

การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Improvement of Aerosol Deposition Model in ART Mod 2 programme

Mr. Wasin Vechgama



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลใน โปรแกรม ART Mod 2
โดย	นายวศิน เวชกามา
สาขาวิชา	วิศวกรรมนิวเคลียร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. สมบูรณ์ รัชมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. กัมปนาท ชิลวา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. สมบูรณ์ รัชมี)

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัตยชัย นิลสุวรรณเมษิต)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ปิยธิดา ไตรนุรักษ์)

วศิน เวชกามา : การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 (Improvement of Aerosol Deposition Model in ART Mod 2 programme) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ดร. สมบูรณ์ รัชมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. กัมปนาท ชิลวา, 132 หน้า.

ในการประเมินอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ การประเมินอุบัติเหตุในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จัดเป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่ง เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ป้องกันการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีขั้นสุดท้ายก่อนไปสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีต่างๆที่รั่วไหลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยเฉพาะสารประกอบซีเซียม ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินผลกระทบของอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่อาจเกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม ART Mod 2 ในการคำนวณ จากการศึกษางานวิจัยในอดีตซึ่งใช้โปรแกรม ART Mod 2 ในการศึกษาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) และจากการจำลองการทดลอง Nuclear Safety Pilot Plant – 502 (NSPP-502) และ Phébus Fission Product Test 1 (Phébus FPT1) เพื่อศึกษาการสะสมตัวของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ พบว่ามีความไม่สอดคล้องกันของปริมาณแอโรซอลที่สะสมตัวบนพื้น ปริมาณแอโรซอลที่สะสมตัวบนผนัง และปริมาณสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับการทดลองจริงมากขึ้นและสามารถประเมินอุบัติเหตุได้แม่นยำขึ้น โดยได้ทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจาก 4 ปรากฏการณ์ ได้แก่ ปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) ปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโฟเรซิส (diffusiophoresis) และปรากฏการณ์เทอร์โมโฟเรซิส (thermophoresis) ถัดมา จึงได้นำแบบจำลองที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมาใช้ในการจำลองการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 และการประเมินการจัดการอุบัติเหตุในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ผลที่ได้พบว่าการจำลองการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 มีค่าการสะสมตัวของแอโรซอลบนพื้นและผนังใกล้เคียงการทดลองจริงมากขึ้น และพบว่าการจำลองการประเมินการจัดการอุบัติเหตุในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR มีปริมาณสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกับการประเมินจากโปรแกรม MAAP ที่ใช้ประเมินก่อนหน้านี้มากขึ้น จากผลที่สอดคล้องกันของการทดลองและการคำนวณ ทำให้สามารถเลือกวิธีการจัดการอุบัติเหตุกับผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยมากขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870240921 : MAJOR NUCLEAR ENGINEERING

KEYWORDS: ART MOD 2 / PHEBUS FPT / NSPP-502 / CONTAINMENT VESSEL / AEROSOL DEPOSITION MODEL

WASIN VECHGAMA: Improvement of Aerosol Deposition Model in ART Mod 2 programme. ADVISOR: SOMBOON RASSAME, Ph.D., CO-ADVISOR: KAMPANART SILVA, Ph.D., 132 pp.

As for severe accident assessment of nuclear power plant, severe accident assessment in containment vessel is important because containment vessel is the last structure for protection of release of fission product. This research focuses on the study of fission product behaviour in containment vessel, in particular the cesium compounds, which are important information for consequence assessment of accidents in nuclear power plants, using ART Mod 2 programme. In previous research, ART Mod 2 programme was used to study transportation and deposition of cesium compounds in containment vessel of Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) and experiments of Nuclear Safety Pilot Plant – 502 (NSPP-502) and Phébus Fission Product Test 1 (Phébus FPT1). Aerosol deposition on the floor, aerosol deposition on the wall and amount of radioactive material leak into the environment from the experiment and calculation were found inconsistent. The objective of this research is to improve aerosol deposition model for more consistent calculation and more accurate accident assessment. There are four phenomenon of aerosol deposition of which the calculation models being modified, including gravitational settling, Brownian diffusion, diffusiophoresis and thermophoresis. After that, modified aerosol deposition models are simulated with NSPP-502, Phébus FPT1 experiment and accident management of ESBWR containment vessel. As a result, aerosol deposition on the floor and the wall agree more with NSPP-502 and Phébus FPT1 experiments. In addition, in the simulation of accident management of ESBWR containment vessel, it is found that release of radioactive material become closer to the previous assessment using the MAAP programme. This consistency of the experiment and calculation results provide accurate information which enable us to choose method in order to more appropriately and safely deal with consequence of accident.

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study: Nuclear Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยในหัวข้อการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 ครั้งนี้ได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่ายจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่สนับสนุนและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบุรณ์ รัชมี อาจารย์ที่ปรึกษาหลักในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ แนะนำและให้คำปรึกษาในการเขียนวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงช่วยแก้ไขการเขียนวิจัยซึ่งเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถในการวิจัยของข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร.กัมปนาท ซิลวา จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ของข้าพเจ้า ที่คอยแนะนำแนวทางในการทำวิจัยทั้งในด้าน การใช้และการปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 นอกจากนี้ยังแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยให้ข้าพเจ้าเข้าใจ และสามารถต่อยอดในการทำงานของข้าพเจ้าได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุพิชชา จันทโรยธา ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้เกี่ยวกับระบบต่างๆที่เกี่ยวข้อง โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินวิจัยครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สัญชัย นิลสุวรรณโฆสิต กรรมการภายในในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้เกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินวิจัยครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ดร.ปิยธิดา ไตรนุรักษ์ กรรมการภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับการสอบวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาสละเวลามาร่วมฟังการดำเนินวิจัยครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ นางสาวพิณสุรางค์ กิตติวราพล ที่คอยให้ความรู้และข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับการจัดการอุบัติเหตุเกี่ยวกับโปรแกรม ART Mod 2

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยของข้าพเจ้าในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	1
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อุบัติเหตุร้ายแรง (severe accident: SA)	6
2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในลำดับต่างๆ	6
2.3 โปรแกรม ART Mod 2.....	8
2.3.1 สารกัมมันตรังสีที่โปรแกรม ART Mod 2 สามารถประเมินได้.....	8
2.3.2 พฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod 2.....	9
2.3.3 การใช้งานโปรแกรม ART Mod 2	10
2.3.3.1 ข้อมูลขาเข้า (input) ที่สำคัญในโปรแกรม ART Mod 2	10
2.3.3.2 การใช้งานโปรแกรม ART Mod 2.....	10
2.3.4 โครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2.....	10

2.4 การทดลอง NSPP-502.....	13
2.5 การทดลอง Phébus FPT1.....	14
2.6 ทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลของ สารประกอบซีเซียม	18
2.6.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง.....	22
2.6.2 การแพร่แบบบราวเนียน	26
2.6.3 ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส	31
2.6.4 เทอร์โมฟรีซิส.....	34
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบ ซีเซียม.....	37
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบ ซีเซียม.....	38
2.7.3 งานวิจัยอื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโร ซอล	40
3.1 การศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมจากอุบัติเหตุร้ายแรง	42
3.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1	42
3.2.1 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502.....	45
3.2.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1	47
3.2.2.1 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียว	47
3.2.2.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียวเพื่อทดสอบผลกระทบจากของคอนเดนเซอร์.....	50
3.2.2.3 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร.....	50

3.3 การปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยใช้การทดลอง Phébus FPT1	
เป็นกรณีเปรียบเทียบ	52
3.3.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง.....	53
3.3.2 การแพร่แบบบราวเนียน	55
3.3.3 ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส	57
3.3.4 เทอร์โมฟรีซิส	58
3.4 การทดลองใช้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล.....	64
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผล	65
4.1 ผลการศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีซีเอ็มจากอุบัติเหตุ	
ร้ายแรง.....	65
4.2 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2	67
4.2.1 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2.....	68
4.2.2 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2.....	69
4.2.2.1 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียว	69
4.2.2.2 ผลการจำลองผลกระทบจากของคอนเดนเซอร์ของการทดลอง Phébus	
FPT1	70
4.2.2.3 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร.....	72
4.3 ผลจากปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยใช้การทดลอง Phébus FPT1	
เป็นกรณีเปรียบเทียบ	75
4.3.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง.....	76
4.3.2 การแพร่แบบบราวเนียน	81
4.3.3 ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส	83
4.3.4 เทอร์โมฟรีซิส	86

4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัว ของแอโรซอล	89
4.4.1 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล	89
4.4.2 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT 1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล.....	90
4.4.3 ผลการจำลองการทดลองการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล	91
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลจากงานวิจัย	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	132

สารบัญรูป

รูปที่ 1 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในลำดับต่างๆ	7
รูปที่ 2 แสดงการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod 2	9
รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2 ทั้งหมด	11
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรมคำนวณ ART Mod 2 ที่สำคัญ.....	12
รูปที่ 5 แสดงภาพจำลองอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ NSPP-502	14
รูปที่ 6 แสดงอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Phébus	17
รูปที่ 7 แสดงการสะสมตัวของแอรโซลจากแรงโน้มถ่วงช่วงที่ $Re < 1$	23
รูปที่ 8 แสดงการสะสมตัวของแอรโซลจากแรงโน้มถ่วงช่วงที่ $Re > 1$	24
รูปที่ 9 แสดงการสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน	26
รูปที่ 10 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอรโซลกรณี $\tau^+ < 0.2$	29
รูปที่ 11 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอรโซลกรณี $0.2 < \tau^+ < 22.9$	30
รูปที่ 12 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอรโซลกรณี $\tau^+ > 22.9$	30
รูปที่ 13 แสดงการสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิส	31
รูปที่ 14 แสดงการสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์เทอร์โมฟรีซิส	34
รูปที่ 15 แสดงโนดาไลเซชัน (noldalization) ของการทดลอง NSPP-502	45
รูปที่ 16 แสดงโนดาไลเซชัน (noldalization) ของการทดลอง Phébus FPT 1	48
รูปที่ 17 แสดงโนดาไลเซชัน (nodalization) และ เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) หลังปรับปรุงของการทดลอง Phébus FPT1	51
รูปที่ 18 แสดงโนดาไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 ของการทดลอง Phébus FPT1	52

รูปที่ 19 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ แอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง	55
รูปที่ 20 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ แอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน.....	56
รูปที่ 21 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ แอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส.....	58
รูปที่ 22 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ แอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมฟรีซิส.....	59
รูปที่ 23 แสดงโนดไลเซชัน (nodalization) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR	66
รูปที่ 24 แสดงผลการปรับอุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของ Phébus FPT 1 ในการจำลองคอนเดนเซอร์	71
รูปที่ 25 แสดงอัตราการไหลระหว่างปริมาตรของการทดลอง Phébus FPT1 จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3.....	73
รูปที่ 26 แสดงความเร็วภายในปริมาตรของการทดลอง Phébus FPT1 จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3.....	74
รูปที่ 27 แสดงผลการปรับค่า Knudsen number เพื่อตรวจสอบ Cunningham factor	78
รูปที่ 28 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจาก ปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง	80
รูปที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิด จากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน.....	82
รูปที่ 30 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจาก ปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน	83
รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจาก ปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส	85
รูปที่ 32 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจาก ปรากฏการณ์เทอร์โมฟรีซิส	88

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงกลุ่มของสารกัมมันตรังสีที่โปรแกรม ART Mod2 สามารถประเมินได้	8
ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่อง ปฏิกรณ์ NSPP-502	13
ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของ NSPP-502	14
ตารางที่ 4 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่อง ปฏิกรณ์ Phébus FPT1	16
ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองของ Phébus FPT1	17
ตารางที่ 6 แสดงแบบจำลองที่มีผลต่อการสะสมตัวของแอรโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆและ เงื่อนไขต่างๆของแบบจำลองในงานวิจัย	18
ตารางที่ 7 แสดงความแตกต่างของแรงขับ (driving force) ที่ทำให้เกิดการสะสมของแอรโรซอล ตัวจากปรากฏการณ์ต่างๆ	37
ตารางที่ 8 แสดงสรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองแบบปริมาตรเดียว ทั้งหมดของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ในงานวิจัย	43
ตารางที่ 9 แสดงสรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองแบบสาม	44
ตารางที่ 10 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอรโรซอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	46
ตารางที่ 11 แสดงข้อมูลขาเข้า (input) ของการทดลอง NSPP-502	46
ตารางที่ 12 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอรโรซอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (CsI)	48
ตารางที่ 13 แสดงข้อมูลขาเข้า (input) ของการทดลอง Phébus FPT 1	49
ตารางที่ 14 แสดงความเหมาะสมของสมการต่างๆที่นำมาเลือกใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองการ สะสมตัวของแอรโรซอลจากปรากฏการณ์ต่าง	60
ตารางที่ 15 แสดงขนาดโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR	66

ตารางที่ 16 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR	67
ตารางที่ 17 แสดงผลการคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอรโซลของสารประกอบซีเซียมด้วยโปรแกรม ART Mod 2 เทียบกับโปรแกรม MAAP.....	67
ตารางที่ 18 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ NSPP-502.....	68
ตารางที่ 19 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบปริมาตรเดียวเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1.....	70
ตารางที่ 20 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบปริมาตรเดียวเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการปรับปรุงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของ Phébus FPT 1.....	72
ตารางที่ 21 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบสามปริมาตรเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1.....	74
ตารางที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor	78
ตารางที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path).....	80
ตารางที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์ดีฟิวซีโอโพริซิตี.....	85
ตารางที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโพริซิตี.....	88
ตารางที่ 26 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ NSPP-502 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล.....	89
ตารางที่ 27 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบสามปริมาตรเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล.....	90
ตารางที่ 28 แสดงผลจากคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอรโซลของสารประกอบซีเซียมด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR	92

ตารางที่ 29 แสดงผลจากคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอมโมเนียของสารประกอบซีเซียมด้วย
โปรแกรม ART Mod 2 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโปรแกรมเทียบกับโปรแกรม MAAP 92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ตามแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2553 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 [1] ประเทศไทยมีโครงการสร้างโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ขนาด 1,000 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า จำนวน 4 โรง โดยจะเริ่มเดินเครื่องในปี พ.ศ. 2569 อย่างไรก็ตาม หลังจากเกิดอุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ฟูกูชิมะ ไดอิจิ (Fukushima Daiichi Nuclear Power Station) รัฐบาลจำเป็นต้องทบทวนการสร้างโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ใหม่อีกครั้ง นอกจากนี้อุบัติเหตุครั้งนี้ยังเป็นสาเหตุสำคัญของการไม่ยอมรับการใช้พลังงานจากนิวเคลียร์ในประเทศไทยของภาคประชาชน องค์ความรู้ในเรื่องของความปลอดภัยของการใช้พลังงานนิวเคลียร์โดยเฉพาะในส่วนของการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญที่ต้องทำการศึกษาวิจัย ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจสร้างหรือไม่สร้างโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ของรัฐบาล และยังเป็นส่วนสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นให้กับคนไทยอีกด้วย

สำนักงานเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกันศึกษาวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ด้านการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ โดยใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 โดยใช้โปรแกรม RELAP5 ของ Innovative Systems Software (ISS) เพื่อประเมินกลศาสตร์ของไหลหรือค่าทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic) ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในระหว่างการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรง และใช้โปรแกรม OSCAR ของ Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) ในการประเมินการกระจายตัวในบรรยากาศของสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลมาจากโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ในกรณีเกิดอุบัติเหตุร้ายแรง เพื่อให้สามารถศึกษาอุบัติเหตุร้ายแรงให้ได้ครอบคลุมทุกส่วน ทั้งสองสถาบันจึงได้เริ่มต้นงานวิจัยเพื่อศึกษาในส่วนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างงานวิจัยทั้งสองที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น เพื่อให้สามารถประเมินสถานการณ์เมื่อเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ได้อย่างครบวงจร โดยเริ่มต้นจากการจำลองอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้

โปรแกรม ART Mod 2 ของ Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) เพื่อประเมินปริมาณของแอรอสอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

จากการศึกษาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมจากการจัดการอุบัติเหตุในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ที่ผ่านมา [2] พบว่าปริมาณแอรอสอลของสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมและที่สะสมตัวอยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ไม่สอดคล้องกับผลคำนวณจากโปรแกรม MAAP ของ Electric Power Research Institute (EPRI) ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณที่ผ่านการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) แล้ว [3] โดยปริมาณแอรอสอลของสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมที่คำนวณโดยโปรแกรม ART Mod 2 มีค่ามากกว่าผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MAAP อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันปริมาณแอรอสอลของสารประกอบซีเซียมที่สะสมตัวอยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ก็มีค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

จากปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอรอสอลที่เกิดขึ้นในการจัดการอุบัติเหตุในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ผู้วิจัยจึงทดลองจำลองจากการทดลองอื่นๆ เพื่อตรวจสอบที่มาของปัญหาดังกล่าวและหาวิธีการแก้ไข โดยเริ่มต้นจากการจำลองของการทดลอง NSPP-502 ของ Oak Ridge National Laboratory ซึ่งเป็นตัวอย่างการทดลองที่มาพร้อมกันกับคู่มือการใช้โปรแกรม ART Mod 2 [4] การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแอรอสอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่รั่วไหลมาจากการหลอมเหลวของแกนเครื่องปฏิกรณ์ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ จากผลการคำนวณพบว่าการสะสมตัวของแอรอสอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) นั้นมีการสะสมตัวที่พื้นมากกว่าผลการทดลองเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันมีการสะสมตัวที่ผนังน้อยเกินไปเล็กน้อยเช่นกัน อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้โดยผู้พัฒนาโปรแกรมคำนวณ ART Mod 2 [4]

การทดลองที่สองที่ผู้วิจัยนำมาใช้ตรวจสอบปัญหาการสะสมตัวของแอรอสอลที่สะสมตัวอยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์คือการทดลอง Phébus FPT 1 ของ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแอรอสอลที่รั่วไหลมาจากการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [5] ผู้วิจัยเลือกใช้แอรอสอลของ

สารประกอบซีเซียมในการศึกษา เนื่องจากสารประกอบซีเซียมเป็นสารกัมมันตรังสีที่มีปริมาณการรั่วไหลมากและยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ เนื่องจากสารประกอบซีเซียมเป็นสารที่ติดอยู่ในร่างกายได้ยาวนานและมีอัตราการสลายตัวที่ช้า โดยเฉพาะสารประกอบซีเซียม-137 (Cs-137) ที่มีค่าครึ่งชีวิตมากถึง 30 ปี [6] ผู้วิจัยเลือกแไอโรซอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (Csl) เป็นตัวแทนของแไอโรซอลของสารประกอบซีเซียมในการจำลอง เนื่องจากในการทดลองของ Phébus FPT 1 มีแไอโรซอลของจากปฏิกิริยาฟิชชันเป็นธาตุซีเซียมและไอโอดีนมากที่สุด [7] โดยจากผลการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 พบว่าการสะสมตัวของแไอโรซอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (Csl) จากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) มากกว่าผลการทดลอง ในขณะที่เดียวกันมีการสะสมตัวจากปรากฏการณ์แพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และดิฟฟิวซิโอโพรีซิส (diffusiophoresis) น้อยกว่าผลการทดลอง จากปัญหาความไม่สอดคล้องของผลการสะสมตัวของแไอโรซอลในการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 กับผลการคำนวณโดยโปรแกรม ART Mod 2 ตามที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแไอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อให้สามารถใช้ในการประเมินพฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในอุบัติเหตุร้ายแรงแบบต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

1.2 จุดประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายการสะสมตัวของแไอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ก่อนและหลังการปรับปรุงแก้ไขกับผลการทดลองที่มีอยู่
2. ปรับปรุงแก้ไขแบบจำลองที่เกี่ยวข้องในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อให้สามารถประเมินค่าการสะสมตัวปริมาณแไอโรซอลของสารประกอบซีเซียมที่อยู่ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีอยู่

1.3 ขอบเขต

1. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองก่อนการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม ART Mod 2 กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 และอภิปรายสาเหตุของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

2. ศึกษาแบบจำลองทางกายภาพที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมของแอรโซลของสารประกอบซีซีเอ็มเมื่อเกิดอุบัติเหตุร้ายแรง
3. จากสาเหตุที่ระบุตามข้อ 1 ปรับปรุงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และสหสัมพันธ์ (correlation) ที่ใช้ในแบบจำลอง
4. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองหลังการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม ART Mod 2 กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 และอภิปรายสาเหตุของความแตกต่างที่เกิดขึ้น
5. จากแบบจำลองที่แก้ไข ทดลองคำนวณลักษณะการสะสมตัวของแอรโซลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองและการจำลองที่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลและการสะสมตัวของสารประกอบซีซีเอ็ม และงานวิจัยอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแบบจำลอง
2. ศึกษาการจำลองเหตุการณ์การจัดการอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ ESBWR จากงานวิจัยในอดีต [2] ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสีภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยอื่น ๆ ในกรณีเดียวกัน เพื่อตรวจสอบผลความแตกต่างที่เกิดขึ้น
3. จำลองการทดลองของ NSPP-502 และ Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อตรวจสอบปัญหาการสะสมตัวของแอรโซลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้น
4. ศึกษาแบบจำลองทางกายภาพภายในโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2 ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอรโซลของสารประกอบซีซีเอ็ม ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

5. แก้ไขและปรับปรุงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และสหสัมพันธ์ (correlation) ที่สำคัญในแบบจำลองทางกายภาพภายในโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2
6. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองหลังการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม ART Mod 2 กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 และอภิปรายสาเหตุของความแตกต่างที่เกิดขึ้น
7. นำแบบจำลองหลังการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม ART Mod 2 มาจำลองเหตุการณ์การจัดการอุบัติเหตุภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการคำนวณจากโปรแกรม MAAP ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณที่ผ่านการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) แล้วเพื่อตรวจสอบผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้น
8. แก้ไขและปรับปรุงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้าง ของการจัดการอุบัติเหตุภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ให้ใกล้เคียงข้อมูลจริงมากขึ้น และจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการคำนวณจากโปรแกรม MAAP ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณที่ผ่านการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) แล้วเพื่อตรวจสอบผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อใช้ในการแก้ไขปรับปรุงโปรแกรมได้
2. สามารถใช้โปรแกรม ART Mod 2 ทำนายการสะสมตัวของแอมริซอนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น อันจะนำไปสู่การออกแบบวิธีและระบบจัดการอุบัติเหตุร้ายแรงที่มีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้เป็นการรวบรวมนิยามและความรู้เบื้องต้นที่ต้องทราบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ คำจำกัดความของอุบัติเหตุร้ายแรง โปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในลำดับต่างๆ ข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับโปรแกรมต้นทาง ART Mod 2 ที่จำเป็นในการจำลองและแก้ไขโปรแกรมต้นทาง (source code) การทดลองที่ใช้ในการจำลองเพื่อทดสอบปัญหาของโปรแกรม ART Mod 2 ได้แก่ การทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 และทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียม นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้รวบรวมงานวิจัยศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองและการจำลองซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบซีเซียม และงานวิจัยอื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลอีกด้วย โดยทฤษฎีและงานวิจัยที่ศึกษาจะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงแก้ไขแบบจำลองของโปรแกรม ART Mod 2

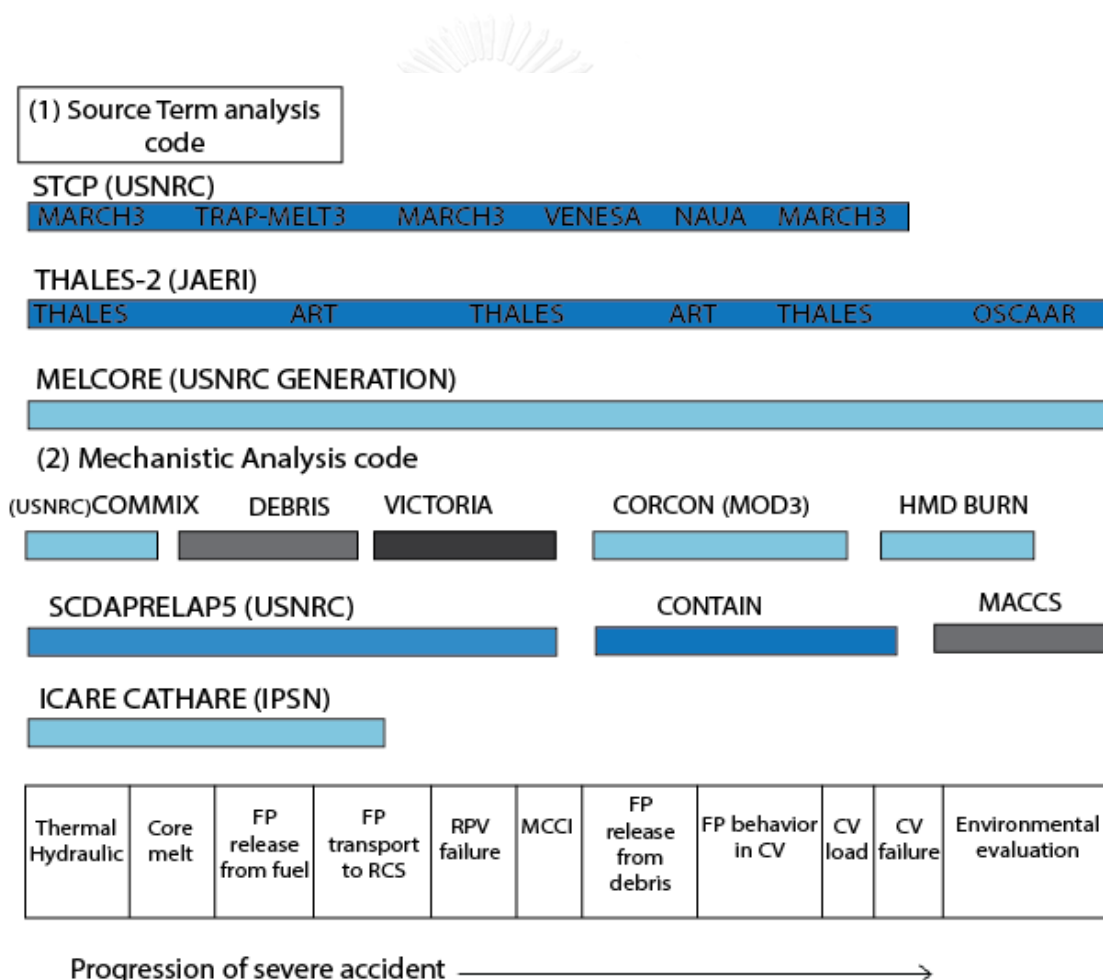
2.1 อุบัติเหตุร้ายแรง (severe accident: SA) [8]

อุบัติเหตุร้ายแรง ในคำจำกัดความของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ คือ สภาวะอุบัติเหตุที่รุนแรงกว่าอุบัติเหตุพื้นฐานที่ได้ออกแบบไว้ที่มีการสลายตัวของแกนปฏิกรณ์อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการแตกออกของแกนปฏิกรณ์อย่างรุนแรงหรือการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากมีการทำความเย็นให้กับแกนปฏิกรณ์ไม่เพียงพอ

2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในลำดับต่างๆ [8]

ในการศึกษาอุบัติเหตุร้ายแรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีความปลอดภัยกว่าการทดลองและลดค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงโดยมีหลายโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงจากรูปที่ 1 หากแบ่งโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงตามบริเวณต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ พบว่าจะแบ่งได้ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1. โปรแกรมที่ใช้เพื่อประเมินค่าทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic) ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และประเมินการหลอมเหลวของแท่งเชื้อเพลิง เช่น โปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 โปรแกรม THALES และโปรแกรม MELCOR เป็นต้น
2. โปรแกรมที่ใช้เพื่อประเมินพฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เช่น โปรแกรม ART Mod 2 โปรแกรม CONTAIN และโปรแกรม NAUA เป็นต้น
3. โปรแกรมที่ใช้เพื่อประเมินการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีไปสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โปรแกรม MACCS โปรแกรม OSCAAR และโปรแกรม HMD BURN เป็นต้น



รูปที่ 1 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในลำดับต่างๆ [8]

2.3 โปรแกรม ART Mod 2 [4]

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซึ่งโปรแกรม ART Mod 2 โดยได้ศึกษาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับโปรแกรมต้นทาง ART Mod 2 ที่จำเป็นในการจำลองและแก้ไขโปรแกรมต้นทาง (source code) หลังจากพบปัญหาของการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 แล้ว ซึ่งโปรแกรม ART Mod 2 เป็นโปรแกรมจำลองที่ใช้ประเมินพฤติกรรมเคลื่อนที่และการสะสมของสารกัมมันตรังสีในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ในระหว่างการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงซึ่งโปรแกรมนี้ออกพัฒนาโดย Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2.3.1 สารกัมมันตรังสีที่โปรแกรม ART Mod 2 สามารถประเมินได้ [4]

สารกัมมันตรังสีในการประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงในโปรแกรม ART Mod 2 ประกอบด้วยส่วนประกอบของเชื้อเพลิง และวัสดุที่เป็นโครงสร้าง จากตารางที่ 1 ได้แสดงกลุ่มของสารกัมมันตรังสีที่โปรแกรม ART Mod 2 สามารถประเมินได้ พบว่าสารกัมมันตรังสีถูกแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 10 กลุ่ม และมีรูปแบบ 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ ไอและแอโรซอล

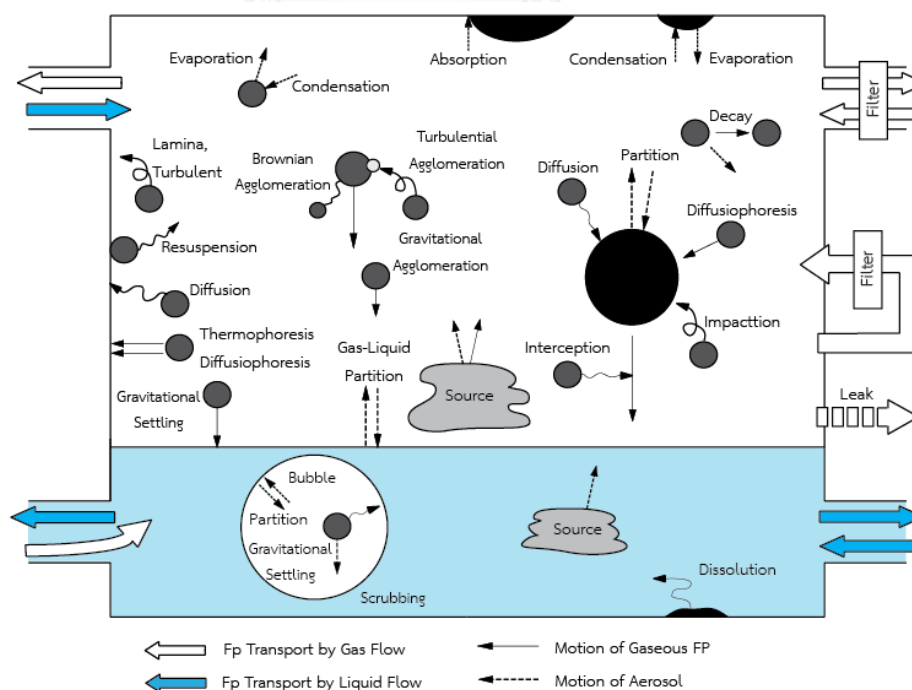
ตารางที่ 1 แสดงกลุ่มของสารกัมมันตรังสีที่โปรแกรม ART Mod2 สามารถประเมินได้ [4]

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

2.3.2 พฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod 2 [4]

จากรูปที่ 2 ได้แสดงการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod 2 พบว่าในโปรแกรม ART Mod 2 จะพิจารณาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสี 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะของไอและแอโรซอล โดยปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลของสารกัมมันตรังสี ได้แก่ การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟริซิส (thermophoresis) และปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของไอของสารกัมมันตรังสี ได้แก่ การควบแน่น (condensation) การดูดซับ (adsorption) และการระเหย (evaporation)

นอกจากนี้ในการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสีทั้งในสภาวะของไอและแอโรซอลยังสามารถเกิดได้จากการทำงานของระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม (engineering safety system) ได้แก่ การกำจัดด้วยสเปรย์ (removal by a spray) การกำจัดด้วยการสครับบิงในบ่อน้ำ (removal by a scrubbing) การผ่านสตีมไดรเออร์ (steam dryer) และการผ่านตัวกรอง (filters)



รูปที่ 2 แสดงการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสีในโปรแกรม ART Mod 2 [4]

2.3.3 การใช้งานโปรแกรม ART Mod 2 [8]

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการใช้งานโปรแกรม ART Mod 2 ตั้งแต่การป้อนข้อมูลขาเข้า (input) การใช้งานโปรแกรม จนไปถึงได้ไฟล์แสดงผล (output) ดังนี้

2.3.3.1 ข้อมูลขาเข้า (input) ที่สำคัญในโปรแกรม ART Mod 2 [8]

ข้อมูลที่โปรแกรม ART Mod 2 จำเป็นต้องทราบ เพื่อใช้ในการคำนวณการสะสมตัวของ แอโรซอล โดยข้อมูลขาเข้า (input) ที่จำเป็นได้แก่ คือ ข้อมูลรูปทรงเรขาคณิต, อัตราการรั่วไหลหรือ ปริมาณของสารกัมมันตรังสีจากเชื้อเพลิง และข้อมูลทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic)

2.3.3.2 การใช้งานโปรแกรม ART Mod 2 [8]

เมื่อใส่ข้อมูลขาเข้า (input) จนครบและตรวจสอบข้อมูลต่างๆเรียบร้อยแล้วจึงทำการ compile ไฟล์ขาเข้า (input file) ด้วยคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม ART Mod 2 ลงที่ไดรฟ์ C ในคอมพิวเตอร์สร้างไฟล์ขาเข้า (input file) โดยบันทึกเป็นสกุล .dat และบันทึกไฟล์ขาเข้า (input file) ไว้ที่ source folder ของโปรแกรม ART Mod 2
2. compile file ด้วยโปรแกรม Fortran Command Prompt ใน Windows โดย compile ในแฟ้มชื่อ source โดยใช้คำสั่ง nmake -f Makefile_NT compile file จะได้ executing file ชื่อ artmod.exe
3. execute ไฟล์ด้วยคำสั่ง artmod.exe <inputfilename.dat>outputfilename.out โดย ให้ใส่ชื่อ input file แทนที่ inputfilename.dat และใส่ชื่อ output file ที่ต้องการ แทนที่outputfilename.out โดย Output file ที่ได้จะปรากฏแฟ้มชื่อ source

2.3.4 โครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2 [4]

จากรูปที่ 3 แสดงแผนผังของโครงสร้างโปรแกรม ART Mod 2 โดยในโปรแกรมต้นทาง (source code) จะมีไฟล์ใหญ่สุดคือ ART และจะแบ่งเป็นโปรแกรมน้อย (subroutine) โดยเราได้ศึกษาในส่วนของโปรแกรมน้อยที่สำคัญๆแสดงในรูปที่ 4

ในการศึกษาโปรแกรมต้องทราบว่าในแต่ละโปรแกรมน้อย (subroutine) มีหน้าที่อะไรบ้าง เพื่อเป็นประโยชน์ในการแก้ไขโปรแกรม จากรูปที่ 4 ตัวอย่างโปรแกรมน้อยที่สำคัญ ได้แก่ โปรแกรม

ย่อย physic.f เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้คำนวณค่าคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ต่างๆของไอและแอโรซอล และโปรแกรมย่อย deposit.f เป็นโปรแกรมย่อยในคำนวณความเร็วในการสะสมตัวของแอโรซอลจาก ปฏิกิริยาการต่าง ๆ เป็นต้น โดยหน้าที่ของแต่ละโปรแกรมย่อยคำสั่งและตัวแปรที่สำคัญบางส่วนต่างโดยจะแสดงโดยละเอียดในตารางที่จะแสดงในภาคผนวก ก

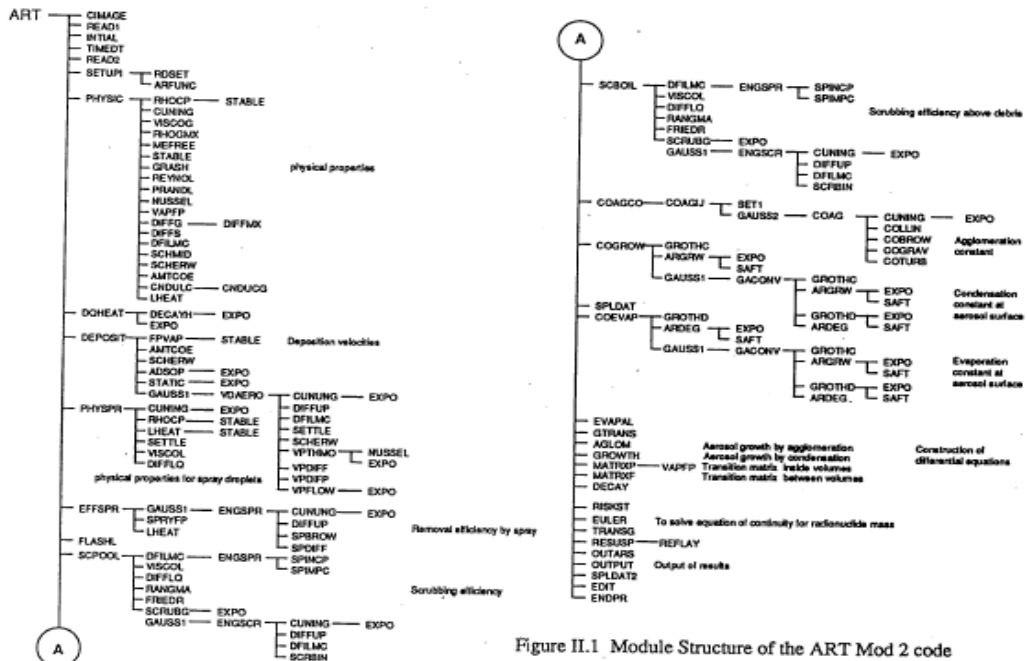
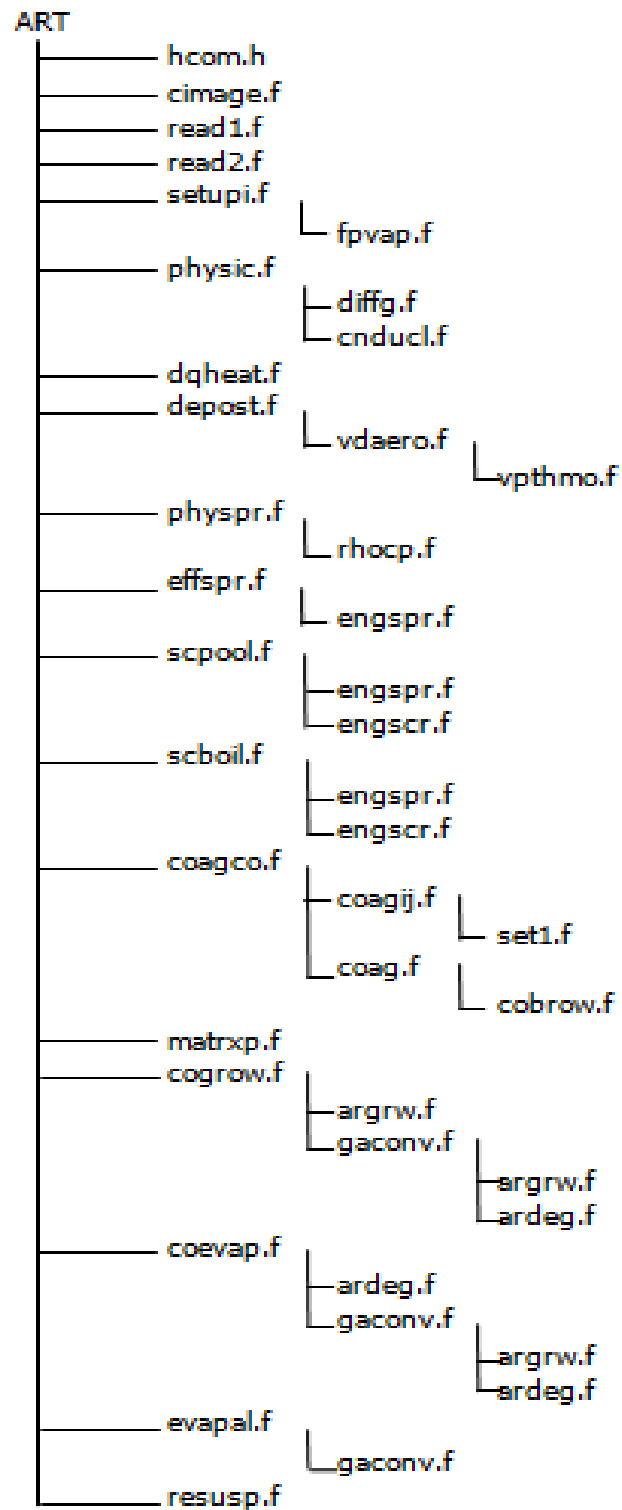


Figure II.1 Module Structure of the ART Mod 2 code

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรม ART Mod 2



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมต้นทาง (source code) ของโปรแกรมคำนวณ ART Mod 2 ที่สำคัญ

2.4 การทดลอง NSPP-502 [4]

การทดลอง NSPP-502 หรือ Nuclear Safety Pilot Plant – 502 ของ Oak Ridge National Laboratory เป็นการทดลองในการประเมินพฤติกรรมของสารกัมมันตภาพรังสีของแอรอสอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่รั่วไหลมาจากการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยสาเหตุที่เลือกการทดลอง NSPP-502 ในการจำลองเพื่อทดสอบปัญหาการสะสมตัวของแอรอสอล เนื่องจากการทดลองที่ถูกคำนวณจากโปรแกรม ART Mod 2 มาก่อนหน้าในคู่มือของโปรแกรม ART Mod 2 [4] และได้รับการยืนยันความถูกต้องของผลการคำนวณ [4]

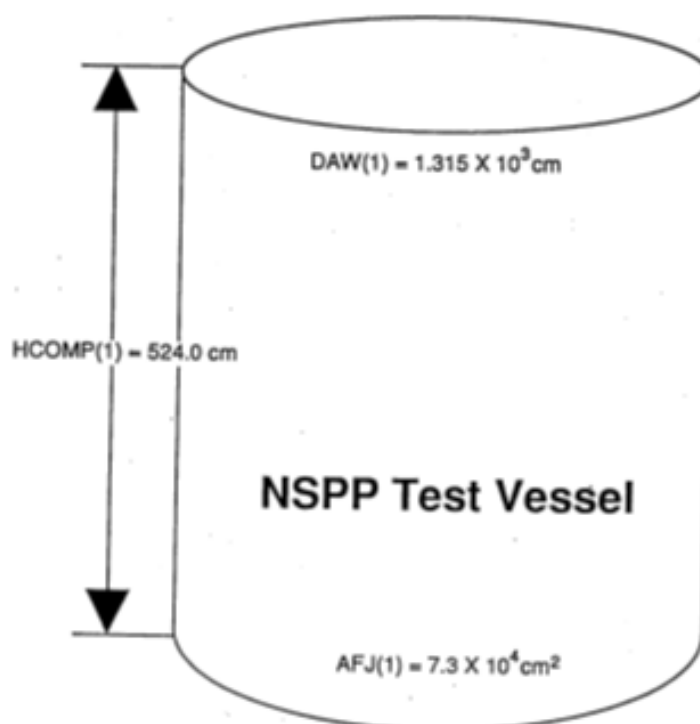
โดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ของการทดลอง NSPP-502 เป็นแบบปริมาตรเดียวดังภาพจำลองในรูปที่ 5 ซึ่งได้ปล่อยแอรอสอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ไว้ภายในเพื่อสังเกตพฤติกรรมภายในระยะเวลา 10,000 วินาที ในเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และขนาดของโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 จากทดลอง NSPP-502 พบว่ามีการสะสมตัวของแอรอสอล ของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่พื้นเป็นส่วนมากโดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ NSPP-502 [4]

ตัวแปร	NSPP-502
เงื่อนไขขอบเขต	
ความดัน [MPa]	0.27
อุณหภูมิผนัง [K]	393
อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ [K]	-
อุณหภูมิแอรอสอล [K]	399
อัตราการไหล [g/s]	0.01
ชนิดแอรอสอล	เหล็กออกไซด์
โครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	
เส้นผ่านศูนย์กลางอาคาร [m]	1.52
ความสูงอาคาร [m]	5.24

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของ NSPP-502 [4]

ข้อมูลการทดลอง	ชนิดแบริโชนอล	การกระจายตัวของแบริโชนอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [%]		
		บนพื้น	บนผนัง	อื่นๆ
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	3	92	<1



รูปที่ 5 แสดงภาพจำลองอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ NSPP-502 [4]

2.5 การทดลอง Phébus FPT1

การทดลอง Phébus ของ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) เป็นการทดลองในการประเมินอุบัติเหตุในหลายๆด้าน ตั้งแต่การเริ่มหลอมเหลวของเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์จนกระทั่งไปถึงการรั่วไหลของการกัมมันตรังสีไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [5] โดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบปริมาตรเดียว และมีคอนเดนเซอร์ 3 แท่ง ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าไอน้ำและแก๊สภายในเพื่อลดความดันในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยการทดลอง Phébus ได้มีการทดลองมาแล้ว 5 การทดลอง [5] ดังนี้

1. Phébus FPT0 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงใหม่ โดยศึกษาการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีไปที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยไอน้ำที่มีอัตราเร็วสูง ที่ค่า pH เท่ากับ 5
2. Phébus FPT1 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยศึกษาการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีไปที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยไอน้ำที่มีอัตราเร็วสูง ที่ค่า pH เท่ากับ 5
3. Phébus FPT2 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยศึกษาการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีไปที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยไอน้ำที่มีอัตราเร็วต่ำ และพิจารณาถึงการระเหยของบ่อน้ำทิ้ง (sump) ที่มีผลต่อการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสี และผลการการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของกรตบอริก
4. Phébus FPT3 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยศึกษาการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีไปที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยไอน้ำที่มีอัตราเร็วต่ำ และพิจารณาถึงการระเหยของบ่อน้ำทิ้ง (sump) ที่มีผลต่อการสะสมตัวของสารกัมมันตรังสี
5. Phébus FPT4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงใช้แล้ว โดยศึกษาการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีชนิดที่ไม่ใช่สารระเหย เช่น แอคติไนด์ (actinide)

จากการทดลองพบว่าการทดลอง Phébus FPT0 และ FPT1 มีการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีโดยเฉพาะสารประกอบซีเซียมที่มากกว่า Phébus FPT4 ซึ่งพิจารณาเพียงแค่การรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีชนิดที่ไม่ใช่สารระเหย และมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไม่ซับซ้อนเหมือนกับการทดลอง Phébus FPT2 และ FPT3 ซึ่งพิจารณาถึงการระเหยของบ่อน้ำทิ้ง (sump) และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ดังนั้นการทดลอง Phébus FPT0 และ FPT1 จึงเหมาะในการจำลองเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียม แต่ในกรณีนี้ผู้วิจัยได้เลือกการทดลอง Phébus FPT1 เนื่องจากในการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลในการทดลอง Phébus FPT1 มีมากกว่า Phébus FPT0 [9] ซึ่งทำให้ง่ายต่อการศึกษาเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมจากการจำลอง

นอกจากนี้การทดลอง Phébus FPT1 และการทดลอง Phébus อื่นๆ ได้ศึกษาผลการสะสมตัวของแโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งสอดคล้องแบบจำลองการสะสมตัวของแโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 ได้แก่ ปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitation settling) การแพร่

แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟริซิส (thermophoresis)

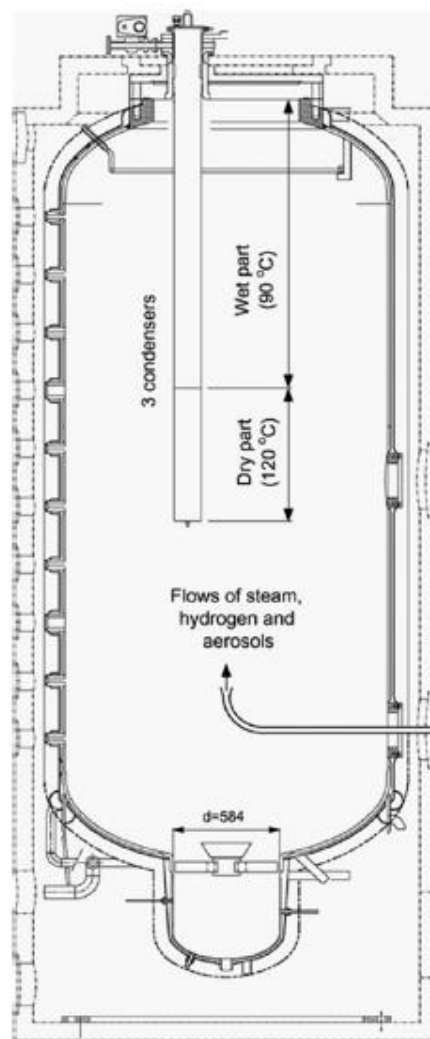
โดยการทดลอง Phébus FPT1 จากในรูปที่ 6 พบว่าได้ปล่อยแอรอสอลของสารประกอบซีเซียมพร้อมกับไอน้ำไปสู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อสังเกตพฤติกรรมภายในระยะเวลา 133,200 วินาที ในเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และขนาดของโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [7] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 จากทดลองของ Phébus FPT1 พบว่ามีการสะสมตัวของแอรอสอลของสารประกอบซีเซียม จากปรากฏการณ์ตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) เป็นส่วนมาก รองลงมาเป็นปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) และปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ตามลำดับ [9] โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Phébus FPT1 [7], [9]

ตัวแปร	Phébus FPT1
เงื่อนไขขอบเขต	
ความดัน [MPa]	0.21
อุณหภูมิผนัง [K]	381
อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ [K]	363
อุณหภูมิแอรอสอล [K]	381
อัตราการไหล [g/s]	2.2
ชนิดแอรอสอล	สารประกอบซีเซียม
โครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	
เส้นผ่านศูนย์กลางอาคาร [m]	1.8
ความสูงอาคาร [m]	5
เส้นผ่านศูนย์กลางคอนเดนเซอร์ [m]	0.15
ความสูงคอนเดนเซอร์ [m]	1.6
จำนวนคอนเดนเซอร์	3

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองของ Phébus FPT1 [9]

ข้อมูลการทดลอง	ชนิดแไอโซล	การสะสมตัวของแไอโซลจากปรากฏการณ์ต่างๆ [%]			
		การตกจากแรงโน้มถ่วง	การแพร่แบบบราวเนียน	ดิฟฟิวซิโ-โพริซิส	เทอร์โม-โพริซิส
Phébus FPT1	สารประกอบซีเซียม	72	2	26	น้อยมาก



รูปที่ 6 แสดงอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Phébus [9]

2.6 ทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียม



ทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ [4] มีหลายแบบจำลองของหลายปรากฏการณ์ในการคำนวณการเคลื่อนที่ และการสะสมตัวของแอโรซอล ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา 4 ปรากฏการณ์หลัก ได้แก่ การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟริซิส (thermophoresis) โดยในตารางที่ 6 ได้สรุปแบบจำลองและเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม ART Mod 2 และจากงานวิจัยอื่นๆ และได้กล่าวรายละเอียดของแบบจำลองต่างๆในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 6 แสดงแบบจำลองที่มีผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆและเงื่อนไขต่างๆของแบบจำลองในงานวิจัย

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	เงื่อนไข
การตกจากแรงโน้มถ่วง	Cunningham factor	
	$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.26 + 0.42 \exp\left(\frac{-0.87}{Kn}\right) \right]^{***}$	ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [4]
	$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.142 + 0.588 \exp\left(\frac{-0.999}{Kn}\right) \right]$	ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [10]
	$Cu(r) = 1 + Kn \left[2.34 + 1.05 \exp\left(\frac{-0.39}{Kn}\right) \right]$	ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมทุกขนาด ในบริเวณ Stoke (Stoke's region)

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	เงื่อนไข
	ระยะอิสระเฉลี่ย	
	$\lambda = \frac{k_B T}{4\pi a^2 \sqrt{2} P_i} \quad ***$	คำนวณจากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส (mean velocity of gas) [4]
	$\lambda = \frac{\mu_g}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_w}{3k_B T}}$	คำนวณจากความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) [12]
การแพร่แบบบราวเนียน	ความเร็วของแอร์โซลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน	
	$v_{diff}(r) = 2.17 D_p(r)^{0.79} \quad ***$	ได้จากการทดลองของการเคลื่อนที่ของการแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคขนาดเล็ก [4]
	$v_{diff}(r) = 0.22 D_p(r)^{0.735}$	ได้จากการทดลองของการเคลื่อนที่ของการแพร่แบบบราวเนียนอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [10]
$v_{diff} = \begin{cases} 0.0899 Sc^{-0.704} u_\tau & ; \tau^+ < 0.2 \\ 3.25 \times 10^{-4} \tau^{+2} u_\tau & ; 0.2 < \tau^+ < 22.9 \\ 0.17 u_\tau & ; \tau^+ > 22.9 \end{cases}$	ได้จากการทดลองของการปล่อยอนุภาคขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่ Sc^+ ขึ้น 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อตรวจสอบความเร็วจากการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณากระบวนการ turbulent damping	

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	เงื่อนไข
		process [13]
ดิฟฟิวซิโอ-โพริซิส	ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโพริซิส	
	$v_{diffph}(r) = \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c \quad ***$	<p>ได้จากการทดลองที่พิจารณาถึงผลของความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) [4]</p>
	$v_{diffph}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right]$	<p>ได้จากการทดลองกรณีความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) มีผลมากกว่าผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) [10]</p>
เทอร์โมโพริซิส	ความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ	
	$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_g Cu(r)(\lambda_g + C_r Kn(r)\lambda_p)}{2T_g(1+3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_r Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_g}{4\left(1 + \frac{\pi}{8} \alpha_m\right) T} \nabla T_g \exp\left(\frac{-(0.09 + 0.12\alpha_m)\left(1 - \alpha_r \frac{\lambda_g}{2\lambda_p}\right)}{Kn}\right) & ; Kn > 0.2 \end{cases}$ <p style="text-align: center;">***</p>	<p>กรณีที่ 1</p> <p>ได้จากการทดลอง ที่ค่า Knudsen number น้อยกว่า 0.2 เป็นช่วงอนุภาคยังคงเคลื่อนที่ไปตามแก๊สที่เคลื่อนที่แต่มียังมีอนุภาคบางส่วนที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊สหรืออาจมีเพียงแค่อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามแก๊สที่</p>

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	เงื่อนไข
		<p>เคลื่อนที่ โดยจะคำนวณจากสมการของ Brock [4]</p> <p>กรณีที่ 2</p> <p>ได้จากการทดลอง ที่ค่า Knudsen number มากกว่า 0.2 เป็นช่วงอนุภาคยังคงเคลื่อนที่ไปตามแก๊สที่เคลื่อนที่แต่มียังมีอนุภาคบางส่วนที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส หรืออาจมีเพียงแค่อนุภาคที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส โดยจะคำนวณจากสมการของ Wildman [4]</p>
	 <p>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p> $v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{T_g (2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$	<p>ได้จากการทดลอง ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number สร้างขึ้นหลังจากพิสูจน์ว่าสมการของ Brock ใช้แค่ช่วงที่ค่า Knudsen number น้อย และที่ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง สมการของ Brock มีความคลาดเคลื่อนสูง [16]</p>
	$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}} \right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$	<p>ได้จากวิธี Monte-Carlo type numerical modeling ในการปรับปรุงสมการของ Brock และ</p>

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	เงื่อนไข
		สมการของ Wildman เพื่อหาค่าของความเร็วการสะสมตัว และ สร้าง สมการที่สามารถใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number [16]

*** เป็นแบบจำลองที่มีในโปรแกรม ART Mod 2

2.6.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling)

ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วงหรือ $v_{gra}(r)$ หน่วย [cm/s] เป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลที่พื้น โดยการตกจากแรงโน้มถ่วงหากไม่มีการพิจารณาถึงแรงต้านของการเคลื่อนที่ (drag force) แอโรซอลจะตกสู่พื้นด้วยความเร็วเดียวตามค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก หรือ g เท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ซึ่งความเร็วของการตกจากแรงโน้มถ่วงของแอโรซอลที่แตกต่างกันเกิดขึ้นจากผลของแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag force) กรณีที่มีการไหลของของไหลต้านการตกของอนุภาคดังรูปที่ 7 และ 8 [4]

โดยแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag force) หรือ F_k หน่วย [kg.m/s²] ที่กระทำกับพื้นผิวของแอโรซอลในสมการที่ 1 [4] จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของ ตัวคูณความเสียดทาน (friction factor) f_D หน่วย [-] ความหนาแน่นของแก๊ส หรือ ρ_g หน่วย [g/cm³] และความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วงหรือ $v_{gra}(r)$ หน่วย [cm/s]

$$F_k = \frac{\pi r^2 \rho_g v_{gra}^2(r) f_D}{2} \quad (1)$$

โดยตัวคูณความเสียดทาน (friction factor) f_D หน่วย [-] เป็นสมการที่ได้จากการทดลองการตกของแอโรซอลที่ผ่านบริเวณที่มีของไหลผ่าน ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ ค่า Reynolds number หรือ Re แสดงอยู่ในสมการที่ 2 [4]

$$f_D(\text{Re}) \text{Re}^2 = \frac{32r^2 g \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{2\mu_g} \quad (2)$$

เมื่อ

r คือ รัศมีของแอโรซอล หน่วย [cm]

ρ_p คือ ความหนาแน่นของแอโรซอล หน่วย [g/cm^3]

ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส หน่วย [g/cm^3]

g คือ ค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย [cm/s^2]

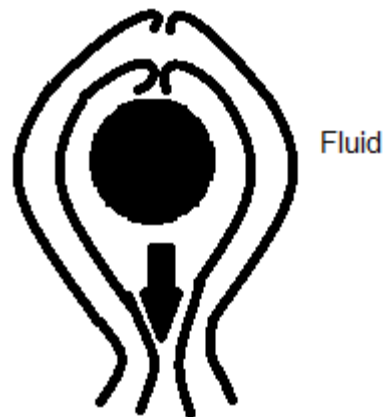
μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ หน่วย [$\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$]

จากสมการที่ 2 ในช่วงที่แรงเฉื่อย (inertial force) น้อยกว่าแรงหนืด (viscous force) หรือ ช่วงที่ Reynolds number น้อยกว่า 1 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบ laminar ในรูปที่ 7 ความเร็วของการสะสมตัวของแอโรซอลจากแรงโน้มถ่วงจะประมาณค่าจากการคำนวณของ Stoke (Stoke's approximation) ในสมการที่ 3 [4]



รูปที่ 7 แสดงการสะสมตัวของแอโรซอลจากแรงโน้มถ่วงช่วงที่ $\text{Re} < 1$ [4]

ในทางกลับกันในช่วงที่แรงเฉื่อย (inertial force) มากกว่าแรงหนืด (viscous force) หรือ ช่วงที่ Reynolds number มากกว่า 1 ซึ่งการไหลอยู่ในช่วง transient จนถึงช่วง turbulent ในรูปที่ 8 ความเร็วของการสะสมตัวของแอโรซอลจากแรงโน้มถ่วงจะประมาณค่าจากการคำนวณของ Newton (Newton's approximation) ในสมการที่ 3 [4]



รูปที่ 8 แสดงการสะสมตัวของแอโรซอลจากแรงโน้มถ่วงช่วงที่ $Re > 1$ [4]

$$v_{gra}(r) = \begin{cases} \frac{2r^2 g(\rho_p - \rho_g)}{9\mu_g} Cu(r) & ; Re < 1 \\ \frac{\mu_g Re}{2r\rho_p} & ; Re > 1 \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ

$Cu(r)$ คือ Cunningham factor หน่วย [-]

โดย Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ หน่วย [-] ซึ่งเป็นตัวคูณของสหสัมพันธ์ (correlation factor) ที่พิจารณาการไถล (slip) ของของไหลที่เคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง (non-continuum) โดยค่า Cunningham factor จะเป็นฟังก์ชันของ Knudsen number หรือ Kn หน่วย [-]

โดยสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขต่างๆของการทดลอง โดยจากสมการที่ 4 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [4]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.26 + 0.42 \exp\left(\frac{-0.87}{Kn}\right) \right] \quad (4)$$

ถัดมาในสมการที่ 5 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [10]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.142 + 0.588 \exp\left(\frac{-0.999}{Kn}\right) \right] \quad (5)$$

และในสมการที่ 6 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมทุกขนาด ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [11]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[2.34 + 1.05 \exp\left(\frac{-0.39}{Kn}\right) \right] \quad (6)$$

โดยค่า Knudsen number คำนวณได้จากระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) หรือ λ หน่วย [cm] และรัศมีของแอโรซอลดังสมการที่ 7

$$Kn = \frac{2\lambda}{r} \quad (7)$$

โดยในการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) สามารถคำนวณมาได้จากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส (mean velocity of gas) [4] ดังสมการที่ 8 โดยจะอยู่ในรูปฟังก์ชันของ แต่จากการศึกษา [12] พบว่าการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) สามารถคำนวณได้อีกวิธีหนึ่งคือการคำนวณโดยใช้ความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) [12] ดังสมการที่ 9

$$\lambda = \frac{k_B T}{4\pi a^2 \sqrt{2} P_t} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\mu_g}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_w}{3k_B T}} \quad (9)$$

เมื่อ

a คือ รัศมีของโมเลกุลแก๊ส หน่วย [cm]

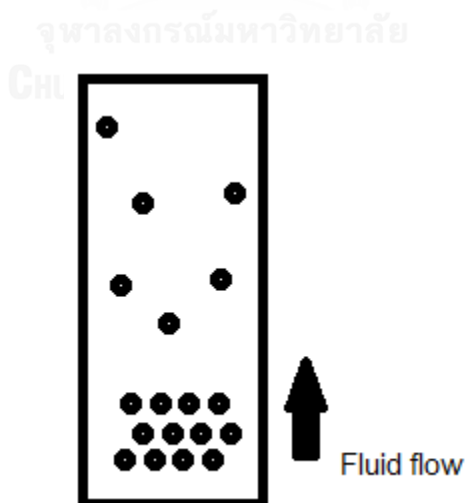
P_t คือ ความดันรวมในระบบ หน่วย [MPa]

M_w คือ น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส หน่วย [g]

N_A คือ เลข Avogadro หน่วย [-]

2.6.2 การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน หรือ $v_{diff}(r)$ หน่วย [cm/s] ในสมการที่ 10 [4] ซึ่งเป็นสมการในรูปอย่างง่ายจากกฎของ Fick's law โดยค่าคงที่ต่างๆถูกคำนวณมาจากการทดลองของการเคลื่อนที่ของการแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลที่ผนัง โดยการแพร่แบบบราวเนียนเกิดจากความความแปรปรวนของแอโรซอลในของไหลที่ชนกันในบริเวณที่มีความหนาแน่นของแอโรซอลสูง [10] โดยการชนกันของแอโรซอลส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของแอโรซอลออกจากของไหลออกไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นของแอโรซอลต่ำกว่าดังรูปที่ 9 โดยการเคลื่อนที่ของแอโรซอลจะขึ้นกับอุณหภูมิจึงกับแอโรซอลในระบบ ดังนั้นแอโรซอลจึงเคลื่อนที่ออกไปด้วยพลังงานจลน์ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในพจน์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของแอโรซอล หรือ $D_p(r)$ หน่วย [cm²/s] ดังสมการที่ 11 [4]



รูปที่ 9 แสดงการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน [4]

$$v_{diff}(r) = 2.17D_p(r)^{0.79} \quad (10)$$

$$D_p = \frac{k_B T}{6\pi\mu_g r} \quad (11)$$

เมื่อ

k_B คือ ค่าคงที่ Boltzmann constant หน่วย [erg/K.g]

T คือ อุณหภูมิของแอร์โซล

ต่อมา Van der Vate [10] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) พบว่าสมการยังคงในรูปอย่างง่ายจากกฎของ Fick's law แต่ค่าคงที่เปลี่ยนไปจากเดิมในสมการที่ 12

$$v_{diff}(r) = 0.22D_p(r)^{0.735} \quad (12)$$

นอกจากนี้พบว่ายังมีการคำนวณความเร็วการสะสมตัวของแอร์โซลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน ที่พิจารณาในส่วนของการกระบวนการ turbulent damping process ซึ่งพิจารณาความเร็วของเฟสสองเฟสที่แตกต่างกันระหว่างความเร็วของเฟสอนุภาคของแอร์โซล และความเร็วของเฟสของไอหรือแก๊ส[13] โดยความแตกต่างของความเร็วของสองเฟสที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างเฟสของไอหรือแก๊สและอนุภาคของแอร์โซล ซึ่งส่งผลต่อการสะสมตัวของแอร์โซล โดยสมการที่ใช้ในอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้จากการทดลอง [13] ของการปล่อยอนุภาคขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่ขึ้น 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อตรวจสอบความเร็วจากการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณากระบวนการ turbulent damping process จากการทดลองพบว่าความเร็วของการสะสมตัวอยู่ในฟังก์ชันของ dimensionless particle relaxation time หรือ τ^+ หน่วย [-] Schmidt number หรือ Sc หน่วย [-] Reynolds number หน่วย [-] ความหนาแน่นของแอร์โซล หรือ ρ_p หน่วย [g/cm³] ความหนาแน่นของแก๊ส หรือ ρ_g หน่วย [g/cm³] และความเร็วเสียดทาน (friction velocity) หรือ u_τ หน่วย [cm/s] ดังสมการที่ 13 [13]

$$\frac{v_{diff}}{u_\tau} = f(\tau^+, Sc, Re, \frac{\rho_p}{\rho_g}) \quad (13)$$

จะเห็นได้ว่าการแพร่ที่พิจารณาถึงกระบวนการ turbulent damping process มีที่มาจากเริ่มต้นเช่นเดียวสมการการแพร่แบบบราวเนียนในสมการที่ 10 และ 12 ที่กล่าวมาก่อนหน้า คือมีพจน์ของความเร็วในการสะสมตัวอยู่ฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแอรอสอล หรือ $D_p(r)$ หน่วย $[cm^2/s]$ ซึ่งเป็นพจน์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากอุณหภูมิกายในแอรอสอลตั้งสมการที่ 11 โดยพจน์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของแอรอสอลในกระบวนการ turbulent damping process แสดงอยู่ในฟังก์ชันของ Schmidt number ในสมการที่ 14 [13]

โดยในกระบวนการ turbulent damping process ได้พิจารณาในกรณีที่มีความเร็วของเฟสสองเฟสที่แตกต่างกันระหว่างความเร็วของเฟสอนุภาคของแอรอสอลและความเร็วของเฟสของไอหรือแก๊ส ดังนั้นค่าความเร็วในการสะสมตัวของแอรอสอลจากปรากฏการณ์บราวเนียนจึงขึ้นกับฟังก์ชันอื่นๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ 13 [13]

โดยค่า Schmidt number เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการส่งผ่านมวลในบริเวณที่มีความหนืดโดยคำนวณได้จากสมการที่ 14 โดยจากสมการที่ 14 พบว่าในกรณีที่ค่า Schmidt number มาก จะส่งผ่านมวลในบริเวณที่มีความหนืดได้น้อย ในทางกลับกันถ้า Schmidt number น้อย จะส่งผ่านมวลในบริเวณที่มีความหนืดได้มาก [13]

$$Sc = \frac{\nu}{D_p(r)} \quad (14)$$

เมื่อ

ν คือ ความหนืดไคเนมาติกของแก๊ส (kinematic viscosity of gas) หน่วย $[cm^2/s]$

โดยฟังก์ชันของความเร็วการสะสมตัวของแอรอสอลจากสมการที่ 13 พบว่าลักษณะของการสะสมตัวของแอรอสอลจะถูกแบ่งด้วยค่า dimensionless particle relaxation time หรือ τ^+ ตั้งสมการที่ 15 เดิมทีค่า dimensionless particle relaxation time มาจาก particle relaxation time หรือ τ หน่วย $[s]$ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณมาผลหารของจาก stopping distance หรือ S หน่วย

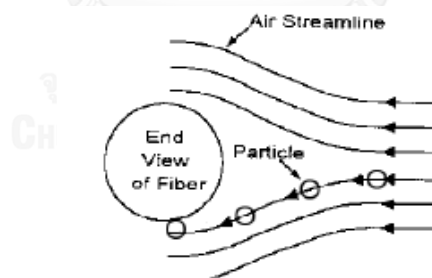
[cm] ต่อ initial velocity หรือ U_0 หน่วย [cm/s] ในสมการที่ 16 แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงถูกปรับให้เป็นตัวแปรไร้มิติ ดังนั้นค่า dimensionless particle relaxation time หรือ τ^+ จึงบ่งบอกถึงกลไกการสะสมตัวของแอโรซอลว่าเป็นไปตามทิศทางของการไหลของไอหรือแก๊สหรือไม่ โดยค่า dimensionless particle relaxation time คำนวณได้จากสมการที่ 17 [13]

$$v_{diff} = \begin{cases} 0.0899 Sc^{-0.704} u_\tau & ; \tau^+ < 0.2 \\ 3.25 \times 10^{-4} \tau^{+2} u_\tau & ; 0.2 < \tau^+ < 22.9 \\ 0.17 u_\tau & ; \tau^+ > 22.9 \end{cases} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{S}{U_0} \quad (16)$$

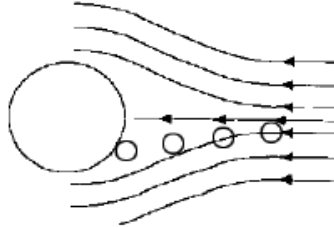
$$\tau^+ = \frac{\rho_p 4r^2}{18\mu_g^2} u_\tau^2 \rho_g \quad (17)$$

ในกรณีช่วงที่ dimensionless particle relaxation time น้อยกว่า 0.2 เป็นช่วงการสะสมตัวของแอโรซอลที่มีทิศทางเป็นไปตามการไหลของไอหรือแก๊ส ดังในรูปที่ 10 [14]



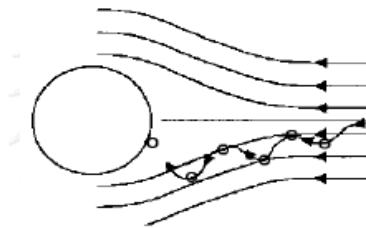
รูปที่ 10 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอโรซอลกรณี $\tau^+ < 0.2$ [14]

ในกรณีช่วงที่ dimensionless particle relaxation time อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 22.9 เป็นช่วงการสะสมตัวของแอโรซอลเริ่มมีทิศทางเบนออกจากการไหลของไอหรือแก๊ส ดังในรูปที่ 11 [14]



รูปที่ 11 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอโรซอลกรณี $0.2 < \tau^+ < 22.9$ [14]

ในกรณีช่วงที่ dimensionless particle relaxation time มากกว่า 22.9 เป็นช่วงการสะสมตัวของแอโรซอลที่มีทิศทางเป็นไม่ไปตามการไหลของไอหรือแก๊ส ดังในรูปที่ 12 [14]



รูปที่ 12 แสดงทิศทางการสะสมตัวของแอโรซอลกรณี $\tau^+ > 22.9$ [14]

โดยความเร็วเสียดทาน (friction velocity) คำนวณได้จากสมการที่ได้จากการทดลองของของไหลที่วิ่งผ่านบริเวณพื้นที่ผิวเรียบของท่อทรงกระบอก โดยเรียกว่ากฎของผนัง (law of the wall) [15] ดังสมการที่ 18 จากค่าสูงสุดของความสัมพันธ์ของกฎของผนัง ดังนั้นจึงคำนวณความเร็วเสียดทาน (friction velocity) ได้จากสมการที่ 19

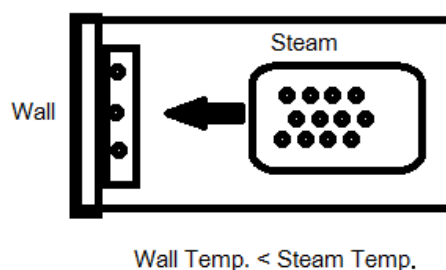
$$0 \leq \frac{\delta_D u_\tau}{\nu} \leq 5 \quad (18)$$

$$u_\tau = \frac{5\nu}{\delta_D} \quad (19)$$

โดยจะเห็นว่าปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากอุณหภูมิจากของ แอโรซอลเป็นหลักโดยไม่ได้พิจารณาถึงผลต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในส่วนอื่นซึ่งทำให้เกิดการแพร่แบบไร้ทิศทาง [10] แต่ถ้าหากมีการพิจารณาถึงผลกระทบจากทางโฟเรติก (phoretic effect) ของ การแพร่แบบบราวเนียนจะส่งผลให้การแพร่แบบบราวเนียนถูกกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ โดยจะ ขึ้นกับสองปรากฏการณ์หลักๆ ได้แก่ เทอร์โมโฟเรซิส (thermophoresis) ที่เกิดจากเกรเดียนต์ของ ผลต่างอุณหภูมิของแอโรซอลและผนัง และดิฟฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis) ที่เกิดจาก เกรเดียนต์ของผลต่างอุณหภูมิของแอโรซอลและผนังซึ่งมีผลของการควบแน่นของไอน้ำเข้ามา เกี่ยวข้องด้วย [10] โดยทั้งสองปรากฏการณ์นี้จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.6.3 ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis)

ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส หรือ $v_{diffph}(r)$ หน่วย [cm/s] เป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลที่ผนัง โดยปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิสเป็น ปรากฏการณ์การแพร่อย่างหนึ่งที่เกิดในบริเวณที่อุณหภูมิของผนังน้อยกว่าอุณหภูมิของแอโรซอลและ มีการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นที่ผนัง ดังรูปที่ 13 ซึ่งการเกิดการควบแน่นจะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลง ของเกรเดียนต์ความเข้มข้นของไอน้ำและเกรเดียนต์ของความดันย่อยซึ่งนำไปสู่การสะสมตัวของ แอโรซอล [4] ซึ่งจากสมการที่ 20 พบว่าความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ ดิฟฟิวซิโอฟรีซิสจะอยู่ในฟังก์ชันของความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการ ควบแน่น (Stephan flow) ในพจน์ของ U_c หน่วย [cm/s] และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัม ของ แก๊ส (gas momentum transfer) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความดันย่อยของแก๊ส (partial pressures of noncondensable gases)



รูปที่ 13 แสดงการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส [4]

โดยการคำนวณความเร็วของแอรอสอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดีฟิวซีโอโพริซิซอย่างง่าย ได้พิจารณาถึงผลของความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) [4] รวมในสมการเดียวกันในสมการที่ 20

$$v_{diffph}(r) = \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c \quad (20)$$

ถัดมาจากงานวิจัย [10] พบว่าความเร็วของแอรอสอลจากปรากฏการณ์ดีฟิวซีโอโพริซิซ ในกรณีที่ความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) มีผลมากกว่าผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) จะใช้สมการใหม่โดยแยกคิดผลจากความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) นอกจากนี้ยังได้พิจารณาในส่วนของรูปร่างของแอรอสอลในพจน์ของ dynamic sharp factor หรือ χ และการไถล (Slip) ในพจน์ของ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ ดังในสมการที่ 21

$$v_{diffph}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right] \quad (21)$$

เมื่อ

m_s คือมวลโมเลกุลของไอน้ำ หน่วย [g]

m_a คือ มวลโมเลกุลของแก๊ส หน่วย [g]

γ_s คือ สัดส่วนความดันย่อยของไอน้ำ หน่วย [-]

γ_a คือ สัดส่วนความดันย่อยของแก๊ส หน่วย [-]

โดยความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) ในพจน์ของ U_c หน่วย [cm/s] จะต้องพิจารณาในส่วนของความเร็วไอน้ำที่เกิดการควบแน่นจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นไอน้ำในพจน์ของ k_c หน่วย [cm/s] และความเร็วไอน้ำที่เกิดการควบแน่นจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของไอน้ำ (convective diffusion) ในพจน์ของ k_n หน่วย [cm/s] ดังสมการที่ 22 [4]

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_n} \quad (22)$$

โดยความเร็วไอน้ำที่เกิดการควบแน่นจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นไอน้ำเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะที่เกิดการควบแน่น โดยพบว่าไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าทำให้เกรเดียนต์ของความเข้มข้นไอน้ำเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งผลของความเร็วของการควบแน่นถูกคำนวณในสมการที่ 23 [4]

$$k_c = \frac{D_{sa}}{1 - \gamma_s} \nabla \gamma_s \quad (23)$$

เมื่อ

D_{sa} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในแก๊ส หน่วย $[cm^2/s]$

$\nabla \gamma_s$ คือ เกรเดียนต์ของความเข้มข้นไอน้ำ $[1/cm]$

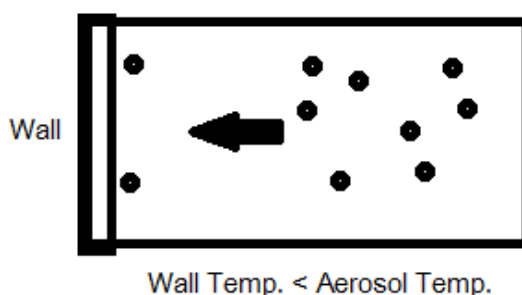
ในส่วนของความเร็วไอน้ำที่เกิดการควบแน่นจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของไอน้ำ (convective diffusion) จะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน Sherwood number หรือ Sh หน่วย [-] และความยาวของพื้นที่ในการควบแน่นตัวจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของไอน้ำ (convective diffusion) หรือ L หน่วย $[cm]$ ดังสมการที่ 24 [4]

$$k_n = \frac{D_{sa}}{L} Sh \quad (24)$$

โดยค่า Sherwood number เป็นค่าที่อธิบายถึงการส่งผ่านของอนุภาคที่กำลังแพร่ในของไหล โดยในกรณี Sherwood number น้อยอนุภาคจะแพร่ได้เร็วกว่าที่จะเคลื่อนที่ไปตามของไหล ในทางกลับกันกรณี Sherwood number มากอนุภาคจะแพร่ได้ช้ามากทำให้อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามของไหลมากขึ้น (gases)

2.6.4 เทอร์โมโฟรีซิส (Thermophoresis)

ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส หรือ $v_{ther}(r)$ หน่วย [cm/s] เป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลที่ผนัง โดยปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิสเป็นปรากฏการณ์การแพร่อย่างหนึ่งที่เกิดในบริเวณที่อุณหภูมิของผนังน้อยกว่าอุณหภูมิของแอโรซอลเช่นเดียวกับปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส แต่ไม่มีการพิจารณาการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นที่ผนัง ซึ่งจะพิจารณาการสะสมตัวของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผนังและอุณหภูมิของแอโรซอลเท่านั้น ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส [4]

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส จะต้องพิจารณาในส่วนผลของความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊สในพจน์ของ v_T หน่วย [cm/s] และความเร็วของการสะสมตัวจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของแก๊ส (convective diffusion) ในพจน์ของ v_c หน่วย [cm/s] ดังสมการที่ 25 [4]

$$v_{ther}(r) = \frac{v_T(r)v_c(r)}{v_T(r) + v_c(r)} \quad (25)$$

โดยความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊ส โดยลักษณะของการสะสมตัวจะใช้ค่า Knudsen number หรือ Kn เป็นตัวแบ่ง ซึ่งค่า Knudsen number จะเป็นตัวบอกลักษณะการเคลื่อนของอนุภาคขนาดเล็กผ่านช่องแคบ ดังสมการที่ 26 [4]

โดยกรณีแรกค่า Knudsen number น้อยกว่า 0.2 เป็นช่วงอนุภาคยังคงเคลื่อนที่ไปตามแก๊ส ที่เคลื่อนที่แต่มียังมีอนุภาคบางส่วนที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส หรืออาจมีเพียงแค่อุณหภูมิเคลื่อนที่ไปตามแก๊สที่เคลื่อนที่ โดยจะคำนวณจากสมการของ Brock (Brock model) [4]

กรณีที่สองที่ค่า Knudsen number มากกว่า 0.2 เป็นช่วงอนุภาคยังคงเคลื่อนที่ไปตามแก๊ส ที่เคลื่อนที่แต่มียังมีอนุภาคบางส่วนที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส หรืออาจมีเพียงแค่อุณหภูมิที่เคลื่อนที่เป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส โดยจะคำนวณจากสมการของ Wildman (Wildman model) [4]

$$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{2T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_g}{4\left(1 + \frac{\pi}{8}\alpha_m\right)T} \nabla T_g \exp\left(\frac{-(0.09 + 0.12\alpha_m)\left(1 - \alpha_t \frac{\lambda_g}{2\lambda_p}\right)}{Kn}\right) & ; Kn > 0.2 \end{cases} \quad (26)$$

เมื่อ

v_g คือ ความหนืดไดนามิกของแก๊ส (dynamic viscosity of gas) หน่วย [cm^2/s]

λ_g คือ ค่าการนำความร้อนของแก๊ส (thermal conductivity of gas) หน่วย [$\text{erg}/(\text{K}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})$]

λ_p คือ ค่าการนำความร้อนของแอโรซอล (thermal conductivity of aerosol) หน่วย [$\text{erg}/(\text{K}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})$]

C_t คือ ค่าคงที่ของการถ่ายโอนพลังงานของแอโรซอลและแก๊ส

C_m คือ ค่าคงที่ของการถ่ายโอนโมเมนตัมของแอโรซอลและแก๊ส

α_t คือ ค่าตัวคูณของการถ่ายโอนพลังงานของแอโรซอลและแก๊ส

α_m คือ ค่าตัวคูณของการถ่ายโอนโมเมนตัมของแอโรซอลและแก๊ส

ถัดมา Derjaguin [16] ได้พิสูจน์ว่าสมการของ Brock ใช้แค่ช่วงที่ค่า Knudsen number น้อย และที่ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง สมการของ Brock มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้น Derjaguin จึงได้เสนอสมการในการคำนวณที่ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้สมการที่ใช้อธิบายยังพบว่ามีคลาดเคลื่อนไป

จากการทดลองที่ได้ประมาณ 10 % โดยความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊สที่ได้จากการทดลองของ Derjaguin แสดงในสมการที่ 27

$$v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{T_g (2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (27)$$

ภายหลัง Talbot [16] ได้ใช้วิธี Monte-Carlo type numerical modeling ในการปรับปรุงสมการของ Brock และสมการของ Wildman เพื่อหาค่าของความเร็วการสะสมตัวและสร้างสมการที่สามารถใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number ซึ่งค่าที่ได้สมการที่ใช้อธิบายยังพบว่ามีแตกต่างไปจากการทดลองประมาณ 3 % โดยความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊สที่ได้จากการประมาณของ Talbot แสดงในสมการที่ 28

$$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}} \right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (28)$$

โดยความเร็วของการสะสมตัวจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของแก๊ส (convective diffusion) จะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน Sherwood number หรือ Sh หน่วย [-] และความยาวของพื้นที่ในควบแน่นตัวจากการแพร่ที่เกิดจากการพาของแก๊ส (convective diffusion) หรือ L หน่วย [cm] ดังสมการที่ 29 [4]

$$v_c = \frac{D_{pa}}{L} Sh \quad (29)$$

เมื่อ

D_{pa} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคในแก๊ส หน่วย [cm²/s]

โดยค่า Sherwood number เป็นค่าที่อธิบายถึงการส่งผ่านของอนุภาคที่กำลังแพร่ในของไหลอธิบายเช่นเดียวกับปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis)

จากปรากฏการณ์ทั้งสี่ปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมของแอโรซอลผู้วิจัยได้สรุปความแตกต่างของแรงขับ (driving force) ที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของแอโรซอลไว้ในตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 แสดงความแตกต่างของแรงขับ (driving force) ที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ

ปรากฏการณ์	แรงขับ (driving force)
การตกจากแรงโน้มถ่วง	เป็นการตกจากแรงโน้มถ่วงของโลก
การแพร่แบบบราวเนียน	เป็นการแพร่แบบไร้ทิศทางเนื่องจากอุณหภูมิของแอโรซอล
เทอร์โมโฟริซิส	เป็นการแพร่แบบมีทิศทางเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผนังและอุณหภูมิของแอโรซอล จึงเกิดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผนังและอุณหภูมิของแอโรซอล
ดิฟฟิวซิโอฟริซิส	เป็นการแพร่แบบมีทิศทางเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผนังและอุณหภูมิของแอโรซอลและมีการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้น จึงเกิดเกรเดียนต์ความเข้มข้นของไอน้ำและเกรเดียนต์ของความดันย่อย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ออกแบ่ง 3 ส่วนหลัก ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบซีเซียม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบซีเซียม และงานวิจัยอื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอล โดยงานวิจัยที่ศึกษาจะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงแบบจำลองของโปรแกรม ART Mod 2

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบซีเซียม

1. Reprint of “Containment behaviour in Phébus FP” [9] (by M. Laurie, et al., 2013)

กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของสารกัมมันตรังสีในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ของเครื่องปฏิกรณ์ Phébus FP พบว่าผลที่ได้คือสารส่วนใหญ่ที่รั่วไหลออกมาจะเป็นซีเซียมไอโอดีด (CsI) และเทลเลียม (Te) และการเกิดสะสมตัวในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะเกิดจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) มากที่สุด

รองลงมาเป็นดิฟฟิวซิโอโพรซิซิส (diffusiophoresis) และสุดท้ายเป็นการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

2. The objectives of the Phébus FP experimental programme and main findings [5] (by Bernard Clément, et al., 2013)

กล่าวถึงจุดประสงค์หลักของโปรแกรมการทดลอง Phébus FP ซึ่งได้ศึกษาอุบัติเหตุร้ายแรงตั้งแต่เชื้อเพลิงหลอมเหลวจนกระทั่งการรั่วไหล ของสารกัมมันตภาพรังสี ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยเรื่องที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่แท่งเชื้อเพลิง การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่หลอมเหลว และการรั่วไหล ของสารกัมมันตรังสี ที่เป็นต้น

3. Circuit and Containment Aspects of Phébus Experimental FPT0 and Phébus FPT1 [17] (by A.V. Jones, et al., 2013)

รายงานฉบับนี้กล่าวถึงการทดลอง Phébus FPT0 และ FPT1 โดยได้บอกตัวแปรต่างๆของ แต่ละช่วงการทดลอง ตั้งแต่เชื้อเพลิงหลอมเหลวจนกระทั่งการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองของการสะสมตัวและการรั่วไหลของสารประกอบซีเซียม

1. The Study of Cesium Iodide Transportation in Containment of a Generation III+ Boiling Water Reactor under Bypass Condition [2] (by Pinsurang, et al., 2015)

กล่าวถึงการจำลองอุบัติเหตุการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอดด์ (CsI) ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ภายใต้การรั่วไหลแบบ bypass condition ในโปรแกรม ART Mod 2 โดยมีการเปรียบเทียบกรณีเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุ และไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ นอกจากนี้ยังได้ทำ sensitivity analysis โดยการปรับตัวแปรต่างๆในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อหาตัวแปรที่ส่งต่อการเคลื่อนที่ของซีเซียมไอโอดด์ (CsI) ได้แก่ อุณหภูมิของแก๊ส อุณหภูมิของผนัง และบริเวณของรอยรั่วระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อม

2. CIEMAT Contribution to the PHEBEN-2 Project: Interpretation of the PHEBUS-FPT I Experiment [7] (by L. Herranz, et al., 2003)

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการจำลองของ Phébus FPT 1 ด้วยโปรแกรม CONTAIN เพื่อศึกษาค่าทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic) ต่างๆ ศึกษาพฤติกรรมของสาร

กัมมันตรังสีที่รั่วไหล โดยเพื่อเทียบกับผลการทดลอง และผลการคำนวณจากแบบจำลองอื่นๆ

3. Simulation of the Phébus FPT1 Experiment with MELCOR 1.8.5 [18] (by Matjaž Leskovar, 2002)

กล่าวถึงการจำลองโดยใช้โปรแกรม MELCOR 1.8.5 ของการทดลอง Phébus FPT1 เพื่อคำนวณค่าทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic) และปริมาณรังสีที่รั่วไหลเพื่อเทียบกับการทดลองจริง พบว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม MELCOR 1.8.5 ที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองจริงอย่างมีนัยสำคัญ

4. Computational Modeling and Validation of Aerosol Deposition in Ventilation Ducts [19] (by Kristopher, et al., 2014)

กล่าวถึงการจำลองเพื่อศึกษาการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling), การสะสมตัวจากเทอร์โมโฟริซิส (thermophoresis) และการสะสมตัวจากการปั่นป่วน (turbulent deposition) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ computational fluid dynamics (CFD) และ fire dynamics simulator (FDS) พบว่าการสะสมตัวของแอโรซอลจากการคำนวณยังคงต่ำกว่าที่ประมาณการไว้มาก เนื่องจากยังคงต้องพิจารณาเงื่อนไขหรือปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวเพิ่มเติม

5. Quantification of in-containment fission products source term for 1000 MWe PWR under loss of coolant accident [20] (by Khurram Mehboob, et al., 2015)

กล่าวถึงการปรับปรุงการจำลองของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR เพื่อประเมินการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมา โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ พบว่าสารกัมมันตรังสีที่ออกมาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ ซีเซียม (Cs), แทลเลียม (Te), คริปตรอน (Kr), และซีนอน (Xe)

6. MELCOR 1.8.2 Assessment: Aerosol Experiments ABCOVE AB5, AB6, AB7, and LACE LA2 [21] (by J. Souto, et al., 1994)

รายงานฉบับนี้กล่าวถึงการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) ของโปรแกรม MELCOR 1.8.2 โดยใช้การทดลอง AB5, AB6 และ AB7 เพื่อตรวจสอบการสะสมตัวของแอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์พบว่าผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอล มีผล

ใกล้เคียงการทดลอง แต่พบว่ามีการไม่สมดุลกันของมวลแอโรซอลบางการทดลอง เนื่องจากขาดแบบจำลองที่พิจารณาถึงการลอยตัวของแอโรซอลในอากาศ

7. Containment analysis on the PHEBUS FPT-0, FPT-1 and FPT-2 experiments [22] (by G. Gyenes, L. Ammirabile, 2011)

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) ของโปรแกรม CPA module (Containment Package implemented in the European integral code ASTEC) โดยใช้ในการทดลองของ Phébus FPT0, FPT1 และ FPT2 พบว่าตัวแปรที่คำนวณได้ใกล้เคียงผลการทดลองได้แก่ ขนาดของแอโรซอลที่ออกจากท่อขาเย็น (cold leg) อุณหภูมิและความชื้น นอกจากนี้พบว่าการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) และการสะสมตัวที่คอนเดนเซอร์ ในระยะสั้นจะมีผลใกล้เคียงการทดลอง แต่ในระยะยาวยังมีผลน้อยกว่าการทดลองอยู่

8. Experimental interpretation and code validation based on the PHEBUS-FP programme: Lessons learnt from the analysis of the containment scenario of FPT1 and FPT2 tests [23] (by L. Herranz, et al., 2007)

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) ของโปรแกรม CONTAIN 2.0, MELCOR 1.8.5 และ ASTEC 1.1 โดยในการทดลอง Phébus FPT0 และ FPT1 ซึ่งความแตกต่างของทั้ง 3 โปรแกรมคือโนดไลเซชัน (nodalization) โดยโปรแกรม MELCOR 1.8.5 และ CONTAIN 2.0 จะใช้ปริมาตรเดียวสำหรับการจำลอง ส่วนโปรแกรม ASTEC 1.1 จะแบ่งออกเป็นสามปริมาตร โดยผลการสะสมตัวของแอโรซอล ที่ได้จากทั้งสามโปรแกรมนั้นใกล้เคียงกัน

2.7.3 งานวิจัยอื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอล

1. Rate of Deposition of Droplets in Annular Two-Phase Flow [13] (by D. D. McCoy, et al., 2013)

กล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับการสะสมของอนุภาคขนาดเล็กที่ผนัง ที่คำนึงถึงการปั่นป่วนภายในท่อทรงกระบอกทั้งแนวตั้งและแนวนอน ผลที่ได้พบว่าการสะสมตัวมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วเสียดทานของอนุภาคในท่อ และสัดส่วนของความหนาแน่นของอนุภาคต่อแก๊สเป็นหลัก

2. State of The ART Report on Nuclear Aerosol [10] (by H.J. Allelein, et al., 2009)

เป็นรายงานที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของสหสัมพันธ์ (correlation) และการทดลองต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมจากปรากฏการณ์ต่างของแอรอสอล ของปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟรีซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟรีซิส (thermophoresis)

3. Thermophoresis of particles in a heated boundary [16] (by L. Talbot, et al., 1979)

เป็นรายงานที่กล่าวถึงประวัติและการพัฒนาแบบจำลองการสะสมตัว ของอนุภาคขนาดเล็กจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส (thermophoresis) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยโมเดลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส (thermophoresis) ปัจจุบันได้ใช้แบบจำลองที่ได้จากการประมาณด้วยวิธี Monte-Carlo type numerical modeling

4. Mechanisms of Filtration for High Efficiency Fibrous [14] (by TSI Incorporated, USA, 2012)

รายงานฉบับนี้ กล่าวถึงลักษณะของกลไกการสะสมตัวจากการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ที่พิจารณาถึงกระบวนการ turbulent damping process โดยจะขึ้นกับค่า dimensionless particle relaxation time

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัยขึ้น

วิธีการดำเนินวิจัยในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการปฏิบัติ ตั้งแต่เริ่มศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมจากอุบัติเหตุร้ายแรง การเริ่มจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 เพื่อตรวจสอบปัญหาการสะสมตัวของแอรโซล การปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยการใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ จนไปถึงการทดลองใช้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วกับ การทดลอง NSPP-502 การทดลอง Phébus FPT1 และเงื่อนไขอื่นที่กำหนดขึ้น

3.1 การศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมจากอุบัติเหตุร้ายแรง

ศึกษาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 จากงานวิจัยในอดีต [2] ตรวจสอบและเปรียบเทียบปริมาณแอรโซลของสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมและที่สะสมตัวในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ที่คำนวณด้วยด้วยโปรแกรม ART Mod 2 กับงานวิจัยอื่นๆ ในกรณีนี้ใช้ผลการคำนวณจากโปรแกรม MAAP [3] เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม ART Mod 2 กับโปรแกรม MAAP เมื่อพบปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอรโซล จึงเริ่มตรวจสอบปัญหาการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 อีกครั้งด้วยการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1

เนื่องจากโปรแกรม ART Mod 2 เป็นโปรแกรมที่ใช้แบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซลพื้นฐานที่มีมานานมาก และผลการคำนวณมีค่าไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ผู้วิจัยจึงตัดสินใจคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 2 การทดลอง คือ NSPP-502 และ Phébus FPT1 เพื่อตรวจสอบว่าโปรแกรม ART Mod 2 มีปัญหาหรือไม่ หรือเกิดจากปัญหาการกำหนดข้อมูลขาเข้า (input) ของเงื่อนไขขอบเขตและโครงสร้าง โดยในตารางที่ 8 ได้สรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองแบบปริมาตรเดียวทั้งหมดของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ในงานวิจัยนี้ และในตารางที่ 9 และได้สรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลอง

แบบสามปริมาตรของการทดลอง Phébus FPT1 และรายละเอียดของการจำลองได้แสดงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 8 แสดงสรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองแบบปริมาตรเดียว ทั้งหมดของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ในงานวิจัย

เงื่อนไขของเขต ของข้อมูลขาเข้า	การจำลองการทดลอง		
	NSPP- 502	Phébus FPT1 ปริมาตร เดียว	Phébus FPT1 ปริมาตรเดียว เพื่อทดสอบผลของคอนเดนเซอร์
ข้อมูลขาเข้าของโครงสร้าง			
ปริมาตร 1 แทนอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์			
เส้นผ่านศูนย์กลาง อาคาร [m]	1.52	1.8	1.8
ความสูงอาคาร	5.24	5	5
จำนวนปริมาตร	1	1	1
ปริมาตรที่ปล่อย สารต้นกำเนิด	1	1	1
ปริมาตรอาคาร [m ³]	9.5	10	10
พื้นที่ผิวอาคาร [m ²]	7.3	5.08	5.08
ข้อมูลขาเข้าของเงื่อนไขขอบเขต			
ความดัน [MPa]	0.27	0.21	0.21
อุณหภูมิผนัง [K]	393	381	381
อุณหภูมิ คอนเดนเซอร์ [K]	-	สมมติเท่า ผนัง 381	ทดลองอุณหภูมิของผนังลงจาก 381 K (เท่าอุณหภูมิ แก๊ส) เป็น 376K 373 K 367 K และ 363 K (เท่า อุณหภูมิกอนเดนเซอร์) เพื่อทดสอบผลของ คอนเดนเซอร์

อุณหภูมิแอรโรซอล [K]	399	381	381
อัตราการไหล [g/s]	0.01	2.2	2.2
ระยะเวลา [s]	10,000	133,200	133,200
สารต้นกำเนิด	เหล็ก ออกไซด์	ซีเซียมไอ โอดด์	ซีเซียมไอโอดด์
มวลของสารต้น กำเนิด [g]	17.4	9.77	9.77

ตารางที่ 9 แสดงสรุปเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการจำลองแบบสาม
ปริมาตรการทดลอง Phébus FPT1 ในงานวิจัย

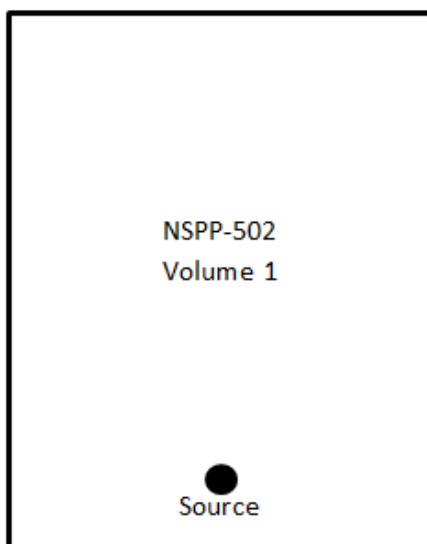
เงื่อนไขขอบเขตของ ข้อมูลขาเข้า	การจำลองการทดลอง		
	Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร		
ข้อมูลขาเข้าของ โครงสร้าง	ปริมาตร 1 แทนท่อปล่อยสารกัม- ตรังสีและไอน้ำ	ปริมาตร 2 แทนอาคารคลุม เครื่องปฏิกรณ์	ปริมาตร 3 แทนพื้นที่ผิว คอนเดนเซอร์
เส้นผ่านศูนย์กลาง [m]	0.16	1.8	1.3
ความสูง [m]	0.1	5	1.6
ปริมาตร [m ³]	0.002	10	2.16
พื้นที่ผิวอาคาร [m ²]	0.02	5.08	-
ข้อมูลขาเข้าของเงื่อนไขขอบเขต			
ความดัน [MPa]	0.21		
อุณหภูมิผนัง [K]	381	381	363
อุณหภูมิแอรโรซอล [K]	381		
อัตราการไหล [g/s]	คำนวณจากโปรแกรม RELAP5		
ระยะเวลา [s]	133,200		

สารตั้งก่าเนิด	ซีเซียมไอโอดี
มวลสารตั้งก่าเนิด [g]	9.77

3.2.1 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502

เมื่อพบปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอรโซลที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้จำลองของการทดลอง NSPP-502 ของ Oak Ridge National Laboratory [4] โดยสาเหตุที่เลือกการทดลองนี้มาเนื่องจากเป็นตัวอย่งการทดลองที่มาพร้อมกันกับคู่มือการใช้โปรแกรม ART Mod 2 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแอรโซลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่รั่วไหลมาจากการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

โดยโนดไลเซชัน (noldalization) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 เนื่องจากการทดลองอย่างง่ายไม่ซับซ้อนมากจึงเป็นเพียงปริมาตรเดียว ที่มีการปล่อยแอรโซลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ไว้ด้านในและศึกษาพฤติกรรมของแอรโซลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เกิดขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอรโซลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) [4] แสดงไว้ในตารางที่ 10 และข้อมูลขาเข้า (input) ที่สำคัญ [4] ได้แสดงไว้ในตาราง 11



รูปที่ 15 แสดงโนดไลเซชัน (noldalization) ของการทดลอง NSPP-502 [4]

ตารางที่ 10 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอโรซอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์

(Fe₂O₃) [4]

ของล่าง [cm]	ขอบบน [cm]
2.1782E-14	1.7425E-13
1.7425E-13	1.3940E-12
1.3940E-12	1.1152E-11
1.1152E-11	8.9218E-11
8.9218E-11	7.1374E-10
7.1374E-10	5.7099E-09
5.7099E-09	4.5680E-08
4.5680E-08	3.6544E-07
3.6544E-07	2.9235E-06
2.9235E-06	2.3388E-05

ตารางที่ 11 แสดงข้อมูลขาเข้า (input) ของการทดลอง NSPP-502 [4]

ข้อมูลขาเข้าของโครงสร้าง	
ปริมาตร 1 แทนอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	
เส้นผ่านศูนย์กลางอาคาร [m]	1.52
ความสูงอาคาร [m]	5.24
จำนวนปริมาตร	1
ปริมาตรที่ปล่อยสารต้นกำเนิด	1
ปริมาตรอาคาร [m ³]	9.5
พื้นที่ผิวอาคาร [m ²]	7.3
ข้อมูลขาเข้าของเงื่อนไขขอบเขต	
ความดัน [MPa]	0.27
อุณหภูมิผนัง [K]	393

อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ [K]	-
อุณหภูมิแอร์ซอล [K]	399
อัตราการไหล [g/s]	0.01
ระยะเวลา [s]	10,000
สารต้นกำเนิด	เหล็กออกไซด์
มวลของสารต้นกำเนิด [g]	17.4

โดยหลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม ART Mod 2 กับผลการทดลองพบว่ายังคงมีความไม่สอดคล้องกันของค่าการสะสมตัวของแอร์ซอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อยู่ อย่างไรก็ตามในคู่มือการใช้โปรแกรม ART Mod 2 [4] ยังคงยอมรับผลการคำนวณว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงตรวจสอบปัญหาการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 อีกครั้งด้วยการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1

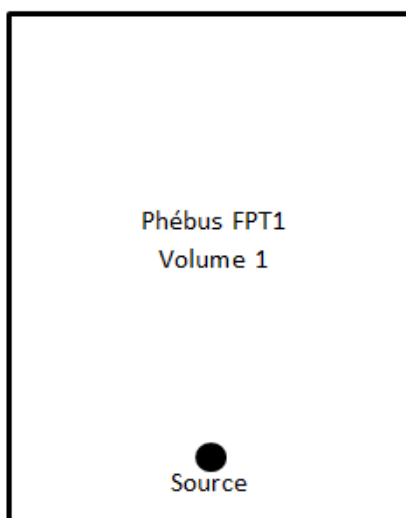
เนื่องจากการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 มีรายละเอียดหลายส่วน ซึ่งผู้วิจัยจึงเริ่มการจำลองอย่างง่ายก่อนและจึงปรับปรุงเงื่อนไขและโครงสร้างต่างๆของการจำลอง เพื่อให้ได้ผลการจำลองใกล้เคียงการทดลองจริงมากที่สุด ดังนี้

3.2.2.1 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียว

จากปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอร์ซอลจากการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 จึงได้ทดลองจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 ของ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) เพื่อเป็นการยืนยันปัญหาการสะสมตัวของแอร์ซอลอีกครั้ง

โดยการทดลอง Phébus FPT 1 มีอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบปริมาตรเดียวและมีคอนเดนเซอร์ 3 แห่ง ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าไอน้ำและแก๊สภายในเพื่อลดความดันในอาคารคลุมเครื่อง

ปฏิกรณ์ ซึ่งในการจำลองได้เริ่มจำลองอย่างง่ายก่อนโดยสร้างเป็นปริมาตรเดียวมีแอร์ชอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (Csi) อยู่ด้านในเช่นเดียวกันกับการทดลอง NSPP-502 ดังรูปที่ 16 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ แอร์ชอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (Csi) [9] แสดงไว้ในตารางที่ 12 และข้อมูลขาเข้า (Input) ที่สำคัญ [7] ได้แสดงไว้ที่ตาราง 13



รูปที่ 16 แสดงโนตาไลเซชัน (noldalization) ของการทดลอง Phébus FPT 1

ตารางที่ 12 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแอร์ชอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (Csi) [9]

ของล่าง [cm]	ขอบบน [cm]
1.5105E-13	2.3602E-12
2.3602E-12	2.5132E-11
2.5132E-11	9.2767E-11
9.2767E-11	3.7165E-10
3.7165E-10	1.5012E-09
1.5012E-09	4.9498E-09
4.9498E-09	2.3131E-08
2.3131E-08	2.3388E-05

ตารางที่ 13 แสดงข้อมูลขาเข้า (input) ของการทดลอง Phébus FPT 1 [7]

ข้อมูลขาเข้าของโครงสร้าง	
ปริมาตร 1 แทนอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	
เส้นผ่านศูนย์กลางอาคาร [m]	1.8
ความสูงอาคาร [m]	5
จำนวนปริมาตร	1
ปริมาตรที่ปล่อยสารต้นกำเนิด	1
ปริมาตรอาคาร [m ³]	10
พื้นที่ผิวอาคาร [m ²]	5.08
ข้อมูลขาเข้าของเงื่อนไขขอบเขต	
ความดัน [MPa]	0.21
อุณหภูมิผนัง [K]	381
อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ [K]	สมมุติเท่าผนัง 381
อุณหภูมิแอร์โซล [K]	381
อัตราการไหล [g/s]	2.2
ระยะเวลา [s]	133,200
สารต้นกำเนิด	ซีเซียมไอโอดด์
มวลของสารต้นกำเนิด [g]	9.77

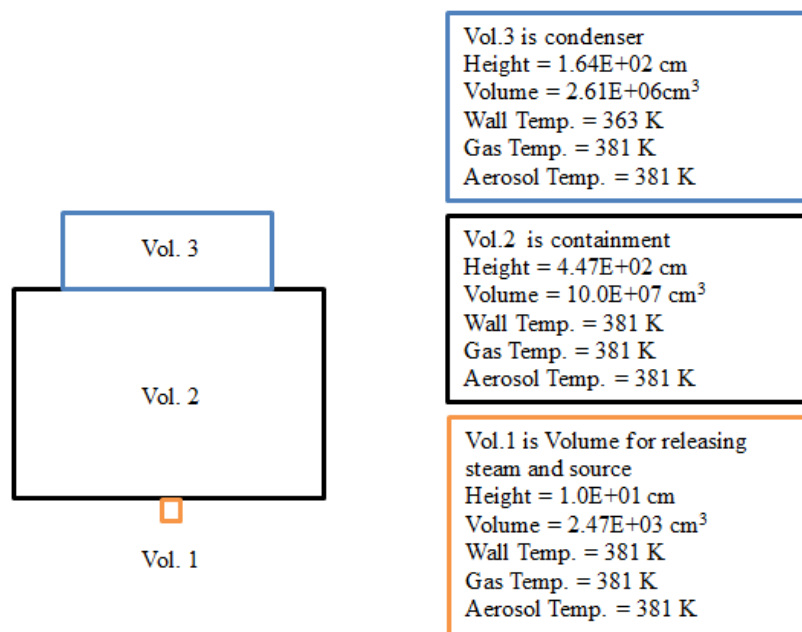
3.2.2.2 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียวเพื่อทดสอบผลกระทบจากของคอนเดนเซอร์

โดยผลที่ได้จากการจำลองของ Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียวในที่นี้ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของคอนเดนเซอร์พบว่า ผลการสะสมตัวของแอโรซอลที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับการทดลองมากนัก เนื่องจากในการสะสมตัวของแอโรซอลจะมีที่ผิวของคอนเดนเซอร์ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำลองคอนเดนเซอร์ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วย แต่โปรแกรม ART Mod 2 มีข้อจำกัดคือไม่สามารถสร้างปริมาตรของคอนเดนเซอร์ภายในปริมาตรของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบผลการสะสมตัวของแอโรซอลให้แม่นยำมากขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของคอนเดนเซอร์ด้วย จากการปรับเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอุณหภูมิของผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อใช้เป็นการทดสอบผลกระทบของการสะสมตัวของแอโรซอลจากคอนเดนเซอร์ โดยเราได้สมมติว่าผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวแทนของคอนเดนเซอร์ จึงได้ทดสอบปรับเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) โดยการลดอุณหภูมิของผนังลงจาก 381 K (เท่าอุณหภูมิแก๊ส) เป็น 376K 373 K 367 K และ 363 K (เท่าอุณหภูมิคอนเดนเซอร์) ตามลำดับ โดยใช้โนดไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) อื่นๆเหมือนเดิม

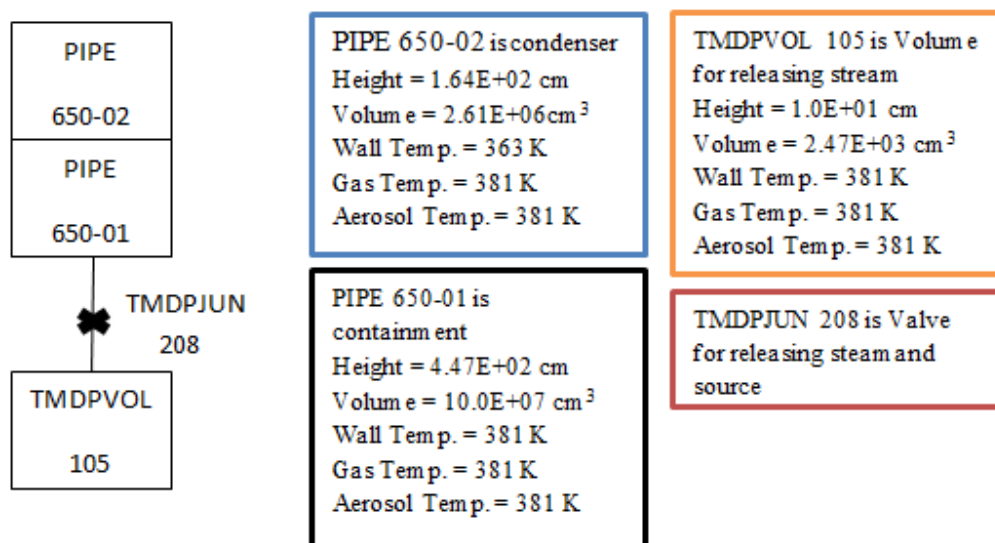
3.2.2.3 การจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร

จะเห็นได้ว่าการจำลองแบบปริมาตรเดียวไม่สามารถตรวจสอบผลการสะสมตัวของแอโรซอลได้ครบทุกกรณีเนื่องจากมีผลของอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ด้วยจึงทำให้ต้องจำลองหลายครั้งเพื่อตรวจสอบปัญหา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างโนดไลเซชัน (nodalization) และปรับค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของการทดลอง Phébus FPT1 ใหม่โดยการสร้างปริมาตรขึ้นมาใหม่สามปริมาตร ปริมาตร (volume) ที่ 1 เป็นปริมาตรเล็ก มีขนาดโดยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปริมาตรเท่ากับที่ท่อที่ปล่อยแอโรซอลและไอน้ำเข้าอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 0.03 เมตร ปริมาตร (volume) ที่ 2 เป็นปริมาตรที่เท่าขนาดของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และปริมาตร (volume) ที่ 3 เป็นปริมาตรที่มีความสูงเท่ากับคอนเดนเซอร์จริงประมาณ 1.6 เมตรและมีพื้นที่ผิวและอุณหภูมิเท่ากับคอนเดนเซอร์ทั้งสามแห่งรวมกัน โดยโนดไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของทั้ง 3 ปริมาตรแสดงได้ในรูปที่ 17 และในตารางที่ 9



รูปที่ 17 แสดงโนดาไลเซชัน (nodalization) และ เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) หลังปรับปรุงของการทดลอง Phébus FPT1

แต่การสร้างโนดาไลเซชัน (nodalization) ของการทดลอง Phébus FPT1 ใหม่โดยการสร้างปริมาตรขึ้นมาใหม่สาม ปริมาตรจำเป็นต้องใส่ข้อมูลขาเข้า (input) ของค่าอัตราการไหลระหว่างปริมาตร และความเร็วภายในปริมาตรของไอน้ำด้วย ซึ่งโปรแกรม ART Mod 2 ไม่สามารถคำนวณได้ โดยค่าอัตราการไหลระหว่างปริมาตรและความเร็วภายในปริมาตรผู้วิจัยได้ใช้การคำนวณจากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 [24] ซึ่งเป็นโปรแกรมหาค่าทางเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal hydraulic) โดยโนดาไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) โดยหาค่าอัตราการไหลระหว่างปริมาตรในโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 แสดงได้ในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงโนดัลไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 ของการทดลอง Phébus FPT1

เมื่อจำลองการทดลองของ Phébus FPT1 ได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงแล้ว จึงตรวจสอบผลการสะสมตัวที่ได้พบว่า การสะสมตัวของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมไอโอดีน (CsI) ยังไม่สอดคล้องกับการทดลองจริงอยู่จากหลายๆปรากฏการณ์ ได้แก่ ปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และดิฟฟิวซิโอโฟเรซิส (diffusiophoresis) จากผลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยการใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.3 การปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยการใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ

การปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยการใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ โดยสาเหตุที่ใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบเนื่องจากผลการทดลองที่ได้แสดงถึงการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งการปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่างด้วย ได้แก่ปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟเรซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟเรซิส

(thermophoresis) โดยการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลได้มีการเลือกแบบจำลอง หรือสหสัมพันธ์ (correlation) หลายๆแบบเพื่อนำมาปรับปรุงการสะสมตัวของแอโรซอลในแต่ละปรากฏการณ์ ดังนี้

3.3.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational settling)

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วงหรือ $v_{gra}(r)$ หน่วย [cm/s] จากสมการที่ 3 เป็นสมการถูกพิสูจน์มากจากการคำนวณของ Stoke (Stoke's approximation) และการคำนวณของ Newton (Newton's approximation) ซึ่งในการปรับปรุงแบบจำลองได้ปรับปรุงในส่วนของสหสัมพันธ์ (correlation) อื่นๆที่อยู่ในรูปของสมการที่ 1 ได้แก่ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ [4]

$$v_{gra}(r) = \begin{cases} \frac{2r^2 g (\rho_p - \rho_g)}{9\mu_g} Cu(r) & ; Re < 1 \\ \frac{\mu_g Re}{2r\rho_p} & ; Re > 1 \end{cases} \quad (3)$$

โดยสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขต่างๆของการทดลอง โดยจากสมการที่ 4 ซึ่งเป็นสมการที่โปรแกรม ART Mod 2 ใช้ในคำนวณ เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [4]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.26 + 0.42 \exp\left(\frac{-0.87}{Kn}\right) \right] \quad (4)$$

ถัดมาผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้สมการที่ 3 และสมการที่ 4 ในการปรับปรุงแบบจำลอง โดยสมการที่ 5 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [10]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.142 + 0.588 \exp\left(\frac{-0.999}{Kn}\right) \right] \quad (5)$$

และในสมการที่ 6 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมทุกขนาด ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [11]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[2.34 + 1.05 \exp\left(\frac{-0.39}{Kn}\right) \right] \quad (6)$$

จากการปรับปรุงโมเดลพบว่าสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จะอยู่ในฟังก์ชันของค่า Knudsen number โดยค่า Knudsen number คำนวณได้จากระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) หรือ λ หน่วย [cm] และรัศมีของแอโรซอลดังสมการที่ 7 [4]

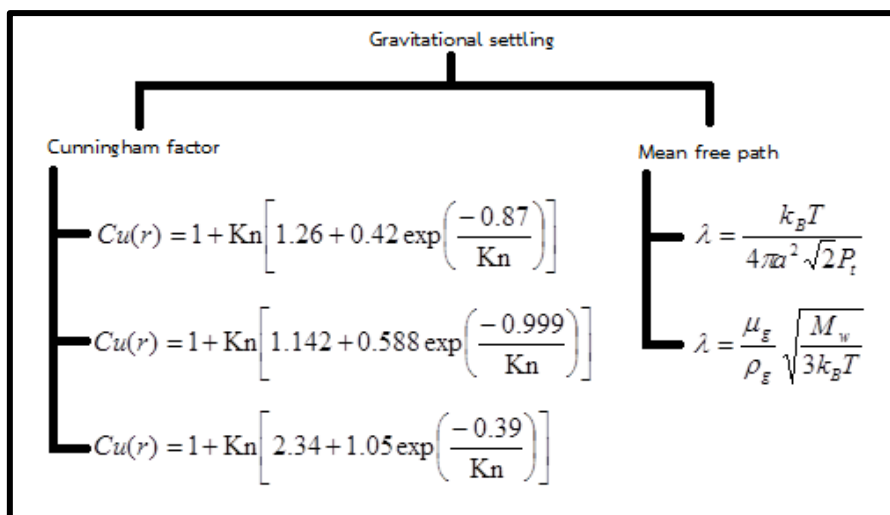
$$Kn = \frac{2\lambda}{r} \quad (7)$$

โดยในการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ในโปรแกรม ART Mod 2 คำนวณมาจากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส (mean velocity of gas) [4] ดังสมการที่ 8 เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าได้พบว่าการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) สามารถคำนวณได้อีกวิธีหนึ่งคือการคำนวณโดยใช้ความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) [12] ดังสมการที่ 9 จึงใช้สมการที่ 9 ทดลองในการปรับปรุงแบบจำลอง

$$\lambda = \frac{k_B T}{4\pi a^2 \sqrt{2} P_i} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\mu_g}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_w}{3k_B T}} \quad (9)$$

โดยจากรูปที่ 19 ได้สรุปแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 19 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ แอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง

3.3.2 การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน หรือ $v_{diff}(r)$ หน่วย [cm/s] ในโปรแกรม ART Mod 2 คำนวณได้จากสมการในรูปอย่างง่ายจากกฎของ Fick's law ดังสมการที่ 10 โดยค่าคงที่ต่างๆถูกคำนวณมาจากการทดลองของการเคลื่อนที่ของการแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคขนาดเล็ก [4]

$$v_{diff}(r) = 2.17D_p(r)^{0.79} \quad (10)$$

เมื่อ

$D_p(r)$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของแอโรซอล หน่วย [cm²/s]

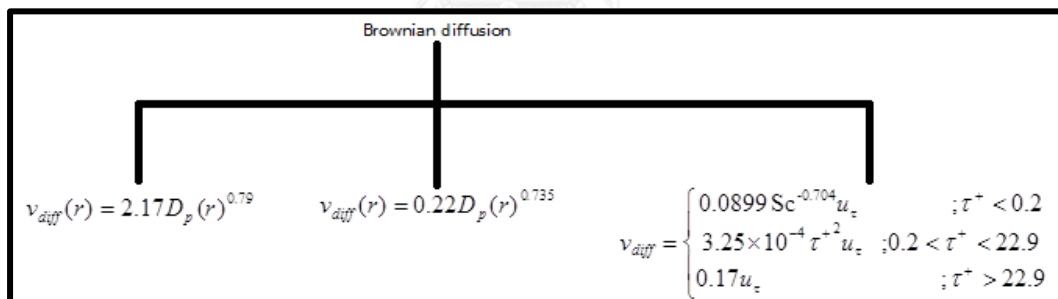
ถัดมาจึงได้ทดลองใช้สมการจากการทดลองของ Van der Vate [10] ได้ทำการทดลองเพื่อ ศึกษาการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) ในการปรับปรุงแบบจำลอง ซึ่งสมการยังคงในรูปอย่างง่ายจากกฎของ Fick's law แต่ค่าคงที่เปลี่ยนไปจากเดิมในสมการที่ 12

$$v_{diff}(r) = 0.22D_p(r)^{0.735} \quad (12)$$

สุดท้ายจากงานวิจัยของการทดลอง Phébus FPT1 [9] ได้กล่าวไว้ว่ากระบวนการ turbulent damping process ส่งผลต่อการสะสมตัวที่ผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อย่างมาก ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงแบบจำลองโดยทดลองใช้แบบจำลองการแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณาในส่วน ของกระบวนการ turbulent damping process ในสมการที่ 15 ซึ่งเป็นการทดลองการปล่อย อนุภาคขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการใช้ไฮโดรเจนที่ 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อ ตรวจสอบความเร็วจากการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณา กระบวนการ turbulent damping process [13]

$$v_{diff} = \begin{cases} 0.0899 Sc^{-0.704} u_\tau & ; \tau^+ < 0.2 \\ 3.25 \times 10^{-4} \tau^{+2} u_\tau & ; 0.2 < \tau^+ < 22.9 \\ 0.17 u_\tau & ; \tau^+ > 22.9 \end{cases} \quad (15)$$

โดยจากรูปที่ 20 ได้สรุปแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสม ตัวของไอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน



รูปที่ 20 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของ ไอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน

3.3.3 ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis)

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส หรือ $v_{diffph}(r)$ หน่วย [cm/s] ในโปรแกรม ART Mod 2 ได้ใช้สมการที่ 20 ในการคำนวณ โดยจากสมการที่ 20 การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิสอย่างง่าย ได้พิจารณาถึงผลของความเร็วของ ไออน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของ โมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) [4] รวมในสมการเดียวกันในสมการที่ 20

$$v_{diffph}(r) = \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c \quad (20)$$

ถัดมาผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้แบบจำลองของสมการที่ 21 ในกรณีที่ความเร็วของไออน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) มีผลมากกว่า ซึ่งแยกคิดผลจากความเร็วของไออน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัม ของแก๊ส (gas momentum transfer) ออกจากกัน นอกจากนี้ยังได้พิจารณาในส่วนของรูปร่างของแอโรซอลในพจน์ของ Dynamic sharp factor หรือ χ และการไถล (slip) ในพจน์ของ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ [10]

$$v_{diffph}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right] \quad (21)$$

โดยจากรูปที่ 21 ได้สรุปแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส

Diffusiophoresis

$$v_{diffph}(r) = \frac{\sqrt{m_z}}{\gamma_z \sqrt{m_z} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c$$

$$v_{diffph}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_z}}{\gamma_z \sqrt{m_z} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right]$$

รูปที่ 21 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส

3.3.4 เทอร์โมไฟรีซิส (thermophoresis)

การคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมไฟรีซิส ในส่วนของความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊ส หรือ $v_T(r)$ ในโปรแกรม ART Mod 2 ใช้ดังสมการที่ 26 ซึ่งเป็นสมการของ Brock (Brock model) และ Wildman (Wildman model) [4]

$$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{2T_g(1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_g}{4\left(1 + \frac{\pi}{8}\alpha_m\right)T} \nabla T_g \exp\left(\frac{-(0.09 + 0.12\alpha_m)\left(1 - \alpha_t \frac{\lambda_g}{2\lambda_p}\right)}{Kn}\right) & ; Kn > 0.2 \end{cases} \quad (26)$$

ถัดมาผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการจากการทดลองของ Derjaguin [16] ในสมการที่ 27 ซึ่ง Derjaguin ได้พิสูจน์ว่าสมการของ Brock ใช้แค่ช่วงที่ค่า Knudsen number น้อย และที่ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง สมการของ Brock มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้น Derjaguin จึงได้เสนอสมการในการคำนวณที่ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number

$$v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{T_g(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (27)$$

สุดท้ายได้ทดลองใช้สมการที่ 28 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Monte-Carlo type numerical modeling [16] ในการปรับปรุงสมการของ Brock และสมการของ Wildman เพื่อหาค่าของความเร็วการสะสมตัวและสร้างสมการที่สามารถใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number

$$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}}\right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (28)$$

โดยจากรูปที่ 22 ได้สรุปแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส

Thermophoresis

$$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p)}{2T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_g}{4 \left(1 + \frac{\pi}{8} \alpha_m\right) T} \nabla T_g \exp \left[\frac{-(0.09 + 0.12 \alpha_m) \left(1 - \alpha_i \frac{\lambda_g}{2\lambda_p}\right)}{Kn} \right] & ; Kn > 0.2 \end{cases}$$

$$v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p)}{T_g (2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$$

$$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}}\right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$$


รูปที่ 22 แสดงแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส

โดยในตารางที่ 14 ได้สรุปความเหมาะสมของสมการต่างๆที่นำมาเลือกใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ

ตารางที่ 14 แสดงความเหมาะสมของสมการต่างๆที่นำมาเลือกใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองการ
 สะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่าง

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	ความเหมาะสม
การตกจาก แรงโน้มถ่วง	Cunningham factor $Cu(r) = 1 + Kn \left[1.142 + 0.588 \exp\left(\frac{-0.999}{Kn}\right) \right]$	เนื่องจากเป็นสมการจากรายงาน ของ State of The ART Report on Nuclear Aerosol ปี 2009 [10] ซึ่งได้สรุปการทดลองและ สมการต่างๆที่เกี่ยวกับการสะสม ตัวของ แอโรซอลจาก ปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งสมการนี้ ได้มาจากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก กว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) เมื่อมี การตกจากแรงโน้มถ่วง
	$Cu(r) = 1 + Kn \left[2.34 + 1.05 \exp\left(\frac{-0.39}{Kn}\right) \right]$	เนื่องจากเป็นสมการในหัวข้อเรื่อง Single Particle Dynamics [11] ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ของ สมการต่างๆจากการทดลองใน การเคลื่อนที่ของอนุภาคทุก ขนาด ซึ่งสมการนี้ได้จากการ ทดลองจากการตกของแรงโน้ม ถ่วงของอนุภาคทุกๆขนาดเพื่อ ศึกษาหาสหสัมพันธ์ของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมทุกขนาด ในบริเวณ Stoke (Stoke's region)

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	ความเหมาะสม
	<p data-bbox="475 353 659 387">ระยะอิสระเฉลี่ย</p> $\lambda = \frac{\mu_g}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_w}{3k_B T}}$	<p data-bbox="1026 409 1401 1014">เนื่องจากเป็นสมการที่ 21.42 ที่ได้จากทฤษฎีในหนังสือ Physics for Scientists and Engineers [12] โดยค่าระยะอิสระเฉลี่ยนี้พิสูจน์จากความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) การในสมการนี้เพื่อเป็นการลดปัญหาการหักล้างของทิศของความเร็วมี่ทั้งทิศขึ้นและลง ตามหลักการของฟิสิกส์</p>
การแพร่แบบบราวเนียน	<p data-bbox="475 1037 1281 1070">ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน</p> $v_{diff}(r) = 0.22 D_p(r)^{0.735}$	<p data-bbox="1026 1093 1401 1709">เนื่องจากเป็นสมการจากรายงานของ State of The ART Report on Nuclear Aerosol ปี 2009 [10] ซึ่งได้สรุปการทดลองและสมการต่างๆที่เกี่ยวกับการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งสมการนี้ได้มาจากการทดลองของการแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region)</p> <p data-bbox="1026 1731 1401 2000">เนื่องจากการแพร่แบบบราวเนียนที่ 8, 9 และ 10 จากงานวิจัยการสะสมตัวกรณีสองเฟส [13] ซึ่งสมการนี้ได้พิจารณากระบวนการ turbulent</p>

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	ความเหมาะสม
	 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY	<p>damping process โดยจะพิจารณาในส่วนของการสะสมตัวของแอโรซอลจากการเกิดเกรเดียนต์ของความเร็วของเฟสแก๊สและเฟสอนุภาคที่ต่างกัน โดยการสะสมตัวจาก กระบวนการ turbulent damping process มีเกิดขึ้นจริงในการสะสมตัวของแอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จริงโดยสมการนี้ได้จากการทดลองของการปล่อยอนุภาคขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อตรวจสอบการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณากระบวนการ turbulent damping process</p>
ดิฟฟิวซิโ- โพริซิส	<p>ความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโโพริซิส</p> $v_{diff}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right]$	<p>เนื่องจากเป็นสมการจากรายงานของ State of The ART Report on Nuclear Aerosol ปี 2009 [10] ซึ่งได้สรุปการทดลองและสมการต่างๆที่เกี่ยวกับการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งสมการนี้ได้จากการทดลองกรณีความเร็วของไอน้ำในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ</p>

ปรากฏการณ์	สมการหรือสหสัมพันธ์ที่ใช้	ความเหมาะสม
		มาก ที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow)
เทอร์โมโฟ- รีซิส	ความเร็วของการสะสมตัวจากเกรตเตียนต์ของอุณหภูมิต่ำ	
	$v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p)}{T_g (2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$	เนื่องจากเป็นสมการที่ 18 จากงานวิจัยปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส [16] โดยได้จากการทดลองแบบเดียวกันกับสมการในโปรแกรม ART Mod 2 โดยสมการนี้ได้ปรับให้ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number และลดปัญหาความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อระบบมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง
	$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_i Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}}\right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_i Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g$	เนื่องจากเป็นสมการที่ 17a จากงานวิจัยปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส [16] โดยได้จากการทดลองแบบเดียวกันกับสมการในโปรแกรม ART Mod 2 โดยสมการนี้ได้ปรับให้ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number โดยใช้ได้จากวิธี Monte-Carlo type numerical modeling ในการปรับปรุงสมการของ Brock และสมการของ Wildman ในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อให้สามารถใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number

3.4 การทดลองใช้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล

จากหลังจากได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้นำโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วมาใช้ทดลองใช้ในการทดลอง การทดลอง NSPP-502 และการทดลอง Phébus FPT1 โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองก่อนปรับปรุง และอภิปรายผล

นอกจากนี้ได้ทดลองนำโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วมาใช้เพื่อทดสอบเงื่อนไขอื่นที่กำหนดขึ้น ในกรณีเลือกการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ของงานวิจัย [2] ที่อ้างถึงในตอนแรก โดยนอกจากการใช้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วมาจำลอง ยังได้ปรับค่าข้อมูลขาเข้าของโครงสร้าง (geometry input) บางส่วนเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น



บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

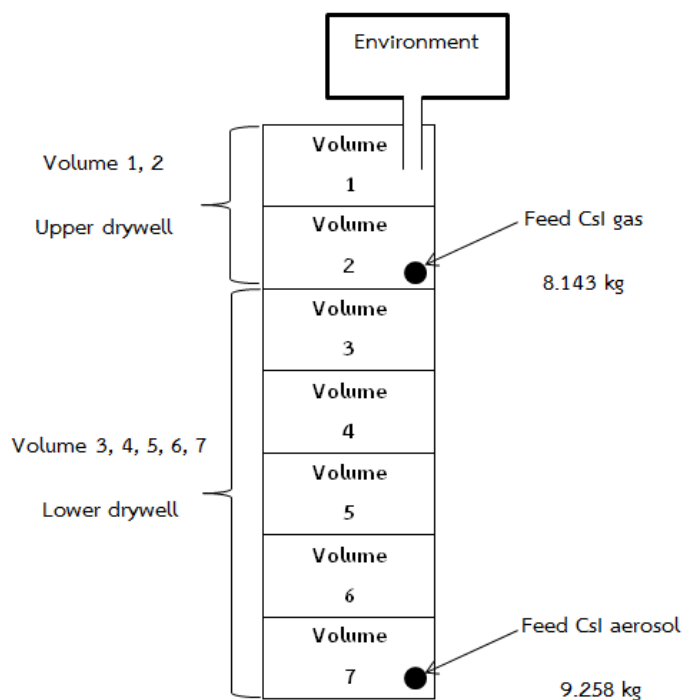
ผลและการอภิปรายผล จะอธิบายตั้งแต่ผลที่เริ่มการศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีซีเอ็มจากอุบัติเหตุร้ายแรง ผลที่ได้จากการเริ่มจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 เพื่อตรวจสอบปัญหาการสะสมตัวของแอรโซล ผลการปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยการใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ จนไปถึงผลการการใช้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วจำลองการทดลอง NSPP-502 การทดลอง Phébus FPT1 และเงื่อนไขอื่นที่กำหนดขึ้น ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาค้นคว้างานวิจัยของการสะสมตัวของสารประกอบซีซีเอ็มจากอุบัติเหตุร้ายแรง

จากศึกษาการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของสารประกอบซีซีเอ็มที่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 จากงานวิจัยในอดีต [2] ซึ่งตรวจสอบและเปรียบเทียบปริมาณแอรโซลของสารประกอบซีซีเอ็มที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมและที่สะสมตัวในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ที่คำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 กับเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรม MAAP [3] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณมาก่อนหน้าและผ่านการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) แล้ว โดยโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR จะถูกแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ lower drywell และ upper drywell ซึ่งภายนอกเป็นสิ่งแวดล้อม โดยโนดาไลเซชัน (nodalization) [8] แสดงดังในรูปที่ 23 ขนาดของโครงสร้างต่างๆ [8] และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) [8] ในตารางที่ 15 และ 16

โดยการจัดการอุบัติเหตุ เป็นการเติมน้ำจากภายนอกน้ำเข้าสู่ปริมาตร (volume) 7 ทางด้านล่างจนถึง 16.31 เมตร หรือปริมาตร (volume) 4 เพื่อเป็นการลดการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีจากการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 ที่ระยะเวลา 250,000 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม MAAP พบว่าปริมาณ แอรโซลของสารประกอบซีซีเอ็มที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เดียวกันปริมาณแอรโซลของสารประกอบซีซีเอ็มที่สะสมตัวในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ควรจะมีการสะสมตัวมากกว่านี้ ดังตารางที่ 17

จากปัญหาความไม่สอดคล้องดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเริ่มตรวจสอบการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 อีกครั้งด้วยการจำลองการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 23 แสดงโนดไลเซชัน (nodalization) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR [8]

ตารางที่ 15 แสดงขนาดโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR [8]

ปริมาตร	พื้นที่ [m ²]	ความสูง [m]	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก [m]	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน [m]
1	682.297	2.91	54.4558	45.7898
2	682.297	5.21	29.524	0.6311
3	89.033	5.707	10.6471	-
4	89.033	4.031	10.6471	-
5	86.827	5.047	15.253	11.05
6	92.745	2.415	10.867	-
7	84.886	8.8	10.396	-

ตารางที่ 16 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

ESBWR [8]

เงื่อนไขขอบเขต	Phébus FPT1
ความดัน [MPa]	1
อุณหภูมิผนัง [K]	800
อุณหภูมิแอรโรซอล [K]	800
สถานะแก๊สในอาคาร	ไอน้ำ และไนโตรเจน
สารต้นกำเนิด	ซีเซียมไอโอดด์
อัตราการไหล [g/s]	0.5
ระยะเวลา [s]	250,000

ตารางที่ 17 แสดงผลการคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอรโรซอลของสารประกอบซีเซียมด้วย

โปรแกรม ART Mod 2 เทียบกับโปรแกรม MAAP

แอรโรซอลใน lower drywell [%]	แอรโรซอลใน upper drywell [%]	แอรโรซอลในสิ่งแวดล้อม [%]
ผลหลังการจัดการอุบัติเหตุของโปรแกรม MAAP		
60	10	30
ผลหลังการจัดการอุบัติเหตุของโปรแกรม ART Mod 2		
53.20	5.52	41.27

4.2 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2

เนื่องจากโปรแกรม ART Mod 2 เป็นโปรแกรมที่ใช้แบบจำลองการสะสมตัวของแอรโรซอลพื้นฐานที่มีมานานมาก และผลการคำนวณมีค่าไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ผู้วิจัยจึงตัดสินใจคำนวณเปรียบเทียบกับกรทดลอง 2 การทดลอง คือ NSPP-502 และ Phébus FPT1 เพื่อตรวจสอบว่าโปรแกรม ART Mod 2 มีปัญหาหรือไม่ หรือเกิดจากปัญหาการกำหนดข้อมูลขาเข้า (input) ของเงื่อนไขขอบเขตและโครงสร้าง

4.2.1 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2

จากความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอโรซอลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้จำลองของการทดลอง NSPP-502 ของ Oak Ridge National Laboratory โดยสาเหตุที่เลือกการทดลองนี้มาเนื่องจากเป็นตัวอย่างการทดลองที่มาพร้อมกันกับคู่มือการใช้โปรแกรม ART Mod 2 [4] ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแอโรซอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่รั่วไหลมาจากการหลอมเหลวของแกนปฏิกรณ์ไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ รายละเอียดในบทที่ 2 ข้อ 2.4 และบทที่ 3 ข้อ 3.2.1

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม ART Mod 2 กับผลการทดลอง พบว่าการสะสมตัวของแอโรซอลของสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีการสะสมตัวที่พื้นมากเกินไปเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันก็มีการสะสมตัวที่ผนังน้อยเกินไปเล็กน้อยเช่นกัน ดังผลที่แสดงในตารางที่ 18 อย่างไรก็ตาม ในคู่มือการใช้โปรแกรม ART Mod 2 [4] ในการทดลองนี้ ผลการคำนวณที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ตารางที่ 18 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลเปรียบกับผลการทดลองของ NSPP-502

ข้อมูล	ชนิดแอโรซอล	การกระจายตัวของแอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [%]		
		บนพื้น	บนผนัง	อื่นๆ
ผลการทดลอง				
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	3	92	<1
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2				
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	17	81	<1

จากปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอโรซอลดังกล่าว จึงตรวจสอบปัญหาการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 อีกครั้งด้วยการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2

เนื่องจากการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 มีรายละเอียดหลายส่วน ซึ่งผู้วิจัยจึงเริ่มการจำลองอย่างง่ายก่อนและจึงปรับปรุงเงื่อนไขและโครงสร้างต่างๆของการจำลอง เพื่อให้ได้ผลการจำลองใกล้เคียงการทดลองจริงมากที่สุด โดย รายละเอียดในบทที่ 2 ข้อ 2.5 และบทที่ 3 ข้อ 3.2.2

4.2.2.1 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียว

จากปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอโรซอลจากการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง NSPP-502 จึงได้ทดลองจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ของการทดลอง Phébus FPT1 เพื่อเป็นการยืนยันปัญหาการสะสมตัวของแอโรซอลอีกครั้ง

การทดลอง Phébus FPT 1 [7] มีอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เมตร และมีคอนเดนเซอร์ 3 แห่งซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าไอน้ำและแก๊สภายในเพื่อลดความดันในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ผู้วิจัยเริ่มจำลองอย่างง่ายก่อนโดยสร้างเป็นปริมาตรเดียว มีแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) อยู่ด้านใน โดยผลที่ได้จากการจำลองของ Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียวในที่นี้ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของคอนเดนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองในตารางที่ 19 พบว่ามีการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) มากเกินไป ในขณะที่เดียวกัน มีการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) น้อยเกินไปมาก โดยผลจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสะสมตัวที่พื้นของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มากเกินไป และมีการสะสมตัวที่ผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่น้อยเกินไป เช่นเดียวกับการทดลอง NSPP-502 จากผลความไม่สอดคล้องที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงได้ตัดใจปรับปรุงข้อมูลขาเข้าของเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างบางอย่าง เพื่อให้ได้ผลการคำนวณใกล้เคียงผลการทดลองมากขึ้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 19 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลแบบปริมาตรเดียวเปรียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1

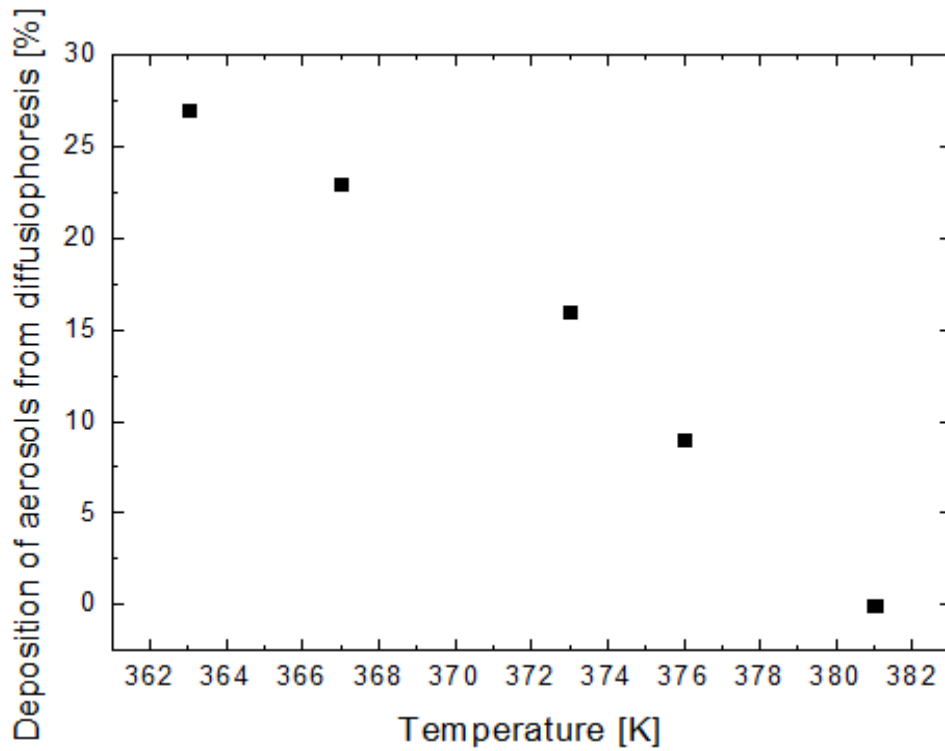
ข้อมูล	ชนิดแอโรซอล	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ [%]			
		การตกจากแรงโน้มถ่วง	การแพร่แบบบราวเนียน	ดิฟฟิวซิโอ-โพริซิส	เทอร์โม-โพริซิส
ผลการทดลอง					
Phébus FPT1	สารประกอบซีเซียม	72	2	26	น้อยมาก
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2					
Phébus FPT1	ซีเซียมไอโอไดด์	99	<0.01	0	0

4.2.2.2 ผลการจำลองผลกระทบจากของคอนเดนเซอร์ของการทดลอง Phébus FPT1

ผลที่ได้จากการจำลองของ Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียวในที่นี้ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของคอนเดนเซอร์ จึงทำให้ผลการสะสมตัวของแอโรซอลที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับการทดลองมากนัก ทั้งนี้ เนื่องจากการสะสมตัวของแอโรซอลบนผนังส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของคอนเดนเซอร์ จึงจำเป็นต้องจำลองคอนเดนเซอร์ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วย แต่โปรแกรม ART Mod 2 ไม่สามารถสร้างปริมาตรของคอนเดนเซอร์ภายในปริมาตรของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้ ดังนั้น เพื่อตรวจสอบผลการสะสมตัวของแอโรซอลให้แม่นยำมากขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาวิธีการจำลองผลกระทบจากการมีอยู่ของคอนเดนเซอร์ในแบบจำลองแบบปริมาตรเดียวด้วย ผู้วิจัยได้พิจารณาปรับเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอุณหภูมิของผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยสมมุติว่าการลดอุณหภูมิของผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เป็นตัวแทนของผลกระทบจากการมีอยู่ของคอนเดนเซอร์ ผู้วิจัยได้ปรับลดอุณหภูมิของผนังลงจาก 381 K (เท่าอุณหภูมิแก๊สหรือไอ) เป็น 376K 373 K 367 K และ 363 K (เท่าอุณหภูมิคอนเดนเซอร์) ตามลำดับ โดยใช้โนดัลไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) อื่นๆเหมือนเดิม

จากรูปที่ 24 ซึ่งแสดงผลการลดอุณหภูมิของผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในการจำลองคอนเดนเซอร์ พบว่าอุณหภูมิผนังที่ลดลงจะส่งผลให้การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโพริซิส (diffusiophoresis) เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิที่ผนังกับอุณหภูมิของไอน้ำหรือแก๊สภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เกิดเกรเดียนต์ที่

เปลี่ยนไปของความเข้มข้นของอนุภาคที่ไอน้ำและเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันย่อย ทำให้เกิดจาก
สะสมตัวมากขึ้นตามนิยามของปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis)



รูปที่ 24 แสดงผลการปรับอุณหภูมิของผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของ
Phébus FPT 1 ในการจำลองคอนเดนเซอร์

ตารางที่ 20 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลแบบปริมาตรเดียวเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการปรับปรุงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของ Phébus FPT 1

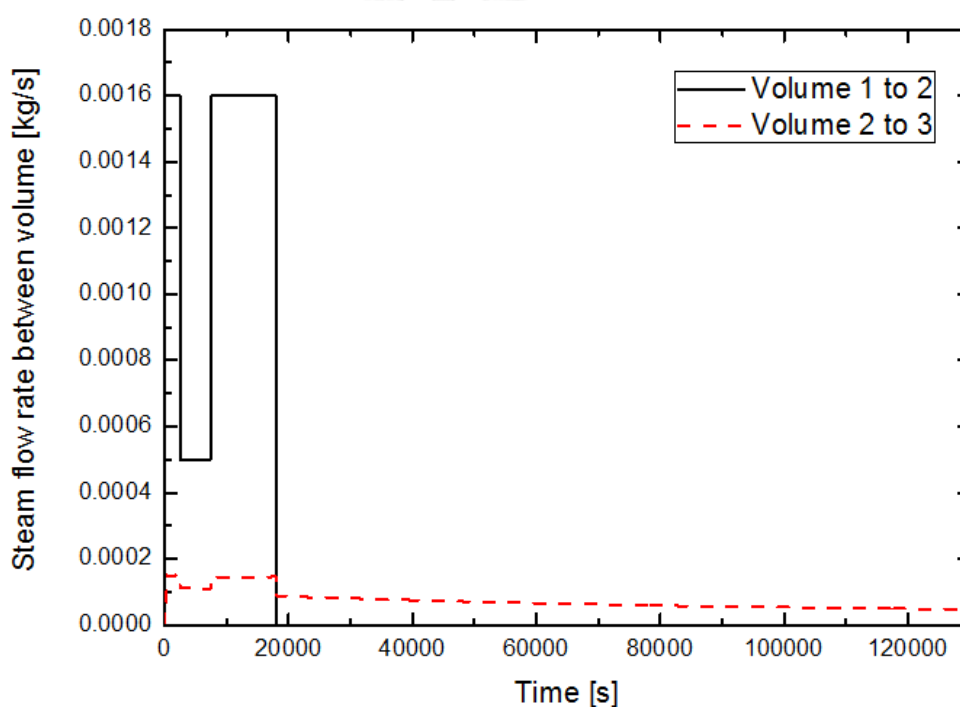
ข้อมูล	ชนิดแอโรซอล	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ [%]			
		การตกจากแรงโน้มถ่วง	การแพร่แบบบราวเนียน	ดิฟฟิวซิโอ-โพริซิส	เทอร์โม-โพริซิส
ผลการทดลอง					
Phébus FPT1	สารประกอบซีเซียม	72	2	26	น้อยมาก
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ก่อนเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขต					
Phébus FPT1 อุณหภูมิผนัง = 381K (สมมุติไม่มีคอนเดนเซอร์)	ซีเซียมไอโอไดด์	99	<0.01	0	0
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขต					
Phébus FPT1 อุณหภูมิผนัง = 363 K (สมมุติผนังเป็นคอนเดนเซอร์)	ซีเซียมไอโอไดด์	71	<0.01	27	<1

4.2.2.3 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร

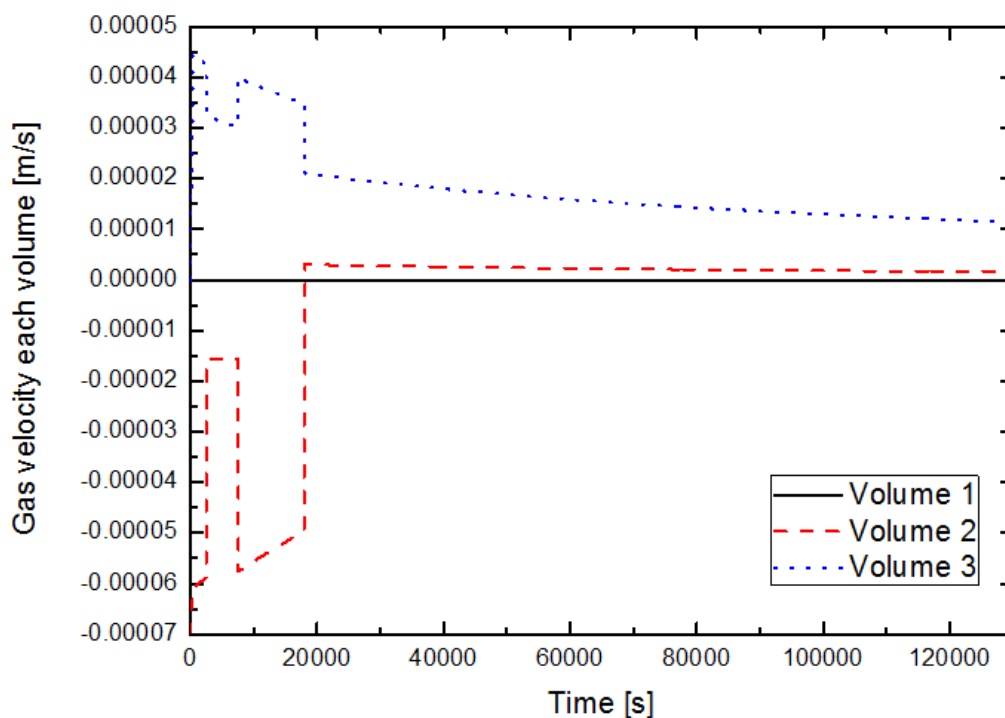
จากตารางที่ 20 จะเห็นได้ว่าการจำลองแบบปริมาตรเดียวนั้นไม่สามารถตรวจสอบผลการสะสมตัวของแอโรซอลได้ครบทุกกรณี เนื่องจากมีผลของอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ที่มีผลต่อปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโพริซิส (diffusiophoresis) จึงทำให้ต้องจำลองหลายครั้งเพื่อตรวจสอบปัญหาการสะสมตัวของแอโรซอล ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสร้างโนดัลไลเซชัน (nodalization) และปรับค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของการทดลอง Phébus FPT1 ใหม่โดยการสร้างปริมาตรขึ้นมาใหม่สามปริมาตร ปริมาตร (volume) ที่ 1 เป็นปริมาตรเล็ก มีขนาดโดยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปริมาตรเท่ากับที่ท่อที่ปล่อยแอโรซอลและไอน้ำเข้าอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 0.03 เมตร ปริมาตร (volume) ที่ 2 เป็นปริมาตรที่เท่าขนาดของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และ

ปริมาตร (volume) ที่ 3 เป็นปริมาตรที่มีความสูงเท่ากับคอนเดนเซอร์จริงประมาณ 1.6 เมตรและมีพื้นที่ผิวและอุณหภูมิเท่ากับคอนเดนเซอร์ทั้งสามแห่งรวมกัน โดยโนดไลเซชัน (nodalization) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของทั้งสามปริมาตรแสดงได้ในรูปที่ 12

ในการสร้างโนดไลเซชัน (nodalization) ของการทดลอง Phébus FPT1 โดยการสร้างปริมาตรขึ้นมาใหม่ของสามปริมาตร จำเป็นต้องใส่ข้อมูลขาเข้า (input) ของค่าอัตราการไหลระหว่างปริมาตรและความเร็วภายในปริมาตรของไอน้ำด้วย ซึ่งโปรแกรม ART Mod 2 ไม่สามารถคำนวณได้ ผู้วิจัยจึงคำนวณด้วยโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3 [24] และได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 25 และ 26 เมื่อได้ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ครบถ้วนแล้ว จึงจำลองของการสะสมตัวของ Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร โดยแสดงผลในตารางที่ 21



รูปที่ 25 แสดงอัตราการไหลระหว่างปริมาตรของการทดลอง Phébus FPT1 จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3



รูปที่ 26 แสดงความเร็วภายในปริมาตรของการทดลอง Phébus FPT1 จากโปรแกรม RELAP5 Mod 3.3

ตารางที่ 21 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลแบบสามปริมาตรเปรียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1

ข้อมูล	ชนิดแอโรซอล	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ต่างๆ [%]			
		การตกจากแรงโน้มถ่วง	การแพร่แบบบราวเนียน	ดิฟฟิวซิโอ-โพริซิส	เทอร์โม-โพริซิส
ผลการทดลอง					
Phébus FPT1	สารประกอบซีเซียม	72	2	26	น้อยมาก
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2					
Phébus FPT1	ซีเซียมไอโอดด์	78	<0.01	20	<1

จากตารางที่ 21 พบว่าการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) และดิฟฟิวซิโอโพริซิส (diffusiophoresis) มีผลที่เข้าใกล้การทดลองมากขึ้น แต่ปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ยังคงน้อยกว่าผลการทดลองมาก

จากการสังเกตพบมาก่อนและหลังการเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ผลการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นอกจากนี้ จากตารางที่ 21 ถึงแม้การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) และดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) จะใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น แต่ผลการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) ก็ยังคงมีค่ามากกว่าการทดลองและผลการสะสมตัวจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) ก็ยังคงพบว่ามีค่าน้อยกว่าการทดลอง

ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองจริงเกิดขึ้นจากปัญหาอื่นๆ นอกเหนือจากเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และโครงสร้างของแบบจำลองของ Phébus FPT1 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมุ่งประเด็นไปที่ปัญหาจากแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลจากปรับปรุงแบบจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 โดยใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ

สาเหตุที่ใช้การทดลอง Phébus FPT1 เป็นกรณีเปรียบเทียบ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้แสดงถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอล ได้แก่ การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ดิฟฟิวซิโอโฟริซิส (diffusiophoresis) และเทอร์โมโฟริซิส (Thermophoresis) ซึ่งการปรับปรุงแบบจำลองจากปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอลจะสำคัญมากในการนำไปใช้ในการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลจากการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ ได้ โดยการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล มีการเลือกแบบจำลอง หรือสมการ หลายรูปแบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลการคำนวณและเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด โดยผลการปรับปรุงแบบจำลองทั้งหมดได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อนี้ ดังนี้

4.3.1 การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling)

การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวจากการตกจากแรงโน้มถ่วง ด้วยการปรับปรุง สหสัมพันธ์ (correlation) ต่างๆที่ส่งผลต่อความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง หรือ $v_{gra}(r)$ หน่วย [cm/s] จากสมการที่ 3 [4] โดยในการปรับปรุงแบบจำลอง ผู้วิจัยได้เริ่มปรับปรุงในส่วนของสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ ก่อนเพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้นในการแก้ไขสหสัมพันธ์ (correlation)

$$v_{gra}(r) = \begin{cases} \frac{2r^2 g (\rho_p - \rho_g)}{9\mu_g} Cu(r) & ; Re < 1 \\ \frac{\mu_g Re}{2r\rho_p} & ; Re > 1 \end{cases} \quad (3)$$

โดยสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขของการทดลอง สมการที่ 4 ซึ่งเป็นสมการที่โปรแกรม ART Mod 2 ใช้ในคำนวณ เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ที่ได้จากการทดลองของการไถล (slip) ของอนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [4] ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงเฉื่อย (inertial force) น้อยกว่าแรงหนืด (viscous force) หรือช่วงที่ Reynolds number น้อยกว่า 1 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบ laminar

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.26 + 0.42 \exp\left(\frac{-0.87}{Kn}\right) \right] \quad (4)$$

ผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้สมการที่ 5 และสมการที่ 6 ในการปรับปรุงแบบจำลอง โดยสมการที่ 5 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [10]

$$Cu(r) = 1 + Kn \left[1.142 + 0.588 \exp\left(\frac{-0.999}{Kn}\right) \right] \quad (5)$$

และสมการที่ 6 เป็นสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor ได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมทุกขนาด ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) [11]

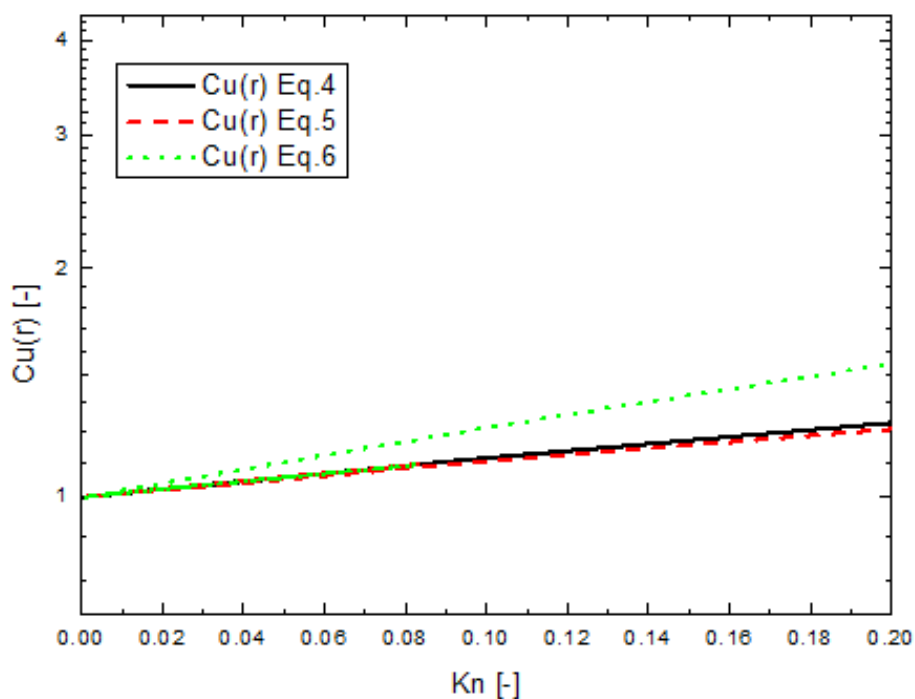
$$Cu(r) = 1 + Kn \left[2.34 + 1.05 \exp\left(\frac{-0.39}{Kn}\right) \right] \quad (6)$$

ผลการคำนวณโดยใช้สหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จากสมการที่ 4, 5 และ 6 เพื่อดูความแตกต่างของการแก้ไขแบบจำลองที่เกิดขึ้น แสดงในตารางที่ 22 พบว่าความแตกต่างของผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5 และ 6 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเดิมมีค่าต่างกันไม่ถึง 1 % ผู้วิจัยจึงสรุปว่าสามารถใช้แบบจำลองจากสมการใดก็ได้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เลือกสมการที่ 5 ในการปรับปรุงแบบจำลอง เนื่องจากเป็นสมการที่มีเงื่อนไขที่สอดคล้องกับการทดลองของ Phébus FPT1 ซึ่งได้จากการทดลองของการไถล (slip) อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) โดยอนุภาคในการทดลองของ Phébus FPT1 มีขนาดประมาณ 3-4 ไมครอน ซึ่งอยู่ในช่วงของการทดลองในสมการที่ 5

จากการทดสอบการปรับค่า Knudsen number หรือ Kn หน่วย [-] เพื่อตรวจสอบผลของ Cunningham factor ที่เปลี่ยนแปลงในรูปที่ 27 พบว่าในช่วงที่ Knudsen number ที่น้อยกว่า 0.02 จะมีค่า Cunningham factor ที่ใกล้เคียงกันมาก จึงเป็นสาเหตุในการคำนวณมวลของแอโรซอลที่สะสมตัวที่พื้นในตารางที่ 22 ต่างกันน้อยมาก และเมื่อผู้วิจัยได้ปรับค่า Knudsen number ให้มากกว่า 0.02 พบว่าจะมีค่า Cunningham factor ที่ต่างกันมากขึ้นซึ่งมีโอกาสส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลของแอโรซอลที่สะสมตัวที่พื้นได้

ตารางที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor

แบบจำลอง	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ตกจากแรงโน้มถ่วง [g]	ความแตกต่างเทียบก่อนแก้ไขแบบจำลอง [%]
ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง		
Cunningham factor Eq.4	7.020	-
หลังปรับปรุงแบบจำลอง		
Cunningham factor Eq.5	7.018	-0.02
Cunningham factor Eq.6	7.034	0.19



รูปที่ 27 แสดงผลการปรับค่า Knudsen number เพื่อตรวจสอบ Cunningham factor

นอกจากนี้ในสหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor จะเป็นฟังก์ชันของค่า Knudsen number โดยค่า Knudsen number คำนวณได้จากระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) หรือ λ หน่วย [cm] และรัศมีของแอโรซอลดังสมการที่ 7 [4]

$$\text{Kn} = \frac{2\lambda}{r} \quad (7)$$

โดยในการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ในโปรแกรม ART Mod 2 คำนวณมาจากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส (mean velocity of gas) [4] ดังสมการที่ 8 เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าได้พบว่าการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) สามารถคำนวณได้อีกวิธีหนึ่งคือการคำนวณโดยใช้ความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ย ของแก๊ส (root mean square velocity of gas) [12] ดังสมการที่ 9 จึงใช้สมการที่ 9 ทดลองในการปรับปรุงโมเดล

$$\lambda = \frac{k_B T}{4\pi a^2 \sqrt{2P_t}} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\mu_g}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_w}{3k_B T}} \quad (9)$$

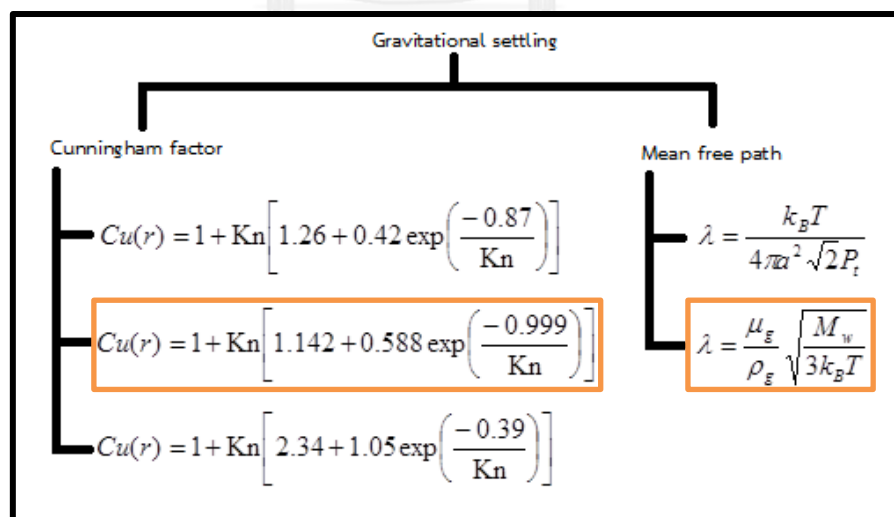
ตารางที่ 21 แสดงผลการเปรียบเทียบผลต่างจากการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) จากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊ส (mean velocity of gas) และความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) พบว่าแบบจำลองของระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) จากสมการที่ 9 ที่ใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองลดการสะสมตัวของแอโรซอลจากการตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) เพียง 0.56 % ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมาก ดังนั้นสามารถใช้สมการใดก็ได้ในการคำนวณ แต่ในกรณีนี้เลือกใช้สมการที่ 9 เนื่องจากความเร็วของแก๊สมิติศทางหลายทิศทางมีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งการใช้ค่าความเร็วรากกำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) ในการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) จะลดปัญหาการหักล้างกันของค่าความเร็วของแก๊สซึ่งทำให้ค่าความเร็วลดลง [25] เพื่อให้ได้ค่าความเร็วของแก๊สที่เป็นบวกทั้งหมดซึ่ง จะสามารถคำนวณผลกระทบจากการสะสมตัวของแก๊สในทุกทิศทางได้ โดยในการทดลองของ Phébus FPT1 ความเร็วของแก๊สภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีทั้งทิศขึ้นและทิศลงดังนั้นการใช้แบบจำลองระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ที่คำนวณมาจากค่าความเร็วราก

กำลังสองเฉลี่ยของแก๊ส (root mean square velocity of gas) จะสามารถช่วยลดคลาดเคลื่อนจากการคำนวณได้

ตารางที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path)

แบบจำลอง	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ตกลูกจากแรงโน้มถ่วง [g]	ความแตกต่างเทียบกับก่อนแก้ไขแบบจำลอง [%]
ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง		
ระยะอิสระเฉลี่ย Eq.8	7.06	-
หลังปรับปรุงแบบจำลอง		
ระยะอิสระเฉลี่ย Eq.9	7.02	-0.56

รูปที่ 28 แสดงแบบจำลองทั้งหมด และแบบจำลองที่เลือกใช้ในการจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกลูกจากแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 28 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การตกลูกจากแรงโน้มถ่วง

4.3.2 การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน ด้วยการเลือกใช้สมการต่างๆ ที่คำนวณความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน หรือ $v_{diff}(r)$ หน่วย [cm/s] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้หลายสมการในการเปรียบเทียบผลการคำนวณ

โดยปกติในโปรแกรม ART Mod 2 ได้ใช้สมการในรู้อย่างง่ายจากกฎของ Fick's law เพื่อคำนวณความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน หรือ $v_{diff}(r)$ หน่วย [cm/s] ดังแสดงในสมการที่ 10 โดยค่าคงที่ต่างๆถูกคำนวณมาจากการทดลองของการเคลื่อนที่ของการแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคขนาดเล็ก [4]

$$v_{diff}(r) = 2.17D_p(r)^{0.79} \quad (10)$$

เมื่อ $D_p(r)$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของแอโรซอล หน่วย [cm²/s]

หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้ปรับปรุงแบบจำลองโดยการใช้สมการจากการทดลองของ Van der Vate [10] ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน ในบริเวณ Stoke (Stoke's region) โดยสมการยังคงในรู้อย่างง่ายจากกฎของ Fick's law แต่ค่าคงที่ที่เปลี่ยนไปจากเดิมในสมการที่ 12

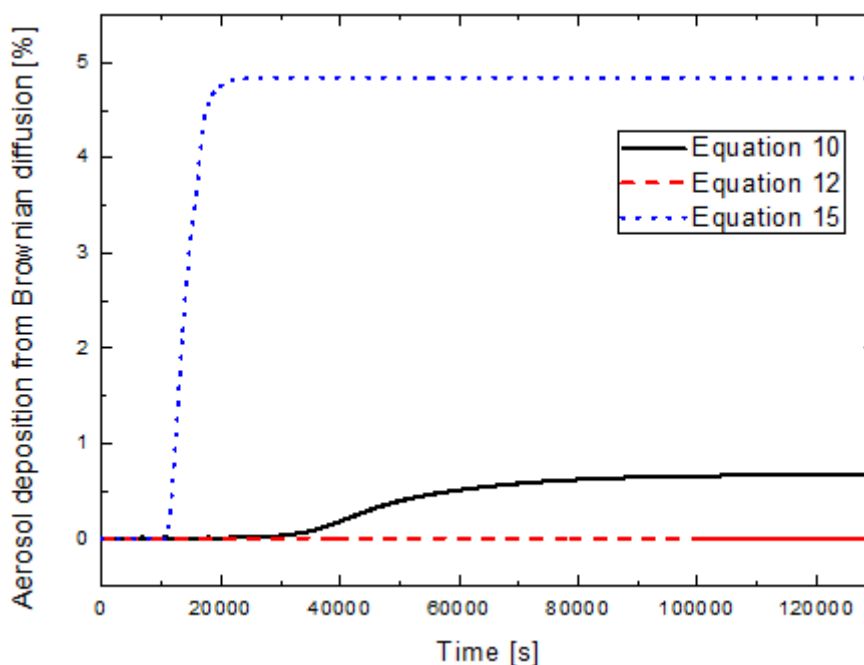
$$v_{diff}(r) = 0.22D_p(r)^{0.735} \quad (12)$$

งานวิจัยของการทดลอง Phébus FPT1 [13] ได้กล่าวไว้ว่ากระบวนการ Turbulent damping process ส่งผลต่อการสะสมตัวที่ผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อย่างมาก ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงแบบจำลองโดยทดลองใช้แบบจำลองการแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณาผลกระทบจากกระบวนการ Turbulent damping process ในสมการที่ 15 ซึ่งเป็นการทดลองการปล่อยอนุภาคขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อตรวจสอบ

ความเร็วจากการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนที่พิจารณากระบวนการ Turbulent damping process [13]

$$v_{diff} = \begin{cases} 0.0899 Sc^{-0.704} u_\tau & ; \tau^+ < 0.2 \\ 3.25 \times 10^{-4} \tau^{+2} u_\tau & ; 0.2 < \tau^+ < 22.9 \\ 0.17 u_\tau & ; \tau^+ > 22.9 \end{cases} \quad (15)$$

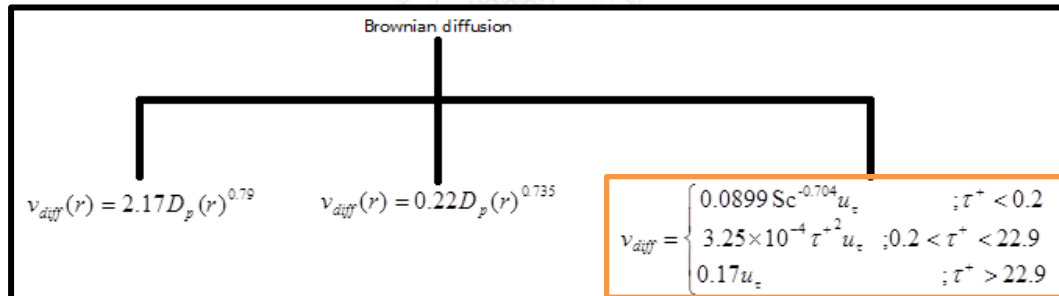
จากการปรับปรุงแบบจำลอง การสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนทั้งสามสมการ ผลความแตกต่างที่ได้แสดงในรูปที่ 29 พบว่าเมื่อใช้สมการที่ 12 ไม่มีการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สมการที่ 14 ที่มีการพิจารณาถึงกระบวนการ turbulent Damping Process พบว่ามีการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน ซึ่งการพิจารณาถึงกระบวนการ turbulent Damping Process คือการพิจารณาการเกิดเกรเดียนต์ของความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างเฟสของแก๊สและแอโรซอล ซึ่งทำให้ค่าการสะสมตัวของแอโรซอลที่คำนวณได้อยู่ในระดับ (order) เดียวกันกับการทดลอง



รูปที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน

ผู้วิจัยเลือกใช้สมการที่ 15 ในการจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ส่งผลต่อการการเพิ่มขึ้นของการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนอย่างเด่นชัด นอกจากนี้จากงานวิจัยในอดีต [9] พบว่าจากข้อมูลการทดลอง Phébus FPT1 การสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน จะได้รับผลกระทบจากกระบวนการ turbulent Damping Process โดยสมการที่ 15 มีเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่มาจากการทดลองการปล่อยแอโรซอลขนาด 2-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 0.00062-0.005 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที [13] ซึ่งสอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของการทดลอง Phébus FPT1 ที่อยู่ในช่วงของการทดลองของกระบวนการ turbulent Damping Process คือทดลองการปล่อยแอโรซอลขนาด 3-4 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 0.002 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

รูปที่ 30 แสดงแบบจำลองทั้งหมด และแบบจำลองที่เลือกใช้ในการจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน



รูปที่ 30 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน

4.3.3 ดิฟฟิวซิโอโพริซิส (Diffusiophoresis)

การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโพริซิส ด้วยการเลือกใช้สมการต่างๆ ที่คำนวณความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอโพริซิส หรือ $v_{diffph}(r)$ หน่วย [cm/s] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้หลายสมการในการเปรียบเทียบผลกรคำนวณ

โดยในโปรแกรม ART Mod 2 ได้ใช้สมการที่ 20 ในการคำนวณการคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิส อย่างง่ายคือพิจารณาถึงผลของความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) [4] รวมในสมการเดียวกันในสมการที่ 20

$$v_{diffph}(r) = \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c \quad (20)$$

ถัดมาผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงแบบจำลองโดยการทดลองใช้แบบจำลองของสมการที่ 21 ในกรณีที่มีความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) มีผลมากกว่า ซึ่งแยกคิดผลจากความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) ออกจากกัน นอกจากนี้ยังได้พิจารณาในส่วนของรูปร่างของแอโรซอลในพจน์ของ dynamic sharp factor หรือ χ และการไถล (slip) ในพจน์ของ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ [10]

$$v_{diffph}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_s}}{\gamma_s \sqrt{m_s} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right] \quad (21)$$

โดยจากการทดลองความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิส จากสมการที่ 20 และ 21 คำนวณเพื่อดูความค่าของผลแตกต่างของการแก้ไขแบบจำลองที่เกิดขึ้นในตารางที่ 24 จากผลการคำนวณพบว่า การปรับปรุงการสะสมตัวโดยใช้สมการที่ 21 พบว่าเพิ่มการสะสมตัวของแอโรซอลถึง 3 %

โดยกรณีนี้ผู้วิจัยได้เลือกสมการที่ 21 ในการปรับปรุงแบบจำลองเนื่องจากผลการคำนวณที่ได้เพิ่มการเกิดการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิส ซึ่งก่อนการปรับปรุงแบบจำลองมีค่าน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับผลการทดลอง และนอกจากนี้ยังเป็นสมการที่มีแยกคิดผลจากความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) ออกจากกันซึ่งจากงานวิจัย [9] ก่อนหน้าพบว่าในการทดลองของ Phébus FPT1 ปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟรีซิสเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากเกิดการควบแน่นเป็นหลักเนื่องจากมีไอน้ำปริมาณมาก ทำให้ความเร็วของ

ไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) มีผลมากกว่า จึงควรพิจารณาผลจากความเร็วของไอน้ำที่เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่าและเกิดการควบแน่น (Stephan flow) และผลจากการส่งผ่านของโมเมนตัมของแก๊ส (gas momentum transfer) ออกจากกัน นอกจากนี้ในสมการที่ 21 ยังได้พิจารณาในส่วนของรูปร่างของแอโรซอลในพจน์ของ Dynamic sharp factor หรือ χ และการไถล (slip) ในพจน์ของ Cunningham factor หรือ $Cu(r)$ [10] เพิ่มเติมอีกด้วยซึ่งทำให้แบบจำลองที่ใช้ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น

ตารางที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส

แบบจำลอง	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส [g]	ความแตกต่างเทียบก่อนแก้ไขแบบจำลอง [%]
ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง		
ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส Eq.20	2.46	-
หลังปรับปรุงแบบจำลอง		
ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส Eq.21	2.54	3.2

รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองทั้งหมด และแบบจำลองที่เลือกใช้ในการจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส

Diffusiophoresis

$$v_{diff}(r) = \frac{\sqrt{m_z}}{\gamma_z \sqrt{m_z} + \gamma_a \sqrt{m_a}} U_c$$

$$v_{diff}(r) = \left[U_c + \frac{Cu(r)}{\chi} \frac{\sqrt{m_z}}{\gamma_z \sqrt{m_z} + \gamma_a \sqrt{m_a}} \gamma_a U_c \right]$$

รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส

4.3.4 เทอร์โมโฟรีซิส (thermophoresis)

การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส ด้วยการเลือกใช้สมการต่างๆที่คำนวณความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิสในส่วนของความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊ส หรือ $v_T(r)$ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้หลายสมการในการเปรียบเทียบผลการคำนวณ

ในการปรับปรุงแบบจำลองจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส ในโปรแกรม ART Mod 2 ได้ใช้สมการในการคำนวณความเร็วของแอโรซอลที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิสในส่วนของความเร็วของการสะสมตัวจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของผนังและแก๊ส หรือ $v_T(r)$ ในสมการที่ 26 ซึ่งเป็นสมการของ Brock (Brock model) และ Wildman (Wildman model) [4]

$$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{2T_g(1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_g}{4\left(1 + \frac{\pi}{8}\alpha_m\right)T} \nabla T_g \exp\left(\frac{-(0.09 + 0.12\alpha_m)\left(1 - \alpha_t \frac{\lambda_g}{2\lambda_p}\right)}{Kn}\right) & ; Kn > 0.2 \end{cases} \quad (26)$$

ถัดมาผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการจากการทดลองของ Derjaguin [16] ในสมการที่ 27 ปรับปรุงแบบจำลอง ซึ่ง Derjaguin ได้พิสูจน์ว่าสมการของ Brock ใช้ได้ดีในช่วงที่ค่า Knudsen number ต่ำ แต่เมื่อค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง การคำนวณจากสมการของ Brock มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้น Derjaguin จึงได้เสนอสมการในการคำนวณที่ใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number

$$v_T(r) = \frac{2.2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p)}{T_g(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (27)$$

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองใช้สมการที่ 28 ในการปรับปรุงแบบจำลอง ซึ่งได้จากการใช้วิธี Monte-Carlo type numerical modeling [16] ในการปรับปรุงแบบจำลองของ Brock และ

สมการของ Wildman เพื่อหาค่าของความเร็วการสะสมตัวและสร้างสมการที่สามารถใช้ได้กับทุกช่วงของ Knudsen number

$$v_T(r) = \frac{2v_g Cu(r)(\lambda_g + C_t Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{(4 + \frac{\pi}{2})} \right)}{T_g (1 + 3C_m Kn(r))(2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_g \quad (28)$$

จากในการทดลองของ Phébus FPT1 จะเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมโพริซิสมันเป็นปรากฏการณ์ที่จะเกิดพร้อมกับปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟริซิสมัน เมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิขึ้นระหว่างไอหรือแก๊สกับผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [9] ซึ่งในการทดลองจะเกิดปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอฟริซิสมันเป็นหลัก เนื่องจากมีปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจำนวนมากซึ่งแอโรซอลส่วนใหญ่ จะเกิดการสะสมตัวจากปรากฏการณ์นี้ ทำให้มีแอโรซอลที่เกิดจากการสะสมตัวจากปรากฏการณ์เทอร์โมโพริซิสมันน้อยมากหรืออาจไม่เกิดขึ้นเลย

จากตารางที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโพริซิสมัน พบว่าผลจากการคำนวณในสมการที่ 27 มีผลการสะสมตัวที่ได้มีค่ามากขึ้นถึงเท่าตัว ส่วนผลจากการคำนวณในสมการที่ 28 พบว่าผลการสะสมตัวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 35 % ซึ่งจากผลของทั้งสองสมการพบว่ามวลของแอโรซอลที่คำนวณได้มีค่าไม่เกิน 1% ของแอโรซอลทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการใดก็ได้ในการปรับปรุงแบบจำลองเพราะในการทดลองของ Phébus FPT1 การสะสมตัวจากปรากฏการณ์เทอร์โมโพริซิสมันน้อยมากหรืออาจไม่เกิดขึ้นเลย

ในกรณีนี้ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกสมการที่ 28 เป็นสมการที่ถูกประมาณโดยวิธี Monte-Carlo type numerical modeling [16] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อนน้อยการแบบจำลองที่ได้จากการประมาณจากการทดลอง และในปัจจุบันแบบจำลองนี้ได้ถูกใช้ในงานวิจัยทั่วไป [26], [27]

ตารางที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของ
แอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส

แบบจำลอง	การสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส [g]	ความแตกต่างเทียบก่อนแก้ไขแบบจำลอง [%]
ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง		
เทอร์โมโฟรีซิส Eq.21	0.0348	-
หลังปรับปรุงแบบจำลอง		
เทอร์โมโฟรีซิส Eq.22	0.0713	104.8
เทอร์โมโฟรีซิส Eq.23	0.0472	35.6

รูปที่ 32 แสดงแบบจำลองทั้งหมด และแบบจำลองที่เลือกใช้ในการจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส

Thermophoresis

$$v_T(r) = \begin{cases} \frac{3v_\varepsilon Cu(r)(\lambda_\varepsilon + C_t Kn(r)\lambda_p)}{2T_\varepsilon(1+3C_m Kn(r))(2\lambda_\varepsilon + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_\varepsilon & ; Kn < 0.2 \\ \frac{3v_\varepsilon}{4\left(1 + \frac{\pi}{8}\alpha_m\right)T} \nabla T_\varepsilon \exp\left(\frac{-(0.09 + 0.12\alpha_m)\left(1 - \alpha_t \frac{\lambda_\varepsilon}{2\lambda_p}\right)}{Kn}\right) & ; Kn > 0.2 \end{cases}$$

$$v_T(r) = \frac{2.2v_\varepsilon Cu(r)(\lambda_\varepsilon + C_t Kn(r)\lambda_p)}{T_\varepsilon(2\lambda_\varepsilon + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_\varepsilon$$

$$v_T(r) = \frac{2v_\varepsilon Cu(r)(\lambda_\varepsilon + C_t Kn(r)\lambda_p) \left(1 + \frac{9Kn}{4 + \frac{\pi}{2}}\right)}{T_\varepsilon(1+3C_m Kn(r))(2\lambda_\varepsilon + \lambda_p + 2C_t Kn(r)\lambda_p)} \nabla T_\varepsilon$$

รูปที่ 32 แสดงแบบจำลองที่เลือกใช้หลังปรับปรุงแบบจำลองของการสะสมตัวของแอโรซอลจากปรากฏการณ์เทอร์โมโฟรีซิส

4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล

หลังจากได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้นำโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วมาใช้ทดลองใช้กับการทดลอง NSPP-502 การทดลอง Phébus FPT1 และการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ของงานวิจัย [2] โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองก่อนปรับปรุง และอภิปรายผล ดังนี้

4.4.1 ผลการจำลองการทดลอง NSPP-502 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล

จากตารางที่ 26 ซึ่งแสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลเปรียบกับผลการทดลองของ NSPP-502 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล พบว่าหลังจากที่ได้ปรับปรุงแบบจำลอง มีการสะสมตัวของแอโรซอลที่ผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ในทางกลับกันมีการลดลงของการสะสมตัวของแอโรซอลที่พื้นของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าผลที่ได้ยังคงมีค่าที่แตกต่างกับผลการทดลอง แต่แนวโน้มของผลหลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลมีทิศทางที่สอดคล้องกับความจริงมากขึ้น

ตารางที่ 26 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลเปรียบกับผลการทดลองของ NSPP-502 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล

ข้อมูล	ชนิดแอโรซอล	การกระจายตัวของแอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [%]		
		บนพื้น	บนผนัง	อื่นๆ
ผลการทดลอง				
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	3	92	<1
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง				
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	17	81	<1
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลอง				
NSPP-502	เหล็กออกไซด์	12	86	<1

4.4.2 ผลการจำลองการทดลอง Phébus FPT 1 ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล

จากตารางที่ 27 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบสามปริมาตรเปรียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล พบว่าปรากฏการณ์ตกรังแรงโน้มถ่วง และปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอโพริซิส มีผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าผลการทดลองถึงสองเท่า เกิดจากข้อจำกัดของโปรแกรม ART Mod 2 ในการสร้างโนดัลไลเซชัน (nodalization) ในรูปที่ 17 ซึ่งปริมาตร (volume) ที่ 1 ได้ปล่อยสารกัมมันตรังสีและไอน้ำ ผ่านบริเวณผนังของปริมาตร (volume) ที่ 2 ที่จำลองเป็นส่วนผนังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้มีโอกาสเกิดการสะสมตัวจากปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนก่อนที่จะเกิดการสะสมตัวที่ปริมาตร (volume) ที่ 3 ที่จำลองเป็นคอนเดนเซอร์ โดยในการทดลองของ Phébus FPT 1 [22] จะมีการหมุนเวียนของการปล่อยสารกัมมันตรังสีและไอน้ำในทุกทิศทำให้ผลที่ได้ต่างจากการคำนวณ

ตารางที่ 27 แสดงผลการคำนวณการสะสมตัวของแอรโซลแบบสามปริมาตรเปรียบกับผลการทดลองของ Phébus FPT 1 ก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล

ข้อมูล	ชนิดแอรโซล	การสะสมตัวของแอรโซลจากปรากฏการณ์ต่างๆ [%]			
		การตกรังแรงโน้มถ่วง	การแพร่แบบบราวเนียน	ดีฟิวซิโอ-โพริซิส	เทอร์โม-โพริซิส
ผลการทดลอง					
Phébus FPT1	สารประกอบซีเซียม	72	2	26	น้อยมาก
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ก่อนปรับปรุงแบบจำลอง					
Phébus FPT1	ซีเซียมไอโอไดด์	78	<0.01	20	<1
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลอง					
Phébus FPT1	ซีเซียมไอโอไดด์	75	4	20	<1

4.4.3 ผลการจำลองการทดลองการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ด้วยโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซล

หลังจากได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอรโซลในโปรแกรม ART Mod 2 แล้ว จึงได้นำโปรแกรมที่ปรับปรุงแล้วมาใช้ในการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ของงานวิจัย [2] และเปรียบเทียบผลที่ได้ เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบปริมาณแอรโซลของสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมและที่สะสมตัวในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ที่คำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 กับงานวิจัยอื่นๆ ในกรณีนี้ใช้ผลการคำนวณจากโปรแกรม MAAP [3] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณมาก่อนหน้าที่ผ่านการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) แล้ว โดยโนดัลไลเซชัน (nodalization) แสดงดังในรูปที่ 23 ขนาดของโครงสร้างต่างๆและเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในตารางที่ 15 และ 16 โดยการจัดการอุบัติเหตุ เป็นการเติมน้ำจากภายนอกน้ำเข้าสู่ปริมาตร (volume) ที่ 7 ทางด้านล่างจนถึง 16.31 เมตร หรือปริมาตร (volume) ที่ 4 เพื่อเป็นการลดการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี จากการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 ที่ระยะเวลา 250,000 วินาที

ก่อนที่จะทดสอบการจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้ว จากการตรวจสอบโนดัลไลเซชัน (nodalization) รูปที่ 23 พบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างปริมาตร (volume) ที่ 2 และ 3 เป็นบริเวณที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันซึ่งปริมาตร (volume) ที่ 2 ทางด้านบนจะใหญ่กว่าปริมาตร (volume) ที่ 3 ทางด้านล่าง ทำให้มีบริเวณที่เป็นพื้นที่ระหว่างรอยต่อนี้เพิ่มขึ้นมาจากงานวิจัยในอดีต [2] ไม่ได้พิจารณาผลจากพื้นที่ระหว่างรอยต่อนี้ซึ่งเป็นบริเวณที่จะมีผลต่อการสะสมตัวของแอรโซล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาการปรับโครงสร้างในส่วนนี้ด้วย

หลังจากทดลองจำลองการจัดการอุบัติเหตุของ ESBWR ทั้งก่อนและหลังการปรับโครงสร้างที่แสดงในตารางที่ 28 พบว่าผลของการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี ไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งก่อนและหลังการปรับโครงสร้างไม่ต่างจากเดิมมากนัก เพราะว่าเมื่อมีการจัดการอุบัติเหตุโดยการเติมน้ำจนถึงปริมาตร (volume) ที่ 4 สารกัมมันตรังสี ก็ยังคงสะสมที่บริเวณปริมาตร (volume) ที่ 1 ถึง 3 เนื่องจากสารกัมมันตรังสีทั้งในรูปของแก๊สและแอรโซลที่มีอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนที่มาสะสมตัวในน้ำซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งในกรณีนี้ผู้วิจัยได้เลือกโครงสร้างที่ปรับเปลี่ยนให้ใกล้เคียงกับอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จริงในการจำลองต่อ

ตารางที่ 28 แสดงผลจากคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR

แอโรซอลใน lower drywell [%]	แอโรซอลใน upper drywell [%]	แอโรซอลในสิ่งแวดล้อม [%]
ผลการจัดการอุบัติเหตุก่อนปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 ก่อนปรับโครงสร้าง		
53.20	5.52	41.27
ผลการจัดการอุบัติเหตุก่อนปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 หลังปรับโครงสร้าง		
53.20	5.52	41.27

ถัดมาหลังจากได้โครงสร้างที่ปรับเปลี่ยนให้ใกล้เคียงกับอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จริง จึงนำทดสอบการจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้ว โดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 29 พบว่าหลังการปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 พบว่ามีการลดลงของสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยสารกัมมันตรังสีเคลื่อนที่มาสะสมที่บริเวณผนัง upper drywell ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR มากขึ้น ซึ่งพบว่าเป็นผลมาจากสะสมตัวปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน ส่งผลในการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีที่ได้ลดน้อยลงใกล้เคียงกับการจำลองจากโปรแกรม MAAP มากขึ้น

ตารางที่ 29 แสดงผลจากคำนวณปริมาณการรั่วไหลของแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโปรแกรมเทียบกับโปรแกรม MAAP

แอโรซอลใน lower drywell [%]	แอโรซอลใน upper drywell [%]	แอโรซอลในสิ่งแวดล้อม [%]
ผลการจัดการอุบัติเหตุของโปรแกรม MAAP		
60	10	30
ผลการจัดการอุบัติเหตุก่อนปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2		
53.20	5.52	41.27
ผลการจัดการอุบัติเหตุหลังปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2		
53.20	10.88	35.91

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้ประกอบด้วยบทสรุปผลจากงานวิจัยการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 และข้อเสนอแนะต่างๆที่จะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยงานนี้ในอนาคต

5.1 สรุปผลจากงานวิจัย

จากการศึกษาของงานวิจัยการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR พบว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม ART Mod 2 มีปริมาณแอโรซอลของสารประกอบซีเซียมที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MAAP อย่างมีนัยสำคัญ จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงตรวจสอบการคำนวณของโปรแกรม ART Mod 2 โดยนำมาคำนวณการเคลื่อนที่และการสะสมตัวของแอโรซอลของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 ด้วยการจำลองแบบปริมาตรเดียวซึ่งเป็นการจำลองอย่างง่าย พบว่าการสะสมตัวของแอโรซอลบนผนังน้อยกว่าผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แต่เนื่องจากการทดลอง Phébus FPT1 มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ผู้วิจัยจึงปรับปรุงการจำลองโดยคำนวณการสะสมตัวของแอโรซอลด้วยใช้แบบจำลองแบบสามปริมาตร ก็ยังพบว่าผลการคำนวณยังมีผลไม่สอดคล้องกับการทดลองอยู่

จากปัญหาความไม่สอดคล้องของการสะสมตัวของแอโรซอลในการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 กับผลจากการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 ผู้วิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 จึงได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวจากปรากฏการณ์ต่างๆที่มีผลต่อการสะสมตัวของแอโรซอล ได้แก่ สหสัมพันธ์ (correlation) ของ Cunningham factor และ ระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดปรากฏการณ์การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) และสมการความเร็วการสะสมตัวของแอโรซอลของปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian Diffusion) ปรากฏการณ์ดิฟฟิวซิโอฟรีซิส (diffusiophoresis) และปรากฏการณ์เทอร์โมฟรีซิส (thermophoresis)

หลังจากได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้นำโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้วมาจำลองการทดลอง NSPP-502 การทดลอง Phébus FPT1 และการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้น โดยเริ่มจากในส่วนของ

การทดลอง NSPP-502 พบว่าหลังจากที่ได้ปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล มีการสะสมตัวของแอโรซอลที่ผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ในทางกลับกันยังลดการสะสมตัวของแอโรซอลที่พื้นของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าผลที่ได้ยังคงมีค่าต่างกับผลการทดลองอยู่ แต่แนวโน้มของผลหลังปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลนั้นมีทิศทางที่สอดคล้องกับความจริงมากขึ้น

สำหรับการทดลองของ Phébus FPT 1 หลังจากการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอล พบว่าปรากฏการณ์ตกรังสีจากแรงโน้มถ่วง และปรากฏการณ์ดีฟิวซิโอพีริซิส มีผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น ในส่วนของปรากฏการณ์การแพร่แบบบราวเนียนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนมากกว่าผลการทดลองถึงสองเท่า ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากผลของโครงสร้างของแบบจำลอง Phébus FPT 1 ที่บริเวณปริมาตรที่ปล่อยสารกัมมันตรังสี ทำให้อิออน้ำมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าหาผนังของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้มากกว่าได้มากกว่าในการทดลองจริง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม ART Mod 2 ที่ไม่สามารถสร้างท่อจากภายนอกเพื่อปล่อยสารกัมมันตรังสีและไอน้ำจากด้านในได้

สำหรับการจัดการอุบัติเหตุของเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR ซึ่งเป็นการจัดการการอุบัติเหตุด้วยการเติมน้ำจากภายนอกเพื่อลดการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี ผู้วิจัยได้ปรับปรุงโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จริงก่อน แล้วจึงนำไปจำลองด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงแล้ว พบว่ามีการลดลงของสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยสารกัมมันตรังสีเคลื่อนที่มาสะสมตัวอยู่ที่บริเวณผนัง upper drywell ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ESBWR มากขึ้นจากสะสมตัวปรากฏการณ์การแพร่ของบราวเนียน ส่งผลให้การรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีที่ไดลดน้อยลง และมีค่าใกล้เคียงกับผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MAAP มากขึ้น

งานวิจัยการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 นี้ ทำให้สามารถใช้โปรแกรม ART Mod 2 ทำนายการสะสมตัวของแอโรซอลในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบวิธีจัดการอุบัติเหตุและระบบจัดการอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของโปรแกรม ART Mod 2 ช่วยให้สามารถประเมินอุบัติเหตุร้ายแรงจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้แม่นยำขึ้น ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม ART Mod 2 ที่ปรับปรุงใหม่สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในเรื่องความปลอดภัยให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ รวมถึงเป็นข้อมูลอ้างอิงในเรื่องความปลอดภัยเพื่อเพิ่มการยอมรับของประชาชนต่อโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
2. ในการวิจัยนี้โปรแกรม ART Mod 2 ที่ใช้ในการทำการวิจัยต้องได้รับข้อมูล Thermal hydraulic มาจากโปรแกรม THALES 2 แต่เนื่องจากทั้งสองโปรแกรมเป็นโปรแกรมรุ่นเก่าที่มีความซับซ้อน ยากต่อการทำความเข้าใจ เมื่อไม่สามารถใช้โปรแกรม THALES2 เพื่อเป็นข้อมูล Input ของ ART Mod 2 ได้ จึงต้องหาข้อมูล Thermal hydraulic จากรายงานและเอกสารงานวิจัยต่างๆ หรือใช้โปรแกรมจำลองเหตุการณ์อื่นๆ เช่น RELAP5 Mod 3.4
3. ในการแสดงผลของโปรแกรม ART Mod 2 นั้น พบว่ายังมีความยุ่งยากในการอ่านผลที่ได้ จึงต้องแก้ไขโปรแกรมต้นทาง (source code) หรือใช้โปรแกรมอื่นๆ เพื่อให้แสดงผลการคำนวณที่เป็นระเบียบมากขึ้น
4. ในการปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 ของงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโปรแกรมโดยใช้การสะสมตัวของสารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) เป็นตัวแทนของสารประกอบซีเซียมทั้งหมดในประเมินผล ดังนั้นจึงควรประเมินผลจากสารประกอบซีเซียมอื่นๆ ด้วยทั้งที่มีอยู่และไม่มีในโปรแกรม ART Mod 2 เช่น ซีเซียมไฮดรอกไซด์ (CsOH) และซีเซียมโมลิบเดต (Cs_2MO_4) ตามลำดับ เพื่อให้ได้ผลการประเมินที่แม่นยำมากขึ้น



รายการอ้างอิง

1. *Power Development Plan 2010 Reversion 3 (PDP 2010 Revision 3)*. 2011, National Energy Policy Council (NEPC), Thailand.
2. P. Kittiwarapon, S. Rassame, K. Silva, *The Study of Cesium Iodide Transportation in Containment of a Generation III+ Boiling Water Reactor under Bypass Condition*. Transactions of the American Nuclear Society,, 2015. **113**: p. 1422-1425.
3. *ESBWR CERTIFICATION PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT*, in *Licensing Topical Report, NEDO-33201 Rev 6*. 2010, GE Hitachi Nuclear Energy.
4. M. Kajimoto, et.al., *A Computer Code for the Analysis of Radionuclide Transport and Deposition under Severe Accident Conditions, Chapter 4*. Department of Reactor Safety Research, JAERI, Japan.
5. B. Clément, et.al., *The objectives of the Phébus FP experimental programme and main findings*. Annals of Nuclear Energy, 2013. **61**: p. 4-10.
6. J. Valentin, *Pregnancy and Medical Radiation*, *Annals of the ICRP Publication 80*. 2000, International Commission on Radiological Protection.
7. L. E. Herranz, et.al., *Interpretation of the PHEBUS-FPTI Experiment*. *Informes Técnicos Ciemat, No. 25*. 2003.
8. P. Kittiwarapon, *SIMULATION OF CsI TRANSPORTATION IN THE ESBWR'S CONTAINMENT BYPASS CONDITION*. 2015, Chulalongkorn University.
9. M. Laurie, et.al., *Reprint of "Containment behaviour in Phébus FP"*. Annals of Nuclear Energy, 2013. **61**: p. 122-134.
10. H.J. Allelein, et.al., *State of The ART Report on Nuclear Aerosol*. 2009, Nuclear Energy Agency Committee on The Safety of Nuclear of Nuclear Installations, JT03276300. p. 31-36.
11. *Chapter Four: Single Particle Dynamics*. 2005; Available from: <http://aerosol.ev.ncku.edu.tw/teach/Aerosol/2005%20Aerosol/Chapter%204-2005.doc>.

12. R.A. Serway, et.al., *Physics for Scientists and Engineers*. 9 ed. 2014: Brooks/Cole, United States of America.
13. D.D. McCoy, et.al., *Rate of Deposition of Droplets in Annular Two-Phase Flow*. Pergamon/Elsevier, 1977. **3**: p. 319-333.
14. *Mechanisms of Filtration for High Efficiency Fibrous*. 2012, TSI Incorporated, USA.
15. Y.A. Cengel, et.al., *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. 2006: McGraw-Hill, New York, United States of America.
16. L. Talbot, et.al., *Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary*. 1979. p. 1-48.
17. A.V. Jones, et.al., *Circuit and Containment Aspects of Phébus Experimental FPT0 and Phébus FPT1*. 2015, JRC Science and Policy Report, European Commission.
18. M.Leskovar, *Simulation of the Phébus FPT1 Experiment with MELCOR 1.8.5*. Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, September 9-12, 2002.
19. Kristopher, et.al., *Computational Modeling and Validation of Aerosol Deposition in Ventilation*. USA, 2014.
20. Khurram Mehboob, et.al., *Quantification of in-containment fission products source term for 1000 MWe PWR under loss of coolant accident*. Annals of Nuclear Energy, 2015. **75**: p. 365-376.
21. J. Souto, et.al., *MELCOR 1.8.2 Assessment: Aerosol Experiments ABCOVE AB5, AB6, AB7, and LACE LA2*. October 1994, Sandia report, Francisco.
22. G. Gyenes, et.al., *Containment analysis on the PHEBUS FPT-0, FPT-1 and FPT-2 experiments*. Nuclear Engineering and Design, 2011. **241**: p. 854-864.
23. L. E. Herranz, et.al., *Experimental interpretation and code validation based on the PHEBUS-FP programme: Lessons learnt from the analysis of the containment scenario of FPT1 and FPT2 tests*. Nuclear Engineering and Design, 2007. **237**.
24. L. J. Siefken, et.al., *User manual of RELAP5 3.3*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. 2000, Idaho Falls, Idaho through the Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA.

25. *A Dictionary of Physics* 6ed. 2009: Oxford University Press.
26. J.S. Huang, et.al., *Numerical Study of Thermophoresis on Aerosol Partical Deposition from Hiemenz Flow through Porous Medium onto a Stretchinh Surface*. Marine Science and Technology, 2012. **20**: p. 163-172.
27. H.B. Tabrizi, et.al., *Thermophoresis of Particles over Flat Plate Turbulent Flow based on Two-fluid Modeling*, *Journal of Marine Science and Technology*. 2012. **20**: p. 163-172.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก : แสดงรายละเอียดของโปรแกรมย่อยต่างๆที่สำคัญ

ความหมายของหัวตารางมีดังนี้

- IN จะบอกว่าได้ดึงโปรแกรมย่อย (subroutine) ไตมาใช้บ้าง และใช้คำสั่งใดเรียกมาใช้
- PROGRAM จะบอกถึงตัวแปรสำคัญและข้อมูลที่สำคัญของช่อง IN
- OUT จะบอกข้อมูลในส่วนที่แสดงผล
- COMMENTS จะบอกหน้าหลักของโปรแกรมย่อย

1) art.f

ตารางที่ ก1 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย art.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
<u>hcom.h</u>	include 'hcom.h'				
hcom5.h	include 'hcom5.h'				deviation and diameter variables
		dimension nsystem(n)			
		data zero/0.0/			
<u>cimage.f</u>	call cimage(5,6)				print of input data with card image form
<u>read1.f</u>	call read1(nsystem(1))				read data which does not depend on time
intial.f	call intial				setting of initial conditions
		icycle=1			cycle no. of calculations for art-code
		icor=1			counter of event for fission product data
		ipb=1			counter of event time for thermal hydraulic data on primary systems
		icv=1			counter of event time for thermal on containment systemshydraulic data
		iend=0			setting of initial conditions for time to calculation
		time=zero			setting of initial conditions for time to calculation
		calculation of fp			

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		and aerosol behavior at specified accident sequence (from time=0 to time=tend)			
timedt.f	call timedt(iend)				setting of problem time and time-step
<u>read2.f</u>	call read2(icor,ipb,icv)				read data which depends on time
<u>setupi.f</u>	call setupi				replacing new value to calculate next time step, setting of aerosol distribution function of chemical components in class, setting of aerosol geometrical properties l
<u>physic.f</u>	call physic				calculation of physico-chemical properties
<u>dqheat.f</u>	call dqheat				re-calculation of wall/floor temperature due to decay heat
<u>depost.f</u>	call depost	-	-	-	control routine of calculation for deposition velocity
<u>physpr.f</u>	call physpr				calculation of physical and chemical properties of spray liquid
<u>effspr.f</u>	call effspr				calculation of spray removal efficiency as following mechanism
flash.f	call flashl				setting of flashing conditions
		calculation of scrubbing			
<u>scpool.f</u>	call scpool				scrubbing related with gas flow (analysis of fp behavior in the water pool)
<u>scboil.f</u>	call scboil				scrubbing above corium (analysis of fp behavior in the water pool)
<u>coagco.f</u>	call coagco				setting of coagulation constant (calculation of agglomeration constant)

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
<u>matrxp.f</u>	call matrxp				setting of matrix elements related to fp phase conditions
<u>cogrow.f</u>	call cogrow				setting of condensation coefficients at aerosol surface
		(call spldat) is available on facom-380 system			
<u>coevap.f</u>	call coevap	-	-	-	calculation of aerosol decreasing rate due to gas evaporation on aerosol surface
riskst.f	call riskst				check of stiff equation (calculation of stiff transport equation before setting of differential coefficients in terms of risk evaluation)
<u>evapal.f</u>	call evapal				fp-condensation and evaporation rate equation (calculation of aerosol decay due to gas evaporation at aerosol surface)
growth.f	call growth				fp-condensation and evaporation rate equation (calculation of aerosol growth due to gas condensation at aerosol surface)
matrxf.f	call matrxf				fp-transport and deposition rate equation (setting of matrix elements related to external flow)
decay.f	call decay				decay rate equation (setting of differential coefficient of fp decay)
gtrans.f	call gtrans				differential equation of gravitational settling trough floor (calculation of aerosol transportation between compartments due to

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
					gravitational settling)
aglom.f	call aglom				agglomelation rate equation (calculation of differential coefficient for aerosol agglomeration and setting dcdt(nss,n,nkk) to combine data in isodimensional term.)
euler.f	call euler				integration of differential equation by using euler method
transg.f	call transg				setting of fp conditions between gas phase and liqui phase if compartments are filled up by coolant.(transportation of fp from gas phase to liquid phase , if compartments are filled by coolant)
<u>resusp.f</u>	call resusp				calculation of reruspention (calculation of critical velocity for aerosol re-suspention)
		output of results			
outars.f	call outars				output of aerosol distribution function
output.f	call output(iend,nsystem(1))				write other output
		print of results to file ftnd010, ftnd011			
		(call splda2) is available on facom-380 system			

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		if user want to use art-code by using another computer system,user must change following lines to comments			
		call splda2			
		if(nspl.eq.0) call edit			
		data transportation to ploter			
		call plotfl(iend)			
		end of all calculation			
endpr.f	call endpr(ititle)				print of message after calculation

2) hcom.h

ตารางที่ ก2 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย hcom.h

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
hpara.h	include 'hpara.h'				maximam numbers of compartment(n),aerosol class(ncc),nuclid(nkk)
		parameter (ncc1=ncc+1, nss=2*ncc+4)			upper limit of aerosol mass class, fp-phase states (fission phase state)
		character ititle*80, nmfp*8, nmstat*16			announce parameter for names
		common /ctime/			15 parameters ,time data
		common /compr /			13 parameters geometry data of compartment
		common /chdrr/			29 parameters ,thermal-hydraulic data
		common /cnucl/			10 parameters ,mass of fp and data of differential coefficient
		common /cradi/			6 parameters , aerosol geometories (radius?)
		common /caero/			13 parameters, physico-chemical data for aerosol
		common /cphch/			10 parameters , physico-chemical properties related to fp

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		common /cchiod/			8 parameters, physico-chemical properties related to iodine
		common /cphys/			17 parameters, physico-chemical properties on fluid
		common /cphys2/			2 parameters, physico-chemical properties in partition (differentiation of liquid and gas)
		common /cphysd/			1 parameter, physico-chemical properties on fluid (time dependent)
		common /cvdep/			14 parameters, deposition velocity of fp
		common /cvedpn/			12 parameters, deposition at bend pipe and steam dryer
		common /cespr/			5 parameters, spray removal coefficient of fp
		common /cscrbr/			9 parameters, fp-partition factor(liquid.and.gas) due to scrubbing (phase transition due to scrubbing)
		common /cscr2/			1 parameter, fp-partition factor(2)(liquid.and.gas) due to scrubbing
		common /cflsh/			3 parameters, fp partition factor(liquid/gas) due to flashing (rapid vaporization)
		common /cocond/			8 parameters, condensation coefficients on aerosol surface
		common /cbeta/			5 parameters ,agglomeration coefficient (aerosol)
		common /cdecay/			4 parameters, decay rate constant of fp
		common /cefir/			3 parameters, fp-removal efficiency by filter and fp-leak rate
		common /crmda/			2 parameters, fp transport-rate-constant
		common /crelat/			1 parameters, data to indicates relation of compartments (flow direction)
		common /cname/			3 parameters, name of fp and title of calculation

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		common /compfi/			8 parameters,ident no. of compartment related with type (identification of types of compartments)
		common /cphsei/			12 parameters,indicator of fp-phase conditions
		common /cntli/			20 parameters,control data for analysis
		common /cntli2/			4 parameters,control data for iodine transformation, nucleation, scrubbing
		common /iouunit/			4parameters,i/o unit no. to read thales-data set up
		common /cworki/			7 parameters,variable no. for calculation of integration
		common /cworkr/			9 parameters,variable no. for calculation of integration

3) cimage.f

ตารางที่ ก3 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย cimage.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		subroutine cimage(i,j)			i=5,j=6,read input cards and write them to line printer,input---i= card reader logical unit no.,j= line printer logical unit no.
	read(i,5,end=20) m				read from unit no.i(determine by assessor)
				write(j,6) k,m	write on unit no.j(determine by assessor)

4) read1.f

ตารางที่ ก4 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย read1.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
hcom.h	include 'hcom.h'				
hcom2.h	include 'hcom2.h'				interpolation data
hmpec.h	include 'hmpec.h'				for interface with mpec

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
hcom4.h	include 'hcom4.h'				decay heat variables
hcom5.h	include 'hcom5.h'				deviation and diameter variables
		namelist /ndptim/			namelist * non-dependent on time *
		art input data			
	read(5,7091) ititle				read title of the main input file.
	read(5,ndptim)				read value for all parameters in ndptim
		time independent data from thales-pm,bm			not used
		time independent data from thales-cv2			not used

5) read2.f

ตารางที่ ก5 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย read2.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
hcom.h	include 'hcom.h'				
hcom2.h	include 'hcom2.h'				interpolation data
hcom3.h	include 'hcom3.h'				condensation coefficients on aerosol surface
		input data from art-code			
		input data thales-pm or thales-bm			
		input data from thales-cv			
		namelist /dptim/			namelist * dependent on time *
		namelist /thlspb/			not used
		namelist /thlscv/			not used

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		setting of initial conditions for input data			
		read transient data by art-code			
	read(5,dptim)				read value for all parameters in dptim
				write(14,1000) ntrndt,tstart ,icycle	write on unit no.14(determine by assessor)
		read transient data by thales-pm or thales-bm			not used

6) setupi.f

ตารางที่ ก6 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย setupi.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		subroutine fpvap(tk,v,ifp,concm,concg,fp mole,fpmass,ps,pcgs)			calculation of saturation vapor pressure for i2,cs,te,csi,cso h
		low volatile fp and fuel and structure materials of cor			
stabl.f	call stabl(psd,tk,1,dum1,dum2,dum3,dum4,dum5,dum6)				represent saturated steam table for h2o

7) physic.f

ตารางที่ ก7 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย physic.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		subroutine physic			calculation of physical and chemical properties
hcom.h	include 'hcom.h'				
		character ctype(n)*4,itype(3)*4			announce parameter for names

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
		setting of boundary conditions (1) temperature differences between bulk gas and wall (2) volume of gas phase (3) limit of liquid volume (4) gas velocity in pipe (5) flow condition			
rhocp.f	call rhocp(p(i),t(i),nro,dum,cp(i),dum1,dum2,dum3)				specific heat of gas
cnducg.f	call cnducg(xsg(1),t(i),akg(i))				thermal conductivity of h2o(vapor)
viscog.f	call viscog(xsg(1),t(i),viscdg(i))				viscosity of mixture gas
rhogmx.f	call rhogmx(xsg(1),t(i),p(i),rhog(i))				density of gas
mefree.f	call mefree(t(i),rhog(i),viscdg(i),xsg(1),freeg(i))				mean free path of gas
stabl.f	call stabl(psatlq(i),tl(i),1,dum1,dum2,dum3,dum4,dum5,dum6)				saturated vapor(h2o) pressure at liquid temp.
		calculation of hydraulic properties			

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
grash.f	call grash(pleng h,tmpw(i),t(i), viscdg(i),rhog(i),gr(i))				calculate grash no.
reynol.f	call reynol(plengh, ugas(i),viscdg(i), rhog(i),re(i))				calculate reynol no.
prandl.f	call prandl(cp(i), rhog(i),viscdg(i), akg(i),pr(i))				calculate prandl no.
nussel.f	call nussel(ii,gr(i), re(i),pr(i),anu(i))				calculate nussel no.
		$h_{trans}(i) = anu(i) * akg(i) / plengh$			calculation of heat transfer coefficient
vapfp.f	call vapfp(idfpc,cc(i), igfp,i,k,t(i),volg(i), vap(i,k))				fp partial pressure
		calculation of properties of steam(h2o)			
vapfp.f	call vapfp(ih2o, ch2o, t(i),volg(i),vah2o)				vapor pressure of steam
diffg.f	call diffg(t(i),p(i), 1,zero,xsg(1), dummy0,dummy1, dstem(i))				calculation of diffusion coefficient of h2o vapor

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
diffs.f	call diffs(t(i),p(i),ih2o,wh2o,dstem(i))				calculation of diffusion coefficient of h2o vapor
dfilmc.f	call dfilmc(dstem(i),filmc(i))				calculation diffusion boundary layer
stabl.f	call stabl(pss,tmpw(i),1,dum1,dum2,dum3,dum4,dum5,dum6)				calculation of saturated pressure
diffs.f	call diffs(t(i),p(i))*xs(i,igh2o),ih2o,dummy,dstem(i))				calculation of condensing vapor velocity, it assumed that composition of atomospher is h2o.
dfilmc.f	call dfilmc(dstem(i),filmc(i))	calculation diffusion boundary layer			call diffs(t(i),p(i))*xs(i,igh2o),ih2o,dummy,dstem(i))
schmid.f	call schmid(visc dg(i),rhog(i),dstem(i),sch2o)				schmidt number of steam
scherw.f	call scherw(idtyp,re(i),plengh,xlpipe(i),sch2o,shflow)				sherwood number of steam

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
amtcoe.f	call amtcoe(sch2o,gr(i),plengh,dstem(i),ht1,ht2,shnatu,dum)				sherwood number of steam
		vh2oc=dstem(i)*shh2o/plengh			velocity of h2o vapor related to convectional flow
		overall velocity of h2o vapor to wall			
cnducl.f	call cnducl(tmpars(ic,i),cbtu,akp(ic,i))				thermal conductivity of aerosol
lheat.f	call lheat(tmpars(ic,i),rams(ic,i))				latent heat of h2o vapor
		calculation of physico-chemical properties related to fp-vapor deposition velocity			
diffg.f	call diffg(t(i),p(i),ifp(k),zero,xsg(1),difmix(i,k),dummy1,dummy2)				diffusion coefficient of vapor-fp
schmid.f	call schmid(viscdg(i),rhog(i),difmix(i,k),scmix(i,k))				schmidtz no. of vapor-fp

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
				write(6,100 0) ititle,i cycle	output of results of ititle and icycle
				write(6,110 0) tstart	output of results of tstart
				write(6,120 0)	output of results of all physical properties
				write(6,130 0)	output of results of all physical properties
				write(6,140 0)	output of results of all physical properties
				write(6,150 0)	output of results of all physical properties

8) diffg.f

ตารางที่ ก8 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย diffg.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
diffg.f	subroutine diffg(t,pcgs,im,ffp,frac,dmix,dair,dh2o)				calculation of diffusion coefficient in mixture gas
diffmx.f	call diffmx(t,pcgs,xm(i),xm(j),r(i),r(j),ek(i),ek(j),wd,d)				calculation of diffusion coefficient in binary gas mixtures

9) cnducl.f

ตารางที่ ก9 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมย่อย cnducl.f

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
cnducl.f	subroutine cnducl(tk,cbtu,cerg)				calculation of conductivity of water

IN		PROGRAM	OUT		COMMENTS
cnducg.f	call cnducg(frac(1),tk,cergs)				calculation of thermal conductivity of mixture gas

ภาคผนวก ข : แสดงรายละเอียดของ input code ในโปรแกรม ART Mod 2

1) Input code ของ NSPP-502 [4]

<<ART MOD 2 CALCULATION FOR NSPP-502 AEROSOL EXPERIMENT>>>

&NDPTIM

LPITCH=100, LOPT(2)=100,

IAGLOM=1, IBROW=1, IGRAV=1, NDX=5, NDY=5,

NCOM=1, IELEVE=2,

HCOMP(1)=5.240E+02, VCOMP(1)=3.830E+07, DAW(1)=1.315E+03,

TEND=6.00E+04, TUSER=1.2300E+03, DTALLM=5.0,

IFP(1)=59,

RHOM(1)=5.2000E+00,

ICLASS=10,

ARS(1)=2.1782E-14,1.7425E-13,1.3940E-12,1.1152E-11,8.9218E-11,

7.1374E-10,5.7099E-09,4.5680E-08,3.6544E-07,2.9235E-06,

2.3388E-05,

CC(2, 1, 1) = 2.6413E-01, 7.7000E+00, 8.9763E+00, 4.3886E-01,5.1609E-04,
1.0757E-08,

3.5705E-15, 1.8073E-23,1.3655E-33, 1.5214E-45,

FXFILM = 5.0000E-01, ALIMIT=1.0E-20&END

&DPTIM NTRNDT = 1, TNEXTJ = 6.9800E+02,

DTALLM = 5.0, DTB = 6.9800E+02,

AFJ(1) = 7.3000E+04,

PMPAJ(1) = 2.7000E-01,

XSJ(1,1)= 8.0421E-01,

XSJ(1,2)= 1.9579E-01,
 TJ(1) = 3.9600E+02,
 TWJ(1) = 3.9200E+02,
 TMPARJ(1,1) = 10*3.9600E+02&END
 &DPTIM NTRNDT = 2, TNEXTJ = 2.5650E+03,
 DTALLM = 5.0, DTB = 1.8670E+03,
 PMPAJ(1) = 3.1000E-01,
 XSJ(1,1)= 7.9255E-01,
 XSJ(1,2)= 2.0745E-01,
 TJ(1) = 4.0000E+02,
 TWJ(1) = 3.9700E+02,
 TMPARJ(1,1) = 10*4.0000E+02&END
 &DPTIM NTRNDT = 3, TNEXTJ = 4.1790E+03,
 DTALLM = 5.0, DTB = 1.6140E+03,
 PMPAJ(1) = 3.1000E-01,
 XSJ(1,1)= 7.9255E-01,
 XSJ(1,2)= 2.0745E-01,
 TJ(1) = 4.0000E+02,
 TWJ(1) = 3.9700E+02,
 TMPARJ(1,1) = 10*4.0000E+02&END
 &DPTIM NTRNDT = 4, TNEXTJ = 5.997E+03,
 DTALLM = 5.0, DTB = 1.8180E+03,
 PMPAJ(1) = 3.1000E-01,
 XSJ(1,1)= 8.1670E-01,
 XSJ(1,2)= 1.8330E-01,
 TJ(1) = 4.0100E+02,
 TWJ(1) = 3.9700E+02,
 TMPARJ(1,1) = 10*4.0100E+02&END

&DPTIM NTRNDT = 5, TNEXTJ = 9.6160E+03,

DTALLM = 5.0, DTB = 3.6190E+03,

PMPAJ(1) = 2.9000E-01,

XSJ(1,1)= 8.2140E-01,

XSJ(1,2)= 1.7860E-01,

TJ(1) = 3.9900E+02,

TWJ(1) = 3.9700E+02,

TMPARJ(1,1) = 10*3.9900E+02&END

&DPTIM NTRNDT = 6, TNEXTJ = 1.6800E+04,

DTALLM = 5.0, DTB = 7.1840E+03,

PMPAJ(1) = 2.7000E-01,

XSJ(1,1)= 7.7982E-01,

XSJ(1,2)= 2.2018E-01,

TJ(1) = 3.9500E+02,

TWJ(1) = 3.9700E+02,

TMPARJ(1,1) = 10*3.9500E+02&END

&DPTIM NTRNDT = 7, TNEXTJ = 2.7013E+04,

DTALLM = 5.0, DTB = 1.0213E+04,

PMPAJ(1) = 2.1000E-01,

XSJ(1,1)= 7.0168E-01,

XSJ(1,2)= 2.9832E-01,

TJ(1) = 3.8400E+02,

TWJ(1) = 3.9700E+02,

TMPARJ(1,1) = 10*3.8400E+02&END

&DPTIM NTRNDT = 8, TNEXTJ = 6.8770E+04,

DTALLM = 5.0, DTB = 4.1757E+04,

PMPAJ(1) = 1.1000E-01,

XSJ(1,1)= 1.2293E-01,

$XSJ(1,2) = 8.7707E-01,$
 $TJ(1) = 3.2500E+02,$
 $TWJ(1) = 3.9700E+02,$
 $TMPARJ(1,1) = 10 * 3.2500E+02 \&END$
 $\&DPTIM \ NTRNDT = 9, \ TNEXTJ = 8.7881E+04,$
 $DTALLM = 5.0, \ DTB = 1.9111E+04,$
 $PMPAJ(1) = 1.1000E-01,$
 $XSJ(1,1) = 1.2293E-01,$
 $XSJ(1,2) = 8.7707E-01,$
 $TJ(1) = 3.2500E+02,$
 $TWJ(1) = 3.9700E+02,$
 $TMPARJ(1,1) = 10 * 3.2500E+02 \&END$
 $\&DPTIM \ NTRNDT = 10, \ TNEXTJ = 2.4177E+05,$
 $DTALLM = 5.0, \ DTB = 1.5389E+05,$
 $PMPAJ(1) = 1.0924E-01,$
 $XSJ(1,1) = 1.2378E-01,$
 $XSJ(1,2) = 8.7622E-01,$
 $TJ(1) = 3.2500E+02,$
 $TWJ(1) = 3.9700E+02,$
 $TMPARJ(1,1) = 10 * 3.2500E+02 \&END$
 $\&DPTIM \ NTRNDT = 11, \ TNEXTJ = 1.0000E+09,$
 $DTALLM = 5.0, \ DTB = 9.9976E+08,$
 $PMPAJ(1) = 1.0300E-01,$
 $XSJ(1,1) = 1.3128E-01,$
 $XSJ(1,2) = 8.6872E-01,$
 $TJ(1) = 3.2500E+02,$
 $TWJ(1) = 3.9700E+02,$
 $TMPARJ(1,1) = 10 * 3.2500E+02 \&END$

2) Input code ของ Phébus FPT1 แบบปริมาตรเดียว

<<ART MOD 2 CALCULATION FOR FPT1 AEROSOL EXPERIMENT>>>

&NDPTIM

LPITCH=100, LOPT(2)=100,

IAGLOM=1, IBROW=1, IGRAV=1, NDX=5, NDY=5,

NCOM=1, IELEVE=2,

HCOMP(1)=5.00E+02, VCOMP(1)=1.00E+07, DAW(1)=5.65E+02,

TEND=1.33200E+05, TUSER=0.0, DTALLM=5.0,

IFP(1)=6,

RHOM(1)=4.5100E+00,

ICLASS=8,

ARS(1)=1.5105E-13,2.3602E-12,2.5132E-11,9.2767E-11,

3.7165E-10,1.5012E-09,4.9498E-09,2.3131E-08,2.3388E-05,

CC(2,1,1) = 9.76E-02,1.2688E-01,5.856E-01,3.416E+00,4.196E+00,9.76E-01,

1.952E-01,1.6592E-01,

FXFILM = 5.0000E-01, ALIMIT=1.0E-20&END

&DPTIM NTRNDT = 1, TNEXTJ = 1.33200E+05,

DTALLM = 5.0, DTB = 1.33200E+05,

AFJ(1) = 5.0893E+04,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8100E+02,

TWJ(1) = 3.8100E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8100E+02&END

&DPTIM NTRNDT = 2, TNEXTJ = 1.3500E+05,

DTALLM = 5.0, DTB = 1.800E+03,

PMPAJ(1) = 1.5000E-01,

```

XSJ(1,1)= 1.0,
      XSJ(1,2)= 0.0,
TJ(1) = 3.8000E+02,
TWJ(1) = 3.8000E+02,
TMPARJ(1,1) = 8*3.8000E+02&END
&DPTIM NTRNDT = 3, TNEXTJ = 3.078E+05,
      DTALLM = 5.0, DTB = 1.728E+05,
PMPAJ(1) = 2.200E-01,
XSJ(1,1)= 3.10E-01,
      XSJ(1,2)= 6.90E-01,
TJ(1) = 4.0100E+02,
TWJ(1) = 4.0100E+02,
TMPARJ(1,1) = 8*4.0100E+02&END
&DPTIM NTRNDT = 4, TNEXTJ = 4.078E+05,
      DTALLM = 5.0, DTB = 1.000E+05,
PMPAJ(1) = 1.5000E-01,
XSJ(1,1)= 1.0,
      XSJ(1,2)= 0.0,
TJ(1) = 3.8000E+02,
TWJ(1) = 3.8000E+02,
TMPARJ(1,1) = 8*3.8000E+02&END

```

3) Input code ของ Phébus FPT1 แบบสามปริมาตร

```
<<ART MOD 2 CALCULATION FOR FPT1 AEROSOL EXPERIMENT>>>
```

```
&NDPTIM
```

```

LPITCH=100, LOPT(2)=100,
IAGLOM=1, IBROW=1, IGRAV=1, NDX=5, NDY=5,
NCOM=3, IELEVE=4,

```

HCOMP(1)=1.000E+01,
 HCOMP(2)=4.472E+02,
 HCOMP(3)=1.6450E+02,

VCOMP(1)=2.470E+03,
 VCOMP(2)=1.095E+07,
 VCOMP(3)=2.610E+06,

DAW(1)=5.56E+01,
 DAW(2)=5.56E+02,
 DAW(3)=1.41E+02,

TEND=1.33200E+05, TUSER=0.0, DTALLM=5.0,
 IFP(1)=6,
 RHOM(1)=4.5100E+00,
 ICLASS=8,
 ARS(1)=1.5105E-13,2.3602E-12,2.5132E-11,9.2767E-11,
 3.7165E-10,1.5012E-09,4.9498E-09,2.3131E-08,2.3388E-05,
 CC(2,2,1) = 8*0.0,

FXFILM = 5.0000E-01, ALIMIT=1.0E-20&END

&DPTIM NTRNDT = 1, TNEXTJ = 2500.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 2500.0,

AFJ(1)=2.47E+02,

AFJ(2)=2.47E+04,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

$$UGJ(1)=-1.2E-05,$$

$$UGJ(2)=-6.0E-03,$$

$$UGJ(3)=4.47E-03,$$

$$SRCJ(2,2,1)=8*0.0,$$

$$PMPAJ(1) = 2.10E-01,$$

$$PMPAJ(2) = 2.10E-01,$$

$$PMPAJ(3) = 2.10E-01,$$

$$XSJ(1,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(1,2)= 4.00E-01,$$

$$XSJ(2,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(2,2)= 4.00E-01,$$

$$XSJ(3,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(3,2)= 4.00E-01,$$



$$TJ(1) = 3.8500E+02,$$

$$TJ(2) = 3.8500E+02,$$

$$TJ(3) = 3.8500E+02,$$

$$TWJ(1) = 3.8500E+02,$$

$$TWJ(2) = 3.8500E+02,$$

$$TWJ(3) = 3.6300E+02,$$

$$TMPARJ(1,1) = 8*3.8100E+02,$$

$$TMPARJ(1,2) = 8*3.8100E+02,$$

TMPARJ(1,3) = 8*3.8100E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 2, TNEXTJ = 7500.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 5000.0,

GJ(1, 2, 1) = 9.9E+03,

GJ(1, 3, 2) = 2.178E+03,

UGJ(1)=-4.1E-06,

UGJ(2)=-1.5E-03,

UGJ(3)=3.2E-03,

SRCJ(2,2,1)=8*0.0,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

XSJ(2,1)= 6.00E-01,

XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,

XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8100E+02,

TJ(2) = 3.8100E+02,

TJ(3) = 3.8100E+02,



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

TWJ(1) = 3.8100E+02,

TWJ(2) = 3.8100E+02,

TWJ(3) = 3.6300E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8100E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8100E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8100E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 3, TNEXTJ = 11000.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 3500.0,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

UGJ(1)=-1.02E-05,

UGJ(2)=-5.7E-03,

UGJ(3)=4.01E-03,

SRCJ(2,2,1)=8*0.0,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

XSJ(2,1)= 6.00E-01,

XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,



XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8600E+02,

TJ(2) = 3.8600E+02,

TJ(3) = 3.8600E+02,

TWJ(1) = 3.8600E+02,

TWJ(2) = 3.8600E+02,

TWJ(3) = 3.6300E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 4, TNEXTJ = 14000.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 3000.0,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

UGJ(1)=-9.8E-06,

UGJ(2)=-5.4E-03,

UGJ(3)=3.81E-03,

SRCJ(2,2,1)=2.17E-05,2.82E-05,1.30E-04,7.59E-04,

9.32E-04,2.17E-04,4.34E-05,3.69E-05,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

XSJ(2,1)= 6.00E-01,

XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,

XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8600E+02,

TJ(2) = 3.8600E+02,

TJ(3) = 3.8600E+02,

TWJ(1) = 3.8600E+02,

TWJ(2) = 3.8600E+02,

TWJ(3) = 3.7000E+02,



TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 5, TNEXTJ = 16000.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 2000.0,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

$$UGJ(1)=-1.09E-05,$$

$$UGJ(2)=-5.11E-03,$$

$$UGJ(3)=3.63E-03,$$

$$SRCJ(2,2,1)=9.64E-06,1.25E-05,5.78E-05,3.37E-04,$$

$$4.14E-04,9.64E-05,1.93E-05,1.64E-05,$$

$$PMPAJ(1) = 2.10E-01,$$

$$PMPAJ(2) = 2.10E-01,$$

$$PMPAJ(3) = 2.10E-01,$$

$$XSJ(1,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(1,2)= 4.00E-01,$$

$$XSJ(2,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(2,2)= 4.00E-01,$$

$$XSJ(3,1)= 6.00E-01,$$

$$XSJ(3,2)= 4.00E-01,$$



$$TJ(1) = 3.8600E+02,$$

$$TJ(2) = 3.8600E+02,$$

$$TJ(3) = 3.8600E+02,$$

$$TWJ(1) = 3.8600E+02,$$

$$TWJ(2) = 3.8600E+02,$$

$$TWJ(3) = 3.7000E+02,$$

$$TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,$$

$$TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,$$

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 6, TNEXTJ = 17000.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 1000.0,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

UGJ(1)=-1.12E-05,

UGJ(2)=-5.1E-03,

UGJ(3)=3.57E-03,

SRCJ(2,2,1)=1.33E-05,1.72E-05,7.95E-05,4.64E-04,

5.70E-04,1.33E-04,2.65E-05,2.25E-05,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

XSJ(2,1)= 6.00E-01,

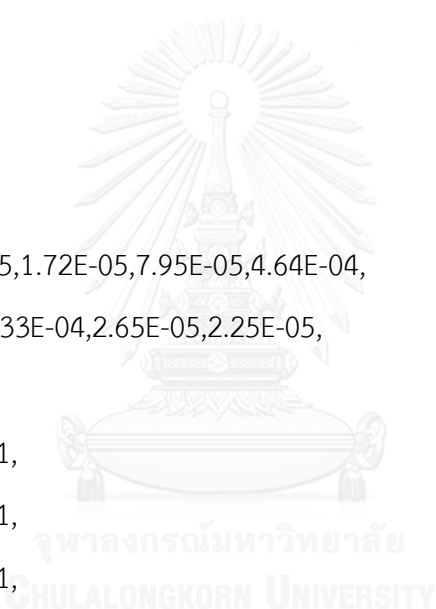
XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,

XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8600E+02,

TJ(2) = 3.8600E+02,



TJ(3) = 3.8600E+02,

TWJ(1) = 3.8600E+02,

TWJ(2) = 3.8600E+02,

TWJ(3) = 3.7000E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 7, TNEXTJ = 18000.0,

DTALLM = 5.0, DTB = 1000.0,

GJ(1, 2, 1) = 3.00E+04,

GJ(1, 3, 2) = 3.00E+03,

UGJ(1)=-1.25E-05,

UGJ(2)=-5.0E-03,

UGJ(3)=3.55E-03,

SRCJ(2,2,1)=8*0.0,

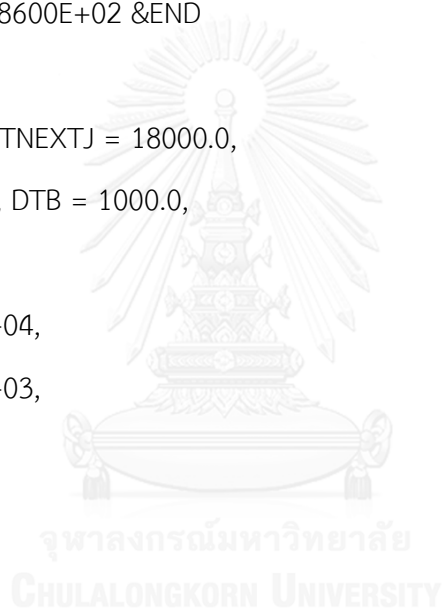
PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,



XSJ(2,1)= 6.00E-01,

XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,

XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8600E+02,

TJ(2) = 3.8600E+02,

TJ(3) = 3.8600E+02,

TWJ(1) = 3.8600E+02,

TWJ(2) = 3.8600E+02,

TWJ(3) = 3.7000E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 8, TNEXTJ = 1.33200E+05,

DTALLM = 5.0, DTB = 1.152E+05,

GJ(1, 2, 1) = 0.0,

GJ(1, 3, 2) = 1.178E+03,

UGJ(1)=0.0,

UGJ(2)=2.7E-04,

UGJ(3)=2.1E-03,

SRCJ(2,2,1)=8*0.0,

PMPAJ(1) = 2.10E-01,

PMPAJ(2) = 2.10E-01,

PMPAJ(3) = 2.10E-01,

XSJ(1,1)= 6.00E-01,

XSJ(1,2)= 4.00E-01,

XSJ(2,1)= 6.00E-01,

XSJ(2,2)= 4.00E-01,

XSJ(3,1)= 6.00E-01,

XSJ(3,2)= 4.00E-01,

TJ(1) = 3.8600E+02,

TJ(2) = 3.8600E+02,

TJ(3) = 3.8600E+02,

TWJ(1) = 3.8600E+02,

TWJ(2) = 3.8600E+02,

TWJ(3) = 3.6300E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,2) = 8*3.8600E+02,

TMPARJ(1,3) = 8*3.8600E+02 &END

&DPTIM NTRNDT = 9, TNEXTJ = 2.33200E+05,

DTALLM = 5.0, DTB = 1.0E+05,

PMPAJ(1) = 1.5000E-01,

XSJ(1,1)= 1.0,

XSJ(1,2)= 0.0,

TJ(1) = 3.8000E+02,



TWJ(1) = 3.8000E+02,

TMPARJ(1,1) = 8*3.8000E+02&END



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวศิน เวชกามา

เกิดวันที่ 2 ตุลาคม 2535

สถานที่เกิด มหาสารคาม

วุฒิการศึกษา: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2557

ประสบการณ์การทำงาน

ก.พ. - ต.ค. 2559 : รับจ้างเหมาทำงานวิจัยโครงการวิจัย การประเมินการรั่วไหล
ของ สารกัมมันตรังสีในอุบัติเหตุร้ายแรงของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อพัฒนากลยุทธ์การจัดการ
อุบัติเหตุ ในหน่วยงาน : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่

W. Vechgama, K. Silva, S. Rassame. Investigation and modification of
aerosol deposition model of ART Mod 2 using experimental data from NSPP-502
and Phébus FPT1, NUTHOS-11 (N11P0431). Gyeongju, October 9-13, 2016.