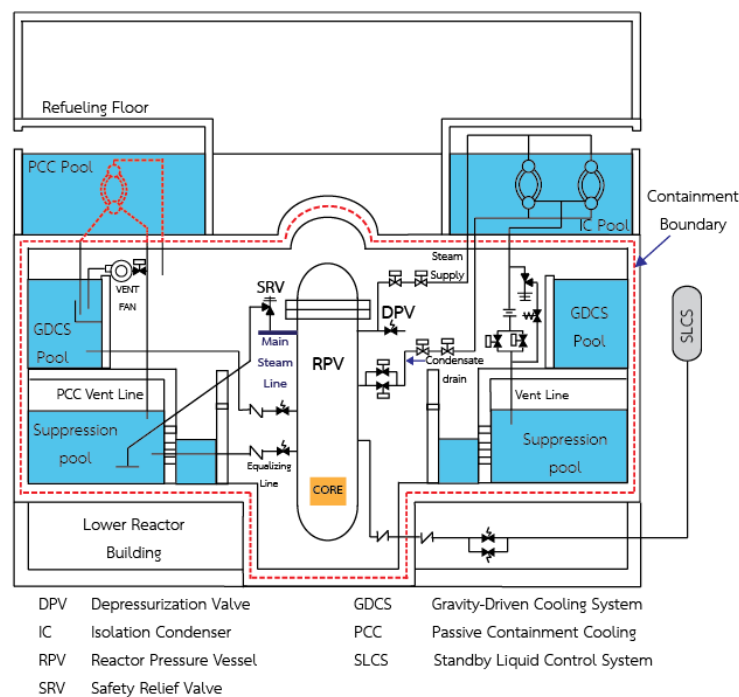
เนื้อหาในบทนี้เป็นการรวบรวมทฤษฎี และความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อให้สามารถทำความเข้าใจความหมาย โปรแกรมจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุรวมถึงวิธีการใช้งานโปรแกรมจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุและการจัดการอุบัติเหตุระดับรุนแรงไว้ในตอนท้าย

#### 2.1 ทฤษฎี และความรู้ที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 อุบัติเหตุระดับรุนแรง (Severe Accident : SA)

อุบัติเหตุระดับรุนแรงในคำจำกัดความของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ คือ สภาวะอุบัติเหตุที่รุนแรงกว่าอุบัติเหตุพื้นฐานที่ได้ออกแบบไว้ที่มีการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการแตกออกของแกนปฏิกรณ์อย่างรุนแรง (Reactivity Events) หรือ การหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์อย่างช้าๆ (ทำความเข้าใจเกี่ยวกับแกนปฏิกรณ์ไม่เพียงพอ)

##### 2.1.2 ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) [3]



รูปที่ 2.1 ระบบความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR (ไม่ตามขนาดจริง) [4]

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด ซึ่งใช้น้ำมวลเบาเป็นตัวทำความเย็น และตัวลดทอนพลังงานของนิวตรอน (moderator) มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 1600 เมกกะวัตต์ พัฒนาโดย GE-Hitachi ปัจจุบันอยู่ในระหว่างขั้นตอนการออกแบบ (design basic) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ได้ถูกปรับปรุงมาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ BWR ซึ่งส่งผลให้มีความปลอดภัย และน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น โดยวัตถุประสงค์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ประกอบด้วย

1. มีอายุการใช้งานโรงไฟฟ้า 60 ปี นับจากวันที่ดำเนินการเต็มกำลังของลิขสิทธิ์
2. มีความสามารถของโรงไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 92 เปอร์เซ็นต์
3. มีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงทุก 12 – 24 เดือน
4. การได้รับปริมาณรังสีของบุคคลจำกัดไม่เกิน 0.5 คน-ซีเวิร์ตต่อปี
5. ฟังก์ชันความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องสามารถทำงานได้ด้วยตนเองเป็นหลัก
6. มีความถี่ในการเกิดความเสียหายต่อแกนปฏิกรณ์มีค่าน้อยกว่า  $10^{-6}$  ต่อเครื่องปฏิกรณ์-ปี
7. การปลดปล่อยอย่างมีนัยสำคัญจากเหตุการณ์ทั้งภายใน และภายนอกถูกจำกัดที่  $5 \times 10^{-8}$  ต่อเครื่องปฏิกรณ์-ปี
8. ระบบความปลอดภัยไม่ต้องใช้ผู้ดำเนินการ หรือแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอกโดยระบบจะทำงานได้ 72 ชั่วโมงตามการออกแบบอุบัติเหตุพื้นฐานเพื่อคงสถานะความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

### 2.1.3 การรั่วไหลประเภทต่างๆ และเหตุการณ์จำลองที่ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของซีซีเอ็มไอโอไดต์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR [5]

Containment Event Trees (CET) ถูกพัฒนาขึ้นโดยการทำงานและระบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการลดความดันที่มากเกินไปหรือเกิด bypass ร่วมกับปรากฏการณ์วิทยา (Phenomenological) ซึ่ง CET ถูกสร้างโดยการประมาณค่าแบบจุดสำหรับผลกระทบของปรากฏการณ์วิทยาและจัดสรรตรรกะไว้อธิบายว่าระบบการบรรเทา (mitigation system) สำเร็จหรือล้มเหลวโดยการสร้างการตอบสนองของอาคารเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์อย่างเป็นทางการเป็นเหตุเป็นผล และขั้นตอนสุดท้ายของ CET คือการตั้งชื่อและการนิยามประเภทของการปลดปล่อย (release categories) ซึ่งประเภทการรั่วไหลอาจจะแสดงความล้มเหลวของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หรือความสำเร็จในการทำงานของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในการจำกัดการปลดปล่อยของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยประเภทของการปลดปล่อยแสดงผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของ containment challenges และยังใช้ในการประเมิน source term

### 2.1.3.1 ประเภทของการปลดปล่อย (release categories) ของ source term

ตารางที่ 2.1 ประเภทของการปลดปล่อย source term และความถี่ในการเกิด [5]

ประเภทของการปลดปล่อย	ความถี่ (ต่อปี)
Filtered release (FR)	7.68E-11
Ex-vessel explosion (EVE)	1.14E-09
Containment Bypass (BYP)	5.57E-11
Direct containment heating (DCH)	-
Dry core-concrete interaction (CCID)	1.48E-12
Technical Specification Leakage (TSL)	1.51E-08
Wet core-concrete interaction (CCIW)	2.93E-12
Overpressure due to failure of Vacuum Breaker (OPVB)	1.97E-12
Break Outside of Containment (BOC, Connecting RPV to environment)	8.50E-11
Overpressure due to failure of short-term containment heat removal (OPW1)	1.96E-12
Overpressure due to failure of long-term containment heat removal (OPW2)	5.64E-11

โดยประเภทของการปลดปล่อย (release categories) ของ source term สามารถแบ่งได้เป็น

1. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลวเนื่องจากระบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งประกอบด้วย

- Containment Bypass (BYP)

สำหรับการรั่วไหลแบบ Containment Bypass จะแสดงสภาวะที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะไม่ถูกทำให้แยกออกจากสิ่งแวดล้อมคือมีการเกิด bypass เนื่องจากการทำงานของ Containment Isolation System (CIS) ล้มเหลวโดยสมมติว่าอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่สามารถกีดขวางนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากการเริ่มเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง เช่น มีช่องทางจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เปิดสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยตรง

- Overpressurization (OP)

แทนลำดับเหตุการณ์ซึ่งนำความร้อนออกหลังเกิดอุบัติเหตุไม่เพียงพอส่งผลให้ความดันในอาคารมากเกินไปกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (ultimate containment strength) โดย OP มี 2 ประเภท คือ

1. Overpressurization (OPW) ใช้กับลำดับเหตุการณ์อุบัติเหตุระดับรุนแรงที่ vapor suppression ทำงานได้สำเร็จแต่การทำงานของกานำความร้อนออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลว
2. Overpressurization due to vacuum breaker failure (OPVB) แทนสถานะซึ่ง vacuum breaker เปิดหรือไม่สามารถปิดใหม่ได้ vapor suppression ทำงานล้มเหลว

2. ประเภทการปลดปล่อยที่อธิบายความล้มเหลวเนื่องจากผลของปรากฏการณ์วิทยาประกอบด้วย

- Dry core-concrete interaction (CCID) เกิดขึ้นเมื่อระบบ Gravity Driven Cooling System (GDCS) deluge ล้มเหลวในการฉีดน้ำจากบ่อ GDCS สู่ Basemat Internal Melt Arrest and Coolability (BiMAC) และ lower drywell (LWD) การปลดปล่อยประเภทนี้จะเกิดความดันเกินเนื่องจากมีการผลิตผลผลิตที่เป็นไอโซลและผลผลิตที่ไม่ควบแน่นขึ้น
  - Wet core-concrete interaction (CCIW) เหมือนกับ CCID แต่ต่างตรงที่ BiMAC ลดความร้อนให้กับแกนปฏิกรณ์ที่ถูกฉีดน้ำไม่สำเร็จ โดยถึงแม้ว่าจะมีน้ำปกคลุมแกนปฏิกรณ์แต่ยังคงมีปฏิกริยาระหว่างแกนปฏิกรณ์และคอนกรีต (core-concrete interaction)
  - Ex-vessel explosion (EVE) เป็นปรากฏการณ์พลังงานสูงที่เกิดขึ้นเมื่อเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลวที่ความดันต่ำ และแกนปฏิกรณ์หล่นลงสู่ LWD ซึ่งทำให้เกิดการระเบิดของไอน้ำส่งผลให้แทนของแกนปฏิกรณ์และอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลว
  - Direct containment heating (DCH) เป็นผลของผลกระทบจากปรากฏการณ์พลังงานสูงระหว่างที่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลวที่ความดันสูง โดย DCH แทนการล้มเหลวของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์อันเนื่องมาจากการสะสมตัวของแกนปฏิกรณ์บน LWD ระหว่างมีการขับออกของแกนที่หลอมเหลวที่ความดันสูง (high-pressure melt ejection : HPME)
3. กลุ่มนี้ไม่ได้ถูกพิจารณาให้เป็นความล้มเหลวของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เนื่องจากไม่ได้มีผลในการสูญเสียการควบคุมขอบเขตของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

- Technical Specification Leakage (TSL) แทนเงื่อนไขซึ่งขอบเขตความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ยังคงอยู่และมีแต่ source term เท่านั้นปลดปล่อยออกโดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการปลดปล่อยที่ได้รับอนุญาต
- Filtered release (FR) แทนลำดับเหตุการณ์ที่ใช้ควบคุมความดันในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่สูงขึ้นเมื่อเกิดความล้มเหลวในการนำความร้อนออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์หรือเกิดปฏิกิริยาระหว่างแกนปฏิกรณ์ที่หลอมเหลวกับคอนกรีต (core-concrete interaction) เพียงพอทำให้ไม่เกิดการควบแน่นของก๊าซจนมีความดันสูงเกินการปลดปล่อยแบบ FR เป็นการปล่อยออกภายใต้การควบคุมของผู้ควบคุมโดยการปลดปล่อยนี้จะมีการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสีในปริมาณที่น้อยกว่าในกรณีที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เกิดความล้มเหลวเพราะช่องทางที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีถูกปล่อยออกต้องผ่าน suppression pool ซึ่งเป็นการกรองนิวไคลด์กัมมันตรังสีทำให้สามารถลดปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ถูกปลดปล่อย

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความน่าจะเป็นในการเกิดการรั่วไหลแบบรั่วไหลแบบ Containment Bypass (BYP) มีค่าน้อยกว่าการรั่วไหลแบบ Technical Specification Leakage (TSL) และ Ex-vessel explosion (EVE) เพราะการรั่วไหลแบบ TSL เป็นการรั่วที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาพสมบูรณ์มีเพียงอัตราการรั่วไหลน้อยที่สุดที่ยอมให้เกิดได้ตามข้อกำหนดทางเทคนิค ส่วนปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีของการปลดปล่อยแบบ Filtered release (FR) นั้นถูกกรองจากการผ่าน suppression pool ซึ่งทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีปริมาณลดลงแล้ว ในขณะที่การเกิดการรั่วไหลแบบ EVE ไม่สามารถคำนวณด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ที่มีได้เนื่องจากไม่มีแบบจำลองการอนุรักษ์พลังงานปรากฏในโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ ดังนั้นเหตุการณ์จำลองที่พิจารณาในการศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์คือ Containment Bypass (BYP) ซึ่งเป็นการปลดปล่อยประเภท (release category) หนึ่งใน Containment Event Trees (CET)

โดยการรั่วไหลแบบ Containment Bypass มีความถี่ของการรั่วไหลที่  $5.57 \times 10^{-11}$  ต่อเครื่องปฏิกรณ์-ปี โดยเหตุการณ์จำลองที่จะศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์จะสมมติให้มีช่องทางขนาดเท่าท่อไอน้ำหลัก (Main Steam Line : MSL) จากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เปิดออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงเมื่อเริ่มเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง

## 2.1.4 ระบบป้องกันและลดการเกิด containment bypass และ overpressurization ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ประกอบด้วยระบบที่สามารถป้องกันและลดการเกิด containment bypass และ overpressurization ซึ่งประกอบด้วยระบบต่างๆ ดังนี้

### 1. Containment Isolation Function

มีหน้าที่ตรวจสอบ และแยกขอบเขตของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปลดปล่อยสารรังสีที่ไม่ผ่านค่าที่ยอมรับได้ระหว่างสภาวะปกติ, สภาวะไม่ปกติ และเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

### 2. Isolation Condenser System (ICS)

มีความสามารถในการนำความร้อนที่สลายตัวจากถังปฏิกรณ์ออกโดยความร้อนนี้จะถูกนำออกไปภายนอกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดย ICS จะมีประสิทธิภาพในตอนต้นเมื่อถังปฏิกรณ์มีความดันสูง เมื่อมีการลดความดันของถังปฏิกรณ์แล้ว ICS จะไม่ควบแน่นไอน้ำจึงเป็นการลดความรุนแรงของอุบัติเหตุระดับรุนแรงเพียงเล็กน้อย

### 3. Gravity Driven Cooling System Deluge (GDCS Deluge) และ Basemat Internal Melt Arrest and Coolability (BiMAC)

เมื่ออุณหภูมิของ Lower Drywell (LWD) เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่บ่งบอกว่าถังปฏิกรณ์ล้มเหลวหรือแกนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ลงไปอยู่ใน LWD จะทำให้ Delude mode ของการดำเนินการของ GDCS ทำให้มีการไหลผ่าน BiMAC เพื่อให้ท่วมน้ำ LWD ซึ่งจะทำให้ความสามารถสำหรับ energetic fuel-coolant interaction ของถังปฏิกรณ์ที่ล้มเหลวน้อยที่สุด และการที่น้ำปกคลุมซากของแกนปฏิกรณ์จะเป็นการดักจับผลิตภัณฑ์ฟิชชันที่ถูกปลดปล่อยจากซากแกนปฏิกรณ์ (debris) และ corium ซึ่งเป็นการจำกัดความสามารถของปฏิกิริยาระหว่าง corium และคอนกรีต

BiMAC จะเพิ่มความเชื่อมั่นของ debris bed cooling โดยทำหน้าที่เป็นทางในทางวิศวกรรมสำหรับให้น้ำไหลผ่าน debris bed

### 4. Containment Heat Removal (PCCS และ Suppression Pool Cooling)

จะทำหน้าที่โดยใช้ Passive Containment Cooling System (PCCS) หรือ Suppression Pool Cooling (SP) mode อย่างใดอย่างหนึ่ง โดย PCCS ถูกออกแบบมาให้นำความร้อนจากการสลายตัวที่ถูกเพิ่มเข้าสู่อาคารเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลังเกิด Loss of coolant accident (LOCA) ออกทำให้สามารถจำกัดการทำความร้อนได้เท่านั้น ในขณะที่ SP สามารถทำได้ทั้งจำกัด และลดความดัน



PPCS จะควบแน่นไอน้ำและก๊าซที่บ่อของ PCCS และส่งส่วนที่ถูกควบแน่นไปที่บ่อของ GDCS ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกควบแน่นถูกส่งไปที่ SP โดยอาศัยความต่างของความดันระหว่าง Drywell และ Wetwell

#### 5. Drywell Spray

Drywell Spray ของ ESBWR ถูกออกแบบให้เป็น post-event containment clean up และ recovery system เพื่อจำกัดการได้รับ “first-in” personnel หลังเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง

#### 6. Vacuum Breakers

Vapor Suppression ต้องการหน้าที่ของ Vacuum Breaker เพื่อป้องกันการเกิด Bypass ของ Suppression pool โดยสมมติฐานแล้วเมื่อ Vacuum Breakers ล้มเหลวจะทำให้สูญเสียความสามารถในการ suppression ไอน้ำ

#### 7. Manual Containment Overpressure Protection (MCOPS)

เพื่อป้องกัน Overpressurization failure ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งเกิดความล้มเหลวของการนำความร้อนออกจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดย ESBWR ประกอบด้วยช่องปล่อยออกที่ควบคุมด้วยมือ (manual) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับสิ่งแวดล้อมผ่านทาง stack โดยการเกิดช่องปล่อยออกนี้จะลดปริมาณความการปล่อยออกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เกิดความล้มเหลวของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

#### 8. Reactor Building Effects

อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีช่องทางปล่อยผลิตผลพิซชันให้รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยอยู่ในค่าทางเทคนิคที่กำหนด

### 2.1.5 ซีเซียมไอโอไดต์ (CsI)

ซีเซียมไอโอไดต์ (CsI) เมื่อเกิดอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ BWR จะมีการปลดปล่อยจากระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นสารประกอบระหว่างซีเซียม และไอโอดีน โดยในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR มีปริมาณการสะสมในแกนปฏิกรณ์ในตอนท้ายของวัฏจักร ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณไอโอดีน และซีเซียมที่สะสมในแกนปฏิกรณ์แบบ ESBWR [6]

Isotope	Activity (Ci)	mass (g)
I-131	1.23E+08	991.94
I-132	1.79E+08	158.41
I-133	2.53E+08	2.2193
I-134	2.73E+08	10.111
I-135	2.88E+08	91.429
Cs-134	2.45E+07	18992
Cs-136	8.54E+06	116.51
Cs-137	1.59E+07	180682

### 2.1.6 ไอโอดีน [7]

เป็นของธาตุของแข็งที่ไม่ใช่โลหะ มีทั้งที่เป็นสารกัมมันตรังสี และไม่เป็นสารกัมมันตรังสี โดย I-129 และ I-131 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่สำคัญในสิ่งแวดล้อม ซึ่งไอโซโทปทั้งสองผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันของอะตอมยูเรเนียมระหว่างการดำเนินการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และการระเบิดของพลูโตเนียมหรือยูเรเนียมที่เป็นอาวุธนิวเคลียร์ ไอโอดีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นได้ง่าย และพบในรูปสารประกอบมากกว่าธาตุบริสุทธิ์โดย ไอโอดีนที่ปลดปล่อยออกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มักอยู่ในรูปของก๊าซ

I-129 มีค่าครึ่งชีวิต 15.7 ล้านปีในขณะที่ I-131 มีค่าครึ่งชีวิต 8.1 วัน โดยไอโซโทปทั้งสองเป็นผลผลิตฟิชชันที่เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงขณะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งเมื่อสลายตัวจะปลดปล่อยอนุภาคบีตา หากไม่มีการควบคุมปฏิกิริยาเคมีอย่างระมัดระวังจะเกิดไอโซโทปของไอโอดีนทั้งสองขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นการเพิ่มความดัน และทำให้เกิดการผุกร่อนของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนานนำไปสู่การแตกหักของแท่งเชื้อเพลิงเป็นผลให้ไอโอดีนปนเข้าไปในน้ำที่อยู่รอบๆ และไปสู่ส่วนที่เป็นของเสียซึ่งเป็นก๊าซ, ของเหลว และของเสียของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ไอโอดีนกัมมันตรังสีมีผลต่อสุขภาพคือทำให้เกิดปัญหาเมเร็งต่อมไทรอยด์ โดยหากได้รับ ไอโอดีนกัมมันตรังสีเป็นเวลานานสามารถเกิดก้อนเนื้อหรือเมเร็งต่อมไทรอยด์ได้ อย่างไรก็ตาม I-131 สามารถใช้รักษามะเร็งต่อมไทรอยด์ได้เช่นกัน

### 2.1.7 ซีเซียม Cesium [8]

ซีเซียมเป็นโลหะที่อาจเป็นธาตุที่มีความเสถียรคือไม่เป็นสารกัมมันตรังสีหรือไม่เสถียรคือเป็นสารกัมมันตรังสีโดยซีเซียมกัมมันตรังสีที่พบมากที่สุดคือ Cs-137 และอีกไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ทั่วไปคือ Cs-134 ซึ่ง Cs-137 มีความสำคัญต่อการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากกว่า Cs-134 ซึ่งโดยลักษณะทางเคมีของซีเซียมจะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายผ่านสิ่งแวดล้อมทำให้การทำความสะอาด Cs-137 เป็นไปได้อย่างยาก

Cs-137 ในสิ่งแวดล้อมมาจากหลายแหล่งโดยแหล่งใหญ่ที่สุดที่มีการแพร่กระจายและสะสมตัวคือฝุ่นกัมมันตรังสีที่มาจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ในปี 1950s และ 1960s ซึ่งมีการทดสอบว่ายังมีการสลายตัวของ Cs-137 อยู่ในปัจจุบัน และอุบัติเหตุการรั่วไหลของ Cs-137 ของเสียของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เช่น อุบัติเหตุของไฟฟ้านิวเคลียร์ Chernobyl นอกจากนี้ยังอาจมีการรั่วไหลของ Cs-137 จากเครื่องมือที่ใช้ในโรงพยาบาล ห้องปฏิบัติการวิจัย หรือเครื่องมือที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากลักษณะพิเศษของไอโซโทปซีเซียม [9] คือ

1. เป็นสารที่มีมากที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อ
2. มีค่าครึ่งชีวิตยาวนานโดย Cs-134 มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 2.1 ปี Cs-137 มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 30.1 ปี
3. สามารถเคลื่อนย้ายและระเหยในเนื้อเยื่อ
4. สามารถถูกกลายได้ดีซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ในสิ่งแวดล้อม
5. มีการดูดซึมเข้าไปอยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ในวงกว้าง

ทำให้ Cs-137 และ Cs-134 เป็นไอโซโทปที่มีศักยภาพในการปนเปื้อนในพื้นดินโดย Cs-137 ถูกผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 และ Pu-239 ส่วน Cs-134 ถูกผลิตจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (neutron capture) ของ Cs-133

มีหลักฐานการรั่วไหลที่สำคัญของไอโอดีนและซีเซียมอันเกิดจากการได้รับความร้อนสูงเกินไปของเชื้อเพลิงฟอสซิลซีเซียมและไอโอดีนจะปลดปล่อยออกมาในรูปของ atomic และ ionic species ในทางตรงกันข้ามหากซีเซียมและไอโอดีนอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เย็นกว่าจะสามารถรวมตัวกันอยู่ในรูปสารประกอบได้โดยอาจมีปริมาณส่วนน้อยที่ปรากฏในรูปของโมเลกุล

เมื่อ Cs-137 อยู่ในสิ่งแวดล้อมจะสลายตัวโดยปล่อยอนุภาคเบต้า, รังสีแกมมา และ Ba-137 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตการสลายตัวสั้นโดยปริมาณรังสีหลักจาก Cs-137 มาจาก Ba-137 ทุกคนได้รับ Cs-

137 ที่เป็นผลมาจากฝุ่นกัมมันตรังสีจากการทดลองนิวเคลียร์ในปริมาณน้อยจากดินและน้ำ โดย Cs-137 เข้าสู่ร่างกายโดยการกินอาหารและน้ำ หรืออาจเข้าผ่านทางสูดเอาฝุ่นผง ซึ่ง Cs-137 จะแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเนื้อเยื่ออ่อนของร่างกาย และบริเวณกล้ามเนื้อจะเป็นบริเวณที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นมากในขณะที่กระดูกและไขมันจะมีความเข้มข้นของ Cs-137 น้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารกัมมันตรังสีอื่นๆ Cs-137 จะคงอยู่ในร่างกายเพียงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากร่างกายสามารถขับ Cs-137 ออกได้ทางปัสสาวะ นอกจากนี้ร่างกายยังได้รับผลภายนอกจาก Cs-137 จากการแผ่รังสีแกมมา

### 2.1.8 Computer Code Program [10]

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาสามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.3

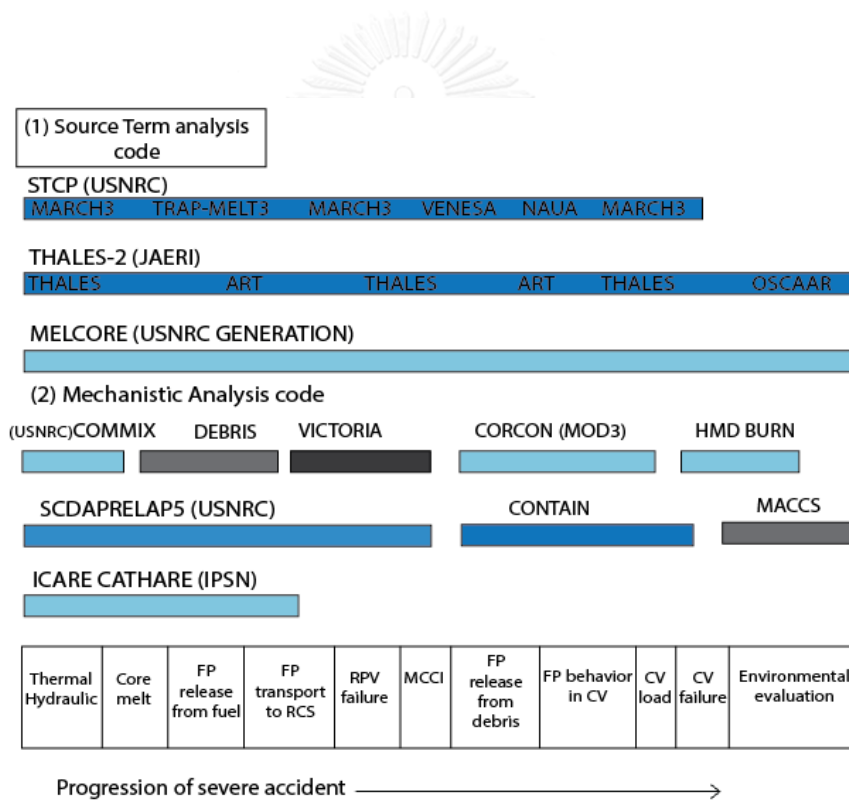
ตารางที่ 2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา

กลุ่ม	Analysis codes	ลักษณะพิเศษ
Fuel behavior codes	FALCON/FREY FRAPTRAN, SCANAIR, FRAPCON FRAPTRAN	ประกอบด้วย โมเดล, ความสัมพันธ์กัน และคุณสมบัติแบบพลาสติกของวัสดุที่ใช้หุ้ม, การเปลี่ยนเฟส และการเสีรูปของวัสดุหุ้มพร้อมกับการปลดปล่อยของก๊าซ
Reactor dynamics codes including those coupled with plant dynamic model	PARCS/RELAP5, HEXTRAN, HEXBU, SMABRE, KIKO3D/ATHLET, RELAP5/PANBORELAP5-3d, ESTLE, PANTHER,HEXTRAN/SMABREDYN 3D/ATHLET	การแก้ปัญหาของสมการนิวตรอนสองกลุ่มที่ขึ้นกับเวลาในเรขาคณิต Cartesian สามทิศทาง
Thermal-hydraulics, Integrated system, sub channel , porous media, and computational fluid dynamic methods	TRACE, TRACE-P, TRACE-B, SNAP RELAP5, CONTAIN, APROS, ATHLET , CATHARE, CATHENA	ใช้สำหรับวิเคราะห์อุบัติเหตุสูญเสีย น้ำหล่อเย็น (Loss of coolant accident : LOCA) และระบบชั่วคราวในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาใน 1 มิติ และ 3 มิติ Subchannel และ Porous media codes สามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบของการไหลที่จำกัดในตัวอย่าง

กลุ่ม	Analysis codes	ลักษณะพิเศษ
		<p>ของมัดเชื้อเพลิง</p> <p>Computational fluid dynamic (CFD) codes สามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบเช่น การผสมกันในบริเวณ down comer</p>
Containment thermal-hydraulics codes	WAVCO, RALOC, COCOSYS, GOTHIC, CONTAIN	<p>การวิเคราะห์ความดัน และอุณหภูมิมาก ที่สุดระหว่างอุบัติเหตุ LOCA และ steam line break (SLB), วิเคราะห์ minimum back pressure during, พฤติกรรมของความดัน และอุณหภูมิระหว่างเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง</p> <p>large break (LB)-LOCA วิเคราะห์ความแตกต่างของความดันโครงสร้างภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ระหว่าง LOCA, SLB เพื่อเป็นฐานสำหรับประเมินแรงที่กระทำต่อภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์</p>
Severe accident analysis codes	MELCOR, MACCS2, SCDAP/RELAP5-3D, CONTAIN, MAAP, IFCI, ICARE, ATHLET-CD, VICTORIA, IMPACT, COCOSYS, SAMPSON GOTHIC, WAVCO, ART	<p>เพื่อจำลองลำดับเหตุการณ์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยขยายจาก Thermal-Hydraulic ไปสู่การกระจายและการลดลงของไฮโดรเจน, การเผาไหม้ของไฮโดรเจน และแบบจำลองของแอโรซอล</p> <p>ปรากฏการณ์อุบัติเหตุระดับรุนแรงที่ใช้ MELCOR ซึ่งประกอบด้วย การตอบสนองต่อ thermal-hydraulic ในระบบทำความเย็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์, ช่องว่างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์, อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และอาคารที่จำกัดการเพิ่มความร้อน, การสลายตัว และการเปลี่ยนตำแหน่งของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น</p> <p>MACCS2 ใช้คำนวณการแพร่กระจายของกัมมันตภาพรังสีที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อม</p>

กลุ่ม	Analysis codes	ลักษณะพิเศษ
		และประชากร
More detailed mechanistic severe accident analysis codes	TRAC/MELPROG ICARE, CATHARE ATHLET-CD, CFD	เป็น code ที่รวมหลายๆ code เข้าด้วยกัน โดยใช้กับแบบจำลองพาราเมตริกซ์กับปรากฏการณ์ทางกายภาพ ลักษณะทั่วไปของ code นี้คือเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำ และไม่แตกต่างจากระบบที่เกี่ยวข้องกับ thermal-hydraulic code ตรวจจับที่ไม่มีการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์อย่างมีนัยสำคัญ
Computational fluid dynamics (CFD) / Fire analysis codes	CFD, PHOENICS CFX, FLUENT TRIO, FINFLO, CAMP code	CFD code ใช้ในวงพื้นที่คอมพิวเตอร์ที่จำกัดซึ่งมาจากเรื่องความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ CFD และ fire analysis code ใช้สำหรับการทดลองที่สัมพันธ์กับการประมาณอย่างหยาบของการเกิดไฟ, การคำนวณไฟและก๊าซ โดย CFD code จำเป็นต้องใช้เมื่อมีส่วนที่ซับซ้อน CAMP code ประเมินแรงจากอุณหภูมิที่กระทำต่อ lower head ของถังปฏิกรณ์ และ บอกปริมาณสภาพซากที่หลอมเหลวที่ lower head เกิดความล้มเหลว
Design-Basis Accident (DBA) codes	RADTRAD	DBA code ถูกใช้ในการพิจารณาปริมาณ (dose) ที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งจำเพาะสำหรับเหตุการณ์จำลองอุบัติเหตุที่กำหนดขึ้น และยังประมาณการสะสม, โഴ้การสลายตัว, ตารางสัดส่วนการแปลงค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าปริมาณ (dose)
Health effects/dose calculation	VARSKIN	ใช้ในการจำลองและประเมินด้านสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับการได้รับกัมมันตรังสี และการปนเปื้อน
Radioactive nuclide transport codes	DandD, Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Codes	วิเคราะห์ปริมาณ dose เพื่อใช้ในเรื่องลิขสิทธิ์การสิ้นสุด และการรื้อถอน DandD code เป็นโปรแกรมคัดกรองเรื่อง

กลุ่ม	Analysis codes	ลักษณะพิเศษ
		ลิขสิทธิ์การสิ้นสุด และการรื้อถอน RESRAD code ใช้ในเรื่องการทำความเข้าใจ สะอาดพื้นที่ที่ทำงาน RESRAD-BUILD ใช้ในเรื่องทำความเข้าใจ สะอาดตึกและโครงสร้าง
Structural analysis codes	Frame 3DD	อธิบายพฤติกรรมของถัง, ท่อ และ โครงสร้างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ภายใต้การเกิดอุบัติเหตุที่สภาวะ ต่างๆ



รูปที่ 2.2 Progression of major severe accident [10]

### 2.1.9 ART Mod2 Program [11]

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่ม Severe accident analysis codes โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2 ใช้คำนวณการเคลื่อนที่และการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR ในระหว่างการเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงซึ่งพัฒนาโดย Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) มีลักษณะเด่น คือ

1. วิเคราะห์ทั้งระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ และระบบของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
2. มีการเคลื่อนที่ด้วยการไหลของของเหลวพองๆ กับการไหลของก๊าซ
3. มีความรวดเร็วในการคำนวณ

นิวไคลด์กัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod2 ประกอบด้วยส่วนประกอบของเชื้อเพลิง และวัสดุที่เป็นโครงสร้าง โดยจะแบ่งนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 10 กลุ่มดังตารางที่ 2.4 โดยสารระเหยเป็นไอได้ง่ายจะจัดให้อยู่ในรูปแบบของแอโรซอล

ตารางที่ 2.4 กลุ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

กลุ่มที่	ธาตุ	สารประกอบ	รูปแบบ
1	NB (Noble Gas)	Xe, Kr	ไอ
2	I	CsI	ไอ และแอโรซอล
3	Cs	CsOH	
4	Te	TeO <sub>2</sub>	
5	Sr	SrO	แอโรซอล
6	Ru	Ru	
7	La	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
8	Ba	Ba	
9	Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
10	U	UO <sub>2</sub>	



### 2.1.9.1 พฤติกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

โปรแกรม ART Mod2 จะพิจารณาการเคลื่อนย้ายของสารกัมมันตรังสีดังรูปที่ 2.3 คือ

#### 1. การสะสมตัวตามธรรมชาติ

การสะสมตัวตามธรรมชาติ แบ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีแบบแอโรซอล ได้แก่ gravitational settling, thermophoresis, diffusiphoresis, Brownian diffusion, diffusion of aerosol under the laminar and turbulent flow conditions และ resuspension และนิวไคลด์กัมมันตรังสีแบบก๊าซ ได้แก่ condensation at the structure surface, adsorption in structure materials, revaporization at the structure surface และ partition between gas and liquid โดยโปรแกรม ART Mod2 ยังพิจารณาการโตขึ้นของแอโรซอล ได้แก่ agglomeration of aerosols และ condensation / evaporation of radionuclides at the aerosol surface

2. การเคลื่อนย้ายโดยลักษณะความปลอดภัยทางวิศวกรรม (Engineering Safety Features, ESF) ได้แก่ removal by a spray, removal by a scrubbing in a water pool, steam dryer และ filters การคำนวณพฤติกรรมของ Aerosol ด้วยโปรแกรม ART Mod2

โปรแกรม ART Mod2 มีวิธีการคำนวณโดยแบ่งระบบของ primary และระบบของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นปริมาณหลายๆปริมาตรซึ่งแต่ละปริมาตรจะมีสถานะที่เป็นก๊าซหรือของเหลว และใช้ Sectional method ในการคำนวณการกระจายตัวของ Aerosol ขนาดต่างๆ โดยต้องใส่ข้อมูลที่ต้องการ คือ

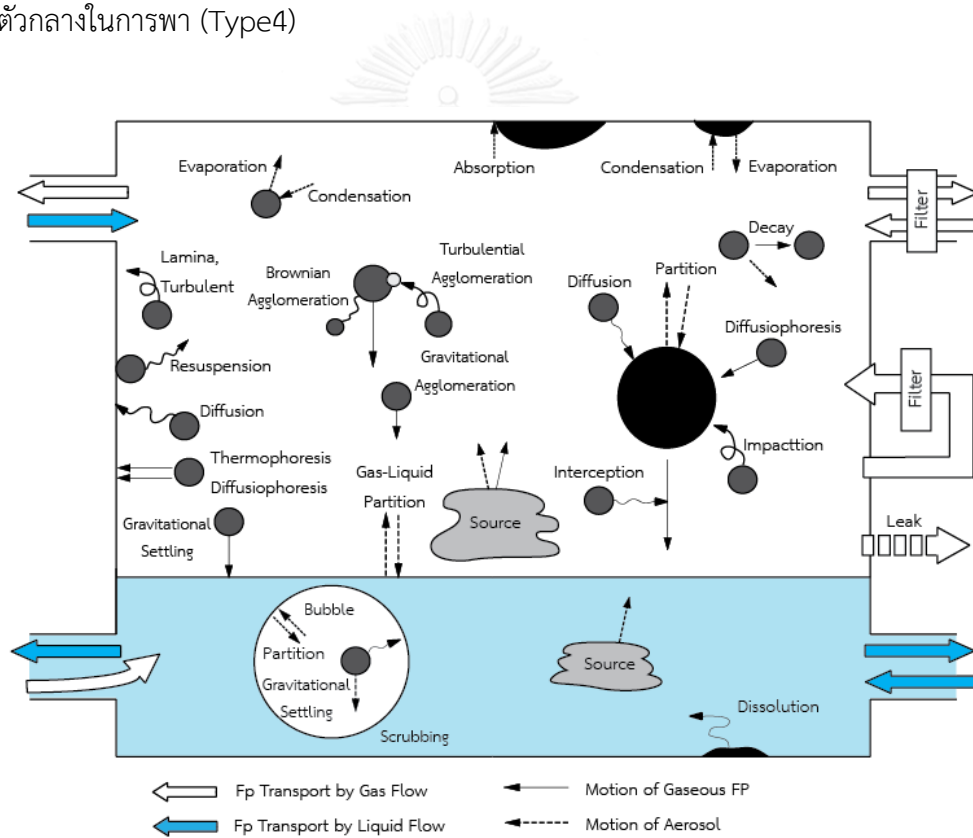
- ข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตของ plant
- อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากเชื้อเพลิง
- ข้อมูล Thermal Hydraulic condition

โปรแกรม ART Mod2 จะแบ่งสถานะทางกายภาพ (physical state) ของสารกัมมันตรังสีในแต่ละปริมาตรเป็น 6 สถานะ

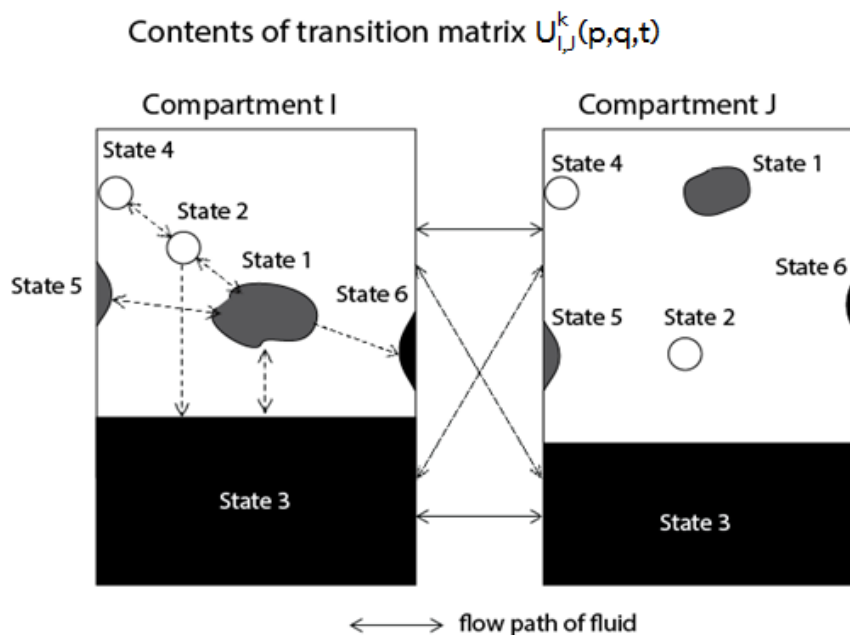
1. รูปแบบที่เป็นไอที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นก๊าซ (สถานะที่ 1)
2. รูปแบบที่เป็นแอโรซอลในตัวกลางที่เป็นก๊าซ (สถานะที่ 2)
3. รูปแบบที่ละลายอยู่ในตัวกลางของเหลว (สถานะที่ 3)
4. รูปแบบของไอที่ควบแน่นที่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 4)
5. รูปแบบของแอโรซอลสะสมที่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 5)
6. รูปแบบที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 6)

โดยนิวเคลอัสกัมมันตรังสีจะมีการเคลื่อนที่ระหว่างปริมาตรโดยการพาของของไหลดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีการเคลื่อนที่ 4 สภาวะ

1. การไหลจากตัวกลางสภาวะที่เป็นก๊าซไปสู่ตัวกลางสภาวะที่เป็นก๊าซโดยมีก๊าซเป็นตัวกลางในการพา (Type1)
2. การไหลจากตัวกลางสภาวะที่เป็นก๊าซไปสู่ตัวกลางสภาวะที่เป็นของเหลวโดยมีก๊าซเป็นตัวกลางในการพา (Type2)
3. การไหลจากตัวกลางสภาวะที่เป็นของเหลวไปสู่ตัวกลางสภาวะที่เป็นของเหลวโดยมีของเหลวเป็นตัวกลางในการพา (Type3)
4. การไหลจากตัวกลางสภาวะที่เป็นของเหลวไปสู่ตัวกลางสภาวะที่เป็นก๊าซโดยมีของเหลวเป็นตัวกลางในการพา (Type4)



รูปที่ 2.3 นิวเคลอัสกัมมันตรังสีเคลื่อนที่และการสะสมในโปรแกรม ART Mod2 [11]



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ภายในและระหว่างปริมาตรและการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี [11]

#### 2.1.9.2 กลุ่มสมการที่เกี่ยวข้อง

พลวัตกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งหมดถูกรวมเข้าไปในสมการความต่อเนื่องของมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสี และใช้ปริมาตรหลายๆ ปริมาตรเป็นตัวแทนเพื่ออธิบายสมการความต่อเนื่องของมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสีในระบบทำความเย็นเครื่องปฏิกรณ์ และระบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ ใช้ Sectional method ในการคำนวณการกระจายตัวของ Aerosol ขนาดต่างๆ และมีการใช้สมการการเคลื่อนที่ของมวล เช่น การควบแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในการอธิบายปรากฏการณ์ในปริมาตรรวมถึงสมการการเคลื่อนที่ของมวลด้วยการพาใช้อธิบายปรากฏการณ์ระหว่างปริมาตร โดยกลุ่มสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของโปรแกรม ART Mod2 แสดงในตารางที่ 2.5

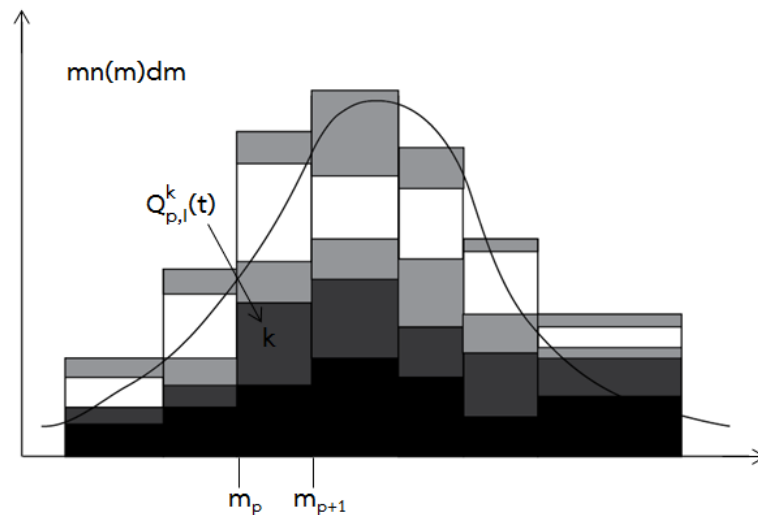
ตารางที่ 2.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม ART Mod2

กลุ่มสมการ	สมการ
Equations of continuity for mass	
Governing Equation by agglomeration	
Mass Transfer Models for Aerosols	Gravitational Settling Diffusiophoresis Thermophoresis

กลุ่มสมการ	สมการ
	Diffusion และ Inertia Resuspension Agglomeration
Mass Transfer Model for Gaseous Radionuclides	Condensation at structure surface Condensation at aerosol surface Adsorption Transfer between gas and liquid
Physio-chemical Properties	Mean free path of gas molecule Viscosity of gas and liquid Diffusion coefficients Thermal conductivity
Radionuclides Removal	Scrubbing Spray Steam Dryer Filter

### ตัวอย่างสมการ

1. Sectional method อธิบายการกระจายตัวของไวรัสตามขนาดแโรซอลดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยแบ่งแโรซอลเป็นส่วนต่างๆตามขนาด



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของแโรซอลในโดย Sectional Method ที่ compartment ที่ 1

- สมการ Sectional method ในโปรแกรม ART Mod2

$$M_{l,p}^k(t) = \int_{m_{p-1}}^{m_p} \left[ \int_0^1 m \eta_k g_l^k(m, \eta_k) d\eta_k \right] \eta_l(m,t) dm \quad 2.1$$

$M_{l,p}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ของปริมาตร l (กรัม)

$\eta_l(m,t)$  : ฟังก์ชันการกระจายตัวของแโรซอลที่ปริมาตร l (1/กรัม)

m : มวลของแโรซอลในส่วนที่ p (กรัม)

$m_p, m_{p-1}$  : ขอบเขตบน และล่างของแโรซอลในส่วนที่ p (กรัม)

$\eta_k$  : สัดส่วนโดยมวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วน p

$g_l^k(m,t)$  : ฟังก์ชันความหนาแน่นของมวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วน p

- สมการแสดงปริมาณทางกายภาพของ Sectional Method

$$R_{p,i}(t) = \int_{m_{p-1}}^{m_p} v_{d,i}(r) \frac{A_{w,i}}{V_{g,i}} m n_i(m,t) dm \quad 2.2$$

$R_{p,i}(t)$  : ค่า mean ของอัตราการสะสมแอร์โซลในส่วนที่ p ของปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$v_{d,i}(r)$  : ความเร็วในการสะสมแอร์โซลที่มีรัศมี r (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,i}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$n_i(m,t)$  : ฟังก์ชันการกระจายตัวของแอร์โซลใน compartment I (1/กรัม)

$m$  : มวลของแอร์โซลในส่วนที่ p (กรัม)

$m_p, m_{p-1}$  : ขอบเขตบน และล่างของแอร์โซลในส่วนที่ p (กรัม)

## 2. สมการความต่อเนื่องของมวล

รูปแบบพื้นฐานของสมการความต่อเนื่องของมวล

พจน์ที่ 1 อัตราการเปลี่ยนแปลง นิวไคลด์กัมมันตรังสี k ใน สถานะ p ที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 การเปลี่ยนแปลง สถานะของนิวไคลด์ k ภายใน ปริมาตรหรือระหว่างปริมาตร	พจน์ที่ 3 อัตราการเกิดของมวล สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะ p ที่ปริมาตร I
--	---	--

$$\frac{dM_{i,p}^k(t)}{dt} = \sum_{J=1}^N \sum_{q=1}^6 U_{i,l}^k(p,q,t) M_{i,q}^k(t) + S_{i,p}^k(t) \quad 2.3$$

$U_{i,l}^k(p,q,t)$  : transition matrix ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ระหว่างสถานะที่ p และ q ที่ปริมาตร I เมื่อ  $l = J$  ถ้า  $l \neq J$  transition matrix จะหมายถึงการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k จากปริมาตร J สู่ I โดยการไหลของของไหล (1/วินาที)

$M_{i,p}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะ p ที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{i,q}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะ q ที่ปริมาตร I (กรัม)

$S_{i,p}^k(t)$  : อัตราการเกิดของมวลสำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะ p ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$N$  : จำนวนของปริมาตร

2.1 รูปแบบที่เป็นไอที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นก๊าซ (สถานะที่ 1)

- การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Nuclide Generation)

การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีซึ่งถูกอธิบายไว้ในพจน์ที่ 2 ของสมการความต่อเนื่องของมวลพื้นฐาน

เมื่อไม่มีน้ำปกคลุมเศษซากแกนปฏิกรณ์

$$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}} = S_{g,l}^k(t) \quad 2.4$$

เมื่อมีน้ำปกคลุมเศษซากแกนปฏิกรณ์

$$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}} = (1-E_{sc}^k)S_{g,l}^k(t) \quad 2.5$$

$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$E_{g,l}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการสครับ (scrubbing) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ปริมาตร I

$S_{g,l}^k(t)$  : อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในรูปของก๊าซจากเชื้อเพลิงที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

- การสะสม (Deposition)

$$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}} = -v_{g,l}^k \frac{A_{w,l}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) + v_{w,l}^k \frac{A_{w,l}}{V_{w,l}} M_{w,l}^k(t) \quad 2.6$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่เป็นก๊าซ จาก (สถานะที่ 1) ไปสู่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 4)	พจน์ที่ 2 อัตราการสะสมของนิวไคลด์ k จากการควบแน่น	พจน์ที่ 3 อัตราการระเหยกลับของนิวไคลด์ k ที่ควบแน่น
---	---	---

$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{w,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  บนพื้นผิวโครงสร้าง (กรัม)

$v_{g,l}^k(t)$  : ความเร็วสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  (เซนติเมตร/วินาที)

$v_{w,l}^k(t)$  : ความเร็วการระเหยของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,l}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร  $l$  (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{w,l}$  : ปริมาตรของชั้น (boundary layer) ตลอดพื้นผิวโครงสร้าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

#### - การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง โดยสมการความต่อเนื่องของการดูดซับจะไม่มีพจน์ของการระเหยเนื่องจากการดูดซับเป็นการรวมกันทางเคมีพื้นผิวโครงสร้าง

$$\left( \frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Adsorption}} = -v_{s,l}^k \frac{A_{w,l}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) \quad 2.7$$

$\left( \frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Adsorption}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$v_{s,l}^k(t)$  : ความเร็วการดูดซับของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,l}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร  $l$  (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

#### - การควบแน่นที่พื้นผิวแอโรซอล (Condensation at the Aerosol Surface)

การควบแน่น และการระเหยที่เกี่ยวข้องกับแอโรซอลถูกแบ่งการคำนวณเป็นส่วนๆ ตามวิธี sectional method

$$\left( \frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Condensation to Aerosol}} = - \left( \sum_{p=1}^L Q_{p,l}(t) \int_{r_{p-1}}^{r_p} \frac{\beta_l^k(r)}{m_p(r)(r_p - r_{p-1})} dr \right) \frac{M_{g,l}^k(t)}{V_{g,l}} \quad 2.8$$

$\left( \frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Condensation to Aerosol}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)



$Q_{p,l}(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  สถานะก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$m_p(r)$  : มวลของแอโรซอลที่มีรัศมี  $r$  ในส่วนที่  $p$  (กรัม)

$r_p, r_{p-1}$  : ขอบเขตบน และล่างของรัศมีแอโรซอลในส่วนที่  $p$  (กรัม)

$\beta_l^k(r)$  : ความถี่ในการชนกันของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  และแอโรซอล

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- การละลาย (Dissolution)

นิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในรูปไอซึ่งลอยตัวอยู่บนสถานะก๊าซบางส่วนถูกละลายลงสู่ของเหลว และนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ที่ละลายอยู่ในน้ำบางส่วนเคลื่อนที่ไปสู่สถานะก๊าซ

$$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Dissolution}} = -v_{g,l}^k \frac{A_{f,l}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) + v_{g,l}^k \frac{A_{f,l}}{V_{l,l} H_l^k} M_{l,l}^k(t) \quad 2.9$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร $l$	พจน์ที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลนิวไคลด์ $k$ จากสถานะที่ 1 (ก๊าซ) ไปสู่สถานะที่ 3 (ของเหลว)	พจน์ที่ 3 การเปลี่ยนแปลงนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ จากของเหลวกลับไปสู่ก๊าซเป็นการผันกลับของพจน์ที่ 2
---	---	--

$\left(\frac{dM_{g,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Dissolution}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$M_{l,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในของเหลว (กรัม)

$v_{g,l}^k(t)$  : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  (เซนติเมตร/วินาที)

$H_l^k$  : สัมประสิทธิ์ partition (partition coefficient) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$

$A_{f,l}$  : พื้นที่ผิวของของเหลวที่ปริมาตร  $l$  (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{l,l}$  : ปริมาตรของของเหลว (liquid phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- การกำจัดโดยสเปรย์ และตัวกรองที่อยู่ภายใน

$$\left(\frac{dM_{g,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray and Filter}} = - \sum_{J=1}^N E_{sp,J}^k H_J^k \frac{F_{sp,J}}{V_{g,i}} M_{g,i}^k(t) + \sum_{J=1}^N (1-E_{sp,J}^k) \frac{F_{sp,J}}{V_{l,J}} M_{l,J}^k(t) - F_{R,g}^k(t) M_{g,i}^k(t) \quad 2.10$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซจากสเปรย์ และตัวกรอง ที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 การกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ด้วยสเปรย์	พจน์ที่ 3 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่ถูกกำจัดด้วยสเปรย์	พจน์ที่ 4 นิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ถูกกำจัดด้วยการกรอง
--	---	--	---

$\left(\frac{dM_{g,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray and Filter}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{g,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{l,J}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลวที่ปริมาตร J (กรัม)

$E_{sp,J}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีของสเปรย์

$H_J^k$  : สัมประสิทธิ์ partition ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ปริมาตร J

$F_{sp,i,J}$  : อัตราการไหลของสเปรย์จากปริมาตร J ไป I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{l,J}$  : ปริมาตรของของเหลว (liquid phase) ในปริมาตร J (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$F_{R,g}^k(t)$  : อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี k โดยตัวกรองที่อยู่ด้านใน

- การขนส่งโดยของเหลว (Transport by Fluids)

การเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในสถานะก๊าซของปริมาตร I สามารถเคลื่อนย้ายไปสู่ปริมาตรอื่นโดยการไหลของของไหลจากก๊าซในปริมาตรที่ J ไปสู่ก๊าซ (Type1) หรือไปสู่ของเหลว (Type2) ในปริมาตรที่ I โดยการไหลของก๊าซเป็นตัวพาไป และสามารถเคลื่อนย้ายจากปริมาตรที่ J ไปสู่ปริมาตรที่ I ได้เช่นกัน

$$\left(\frac{dM_{g,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}} = - \sum_{J=1}^N \left(\frac{G_{J,i}^{gg}}{V_{g,i}} + \frac{G_{J,i}^{lg}}{V_{g,i}}\right) M_{g,i}^k(t) + \sum_{J=1}^N [1-F_{g,i,J}^k(t)] \frac{G_{i,J}^{gg}}{V_{g,i}} M_{g,J}^k(t) + \sum_{J=1}^N [1-E_{sc,i,J}^k(t)] \frac{G_{i,J}^{lg}}{V_{g,i}} M_{g,J}^k(t) \quad 2.11$$

พจน์ที่ 1 อัตราการ ส่งผ่านนิวไคลด์ กัมมันตรังสี k ใน สถานะก๊าซที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 อัตราการ เคลื่อนย้ายของนิวไคลด์ กัมมันตรังสี k จาก ปริมาตร J ไป I ด้วยการ ไหลของของไหล	พจน์ที่ 3 อัตราการ เปลี่ยนแปลงของนิว ไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ ไม่ถูกรอง	พจน์ที่ 4 อัตราการ เปลี่ยนแปลงของนิว ไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ ไม่กำจัดด้วยสเปรย์
---	--	---	--

$\left(\frac{dM_{g,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซ (สถานะที่

1) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{g,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{g,j}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร J (กรัม)

$G_{i,j}^{sg}$  : อัตราการไหลของ bulk gas แบบ Type1 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$G_{i,j}^{lg}$  : อัตราการไหลของ bulk gas แบบ Type2 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$F_{g,i,j}^k(t)$  : ประสิทธิภาพกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี k โดยตัวกรอง (เซนติเมตร/วินาที)

$E_{sc,j}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการสกรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k

$A_{w,i}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

N : จำนวนปริมาตร

## 2.2 รูปแบบที่เป็นแอโรซอลในตัวกลางที่เป็นก๊าซ (สถานะที่ 2)

สมการการความต่อเนื่องนิวไคลด์รูปแบบที่เป็นแอโรซอลในตัวกลางที่เป็นก๊าซมีลักษณะเช่นเดียวกันสมการนิวไคลด์รูปแบบที่เป็นไอที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นก๊าซ (สถานะที่ 1) เช่น

- การเกิดแอโรซอล (Aerosol Generation)

เมื่อไม่มีน้ำปกคลุมเศษซากแกนปฏิกิริยา

$$\left(\frac{dM_{p,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}} = S_{p,i}^k(t) \quad 2.12$$

เมื่อมีน้ำปกคลุมเศษซากแกนปฏิกรณ์

$$\left( \frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Generation}} = (1-E_{sc}^p) S_{p,l}^k(t) \quad 2.11$$

$\left( \frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Generation}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 1) ที่ปริมาตร l (กรัม/วินาที)

$M_{p,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร l (กรัม)

$E_{sc,l}^p$  : ประสิทธิภาพการสกรับของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ที่ปริมาตร l

$S_{p,l}^k(t)$  : อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p จากเชื้อเพลิงที่ปริมาตร l (กรัม/วินาที)

- การสะสม (Deposition)

$$\left( \frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Deposition}} = -v_{d,l}^k(r_p) \frac{A_{w,l}}{V_{g,l}} M_{p,l}^k(t) - v_{dG,l}^k(r_p) \frac{A_{f,l}}{V_{f,l}} M_{p,l}^k(t) \quad 2.12$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ที่ปริมาตร l	พจน์ที่ 2 อัตราการการสะสมของแอโรซอลในส่วนที่ p บนผนัง	พจน์ที่ 3 อัตราการสะสมของแอโรซอลในส่วนที่ p บนพื้นหรือพื้นผิวของเหลวจากการตกตามแรงโน้มถ่วง
--	---	--

$\left( \frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt} \right)_{\text{Deposition}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p (สถานะที่ 2) ที่ปริมาตร l (กรัม/วินาที)

$M_{p,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร l (กรัม)

$v_{d,l}^k(r_p)$  : ความเร็วสะสมของแอโรซอลในส่วนที่ p (เซนติเมตร/วินาที)

$v_{dG,l}^k(r_p)$  : ความเร็วสะสมของแอโรซอลในส่วนที่ p โดยการตกจากแรงโน้มถ่วง (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,l}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร l (ตารางเซนติเมตร)

$A_{f,l}$  : พื้นที่พื้นหรือพื้นผิวของเหลวในการสะสมของปริมาตร l (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- การกำจัดแอโรซอลโดยสเปรย์ และตัวกรอง

$$\left(\frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray and Filter}} = -\lambda_{sp,l}(r_p)M_{p,l}^k(t) - F_{R,p}(t)M_{p,l}^k(t) \quad 2.13$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในส่วนที่ $p$ ที่ปริมาตร $l$ ด้วยสเปรย์และการกรอง	พจน์ที่ 2 อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในส่วนที่ $p$ ด้วยสเปรย์	พจน์ที่ 3 อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในส่วนที่ $p$ ด้วยการกรอง
---	--	---

$\left(\frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray and Filter}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  (สถานะที่ 2) ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$M_{p,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$\lambda_{sp,l}(r_p)$  : อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  ด้วยสเปรย์ (1/วินาที)

$F_{R,g}^k(t)$  : อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  โดยตัวกรองที่ (1/วินาที)

- การขนส่งโดยของเหลว (Transport by Fluids)

การเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในแอโรซอลของปริมาตร  $l$  สามารถเคลื่อนย้ายไปสู่ปริมาตรอื่นโดยการไหลของของไหลจากก๊าซในปริมาตรที่  $j$  ไปสู่ก๊าซ (Type1) หรือไปสู่ของเหลว (Type2) ในปริมาตรที่  $l$  โดยการไหลของก๊าซเป็นตัวพาไป และสามารถเคลื่อนย้ายจากปริมาตรที่  $j$  ไปสู่ปริมาตรที่  $l$  ได้เช่นกัน

$$\left(\frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}} = -\sum_{j=1}^N \left(\frac{G_{j,l}^{gg}}{V_{g,l}} + \frac{G_{j,l}^{lg}}{V_{g,l}}\right) M_{p,l}^k(t) + \sum_{j=1}^N [1-F_{p,l,j}^k(t)] \frac{G_{l,j}^{gg}}{V_{g,j}} M_{p,j}^k(t) + \sum_{j=1}^N [1-E_{sc,l,j}^k(r_p,t)] \frac{G_{l,j}^{lg}}{V_{g,j}} M_{p,j}^k(t) \quad 2.14$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในส่วนที่ $p$ ที่ปริมาตร $l$	พจน์ที่ 2 การเคลื่อนย้ายของแอโรซอลในส่วนที่ $p$ จากปริมาตร $j$ ไป $l$ ด้วยการไหลของของไหล	พจน์ที่ 3 แอโรซอลในส่วนที่ $p$ ที่ไม่ถูกกรอง	พจน์ที่ 4 แอโรซอลในส่วนที่ $p$ ที่ไม่ถูกสครับ
--	---	--	---

$\left(\frac{dM_{p,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p (สถานะที่ 2) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{p,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{p,j}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ที่ปริมาตร J (กรัม)

$G_{i,j}^{sg}$  : อัตราการไหลของ bulk gas แบบ Type1 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$G_{i,j}^{lg}$  : อัตราการไหลของ bulk gas แบบ Type2 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$F_{p,i,j}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการกำจัดแอโรซอลในส่วนที่ p โดยตัวกรอง

$E_{sc,i,j}^k(r_p,t)$  : ประสิทธิภาพการสครับในส่วนที่ p

$A_{w,i}$  : พื้นที่ผิวการดูดซับของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{g,j}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร J (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

N : จำนวนปริมาตร

### 2.3 รูปแบบที่ละลายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (สถานะที่ 3)

- การเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี

$$\left(\frac{dM_{i,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}} = E_{sc}^k S_{g,i}^k(t) + E_{sc}^p S_{p,i}^k(t) \quad 2.15$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์ k ในรูปก๊าซที่ถูกสครับ	พจน์ที่ 3 อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์ k ในรูปแอโรซอลในส่วนที่ p ที่ถูกสครับ
--	---	--

$\left(\frac{dM_{p,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Generation}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลว (liquiq phase) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{i,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ละลายในของเหลว (สถานะที่ 3) ที่ปริมาตร I (กรัม)

$E_{sc,i}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการสครับของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในรูปของก๊าซที่ปริมาตร I

$S_{g,l}^k(t)$  : อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในรูปของก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$E_{sc,l}^p(t)$  : ประสิทธิภาพการสครับ (scrubbing) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  ที่ปริมาตร  $l$

$S_{p,l}^k(t)$  : อัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

- การสะสม และการละลาย (Deposition and Dissolution)

การสะสมแอโรซอลบนพื้นผิวของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางของเหลวในโปรแกรม ART Mod2 หากไม่มีน้ำปกคลุมพื้นแอโรซอลจะถูกสมมติให้สะสมอยู่บนพื้น

$$\left(\frac{dM_{l,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}} = \sum_{p=1}^L v_{d,l}^k(r_p) \frac{A_{f,l}}{V_{g,l}} M_{p,l}^k(t) \quad 2.16$$

$$\left(\frac{dM_{l,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Dissolution}} = v_{g,l}^k \frac{A_{f,l}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) - v_{g,l}^k \frac{A_{f,l}}{V_{l,l} H_l^k} M_{l,l}^k(t) \quad 2.17$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร $l$	พจน์ที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ในรูปก๊าซจากการละลาย	พจน์ที่ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสี $k$ ที่ละลายอยู่ในของเหลวออกสู่ก๊าซ
---	---	--

$\left(\frac{dM_{p,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซ (สถานะที่ 3) ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม/วินาที)

$M_{p,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในส่วนที่  $p$  ที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร  $l$  (กรัม)

$M_{l,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในของเหลว (กรัม)

$v_{g,l}^k(t)$  : สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  (เซนติเมตร/วินาที)

$v_{d,l}(r_p)$  : ความเร็วสะสมของแอโรซอลในส่วนที่  $p$  (เซนติเมตร/วินาที)

$H_l^k$  : สัมประสิทธิ์ partition (partition coefficient) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$

$A_{f,l}$  : พื้นที่ผิวของของเหลวที่ปริมาตร  $l$  (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{l,l}$  : ปริมาตรของของเหลว (liquid phase) ในปริมาตร  $l$  (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- สเปรย์ (Spray)

$$\left(\frac{dM_{i,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray}} = \sum_{J=1}^N E_{sp,J}^k H_J^k \frac{F_{sp,l,J}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) - \sum_{J=1}^N E_{sp,J}^k \frac{F_{sp,l,J}}{V_{l,l}} M_{l,l}^k(t) + \sum_{p=1}^L \lambda_{sp,l}(r_p) M_{p,l}^k(t) \quad 2.18$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่าน นิวไคลด์กัมมันตรังสี k ใน ของเหลวที่ปริมาตร l	พจน์ที่ 2 นิวไคลด์ กัมมันตรังสี k ที่ถูกกำจัด ด้วยสเปรย์กลับไปสู่ก๊าซ	พจน์ที่ 3 นิวไคลด์ กัมมันตรังสี k ที่ถูก กำจัดด้วยสเปรย์	พจน์ที่ 4 แอโรซอล ในส่วนของ p ที่ถูก กำจัดด้วยสเปรย์
---	---	--	--

$\left(\frac{dM_{i,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Spray}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลว (สถานะที่ 3) ที่ปริมาตร l (กรัม/วินาที)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร l (กรัม)

$M_{l,l}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลวที่ปริมาตร l (กรัม)

$E_{sp,l}^k$  : ประสิทธิภาพการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีของสเปรย์

$H_J^k$  : สัมประสิทธิ์ partition ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ปริมาตร J

$F_{sp,l,J}$  : อัตราการไหลของสเปรย์จากปริมาตร J ไป l (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร l (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{l,l}$  : ปริมาตรของของเหลว (liquid phase) ในปริมาตร l (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\lambda_{sp,l}(r_p)$  : อัตราการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนของ p ด้วยสเปรย์ (1/วินาที)

- การขนส่งโดยของเหลว (Transport by Fluids)

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ละลายในของเหลวในปริมาตร l เคลื่อนที่เข้าสู่ปริมาตร J โดยการไหลจากของเหลวไปของเหลว (Type3) หรือของเหลวไปก๊าซ (Type4) โดยการไหลของของเหลว และสามารถเคลื่อนย้ายจากปริมาตรที่ J ไปสู่ปริมาตรที่ l ได้เช่นกัน

$$\left(\frac{dM_{i,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}} = - \sum_{J=1}^N \left( \frac{G_{J,l}^{gl}}{V_{g,l}} + \frac{G_{J,l}^{ll}}{V_{g,l}} \right) M_{l,l}^k(t) + \sum_{J=1}^N E_{sc,l,J}^k(t) \frac{G_{l,J}^{lg}}{V_{g,J}} M_{g,J}^k(t) + \sum_{J=1}^N \sum_{p=1}^L E_{sc,l,J}^k(r_p,t) \frac{G_{l,J}^{lg}}{V_{g,J}} M_{g,J}^k(t) \quad 2.19$$



พจน์ที่ 1 อัตราการ ส่งผ่านนิวไคลด์ กัมมันตรังสี k ใน ของเหลวที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 อัตราการ เคลื่อนย้ายมวล เนื่องจากการไหลของ ของไหล	พจน์ที่ 3 อัตราการกำจัด นิวไคลด์กัมมันตรังสี k ด้วยการสครับ	พจน์ที่ 4 อัตราการ กำจัดแอโรซอลใน ส่วนที่ p ด้วย การสครับ
---	--	---	--

$\left(\frac{dM_{I,J}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Transport by Fluid}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลว (สถานะที่ 3)  
ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{g,I}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{g,J}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซที่ปริมาตร J (กรัม)

$M_{l,J}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในของเหลวที่ปริมาตร J (กรัม)

$M_{p,J}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ที่ปริมาตร J (กรัม)

$G_{I,J}^{sl}$  : อัตราการไหลของของเหลวแบบ Type4 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์  
เซนติเมตร/วินาที)

$G_{I,J}^{ll}$  : อัตราการไหลของเหลวแบบ Type3 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร/  
วินาที)

$G_{I,J}^{lg}$  : อัตราการไหลของ bulk gas แบบ Type2 จากปริมาตร J ไปปริมาตร I (ลูกบาศก์  
เซนติเมตร/วินาที)

$F_{g,I,J}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการกำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี k โดยตัวกรอง (เซนติเมตร/วินาที)

$E_{sc,I,J}^k(t)$  : ประสิทธิภาพการสครับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

$E_{sc,I,J}^k(r_p,t)$  : ประสิทธิภาพการสครับแอโรซอลในส่วนที่ p (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,I}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,I}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$N$  : จำนวนปริมาตร

#### 2.4 การควบแน่นที่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 4)

ในสถานะนี้ประกอบด้วยกระบวนการควบแน่นบนพื้นผิวโครงสร้างจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีในรูปของ  
ก๊าซจากตัวกลางที่เป็นก๊าซ และการระเหยจากนิวไคลด์ที่ควบแน่น สมการความต่อเนื่องของการ  
ควบแน่นจะกลับกับสมการการสะสมของก๊าซใน สถานะที่ 1

$$\left(\frac{dM_{w,I}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Condensed}} = v_{g,I}^k \frac{A_{w,I}}{V_{g,I}} M_{g,I}^k(t) - v_{w,I}^k \frac{A_{w,I}}{V_{l,I} H_i^k} M_{l,I}^k(t) \quad 2.20$$

พจน์ที่ 1 อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k บนพื้นผิวโครงสร้างที่ปริมาตร I	พจน์ที่ 2 อัตราการควบแน่นของก๊าซนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ผิวโครงสร้าง	พจน์ที่ 3 อัตราการระเหยกลับของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ที่ควบแน่น
--	--	---

$\left(\frac{dM_{w,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Condensed}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k บนพื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 4) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{w,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k บนพื้นผิวโครงสร้างที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{g,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในก๊าซ (กรัม)

$v_{g,i}^k(t)$  : ความเร็วสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

$v_{w,i}^k(t)$  : ความเร็วการระเหยของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,i}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{w,i}$  : ปริมาตรของชั้น (boundary layer) ตลอดพื้นผิวโครงสร้าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

## 2.5 รูปแบบของแอโรซอลสะสมที่พื้นผิวโครงสร้าง

อัตราการสะสมมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสีอธิบายโดยการรวมแอโรซอลที่มาจากตัวกลางที่เป็นก๊าซโดยการสะสม

$$\left(\frac{dM_{wp,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}} = \sum_{p=1}^L v_{d,i}^k(r_p) \frac{A_{w,i}}{V_{g,i}} M_{p,i}^k(t) \quad 2.21$$

$\left(\frac{dM_{wp,i}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Deposition}}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p บนพื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 5) ที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{wp,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k สะสมในแอโรซอลส่วนที่ p ที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{p,i}^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในส่วนที่ p ในตัวกลางที่เป็นก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$v_{d,i}^k(t)$  : ความเร็วสะสมของแอโรซอลในส่วนที่ p (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,i}$  : พื้นที่ในการสะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,i}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

## 2.6 รูปแบบที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวโครงสร้าง (สถานะที่ 6)

การดูดซับถูกอธิบายไว้ด้วยอัตราการดูดซับนิโคลด์จาก สถานะที่ 1

$$\left(\frac{dM_{a,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Adsorption}} = v_{s,l}^k \frac{A_{w,l}}{V_{g,l}} M_{g,l}^k(t) \quad 2.22$$

$\left(\frac{dM_{a,l}^k(t)}{dt}\right)_{\text{Adsorption}}$  : อัตราการส่งผ่านนิโคลด์กัมมันตรังสี k บนพื้นผิวโครงสร้างที่ปริมาตร I (กรัม/วินาที)

$M_{a,l}^k(t)$  : มวลของนิโคลด์กัมมันตรังสี k ที่ถูกดูดซับที่ปริมาตร I (กรัม)

$M_{g,l}^k(t)$  : มวลของนิโคลด์กัมมันตรังสี k ในตัวกลางที่เป็นก๊าซที่ปริมาตร I (กรัม)

$v_{s,l}^k(t)$  : ความเร็วการดูดซับของนิโคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

$A_{w,l}$  : พื้นที่พื้นผิวโครงสร้างที่สะสมของปริมาตร I (ตารางเซนติเมตร)

$V_{g,l}$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) ในปริมาตร I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 3. ตัวอย่างสมการแบบจำลองการขนส่งมวลของแอร์โซล

เลข Knudsen (Knudsen number) ถูกใช้เป็นตัววัดปฏิกริยาระหว่างแอร์โซล และก๊าซ

$$K_n = \frac{2\lambda}{r_p} \quad 2.23$$

$K_n$  : เลข Knudsen

$\lambda$  : mean free path ของโมเลกุลก๊าซ (เซนติเมตร)

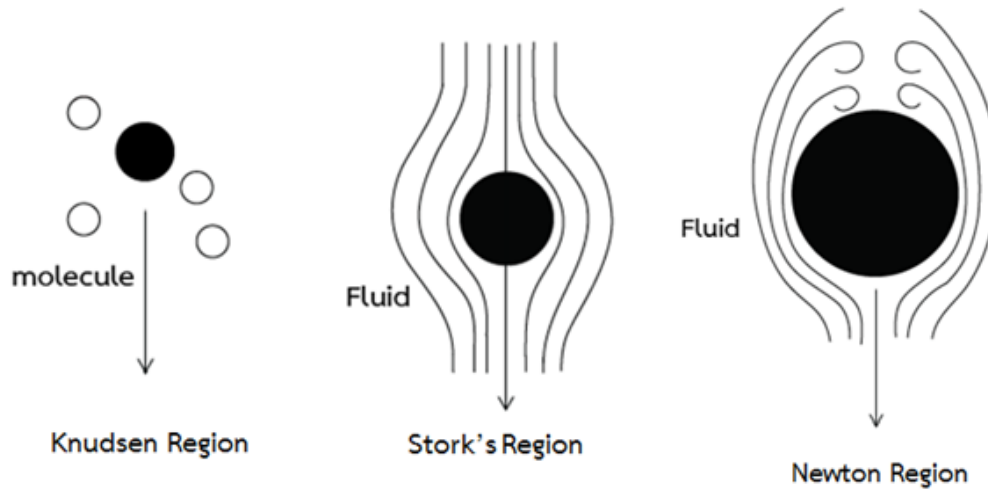
$r_p$  : รัศมีของแอร์โซล (เซนติเมตร)

หากค่า  $K_n \ll 1$  โมเลกุลของก๊าซสามารถพิจารณาเป็นของไหล และพฤติกรรมของแอร์โซลสามารถอธิบายโดยการประมาณมหัพภาคซึ่งอยู่บนพื้นฐานของกลศาสตร์ของไหล (fluid dynamics)

หากค่า  $K_n \gg 1$  พฤติกรรมของแอร์โซลจะถูกจำลองในแบบของพลวัตโมเลกุล (molecular dynamics)

ในสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงเลข Knudsen ควรมีค่ามากกว่า 1 ในระบบหล่อเย็นถึงปฏิกรณ์ และมีค่าน้อยกว่า 1 ในระบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

### 3.1 การตกตามแรงโน้มถ่วง (Gravitational Settling)



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ในช่วง Knudsen, Stork และ Newton ตามลำดับ

- ความเร็วในการตกในช่วง Stork ( $Re < 1$ )

$$v_{dK}(r) = \frac{2r^2 g (\rho_p - \rho_g)}{9\mu_g} Cu(r) \quad 2.24$$

- ความเร็วในการตกในช่วง Newton ( $Re < 1$ )

$$v_{dN}(r) = \frac{\mu_g Re}{2r\rho_g} \quad 2.25$$

$v_{dK}(r)$  : ความเร็วในการตก (settling velocity) ของแอโรซอลรัศมี  $r$  ในช่วง Stork (เซนติเมตร/วินาที)

$v_{dN}(r)$  : ความเร็วในการตก (settling velocity) ของแอโรซอลรัศมี  $r$  ในช่วง Newton (เซนติเมตร/วินาที)

$Cu(r)$  : Cunningham factor

$Re$  : เลข Reynolds

$\rho_p$  : ความหนาแน่นของแอโรซอล (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

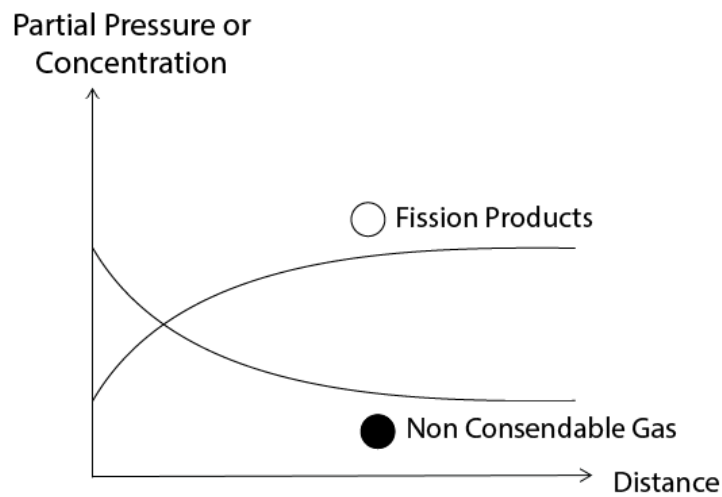
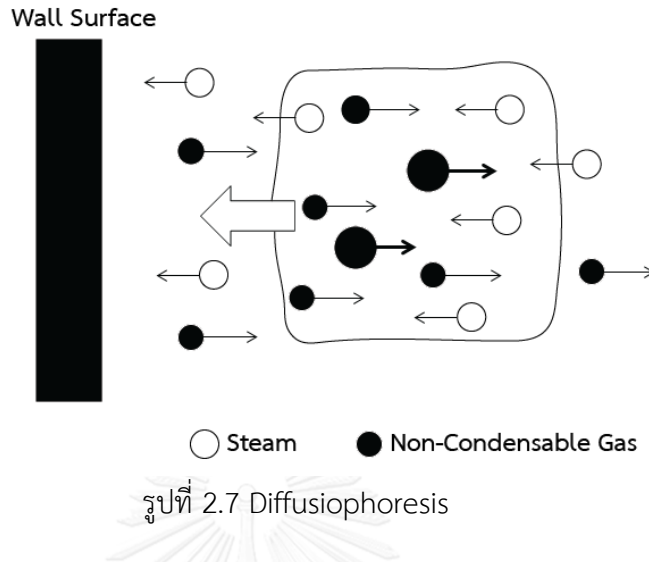
$\rho_g$  : ความหนาแน่นก๊าซผสม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$g$  : ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เซนติเมตร/วินาที<sup>2</sup>)

$T$  : อุณหภูมิของก๊าซ (K)

$\mu_g$  : ความหนืดของก๊าซผสม (พอยส์,  $\text{dyn.s/cm}^2$ )

3.2 Diffusiophoresis



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากพื้นผิวโครงสร้างของผลิตผลฟิชชัน, ก๊าซที่ไม่ควบแน่น และความดันย่อยของเหตุการณ์ Diffusiophoresis

Diffusiophoresis เป็นกลไกสำคัญในสิ่งแวดล้อมเป็นไอ น้ำ แรงขับให้แอโรซอลเคลื่อนที่คือ กระแส diffusive ของโมเลกุลที่อยู่ในก๊าซผสมใน diffusiophoresis ความเร็วในการสะสมแอโรซอลโดย diffusiophoresis ถูกควบคุมโดยการไหลของไอ น้ำที่ควบแน่นและความดันย่อย (partial pressure) ของก๊าซที่ไม่ควบแน่นที่อยู่ใกล้พื้นผิวโครงสร้าง

$$v_d(r) = \frac{\sqrt{m_g}}{Y_s \sqrt{m_s + Y_a \sqrt{m_a}}} U_c \tag{2.26}$$

$v_d(r)$  : ความเร็วในการสะสมโดย diffusiophoresis (เซนติเมตร/วินาที)

$m_g$  : น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำ (กรัม)

$m_s$  : น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซที่ไม่ควบแน่น (กรัม)

$Y_s$  : สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำ

$Y_a$  : สัดส่วนโดยโมลของก๊าซที่ไม่ควบแน่น

$U_c$  : ความเร็วการควบแน่นของไอน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)

### 3.3 Thermophoresis

Thermophoresis เป็นกลไกสำคัญของการสะสมแอโรซอลในสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง รูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 แสดงขอบเขตในการเกิดการสะสมจาก thermophoresis โดยบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะมีระยะห่างระหว่างแอโรซอลกับบริเวณนั้นมากเนื่องจากอนุภาคจะเคลื่อนที่ออกห่างจากบริเวณที่อุณหภูมิสูง ในกรณีของระบบที่มีขนาดใหญ่เช่นโรงงานจริงความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจาก thermophoresis จะถูกจำกัดโดย convective diffusion ดังนั้นในโปรแกรม ART Mod2 ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจาก Thermophoresis จึงถูกคำนวณโดยการรวมกันของ convective diffusion และ Thermophoresis ดังแสดงในสมการ

$$V_d(r) = \frac{v_T(r)v_c(r)}{v_T(r)+v_c(r)} \quad 2.27$$

$v_d(r)$  : ความเร็วในการสะสมแอโรซอลโดย Thermophoresis (เซนติเมตร/วินาที)

$v_d(r)$  : ความเร็วของ Thermophoresis (เซนติเมตร/วินาที)

$v_d(r)$  : ความเร็วของ convective diffusion (เซนติเมตร/วินาที)

โดยเมื่อ  $K_n < 0.2$

$$V_d(r) = \frac{3v_g C(\lambda_g + C_t K_n \lambda_p)}{2T(1 + 3C_m K_n)(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t K_n \lambda_p)} \cdot \nabla T \quad 2.28$$

$$\text{โดย } \nabla T = \frac{T_g - T_{\text{wall}}}{\delta}$$

โดยเมื่อ  $K_n > 0.2$

$$V_d(r) = \frac{3 v_T(r) v_g}{4 \left(1 + \frac{\pi}{8}\right) \alpha_{mT}} \cdot \nabla T \exp\left(\frac{-\tau}{K_n}\right) \quad 2.29$$

$$\text{โดย } \tau = 0.09 + 0.12\alpha_m + 0.28\alpha_m \left( 1 - \frac{\alpha_t \lambda_g}{2\lambda_p} \right)$$

$V_T(r)$  : ความเร็ว Thermophoresis (เซนติเมตร/วินาที)

$v_g$  : ความหนืดไดนามิกของก๊าซ (ตารางเซนติเมตร/วินาที)

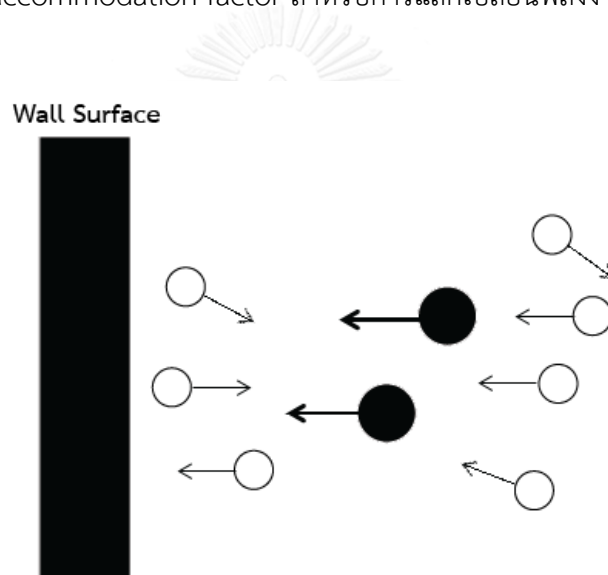
$Cu(r)$  : Cuningham factor

$Kn(r)$  : เลข Knuden

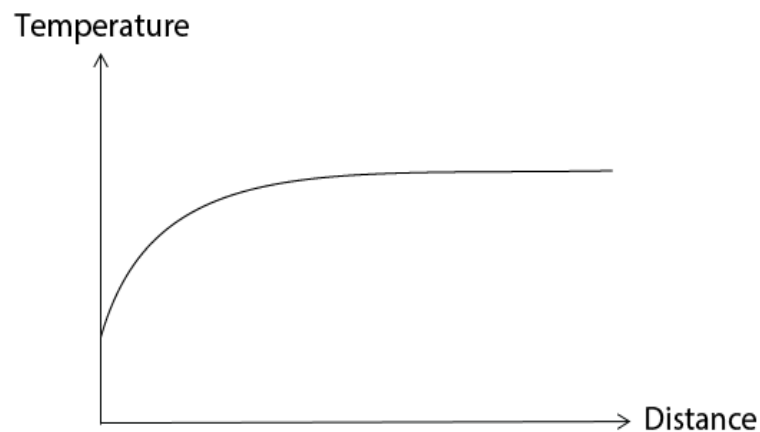
$\lambda_t, \lambda_p$  : ความสามารถในการนำความร้อนของก๊าซผสม และแอร์โซลตามลำดับ (เออร์ก/เคลวิน-เซนติเมตร-วินาที)

$C_t, C_m$  : สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมของระหว่างแอร์โซลและก๊าซ

$\alpha_t, \alpha_m$  : accommodation factor สำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม



รูปที่ 2.9 การสะสมแอร์โซลโดย Thermophoresis



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของพื้นผิวโครงสร้างและอุณหภูมิ

#### 4. ตัวอย่างสมการแบบจำลองการขนส่งมวลของก๊าซนิวไคลด์กัมมันตรังสี

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในรูปแบบไอควบแน่นบนพื้นผิวโครงสร้างในสภาวะที่เกิดอุบัติเหตุชั้นร้ายแรง นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ควบแน่นบางส่วนระเหยเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยความร้อนออกมาและการลดความดันอย่างรวดเร็วโดยพฤติกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมี และสภาวะทาง thermal hydraulic นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิดระเหย เช่น ซีซอน(Xe), คริปทอน (Kr) ง่ายจึ่งรั่วไหลออกจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยไม่มีสารสะสม ในขณะที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิด เช่น ซีเซียมไอโอไดด์(CsI), ซีเซียมไฮดรอกไซด์ (CsOH) จะควบแน่นบนพื้นผิวโครงสร้างในระบบหล่อเย็นถึงปฏิกรณ์ และบนพื้นผิวแอร์ชอล นอกจากนี้ CsI และ CsOH มีความสามารถในการละลายได้สูงในน้ำ

##### 4.1 สมการการควบแน่นที่พื้นผิวอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

ความเร็วในการควบแน่นของก๊าซนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นสัดส่วนของความแตกต่างระหว่างความดันย่อยและความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของพื้นผิวโครงสร้าง ในโปรแกรม ART Mod2 ความดันไอของ ไอโอดีน (I<sub>2</sub>), ซีเซียมไอโอไดด์ (CsI), ซีเซียม (Cs), ซีเซียมไฮดรอกไซด์ (CsOH) และเทลลูเรียม (Te) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในกรณีของระบบที่มีขนาดใหญ่เช่นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การควบแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีถูกจำกัดโดย convective diffusion ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นความเร็วของการควบแน่นจึงคำนวณดังสมการ

$$v_c^k = \frac{v_g^k v_n^k}{v_g^k + v_n^k} \quad 2.30$$

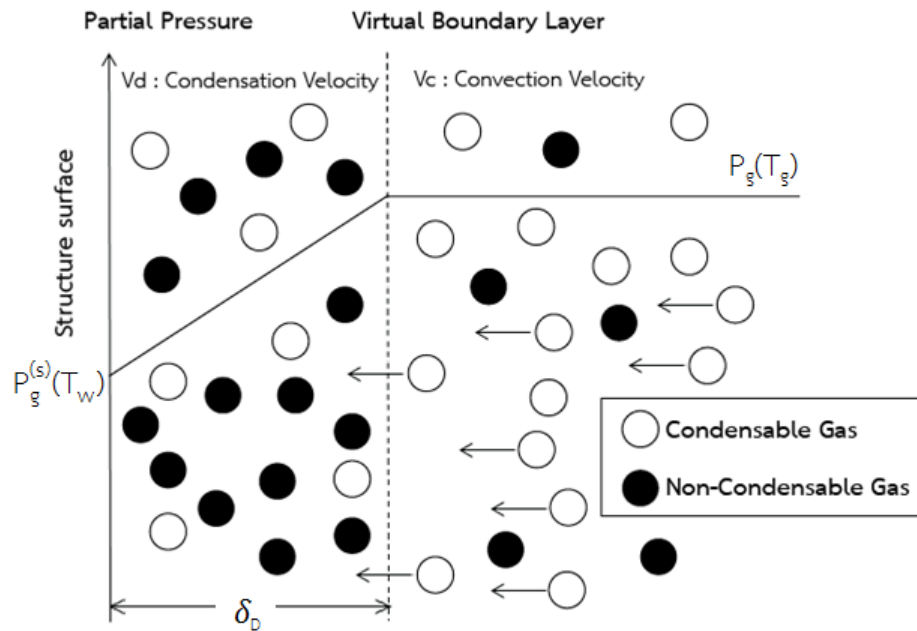
$v_c^k$  : ความเร็วการควบแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

$v_g^k$  : ความเร็วการควบแน่นสำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

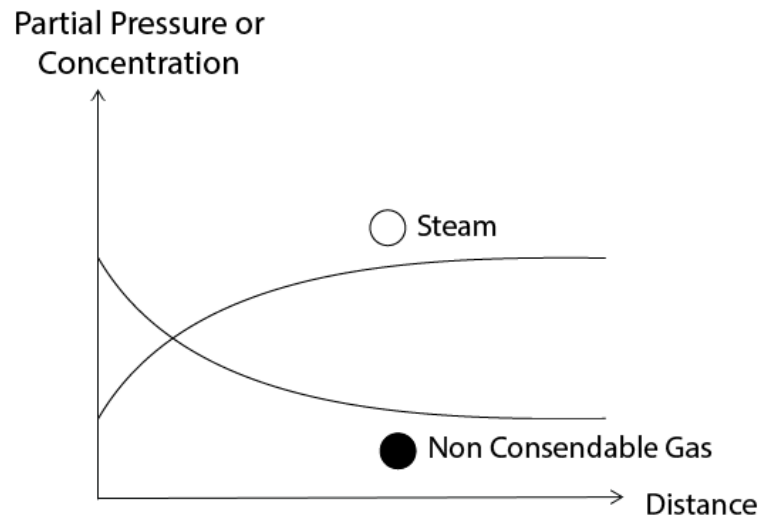
$v_n^k$  : ความเร็วการควบแน่นของ convective diffusion สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี k (เซนติเมตร/วินาที)

รูปที่ 2.12 แสดงการควบแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในรูปแบบไอ และปริมาณของไอน้ำที่ความดันย่อยต่างๆ ตามลำดับ โดยที่ความดันย่อยต่ำจะมีไอน้ำใกล้ผิวพื้นผิวโครงสร้างน้อยเนื่องจากเกิดการควบแน่น



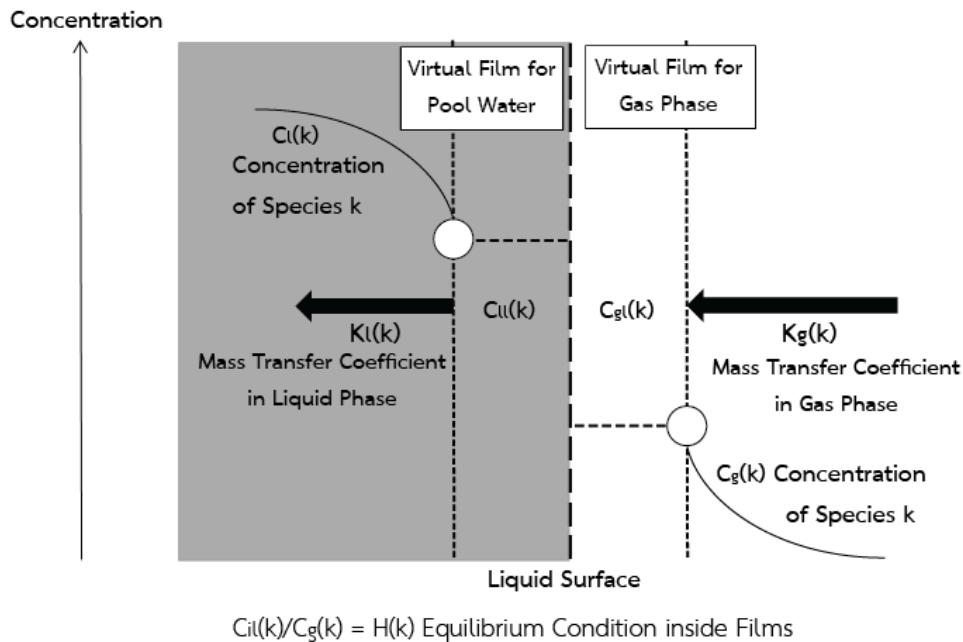


รูปที่ 2.11 แบบจำลองการควบแน่นของไอน้ำและชั้นฟิล์มเสมือน



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากพื้นผิวโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ชิ้น, ก๊าซที่ไม่ควบแน่น และความดันย่อย ของการควบแน่น

## 4.2 การเคลื่อนย้ายระหว่างก๊าซและของเหลว



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนย้ายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีระหว่างของเหลวและก๊าซ

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถละลายน้ำได้ดี เช่น CsI, CsOH สามารถถูกเคลื่อนย้ายโดยการไหลของของเหลวระหว่างระบบหล่อเย็นถึงปฏิกรณ์และระบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เช่นเดียวกันกับการเคลื่อนย้ายระหว่างก๊าซไปยังของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.13 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ละลายได้มีสถานะสมดุลระหว่างก๊าซและของเหลวโดยในเวลาไม่จำกัดสำหรับระบบปิด นิวไคลด์กัมมันตรังสีในแต่ละสถานะจะเข้าถึงสมดุลมวลซึ่งเวลาการเข้าสู่สถานะสมดุลถูกจำกัดโดยความเร็วการแพร่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีระหว่างสถานะก๊าซ และของเหลว ในโปรแกรม ART Mod2 ความเร็วในการเคลื่อนย้ายมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสีระหว่างก๊าซ และของเหลวสามารถอธิบายได้จาก convective diffusion ดังสมการ

$$\frac{dM_g^k(t)}{dt} = -K_{l,gV_g} \frac{A_s}{V_g} M_g^k(t) + K_{g,lV_H^k} \frac{A_s}{V_H^k} M_l^k(t) \quad 2.31$$

$$\frac{dM_l^k(t)}{dt} = K_{l,gV_g} \frac{A_s}{V_g} M_g^k(t) - K_{g,lV_H^k} \frac{A_s}{V_H^k} M_l^k(t) \quad 2.32$$

$\frac{dM_g^k(t)}{dt}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะก๊าซ (กรัม/วินาที)

$\frac{dM_l^k(t)}{dt}$  : อัตราการส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี k ในสถานะของเหลว (กรัม/วินาที)

$k_{l,g}$ ,  $k_{g,l}$  : สัมประสิทธิ์การส่งผ่านนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ระหว่างก๊าซและของเหลว (เซนติเมตร/วินาที) โดย  $k_{l,g} = k_{g,l}$

$M_g^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในสถานะก๊าซ (กรัม)

$M_l^k(t)$  : มวลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$  ในของเหลว (กรัม)

$V_g$  : ปริมาตรของก๊าซ (gas phase) (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_l$  : ปริมาตรของของเหลว (liquid phase) (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$H_k$  : สัมประสิทธิ์ partition (partition coefficient) ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี  $k$

$A_s$  : พื้นที่ผิว (ตารางเซนติเมตร)



## 2.2 บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants [12]

เป็นรายงานสรุปการประเมินความเสี่ยงจากอุบัติเหตุระดับรุนแรงของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จำนวน 5 โรงไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยความเสี่ยงเหล่านี้จะถูกวัดหลายวิธีซึ่งประกอบด้วย

- การประเมินความถี่ของอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยอุบัติเหตุที่เริ่มเกิดจากภายใน และเริ่มเกิดภายนอก (อุบัติเหตุที่เริ่มจากภายใน เช่น อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าล้มเหลวหรือความผิดพลาดของผู้ดำเนินการ จำนวน 2 โรงไฟฟ้า และอุบัติเหตุที่เริ่มเกิดจากภายนอกเช่น แผ่นดินไหว และไฟไหม้ จำนวน 3 โรงไฟฟ้า)
- ประสิทธิภาพของโครงสร้างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้การรับแรงจากอุบัติเหตุร้ายแรง
- ความเป็นไปได้ของปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปลดปล่อย และผลกระทบภายนอกเมื่อเกิดอุบัติเหตุดังกล่าว
- ความเสี่ยงทั้งหมด (ผลิตผลจากความถี่ของอุบัติเหตุและผลที่ตามมา)

โดยการประเมินความเสี่ยงนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานคือการประเมินความเสี่ยงพิจารณาเหตุการณ์เริ่มต้นเมื่อเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ดำเนินการเต็มกำลังการผลิตตามปกติการประเมินความเสี่ยงจะแสดงโดยใช้วิธี PRA (Probabilistic Risk Assessment) โดยในรายงานฉบับนี้ได้เพิ่มการประเมินด้วยเทคนิคขั้นสูงเพิ่มขึ้นด้วยโดยเฉพาะ

- การประเมินขนาดความไม่แน่นอนในความถี่ของการเสียหายของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และความเสี่ยงอันเนื่องมาจากความเข้าใจที่ไม่สมบูรณ์ของระบบตอบสนอง, ความก้าวหน้าของอุบัติเหตุระดับรุนแรง, การตอบสนองของโครงสร้างตึกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และการเคลื่อนย้ายของสารกัมมันตรังสีในโรงไฟฟ้า
- แบบสอบถาม และเอกสาร ที่เป็นทางการของการตัดสินใจโดยผู้เชี่ยวชาญ
- รายละเอียดเพิ่มเติมของนิยามของสถานะความเสียหายของโรงไฟฟ้า, การปรับปรุงประสิทธิภาพของช่วงต่อระหว่างความถี่การเกิดอุบัติเหตุ และการวิเคราะห์ความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ
- ชนิดของเหตุการณ์ และผลที่เกิดถูกพิจารณาอย่างชัดเจนในความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ และการวิเคราะห์การรับแรงของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- วิเคราะห์การปลดปล่อยสารกัมมันตรังสี และการรวมกันของการทดลองกับการคำนวณผลในการวิเคราะห์นี้

- การใช้วิธีที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสำหรับการประมาณความถี่ของอุบัติเหตุความเสียหายของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เริ่มเกิดมาจากเหตุการณ์ภายนอก เช่น แผ่นดินไหว
- การเผยแพร่โมเดลคอมพิวเตอร์ในการการวิเคราะห์โมเดลใหม่ และการรวมข้อมูลความเสี่ยง โดยในรายงานนี้แบ่งการประเมินเป็น 5 ส่วน
  1. ความถี่ของอุบัติเหตุ
  2. ความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ
  3. การรับแรงของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และการตอบสนองของโครงสร้าง
  4. ผลที่ตามมาต่อภายนอกโรงไฟฟ้า
  5. การรวมกันของการวิเคราะห์ความเสี่ยงทั้งสี่ข้อที่ได้กล่าวมา

## 2. Specific Features of Cesium Chemistry and Physics Affecting Reactor Accident Source Predictions [9]

- หลังอุบัติเหตุ Three-Mile Island ยูนิทที่ 2 (TMI-2) หัวข้อสำคัญในการวิจัยความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์คือการวิเคราะห์พฤติกรรมของไอโอดีนระหว่างเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง อย่างไรก็ตามในปี 1991 มีการเพิ่มเติมว่าควรศึกษาผลผลิตฟิชชันอื่น เช่น ซีเซียม และเทลลูเรียม
- พฤติกรรมของซีเซียมมีความซับซ้อนน้อยกว่าไอโอดีนแต่เมื่อจะมีสำคัญเทียบเท่ากันเมื่อมีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบของสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนในพื้นดินระยะยาว

## 3. Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants [2]

เป็นรายงานที่เพิ่มความเสมือนจริงในการประมาณ source term ที่ปลดปล่อยออกจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในเทอมของเวลา, ชนิด, ปริมาณ และรูปแบบทางเคมีของนิวไคลด์ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมเหลวระดับรุนแรง โดยการแก้ไขนี้สามารถใช้ได้กับการออกแบบในอนาคตของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา (LWR)

## 4. Experiment analyses of iodine behavior under severe accident conditions with ART

เป็นการจำลองพฤติกรรมของ CsI ในท่อ โดยมีตัวกลางในการพาที่ต่างกันคือไนโตรเจน และไอน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม ART Mod2 ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ART Mod2 มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของ CsI ที่มีตัวกลางเป็นไอน้ำที่ได้จากการทดลอง [13]

## 5. CONFIRMATORY MELCOR ANALYSIS OF SEVERE ACCIDENTS FOR ESBWR [14]

1. เป็นรายงานที่จัดทำขึ้นเพื่อสนับสนุนการทบทวนการรับรองการออกแบบของความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงโดย NRC

2. ใช้โปรแกรม MELCOR ในการทำแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

- Nodalization โดยแบ่งส่วนประกอบต่างๆออกเป็นส่วนๆ เช่น แกนปฏิกรณ์ ปริมาตร ควบคุม อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะมี GDSC, PCCS และ IC เป็นต้น
- ลักษณะของแบบจำลองอื่นๆ (other modeling aspects) เช่น ระบบสเปรย์ และ ระบบปล่อยออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ระบบเติมน้ำในบ่อ PCC/IC เป็นต้น
- สถานะ (Status)

#### 6. ESBWR CERTIFICATION PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT [5]

เอกสารนี้กล่าวถึงความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการจัดการอุบัติเหตุระดับรุนแรงในเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR คือ การรักษาเสถียรภาพความก้าวหน้าการหลอมละลายภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และความสามารถในการหล่อเย็นของผลของเศษซากการหลอมเหลว (debris) ในลักษณะที่สะดวก ต่อการกู้คืน (recovery) หลังเกิดอุบัติเหตุ โดยความเกี่ยวข้องนี้ถูกระบุโดยการประดิษฐ์ ออกแบบและการรวมกันของอุปกรณ์ Basemat-Internal Melt Arrest และ Coolability ซึ่งในหัวข้อ 21.5 ของเอกสารได้แสดงการทำงาน และสิ่งที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์นี้

นอกจากนี้เอกสารนี้ยังมีการจำแนกประเภทการรั่วไหลของ source term ของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์แบบ ESBWR ในบทที่ 8 รวมทั้งมีการประเมิน source term ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MAAP (MAAP Computer Code) บทที่ 9 มีการจำลองการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ขึ้นกับเวลา โดยในแต่ละประเภทของการปลดปล่อยแสดงด้วยลำดับเหตุการณ์อุบัติเหตุระดับรุนแรง 1 หรือ 2 เหตุการณ์ซึ่งถูกเลือกและจำลองเพื่อแสดงกลุ่มของความน่าจะเป็นของเหตุการณ์อุบัติเหตุระดับรุนแรง

#### 7. MELCOR DBA Containment Audit Calculations for the ESBWR Plant (Final) [15]

MELCOR code (1.8.6YN) ถูกนำมาใช้วิเคราะห์อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ของอุบัติเหตุพื้นฐาน (Design basis accident, DBA) ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ GE Hitachi ESBWR โดยในรายงานนี้จะคำนวณเหตุการณ์จำลองการแตกของท่อไอน้ำหลัก (MSLB) ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบซีดจำกัดความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งการคำนวณนี้อยู่บนพื้นฐานของชุดเงื่อนไขเริ่มต้น และแบบจำลองข้อมูลที่สอดคล้องกับข้อมูลของ Design Control Document (DCD) Rev.6 และการคำนวณนี้จะถูกเปรียบเทียบกับ TRACG code ซึ่งเป็นผลที่ปรากฏใน DCD โดยแบบจำลอง ESBWR แบ่งออกเป็น 5 กลุ่มจากตำแหน่งขององค์ประกอบ และการเชื่อมต่อกัน คือ

1. ถังปฏิกรณ์ และ isolation condensers (IC)

2. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Drywell, Wetwell และ passive cooling condensers)
3. External pools (IC/ PCCS, expansion และ ถังเก็บกัก)
4. ส่วนประกอบที่เชื่อมต่ออยู่ (พัดลมปล่อยออก และปั๊มของถัง PCCS)
5. บริเวณสิ่งแวดล้อม

#### 8. Research on Severe Accidents in Nuclear Power Plants [16]

อธิบายความหมายของอุบัติเหตุระดับรุนแรง, สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ, ความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ, ผลของการเติมน้ำเข้าไปในแกนปฏิกรณ์ที่เสียหายซึ่งอาจชะลอหรือหยุดความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ ในทางตรงข้ามอาจทำให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์อื่น ๆ  
อุบัติเหตุระดับรุนแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบ่งออกเป็น

1. กรณีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบัน เช่น การหลอมละลายของ corium และการสะสมของเศษซากในส่วนล่างของแกนปฏิกรณ์อาจส่งให้ถึงปฏิกรณ์แตก, กรณีการแตกของถังปฏิกรณ์ที่สภาวะความดันสูงส่งผลซึ่งอาจนำไปสู่ direct containment heating (DCH), steam explosion ซึ่งส่งผลต่ออาคารเครื่องปฏิกรณ์, การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง corium และคอนกรีต (MCCI) และการปลดปล่อยก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ เช่น ไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์
2. กรณีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบัน (ในเอกสารนี้หมายถึง โรงไฟฟ้า GenIII) ซึ่งมีการทำข้อกำหนดในการเพิ่มการป้องกัน และการระบุอุบัติเหตุระดับรุนแรงจากในช่วงการออกแบบ โดยสำหรับเครื่องปฏิกรณ์อัดแรงดันของยุโรป (European Pressurized Reactor) ได้ถูกระบุได้ดังนี้
  - อุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมเหลวโดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่มีแรงดันซึ่งคาดว่าจะมีการปลดปล่อยในช่วงต้นต้องถูกกำจัดออกในทางปฏิบัติในขณะที่อุบัติเหตุดังกล่าวยังคงมีความเป็นไปได้ในทางกายภาพ มาตรการการออกแบบต้องถูกดำเนินการเพื่อป้องกัน
  - ลำดับการหลอมละลายของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต้องดำเนินการในลักษณะที่มีการปลดปล่อยมากที่สุดที่เป็นไปได้ต้องใช้มาตรการในระยะยาว และขอบเขตที่จำกัดเพื่อป้องกันประชาชนดังนั้นระบบที่ถูกนำมาใช้ในการเก็บกัก corium และรักษาเสถียรภาพในระยะยาวคือ core-catcher ซึ่งถูกสร้างในตึกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งติดกับหลุมเครื่องปฏิกรณ์
  - ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ GENIII แบบอื่นการหยุดหรือจำกัดผลของ corium จะทำโดยการออกแบบเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ในเอกสารนี้ยังกล่าวถึงการวิจัยและพัฒนาในอุบัติเหตุระดับรุนแรง, การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเชิงตัวเลขสำหรับอุบัติเหตุระดับรุนแรง และตัวอย่างประเด็นการวิจัยและพัฒนาเรื่องการเติมน้ำเข้าสู่ debris bed

#### 9. Source term evaluation to two loop PWR under hypothetical severe accidents [17]

เป็นการประเมิน source term ที่เกิดการรั่วไหลเมื่อเกิดอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบต่างๆ เช่น ไฟฟ้าดับ (station blackout : SBO) และการสูญเสียหล่อเย็นจากอุบัติเหตุ (loss of coolant accident : LOCA) เป็นต้น ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Three-Mile Island ยูนิตที่ 2 (TMI-2) เป็นโรงไฟฟ้าอ้างอิง

#### 10. Nuclear Safety in Light Water Reactors [18]

เทคนิคการจัดการอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่กล่าวในเอกสารนี้สามารถลดความรุนแรงจากผลของอุบัติเหตุระดับรุนแรง อย่างไรก็ตามบางเทคนิคยังคงมีความไม่แน่นอน หรือโอกาสสำเร็จต้องขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเริ่มดำเนินการ โดยบางครั้งอาจเกิดผลเสียหากดำเนินการไม่เหมาะสม

เทคนิคที่ใช้ในการจัดการอุบัติเหตุระดับรุนแรง เช่น

- การฉีดน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์/ระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์

ในเอกสารนี้จะมุ่งเน้นถึงการฉีดน้ำเข้าไปหลังแกนปฏิกรณ์เกิดความเสียหายแล้ว ซึ่งการฉีดน้ำเข้าไปเป็นการช่วยนำความร้อนออกหรืออาจจำกัดความเสียหายของแกนปฏิกรณ์ และมีผลดีในเรื่องของการดักจับผลิตผลฟิชชันที่ระเหย อย่างไรก็ตามการฉีดน้ำก็อาจส่งผลเสีย เช่น สร้างความเสียหายให้แก่แกนปฏิกรณ์ หรือน้ำที่ฉีดเข้าไปอาจกลายเป็นไอไปทำปฏิกิริยากับโลหะ

- การลดความดันเครื่องปฏิกรณ์/ระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีเทคนิคหลัก 2 เทคนิค คือ การลดความดันของระบบ secondary และ การลดความดันของระบบ primary
- การสเปรย์เข้าไปสู่ถังปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR

การสเปรย์จะลดความดัน และดักจับผลิตผลฟิชชันแต่การสเปรย์สามารถนำไปสู่การผลิตไฮโดรเจนได้

- การเริ่มทำงานใหม่ของปั๊มสารหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR

เป็นตัวเลือกเสริมที่เป็นการกวาดน้ำผ่านแกนปฏิกรณ์ซึ่งเป็นการลดความร้อนทำให้สามารถยืดเวลาในระดับชั่วโมงไม่ให้เกิดความเสียหายได้ ในกรณีที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ไม่เก็บกัก การเริ่มของปั๊มจะทำให้การปลดปล่อยผลิตผลฟิชชันเพิ่มขึ้นผ่านทางช่องเปิด และยังทำให้เกิดการผลิตไฮโดรเจน

- ลดความดันของเครื่องผลิตไอน้ำ จะทำให้ความดันของระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ลดลง



- ฉีดน้ำเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำของเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR  
การฉีดน้ำเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำเป็นประโยชน์ในเกือบทุกสภาวะของโรงไฟฟ้า การฉีดน้ำเข้าไปจะเป็นเส้นทางในการระบายความร้อนของระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับลดความดันของระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ และสำหรับดักจับผลิตผลฟิชชันที่ระเหยได้ในกรณีเกิดการแตกของท่อเครื่องผลิตไอน้ำ แต่การเติมน้ำในเครื่องผลิตไอน้ำที่ว่างเปล่าอาจส่งผลให้เกิด thermal shock ของ tube sheet และท่อ

- การสเปรย์เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์  
น้ำที่ใส่สเปรย์มักมีสารปรับแต่งค่า pH เพื่อควบคุมผลิตผลฟิชชัน แต่การเติมสารเหล่านี้ อาจสร้างความเสียหายต่อส่วนประกอบต่างๆ โดยเฉพาะการดำเนินการที่ไม่ได้ตั้งใจระหว่างการดำเนินการโรงไฟฟ้า

การสเปรย์เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถเกิดผลได้หลายอย่าง คือ

- ลดอุณหภูมิ และความดันของสภาพบรรยากาศของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- ช่วยล้างผลิตผลฟิชชันออก
- น้ำอาจสะสมในบริเวณที่อาจทำความเย็นให้ถังปฏิกรณ์จากภายนอก หรือทำความเย็นให้เศษซากที่หลอมเหลว (debris)
- อาจทำให้สภาพบรรยากาศของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ไม่เฉื่อย
- อาจส่งเสริมให้เกิดการสร้างไฮโดรเจน
- การฉีดน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

น้ำสามารถเติมเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้ 3 ช่วงเวลา คือ 1. ก่อน corium ออกไปภายนอกถึง 2. หลัง corium ถูกปลดปล่อยออกจากถังและเกิดเป็นบ่อของวัสดุที่หลอมเหลว 3. หลังบ่อของ corium ที่หลอมเหลวแข็งตัว โดยในช่วงเวลาแรกมีความเสี่ยงสำหรับความดันสูงอย่างรวดเร็วในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และอาจมีแนวโน้มเกิดการระเบิดของไอน้ำ

การเติมน้ำให้เพียงพอก่อนถังปฏิกรณ์หลอมเหลวสามารถป้องกันความล้มเหลวของถังปฏิกรณ์ได้แต่หากไม่สามารถป้องกันการหลอมเหลวได้ การฉีดน้ำเข้าไปจะช่วยชะลอการเดือดของสิ่งที่สะสมในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งอาจเพียงพอต่อการเรียกคืน (recovery) ระบบต่างๆ ก่อนเครื่องปฏิกรณ์ล้มเหลว ในกรณีที่ไม่ใช่ core catcher แต่มีพื้นที่ช่องว่างเพียงพอการหล่อเย็นด้วยชั้นน้ำจากด้านบนจะหยุดปฏิกิริยาของ corium ที่ทำกับคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตว่าการฉีดน้ำจากภายนอกเข้าไปจะเพิ่มความ

ต้นของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ดังนั้นหากเกิด bypass หรือการรั่ว การฉีดย้ำน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ควรทำให้น้อยที่สุด

- การดำเนินการพัดลมทำความเย็น

ถ้าในสภาพบรรยากาศของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีความเข้มข้นไอน้ำสูงพัดลมทำความเย็นสามารถนำความร้อนออกด้วยเปอร์เซ็นต์เล็กน้อยเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตปกติของเครื่องปฏิกรณ์

- การดำเนินการ Recombiner

ในเอกสารนี้จะพิจารณาเฉพาะ passive autocatalytic recombiner (PARs) ซึ่งโดยปกติ PAR จะเป็นกล่องโลหะที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ซึ่งมีปลายเปิดตอนต้น และตอนท้ายทำให้ก๊าซสามารถไหลผ่านมันได้ง่าย PARs จะเริ่มทำงานอัตโนมัติโดยการรวมไฮโดรเจนกับออกซิเจน

- การดำเนินการเผาไหม้ เป็นหลักการที่ง่ายที่สุดในการลดความรุนแรงของไฮโดรเจนคือการทำให้ไฮโดรเจนเผาไหม้ซึ่งเป็นการระเบิดอย่างเบา
- การทำอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ให้เฉื่อยด้วยสารที่ไม่ควบแน่น

อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กโดยเฉพาะ GEH BWR Mark I และ Mark II ถูกทำให้เฉื่อยด้วยก๊าซไนโตรเจนซึ่งป้องกันการเผาไหม้

- การปล่อยออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

กรณีที่มีความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดขึ้นของไอน้ำ และก๊าซ หรือเกิดจาก corium ปล่อยความร้อนออกสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ควรมีการปล่อยออกผ่านช่องทางปล่อยออกซึ่งสามารถลดการปลดปล่อยผลิตผลพิษขึ้น นอกจากนี้การปล่อยออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ยังสามารถทำให้ระบบฉีดย้ำน้ำเข้าไปด้วยความดันต่ำได้ และถ้ามี bypass หรือการรั่วไหลการปล่อยออกจะลดการปลดปล่อยของผลิตผลพิษขึ้นระหว่างทางที่ไม่สามารถควบคุม และยังลดปริมาณไฮโดรเจนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้

- สเปรย์อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2

หากระบบสเปรย์ที่ 2 ทำงานได้จะสามารถล้างผลิตผลพิษขึ้นออกได้แต่การสเปรย์อาจส่งผลเสียต่อระบบลดความรุนแรงของอุบัติเหตุได้ เช่น ECCS หรืออาจใช้ในการกู้คืนระยะยาวจากอุบัติเหตุ

- การเติมน้ำอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2

โดยปกติการป้อนน้ำให้ท่วมคือการปกคลุมรอยรั่วด้วยน้ำเพื่อที่จะดักจับผลิตผลพิษขึ้นที่หลุดรอดออกมา โดยเทคนิคนี้ใช้ได้เฉพาะ low-elevation leaks/bypasses

- การทำความเย็นเครื่องปฏิกรณ์จากภายนอก
- การทำให้อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เฉื่อยด้วยไอน้ำ

อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถถูกทำให้เฉื่อยด้วยไอน้ำที่หลุดลอดมาจากระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อต้องการสภาวะเฉื่อยแต่ไม่สามารถฉีดก๊าซที่ไม่ควบแน่นเข้าไปได้สามารถใช้หม้อต้มน้ำชั่วคราวในการฉีดไอน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

#### 11. Source term evaluation of two loop PWR under hypothetical severe accidents [17]

ทำการศึกษามาตรการรับมือ source term ต่อสภาวะต่างๆของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR 2-loop กำลังการผลิต 2720 MWth โดยพิจารณาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ TMI-2 เป็นตัวอ้างอิง อุบัติเหตุตัวอย่างซึ่งมีความน่าจะเป็นในการเกิดสูงนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ได้แก่ SBO, LOCA และ SBLOCA ถูกคัดเลือกมาศึกษา และมีการคำนวณหาการสะสมในแกนปฏิกรณ์ภายใต้ข้อจำกัดของการออกแบบแกนปฏิกรณ์ด้วยการพัฒนาโปรแกรม MATLAB ที่ใช้วิธี Runge-Kutta และ Simpson Rule เป็นเครื่องมือสำหรับการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการสร้างแบบจำลอง และการจำลองการปลดปล่อยกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในแกนปฏิกรณ์หลังจากมีการดำเนินการเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 1100 วันโดยตั้งสมมติฐานให้มีการปลดปล่อยกัมมันตภาพรังสีเข้าสู่อาคารเครื่องปฏิกรณ์แบบ in-vessel และเกิดโดยทันที โดยจะศึกษาอัตราการปลดปล่อย Noble gas และแอโรซอลในสภาวะที่ปกติ, สภาวะที่เกิดอุบัติเหตุ และ isolation state ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

#### 12. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis [19]

การศึกษาของเอกสารนี้จะมุ่งเน้นเรื่องการจัดการประเมินความก้าวหน้าของอุบัติเหตุ, source term และผลกระทบต่อภายนอกที่สมจริงของสถานีไฟฟ้านิวเคลียร์ Peach Bottom โดยการใช้วิธีฝึกหัดเตรียมความพร้อมฉุกเฉินมากที่สุดในปัจจุบัน, ความสามารถของโรงไฟฟ้า และแบบจำลองที่ดีที่สุดที่สามารถใช้ได้ โดยการวิเคราะห์นี้มีรายละเอียดที่มากขึ้น มีการบูรณาการและมีความสมจริงมากกว่าการวิเคราะห์ในอดีต นอกจากนี้ยังพิจารณามาตรการลดความรุนแรงทั้งหมดซึ่งนำไปสู่ความสมจริงมากขึ้น

รายงานนี้มีส่วนที่อธิบายผลของกระบวนการประเมินมาตรการลดความความรุนแรง และอธิบายถึงลักษณะสำคัญของแบบจำลอง MELCOR และผลการคำนวณของสถานีไฟฟ้านิวเคลียร์ Peach Bottom นอกจากนี้ยังมีส่วนที่อธิบายแนวทางการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินซึ่งแสดงในการคำนวณผลที่ตามมาภายนอกของแต่ละอุบัติเหตุจากการจำลองด้วยโปรแกรม MACCS2 code รวมถึง

เปรียบเทียบผลที่ตามมาภายนอกกับผล State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis (SOARCA) ซึ่งได้ศึกษาลำดับอุบัติเหตุที่มีความถี่โดยประมาณมากกว่า  $10^{-6}$  ต่อเครื่องปฏิกรณ์-ปี ของการดำเนินการเครื่องปฏิกรณ์ และพิจารณาความถี่ที่น้อยกว่า  $10^{-7}$  ต่อเครื่องปฏิกรณ์-ปีหากเป็นกระบวนการที่มีแนวโน้มที่มีการผลิตนิวไคลด์รังสีก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับช่องทางขนส่งรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์สู่สิ่งแวดล้อมที่ได้ศึกษาไปก่อนหน้านี้

### 13. Analysis on containment depressurization under severe accidents for a Chinese 1000 MWe NPP [20]

ลำดับเหตุการณ์อุบัติเหตุ 2 เหตุการณ์ซึ่งใช้ในการประเมินประสิทธิภาพกลยุทธ์การปล่อยออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จีนขนาด 1000 MWe คือ อุบัติเหตุการสูญเสียน้ำหล่อเย็นด้วยการแตกขนาดใหญ่ (LB-LOCA) และ ไฟฟ้าดับ (SBO) ซึ่งการประเมินประกอบด้วย การประเมินพฤติกรรมความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ integral safety analyses code

ประสิทธิภาพของการลดความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นชนิดที่มีระบบกรองอากาศออก (containment filtered venting system, CFVS) ที่มีเวนทริสครบเบอร์ และตัวกรองที่เป็นเส้นใยโลหะ ถูกวิเคราะห์โดยการใช้ integral severe accident analysis code กรณีมีและไม่มี การกรองที่แตกต่างกัน คือ เปิด/ปิด ความดันของ isolation valve จะถูกตรวจสอบ โดยผลการทดลองเมื่อสเปรย์ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถเริ่มต้นได้พบว่าการใช้กลยุทธ์ควบคุมการปล่อยออกของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ทำให้อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถลดความดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอัตราส่วนการปลดปล่อยซีซีเอ็มไอโอไอด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการกรองลดลง และถ้า CFVS ปิดที่ความดันที่สูงกว่าช่วงของการดำเนินการจะน้อยลงและกัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยลดลง ถ้าความดันเปิดของ CFVS เพิ่มขึ้นกัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศจะเข้าและลดลง การพิจารณาความเสี่ยงของการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ที่ความดันสูง การลดความดันระบบหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำให้ CFVS เริ่มได้ใน 7 ชั่วโมงก่อนกรณีพื้นฐานเพื่อลดความดันของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อน้ำหล่อเย็นไหลผ่านเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาของบทนี้อธิบายถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โปรแกรมข้อมูลเข้าและการใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2 การจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งอธิบายโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษา และรวบรวมเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์, การรั่วไหล และปริมาณที่สะสมของสารกัมมันตรังสี, เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR และโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ
2. จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
3. จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอไดด์ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ
4. เปรียบเทียบผลการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในข้อ 3 และ 4
5. สรุปผลการวิจัย

##### 3.1.1 ข้อมูลขาเข้า (Input), ข้อมูลออก (Output) และการใช้งานโปรแกรม ART Mod2

###### 3.1.1.1 Input data

- ข้อมูลทั่วไปของ input

ข้อมูล input ประกอบด้วยสองประเภท ประเภทที่หนึ่งคือ Title card ซึ่งต้องใส่เป็น input ในตอนเริ่มต้นของข้อมูล input ทั้งหมด ถ้าไม่มีการใส่ title card โปรแกรม ART Mod2 จะไม่สามารถดำเนินการได้

ประเภทที่สองมีสองส่วนซึ่งมีรูปแบบเป็น Namelist คือ NDPTIM และ DPTIM

- NDPTIM เป็นข้อมูลที่ไม่ขึ้นกับเวลาประกอบด้วย control data ของการคำนวณ และ geometrical data ของ control volumes

- DPTIM เป็นข้อมูลที่ขึ้นกับเวลา เช่น อัตราการไหลของของไหล, อุณหภูมิของก๊าซในแต่ละปริมาตร

รายละเอียดคำสั่งของ Title card และ NDPTIM อยู่ที่หน้า 134 ของคู่มือการใช้งานโปรแกรม [10] และของ DPTIM อยู่ที่หน้า 143

### 3.1.1.2 Output

องค์ประกอบของข้อมูล output ถูกควบคุมด้วย input data ของ NDPTIM โดย output data ของโปรแกรม ART Mod2 มี 3 ชนิด

1. output ของ input data

2. output ของ major results

ประกอบด้วย

- title of the calculation

- cycle no. of the iteration

- name of the radionuclide และ problem time

- number of the volume

- type of volume

G : gas volume L : liquid volume G-L : volume ที่มีทั้ง gas และ liquid

- mass of radionuclide in each state

- generation rate of radionuclide in each volume

- cumulative mass of radionuclide generated in each volume

3. output ของ detail results เป็น output ที่ถูกควบคุมโดย LOPTH input data

### 3.1.1.3 การใช้งานโปรแกรม ART Mod2

ในงานวิจัยนี้ได้ compile ไฟล์ input ด้วยคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Window 7 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม ART Mod2 ลงที่ไดรฟ์ C

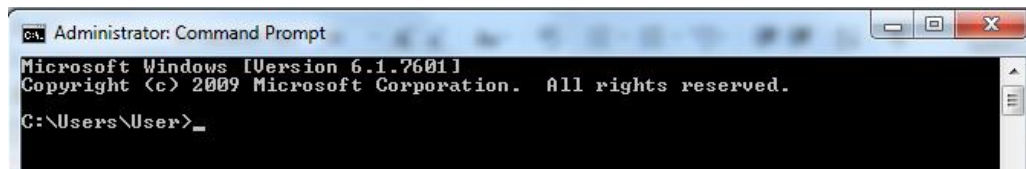
2. สร้าง input file โดยบันทึกเป็นสกุล .dat และบันทึก input file ไว้ที่ source folder ของโปรแกรม ART Mod2

3. Compile file ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยโปรแกรม Command Prompt ซึ่งมีอยู่ใน Windows ทั่วๆไป โดย

3.1 compile ในแฟ้มชื่อ source โดยใช้คำสั่ง `nmake -f Makefile_NT compile file` จะได้ executing file ชื่อ `artmod.exe`

3.2 execute ด้วยคำสั่ง `artmod.exe <inputfilename.dat>outputfilename.out` โดยให้ใส่ชื่อ input file แทนที่ `inputfilename` และใส่ชื่อ output file ที่ต้องการแทนที่ `outputfilename`

3.3 output file ที่ได้จะปรากฏอยู่ในแฟ้มชื่อ `source`

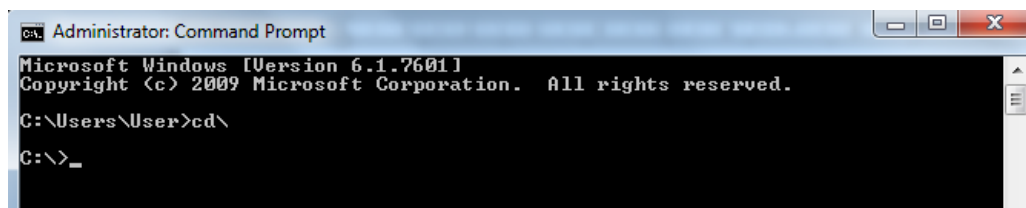


```

Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\User>_

```

(a)

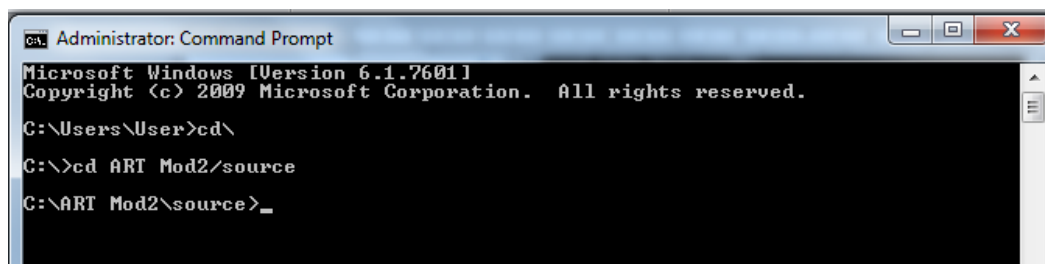


```

Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\User>cd\
C:\>_

```

(b)

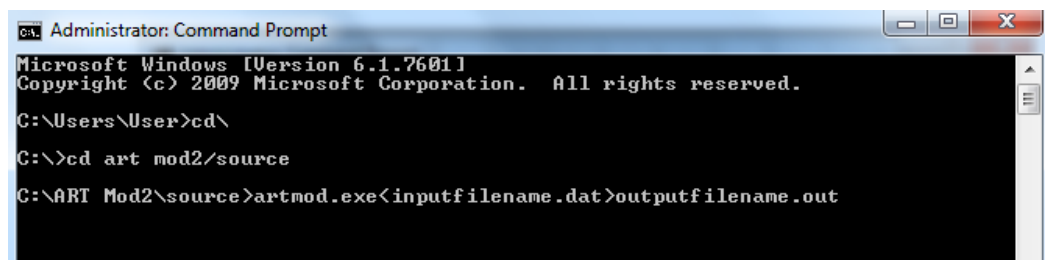


```

Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\User>cd\
C:\>cd ART Mod2/source
C:\ART Mod2\source>_

```

(c)



```

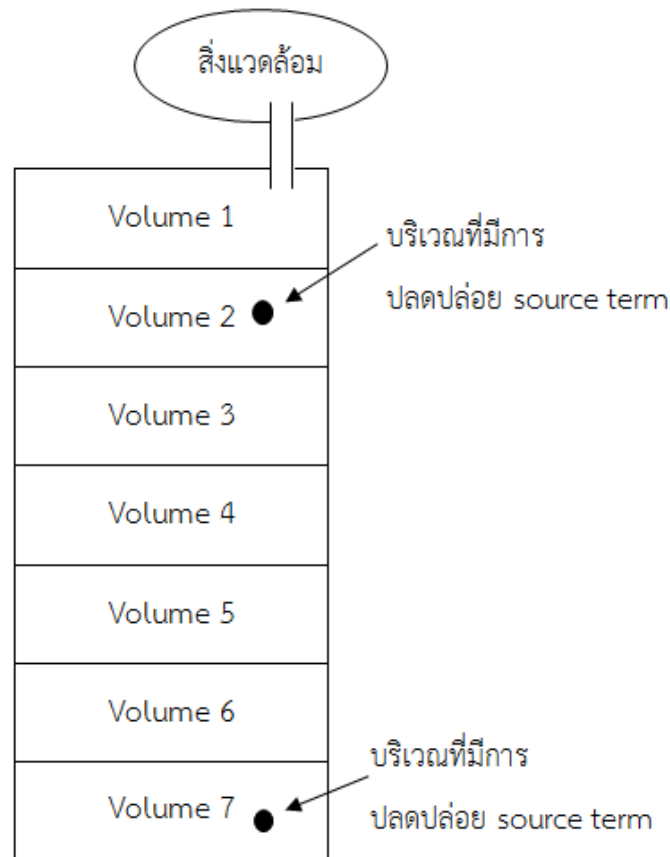
Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\User>cd\
C:\>cd art mod2/source
C:\ART Mod2\source>artmod.exe<inputfilename.dat>outputfilename.out

```

(d)

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการ Compile โปรแกรม ART Mod2

### 3.1.2 การจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีโดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.2 ESBWR Drywell Nodalization

จากเอกสาร ESBWR CERTIFICATION PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT [5] ซึ่งมีการประเมินการรั่วไหลของเหตุการณ์อุบัติเหตุแบบ BYP ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MAAP (MAAP Computer Code) โดยการรั่วไหลแบบ BYP ประกอบด้วยเหตุการณ์ คือ ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ล้มเหลวที่ความดันต่ำ ซึ่งเหตุการณ์ เริ่มต้นของลำดับอุบัติเหตุครั้งนี้จะเริ่มจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ (by a loss-of-preferred power), ไม่มีการป้อนน้ำหล่อเย็นเข้าสู่ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์, ความดันของถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ลดลงด้วยระบบลดความดันอัตโนมัติ (Automatic Depressurization system, ADS) ส่งผลให้ความดันไม่เพียงพอในการทำให้ isolation condensers ทำงาน, ระบบทำความเย็นอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Passive Containment Cooling System, PCCS) เติมน้ำเข้าสู่บริเวณเก็บกักน้ำ, เศษซากโลหะหลอมเหลว (debris) ถูกหล่อเย็นสำเร็จด้วยน้ำจากระบบทำความเย็นแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ด้วยแรงดึงดูด (Gravity Driven Core Cooling



System, GDCS) และ Basemat Internal Melt Arrest Coolability Device (BiMAC), ระบบ containment isolation ทำงานล้มเหลว

การวิจัยนี้ทำการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีแบบ containment bypass (BYP) ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ ART Mod2 เป็นเวลา 200000 วินาที โดยการจำลองอุบัติเหตุอยู่ในขั้นตอนเบื้องต้นจึงพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีเฉพาะ Csi และการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีส่วนใหญ่มาจากส่วนที่อยู่ใน drywell จึงพิจารณาอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เฉพาะส่วน drywell ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ซึ่งมีปริมาตรรวม 5403 ลูกบาศก์เมตร และความสูง 34.12 เมตร โดยการวิจัยได้แบ่งอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR เป็น 7 ปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.2

ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของ Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะศึกษาผลการเคลื่อนที่ของ Csi โดยในเหตุการณ์อุบัติเหตุการรั่วไหลแบบ BYP ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR มีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มาจากระบบ GDCS และ BiMAC เพื่อระบายความร้อนจากเศษซากแกนปฏิกรณ์ที่หลอมเหลว เนื่องจากการจำลองอุบัติเหตุอยู่ในขั้นตอนเบื้องต้นดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเหตุการณ์งานวิจัยนี้จึงพิจารณาการจัดการการอุบัติเหตุเป็นการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยสมมติว่ามีน้ำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จนมีระดับน้ำเท่ากับระดับน้ำสูงสุดที่มาจาก GDCS และ BiMAC (16.31 เมตร) และไม่มีการจัดการอุบัติเหตุคือไม่มีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ รวมถึงการศึกษาความไว (sensitivity study) จากการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- อุณหภูมิของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- อุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csi form) รูปแบบที่ไอต่อแอโรซอล
- ขอบเขตช่วงการกระจายตัวของมวลแอโรซอล
- บริเวณที่เกิดรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อม
- Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

#### กรณีอ้างอิง (base case)

กรณีอ้างอิงที่ใช้สำหรับศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ จะสมมติให้มีอุณหภูมิของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์คงที่ที่ 800 K source term (Csi) ตามเอกสารการจำลองเหตุการณ์ BYP ด้วยโปรแกรม MAAP source term เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทาง DPV

(Depressurization valve) จากรูปที่ ก-1 ในภาคผนวกแสดงให้เห็นว่า source term ใน drywell สะสมอยู่ 2 บริเวณ คือ ส่วนที่อยู่ใน upper drywell และส่วนที่อยู่ใน lower drywell เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเหตุการณ์งานวิจัยนี้จึงแบ่งตำแหน่ง source term ที่เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็น 2 ตำแหน่งเพื่อแทนบริเวณของ upper drywell และ lower drywell ซึ่งตำแหน่งแรกอยู่บริเวณ ปริมาตรควบคุมที่ 2 และตำแหน่งที่สองอยู่ ณ ปริมาตรควบคุมที่ 7 และเริ่มพิจารณาเหตุการณ์เมื่อมีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์คือที่เวลา 25800 วินาที โดยสมมติระดับน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สูง 16.31 เมตร ตั้งแต่เริ่มพิจารณา และมีการป้อน source term เป็นเวลานาน 10 วินาที เพื่อให้มีสัดส่วนของ CsI ใน upper drywell และ lower drywell เท่ากับ 0.229 และ 0.26 ของปริมาณ CsI ทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ (35.61 กิโลกรัม) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ ก-1 โดยรายละเอียดอุณหภูมิต่างๆ และ Nodalization ที่เปลี่ยนแปลงแสดงในตารางที่ 3.1 และในภาคผนวก ตารางก-1 และก-2



### 3.1.3 ข้อมูลเข้าโปรแกรมจำลองอุบัติเหตุ (input data) และสมมติฐาน [5]

ตารางที่ 3.1 ข้อมูล และสมมติฐานที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์

ข้อมูล	รายละเอียด
ตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหลของ source term จากเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	source term ผ่านเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ บริเวณปริมาตรควบคุม (control volume) ที่ 2 และบริเวณปริมาตรควบคุมที่ 7
ปริมาณ Csl เริ่มต้น (source term)	มีรูปแบบเป็นไอ มวล 17.40 กิโลกรัม (ปริมาณ Csl ทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ 35.61 กิโลกรัม [21] โดยปริมาณเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณคือ 48.87% ของปริมาณ Csl ทั้งหมด ข้อมูลจากกราฟของ NEDO-33201 [5] ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก) ซึ่งเข้าสู่ source term เริ่มเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ที่เวลา 25800 วินาทีนาน 10 วินาที
ตำแหน่งของการเกิด bypass	ด้านบนสุดของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งสูง 34.12 เมตร (กรณีอ้างอิง)
ทางผ่านของ source term (source term pathway) จากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ผ่านออกสู่สิ่งแวดล้อม	ขนาดเท่าท่อไอน้ำหลัก (main steam line pipe) ( $983.2 \text{ cm}^2$ )
สถานะของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	พิจารณาว่ามีก๊าซเพียง 2 ชนิด คือ ไนโตรเจนและไอน้ำซึ่งมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Well mixed)
ทิศทางการไหลของไอน้ำ	มีทิศทางการไหลหลักจากล่างขึ้นบน
ความหนาแน่นไอน้ำ	คงที่ ( $0.241 \text{ kg/m}^3$ )
อุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	คงที่ 800K (กรณีอ้างอิง)
สัดส่วนของก๊าซ และความเร็วของก๊าซ ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	คำนวณจากโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ RELAP5MOD3.3
การจัดการอุบัติเหตุ	การเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ระดับความสูง 16.31 เมตร (ระดับน้ำสูงสุดที่ GDSCS และ BiMAC ป้อนน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์)
ข้อมูล thermal hydraulic อื่นๆ	จากเอกสาร NEDO-33201 Rev.6 [5]

ในการวิจัยนี้ได้แบ่งแอร์โซลให้กระจายออกเป็น 10 ส่วนตามขนาดโดยในส่วนของ การปรับ ขอบเขตช่วงการกระจายตัวของมวลแอร์โซลจะปรับขอบเขตขอบมวลแอร์โซลตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวของมวลแอร์โซล

กรณีอ้างอิง (กรัม)		แบบที่ 1 (กรัม)		แบบที่ 2 (กรัม)		แบบที่ 3 (กรัม)	
ขอบล่าง	ขอบบน	ขอบล่าง	ขอบบน	ขอบล่าง	ขอบบน	ขอบล่าง	ขอบบน
1.00E-15	8.00E-15	1.00E-15	8.00E-15	1.00E-15	8.00E-15	1.00E-15	8.00E-15
8.00E-15	6.40E-14	8.00E-15	1.00E-13	8.00E-15	6.40E-14	8.00E-15	6.40E-14
6.40E-14	5.12E-13	1.00E-13	5.12E-13	6.40E-14	5.12E-13	6.40E-14	5.12E-13
5.12E-13	4.10E-12	5.12E-13	4.10E-12	5.12E-13	4.10E-12	5.12E-13	4.10E-12
4.10E-12	3.28E-11	4.10E-12	3.28E-11	4.10E-12	3.28E-11	4.10E-12	3.28E-11
3.28E-11	2.62E-10	3.28E-11	2.62E-10	3.28E-11	2.62E-10	3.28E-11	2.62E-10
2.62E-10	2.10E-09	2.62E-10	2.10E-09	2.62E-10	2.10E-09	2.62E-10	9.10E-09
2.10E-09	1.68E-08	2.10E-09	1.68E-08	2.10E-09	6.68E-08	9.10E-09	1.68E-08
1.68E-08	1.34E-07	1.68E-08	1.34E-07	6.68E-08	1.34E-07	1.68E-08	1.34E-07
1.34E-07	1.07E-06	1.34E-07	1.07E-06	1.34E-07	1.07E-06	1.34E-07	1.07E-06

สำหรับการปรับ Nodalization จะทำการปรับ Nodalization ในการคำนวณโดยเปลี่ยน ปริมาตรควบคุมให้มีความละเอียดขึ้นจาก 7 เป็น 19 ปริมาตรควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ ตารางที่ 3.4 ตามลำดับ โดยที่ข้อมูลเรขาคณิตของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ปริมาตร, พื้นที่หน้าตัด และความสูง รวมทั้งข้อมูล Thermal hydraulic มีค่าเท่าเดิม ในการปรับเพิ่มความละเอียดของ Nodalization นั้นโปรแกรมจำลองอุบัติเหตุ ART Mod2 อนุญาตให้มีปริมาตรควบคุม ได้มากที่สุด 20 ปริมาตรควบคุม ซึ่งการปรับเปลี่ยนปริมาตรควบคุมนี้คิดด้วยการแบ่งปริมาตร ควบคุมที่ 1-6 โดยในแต่ละปริมาตรควบคุมถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน ปริมาตรควบคุมที่ 7 ซึ่งเป็น ตำแหน่งที่สองมีการปล่อย source term จากถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะไม่มีการแบ่งปริมาตรควบคุมแต่ จะกลายเป็นปริมาตรควบคุมที่ 19 ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 20 คือส่วนที่เป็นสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นส่วนที่ นิวไคลด์รังสีรั่วไหลออกไป การปรับเปลี่ยนปริมาตรควบคุมให้มีความละเอียดขึ้นมีผลต่อตำแหน่งของ ข้อมูล Input บางค่าเช่นตำแหน่งการปล่อย source term จากถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีขอบเขตที่จำกัด ขึ้น จากเดิมอยู่ที่ปริมาตรควบคุมที่ 2 มาอยู่ที่ปริมาตรควบคุมที่ 5 ซึ่งเป็นปริมาตรควบคุมที่มีตำแหน่ง ช่วงกลางของปริมาตรควบคุมที่ 2 เดิม นอกจากนี้ยังทำให้ตำแหน่งอุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่อง ปฏิกรณ์มีความแม่นยำขึ้น โดยจากสมมติฐานคืออุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์บริเวณ Upper Drywell มีค่าเท่ากับอุณหภูมิผนังของบริเวณ Lower Drywell ในบริเวณที่ไม่มีน้ำปกคลุม

และเท่ากับอุณหภูมิในบริเวณที่มีน้ำปกคลุม การปรับเปลี่ยนปริมาตรควบคุมทำให้อุณหภูมิบริเวณ ปริมาตรที่ 4 เดิมซึ่งเป็นบริเวณที่มีรอยต่อระหว่างก๊าซและน้ำ มีความละเอียดขึ้นซึ่งจากเดิมที่สมมติ ให้มีอุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับอุณหภูมิของบริเวณ Lower Drywell ทั้งปริมาตร ควบคุมเปลี่ยนเป็นมีส่วนที่มีอุณหภูมิเท่ากับน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ด้วย

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางตรีโกณมิติของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี 7 ปริมาตรควบคุม

ปริมาตร ควบคุมที่	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางแบบ ไฮดรอลิก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	DAW
1	6.82E+06	2.91E+02	8.67E+02	1.99E+09	9.26E+03
2	6.82E+06	5.21E+02	2.89E+03	3.55E+09	9.26E+03
3	8.90E+05	5.71E+02	1.06E+03	5.08E+08	3.34E+03
4	8.90E+05	4.03E+02	1.06E+03	3.59E+08	3.34E+03
5	8.68E+05	5.05E+02	4.20E+02	4.38E+08	3.30E+03
6	9.27E+05	2.42E+02	1.09E+03	2.24E+08	3.41E+03
7	8.49E+05	8.80E+02	1.04E+03	7.47E+08	3.27E+03

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางตรีโกณมิติของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี 19 ปริมาตรควบคุม

ปริมาตร ควบคุมที่	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางแบบ ไฮดรอลิก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	DAW
1	6.82E+06	9.70E+01	8.67E+02	6.62E+08	9.26E+03
2	6.82E+06	9.70E+01	8.67E+02	6.62E+08	9.26E+03
3	6.82E+06	9.70E+01	8.67E+02	6.62E+08	9.26E+03
4	6.82E+06	1.74E+02	2.89E+03	1.18E+09	9.26E+03
5	6.82E+06	1.74E+02	2.89E+03	1.18E+09	9.26E+03
6	6.82E+06	1.74E+02	2.89E+03	1.18E+09	9.26E+03
7	8.90E+05	1.90E+02	1.06E+03	1.69E+08	3.34E+03
8	8.90E+05	1.90E+02	1.06E+03	1.69E+08	3.34E+03
9	8.90E+05	1.90E+02	1.06E+03	1.69E+08	3.34E+03
10	8.90E+05	1.34E+02	1.06E+03	1.20E+08	3.34E+03
11	8.90E+05	1.34E+02	1.06E+03	1.20E+08	3.34E+03
12	8.90E+05	1.34E+02	1.06E+03	1.20E+08	3.34E+03
13	8.68E+05	1.68E+02	4.20E+02	1.46E+08	3.30E+03
14	8.68E+05	1.68E+02	4.20E+02	1.46E+08	3.30E+03
15	8.68E+05	1.68E+02	4.20E+02	1.46E+08	3.30E+03
16	9.27E+05	8.05E+01	1.09E+03	7.47E+07	3.41E+03
17	9.27E+05	8.05E+01	1.09E+03	7.47E+07	3.41E+03
18	9.27E+05	8.05E+01	1.09E+03	7.47E+07	3.41E+03
19	8.49E+05	8.80E+02	1.04E+03	7.47E+08	3.27E+03

### 3.1.4 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 [22]

เนื่องจากข้อมูล Thermal hydraulic ขาเข้า (Input data) จากเอกสารและงานวิจัยไม่เพียงพอจึงต้องหาโปรแกรมจำลองเหตุการณ์เพื่อหาข้อมูลของสัดส่วนของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR ซึ่งในที่นี้สมมติให้มีเพียง 2 ชนิด คือ ก๊าซไนโตรเจนกับไอน้ำเท่านั้น และความเร็วของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR สำหรับโปรแกรมที่เลือกใช้หาข้อมูลเพิ่มเติมคือโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ภาวะไม่คงตัว (transient) ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างกฎ, การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกใบอนุญาต, การประเมินแนวทางการปฏิบัติของผู้ควบคุม และเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์โรงงานนิวเคลียร์ การใช้งานที่จำเพาะของความสามารถนี้ได้รวมการจำลองของภาวะไม่คงตัวในระบบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลเบา เช่น การขาดสารหล่อเย็น (loss of coolant), การคาดการณ์ภาวะไม่คงตัวเมื่อไม่มีการ Scram (anticipated transients without Scram; ATWS) และการดำเนินการที่ภาวะไม่คงตัว เช่น การขาดน้ำขาเข้า (feedwater), การขาดพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก, ไฟฟ้าดับ และการหยุดทำงานของกังหันผลิตไฟฟ้า (turbine trip)

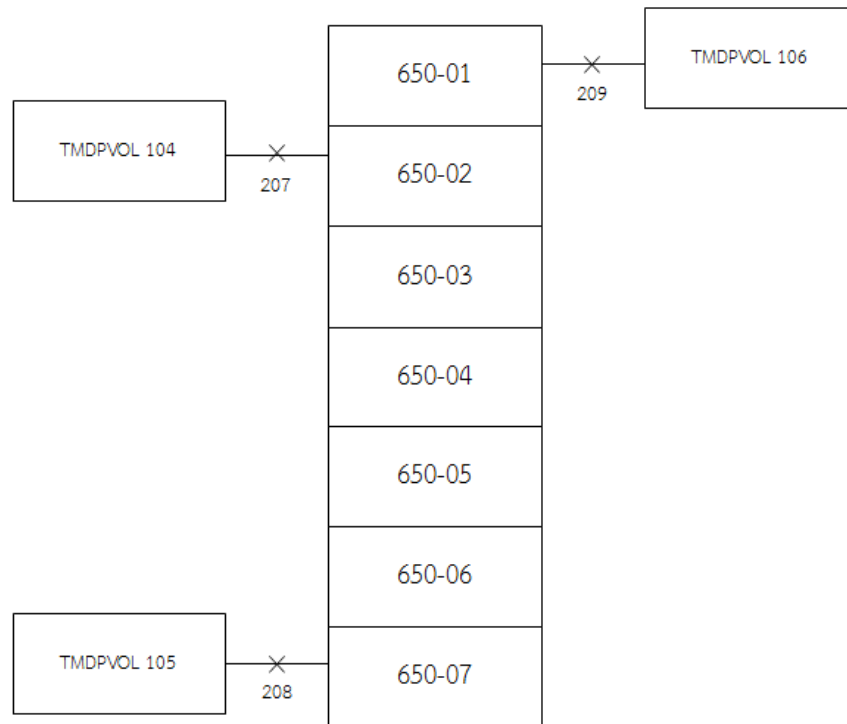
RELAP5MOD3.3 นอกจากการคำนวณพฤติกรรมของระบบหล่อเย็นที่ภาวะไม่คงตัวยังสามารถใช้ในการจำลองที่หลากหลายของไฮดรอลิกและความร้อนที่ภาวะไม่คงตัวต่างๆ ในทั้งกรณีที่เป็นระบบนิวเคลียร์และไม่ใช่นิวเคลียร์ซึ่งเป็นระบบที่มีความเกี่ยวข้องกับส่วนผสมของไอน้ำ, น้ำ, สารที่ไม่ควบแน่น และตัวถูกละลาย

3.1.4.1 ข้อมูล input สำหรับโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ที่ใช้หาค่าสัดส่วนของก๊าซที่ไม่ควบแน่นและความเร็วของก๊าซ

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดข้อมูลเข้า (input) ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3

ข้อมูล	รายละเอียด
Nodalization ของ ESBWR	<p>มีลักษณะทางเรขาคณิตเหมือนกันกับ Nodalization ที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุของโปรแกรม ART Mod2 ซึ่งมี 7 ส่วนปริมาตรโดยในโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ได้กำหนดให้โปรแกรมจัดปริมาตรที่กำหนดเป็น Time-dependent volume component (TMDPVOL) ซึ่งมีตัวเลขแทนส่วนประกอบ (component no.) และปริมาตรของระบบ (volume no.) เช่น ในการวิจัยนี้แทนส่วนประกอบด้วยหมายเลข 650 และปริมาตรที่ 1 แทนด้วยหมายเลข 01 จาก CCCV ของรูปแบบ input CCCV000N โดยปริมาตรที่มีสารเข้าออกจากระบบมีการเชื่อมต่อกับปริมาตรอื่น ดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำจาก TMDPVOL 105 เข้าสู่ปริมาตรที่ 7 (650-07) ผ่านทางรอยต่อ 208</li> <li>- ไอน้ำจาก TMDPVOL 104 ที่มีความดันเท่ากับความดันภายใต้สภาวะดำเนินการของถังปฏิกรณ์เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยผ่านDPV ซึ่งอยู่บริเวณปริมาตรที่ 2 (650-02) ผ่านทางรอยต่อ 207</li> <li>- บริเวณที่เกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมจากปริมาตรที่ 1 (650-01) สู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ TMDPVOL 106 ดังแสดงในรูปที่ 3.3</li> </ul>
ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์	สมมติให้เป็นปริมาตร (TMDPVOL 104) ที่มีความดันเท่ากับความดันภายในถังปฏิกรณ์ (7.17 MPa [3])
องค์ประกอบของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	สมมติให้มีก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เพียง 2 ชนิด คือ ไนโตรเจนซึ่งจัดเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น และไอน้ำ
ข้อมูล input อื่นๆ	ใช้ข้อมูลเริ่มต้นจากเอกสาร NEDO-33201 Rev.6 [5] เช่นเดียวกับโปรแกรม ART Mod2



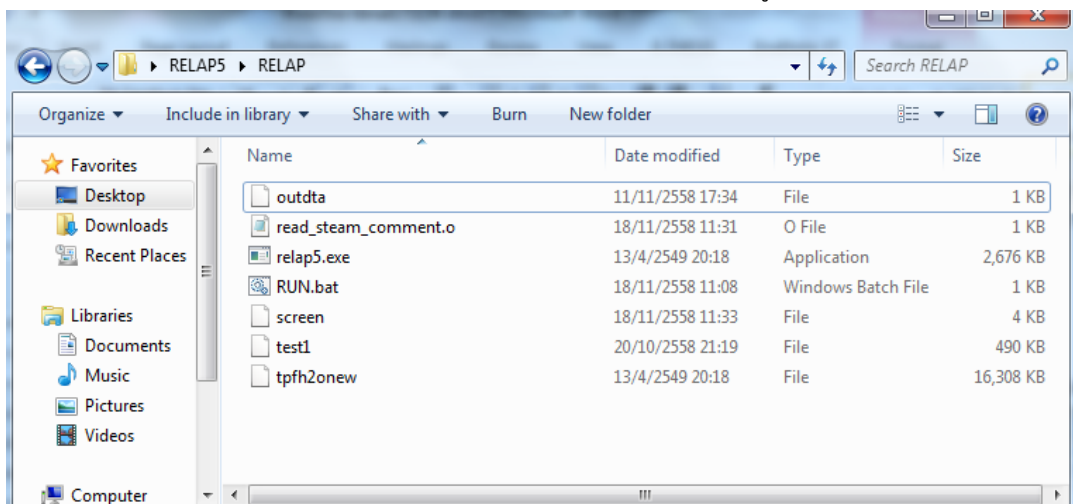


รูปที่ 3.3 Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ในโปรแกรม RELAP5MOD3.3

#### 3.1.4.2 การใช้งานโปรแกรม RELAP5MOD3.3

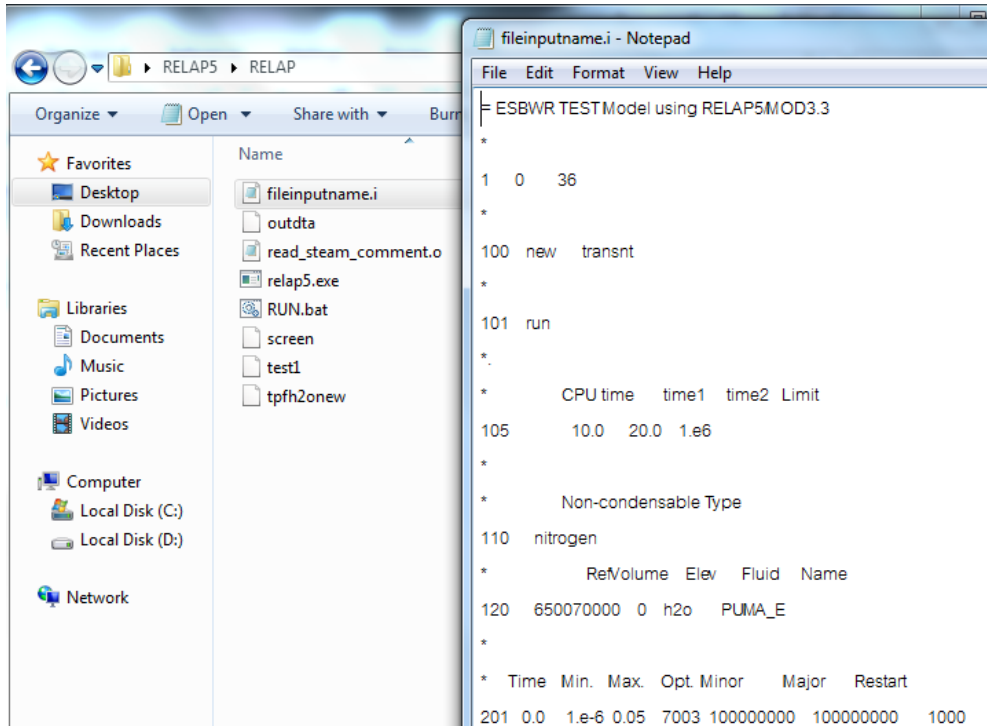
ในงานวิจัยนี้ได้ compile ไฟล์ input ด้วยคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Window 7 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ไว้ในส่วนที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 ที่ติดตั้งไว้

2. สร้าง input file โดยบันทึกเป็นสกุล .i และบันทึก input file ไว้ในแฟ้มข้อมูล RELAP5 ที่ติดตั้งไว้แล้วดังแสดงในรูปที่ 3.5

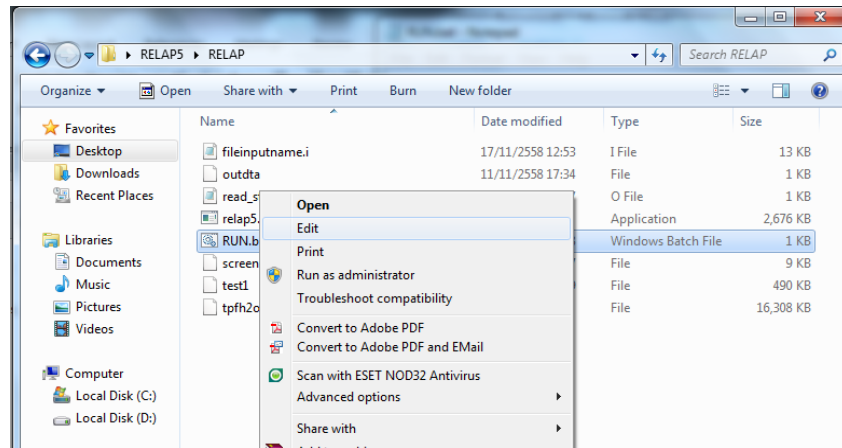


รูปที่ 3.5 การบันทึก input ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ไว้ใน folder ที่ติดตั้งไว้

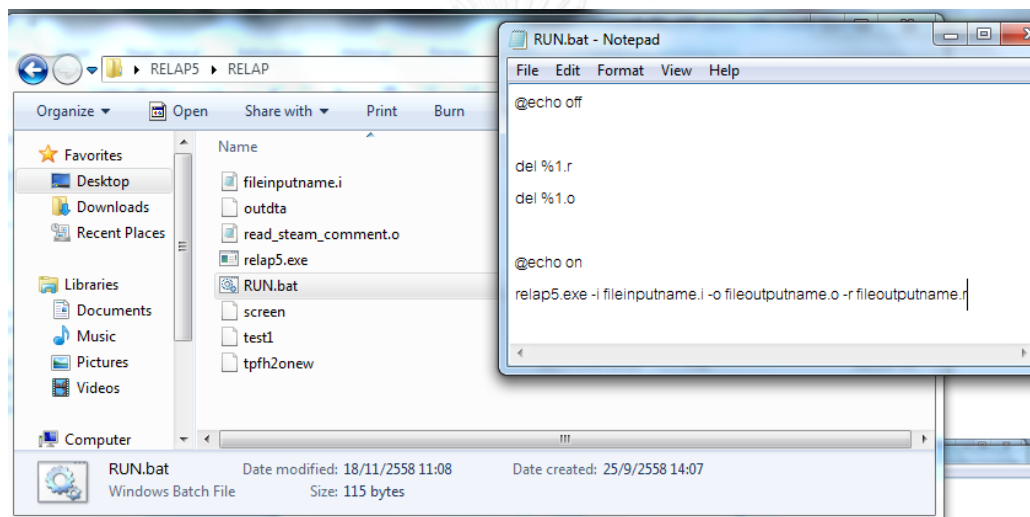
### 3. Compile file

3.1 แก้ไข compile file (RUN.bat) โดยใส่รายละเอียดไฟล์ขาเข้าและขาออกโดยใส่ชื่อ input file แทนที่ fileinputname และใส่ชื่อ output file ที่ต้องการแทนที่ fileoutputname ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 และทำการบันทึก

3.2 รัน compile file โดยดับเบิลคลิกที่ไฟล์ RUN.bat ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างของการ compile ขึ้นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการแก้ไข compile file ของ RELAP5MOD3.3 เพื่อเตรียม compile



รูปที่ 3.7 การแก้ไขรายละเอียด compile file ของ RELAP5MOD3.3 เพื่อเตรียม compile

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Input file name = fileinputname.i

Copyright (C) 2001-2006 Information Systems Laboratories, Inc.
Thermodynamic properties files used by this problem:
Thermodynamic properties file for h2o obtained from lfn tpfh2onew,
tpfh2onew version 3.0, tables of thermodynamic properties of light water
generated on 06-Apr-06 at 12:21:10 by stgh2onew0 3.0 <13/Dec/05

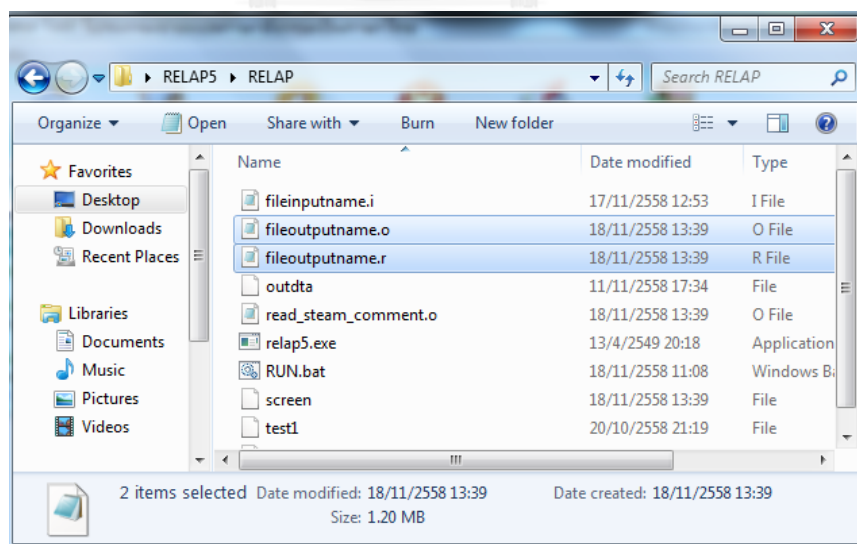
$$$$$$$ Input processing completed successfully.
RELAP5/3.3gl Reactor Loss Of Coolant Analysis Program

Copyright (C) 2001-2006 Information Systems Laboratories, Inc.
= ESBWR TEST Model using RELAP5/MOD3.3
18-Nov-15 11:31:03

cpuT_(s) probTime dTime_(s) dTCournt UolCoP PresCo_MPa UoidCo emass_kg Uo1
Er PresEr_MPa UoidEr QualaEr NSteps Reason
0.0 0.0000 1.00E-06 0.0 10401 7.170 1.0000 0.00 104
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 0 65007f 0.1136 0.9999 -0.843 104
10.0 3110.2 5.00E-02 4.4 62306 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 2.0 65007f 0.1136 0.9997 -0.843 104
20.1 6109.0 5.00E-02 2.0 122282 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 1.5 184602 dtmax
30.1 9225.0 5.00E-02 1.2 246593 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 1.0 304343 dtmax
40.1 12325.0 5.00E-02 0.92 358982 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 0.85 411383 dtmax
50.1 15212.0 5.00E-02 0.81 461893 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 4.8 512262 dtmax
60.1 17944.0 5.00E-02 7.1 565273 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 3.2 621494 dtmax
70.1 20564.0 5.00E-02 2.07E+02 65003g 0.1134 1.0000 -147. 650
80.2 23090.0 5.00E-02 0.913 a 685699 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 1.88E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.356E+03 650
90.2 25608.0 5.00E-02 0.680 a 752754 dtmax
01 7.17 0.00 f 9.225E-02a 1.24E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650
100.2 28259.0 5.00E-02 0.24E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650
110.2 31070.0 5.00E-02 0.13E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650
120.2 34278.0 5.00E-02 0.07E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650
130.2 37631.0 5.00E-02 0.04E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650
140.2 41594.0 5.00E-02 0.02E+02 65003G 0.1134 1.0000 -1.940E+02 650

```

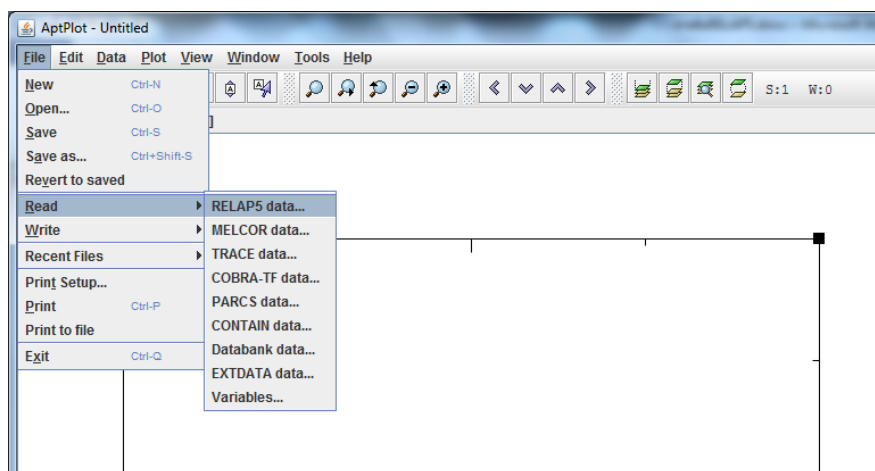
รูปที่ 3.8 โปรแกรม RELAP5MOD3.3 ขณะกำลัง Compile



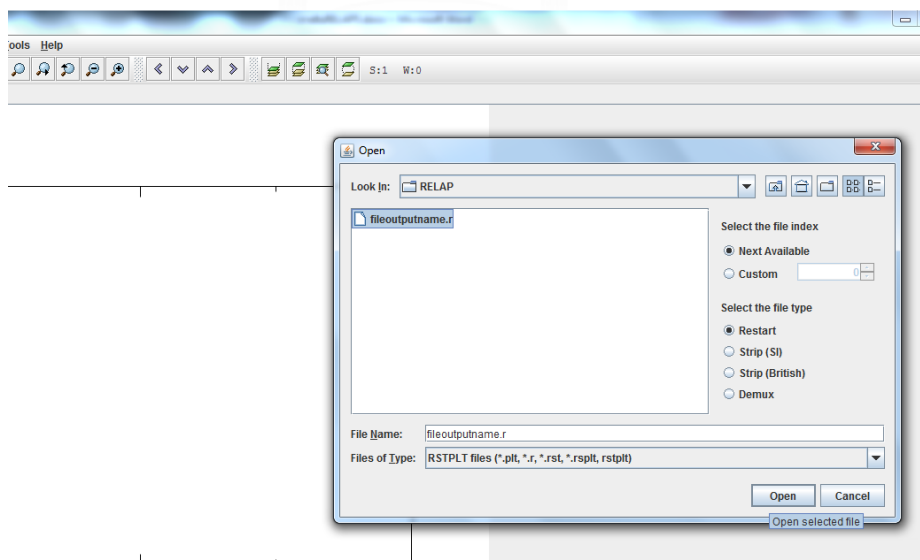
รูปที่ 3.9 ไฟล์ output ของโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ปรากฏที่ folder RELAP5 ที่เราติดตั้ง

3.3 เมื่อการรันโปรแกรม RELAP5MOD3.3 เสร็จสิ้น output file ที่ได้จะปรากฏอยู่ใน folder RELAP5 ที่เราติดตั้งตามรูปที่ 3.9 ซึ่งสามารถดึงข้อมูล output ที่ต้องการใช้จากการให้โปรแกรม AptPlot อ่านไฟล์ output.r ที่ได้ โดยมีวิธีการดังนี้

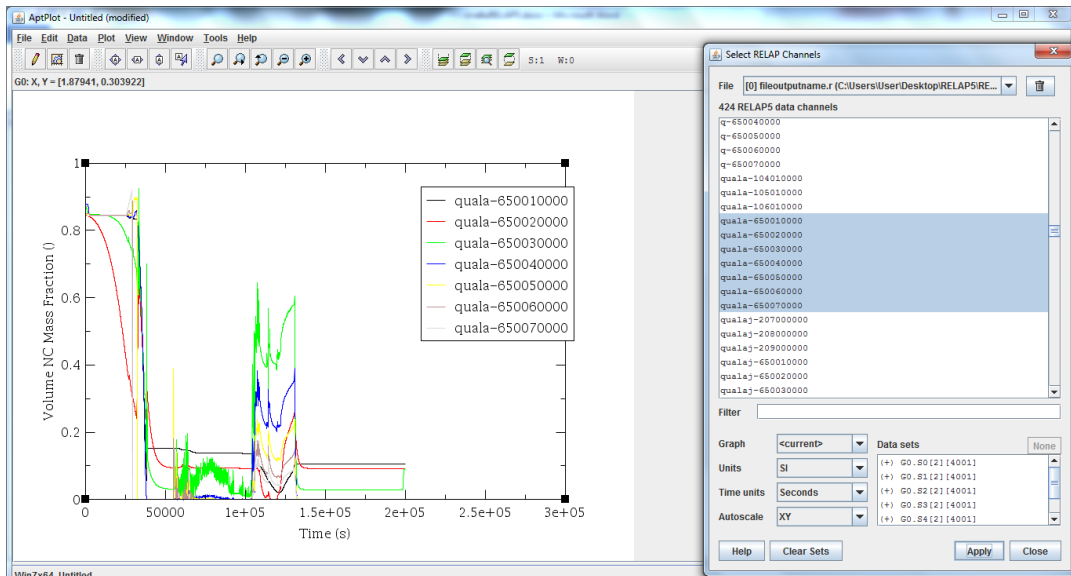
1. เปิดโปรแกรม AptPlot และเลือกหัวข้อ File เลือกหัวข้อ Read RELAP5 data เพื่ออ่านค่า output ของ RELAP5MOD3.3 ตามรูปที่ 3.10
2. เมื่อมีหน้าต่างปรากฏขึ้นให้ทำการเลือกไฟล์ output.r ที่ต้องการและกดปุ่มเปิด



รูปที่ 3.10 การอ่านค่า RELAP5MOD3.3 output ด้วยโปรแกรม AptPlot

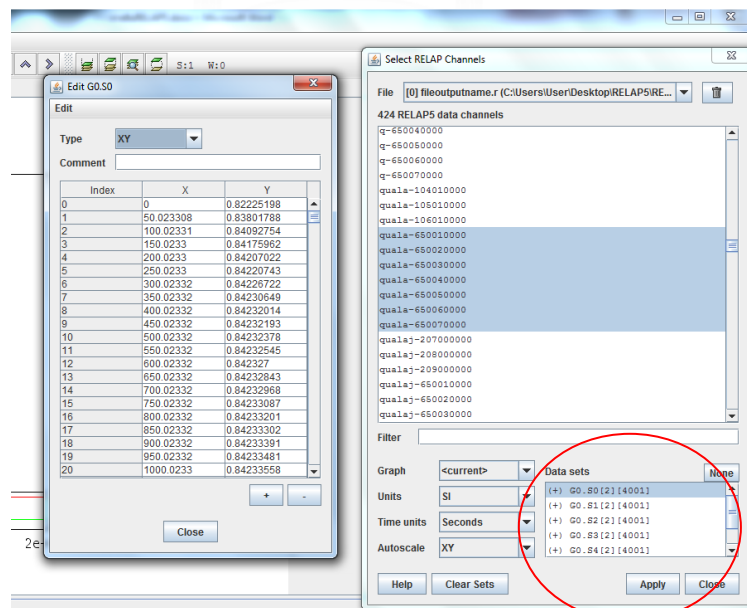


รูปที่ 3.11 เลือกไฟล์ output ของ RELAP5MOD3.3 ที่ต้องการ



รูปที่ 3.12 การเลือกข้อมูล output ที่ต้องการ 1

3. เมื่อเปิดไฟล์ output ที่ต้องการแล้วจะปรากฏแถบแสดง output ต่างๆ ให้ทำการเลือกข้อมูลที่ต้องการโดยงานวิจัยนี้ต้องการค่าสัดส่วนโดยมวลของก๊าซที่ไม่ควมแน่น และค่าความเร็วของก๊าซ จึงเลือก output quala คือสัดส่วนโดยมวลของก๊าซที่ไม่ควมแน่นของแต่ละปริมาตรควบคุม และ velg คือความเร็วเฉลี่ยของไอ (เมตร/วินาที) และกดปุ่ม apply รูปที่ 3.12 เมื่อมีชุดข้อมูลปรากฏในช่อง Data sets ที่ปรากฏในวงกลมสีแดงดังรูปที่ 3.13 ให้ดับเบิลคลิกที่ข้อมูลของแต่ละปริมาตรควบคุม นั้นจะปรากฏชุดข้อมูลขึ้นในหน้าต่างแก้ไข (Edit) จึงทำการคัดลอกไปไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel ที่เตรียมไว้สร้างไฟล์ input ของโปรแกรม ART Mod2

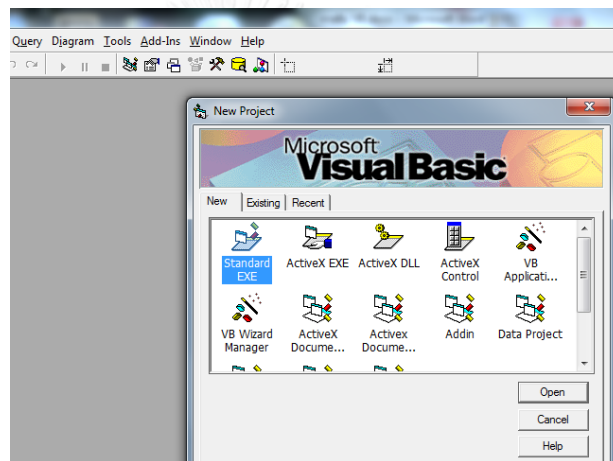


รูปที่ 3.13 การเลือกข้อมูล output ที่ต้องการ 2

### 3.1.5 การเตรียมข้อมูลเข้า

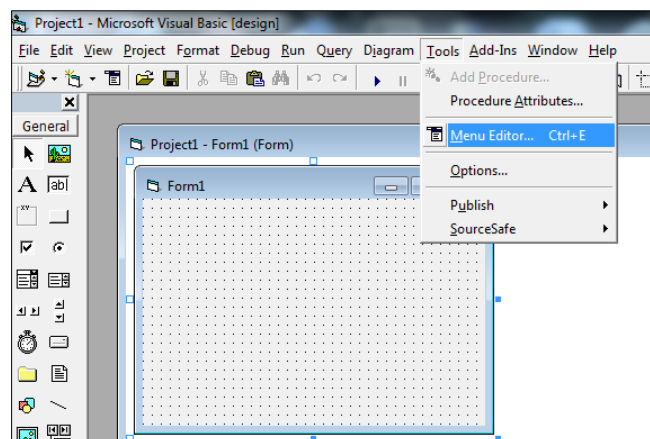
เนื่องจากข้อมูลเข้า (input data) มีตัวแปรที่มีค่าขึ้นกับเวลาโดยในการวิจัยนี้จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาทุกๆ 200 วินาทีซึ่งต้องทำการเขียนวัฏจักรโปรแกรมถึง 1000 รอบเพื่อให้มีเวลาการจำลองอุบัติเหตุครบ 200000 วินาที จึงมีการเขียนโปรแกรมจัดเตรียมข้อมูลเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการเตรียมข้อมูลเข้าโปรแกรม ART Mod2 โดยงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 เพื่อนำข้อมูลขาเข้า เช่น อุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, ความเร็วก๊าซ และสัดส่วนของก๊าซ เป็นต้น ที่เตรียมไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel มาเขียนเป็นข้อมูลเข้าโปรแกรม ART Mod2 โดยมีขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Visual Basic ดังนี้

1. เมื่อเปิดโปรแกรมให้เลือกแบบ standard ดังแสดงในรูปที่ 3.14

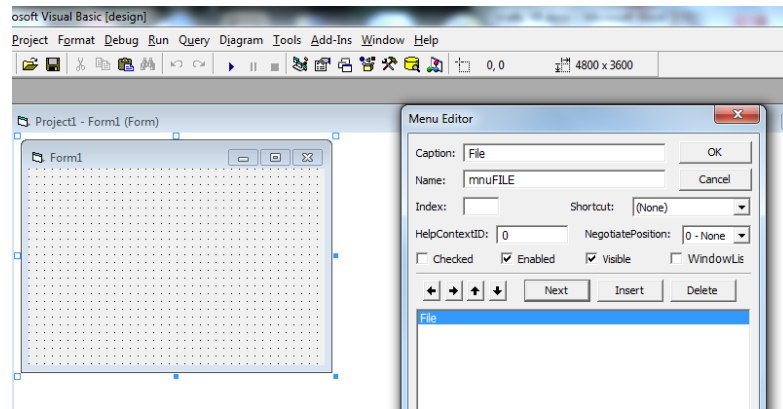


รูปที่ 3.14 การเริ่มใช้งานโปรแกรม Visual Basic

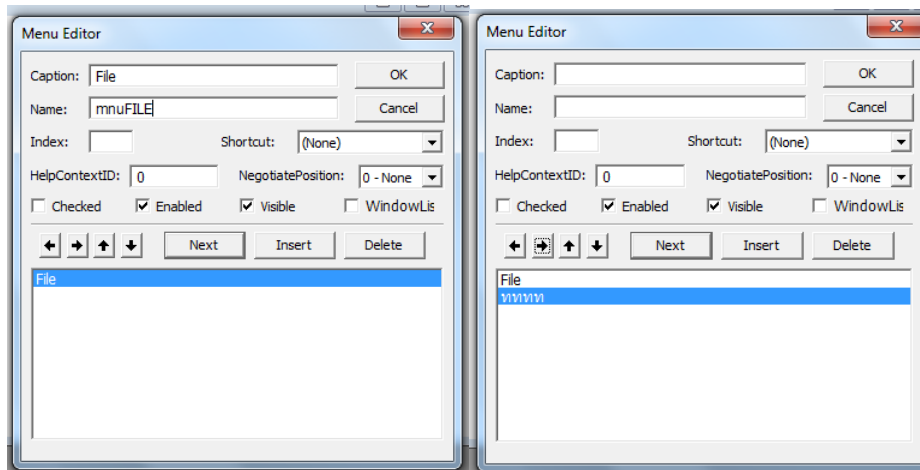
2. ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้าของ ART Mod2 ดังแสดงรูปที่ 3.15 ถึงรูปที่ 3.19 โดยในที่นี้ตั้งชื่อแถบว่า File ปุ่มเปิด และบันทึกคือ Open และ Save ตามลำดับ



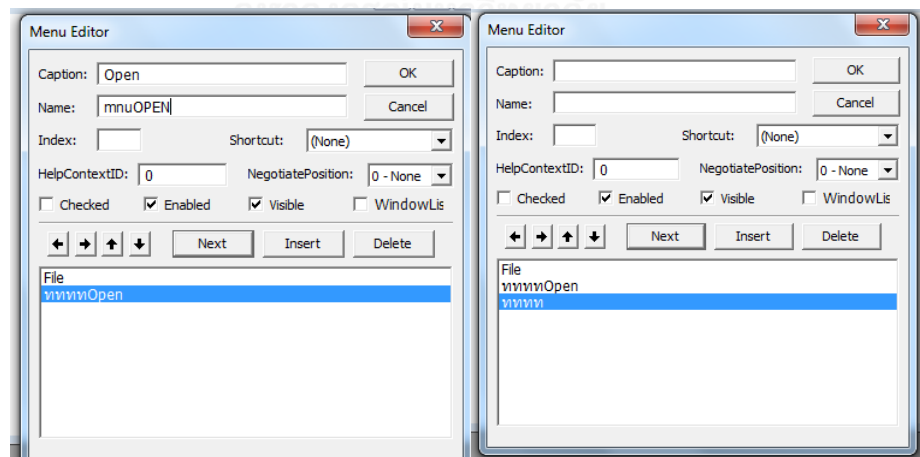
รูปที่ 3.15 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 1



รูปที่ 3.16 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 2

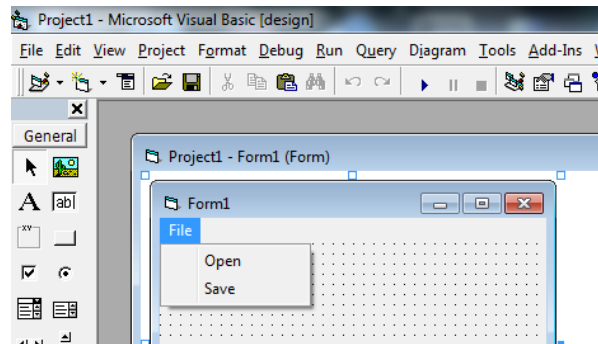


รูปที่ 3.17 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 3



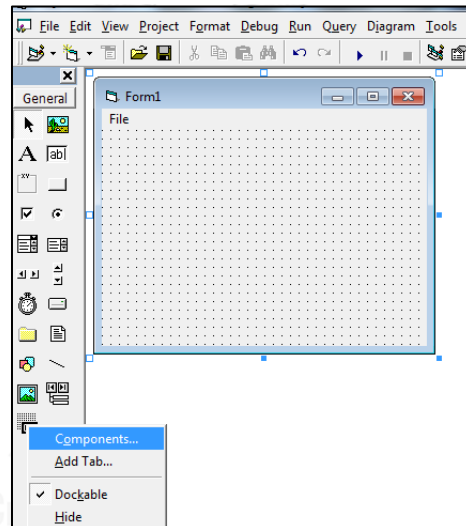
รูปที่ 3.18 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 4



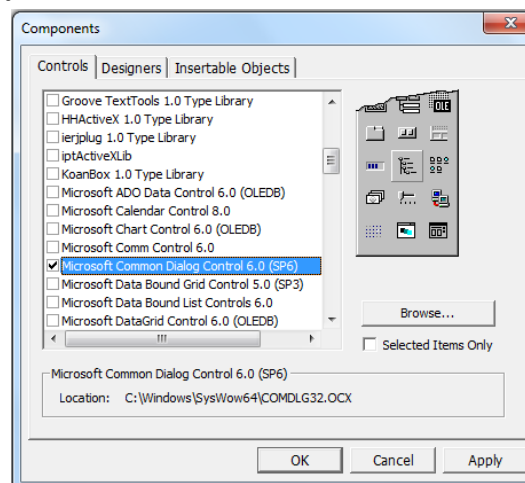


รูปที่ 3.19 ทำการสร้างแถบการเปิดไฟล์ และบันทึกที่เตรียมข้อมูลเข้า 5

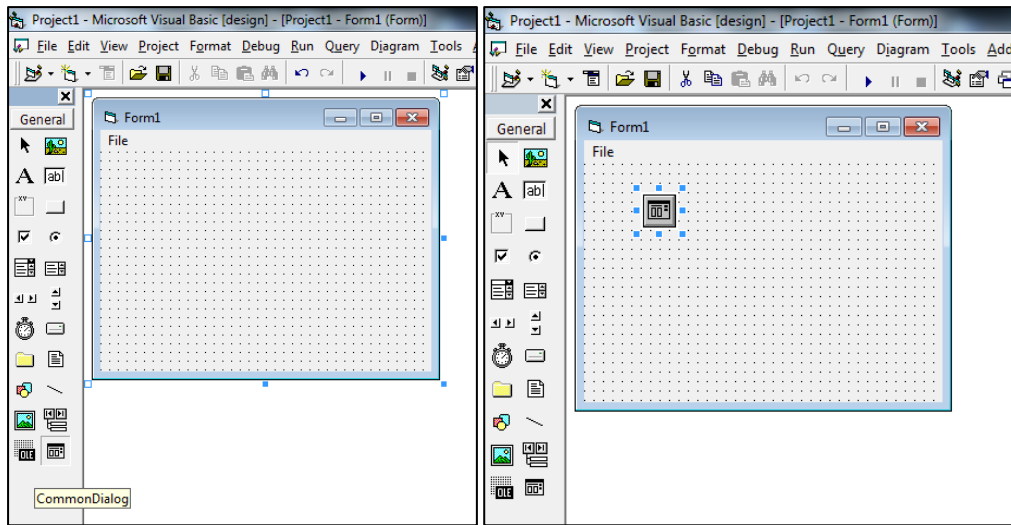
3. สร้างปุ่ม Common dialog เพื่อให้แถบ file ในข้อ 2 ใช้งานได้โดยต้องทำการเพิ่ม component ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.21 จากนั้นนำฟังก์ชัน common dialog ที่ปรากฏมาใส่ใน Form1 ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 1

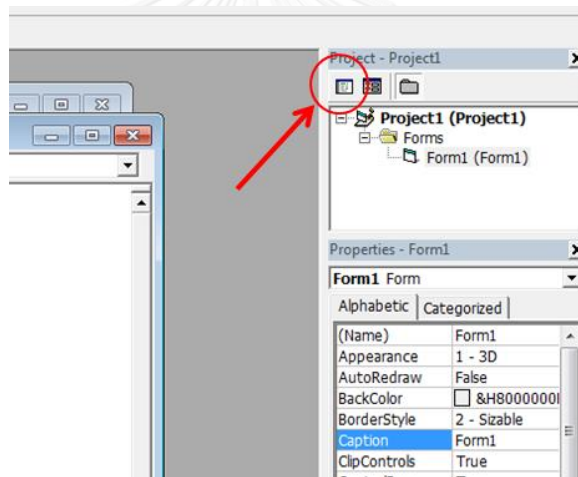


รูปที่ 3.21 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 2



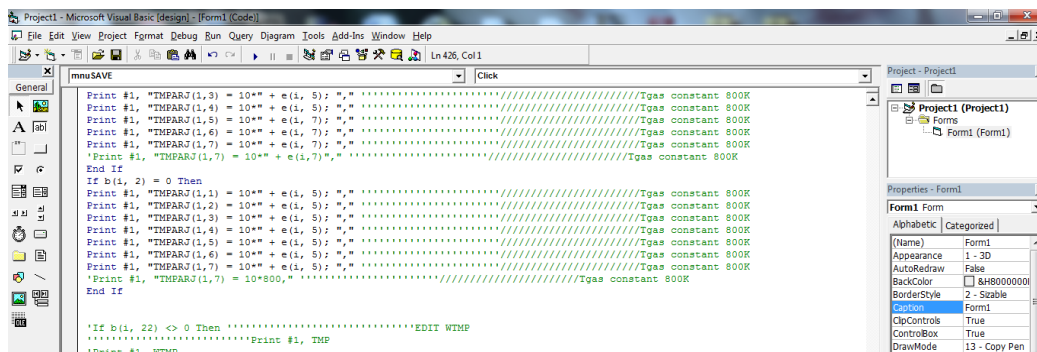
รูปที่ 3.22 การสร้างสร้างปุ่ม Common dialog 3

4. เริ่มการเขียนโปรแกรมโดยเลือกที่หน้าต่างที่มุมขวาดังแสดงในวงกลม



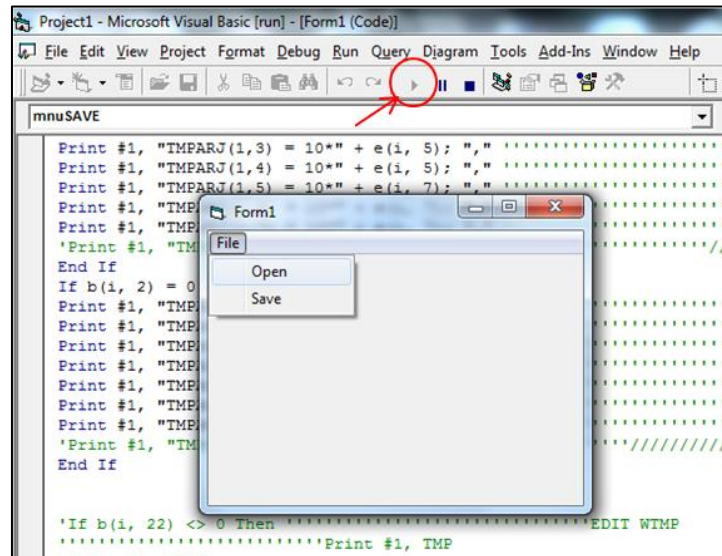
รูปที่ 3.23 การเริ่มเขียนโปรแกรม Visual Basic

5. ทำการเขียนโปรแกรม Visual Basic ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การรันไฟล์ input ของโปรแกรม Visual Basic 1

6. ทำการ Run File ขาเข้าที่เตรียมไว้โดยกดปุ่ม Run ซึ่งอยู่ในวงกลมตามรูปที่ 3.25 จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกเปิดไฟล์ข้อมูล input ที่ต้องการเตรียมสำหรับโปรแกรม ART Mod2 และบันทึกไฟล์ จากนั้นทำการปรับอักษระและช่องว่างไฟล์ขาออกให้สามารถใช้ได้กับโปรแกรม ART Mod2



รูปที่ 3.25 การรันไฟล์ input ของโปรแกรม Visual Basic 2

## บทที่ 4

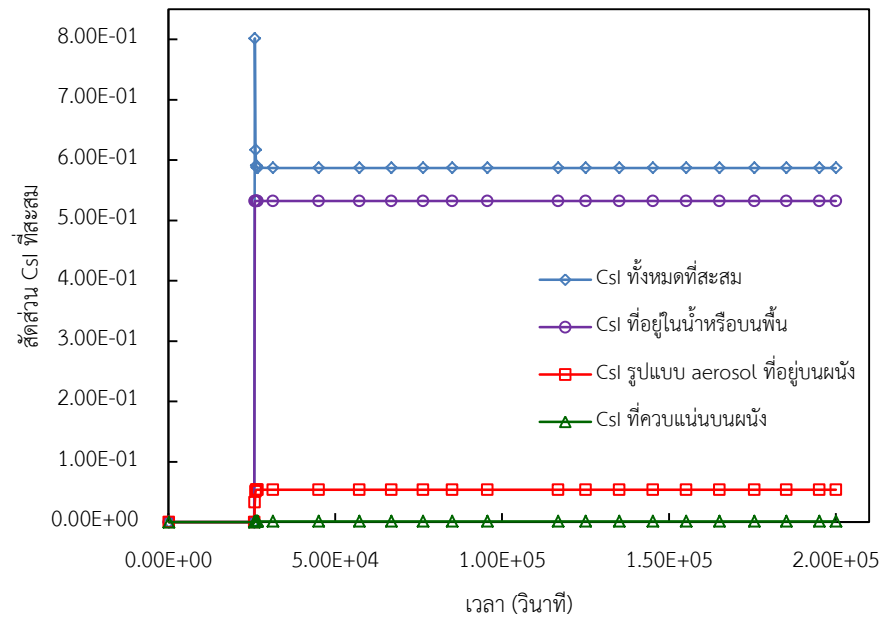
### ผล และการอภิปรายผลการคำนวณ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การแสดงผลการคำนวณของการจำลองอุบัติเหตุการรั่วไหลแบบ BYP ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR ด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ ART Mod2 และ อภิปรายผลที่ได้จากการคำนวณ โดยแบ่งผลการคำนวณและการอภิปรายออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้แก่ ผลการคำนวณของกรณีที่ใช้อ้างอิง, ผลการศึกษาความไวตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิของก๊าซ และอุณหภูมิผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น, การเปรียบเทียบผลการคำนวณของการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุเมื่อมี และไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ, ตารางสรุปผลของตัวแปรที่มีต่อ การสะสม Csl และความแตกต่างของผลการคำนวณระหว่างโปรแกรม ART Mod2 และโปรแกรม MAAP

#### 4.1 ผลการคำนวณของกรณีที่ใช้อ้างอิง (base case)

กรณีอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ BYP ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ESBWR คือ กรณีที่ก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิ 800 K และมีการจัดการอุบัติเหตุ โดยการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีผลการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยการเก็บกัก Csl ที่เกิดขึ้นมีโอกาสเกิดจาก

1. Csl ในรูปแบบไอ (vapor form) ที่อยู่ในตัวกลางแบบก๊าซ (gas phase) ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
2. Csl ในรูปแบบแอโรซอล (aerosol form) ที่อยู่ในตัวกลางแบบก๊าซ (gas phase) ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
3. Csl ที่ละลายอยู่ในของเหลว (ในงานวิจัยนี้คือน้ำ) หรือตกอยู่บนพื้น (ในกรณีที่ไม่มีของเหลวอยู่) ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
4. Csl ในรูปแบบไอ (vapor form) ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
5. Csl ในรูปแบบแอโรซอล (aerosol form) ที่สะสมอยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
6. Csl ในรูปแบบไอ (vapor form) ที่ถูกดูดซึมที่ผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.1 การสะสมของ CsI ในกรณีอ้างอิง

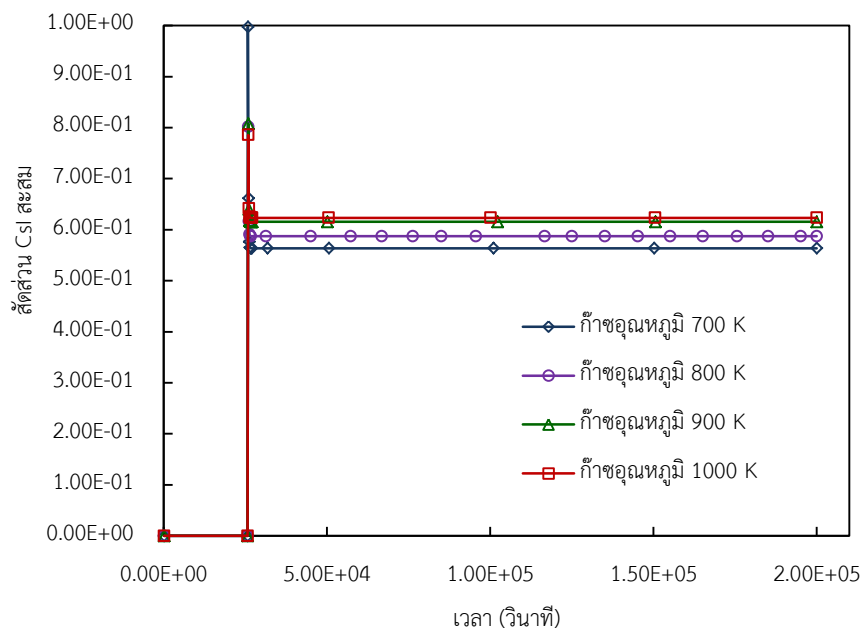
(\* source term เริ่มเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลา 25800 วินาที)

สำหรับกรณีอ้างอิงมีสัดส่วน CsI สะสมทั้งหมดเท่ากับ 0.587 โดยการสะสมส่วนใหญ่เกิดจาก CsI ที่อยู่ในน้ำหรือบนพื้นในขณะที่สัดส่วน CsI รูปแบบแอโรซอลที่สะสมบนผนังมีค่ารองลงมา และแทบไม่มีการสะสมที่เกิดจากการควบแน่นบนผนัง

## 4.2 ผลการศึกษาความไวของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

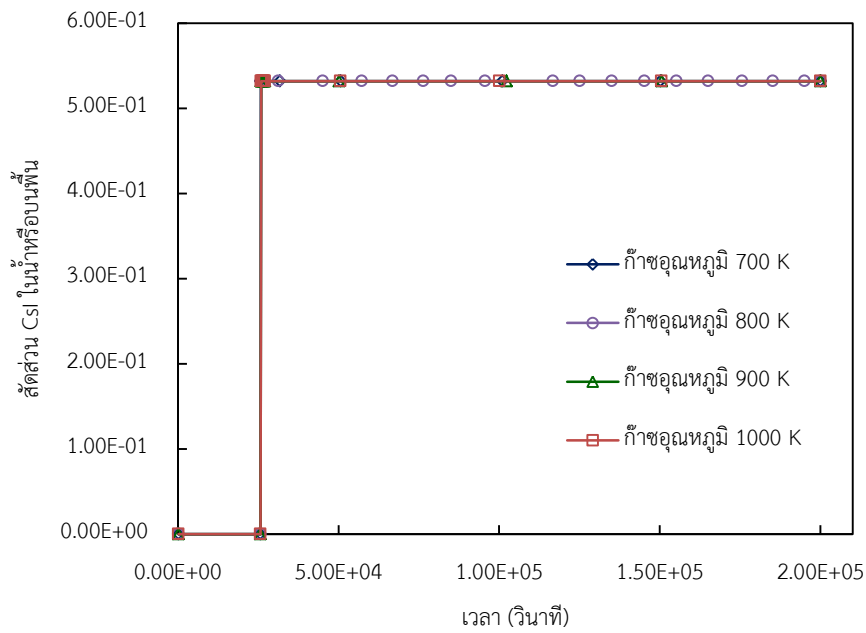
### 4.2.1 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

อุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลต่อการสะสมของ Csl ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แนวโน้มสัดส่วน Csl ที่เก็บกักไว้ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR มีความสอดคล้องกับอุณหภูมิของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเพิ่มมากขึ้นสัดส่วนการเก็บกัก Csl เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสัดส่วนการเก็บกัก Csl โดยส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของ Csl ในน้ำหรือบนพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.3

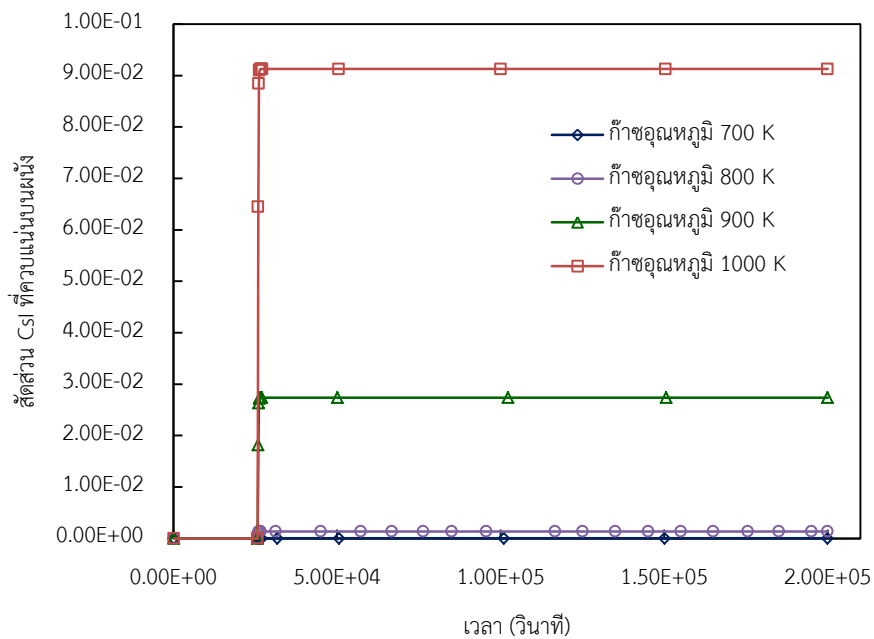


รูปที่ 4.2 สัดส่วน Csl ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

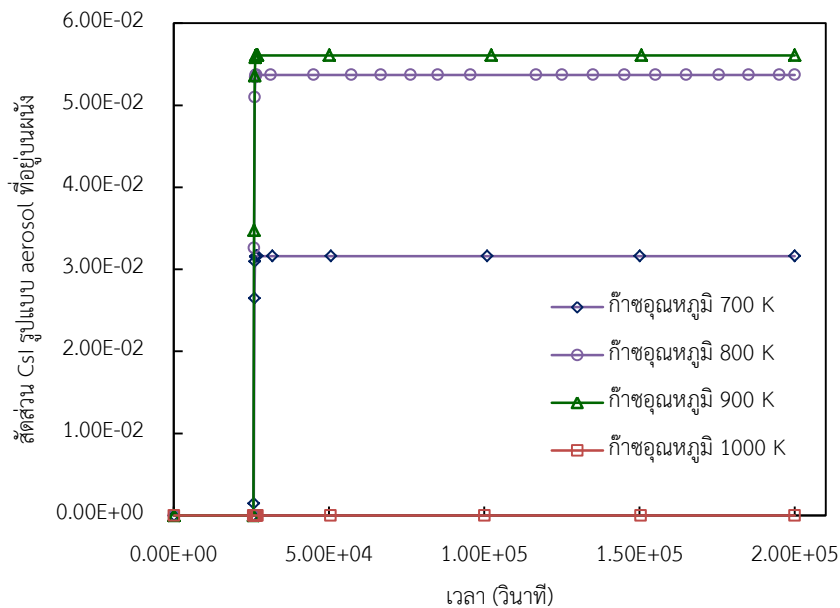
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสัดส่วน Csl ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษามีสัดส่วนการสะสมของ Csl เท่ากันที่ 0.53



รูปที่ 4.3 สัดส่วน Cs1 ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าสภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.4 สัดส่วน Cs1 ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าสภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.5 สัดส่วน CsI แบบแอโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนการเก็บกัก CsI ที่แตกต่างกันภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยที่อุณหภูมิของก๊าซสูง CsI ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีสัดส่วนแนวโน้มสูงขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณ CsI ที่เป็นแอโรซอลที่สะสมบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 1000 K ไม่มีการสะสมของ CsI แบบแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจาก source term ที่ป้อนเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์แบบไอ (vapor form) ที่อุณหภูมิ 1000 K เป็นอุณหภูมิที่สูงที่พอทำให้ไม่มี CsI แบบไอเปลี่ยนไปเป็นแอโรซอลจึงไม่มีการสะสมของแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

จากผลการคำนวณการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุจะพบว่า

- อุณหภูมิของก๊าซส่งผลต่อการสะสมของ CsI ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- เมื่อก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไป การควบแน่นบนผนังของ CsI และการสะสมของ CsI แบบแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อความแตกต่างในการสะสม CsI ทั้งหมด
- เมื่ออุณหภูมิของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สูงจะมีสัดส่วนการควบแน่นสูงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมিরหว่างก๊าซและผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์หากก๊าซมีอุณหภูมิสูงกว่าผนังจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไปสู่ผนังถ้าการคายความร้อนของก๊าซมากเกินไปพอจะส่งผลให้เกิดการควบแน่นของนิวไคลด์ครึ่งสับนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดย

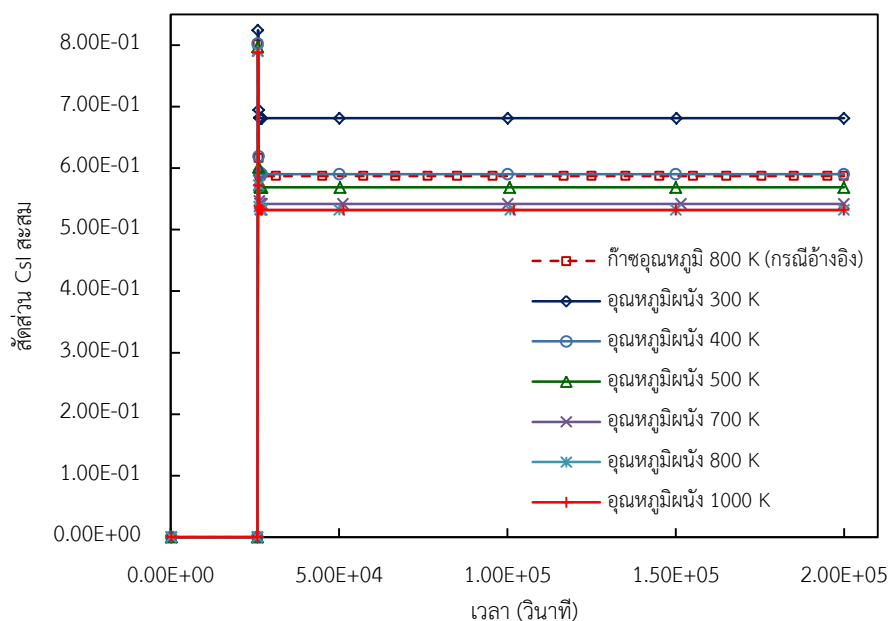


จากสมการการควบแน่น (สมการที่ 2.32) ความเร็วการควบแน่นสำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วในการควบแน่นจะลดลง

- เมื่อก๊าซมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการเกิดแอโรซอลลดลงเนื่องจากไอของ CsI ที่มีอุณหภูมิสูงไม่เปลี่ยนเป็นแอโรซอล
- การสะสมของ CsI แบบแอโรซอลมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิก๊าซและอุณหภูมิของผนังซึ่งโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 400 K มีความแตกต่างกันเพิ่มขึ้นจึงมีค่าการสะสมแอโรซอลเพิ่มขึ้นยกเว้นกรณีที่ก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 1000 K ไม่มีการการสะสมเนื่องจากไม่มีแอโรซอลเกิดขึ้น

#### 4.2.2 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

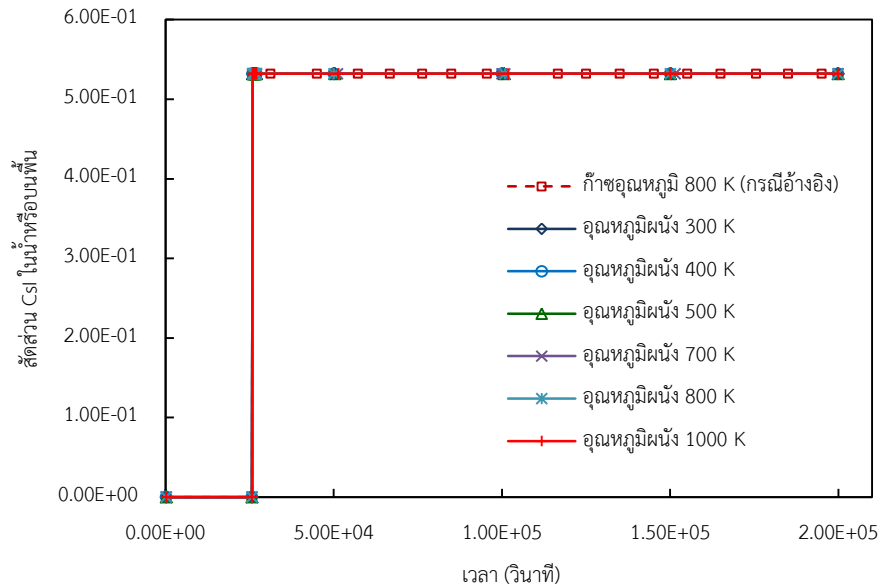
อุณหภูมิผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการสะสมของ CsI เมื่ออุณหภูมิของผนังสูงขึ้นสัดส่วน CsI ที่เก็บกักในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในขณะที่สัดส่วนการเก็บกักส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของ CsI ในน้ำโดยรูปที่ 4.7 แสดงถึงสัดส่วนของการสะสม CsI ในน้ำหรือบนพื้นซึ่งมีค่าเท่ากัน (0.53) ในทุกอุณหภูมิของผนังที่ทำการศึกษา



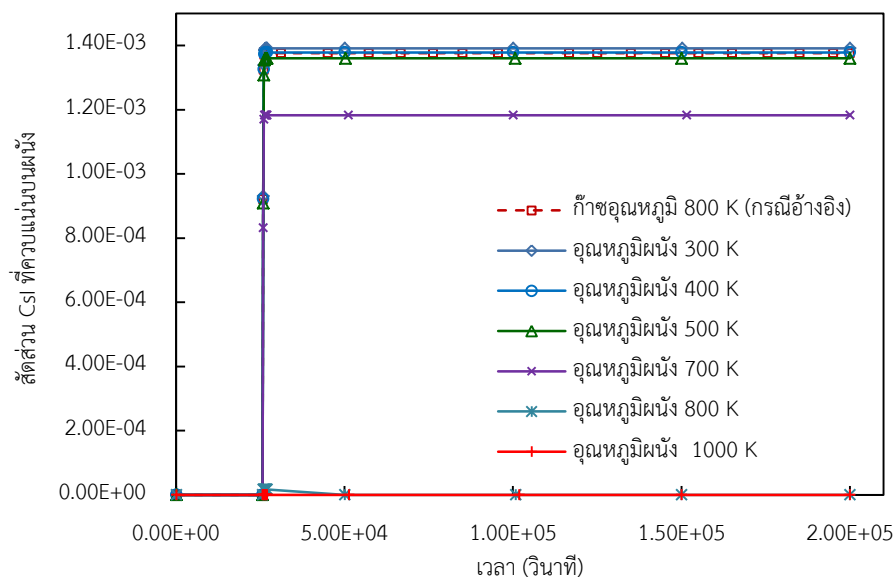
รูปที่ 4.6 สัดส่วน CsI ที่สะสมภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสัดส่วน CsI ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งมีสัดส่วนการเก็บกักที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการเก็บกักที่เกิดในน้ำโดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิ

ผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สูงชันสัดส่วน Csl ที่ควมแน่นมีค่าลดลงโดยที่อุณหภูมิผนัง 800 K และ 1000 K ไม่มีการควมแน่นเนื่องจากไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจาก Csl แบบไอให้แก่ผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

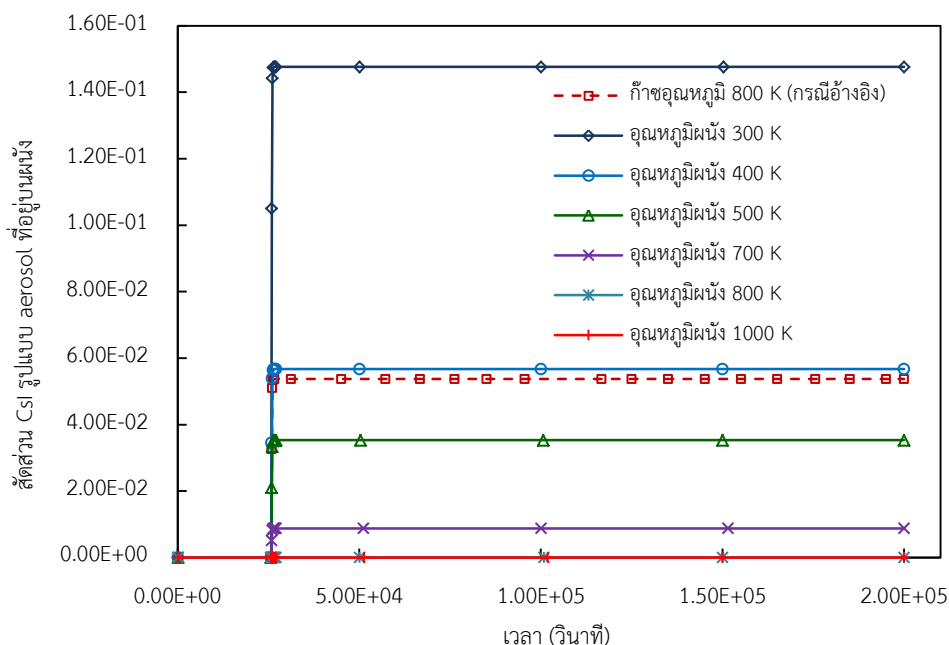


รูปที่ 4.7 สัดส่วน Csl ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.8 สัดส่วน Csl ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

อุณหภูมิของผนังส่งผลต่อการสะสมของ CsI ที่เป็นไอโซลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยที่อุณหภูมิผนังต่ำจะมีไอโซลสะสมสูงกว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงดังแสดงในรูปที่ 4.9 ยกเว้นกรณีที่มีผนังมีอุณหภูมิสูงกว่า 800 K ไม่มีไอโซลสะสมบนผนัง



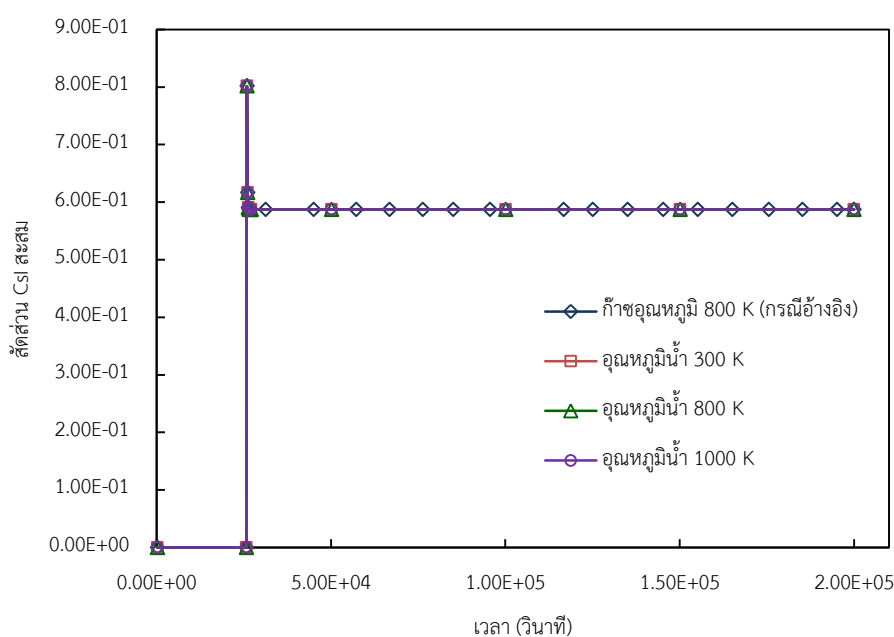
รูปที่ 4.9 สัดส่วน CsI แบบไอโซลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆ ของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

จากผลการจำลองอุบัติเหตุเมื่อมีอุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปจะเห็นได้ว่า

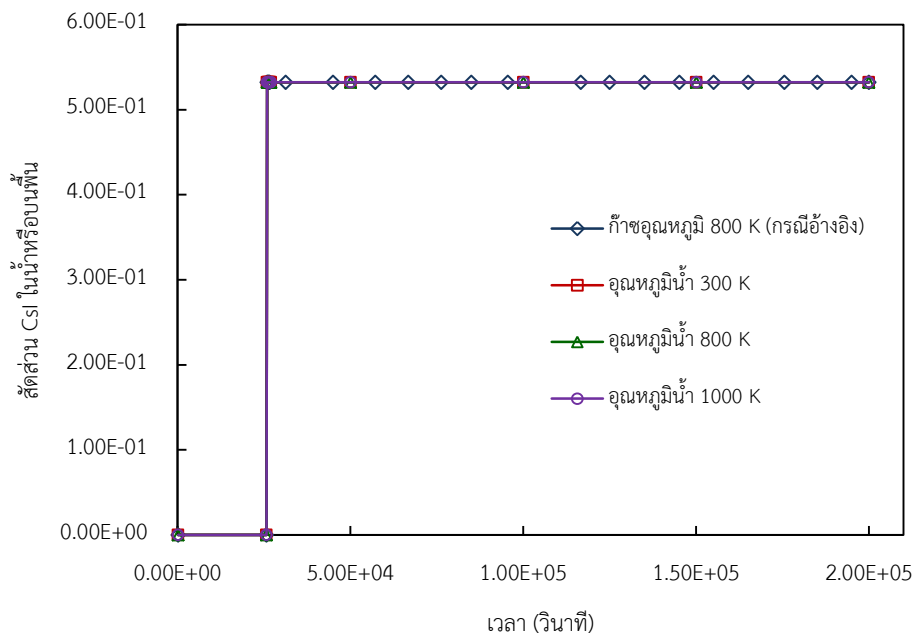
- อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลต่อการสะสมของ CsI ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่แตกต่างกันทำให้สามารถบ่งชี้ได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของ CsI แบบไอโซล คือ Thermophoresis ซึ่งเป็นกลไกที่อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า [23] จากสมการที่ 2.30 และสมการที่ 2.31 Thermophoresis ความเร็วของ Thermophoresis เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเร็วของ Thermophoresis มีค่าลดลงจึงเป็นสาเหตุของการสะสมของไอโซลที่ลดลงเมื่อผนังมีอุณหภูมิสูงขึ้น และหากอุณหภูมิผนังมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ความเร็วของ Thermophoresis จะมีค่าเป็น 0 จึงไม่มีการสะสมตัวของไอโซลบนผนังเมื่อผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเท่ากันหรือสูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซ

#### 4.2.3 ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

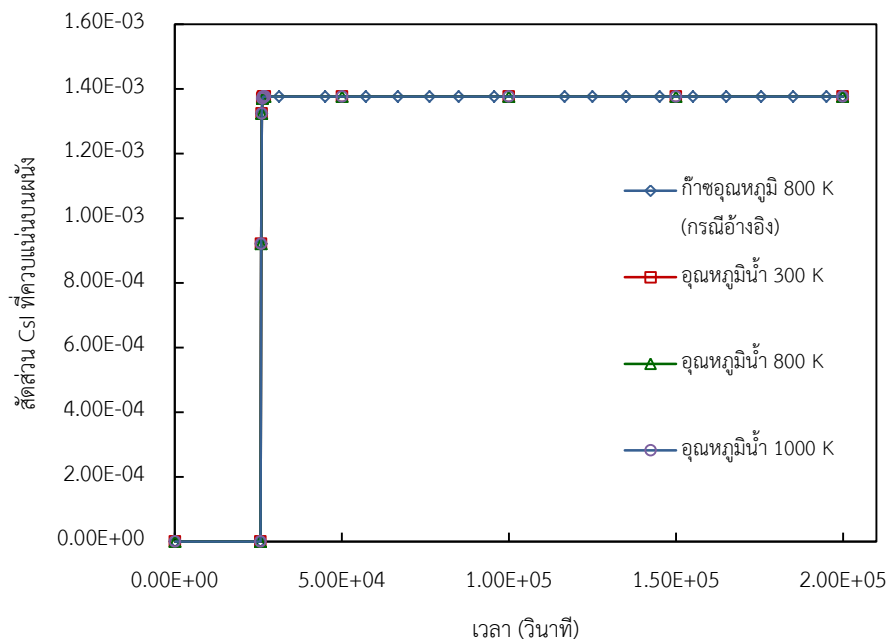
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ต่อการสะสม Csi ไว้ภายใน พบว่าอุณหภูมิของน้ำไม่มีผลต่อการเก็บสะสม Csi ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยการสะสม Csi ภายในน้ำหรือบนพื้นของทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษามีความสามารถในการสะสม Csi ได้มากที่สุด (0.53) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยผลของการสะสม Csi แบบแอโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์แสดงในรูปที่ 4.12 และการควบแน่นของ Csi บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในรูปที่ 4.13 ส่งผลให้ค่าการสะสมรวมมีความแตกต่างจากการสะสมภายในน้ำหรือบนพื้นเล็กน้อยโดยผลของการควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีค่าน้อยมาก จากผลการคำนวณการจำลองอุบัติเหตุเตาอาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิของน้ำภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีผลต่อความแตกต่างในการสะสม Csi



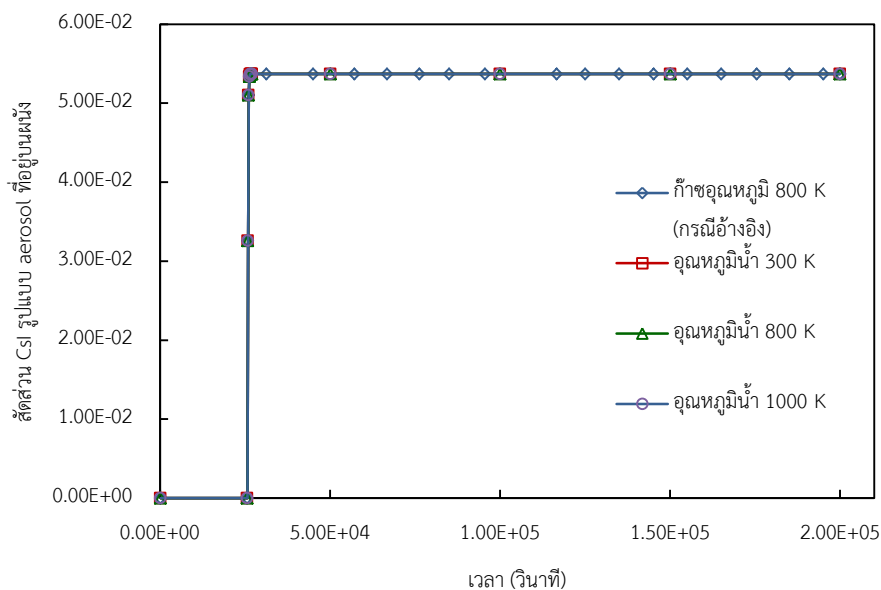
รูปที่ 4.10 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆของน้ำภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.11 สัดส่วน CsI ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆของน้ำภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



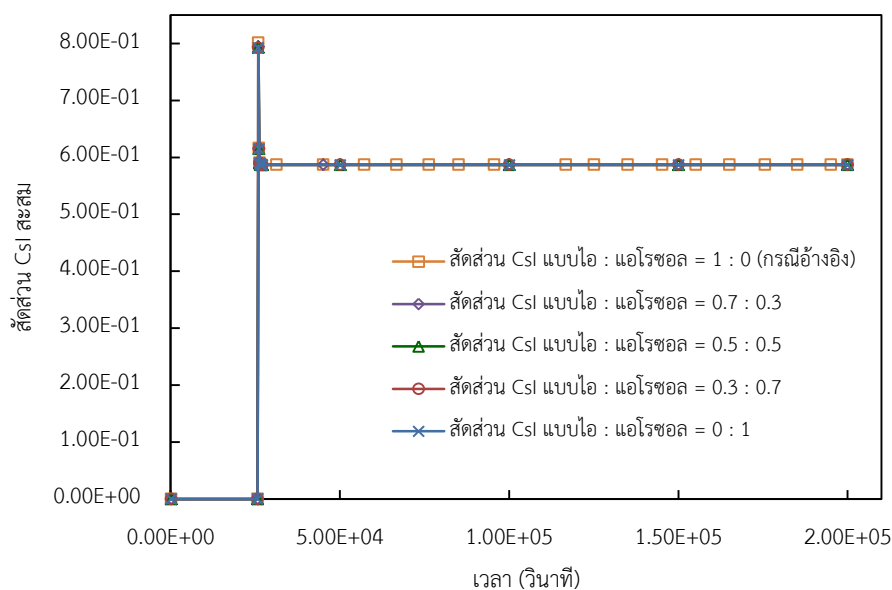
รูปที่ 4.12 สัดส่วน CsI ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆของน้ำภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



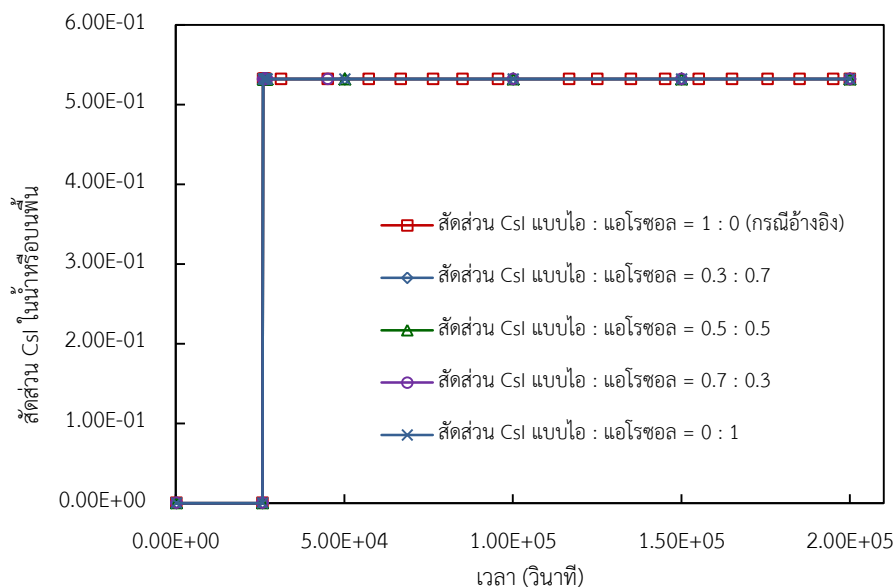
รูปที่ 4.13 สัดส่วน CsI แบบแอโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อุณหภูมิต่างๆของน้ำภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

#### 4.2.4 ผลการคำนวณที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (CsI) ที่เป็นไอต่อแอโรซอลต่างๆ

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 พบว่าการสะสมของ CsI ของสัดส่วน source term ในทุกกรณีที่ศึกษามีค่าใกล้เคียงจนเกือบเท่ากันโดยสัดส่วนการสะสมของ CsI ส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมในน้ำหรือบนพื้น

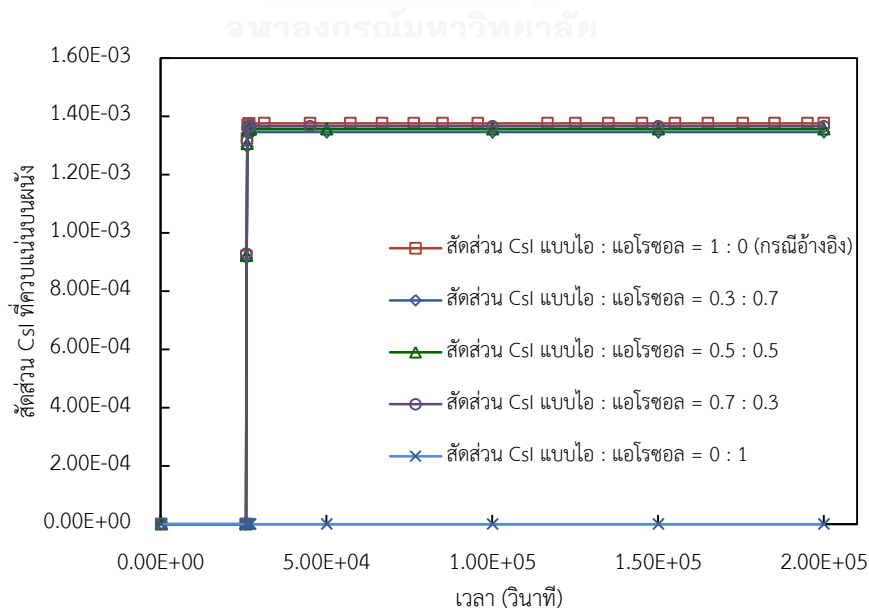


รูปที่ 4.14 สัดส่วน CsI ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (CsI form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอลที่แตกต่างกัน

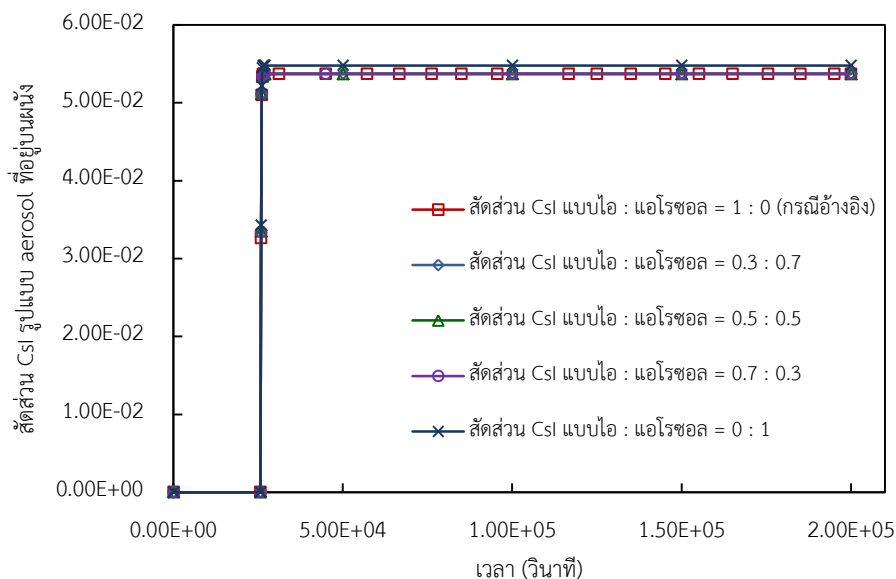


รูปที่ 4.15 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csi form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอลที่แตกต่างกัน

สัดส่วน Csi จากการควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนไอกับแอโรซอลดังแสดงในรูปที่ 4.16 ยกเว้นกรณีที่ source term เป็นแอโรซอลทั้งหมด เนื่องจากการควบแน่นเกิดจาก Csi ที่มีรูปแบบไอน้ำเท่านั้น สำหรับการสะสมของแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในรูปที่ 4.17 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนที่ทำการศึกษาโดยสัดส่วนที่เป็นแอโรซอลทั้งหมดจะมีการสะสมที่ผนังมากกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.16 สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csi form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 สัดส่วน CsI แบบแอรอสอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ที่อัตราส่วนรูปแบบของ source term (CsI form) ที่เป็นไอต่อแอรอสอลที่แตกต่างกัน

จากผลการจำลองเหตุการณ์เมื่อมีสัดส่วนรูปแบบ CsI ที่เป็นไอต่อแอรอสอลภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันจะพบว่า

- สัดส่วนรูปแบบของ source term (CsI form) ที่เป็นไอต่อแอรอสอลมีผลน้อยมากต่อการสะสมของ CsI
- ความแตกต่างส่วนใหญ่ของการสะสม CsI เกิดจากการสะสมของแอรอสอลบนผนังซึ่งสัดส่วนที่มีแอรอสอลมากจะมีแอรอสอลเกาะที่ผนังมากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณของแอรอสอลที่แตกต่างกัน

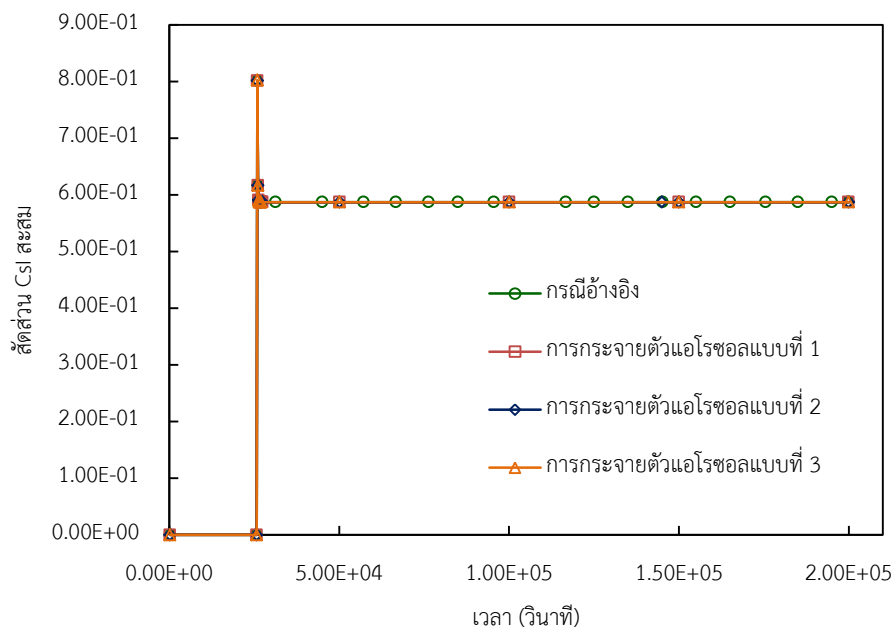
#### 4.2.5 ผลการคำนวณเมื่อแอรอสอลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของแอรอสอลที่เกิดขึ้นจาก Source term ต่อการสะสม CsI ไว้ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์พบว่า การกระจายตัวของแอรอสอลมีผลต่อการสะสม CsI ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์น้อยมากจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

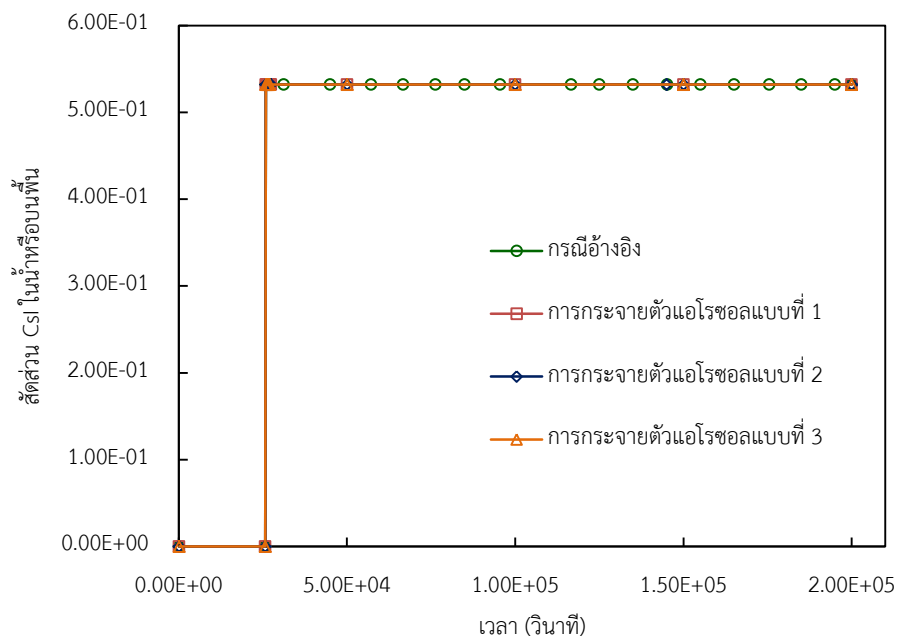
การสะสม CsI ส่วนใหญ่เกิดจาก CsI ที่ละลายอยู่ในน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.19 สำหรับการควบแน่นของ CsI บนผนังพบว่ามีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.21 แสดงการสะสมของ CsI ที่เป็นแอรอสอลบนผนังโดยการสะสมของ CsI บนผนังของการกระจายตัวแบบที่ 1 มีค่ามากกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย

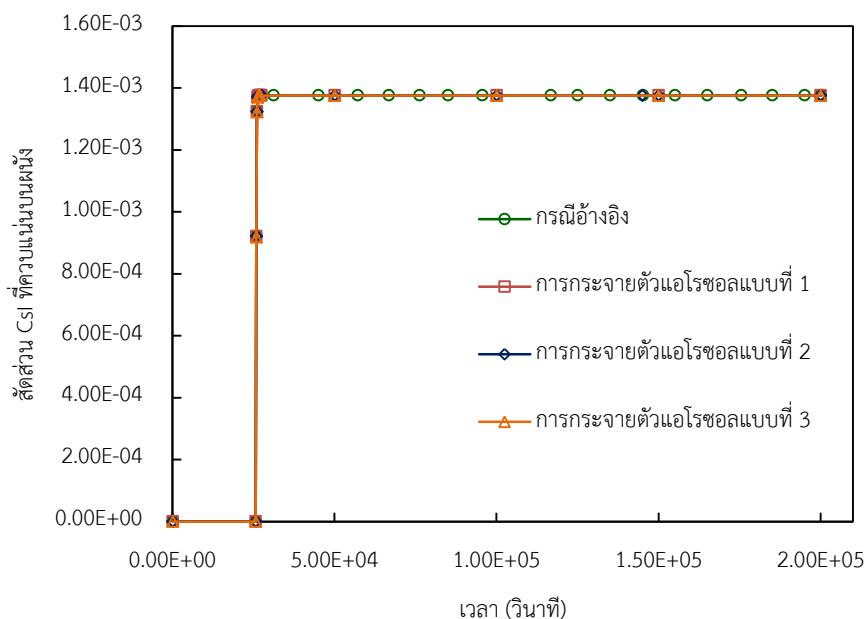




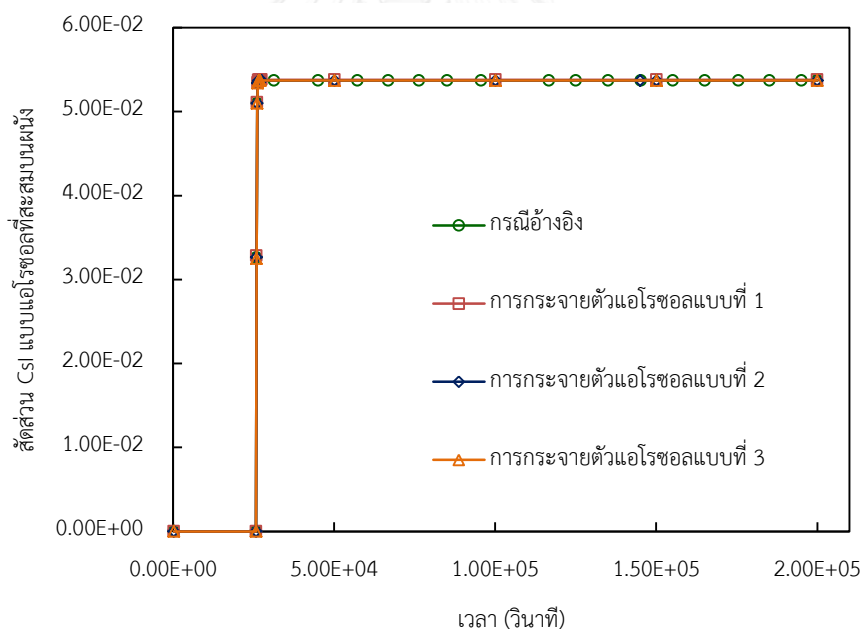
รูปที่ 4.18 สัดส่วน CsI ที่สะสมภายในคลุ่มเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแไอโซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน



รูปที่ 4.19 สัดส่วน CsI ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุ่มเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแไอโซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน



รูปที่ 4.20 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแอรโซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน



รูปที่ 4.21 สัดส่วน Csi แบบแอรโซลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อแอรโซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน

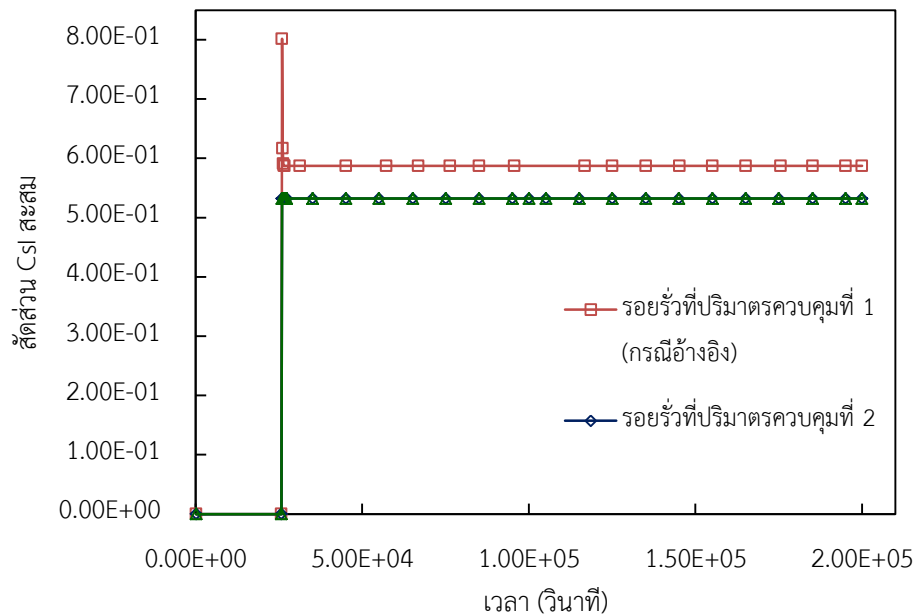
จากผลการจำลองเหตุการณ์เมื่อแอรโซลมีการกระจายตัวของมวลต่างกันพบว่า

- การกระจายตัวของมวลแอรโซลแทบไม่มีผลต่อการสะสม Csi

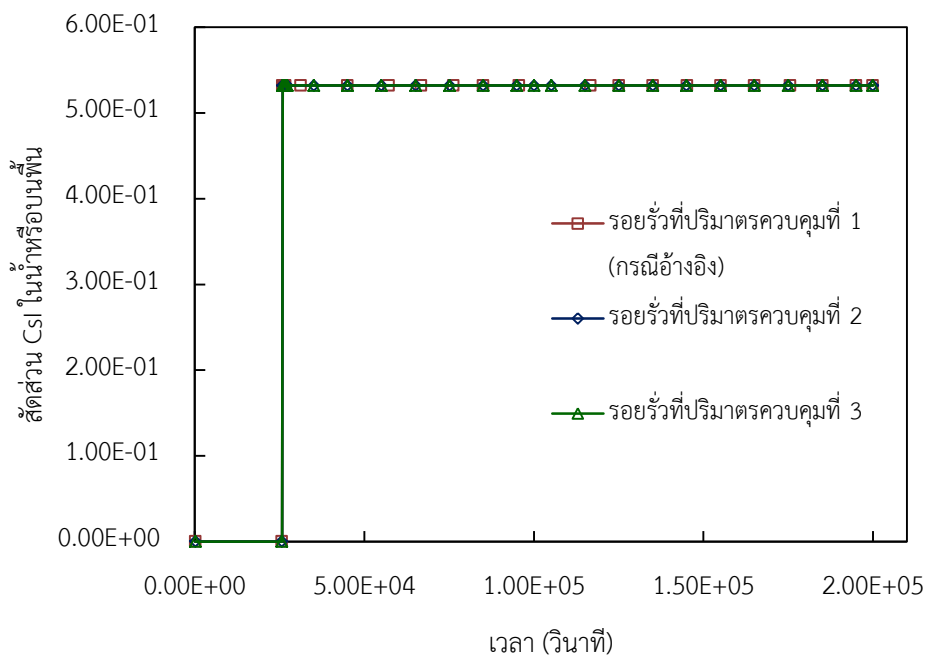
- การสะสม Csi ที่เป็นแอรโซลบนผนังส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการสะสม Csi รวมแต่เนื่องจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่พิจารณามีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการกระจายตัวและขนาดของแอรโซลที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้การสะสม Csi บนผนังซึ่งเกิดจาก Thermophoresis มีผลต่อการสะสมที่เปลี่ยนไปน้อยมากๆ



#### 4.2.6 ผลการคำนวณเมื่อตำแหน่งบริเวณที่เกิดรอยร้าวระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และ สิ่งแวดล้อมต่างกัน

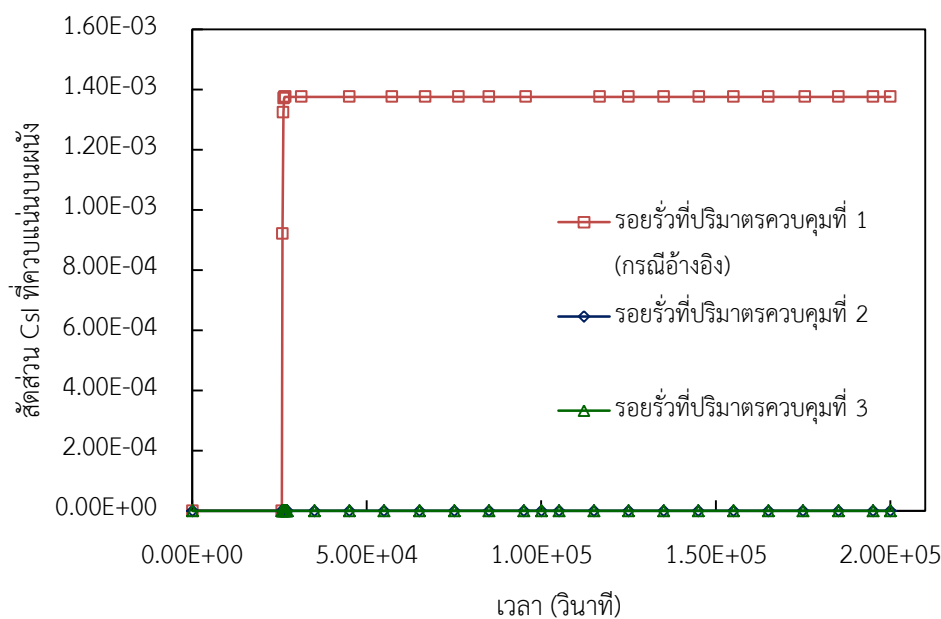


รูปที่ 4.22 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยร้าวระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน

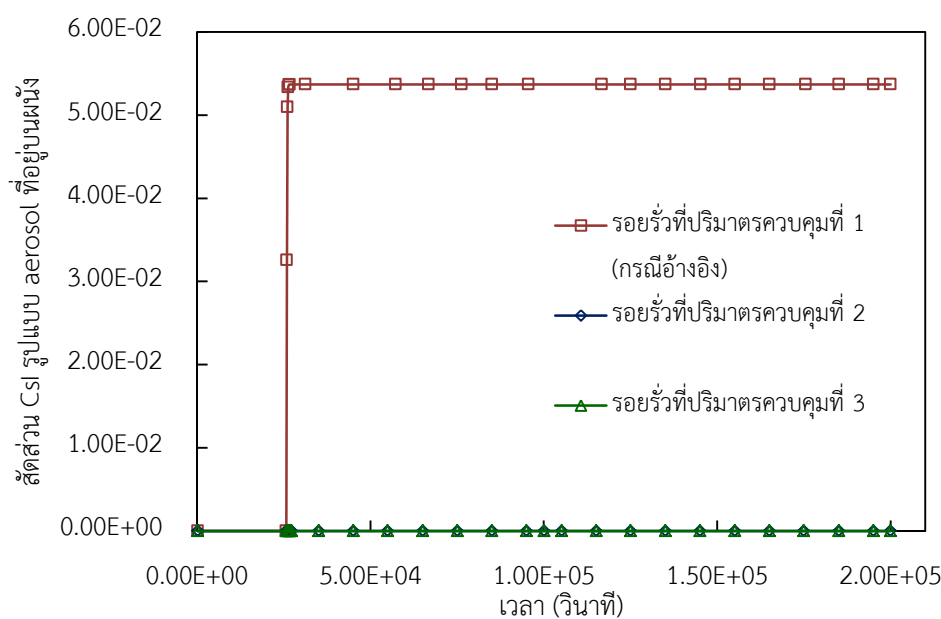


รูปที่ 4.23 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยร้าวระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีผลต่อการสะสม Csi ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยรอยร้าวที่เกิดบริเวณปริมาตรที่ 1 มีค่าการสะสม Csi มากที่สุดในขณะที่รอยร้าวที่เกิดบริเวณปริมาตรที่ 2 และ 3 มีการสะสม Csi เท่ากัน โดยการสะสมส่วนใหญ่เกิดจากการสะสม Csi ในน้ำหรือบนพื้นตามรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.24 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนพื้นผิวดังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยร้าวระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน



รูปที่ 4.25 สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลที่อยู่บนพื้นผิวดังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อตำแหน่งรอยร้าวระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมต่างกัน

การสะสม Csl ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเกิดรอยรั่วบริเวณปริมาตรที่ 1 มีการควบแน่น และมีการสะสม Csl แบบแอโรซอลมากที่สุดดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 โดยความแตกต่างในการสะสม Csl ทั้งหมดเกิดจากการสะสมของทั้งสองส่วนนี้

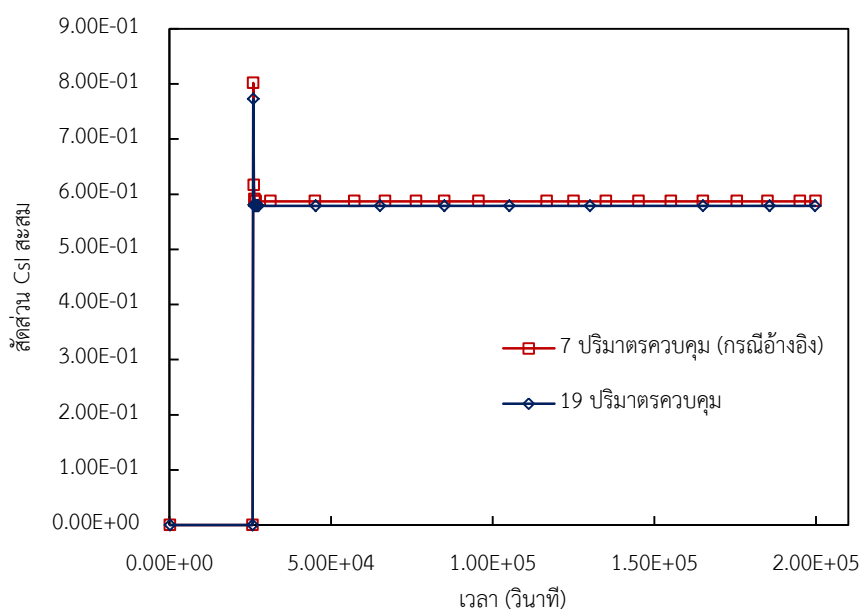
จากผลการคำนวณเมื่อบริเวณที่เกิดรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไป

- บริเวณที่เกิดรอยรั่วมีผลต่อการสะสมของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยการสะสม Csl ในกรณีเกิดรอยรั่วที่ปริมาตรที่ 1 มีค่ามากที่สุด ในขณะที่การสะสม Csl ในกรณีเกิดรอยรั่วที่ปริมาตรที่ 2 และ 3 มีค่าเท่ากันโดยความแตกต่างระหว่างการรั่วที่ปริมาตรที่ 1 กับปริมาตรที่ 2 และ 3 คือการควบแน่นและการสะสมแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยกรณีเกิดรอยรั่วที่ปริมาตรที่ 2 และ 3 ไม่มีการควบแน่นและการสะสมของแอโรซอลเลยซึ่งอาจเกิดจากการเงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม

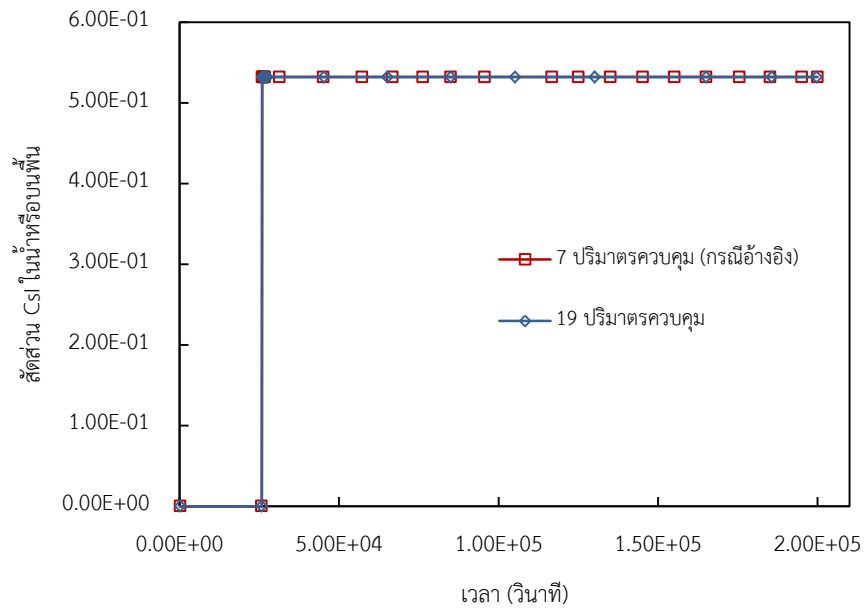


#### 4.2.7 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จาก 7 ปริมาตรควบคุมเป็น 19 ปริมาตรควบคุม

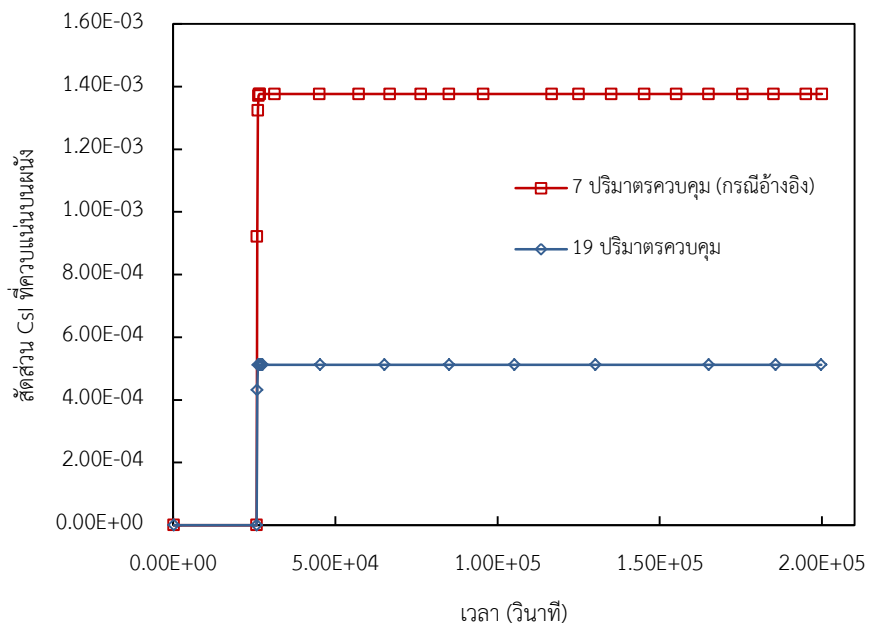
การสะสมรวมของ Csi ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่มีปริมาตรควบคุมมากขึ้นมีค่าลดลงเล็กน้อยดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.26 ซึ่งสัดส่วนการสะสมหลักเกิดจากการสะสมในน้ำหรือบนพื้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาดั้วแปรอื่นๆ ที่ผ่านมา (อุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และ อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csi form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอล) โดยความแตกต่างของสัดส่วน Csi สะสมที่ลดลงนี้เป็นผลจากการลดลงของ Csi แบบแอโรซอลที่สะสมบนผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ในขณะที่การควบคุมของ Csi ส่งผลต่อการลดลงของการสะสมรวมเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.26 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

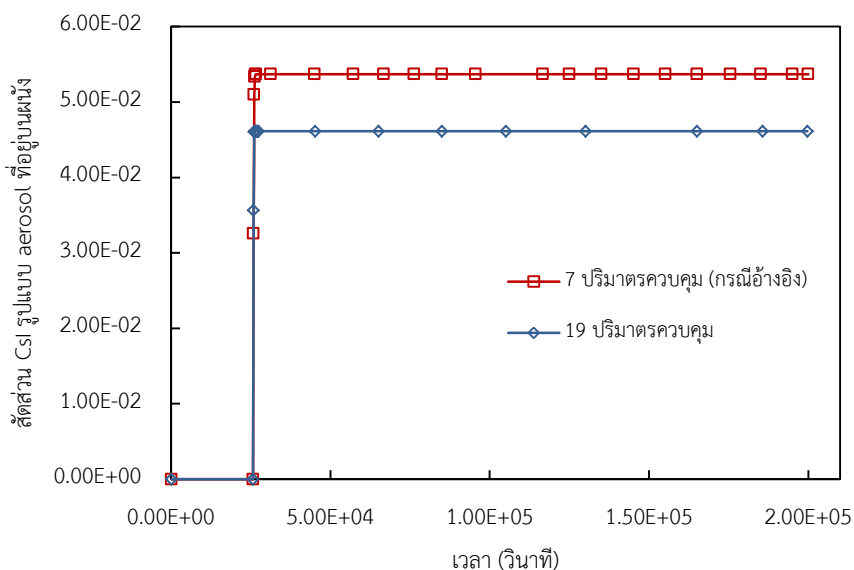


รูปที่ 4.27 สัดส่วน CsI ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.28 สัดส่วน CsI ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์





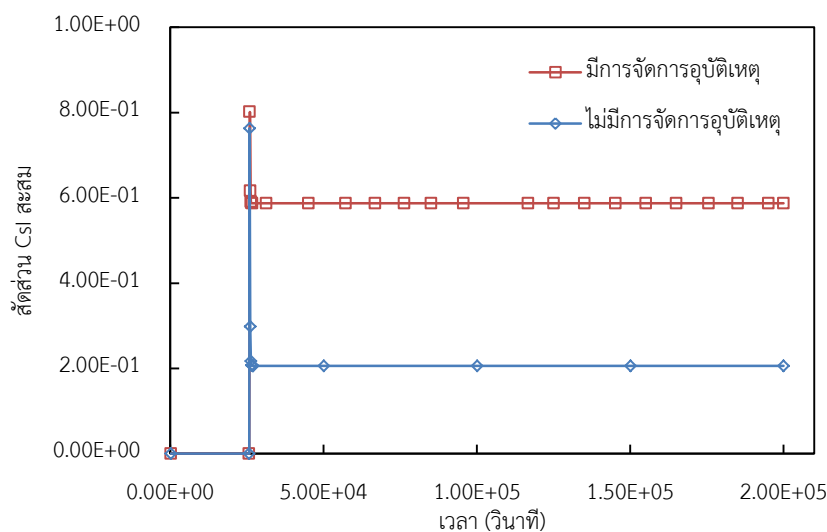
รูปที่ 4.29 สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อเปลี่ยน Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

จากผลการคำนวณการเปลี่ยน Nodalization พบว่า

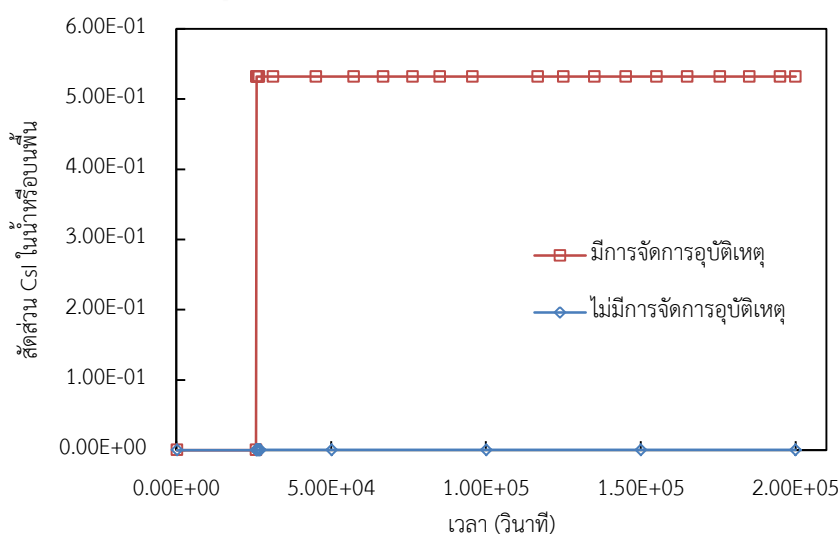
- การเปลี่ยน Nodalization ให้ละเอียดขึ้นมีผลต่อการสะสม Csi
- ค่าการสะสม Csi เปลี่ยนไปเป็นผลจากการลดลงของ Csi แบบแอโรซอลที่สะสมบนผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลักโดยมีสาเหตุจากการแบ่งปริมาตรควบคุมที่มากขึ้นส่งผลต่อตำแหน่งการปลดปล่อย source term จากถังปฏิกรณ์สู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีขอบเขตที่ลดลงคือจากตำแหน่งปริมาตรควบคุมที่ 2 มาอยู่ที่ปริมาตรควบคุมที่ 5 ใน 19 ปริมาตรควบคุมซึ่งเป็นตำแหน่งช่วงกลางของปริมาตรที่ 2 ในทั้งหมด 7 ปริมาตรควบคุม อีกทั้งช่วงของระดับน้ำที่สามารถแบ่งแยกได้ละเอียดขึ้นทำให้ตำแหน่งในการตั้งสมมติฐานในเรื่องของอุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไปเกิดการสะสม Csi จึงเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุที่มีการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสี โดยหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมี และไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

จากรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุสัดส่วนการเก็บกัก Csi จะมากกว่าเมื่อไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ โดยเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุจะสามารถเก็บสะสม Csi ที่มากกว่าไม่มีการจัดการอุบัติเหตุประมาณ 2.85 เท่า ซึ่งความแตกต่างเกิดขึ้นจาก Csi ที่สะสมในน้ำหรือบนพื้นที่แสดงในรูปที่ 4.31 ของกรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการจัดการอย่างชัดเจน

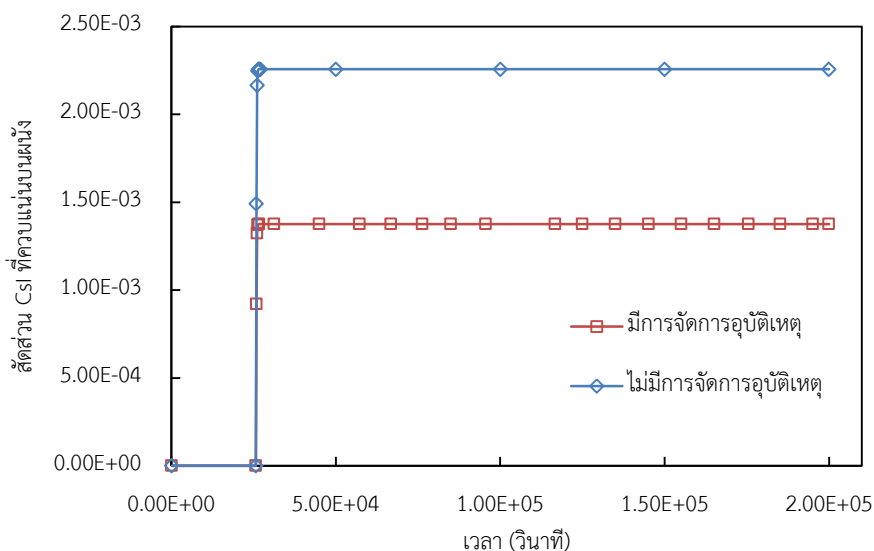


รูปที่ 4.30 สัดส่วน Csi ที่สะสมภายในคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

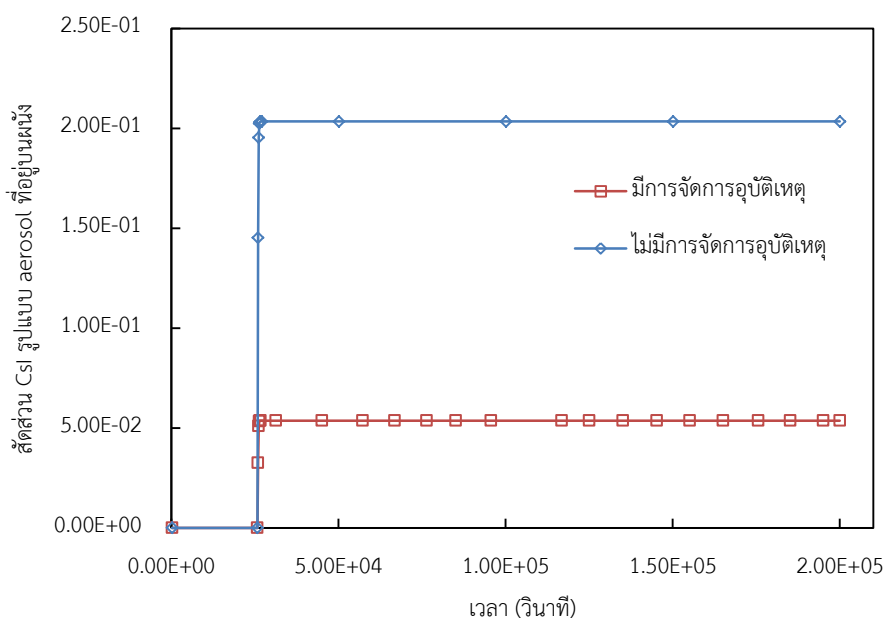


รูปที่ 4.31 สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งพบว่าการสะสม Csi ในส่วนนี้มีค่าเล็กน้อยจึงเมื่อเปรียบเทียบกับการสะสมรวมในขณะที่ รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วน Csi แบบแโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยพบว่าผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่มีการจัดการอุบัติเหตุมี Csi ที่เป็นแโรซอลสะสมอยู่มากกว่ากรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ



รูปที่ 4.32 สัดส่วน Csi ที่ควมแน่นบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ



รูปที่ 4.33 สัดส่วน Csi แบบแโรซอลที่อยู่บนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR เมื่อมีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

จากการเปรียบเทียบผลของการจำลองอุบัติเหตุ BYP ของกรณีที่มีและไม่มีการจัดการอุบัติเหตุพบว่า

#### เมื่อไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

- การสะสม Csi ส่วนใหญ่เกิดจากการสะสม Csi แบบแอโรซอลที่ผนังโดยมีสัดส่วนการสะสมมากกว่ากรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ การสะสมที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากพื้นที่ผิวของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุมีมากขึ้นจากพื้นที่ผนังในปริมาตรควบคุมที่ 4-7 ที่ไม่มีน้ำปกคลุมซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.23 คือเมื่อพื้นที่ผิวโครงสร้างมากขึ้นอัตราการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเพิ่มขึ้น
- Csi ที่สะสมบนพื้นมีรูปแบบเป็นแอโรซอลโดยการสะสมเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ปริมาณการสะสม Csi บนพื้นมีค่าน้อยเนื่องจากอนุภาคของ Csi มีขนาดเล็กและไอน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีแขวนลอยอยู่มีอัตราการไหลขึ้นสู่ด้านบนซึ่งมีสวนทิศกับแรงโน้มถ่วง

#### เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ

- การจัดการอุบัติเหตุด้วยการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถเก็บสะสม source term ซึ่งในที่นี้คือ Csi ไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุได้ถึง 2.85 เท่า
- การสะสม Csi ส่วนใหญ่เกิดจาก Csi ที่ปล่อยเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ปริมาตรควบคุมที่ 7 ละลายอยู่ในน้ำ เนื่องจาก Csi มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี จากการทดลองพบว่า Csi ทั้งหมดละลายอยู่ในปริมาตรที่ 7 ทั้งหมดและไม่มีการเคลื่อนย้ายไปยังปริมาตรควบคุมอื่นเนื่องจากไม่มีการไหลของน้ำพานิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ไปยังปริมาตรควบคุมอื่นโดยสมการ 2.21 การขนส่งของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำ จะเห็นว่าเมื่อไม่มีอัตราการไหลของของเหลว อัตราการส่งผ่าน Csi ในของเหลวมีค่าเป็น 0 ซึ่งในความเป็นจริงนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ด้วยการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

#### 4.4 สรุปผลของตัวแปรต่อการสะสม Csi

ตารางที่ 4.1 ผลของตัวแปรที่มีต่อการสะสม Csi

เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ	การสะสม Csi เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น
<b>อุณหภูมิก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์</b>	เพิ่มขึ้น
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	เพิ่มขึ้น
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	เพิ่มขึ้น
<b>อุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์</b>	ลดลง
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	ลดลง
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	ลดลง
<b>อุณหภูมิของน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์</b>	คงที่
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	คงที่
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	คงที่
<b>สัดส่วน Csi ที่เป็นไอต่อแอโรซอล</b>	<b>เมื่อมีแอโรซอลเพิ่มขึ้น</b>
สัดส่วน Csi สะสมทั้งหมด	คงที่
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	ลดลงเล็กน้อย
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
<b>แอโรซอลมีการกระจายตัวของมวลต่างกัน</b>	<b>การกระจายตัวของมวลเปลี่ยนไป</b>
สัดส่วน Csi สะสมทั้งหมด	เปลี่ยนแปลงน้อยมาก
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	คงที่
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	เปลี่ยนแปลงน้อยมาก
<b>ตำแหน่งรอยรั่ว</b>	<b>ตำแหน่งรอยรั่วเปลี่ยนไป</b>
สัดส่วน Csi สะสมทั้งหมด	เปลี่ยนแปลง
สัดส่วน Csi ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csi ที่ควบแน่นบนผนัง	เปลี่ยนแปลง
สัดส่วน Csi แบบแอโรซอลบนผนัง	เปลี่ยนแปลง

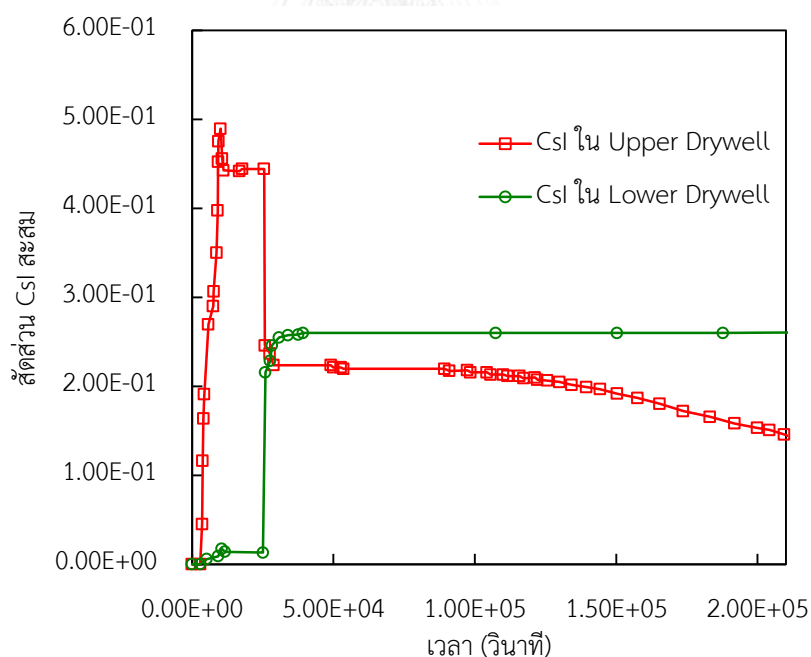
เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ	การสะสม Csl เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น
Nodalization	เมื่อ Nodalization ละเอียดขึ้น
สัดส่วน Csl สะสมทั้งหมด	ลดลง
สัดส่วน Csl ในน้ำหรือบนพื้น	คงที่
สัดส่วน Csl ที่ควบแน่นบนผนัง	ลดลง
สัดส่วน Csl แบบแอโรซอลบนผนัง	ลดลง

โดยในการศึกษาความไว (sensitivity study) สามารถสรุปตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การสะสม Csl ตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้

1. ตำแหน่งรอยรั่ว
2. อุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
3. อุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
4. Nodalization
5. ขอบเขตช่วงการกระจายตัวของมวลแอโรซอล
6. สัดส่วนรูปแบบ Csl
7. อุณหภูมิของน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

#### 4.5 การสะสม Csi เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุจากการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod2 และผลของโปรแกรม MAAP

จากรูปที่ 3.34 แสดงให้เห็นสัดส่วนการสะสมของ Csi ใน upper drywell และ lower drywell จากผลของการวิเคราะห์ source term ของการรั่วไหลแบบ BYP ด้วยโปรแกรม MAAP โดยที่เวลา 25800 วินาทีซึ่งเป็นเวลาที่เริ่มมีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และเวลาที่งานวิจัยนี้เริ่มพิจารณาเหตุการณ์ ปริมาณ Csi ที่สะสมใน lower drywell มีค่าคงที่ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า Csi ที่อยู่ใน lower drywell ทั้งหมดละลายอยู่ในน้ำทำให้เมื่อเวลาผ่านไปไม่มีการเปลี่ยนแปลง สัดส่วนการสะสม Csi ส่วนการสะสมใน upper drywell มีค่าคงที่ในช่วงต้นและค่อยๆลดลงหลังเวลาประมาณ 90000 วินาทีซึ่งการลดลงอาจเกิดจากการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมในขณะที่ผลการคำนวณของงานวิจัยนี้มีสัดส่วนการสะสม Csi ที่ละลายในน้ำซึ่งเป็นบริเวณ lower drywell มีค่าคงที่เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MAAP แต่การสะสมในส่วนของ upper drywell มีความแตกต่างโดยผลการคำนวณจากโปรแกรม ART Mod2 การสะสมจะลดลงอย่างรวดเร็วในทันทีดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องมาจากการตั้งสมมติฐานเพื่อลดความซับซ้อนในการจำลองอุบัติเหตุของการวิจัยซึ่งยังอยู่ในขั้นตอนเบื้องต้น



รูปที่ 4.34 สัดส่วน Csi ที่สะสมอยู่ใน Drywell จากผลการคำนวณของโปรแกรม MAAP

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาบทนี้ประกอบด้วยสรุปผลการศึกษาคณาจารย์ซึ่งเชื่อมโยงไอไอโอดี (Csi) ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ภายใต้การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงซึ่งทำให้เกิดการหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Containment Bypass, BYP) โดยการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2 โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการอุบัติเหตุซึ่งสามารถช่วยลดการรั่วไหลของ Csi ที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังทำให้เกิดความเข้าใจการพฤติกรรมของ Csi และการตอบสนองต่อตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาคณาจารย์นิวเคลียร์อื่นๆ และการเตรียมมาตรการการจัดการเมื่อเกิดอุบัติเหตุ รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงงานวิจัยที่จะมีต่อไปในอนาคต

#### 5.1 สรุปผล

ในอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีโอกาสที่แกนปฏิกรณ์จะหลอมเหลว และหากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นเครื่องขวางกั้นสำคัญสุดท้ายที่ป้องกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมเกิดรอยรั่ว สารกัมมันตรังสีจะรั่วไหลส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง การศึกษาพฤติกรรมของ source term ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ช่วยจำกัดการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์ขั้นออกสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้จำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุระดับรุนแรงซึ่งทำให้เกิดการหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (Containment Bypass, BYP) ซึ่งเป็นการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีในสภาวะที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่ถูกทำให้แยกออกจากสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการทำงานของ Containment Isolation System (CIS) ล้มเหลวโดยสมมติว่าอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่สามารถกีดขวางนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากการเริ่มเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ART Mod2 ในการจำลองเหตุการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Source term ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการจำลองเหตุการณ์เป็นเวลา 20000 วินาที โดยการจำลองอุบัติเหตุอยู่ในขั้นตอนเบื้องต้นจึงพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีเฉพาะ Csi และอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เฉพาะส่วน drywell ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR โดยใช้ข้อมูล Thermal hydraulic จากผลการคำนวณของโปรแกรม MAAP และโปรแกรม RELAP5MOD3.3

ในการจำลองอุบัติเหตุจะแบ่ง Nodalization ของ ESBWR ออกเป็น 7 ปริมาตรควบคุมโดยสมมติให้ source term เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 2 ตำแหน่งเพื่อลดความซับซ้อนในการจำลองเหตุการณ์ ตำแหน่งแรกอยู่บริเวณปริมาตรควบคุมที่ 2 และตำแหน่งที่สองอยู่ ณ ปริมาตรควบคุมที่ 7



และเริ่มพิจารณาเหตุการณ์เมื่อมีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์คือที่เวลา 25800 วินาที และกำหนดให้ก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ตลอดการจำลองอุบัติเหตุที่ 800 K เป็นกรณีอ้างอิง โดยจะแบ่งการจำลองเหตุการณ์ออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การจำลองอุบัติเหตุเมื่อไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ และ 2. การจำลองอุบัติเหตุเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุโดยการจัดการอุบัติเหตุที่ใช้คือการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในส่วนของจัดการอุบัติเหตุนี้จะทำการศึกษาความไวของตัวแปรซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, ขอบเขตช่วงการกระจายตัวตามมวลของแอโรซอล, อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csl form) รูปแบบที่ไต่ต่อแอโรซอล, บริเวณที่เกิดรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อม และ Nodalization ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ แล้วทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเมื่อมีการจัดการ และไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ ผลความไวของตัวแปรต่อการสะสม Csl ในกรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดการอุบัติเหตุด้วยการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถเก็บสะสม source term ซึ่งในที่นี้คือ Csl ไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุได้ถึง 2.85 เท่า ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นผลจากในกรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุการเก็บกักส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของ Csl ในน้ำหรือบนพื้นซึ่งการจัดการอุบัติเหตุที่ศึกษาคือการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ดังนั้น Csl จึงถูกสะสมอยู่ในแบบที่เป็นการละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุที่ไม่มีน้ำอยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นการสะสม Csl กรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุจึงเป็นการสะสมอยู่บนพื้นอันเนื่องมาจากการกระทำของแรงโน้มถ่วงของโลกแทนที่จะละลายอยู่ในน้ำโดย Csl ที่สะสมบนพื้นมีรูปแบบเป็นแอโรซอล เนื่องจากอนุภาคของ Csl มีขนาดเล็กและไอน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีอยู่มีอัตราการไหลขึ้นสู่ด้านบนทำให้การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนพื้นมีค่าน้อยมากและในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุที่มีการสะสมของ Csl ในรูปแบบแอโรซอลที่ผนังเป็นส่วนใหญ่โดยมีสัดส่วนการสะสมมากกว่ากรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุเนื่องจากพื้นที่ผิวของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุมีมากขึ้นเพราะพื้นที่ผนังในปริมาตรควบคุมที่ 4-7 ที่ไม่มีน้ำปกคลุมโดยมีพื้นที่มากกว่าอยู่ 669.66 ตารางเมตร ทำให้มีพื้นที่ผนังในการสะสม Csl มากกว่า อย่างไรก็ตามการสะสมของแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ไม่มากพอจะเทียบเท่าการสะสมของกรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ ดังนั้นการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จึงเป็นการจัดการอุบัติเหตุที่มีประสิทธิภาพในลดการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกสู่ภายนอก

เมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุโดยการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าอุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิของน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, อัตราส่วนรูปแบบของ

source term (Csl form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอล และ Nodalization เปลี่ยนแปลงไป พบว่าไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการศึกษาใดๆ การสะสมของ Csl ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ส่วนใหญ่ เกิดจากการสะสมในน้ำหรือบนพื้นในทุกกรณีศึกษา แสดงว่าการสะสม Csl ในน้ำหรือบนพื้นมีอิทธิพลต่อการสะสม Csl มากกว่าการเก็บกักแบบอื่นๆ และผลการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุยังแสดงให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เข้าไปอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวซึ่งในที่นี้คือน้ำจะไม่มี การปลดปล่อยกัมมันตรังสีออกมาจากน้ำซึ่งในความเป็นจริงอาจมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ด้วยการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

ความแตกต่างของการสะสม Csl ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ในกรณีศึกษาแบบต่างๆ เกิดจากการสะสมที่แตกต่างกัน เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิก๊าซต่อการสะสม Csl พบว่าการควบแน่นบนผนังของ Csl และการสะสมของแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อความแตกต่าง โดยเมื่ออุณหภูมิก๊าซสูงจะมีสัดส่วนการควบแน่นสูงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างก๊าซและผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์หากก๊าซมีอุณหภูมิสูงกว่าผนังจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไปสู่ผนังถ้าการคายความร้อนของก๊าซมากเพียงพอจะส่งผลให้เกิดการควบแน่นของนิวไคลด์รังสีบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ในขณะที่การสะสมของ Csl แบบแอโรซอลมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้นยกเว้นกรณีที่อุณหภูมิก๊าซเท่ากับ 1000 K จะไม่มีการสะสมของ Csl แบบแอโรซอลบนผนังเนื่องจาก source term ที่ป้อนเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นไอ (vapor form) มีอุณหภูมิที่สูงที่พอทำให้ไม่มีไอของ Csl สามารถเปลี่ยนไปเป็นแอโรซอลได้ นอกจากนี้การสะสมของแอโรซอลบนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ยังส่งผลต่อความแตกต่างของการสะสม Csl ในกรณีที่อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่แตกต่างกันทำให้สามารถบ่งชี้ได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของ Csl แบบแอโรซอล คือ Thermophoresis ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกจากบริเวณที่อุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอันเป็นสาเหตุของการสะสมของแอโรซอลที่ลดลงเมื่อผนังมีอุณหภูมิสูงขึ้น และไม่มีการสะสมตัวของแอโรซอลบนผนังเมื่อผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเท่ากันหรือสูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซ

ในส่วนของการศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต่อการสะสม Csl พบว่าอุณหภูมิของน้ำไม่มีผลต่อความแตกต่างในการสะสม Csl ในขณะที่การขอบเขตช่วงการกระจายตัวของมวลแอโรซอลแทบไม่มีผลต่อการสะสม Csl โดยความแตกต่างของการสะสมรวมเกิดจากการสะสมของ Csl ที่เป็นแอโรซอลบนผนัง แต่เนื่องจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่พิจารณามีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของแอโรซอลที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้เปลี่ยนแปลงน้อยมากๆ สำหรับสัดส่วนรูปแบบของ source term (Csl form) ที่เป็นไอต่อแอโรซอลมีผลน้อยมากต่อการสะสมของ

Csl โดยความแตกต่างส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของแอโรซอลบนผนังซึ่งสัดส่วนที่มีแอโรซอลมากจะมีแอโรซอลเกาะที่ผนังมากกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาการเปลี่ยน Nodalization จาก 7 ปริมาตรควบคุมเป็น 19 ปริมาตรควบคุมพบว่าค่าการค่าสะสม Csl ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงเล็กน้อยเป็นผลจากการลดลงของ Csl แบบแอโรซอลที่สะสมบนผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก โดยมีสาเหตุจากการแบ่งปริมาตรควบคุมที่มากขึ้นส่งผลต่อตำแหน่งการปลดปล่อย source term จากถังปฏิกรณ์สู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีขอบเขตที่ลดลงคือจากตำแหน่งปริมาตรควบคุมที่ 2 มาอยู่ที่ปริมาตรควบคุมที่ 5 ใน 19 ปริมาตรควบคุมซึ่งเป็นตำแหน่งช่วงกลางของปริมาตรที่ 2 ในทั้งหมด 7 ปริมาตรควบคุมอีกทั้งช่วงของระดับน้ำที่สามารถแบ่งแยกได้ละเอียดขึ้นทำให้ตำแหน่งในการตั้งสมมติฐานในเรื่องของอุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไปเกิดการสะสม Csl จึงเปลี่ยนแปลงไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ผลการคำนวณที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการลดลงของการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี (Csl) อย่างชัดเจนเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในเรื่องความปลอดภัยให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์รวมถึงเป็นข้อมูลอ้างอิงในเรื่องความปลอดภัยเพื่อเพิ่มการยอมรับของประชาชนต่อโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- ในการวิจัยนี้โปรแกรม ART Mod2 ที่ใช้ในการทำการวิจัยต้องได้รับข้อมูล Thermal hydraulic มาจากโปรแกรม THALES2 แต่เนื่องจากทั้งสองโปรแกรมเป็นโปรแกรมรุ่นเก่าที่มีความซับซ้อนส่งผลให้ยากต่อการทำความเข้าใจในตัวโปรแกรมโดยเฉพาะโปรแกรม THALES2 ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาโปรแกรมรุ่นใหม่ที่ใช้งานง่ายขึ้นแล้ว เมื่อไม่สามารถใช้โปรแกรม THALES2 เพื่อเป็นข้อมูล Input ของ ART Mod2 ได้จึงต้องหาข้อมูล Thermal hydraulic จากรายงานและเอกสารงานวิจัยต่างๆ หรือโปรแกรมจำลองเหตุการณ์อื่นๆ
- อาจปรับปรุงข้อมูลเข้าของโปรแกรม RELAP5MOD3.3 ใหม่เพื่อให้ได้ค่า Thermal Hydraulic ที่ดีขึ้นหรืออาจใช้โปรแกรมจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุรุ่นใหม่หรือโปรแกรมที่ครอบคลุมการคำนวณข้อมูล Thermal Hydraulic เพื่อลดความยุ่งยากและลดตั้งสมมติฐานซึ่งนำไปสู่ผลการคำนวณที่เสมือนจริงมากขึ้น
- จากผลการคำนวณจะเห็นว่ากรณีที่มีการรั่วไหลของ Csl ที่ตำแหน่งแตกต่างกันยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดหากปรับปรุงปัญหาพื้นฐานเดิมโดยศึกษาสิบลงไปในรหัสโปรแกรมต้นฉบับ (source code) เพื่อหาตำแหน่งการนำเข้าและการปลดปล่อยที่แน่ชัด

- การปรับปรุงงานวิจัยในส่วนของโปรแกรม ART Mod2 จะมีการศึกษาลึกลงไปในรหัสโปรแกรมต้นฉบับ sub routine และความสัมพันธ์ของสมการต่างๆ รวมทั้งเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้คำนวณเพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของ source term ได้ดีขึ้น
- ในส่วนของการจัดการอุบัติเหตุสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR อาจมีการพิจารณาศึกษาระบบจัดการอุบัติเหตุอื่นๆ ที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR ซึ่งอาจเป็นระบบแบบจัดการแบบ active หรือ passive safety
- อาจทำการศึกษาอุบัติเหตุหรือการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีแบบอื่นๆ รวมถึงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบอื่นๆ และทำการเปรียบเทียบผล



## รายการอ้างอิง

1. *Safety Analysis for Research Reactors*. 2008, IAEA: Safety Reports Series No.55 p. 68.
2. L. Soffer, e.a., *Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants*, in NUREG-1465. 1995, Division of Systems Technology, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
3. *Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR)*. 2011, IAEA.
4. *Introduction and General Description of Plant Sections 1.1 – 1.11*, in *ESBWR Design Control Document Tier 2* 2014, GE Hitachi Nuclear Energy.
5. *ESBWR CERTIFICATION PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT*. 2010, GE Hitachi Nuclear Energy: Licensing Topical Report, NEDO-33201 Rev 6.
6. Steven Sholly, e.a., *SOURCE TERMS FOR POTENTIAL NPPS AT THE LUBIATOWO SITE, POLAND*. 2014, Institute of Safety and Risk Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences.
7. *Iodine*. 25/2/58]; Available from:  
<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/iodine.html>
8. *Cesium*. 25/2/58; Available from:  
<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/cesium.html>
9. D. Lennart, J.K., *Specific Features of Cesium Chemistry and Physics Affecting Reactor Accident Source Term Predictions*. 1994: SKI Report 94, NEA/CSNI/R(94)28. p. 29.
10. H. Muhammad, e.a., *Review of Severe Accident Phenomena in LWR and Related Severe Accident Analysis Codes*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(12), 2013: p. 3320-3335.
11. M. Kajimoto, e.a., *A Computer Code for the Analysis of Radionuclide Transport and Deposition under Severe Accident Conditions*. 1998, JAERI Japan

12. *Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants.* 1990, Division of Systems Research Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission: Final Summary Report, NUREG-1150 Vol. 1.
13. M. Kajimoto, e.a., *Experiment analyses of iodine behavior under severe accident conditions with ART.* Journal of nuclear material 248 1997: p. 226-232
14. Z. Yuan, M.Z., A. Krall and M. Khatib-Rahbar, *CONFIRMATORY MELCOR ANALYSIS OF SEVERE ACCIDENTS FOR ESBWR.* 2006, Energy Research, Inc. Energy Research, Inc.
15. Tills, J., *MELCOR DBA Containment Audit Calculations for the ESBWR Plant (Final).* 2010, Sandia National Laboratories.
16. V.D. J-Pierre, A.T.A., M. Jean-Claude, *Chapter 8 Research on Severe Accidents in Nuclear Power Plants.* 2011, Nuclear Power - Operation, Safety and Environment: InTech.
17. M. Khurram, X.C. *Source Term evaluation of two loop PWR under hypothesis severe accidents.* 2012. 271-284
18. Sehgal, B.R., *Chapter 6 Severe Accident Management.* 1 ed. 2012, Nuclear Safety in Light Water Reactors, Severe Accident Phenomenology: Elsevier.
19. *Peach Bottom Integrated Analysis,* in NUREG/CR-7110, Vol. 1 2012, Sandia National Laboratories: State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project.
20. K. Yuan, e.a., *Analysis on containment depressurization under severe accidents for a Chinese 1000 MWe NPP.* Progress in Nuclear Energy, 2013. 65: p. 8-14.
21. Woudstra, A., *Fission Product Retention Within the ESBWR Containment.* 1996, GE Energy Company: ECN Nuclear Energy Report No. ECN-CX-96-124, Enclosure 1.
22. *CODE STRUCTURE, SYSTEM MODELS, AND SOLUTION METHODS,* in RELAP5/MOD3.3 CODE MANUAL. 2003, Nuclear Safety Analysis Division: NUREG/CR-5535/Rev 1.

23. Richard C. Flagan, J.H.S., *Aerosols*, in *FUNDAMENTALS Of AIR POLLUTION ENGINEERING*, C.I.o. Technology, Editor. 1988, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey. p. 313.









ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุม เครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับเวลา								
	LIPTCH	LOPT	TEND	ITURB	INUC	IAGLOM	IBROW	IGRAV	IRISK
5 อัตราส่วนรูปแบบของ source term (CsI form) (vapor : aerosol)									
1 : 0	Base Case								
0.3 : 0.7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
0.5 : 0.5									
0.7 : 0.3									
0 : 1									
6 ตำแหน่งการรั่วไหลของ source term ออกสู่สิ่งแวดล้อม									
ปริมาณควบคุมที่ 1	Base Case								
ปริมาณควบคุมที่ 2	B	B	B	B	B	B	B	B	B
ปริมาณควบคุมที่ 3	B	B	B	B	B	B	B	B	B
7 Nodalization 19 Volume	B	B	B	B	B	B	B	B	B
เมื่อไม่มีการจัดการ อุบัติเหตุ	B	B	B	B	B	B	B	B	B







ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการ อุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคาร คลุมเครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับเวลา									
	HCOMP	DAW	IFP	RHOM	ICLASS	ARS*	FXFLIM	FCONX	FILM	ALIMIT
4 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวตามมวลของแอโรซอล										
แบบที่ 1	B	B	B	B	B	1.00E-15, 8.00E-15, 1.00E-13, 5.12E-13, 4.10E-12, 3.28E-11, 2.62E-10, 2.10E-09, 1.68E-08, 1.34E-07, 1.07E-06	B	B	B	B
แบบที่ 2	B	B	B	B	B	1.00E-15, 8.00E-15, 6.40E-14, 5.12E-13, 4.10E-12, 3.28E-11, 2.62E-10, 2.10E-09, 6.68E-08, 1.34E-07, 1.07E-06	B	B	B	B
แบบที่ 3	B	B	B	B	B	1.00E-15, 8.00E-15, 6.40E-14, 5.12E-13, 4.10E-12, 3.28E-11, 2.62E-10, 9.10E-09, 1.68E-08, 1.34E-07, 1.07E-06	B	B	B	B



ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการ อุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุม เครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา					
	NTRNDT	TNEXTJ	DTALLM	SRCJ	DTB	AFJ
Base Case มี 7 Vol	1-1000 cycle	เพิ่มรอบละ 200 วินาที	0.1	พิจารณาเมื่อเริ่มมีการป้อนน้ำจาก GDCS Deluge เข้าสู่ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลา 28500 วินาที มี source ตั้งต้นโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source รูปแบบไอ (vapor form) ด้วยอัตราคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที เข้าสู่ Vol 2 และ 7 มีค่า 814.4 g/s และ 925.9 g/s ตามลำดับ	0.1	8.49E+05
1 Tgas Const Tgas = 600 K Tgas = 700 K Tgas = 800 Tgas = 900 K Tgas = 1000 K	B	B	B	B	B	B
	Base case					
	B	B	B	B	B	B
2 Twall const Twall = 300 K Twall = 500 K Twall = 700 K Twall = 800 K Twall = 900 K Twall = 1000 K	B	B	B	B	B	B
3 Twater Const Twater = 300 K Twater = 800 K Twater = 1000 K	B	B	B	B	B	B
4 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวตามมวลของไอโซล						
แบบที่ 1						
แบบที่ 2	B	B	B	B	B	B
แบบที่ 3						



ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการ อุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุม เครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา					
	NTRNDT	TNEXTJ	DTALLM	SRCJ	DTB	AFJ
5 อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csl form) (vapor : aerosol)						
1 : 0	Base Case					
0.3 : 0.7	B	B	B	source ตั้งต้นที่เวลา 28500 วินาทีโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source ด้วยอัตราการคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที ปล่อยเข้าสู่ Vol 2 ในรูปแบบรูปแบบไอ (Vapor form) และแอโรซอล (aerosol form) มีค่า 244.3g/s และ 570.1 g/s ตามลำดับ และ Vol 7 ด้วยอัตรา 925.9 g/s	B	B
0.5 : 0.5	B	B	B	source ตั้งต้นที่เวลา 28500 วินาทีโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source ด้วยอัตราการคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที ปล่อยเข้าสู่ Vol 2 ในรูปแบบรูปแบบไอ (Vapor form) และแอโรซอล (aerosol form) มีค่า 407.2 g/s และ 407.2 g/s ตามลำดับ และ Vol 7 ด้วยอัตรา 925.9 g/s	B	B
0.7 : 0.3	B	B	B	source ตั้งต้นที่เวลา 28500 วินาทีโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source ด้วยอัตราการคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที ปล่อยเข้าสู่ Vol 2 ในรูปแบบรูปแบบไอ (Vapor form) และแอโรซอล (aerosol form) มีค่า 570.1g/s และ 244.3 g/s ตามลำดับ และ Vol 7 ด้วยอัตรา 925.9 g/s	B	B
0 : 1	B	B	B	source ตั้งต้นที่เวลา 28500 วินาทีโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source ด้วยอัตราการคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที ปล่อยเข้าสู่ Vol 2 ในรูปแบบรูปแบบไอ (Vapor form) และแอโรซอล (aerosol form) มีค่า 0 g/s และ 814.4 g/s ตามลำดับ และ Vol 7 ด้วยอัตรา 925.9 g/s	B	B
6 ตำแหน่งการรั่วไหลของ source term ออกสู่สิ่งแวดล้อม						
ปริมาตรควบคุมที่ 1	Base Case					
ปริมาตรควบคุมที่ 2	B	B	B	B	B	B
ปริมาตรควบคุมที่ 3	B	B	B	B	B	B
7 Nodalization 19 Volume	B	B	B	พิจารณาเมื่อเริ่มมีการป้อนน้ำจาก GDCS Deluge เข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ มี source ตั้งต้นโดยสมมติให้เป็นการปล่อย source รูปแบบไอ (vapor form) ที่เวลา 28500 วินาทีด้วยอัตราการคงที่ในระยะเวลา 10 วินาที ปล่อยเข้าสู่ source เริ่มต้นอยู่ที่ Vol 5 และ 19 มีค่า 814.4 g/s และ 925.9 g/s ตามลำดับ	B	B
เมื่อไม่มีการจัดการ อุบัติเหตุ	B	B	B	B	B	B

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา					
	GJ	UGJ	XSJ	PMPARJ	VOLFJ	HWLEVJ
Base Case มี 7 Vol	ตามเวลา	จาก RELAP5MOD3.3	จาก RELAP5MOD3.3	7*0.10656	Vol1-3 ไม่มีน้ำ Vol4 = 3.54E+08, Vol5 = 1.41E+09, Vol6 = 1.04E+09, Vol7 = 7.47E+08	มีค่าคงที่ 1631.388 cm
1 Tgas Const Tgas = 600 K Tgas = 700 K Tgas = 800 K (Base Case) Tgas = 900 K Tgas = 1000 K	B	B	B	B	B	B
	Base Case					
	B	B	B	B	B	B
2 Twall const Twall = 300 K Twall = 500 K Twall = 700 K Twall = 800 K Twall = 900 K Twall = 1000 K	B	B	B	B	B	B
3 Twater Const Twater = 300 K Twater = 800 K Twater = 1000 K	B	B	B	B	B	B
4 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวตามมวลของไอโรซอล						
แบบที่ 1						
แบบที่ 2	B	B	B	B	B	B
แบบที่ 3						

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา					
	GJ	UGJ	XSJ	PMPARJ	VOLFJ	HWLEVJ
5 อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csl form) (vapor : aerosol)	Base Case					
1 : 0						
0.3 : 0.7						
0.5 : 0.5	B	B	B	B	B	B
0.7 : 0.3						
0 : 1						
6 ตำแหน่งการรั่วไหลของ source term ออกสู่สิ่งแวดล้อม	Base Case					
ปริมาตรควบคุมที่ 1						
ปริมาตรควบคุมที่ 2	B	B	B	B	B	B
ปริมาตรควบคุมที่ 3	B	B	B	B	B	B
7 Nodalization 19 Volume	B	B	B	B	B	B
เมื่อไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ	B	B	B	B	ไม่มีน้ำ	ไม่มีน้ำ

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการ อุบัติเหตุ (เติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุม เครื่องปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา				ผลการ รัน	หมายเหตุ (*)	
	TWJ	TJ	TLJ	TMPARJ	ผ่าน/ไม่ผ่าน		
Base Case มี 7 Vol	ค่าตามเวลา*	คงที่ 800 K	ค่าตามเวลา*	คงที่*	ผ่าน	ตัวแปรที่มีค่าตามเวลาแสดงในตารางที่ ก-2 TJ : อุณหภูมิก๊าซ สมมติมีค่าคงที่ 800 K สมมติให้อุณหภูมิของก๊าซในอาคารคลุมเครื่อง ปฏิกรณ์มีค่าคงที่ตลอดการจำลองเหตุการณ์บริเวณ ที่เป็น gas Taerosol = Tgas, บริเวณที่เป็นน้ำ Taerosol = Twater , ARS, RHOM ใช้ค่าเดียวกับโปรแกรมตัวอย่าง	
1 Tgas Const Tgas = 600 K Tgas = 700 K Tgas = 800 K Tgas = 900 K Tgas = 1000 K	B	คงที่ 600 700	B	คงที่*	ไม่ผ่าน	ที่ก๊าซอุณหภูมิ 600 K ไม่สามารถรันโปรแกรมได้ (รันค้างที่ 2.5800E+04 sec)	
	Base Case			ผ่าน			
	B	900 1000		คงที่*	ผ่าน		
2 Twall const Twall = 300 K Twall = 500 K Twall = 700 K Twall = 800 K Twall = 900 K Twall = 1000 K	คงที่ 300 500 700 800 900 1000		B	B	B	ผ่าน	สมมติให้อุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ มีค่าคงที่ตลอดการจำลองเหตุการณ์
3 Twater Const Twater = 300 K Twater = 800 K Twater = 1000 K	B	B	คงที่ 300 800 1000	B	ผ่าน	สมมติให้อุณหภูมิผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มี ค่าคงที่ตลอดการจำลองเหตุการณ์	
4 ช่วงขอบเขตการกระจายตัวตามมวลของไอโซล							
แบบที่ 1							
แบบที่ 2	B	B	B	B	ผ่าน		
แบบที่ 3							

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

กรณีที่มีการจัดการ อุบัติเหตุ (มีการเติมน้ำ เข้าสู่อาคารคลุมเครื่อง ปฏิกรณ์)	ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา				ผลการ รัน	หมายเหตุ (*)
	TWJ	TJ	TLJ	TMPARJ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	
5 อัตราส่วนรูปแบบของ source term (Csl form) (vapor : aerosol)						
1 : 0	Base Case				ผ่าน	
0.3 : 0.7						
0.5 : 0.5	B	B	B	B		
0.7 : 0.3						
0 : 1						
6 ตำแหน่งการรั่วไหลของ source term ออกสู่สิ่งแวดล้อม						
ปริมาตรควบคุมที่ 1	Base Case				ผ่าน	
ปริมาตรควบคุมที่ 2						
ปริมาตรควบคุมที่ 3	B	B	B	B		
7 Nodalization 19 Volume	B	B	-	B	ผ่าน	
เมื่อไม่มีการจัดการ อุบัติเหตุ	B	B	-	B	ผ่าน	ไม่มีการเติมน้ำเข้าสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ก-2 ตัวแปรที่ใช้เป็น Input ในการดำเนินโปรแกรม ART Mod2

ชื่อตัวแปร	รายละเอียด
<b>ตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับเวลา (NDPTIM)</b>	
LIPTCH	ช่วงเวลาที่โปรแกรมแสดงผล โดยผลจะแสดงในแต่ละวัฏจักรของ LPICH
LOPT	LOPT(IL), IL = 1,30 LOPT(IT) = 0 : ไม่มี output, > 0 : output แสดงผลในแต่ละวัฏจักรของ LOPT(IL), < 0 : output แสดงผลในทุกวัฏจักรจนกระทั่ง ILOPT(IL) และหลัง ILOPT(IL) output จะสิ้นสุด IL = 1 คุณสมบัติของทางอากาศ เช่น ความหนาแน่นของก๊าซ IL = 2 ความเร็วในการควบแน่นและอัตราการควบแน่นของสารเคมีที่เป็น องค์ประกอบ IL = 3 องค์ประกอบของเมทริกซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลง IL = 4 ค่าคงที่การควบแน่นขององค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวแอโรซอล IL = 5 การกระจายตัวมวลของสารเคมีในแต่ละขนาดของแอโรซอล IL = 6 ค่าคงที่การรวมตัวของแอโรซอล IL = 7 ค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสารเคมีด้วยสเปรย์ IL = 8 ค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสารเคมีและแอโรซอลโดยการสครับ IL = 30 แสดง output ทั้งหมดของ 2 และ 4 (IL = 9-29 ไม่ใช่) output of contents for the entry no.2 and 4 by card image
TEND	เวลาที่จบการคำนวณของ ART Mod2
ITURB	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณการรวมตัวแบบ turbulential ถ้า ITURB เท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
INUC	ไม่มีระบุในคู่มือแต่มีในโปรแกรมตัวอย่าง
IAGLOM	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณการรวมตัวของแอโรซอล ถ้า IAGLOM เท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
IBROW	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณการรวมตัวด้วยแรงโน้มถ่วง ถ้า LBROW เท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
IGRAV	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณการรวมตัวแบบ brownian ถ้า IGRAV เท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
IRISK	ค่าที่ตั้งไว้เพื่อใช้แก้ปัญหาสมการพื้นฐานของโปรแกรม ART Mod2 ถ้า IRISK = 1 ใช้ simplified method, = 0 ใช้ normal Euler method

ชื่อตัวแปร	รายละเอียด
ICOND	ไม่มีระบุในคู่มือแต่มีในโปรแกรมตัวอย่าง
IUGAS	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณความเร็วก๊าซในแต่ละปริมาตรถ้าเท่ากับ 1 : คำนวณด้วยโปรแกรม, = 0 : โดยการใส่ค่า input โดยความเร็วของก๊าซถูกคำนวณโดยใช้ตัวแปร UGASJ
IRESUP	IRESUP(I); I = 1, NCOM ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณการ resuspension ของแอโรซอล ถ้า IRESUP(I) เท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
NDX	อันดับกำลังของตัวแปรที่ 2 ใน Guass-Legendre double integration (ค่าที่แนะนำคือ 2, จำกัดค่ามากที่สุดที่ 10)
NDY	อันดับกำลังของตัวแปรที่ 1 ใน Guass-Legendre double integration (ค่าที่แนะนำคือ 2, จำกัดค่ามากที่สุดที่ 10)
NCOM	จำนวนปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ (จำกัดค่ามากที่สุดที่ 20 ปริมาตร)
IELEVE	ปริมาตรที่เป็นสิ่งแวดล้อม ปริมาตรนี้ถูกใช้ในการคิดมวลสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ
IMCOMP	ตัวแปรที่กำหนดค่าการคำนวณโมเดลของลักษณะปริมาตรหลายปริมาตร ถ้าเท่ากับ 1: พิจารณา, = 0 ไม่พิจารณา
VCOMP	VCOMP(I); I = 1, NCOMP ปริมาตรทางเรขาคณิตของปริมาตรควบคุมที่ I
HCOMP	HCOMP(I); I = 1, NCOMP ความสูงของปริมาตรควบคุมที่ I
DAW	DAW(I); I = 1, NCOMP พื้นที่ผิวในหน่วยความยาวของปริมาตรควบคุม
IFP	IFP(K); K = 1, IFPMAX ตัวเลขที่ระบุถึงนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ถูกวิเคราะห์ซึ่งในงานวิจัย IFPMAX = 6 คือ CsI โดย (IFP(K) กำหนดให้มีได้มากที่สุด 10 ค่า)
RHOM	ความหนาแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ICLASS	จำนวนกลุ่มการกระจายตัวของขนาดแอโรซอล
ARS	ARS(L) ; L=1, ICLASS+1 ช่วงมวลของแอโรซอล 1 อนุภาคในส่วนที่ L โดย ARS(1) คือขอบล่างของการกระจายตัวของขนาดแอโรซอล, ARS(ICLASS+1) : คือขอบบนสุดของการกระจายตัวของขนาดแอโรซอล มีหน่วยเป็นกรัม
FXFLIM	ความหนาแน่นของขอบชั้นของการแพร่ที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำ
FCONX	ค่าสัมประสิทธิ์การควบแน่นที่พื้นผิว
FILM	ความหนาแน่นของขอบชั้นของการแพร่
ALIMIT	state ขอบล่างมวลนิวไคลด์กัมมันตรังสี ถ้ามวลนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าน้อยกว่าค่า ALIMIT ในบางสภาวะ โปรแกรมจะห้ามการคำนวณสภาวะทางกายภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น มีหน่วยเป็นกรัม

ชื่อตัวแปร	รายละเอียด
<b>ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา (DPTIM)</b>	
NTRNDT	ตัวเลขที่บอกรอบวัฏจักรของ DPTIM
TNEXTJ	เวลา (วินาที) ที่ข้อมูลที่ขึ้นกับเวลาถูกเปลี่ยนโดยจะใช้ข้อมูลนี้จนถึง TNEXTJ
DTALLM	ความห่างสูงสุดของเวลาจนถึง TNEXTJ โดยความห่างของเวลาในโปรแกรมจะถูกตัดสินอัตโนมัติภายใน DTALLM
SRCJ	SRCJ(IS,I,K) ; IS = 1, sICLASS+4; I = 1, NCOM, K=1,IFPMAX อัตราการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสี k เข้าสู่ สภาวะกายภาพที่ IS ที่ปริมาตรควบคุม I (สภาวะกายภาพที่ IS เป็นค่าที่บอกสภาวะทางกายภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในคู่มือของโปรแกรม ART Mod2 หมายเลข 38) มีหน่วยกรัม/วินาที
DTB	ช่วงเวลา (วินาที) ในการคำนวณค่าคงที่การรวมตัวของแอโรซอล
AFJ	AFJ(I); I=1,NCOM พื้นที่พื้นของปริมาตรควบคุม I ถ้าไม่ใส่จะไม่มีการคำนวณการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พื้นหรือของเหลว
GJ	GJ(IF, I, L); IF =1,4; I, J = 1,NCOM อัตราการไหลจากปริมาตร I ไป J มีหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที
UGJ	UGJ(I); I=1,NCOM ความเร็วในแนวดิ่งของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งตัวแปรนี้ถูกใช้คำนวณความเร็วการสะสมด้วยแรงโน้มถ่วงของแอโรซอล และ Sherwood number หน่วยเซนติเมตร/วินาที
XSJ	XSJ(I,K) ; I=1,NCOM; k=1,10 อัตราส่วนโดยโมลของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบ
PMPARJ	PMPAJ(I) ; I=1,NCOM ความดันทั้งหมดในปริมาตรควบคุมที่ I (เมกกะพาสกาล)
VOLFJ	VOLFJ(I) ; I=1,NCOM ปริมาตรของของเหลวในปริมาตรที่ I (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
HWLEVJ	HWLEVJ(I) ความสูงของของเหลวในปริมาตรที่ I (เซนติเมตร)
TWJ	TWJ(I) ; I=1,NCOM อุณหภูมิผนังของปริมาตรที่ I (K)
TJ	TJ(I) ; I=1,NCOM อุณหภูมิก๊าซของปริมาตรที่ I (K)
TLJ	TLJ(I) ; I=1,NCOM อุณหภูมิของเหลวของปริมาตรที่ I (K)
TMPARJ	TMPARJ(L,I) ;L=1,ICLASS; I=1,NCOM อุณหภูมิของแอโรซอลในส่วนที่ L ของปริมาตรที่ I (K)



### การคำนวณ DAW

สำหรับท่อแนวตั้งหรือปริมาตรแนวตั้ง

$$DAW^2 = \pi^2 \times \frac{V_{COMP}}{H_{COMP}} \times \frac{4}{\pi}$$

$$DAW = \sqrt{DAW}$$

สำหรับท่อแนวขวาง

$$DAW^2 = \left( \frac{XL_{PIPE}}{H_{COMP}} \right)^2 \times \pi^2 \times \frac{V_{COMP}}{H_{COMP}} \times \frac{4}{\pi} \quad ; \quad H_{COMP} = 2 \times \text{Pipe diameter}$$

$$DAW = \sqrt{DAW}$$

### การคำนวณ mole fraction จาก mass fraction

#### สมมติ

สมมติฐาน : ก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยไนโตรเจน และไอน้ำ

$m_N$  : มวลไนโตรเจน,  $m_H$  : มวลน้ำ

N : สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจน โดย  $N = \frac{m_N}{m_{tot}}$

H : สัดส่วนโดยมวลของน้ำ โดย  $H = \frac{m_H}{m_{tot}}$

สัดส่วนโดยโมลของไนโตรเจน

$$N_2 \text{ Mole fraction} = \frac{\text{Mol}_{\text{Nitrogen}}}{\text{Mol}_{\text{tot}}} = \frac{M_N}{M_{\text{tot}}}$$

$$= \frac{m_N/28}{\left[ \frac{m_{\text{tot}}}{MW_{\text{tot}}} \right]} \quad ; \quad MW_{\text{tot}} \text{ มวลโมเลกุลรวม}$$

$$= \frac{m_N/28}{\left[ \frac{m_N+m_H}{28N+18H} \right]} = \frac{N \times m_{\text{tot}}/28}{\left[ \frac{N \times m_{\text{tot}} + H \times m_{\text{tot}}}{28N+18H} \right]} = \frac{N/28}{\left[ \frac{N+H}{28N+18H} \right]}$$

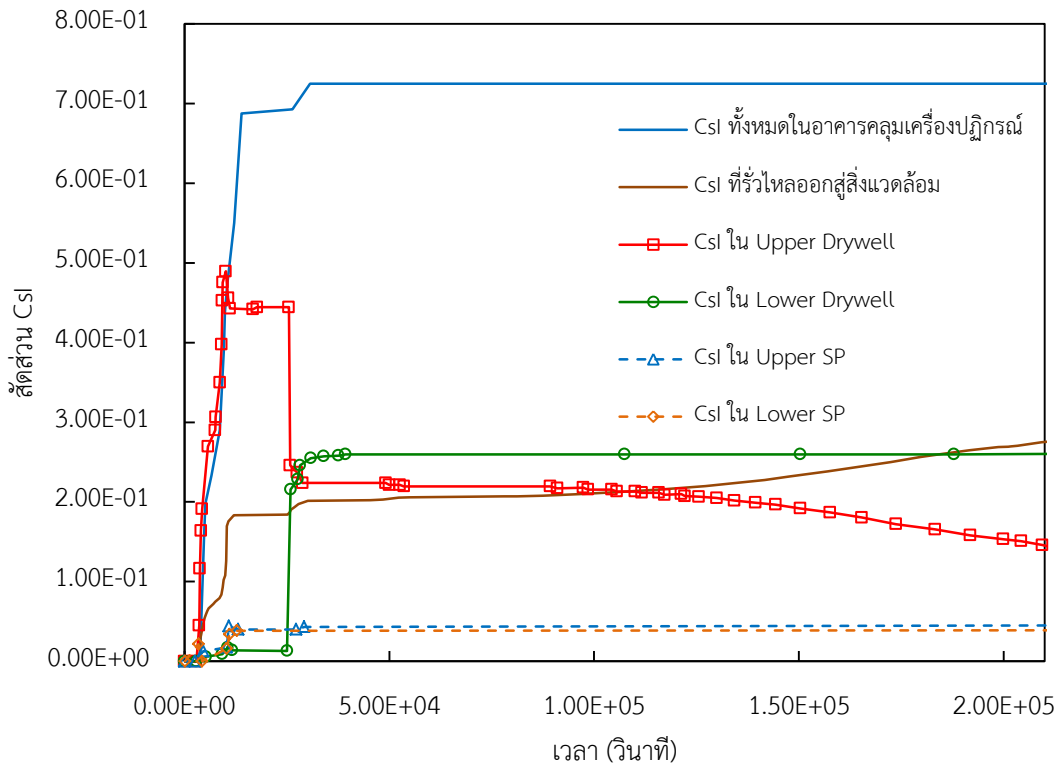
$$= \left[ \frac{28}{28N+18H} \right] \quad ; \quad N+H = 1$$

ดังนั้น สัดส่วนโดยโมลของน้ำ

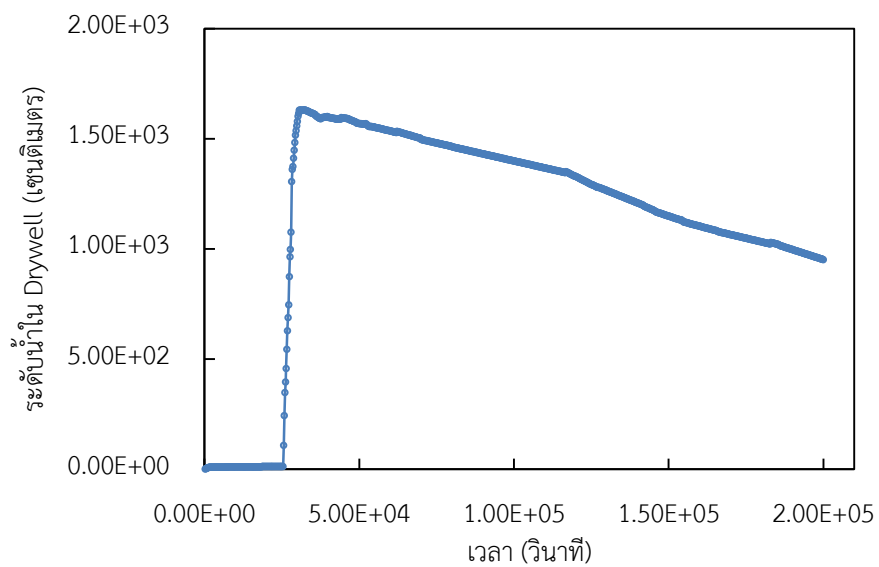
$$H_2O \text{ Mole fraction} = 1 - N_2 \text{ Mole fraction}$$

กราฟแสดงข้อมูล Input ที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์อุบัติเหตุ

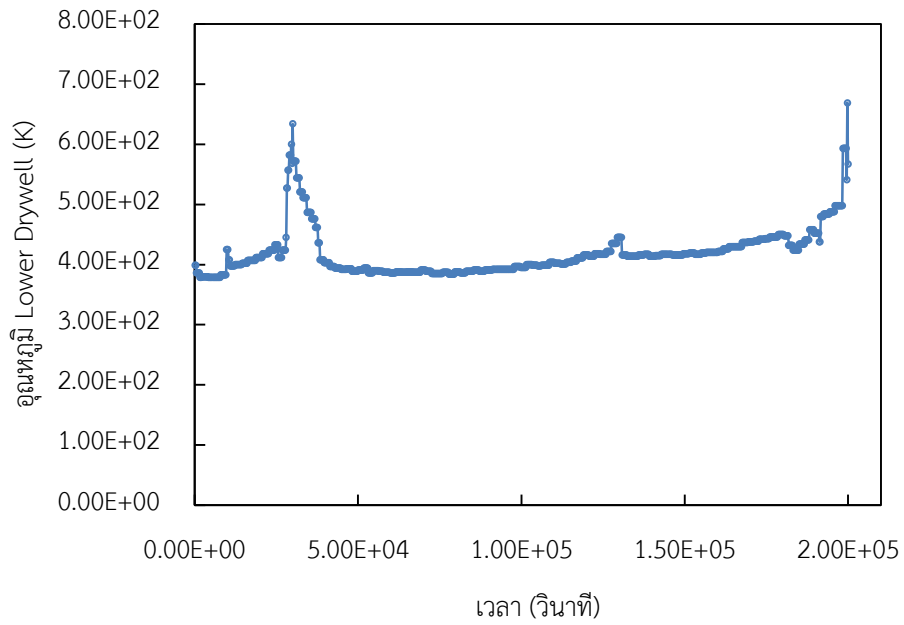
- ข้อมูล Thermal hydraulic จาก NEDO-33201 Rev 6 [5]



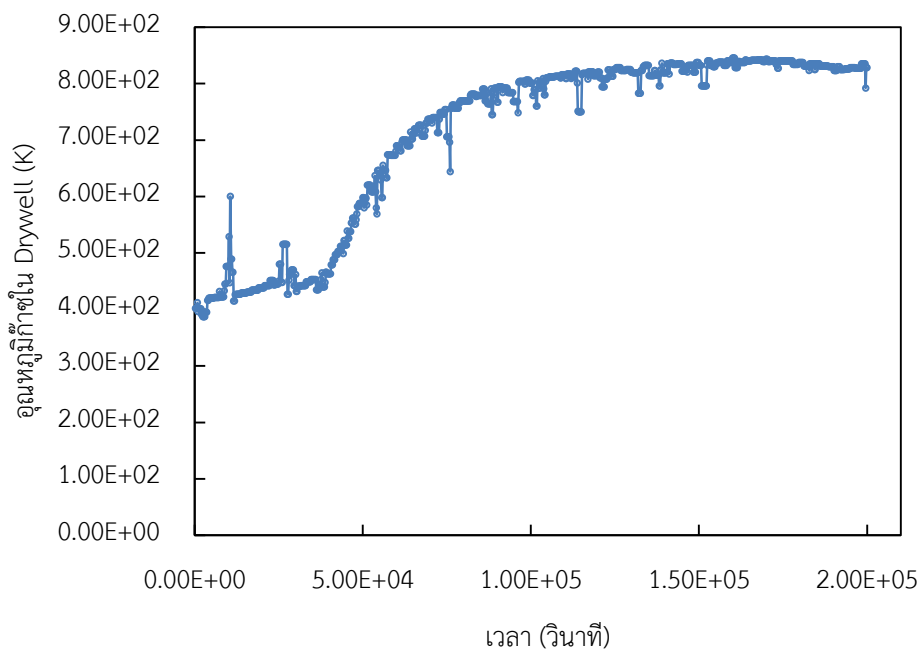
รูปที่ ก-1 สัดส่วน CsI ที่อยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์, CsI ที่อยู่ในส่วนต่างๆภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และCsI ที่รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม



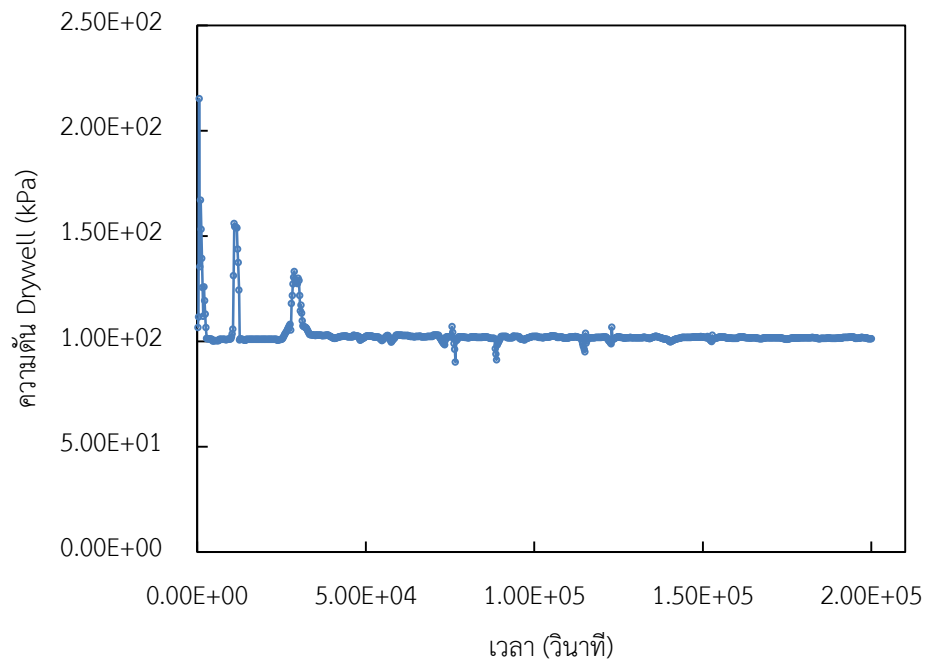
รูปที่ ก-2 ระดับน้ำใน Drywell



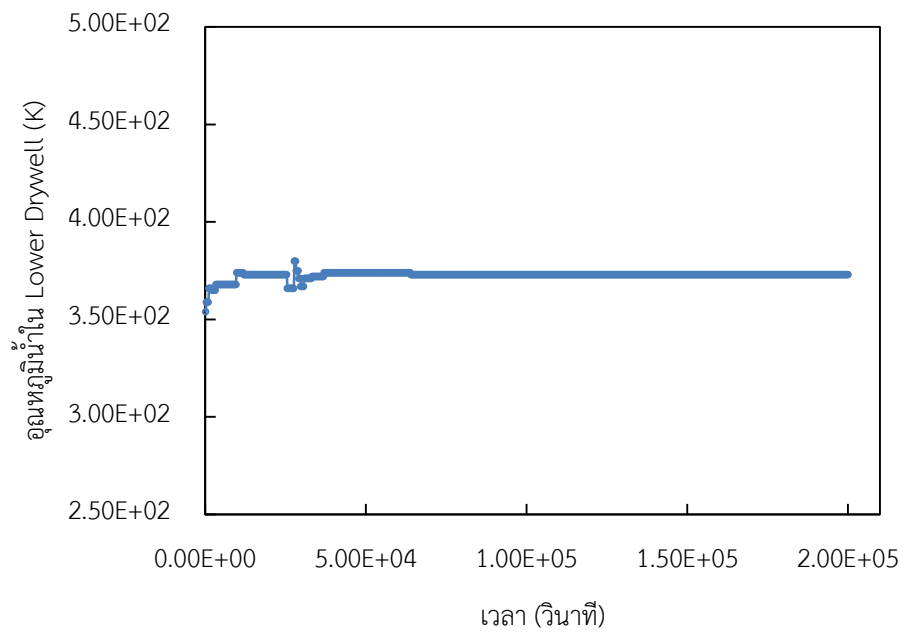
รูปที่ ก-3 อุณหภูมิของ Lower Drywell



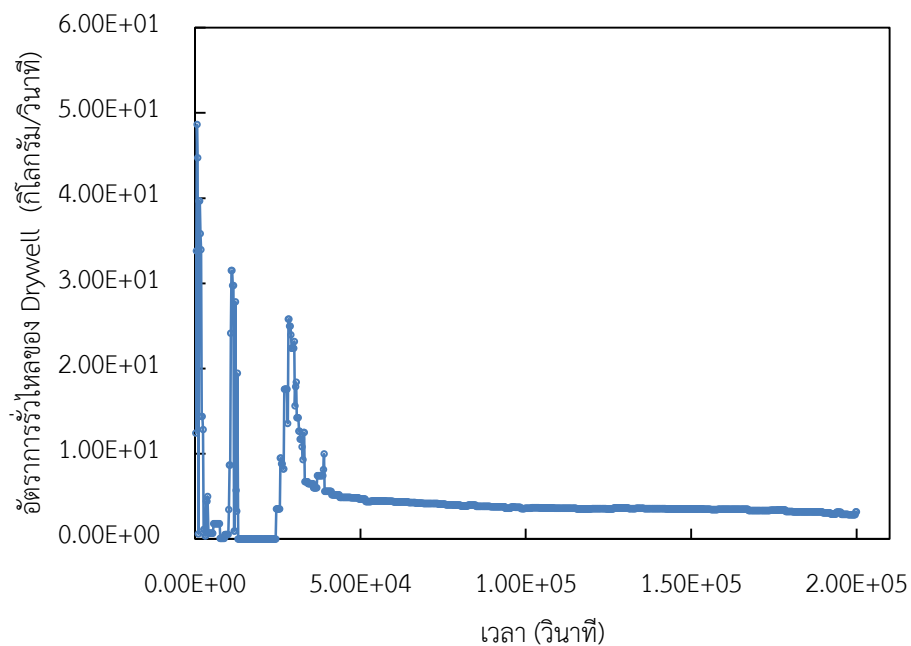
รูปที่ ก-4 อุณหภูมิของก๊าซภายใน Drywell



รูปที่ ก-5 ความดันภายใน Drywell

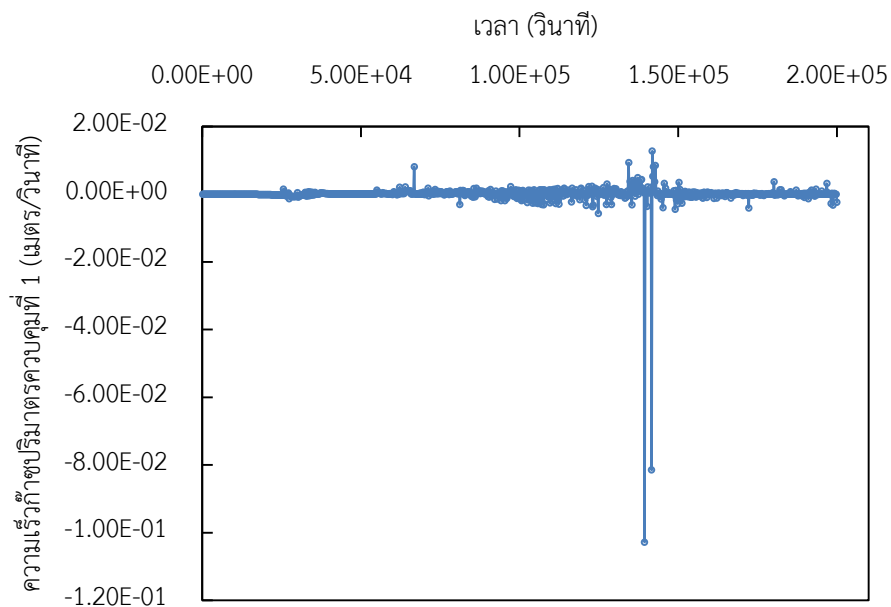


รูปที่ ก-6 อุณหภูมิของน้ำใน Lower Drywell

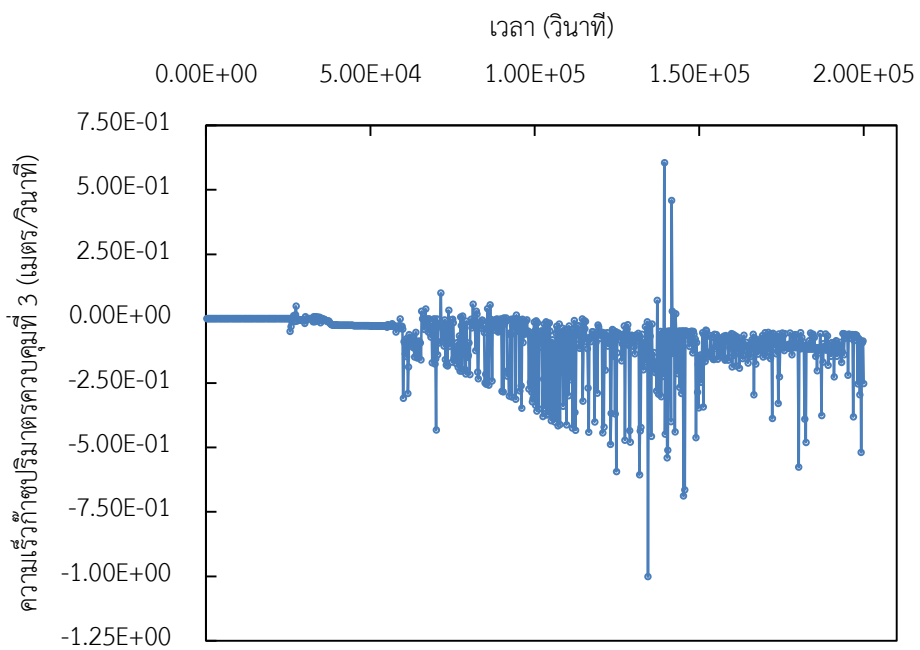
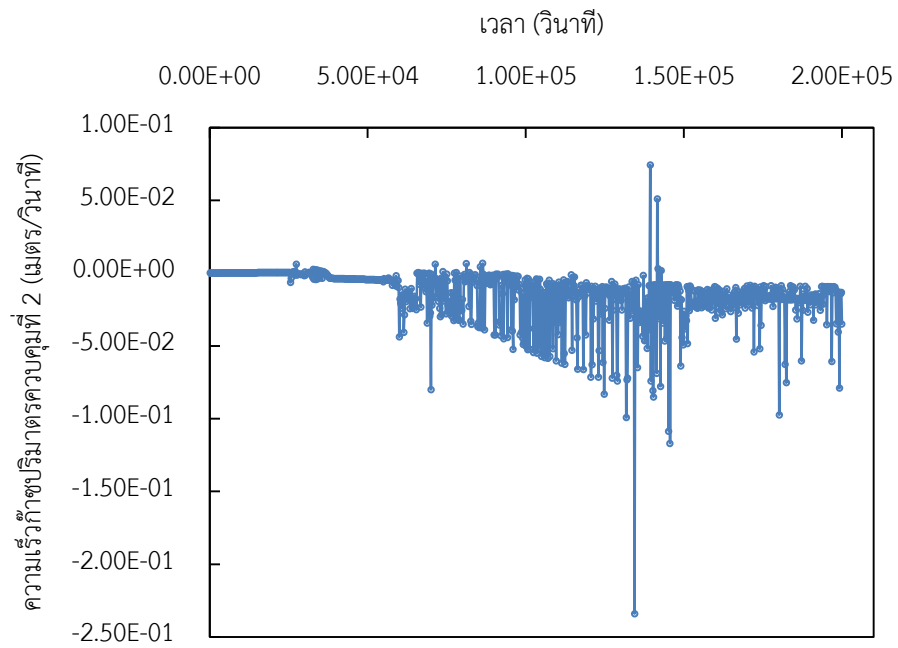


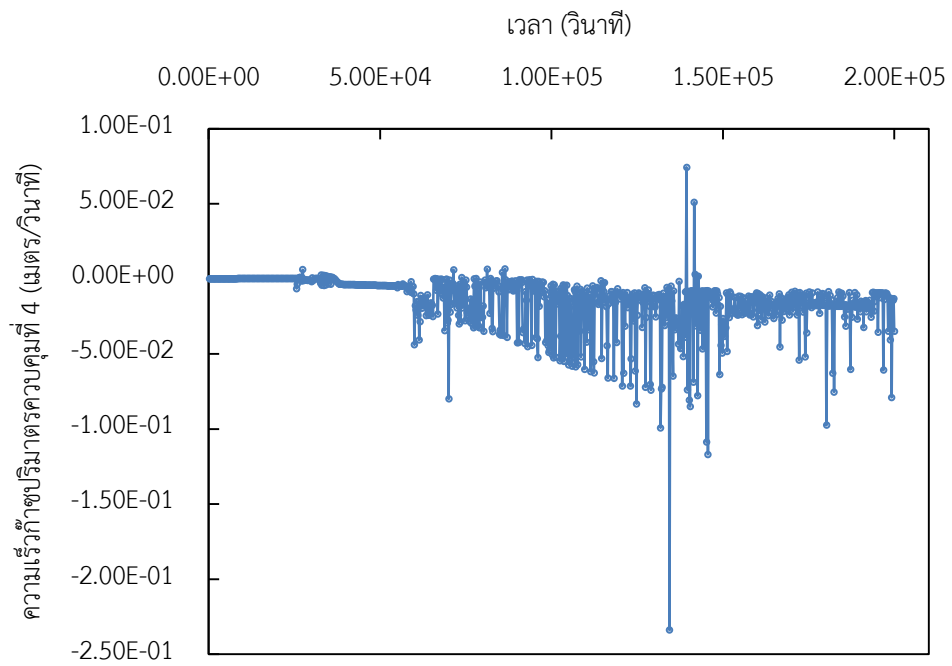
รูปที่ ก-7 อัตราการรั่วไหลของก๊าซจาก Drywell ออกสู่สิ่งแวดล้อม

- ข้อมูลความเร็วและสัดส่วนก๊าซไนโตรเจนที่ได้จากโปรแกรม RELAP5MOD3.3

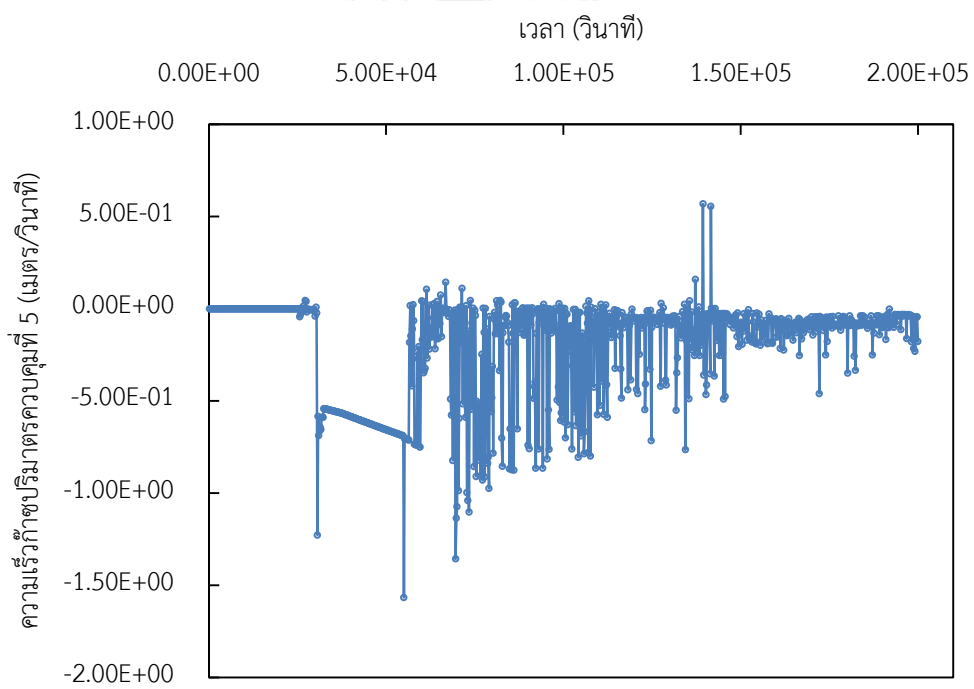


(a)

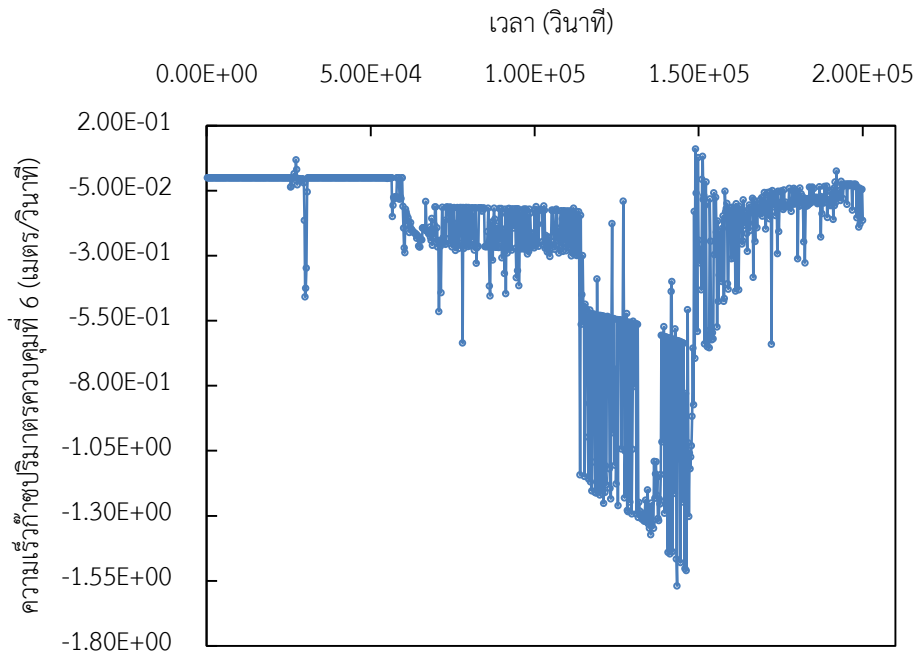




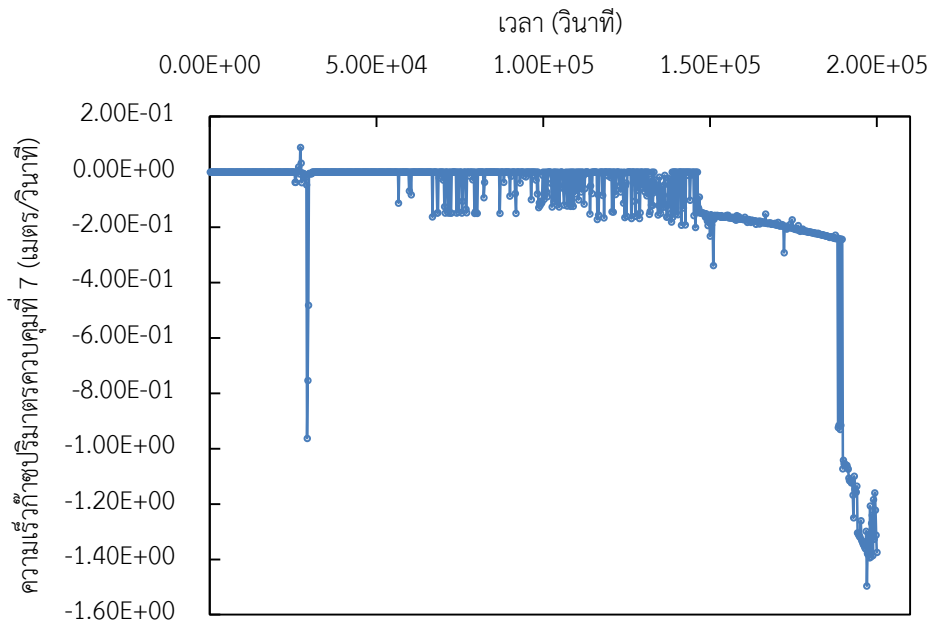
(d)



(e)



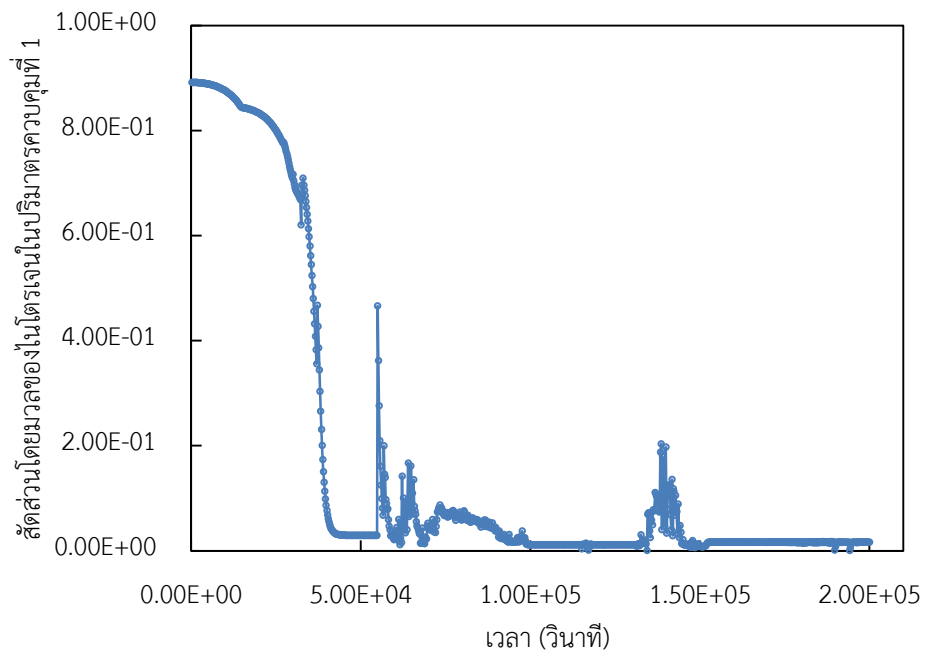
(f)



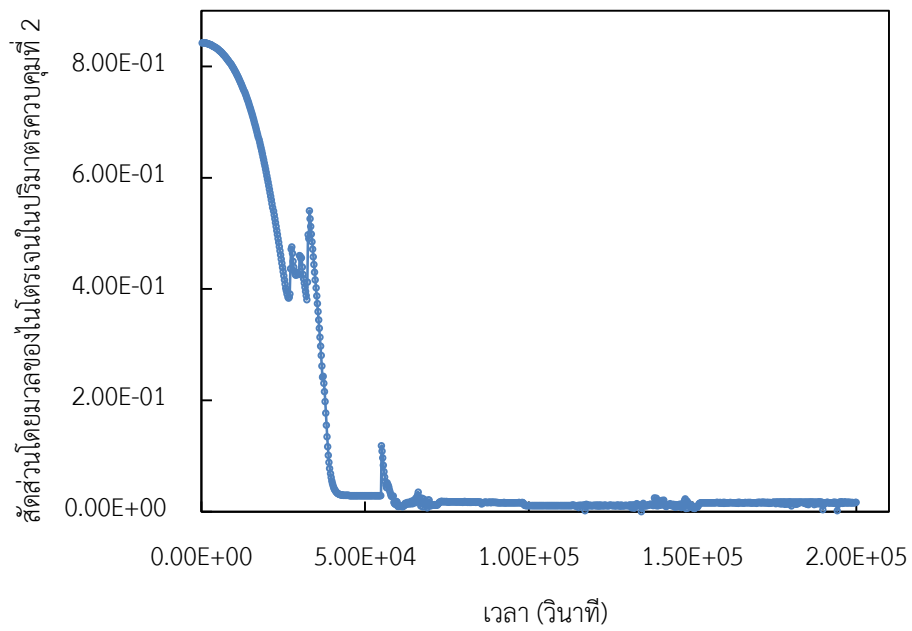
(g)

รูปที่ ก-8 (a-g) ความเร็วของก๊าซภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ของกรณีอ้างอิง (ความเร็วที่ติดลบ มีทิศขึ้น)

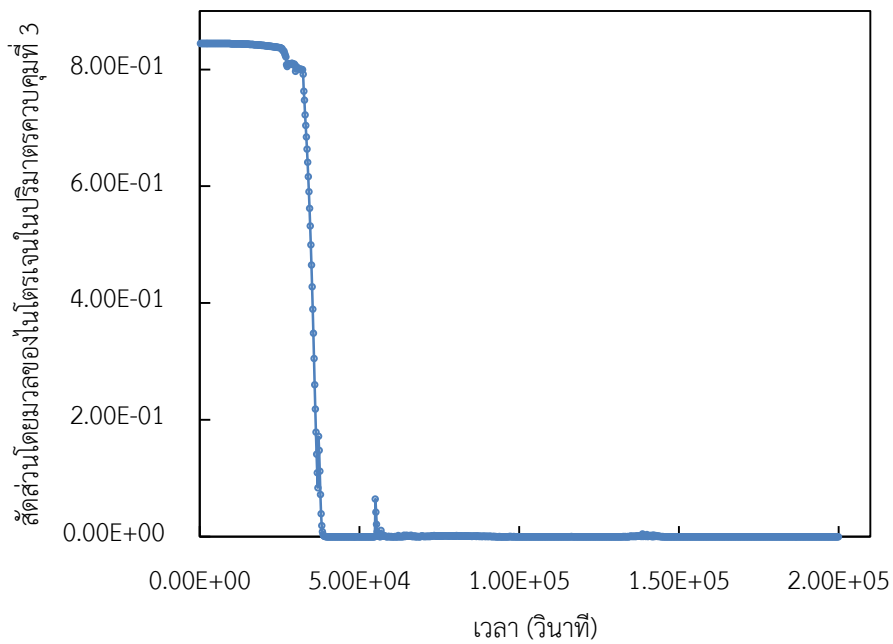




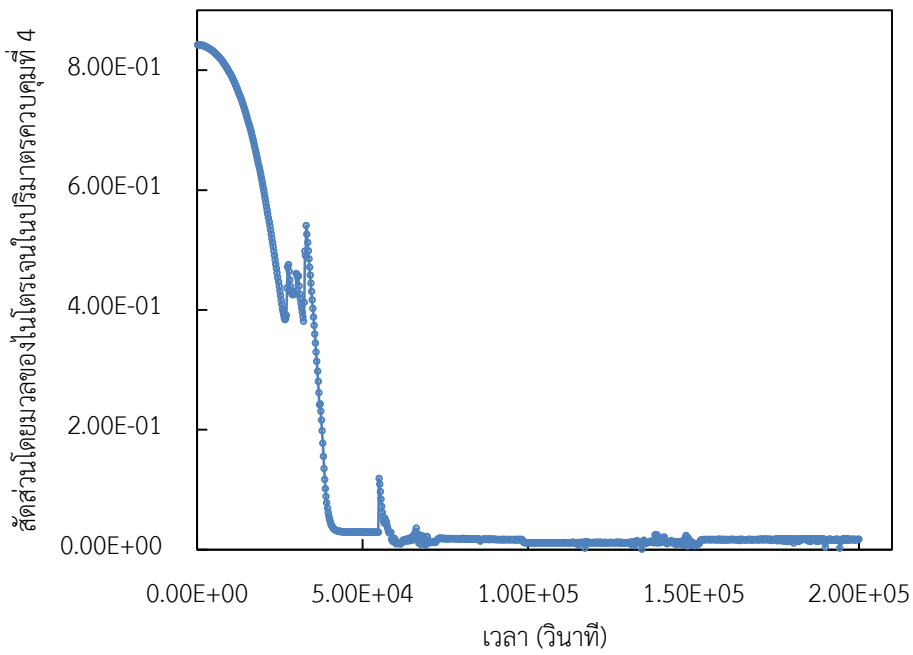
(h)



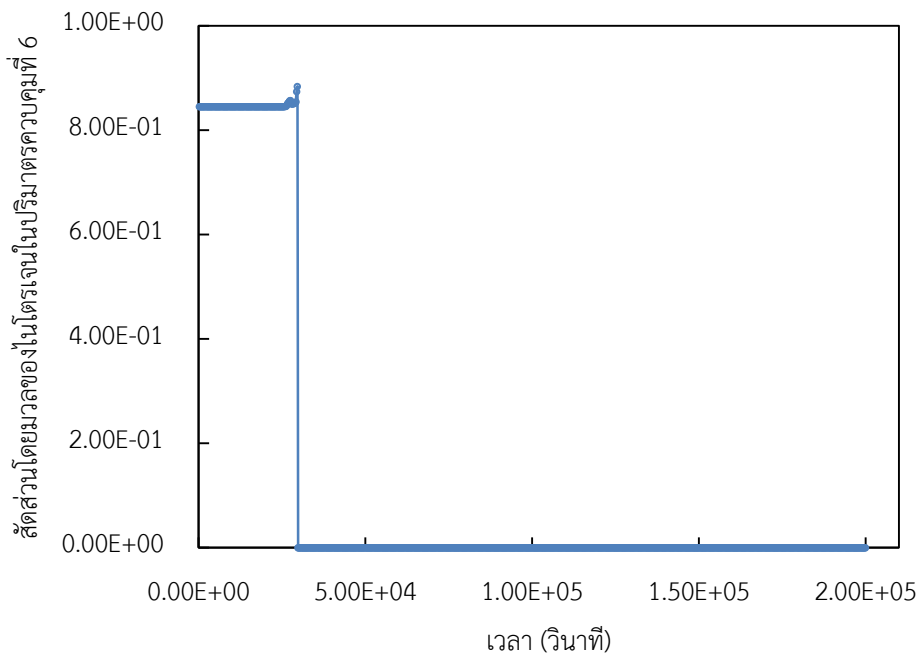
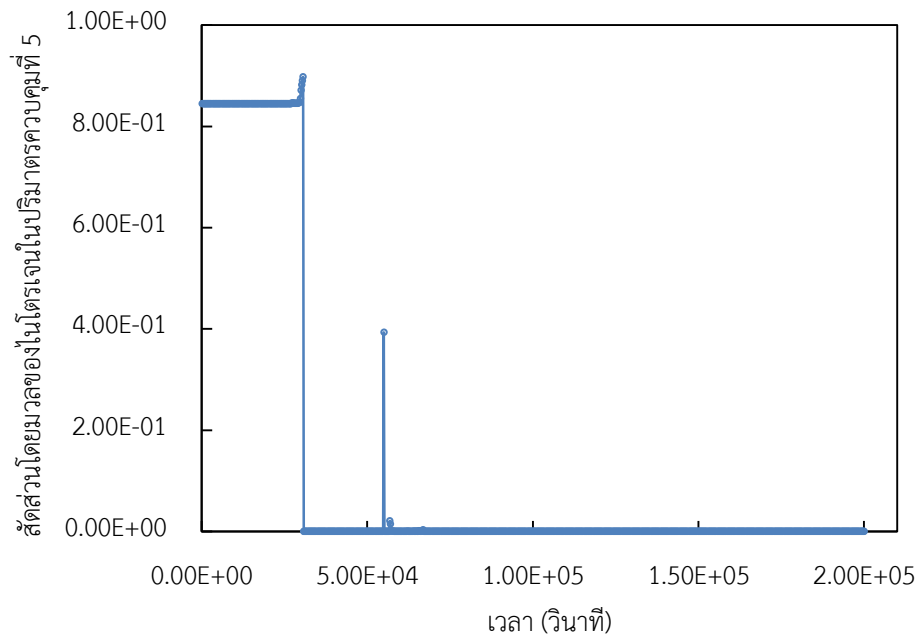
(i)



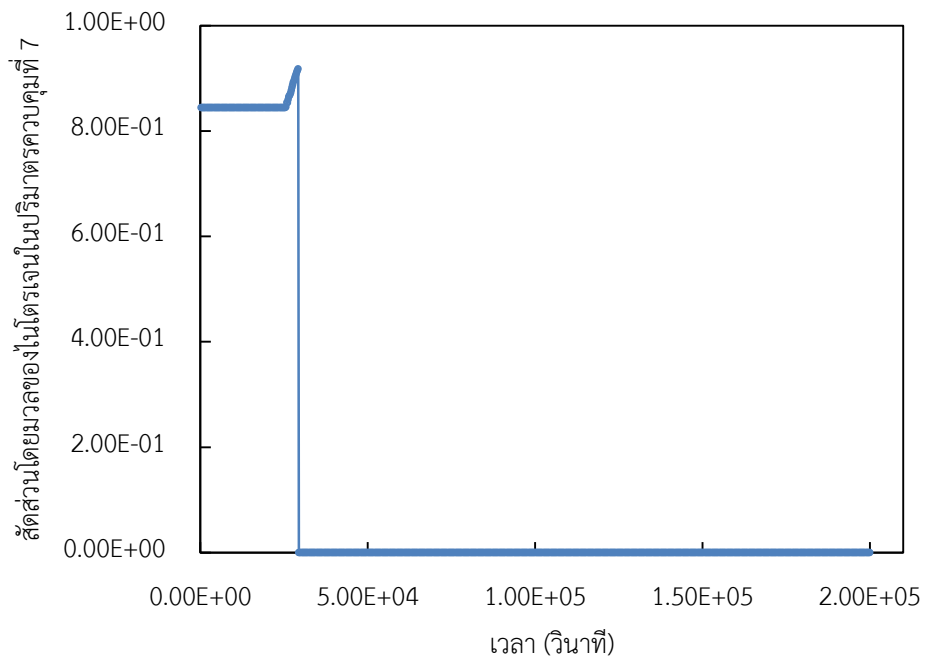
(j)



(k)

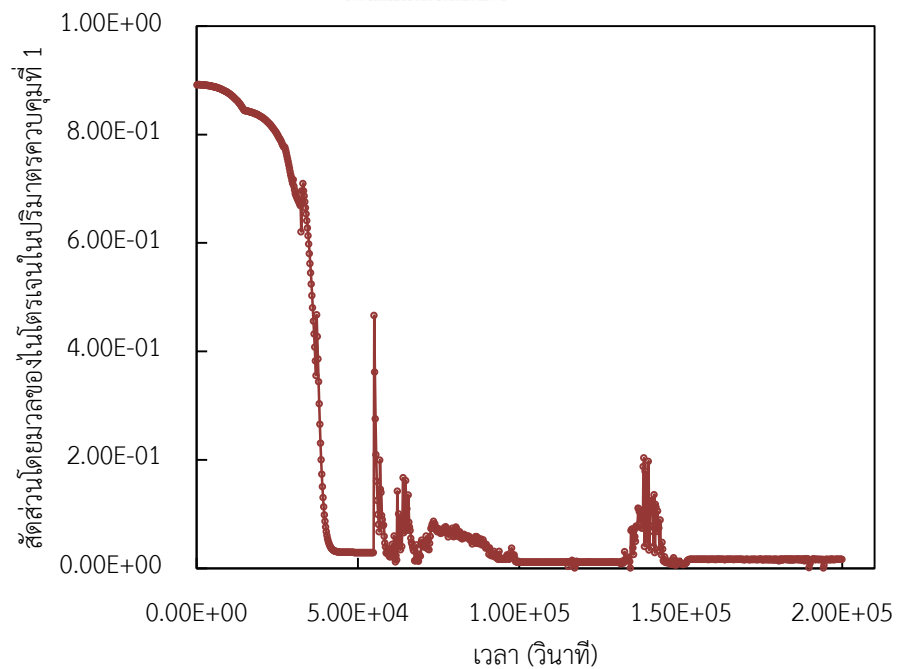


(m)

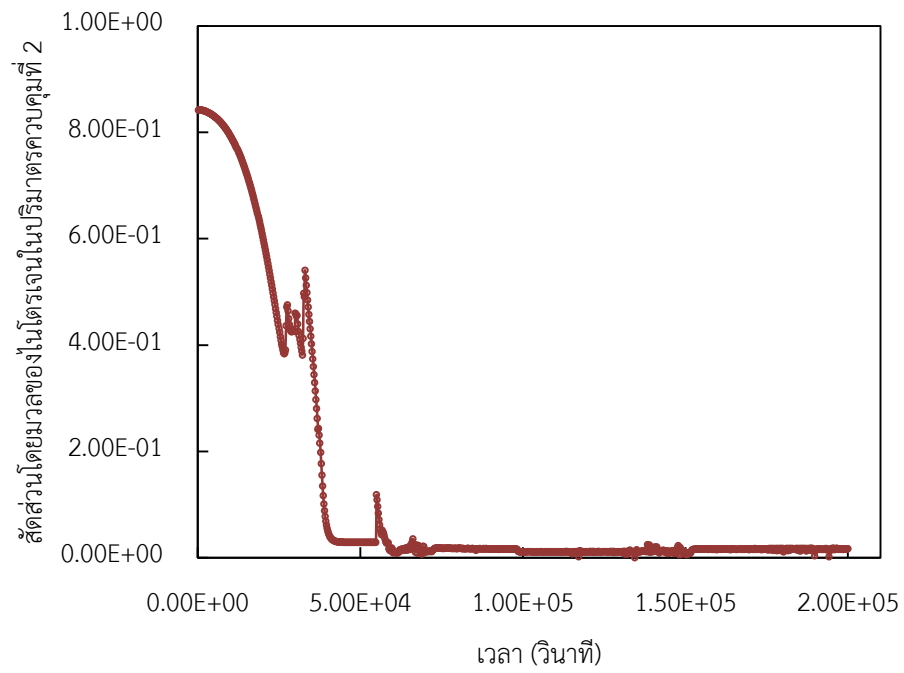


(n)

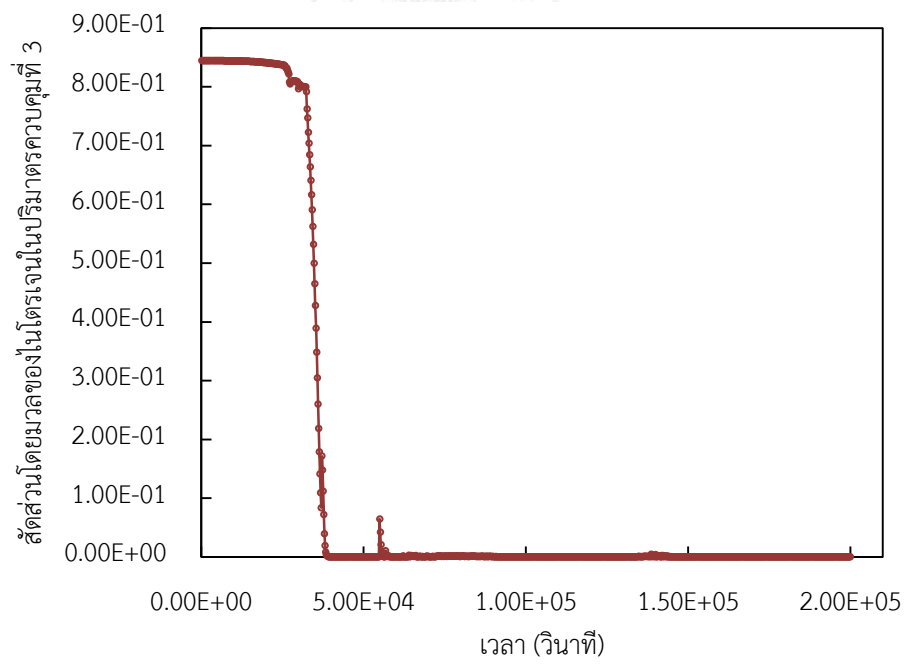
รูปที่ ก-9 (h(n)) สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจนที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิบัติการในกรณีที่มีการจัดการอุบัติเหตุ



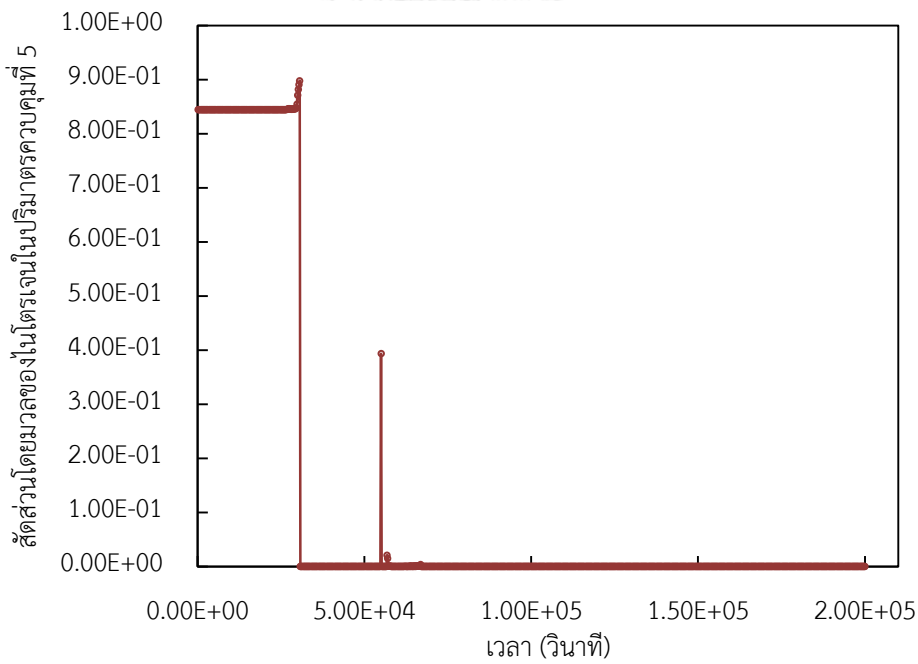
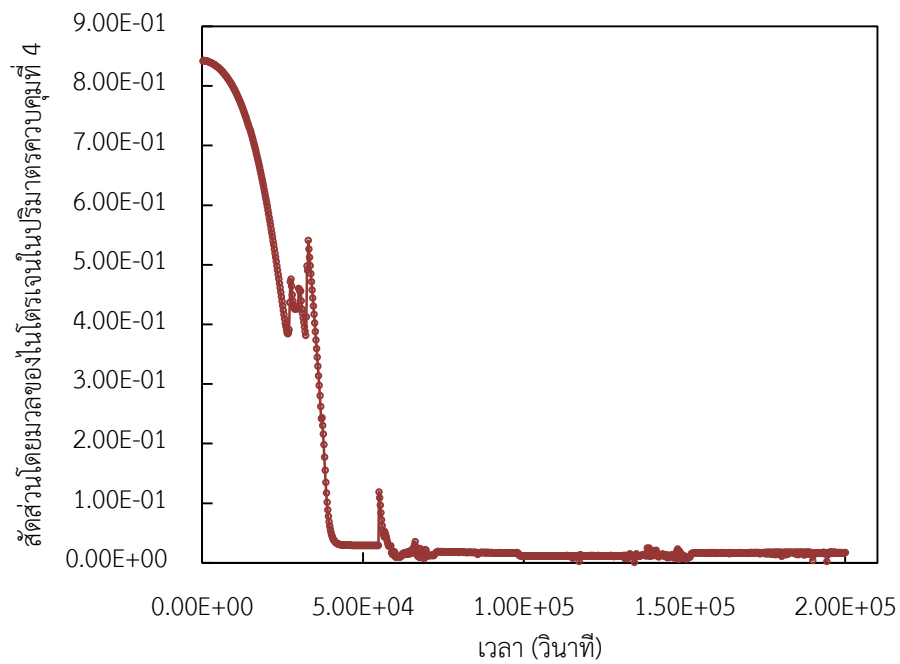
(o)



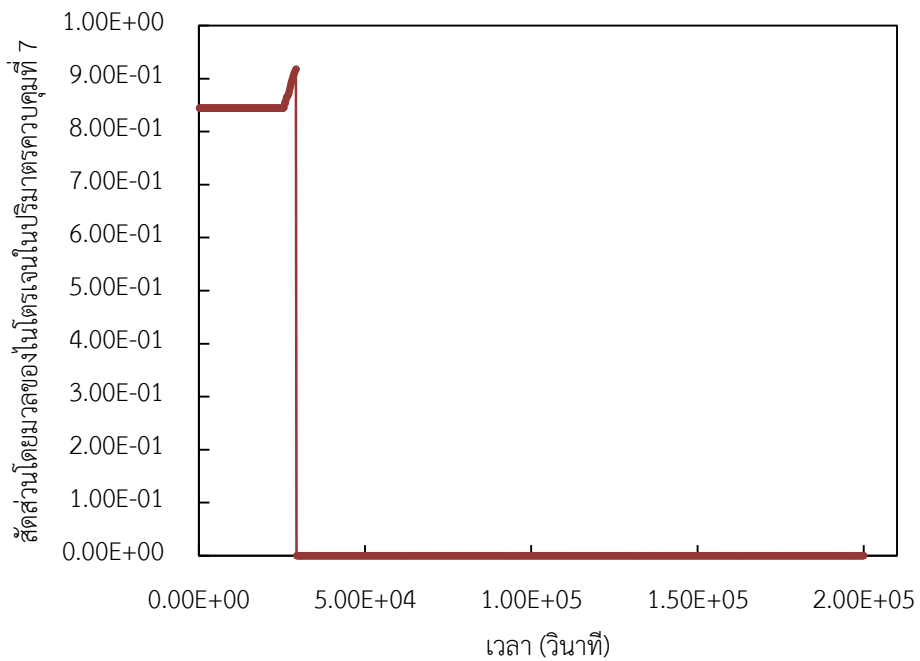
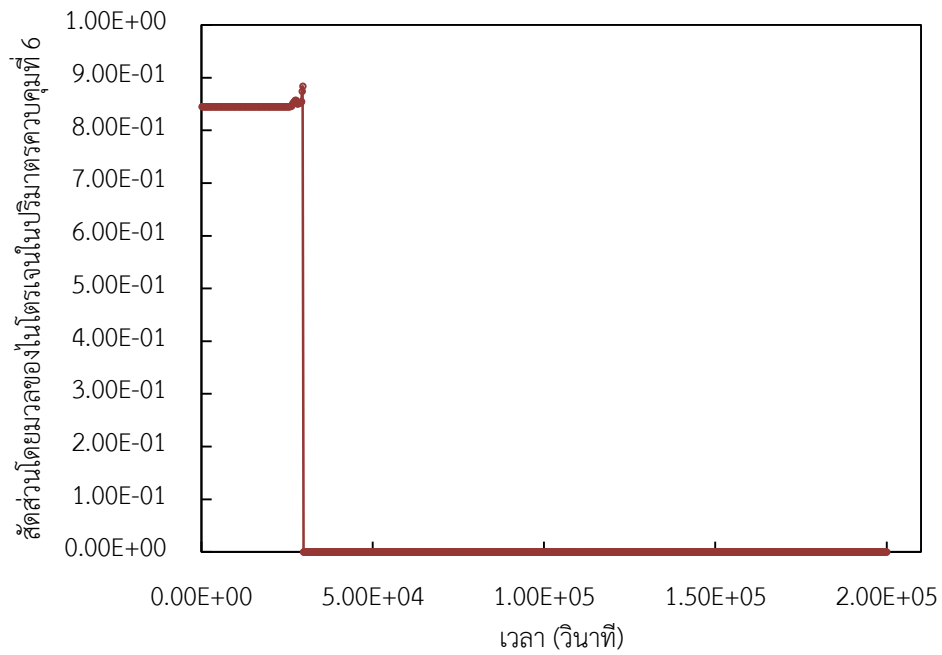
(p)



(q)



(s)



(u)

รูปที่ ก-10 (o(u) สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจนที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ

### ตัวอย่างคำสั่งข้อมูลขาเข้า โปรแกรม Visual Basic ของการจำลองเหตุการณ์ในกรณีอ้างอิง

Option Explicit

Private rowj As Integer

Private b(1700, 100) As Double

Private e(1010, 50) As String

Private h(1010, 50) As Single 'H2 mass fract

Private MN(1010, 50) As Single 'N2 mole fract

Private MH(1010, 50) As Single 'H2 mole fract

Private f(1010, 50) As String

Private Row(10) As String

Private A1 As Single

Private A2 As Single

Private A3 As Single

Private A4 As Single

Private A5 As Single

Private A6 As Single

Private A7 As Single

Private a As Integer

Private d As Integer

Private c As Integer ' column

Private r As Integer ' row

Private realj As Integer ' row of b(j,i)

Private Sub Form\_Load()

c = 22

End Sub

Private Sub mnuOpen\_Click()

Dim SourceName As String

Dim i As Integer

Dim j As Integer

Dim k As Integer

Dim l As Integer

Dim m As Integer

Dim cola As Integer

Dim t As Double 'String 'Single

Dim WatL As Single



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



```

Dim z As Single
CommonDialog1.ShowOpen
SourceName = CommonDialog1.FileName
Open SourceName For Input As #1
    j = 0
    Do Until EOF(1)
        j = j + 1
        For k = 1 To c
            Input #1, t
            b(j, k) = Val(t)
        Next k
    Loop
Close #1
rowj = j
End Sub
Private Sub mnuSAVE_Click()
Dim TargetName As String
Dim k As Integer
Dim j As Integer
CommonDialog1.ShowSave
TargetName = CommonDialog1.FileName
Open TargetName For Output As #1
Dim time As Single
Dim SRCJ As String
Dim UGJ As String
Dim GJ As String
Dim TMP As String 'TMPARJ
Dim WTMP As String
Dim TLJ As String
Dim x As Integer
Dim TJ As String
Dim WVol As String
Dim HWLEVJ As String
Dim TWJ As String
Dim i As Integer

```



```

For i = 1 To rowj
  For k = 1 To 22
    e(i, k) = Str(b(i, k))
  Next k
e(i, 2) = 1631.388 '//////////Max Water Level
b(i, 2) = 1631.388 '//////////Max Water Level\
e(i, 5) = 800
b(i, 5) = 800
Next i
time = 0
For i = 1 To rowj
time = time + 200
If time = 200000 Then
time = time + 5
End If
A1 = 6822970 '/area vol1
A2 = 6822970 '/area vol2
A3 = 890330 '/area vol3
A4 = 890330 '/area vol4
A5 = 868270 '/area vol5
A6 = 927450 '/area vol6
A7 = 848860 '/area vol7
If b(i, 2) > 1626.2 And b(i, 2) <= 2029.3 Then
Dim Wvol4 As String 'vol4
Dim Wvol5 As String 'vol5
Dim Wvol6 As String 'vol6
Dim Wvol7 As String 'vol7
Dim HWLEVJ4 As String
Dim HWLEVJ5 As String
Dim HWLEVJ6 As String
Dim HWLEVJ7 As String
Wvol4 = "VOLFJ(4) = " + Str(A4 * 397.912) + ", ' water level in each vol 504.7/2029.3-1631.388
Wvol5 = "VOLFJ(5) = " + Str(A5 * 506) + ", ' water level in each vol 504.7/1626.2
Wvol6 = "VOLFJ(6) = " + Str(A6 * 242) + ", ' water level in each vol 241.5/880+241.5=1121.5
Wvol7 = "VOLFJ(7) = " + Str(A7 * 880.5) + ", ' water level in each vol 880/

```

```

HWLEVJ4 = "HWLEVJ(4) = 397.912,"
HWLEVJ5 = "HWLEVJ(5) = 506,"
HWLEVJ6 = "HWLEVJ(6) = 242,"
HWLEVJ7 = "HWLEVJ(7) = 880.5,"
TLJ = "TLJ(4) = 4*" + e(i, 7) + ", " 'vol4-7 ????????????'
End If

Dim den As Single ' density
Dim flow As Single
'Steam min density = 0.240902131
den = 0.240902131 * 0.000001
flow = b(i, 8) / den
If time <> 26000 Then
Print #1, "&DPTIM NTRNDT =" + Str(i) + ", TNEXTJ =" + Str(time) + ", "
End If
If time = 26000 Then
Print #1, "&DPTIM NTRNDT =" + Str(i) + ", TNEXTJ = 25810,"
End If
Print #1, "DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,"
If time = 26000 Then
Print #1, "SRCJ(1,2,1) =814.39776,"
Print #1, "SRCJ(2,7,1) = 925.8971428,"
End If
If time = 26200 Then
Print #1, "SRCJ(1,2,1) =0,"
Print #1, "SRCJ(2,7,1) = 0,"
End If
Print #1, "AFJ(7) ="; Str(A7) + ", " "equal to vol7
Print #1, "GJ(1, 6, 7) =" + Str(flow) + ", " ' 7->1->8
Print #1, "GJ(1, 5, 6) =" + Str(flow) + ", " + " GJ(1, 4, 5) =" + Str(flow) + ", "
Print #1, "GJ(1, 3, 4) =" + Str(flow) + ", " + " GJ(1, 2, 3) =" + Str(flow) + ", "
Print #1, "GJ(1, 1, 2) =" + Str(flow) + ", " + " GJ(1, 8, 1) =" + Str(flow) + ", "
Dim vel1 As Single
Dim vel2 As Single
Dim vel3 As Single
Dim vel4 As Single

```

Dim vel5 As Single

Dim vel6 As Single

Dim vel7 As Single

vel1 = b(i, 9) \* 100

vel2 = b(i, 10) \* 100

vel3 = b(i, 11) \* 100

vel4 = b(i, 12) \* 100

vel5 = b(i, 13) \* 100

vel6 = b(i, 14) \* 100

vel7 = b(i, 15) \* 100

Print #1, "UGJ(1) = " + Str(vel1) + "," + Str(vel2) + "," + Str(vel3) + "," + """"vertical velocity

Print #1, Str(vel4) + "," + Str(vel5) + "," + Str(vel6) + "," + Str(vel7) + ","

Dim MPa As Single

MPa = Val(e(i, 6)) 'kPa

MPa = MPa / 1000 'kPa->MPa

h(i, 16) = 1 - b(i, 16) 'H2 mass fraction

h(i, 17) = 1 - b(i, 17)

h(i, 18) = 1 - b(i, 18)

h(i, 19) = 1 - b(i, 19)

h(i, 20) = 1 - b(i, 20)

h(i, 21) = 1 - b(i, 21)

h(i, 22) = 1 - b(i, 22)

MN(i, 16) = b(i, 16) / (28 / (28 \* b(i, 16) + 18 \* h(i, 16)))

MN(i, 17) = b(i, 17) / (28 / (28 \* b(i, 17) + 18 \* h(i, 17)))

MN(i, 18) = b(i, 18) / (28 / (28 \* b(i, 18) + 18 \* h(i, 18)))

MN(i, 19) = b(i, 19) / (28 / (28 \* b(i, 19) + 18 \* h(i, 19)))

MN(i, 20) = b(i, 20) / (28 / (28 \* b(i, 20) + 18 \* h(i, 20)))

MN(i, 21) = b(i, 21) / (28 / (28 \* b(i, 21) + 18 \* h(i, 21)))

MN(i, 22) = b(i, 22) / (28 / (28 \* b(i, 22) + 18 \* h(i, 22)))

Print #1, "XSJ(1,1) = " + Str(1 - MN(i, 16)) + ", XSJ(1,3) = " + Str(MN(i, 16)) + ","

Print #1, "XSJ(2,1) = " + Str(1 - MN(i, 17)) + ", XSJ(2,3) = " + Str(MN(i, 17)) + ","

Print #1, "XSJ(3,1) = " + Str(1 - MN(i, 18)) + ", XSJ(3,3) = " + Str(MN(i, 18)) + ","

Print #1, "XSJ(4,1) = " + Str(1 - MN(i, 19)) + ", XSJ(4,3) = " + Str(MN(i, 19)) + ","

Print #1, "XSJ(5,1) = " + Str(1 - MN(i, 20)) + ", XSJ(5,3) = " + Str(MN(i, 20)) + ","

Print #1, "XSJ(6,1) = " + Str(1 - MN(i, 21)) + ", XSJ(6,3) = " + Str(MN(i, 21)) + ","

```

Print #1, "XSJ(7,1) =" + Str(1 - MN(i, 22)) + ", XSJ(7,3) =" + Str(MN(i, 22)) + ","
Print #1, "PMPAJ(1)= 7*" + Str(MPa) + ", " + "0.101325," "*****"EDIT Val(e(1,18))/1000
If b(i, 2) <> 0 Then
Print #1, Wvol4
Print #1, Wvol5
Print #1, Wvol6
Print #1, Wvol7
Print #1, HWLEVJ4
Print #1, HWLEVJ5
Print #1, HWLEVJ6
Print #1, HWLEVJ7
End If
If b(i, 2) = 0 Then
Print #1, "TWJ(1) = 7*" + e(i, 4) + ","
Print #1, "TJ(1) =" + e(i, 5) + "," ' Tgas constant 800K
End If
If b(i, 2) > 1626.2 And b(i, 2) <= 2029.3 Then
Print #1, "TWJ(1) =4*" + e(i, 4) + "," 'assume Twall = T LDW
Print #1, "TWJ(5) =3*" + e(i, 7) + "," 'assume Twall = T water
Print #1, "TJ(1) = 4*" + e(i, 5) + "," ' Max water lev at 4
End If
If b(i, 2) > 0 Then
Print #1, TLJ
End If
If b(i, 2) <> 0 Then 'assume max water lev at vol4
Print #1, "TMPARJ(1,1) = 10*" + e(i, 5); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,2) = 10*" + e(i, 5); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,3) = 10*" + e(i, 5); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,4) = 10*" + e(i, 5); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,5) = 10*" + e(i, 7); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,6) = 10*" + e(i, 7); ", " 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,7) = 10*" + e(i, 7); ", " 'Tgas constant 800K
End If
If b(i, 2) = 0 Then
Print #1, "TMPARJ(1,1) = 10*" + e(i, 5); ", " 'Tgas constant 800K

```

```
Print #1, "TMPARJ(1,2) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,3) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,4) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,5) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,6) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
Print #1, "TMPARJ(1,7) = 10*" + e(i, 5); "," 'Tgas constant 800K
End If
Print #1, "&END"
Next i
Close #1
End Sub
```



ตัวอย่าง โปรแกรม ART Mod2 กรณีอ้างอิง

<< EXPERIMENT Geometry 8 very large release 1>>

&NDPTIM

LPITCH= 2000,  
 LOPT(1) = 10000,  
 LOPT(2) = 10000,  
 LOPT(5) = 10000,  
 TEND = 200000,  
 ITURB =1,INUC=2,  
 IAGLOM=1,IBROW=1,IGRAV=1,IRISK=0,  
 ICOND=1,IUGAS=0,IRESUP(1)=8\*0,  
 NDX=2,NDY=2,  
 NCOM=8,IELEVE=8,IMCOMP=0,  
 VCOMP(1) = 1.985E+09,VCOMP(2) = 3.555E+09,  
 VCOMP(3) = 5.081E+08,VCOMP(4) = 3.589E+08,  
 VCOMP(5) = 4.382E+08,VCOMP(6) = 2.240E+08,  
 VCOMP(7) = 7.470E+08, VCOMP(8) = 1E+13,  
 HCOMP(1) = 291, HCOMP(2) = 521,  
 HCOMP(3) = 570.7,HCOMP(4) = 403.1,  
 HCOMP(5) = 504.7, HCOMP(6) = 241.5,  
 HCOMP(7) = 880, HCOMP(8) = 1E+7,  
 DAW(1) = 9.258E+03, DAW(2) = 9.260E+03,  
 DAW(3) = 3.345E+03, DAW(4) = 3.345E+03,  
 DAW(5) = 3.303E+03, DAW(6) = 3.414E+03,  
 DAW(7) = 3.266E+03, DAW(8) = 3.545E+03,  
 IFP(1)=6,  
 RHOM(1)=4.510,  
 ICLASS=10,  
 ARS(1)=1.00000E-15,8.00000E-15,6.40000E-14,  
 5.12000E-13,4.09600E-12,3.27680E-11,  
 2.62144E-10,2.09715E-09,1.67772E-08,  
 1.34218E-07,1.07374E-06,  
 FXFILM=0.94417,FCONX=1.0,FILM=0.94417,  
 ALIMIT=1.0E-38,

&END

```

&DPTIM NTRNDT = 1 , TNEXTJ = 200 ,
DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,
AFJ(7)=8.49E+05,
GJ(1, 8, 1) = 5.159708E+07,
GJ(1, 1, 2) = 5.159708E+07, GJ(1, 2, 3) = 5.159708E+07,
GJ(1, 3, 4) = 5.159708E+07,
GJ(1, 4, 5) = 5.159708E+07,
GJ(1, 5, 6) = 5.159708E+07,
GJ(1, 6, 7) = 5.159708E+07,
UGJ(1) = 0.2, 0.2,0.4,0.1,0.6,0.025,0.3,
XSJ(1,1) = 8*1,
PMPAJ(1)= 7*0.10656, 0.101325,
VOLFJ(7) = 1018632,
HWLEVJ(7) = 1.2,
TWJ(1) = 2*402,
TWJ(3) =5*399,
TJ(1) = 2*402,
TJ(3) =5*399,
TLJ(7) = 260,
TMPARJ(1,1) = 10*402,
TMPARJ(1,2) = 10*402,
TMPARJ(1,3) = 10*399,
TMPARJ(1,4) = 10*399,
TMPARJ(1,5) = 10*399,
TMPARJ(1,6) = 10*399,
TMPARJ(1,7) = 10*399,
&END
&DPTIM NTRNDT = 2, TNEXTJ = 400 ,
DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,
AFJ(7) = 848860,
GJ(1, 6, 7) = 1.403064E+08,
GJ(1, 5, 6) = 1.403064E+08, GJ(1, 4, 5) = 1.403064E+08,
GJ(1, 3, 4) = 1.403064E+08, GJ(1, 2, 3) = 1.403064E+08,
GJ(1, 1, 2) = 1.403064E+08, GJ(1, 8, 1) = 1.403064E+08,
UGJ(1) = 5.76E-07,0.00129,-0.00029,

```





0.00129,-0.00034,-0.000295,-0.000298,  
 XSJ(1,1) =0.1424057, XSJ(1,3) =0.8575943,  
 XSJ(2,1) =0.2046417, XSJ(2,3) =0.7953583,  
 XSJ(3,1) =0.2025245, XSJ(3,3) =0.7974755,  
 XSJ(4,1) =0.2046417, XSJ(4,3) =0.7953583,  
 XSJ(5,1) =0.2021507, XSJ(5,3) =0.7978493,  
 XSJ(6,1) =0.2017768, XSJ(6,3) =0.7982232,  
 XSJ(7,1) =0.2025245, XSJ(7,3) =0.7974755,  
 PMPAJ(1)= 7\*0.11152, 0.101325,  
 VOLFJ(4) = 354272990.96,  
 VOLFJ(5) = 4.393446E+08,  
 VOLFJ(6) = 2.244429E+08,  
 VOLFJ(7) = 747421230,  
 HWLEVJ(4) = 397.912,  
 HWLEVJ(5) = 506,  
 HWLEVJ(6) = 242,  
 HWLEVJ(7) = 880.5,  
 TWJ(1) =4\*399,  
 TWJ(5) =3\*359,  
 TJ(1) = 4\*800,  
 TLJ(4) = 4\*359,  
 TMPARJ(1,1) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,2) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,3) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,4) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,5) = 10\*359,  
 TMPARJ(1,6) = 10\*359,  
 TMPARJ(1,7) = 10\*359,  
 &END  
 .  
 .  
 .  
 &DPTIM NTRNDT = 130, TNEXTJ = 25810,  
 DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,  
 SRCJ(1,2,1) =814.39776,



$$\text{SRCJ}(2,7,1) = 925.8971428,$$

$$\text{AFJ}(7) = 848860,$$

$$\text{GJ}(1, 6, 7) = 3.943095\text{E}+07,$$

$$\text{GJ}(1, 5, 6) = 3.943095\text{E}+07, \text{GJ}(1, 4, 5) = 3.943095\text{E}+07,$$

$$\text{GJ}(1, 3, 4) = 3.943095\text{E}+07, \text{GJ}(1, 2, 3) = 3.943095\text{E}+07,$$

$$\text{GJ}(1, 1, 2) = 3.943095\text{E}+07, \text{GJ}(1, 8, 1) = 3.943095\text{E}+07,$$

$$\text{UGJ}(1) = -0.025, 0.0451, 0.0744,$$

$$0.0451, 0.00936, 0.0177, 0.0234,$$

$$\text{XSJ}(1,1) = 0.2693707, \text{XSJ}(1,3) = 0.7306293,$$

$$\text{XSJ}(2,1) = 0.6882188, \text{XSJ}(2,3) = 0.3117812,$$

$$\text{XSJ}(3,1) = 0.2171776, \text{XSJ}(3,3) = 0.7828224,$$

$$\text{XSJ}(4,1) = 0.6882188, \text{XSJ}(4,3) = 0.3117812,$$

$$\text{XSJ}(5,1) = 0.2022753, \text{XSJ}(5,3) = 0.7977247,$$

$$\text{XSJ}(6,1) = 0.2012782, \text{XSJ}(6,3) = 0.7987218,$$

$$\text{XSJ}(7,1) = 0.1907806, \text{XSJ}(7,3) = 0.8092194,$$

$$\text{PMPAJ}(1) = 7 * 0.10318, 0.101325,$$

$$\text{VOLFJ}(4) = 354272990.96,$$

$$\text{VOLFJ}(5) = 4.393446\text{E}+08,$$

$$\text{VOLFJ}(6) = 2.244429\text{E}+08,$$

$$\text{VOLFJ}(7) = 747421230,$$

$$\text{HWLEVJ}(4) = 397.912,$$

$$\text{HWLEVJ}(5) = 506,$$

$$\text{HWLEVJ}(6) = 242,$$

$$\text{HWLEVJ}(7) = 880.5,$$

$$\text{TWJ}(1) = 4 * 412,$$

$$\text{TWJ}(5) = 3 * 366,$$

$$\text{TJ}(1) = 4 * 800,$$

$$\text{TLJ}(4) = 4 * 366,$$

$$\text{TMPARJ}(1,1) = 10 * 800,$$

$$\text{TMPARJ}(1,2) = 10 * 800,$$

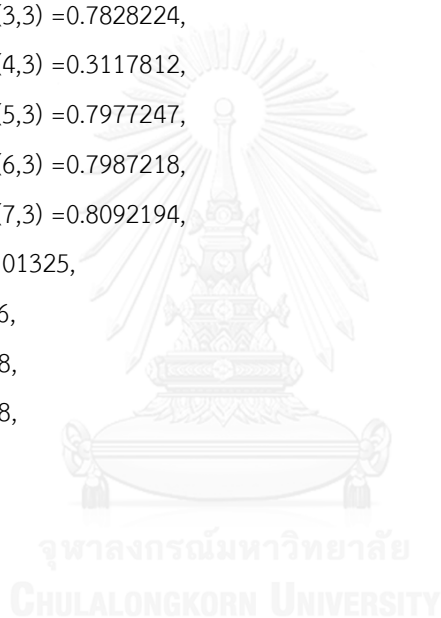
$$\text{TMPARJ}(1,3) = 10 * 800,$$

$$\text{TMPARJ}(1,4) = 10 * 800,$$

$$\text{TMPARJ}(1,5) = 10 * 366,$$

$$\text{TMPARJ}(1,6) = 10 * 366,$$

$$\text{TMPARJ}(1,7) = 10 * 366,$$



&END

&DPTIM NTRNDT = 131, TNEXTJ = 26200 ,

DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,

SRCJ(1,2,1) = 0,

SRCJ(2,7,1) = 0,

AFJ(7) = 848860,

GJ(1, 6, 7) = 3.664185E+07,

GJ(1, 5, 6) = 3.664185E+07, GJ(1, 4, 5) = 3.664185E+07,

GJ(1, 3, 4) = 3.664185E+07, GJ(1, 2, 3) = 3.664185E+07,

GJ(1, 1, 2) = 3.664185E+07, GJ(1, 8, 1) = 3.664185E+07,

UGJ(1) = -0.0321,0.0553,0.125,

0.0553,0.0337,0.00645,-0.00604,

XSJ(1,1) = 0.2722656, XSJ(1,3) = 0.7277344,

XSJ(2,1) = 0.693858, XSJ(2,3) = 0.3061419,

XSJ(3,1) = 0.21792, XSJ(3,3) = 0.78208,

XSJ(4,1) = 0.693858, XSJ(4,3) = 0.3061419,

XSJ(5,1) = 0.2022753, XSJ(5,3) = 0.7977247,

XSJ(6,1) = 0.2009041, XSJ(6,3) = 0.7990959,

XSJ(7,1) = 0.1833771, XSJ(7,3) = 0.8166229,

PMPAJ(1) = 7\*0.103796, 0.101325,

VOLFJ(4) = 354272990.96,

VOLFJ(5) = 4.393446E+08,

VOLFJ(6) = 2.244429E+08,

VOLFJ(7) = 747421230,

HWLEVJ(4) = 397.912,

HWLEVJ(5) = 506,

HWLEVJ(6) = 242,

HWLEVJ(7) = 880.5,

TWJ(1) = 4\*412,

TWJ(5) = 3\*366,

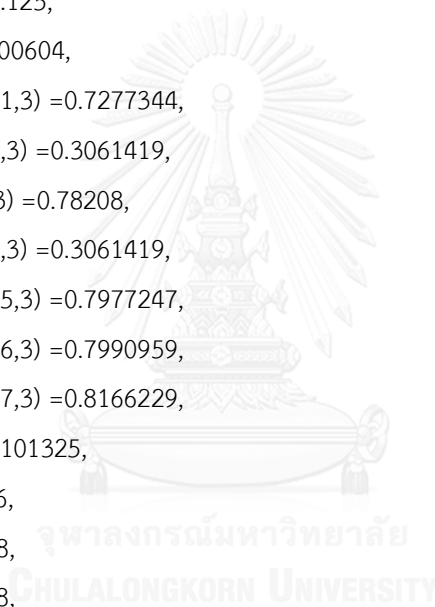
TJ(1) = 4\*800,

TLJ(4) = 4\*366,

TMPARJ(1,1) = 10\*800,

TMPARJ(1,2) = 10\*800,

TMPARJ(1,3) = 10\*800,



TMPARJ(1,4) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,5) = 10\*366,  
 TMPARJ(1,6) = 10\*366,  
 TMPARJ(1,7) = 10\*366,  
 &END  
 &DPTIM NTRNDT = 132, TNEXTJ = 26400 ,  
 DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,  
 AFJ(7) = 848860,  
 GJ(1, 6, 7) = 3.664185E+07,  
 GJ(1, 5, 6) = 3.664185E+07, GJ(1, 4, 5) = 3.664185E+07,  
 GJ(1, 3, 4) = 3.664185E+07, GJ(1, 2, 3) = 3.664185E+07,  
 GJ(1, 1, 2) = 3.664185E+07, GJ(1, 8, 1) = 3.664185E+07,  
 UGJ(1) = -0.024,-0.00846,-0.156,  
 -0.00846,-0.0172,0.128,0.204,  
 XSJ(1,1) =0.2758785, XSJ(1,3) =0.7241215,  
 XSJ(2,1) =0.6989198, XSJ(2,3) =0.3010802,  
 XSJ(3,1) =0.2187858, XSJ(3,3) =0.7812142,  
 XSJ(4,1) =0.6989198, XSJ(4,3) =0.3010802,  
 XSJ(5,1) =0.2021507, XSJ(5,3) =0.7978493,  
 XSJ(6,1) =0.1989081, XSJ(6,3) =0.8010919,  
 XSJ(7,1) =0.1765793, XSJ(7,3) =0.8234207,  
 PMPAJ(1)= 7\*0.104412, 0.101325,  
 VOLFJ(4) = 354272990.96,  
 VOLFJ(5) = 4.393446E+08,  
 VOLFJ(6) = 2.244429E+08,  
 VOLFJ(7) = 747421230,  
 HWLEVJ(4) = 397.912,  
 HWLEVJ(5) = 506,  
 HWLEVJ(6) = 242,  
 HWLEVJ(7) = 880.5,  
 TWJ(1) =4\*412,  
 TWJ(5) =3\*366,  
 TJ(1) = 4\*800,  
 TLJ(4) = 4\*366,  
 TMPARJ(1,1) = 10\*800,

TMPARJ(1,2) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,3) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,4) = 10\*800,  
 TMPARJ(1,5) = 10\*366,  
 TMPARJ(1,6) = 10\*366,  
 TMPARJ(1,7) = 10\*366,  
 &END

.  
 .  
 .

&DPTIM NTRNDT = 1000, TNEXTJ = 200005 ,  
 DTALLM = 0.1 , DTB = 0.1,  
 AFJ(7) = 848860,  
 GJ(1, 6, 7) = 1.321034E+07,  
 GJ(1, 5, 6) = 1.321034E+07, GJ(1, 4, 5) = 1.321034E+07,  
 GJ(1, 3, 4) = 1.321034E+07, GJ(1, 2, 3) = 1.321034E+07,  
 GJ(1, 1, 2) = 1.321034E+07, GJ(1, 8, 1) = 1.321034E+07,  
 UGJ(1) = -0.241,-3.5,-25.1,  
 -3.5,-17.8,-16.3,-137,  
 XSJ(1,1)=0.9891647, XSJ(1,3) = 1.083532E-02,  
 XSJ(2,1)=0.9888372, XSJ(2,3) =0.0111628,  
 XSJ(3,1) = 1, XSJ(3,3) = 0,  
 XSJ(4,1)=0.9888372, XSJ(4,3) =0.0111628,  
 XSJ(5,1) = 1, XSJ(5,3) = 0,  
 XSJ(6,1) = 1, XSJ(6,3) = 0,  
 XSJ(7,1) = 1, XSJ(7,3) = 0,  
 PMPAJ(1)= 7\*0.10128, 0.101325,  
 VOLFJ(4) = 354272990.96,  
 VOLFJ(5) = 4.393446E+08,  
 VOLFJ(6) = 2.244429E+08,  
 VOLFJ(7) = 747421230,  
 HWLEVJ(4) = 397.912,  
 HWLEVJ(5) = 506,  
 HWLEVJ(6) = 242,  
 HWLEVJ(7) = 880.5,

TWJ(1) = 4\*567,  
TWJ(5) = 3\*373,  
TJ(1) = 4\*800,  
TLJ(4) = 4\*373,  
TMPARJ(1,1) = 10\*800,  
TMPARJ(1,2) = 10\*800,  
TMPARJ(1,3) = 10\*800,  
TMPARJ(1,4) = 10\*800,  
TMPARJ(1,5) = 10\*373,  
TMPARJ(1,6) = 10\*373,  
TMPARJ(1,7) = 10\*373,  
&END



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพินสุรางค์ กิตติวรภาพล

เกิดวันที่ 8 มีนาคม 2533

สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2555

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ย. 2556 - ส.ค. 2557 : ผู้ช่วยวิจัยโครงการการศึกษาสถานภาพเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

ก.พ. - ต.ค. 2558 : รับจ้างเหมาทำงานวิจัยโครงการวิจัย การประเมินการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีในอุบัติเหตุร้ายแรงของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อพัฒนากลยุทธ์การจัดการอุบัติเหตุ

หน่วยงาน : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่

Pinsurang K., Somboon R., Kampanart S., The Study of Cesium Iodide Transportation in Containment of a Generation III+ Boiling Water Reactor under Bypass Condition, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 113 2015: p. 1422-1425