

การจำลองการกระจายตัวในชั้นบรรยากาศของซีเซียม-137ปลดปล่อยจากอุบัติเหตุสมมติในโรงไฟฟ้า

พลังนิวเคลียร์: กรณีศึกษาประเทศจีนและเวียดนาม



นายนราภรณ์ คุณศรีเมฆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

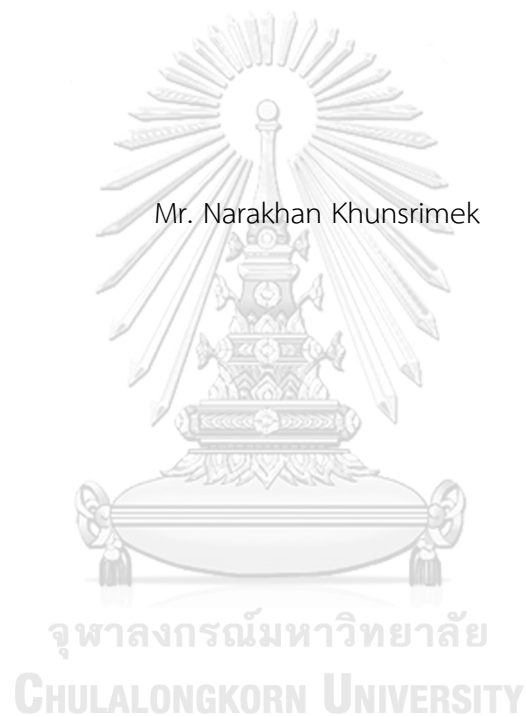
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ATMOSPHERIC DISPERSION SIMULATION OF CESIUM-137 RELEASE FROM
A HYPOTHETICAL ACCIDENT AT NUCLEAR POWER PLANTS: CASE STUDY IN CHINA AND
VIETNAM

Mr. Narakhan Khunsrimek



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองการกระจายตัวในชั้นบรรยากาศของซีซีเอ็ม-
137ปลดปล่อยจากอุบัติเหตุสมมติในโรงไฟฟ้าพลัง
นิวเคลียร์: กรณีศึกษาประเทศจีนและเวียดนาม

โดย

นายนราภรณ์ คุณศรีเมฆ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีนิวเคลียร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. กัมปนาท ชิลวา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

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

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา)

.....กรรมการ
(ดร. พรรณี แสงแก้ว)

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

นรกกานต์ คุณศรีเมฆ : การจำลองการกระจายตัวในชั้นบรรยากาศของซีเซียม-137 ปลอดภัยจากอุบัติเหตุสมมติในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์: กรณีศึกษาประเทศจีนและเวียดนาม (ATMOSPHERIC DISPERSION SIMULATION OF CESIUM-137 RELEASE FROM A HYPOTHETICAL ACCIDENT AT NUCLEAR POWER PLANTS: CASE STUDY IN CHINA AND VIETNAM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมบูรณ์ รัชมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. กัมปนาท ชิลวา, หน้า.

เหตุการณ์อุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ ฟุกุชิมะ ในปี 2011 แสดงให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สามารถกระจายตัวไปได้ไกลถึงประเทศเพื่อนบ้าน เมื่อพิจารณาจำนวนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ถูกสร้างขึ้น ณ บริเวณใกล้เคียงประเทศไทยพบว่าโรงไฟฟ้าทั้งหมด 4 แห่ง ประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้า Ninh Thuan ในประเทศเวียดนาม โรงไฟฟ้า Fangchenggang, Changjiang และ Yangjiang ในประเทศจีน หากโรงไฟฟ้าเหล่านี้เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง มีความเป็นไปได้ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีจะกระจายตัวมายังประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้างกล่าว โดยในการศึกษานี้ใช้กระบวนการสำหรับวิเคราะห์ผลสองกระบวนการร่วมกัน กระบวนการที่หนึ่งใช้ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านสำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยใช้เกณฑ์คะแนนที่ถูกสร้างจากเงื่อนไขสภาพอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้มากที่สุด กระบวนการที่สองใช้ค่ากัมมันตภาพรังสีบนชั้นบรรยากาศและข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งวิเคราะห์ผลในกระบวนการแรก เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ผลจากการวิเคราะห์ของทั้งสองกระบวนการชี้ให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งในประเทศจีนเคลื่อนที่ไปยังชายฝั่งตอนกลางของประเทศเวียดนาม จากนั้นมุ่งหน้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในขณะที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan เคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกของโรงไฟฟ้า และเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนมุ่งหน้าเข้าสู่ทางตอนใต้ของประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางรังสีจากโรงไฟฟ้าแต่ละแห่งพบว่า ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ ณ บริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยทางรังสี (1 mSv) ดังนั้นมีความเป็นไปได้สูงที่ประเทศไทยจะไม่ได้รับผลกระทบทางรังสีอย่างมีนัยสำคัญเมื่อโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง

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

5970211821 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: CHINA / VIETNAM / DISPERSION / HOTSPOT / DISPERSION SCORE

NARAKHAN KHUNSRIMEK: ATMOSPHERIC DISPERSION SIMULATION OF CESIUM-137 RELEASE FROM A HYPOTHETICAL ACCIDENT AT NUCLEAR POWER PLANTS: CASE STUDY IN CHINA AND VIETNAM. ADVISOR: ASST. PROF. DR. SOMBOON RASSAME, CO-ADVISOR: DR. KAMPANART SILVA, pp.

The accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011 showed that radionuclides could distribute to neighboring countries. Therefore the purpose of this research is to evaluate the pathway and the impacts of the radioactive plume released from nuclear power plants around Thailand, including Ninh Thuan nuclear power plant in Vietnam, and Fangchenggang, Changjiang and Yangjiang nuclear power plants in China. The results from these processes can be used for future emergency planning. This study used two methods for the evaluation. The first method was the atmospheric dispersion scoring method. Dispersion score were developed to give higher scores to the weather properties that contribute to better atmospheric dispersion. Then the dispersion score was calculated using the meteorology data of the point that radionuclides passed. The second method, air concentration of the radionuclides and the meteorology data of the points obtained from the first method were used as the input data for the simulation by HotSpot code. The results of assessment showed that the plume released from three nuclear power plants in China dispersed to the north central coast of Vietnam and move to the northeast region of Thailand while the plume from Ninh Thuan dispersed to the west direction of the power plant then changed to the northwest direction before being transported to the south region of Thailand. However, results from the evaluation of radionuclide effects showed that the total effective dose equivalent (TEDE) of each affected area was lower than the regulatory limit (1 mSv). Therefore, the radionuclides released from these nuclear power plants will most probably not have significant impacts to Thailand.

Department:	Nuclear Engineering	Student's Signature
Field of Study:	Nuclear Technology	Advisor's Signature
Academic Year:	2017	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ รศ. สมยศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้เกี่ยวกับการคำนวณปริมาณรังสีตลอดจนให้แนวทางในการวิเคราะห์ผลผลงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สุพิชชา จันทโรยธา กรรมการภายในการสอบวิทยานิพนธ์ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ในด้านระบบการทำงานภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจสอบข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร. พรรณี แสงแก้ว กรรมการภายในการสอบวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในการวิเคราะห์ผลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในอนาคต อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ปิยธิดา ไตรนุรักษ์ กรรมการภายนอกการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาร่วมฟังการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบข้อบกพร่อง และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นาย วศิน เวชกามา ที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้ และช่วยแก้ปัญหาการจำลองผลในส่วนของโปรแกรม ART Mod 2

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ที่ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าให้มีความรู้สามารถนำมาใช้ประกอบการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ บิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ และคอยให้การสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นในอดีต.....	4
2.2 อุบัติเหตุระดับรุนแรง (severe accident).....	5
2.3 การสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกโรงไฟฟ้า (Station blackout).....	7
2.4 การวิเคราะห์ความปลอดภัย (Safety analysis)	9
2.5 แบบจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ.....	11
2.6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	12
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	14
2.7.1 ความเร็วลม	14
2.7.2 การเคลื่อนที่ของลม	14

2.7.3 การหมุนเวียนบรรยากาศ.....	16
2.7.4 ความเสถียรของชั้นบรรยากาศ	18
2.7.5 ปริมาณน้ำฝน	20
2.8 ลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทย	21
2.9 การสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	23
2.9.1 การสะสมตัวแบบเปียก	23
2.9.2 การสะสมตัวแบบแห้ง.....	23
2.10 การได้รับรังสีเข้าสู่ร่างกาย	25
2.11 การคำนวณปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ร่างกายได้รับ	26
2.12 ขีดจำกัดการได้รับรังสี.....	27
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	37
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	37
3.2 กระบวนการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี	38
3.2.1 การศึกษาอิทธิพลของสภาพอากาศที่มีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์ กัมมันตรังสี.....	38
3.2.1.1 ค่ากัมมันตภาพสำหรับวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศ	39
3.2.1.2 ข้อมูลภูมิอากาศรูปแบบที่แตกต่างกัน	42
3.2.1.3 การจำลองผลในโปรแกรม HotSpot	45
3.2.2 การคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี	50
3.2.2.1 เกณฑ์คะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	50
3.2.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเบื้องต้น	51
3.3 กระบวนการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยใช้การจำลองผล ของ โปรแกรม HotSpot.....	51

3.3.1	ค่ากัมมันตภาพที่เกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	52
3.3.2	ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน.....	53
3.3.3	การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและการประเมินผล กระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ	54
บทที่ 4	ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ	56
4.1	ผลวิเคราะห์สภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้น บรรยากาศ	56
4.1.1	การวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณน้ำฝน	56
4.1.2	การวิเคราะห์ความเร็วลม.....	57
4.1.3	วิเคราะห์อิทธิพลของความเสถียรชั้นบรรยากาศ.....	58
4.2	การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ.....	60
4.2.1	เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังไทย... ..	61
4.2.2	เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังไทย.....	65
4.2.3	เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายัง ไทย.....	69
4.2.4	เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังไทย .	73
4.3	ค่ากัมมันตภาพรังสีบนชั้นบรรยากาศ	79
4.3.1	ค่ากัมมันตภาพของ source term ที่กระจายตัว บนชั้นบรรยากาศ จากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย	79
4.3.2	ค่ากัมมันตภาพของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย.....	81
4.3.3	ค่ากัมมันตภาพรังสีของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย.....	82
4.3.4	ค่ากัมมันตภาพรังสีของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย.....	84

4.4 การประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ	85
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลงานวิจัย	90
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	92
5.3 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	96
ภาคผนวก ก	102
ภาคผนวก ข	114
ภาคผนวก ค	126
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	137



สารบัญรูป

รูปที่ 1 ลำดับเหตุการณ์การเกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม 6

รูปที่ 2 ช่วงเวลาการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์จากเหตุการณ์ Station black out..... 8

รูปที่ 3 การกระจายตัวของกลุ่มหมอกนิวไคลด์กัมมันตรังสีในรูปแบบเกาส์เซียน..... 13

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเข้มข้นของมลพิษ..... 14

รูปที่ 5 แผนภาพการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบและแนวตั้ง 15

รูปที่ 6 แอนนิโมมิเตอร์ (anemometer) 15

รูปที่ 7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นบรรยากาศในขณะที่เกิดเหตุการณ์เคลื่อนที่ 17

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเกรเดียนต์ของความกดอากาศและความดันบรรยากาศ..... 17

รูปที่ 9 แรงคอริโอลิสต่อการเบนของทิศทางลม..... 18

รูปที่ 10 แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่ออนุภาค 19

รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศ A คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบ (σ_y) B คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้ง (σ_z)... 20

รูปที่ 12 เครื่องมือวัดฝนแบบมาตรฐาน (standard rain gauge)..... 21

รูปที่ 13 ทิศทางการเกิดลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้..... 22

รูปที่ 14 แผนภาพแสดงเส้นทางการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ร่างกาย 25

รูปที่ 15 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 38

รูปที่ 16 ลักษณะโครงสร้างของโรงไฟฟ้า Surry [43] 39

รูปที่ 17 แสดงโนดัลไลเซชัน (nodalization) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Surry..... 40

รูปที่ 18 การเปรียบเทียบปริมาณการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ระหว่างผล
จำลองจาก โปรแกรม Modified ART Mod2 และ ผลจากรายงาน SOARCA 42

รูปที่ 19 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่เปอร์เซ็นต์ไทม์ต่างๆของ Ninh Thuan ที่มีค่ามากกว่า 0 mm/h.... 43

รูปที่ 20 ข้อมูลความเร็วลมที่เปอร์เซ็นต์ไทม์ต่างๆของจังหวัด Ninh Thuan..... 44

รูปที่ 21 สถานการณ์อุบัติเหตุรูปแบบต่างๆที่ใช้ในการจำลองผล 46

รูปที่ 22 ตำแหน่งการระบุข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการจำลองผล	47
รูปที่ 23 รายละเอียดตำแหน่งในการระบุข้อมูลภูมิอากาศ.....	48
รูปที่ 24 ตำแหน่งในการระบุข้อมูลต่างๆในกระบวนการ Setup	49
รูปที่ 25 ตำแหน่งแสดงผลการคำนวณรูปแบบต่างๆ.....	49
รูปที่ 26 ข้อมูลภูมิอากาศในฟอร์มการใช้งานของโปรแกรม HotSpot.....	53
รูปที่ 27 ตำแหน่งสำหรับระบุข้อมูลในการจำลองผลส่วนที่ 2	55
รูปที่ 28 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับอิทธิพลจากฝน โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ 50, 65, 75, 90, 95, 99, 100 โดยที่ระยะ 0 km คือจุดที่มีการรั่วไหลนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	56
รูปที่ 29 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับอิทธิพลของความเร็วลมเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0, 25, 50, 75, 100 โดยที่ระยะ 0 km คือจุดรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี.....	57
รูปที่ 30 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่อระยะทางที่ได้รับอิทธิพลจากระดับความเสถียรของชั้นบรรยากาศระดับ A, B, C, D, E, F โดยที่ระยะ 0 km คือจุดรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี	59
รูปที่ 31 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย.....	61
รูปที่ 32 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย.....	62
รูปที่ 33 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 3 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย.....	63
รูปที่ 34 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย.....	63
รูปที่ 35 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย	64
รูปที่ 36 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย	65
รูปที่ 37 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย	66

รูปที่ 52 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย	76
รูปที่ 53 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 5 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย	76
รูปที่ 54 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 6 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย	77
รูปที่ 55 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 7 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย	77
รูปที่ 56 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศ ไทย	78
รูปที่ 57 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย.....	79
รูปที่ 58 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย	82
รูปที่ 59 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Fangchengnag มายังประเทศไทย	82
รูปที่ 60 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย.....	84
รูปที่ 61 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Changjiang.....	85
รูปที่ 62 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Yangjiang	86
รูปที่ 63 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang	86
รูปที่ 64 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan.....	87
รูปที่ 65 ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสเคลื่อนที่มารวมกัน	87
รูปที่ 66 ผลรวมค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิละติจูดที่ 15 ถึง 18 และลองจิจูดที่ 105.5 ถึง 108.	88
รูปที่ 67 การเลือก Available Download site.....	127
รูปที่ 68 การติดตั้งฟังก์ชัน gcc	127
รูปที่ 69 การลงฟังก์ชัน make	127
รูปที่ 70 การลงฟังก์ชัน openssl	128

รูปที่ 71 การลงฟังก์ชัน shh	128
รูปที่ 72 การลงฟังก์ชัน Vim	128
รูปที่ 73 การลงฟังก์ชัน Fortran	129
รูปที่ 74 การลงฟังก์ชัน gnuplot	129
รูปที่ 75 การตรวจสอบการ compile ของโปรแกรม	130
รูปที่ 76 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนการลงทะเบียน.....	131
รูปที่ 77 หน้าเว็บไซต์ NOAA.....	131
รูปที่ 78 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนของ get a subset	132
รูปที่ 79 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนของ การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร.....	132
รูปที่ 80 ตำแหน่งติดตั้งของ wgrib2.....	134



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ทิศการเคลื่อนที่ของลม	16
ตารางที่ 2	ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฝน	23
ตารางที่ 3	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน Z ในกรณี Standard Terrain.....	24
ตารางที่ 4	ขีดจำกัดการได้รับรังสี [33].....	27
ตารางที่ 5	ความผิดปกติของร่างกายเมื่อได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสี [34].....	28
ตารางที่ 6	เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	41
ตารางที่ 7	ขนาดโรงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Surry.....	41
ตารางที่ 8	ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผล	43
ตารางที่ 9	ข้อมูลความเร็วลม.....	44
ตารางที่ 10	ข้อมูลวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี	45
ตารางที่ 11	ข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ	45
ตารางที่ 12	ค่ากัมมันตภาพ Cs-137 ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (source term)	52
ตารางที่ 13	ปัจจัยที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้มาก	59
ตารางที่ 14	ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang	64
ตารางที่ 15	ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang ...	68
ตารางที่ 16	ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang	72
ตารางที่ 17	ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan	78
ตารางที่ 18	รายละเอียดการวิเคราะห์ผลที่คงความอนุรักษ์นิยม	95

ตารางที่ 18 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย	102
ตารางที่ 19 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย	104
ตารางที่ 20 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย	107
ตารางที่ 21 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย.....	110
ตารางที่ 22 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Changjiang.....	114
ตารางที่ 23 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Yangjiang	116
ตารางที่ 24 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Fangchenggang	119
ตารางที่ 25 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Ninh Thuan.....	122
ตารางที่ 26 เงื่อนไขสำหรับวิเคราะห์ทิศทางของลม	135
ตารางที่ 27 เงื่อนไขสำหรับคำนวณ day incoming solar radiation.....	136
ตารางที่ 28 เงื่อนไขสำหรับคำนวณความเสถียรชั้นบรรยากาศ.....	136

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนำประกอบไปด้วยที่มาและความสำคัญของงานวิจัย ซึ่งกล่าวถึงอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอดีต ผลกระทบจากการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ แนวทางในการวิเคราะห์ผล รวมทั้งจุดประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการทำงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในภูมิภาคเอเชีย เนื่องจากเป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตปริมาณไฟฟ้าได้สูงในระยะเวลาสั้นและมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำ [1] จึงทำให้ปัจจุบัน ภูมิภาคเอเชีย มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่กำลังเดินเครื่อง 128 โรง และมีแผนในการก่อสร้างอีก 89 โรง [2] แต่อย่างไรก็ตามจากเหตุการณ์อุบัติเหตุของโรงไฟฟ้าเชอร์โนบิลในปี 1986 และ ฟูกูชิมะ ไดอิจิในปี 2011 แสดงให้เห็นว่าอุบัติเหตุจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีวิตของมนุษย์ [3]

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในขณะที่เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงสามารถกระจายตัวไปตามทิศทางลมในชั้นบรรยากาศ [4] และเกิดการสะสมตัวสู่สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ พืช อาหาร น้ำที่ใช้สำหรับอุปโภคบริโภค และอากาศที่ใช้สำหรับหายใจ เกิดการเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสี [5] ส่งผลให้ประชาชนไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และต้องอพยพไปยังพื้นที่ปลอดภัย [6] ผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าสารกัมมันตรังสีส่งผลกระทบต่ออาการดำรงชีวิตของมนุษย์ เมื่อพิจารณาจำนวนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในเขตประเทศเพื่อนบ้านของไทยพบว่า มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั้งหมด 4 แห่งตั้งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางประเทศไทย ในช่วงรัศมี 1,500 กิโลเมตรโดยประมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย โรงไฟฟ้า Changjiang, Fangchenggang และ Yangjiang ในประเทศจีน และโรงไฟฟ้า Ninh Thuan ในประเทศเวียดนาม ซึ่งปัจจุบันได้มีการยกเลิกการก่อสร้างแล้ว [7] แต่อย่างไรก็ตามเพื่อผลิตปริมาณไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้งานภายในประเทศในอนาคต โรงไฟฟ้า Ninh Thuan มีความเป็นไปได้ที่จะกลับมาก่อสร้างอีกครั้ง จากงานวิจัยของ Marzo ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ แสดงให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะสามารถกระจายตัวไปได้ไกลถึงทวีปยุโรป ซึ่งมีระยะห่างจากจุดเกิดเหตุ 8,000 km โดยประมาณ [8] ดังนั้นหากโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งที่ได้กล่าวมาข้างต้น เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงจนเป็น

สาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม มีความเป็นไปได้ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านั้นจะเคลื่อนที่มายังประเทศไทยและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและประเมินผลกระทบทางรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งเป็นสิ่งสำคัญที่ประเทศไทยควรศึกษา การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ได้ โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศโดยใช้โปรแกรมแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผล เช่น T. Haste ได้ทำการประเมินผลกระทบของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในอุบัติเหตุ Three Mile Island โดยใช้โปรแกรม MELCOR และ MACCS ในการจำลองผล[9] T. Homma ได้ใช้ผลจากการจำลองของโปรแกรม OSCAAR ในการวิเคราะห์อัตราการเสียชีวิตของประชาชนจากโรคมะเร็งในบริเวณพื้นที่นอกเขตโรงไฟฟ้าเมื่อประชาชนได้รับผลกระทบจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง[10] X. Geng ได้ใช้โปรแกรม FLEXPART ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และประเมินค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิแต่ละบริเวณที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการสะสมตัว[11] แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์เหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง และในหลายโปรแกรมจำเป็นต้องใช้ข้อมูลภูมิอากาศ 3 มิติซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องใช้โปรแกรมทางภูมิศาสตร์ในการจำลองผลและมีค่าใช้จ่ายในปริมาณมาก

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่ง โดยใช้กระบวนการในการวิเคราะห์ผลสองกระบวนการร่วมกัน โดยกระบวนการแรกคือการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากข้อมูลภูมิอากาศ ซึ่งวิธีการนี้จะนำข้อมูลภูมิอากาศ บริเวณตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดอุบัติเหตุมาใช้สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งคะแนนที่ได้จากการคำนวณบ่งบอกถึงความสามารถในการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในแต่ละทิศทาง กระบวนการที่สองคือการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโปรแกรม HotSpot ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการจำลองผล และไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งาน โดยในการจำลองผลจะพิจารณาในกรณีโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงจากการสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก (long term station blackout) โดยเลือกทำการศึกษานิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม-137 (Cesium-137) เนื่องจากเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันที่ส่งผลกระทบในระยะยาวเพราะมีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี และมีสถานะเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถละลายน้ำได้ [12] ซึ่งมีโอกาสเกิดการรั่วไหลได้มากเมื่อเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง ส่วนข้อมูล

ภูมิอากาศที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม และความเสถียรของชั้นบรรยากาศของจังหวัด Ninh Thuan ประเทศเวียดนาม และจังหวัด Changjiang, Yanagjiang, Fangchenggang ประเทศจีน ผลที่ได้จากทั้งสองกระบวนการจะถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี วิเคราะห์หาพื้นที่ภายในประเทศไทยที่มีโอกาสได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุด และประเมินผลกระทบทางรังสีที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนภายในประเทศในบริเวณดังกล่าว เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนในการจัดการอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อจำลองการกระจายตัวในชั้นบรรยากาศของซีเซียม-137 ที่ปลดปล่อยจากอุบัติเหตุสมมติในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ประเทศจีนและเวียดนาม และประเมินผลกระทบทางรังสีต่อประเทศไทย

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ศึกษาการกระจายตัวของซีเซียม-137 (Cesium-137) ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณี long term station blackout
- 1.3.2 ใช้โปรแกรม ART Mod 2 จำลองผลหาสัดส่วนของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม-137 ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
- 1.3.3 ใช้โปรแกรม Hotspot จำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศและคำนวณปริมาณสมมูลยังผลสุทธิ (Total effective dose equivalent; TEDE)
- 1.3.4 พื้นที่ศึกษาที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ในประเทศจีนเช่นเขตพื้นที่ Changjiang เขตพื้นที่ Fangchenggang และเขตพื้นที่ Yangjiang เป็นต้น
- 1.3.5 พื้นที่ศึกษาที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ในประเทศเวียดนามเขตพื้นที่ Ninh Thuan
- 1.3.6 ใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากการตรวจวัดจริงเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ปี
- 1.3.7 วิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่บุคคลได้รับในแต่ละพื้นที่ศึกษา
- 1.3.8 ประเมินผลกระทบทางรังสีต่อประเทศไทย

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยเกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากอุบัติเหตุระดับรุนแรง ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ปัจจัยทางสภาพอากาศที่ส่งผลกระทบต่อ การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ และผลกระทบทางรังสี
- 1.4.2 คำนวณค่ากัมมันตภาพที่รั่วไหลออกจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และดาวนโหลด ข้อมูลภูมิอากาศ บริเวณ ตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน
- 1.4.3 จำลองลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเพื่อศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
- 1.4.4 วิเคราะห์หาพื้นที่ของประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบทางรังสีมากที่สุดพร้อมทั้งประเมินผลกระทบทางรังสีของประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว
- 1.4.5 สรุปการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถคาดการณ์ลักษณะการกระจายตัว และเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทยในกรณีที่โรงไฟฟ้านั้นเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงได้ พร้อมทั้งสามารถคาดการณ์พื้นที่ในประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบทางรังสีสูง และสามารถประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวมีโอกาสได้รับได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย อุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นในอดีต การวิเคราะห์ความปลอดภัย การเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สู่สิ่งแวดล้อม การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ ตลอดจน ผลกระทบทางรังสีที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณที่มีการปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นในอดีต

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นหนึ่งในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนรูปแบบใหม่ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีกระบวนการสร้างความร้อนโดยใช้ปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมและนิวตรอนพลังงานต่ำ ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดความร้อนปริมาณมากส่งผลให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ปริมาณมากในระยะเวลาสั้น แต่อย่างไรก็ตามการสร้างความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชันก่อให้เกิดผลผลิตฟิชชันซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นเมื่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อาจเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม ในอดีตที่ผ่านมา มีอุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด 3 เหตุการณ์โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในวันที่ 22 มีนาคม 1979 ได้เกิดอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขึ้นที่ Three Mile island [13] ซึ่งเป็นอุบัติเหตุที่เกิดจากการทำงานที่ล้มเหลวของปั้มน้ำในวัฏจักรน้ำหล่อเย็นที่หนึ่งของโรงไฟฟ้า โดยปั้มน้ำที่หยุดการทำงานส่งผลให้น้ำไม่ถูกส่งไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) และเครื่องกำเนิดไอน้ำไม่สามารถผลิตไอน้ำได้ เป็นผลให้กังหันไอน้ำ (Turbine) และแกนปฏิกรณ์ (Reactor) หยุดการทำงาน ในขณะที่เดียวกันการสูญเสียการทำงานของปั้มน้ำให้ความดันภายในวัฏจักรที่หนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อควบคุมความดันที่ผิดปกติ วาล์วระบายความดัน (relief valve) จึงถูกเปิดออกเพื่อระบายความดัน และปิดเมื่อความดันภายในระบบกลับมายังจุดที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมการเปิดปิดวาล์วเกิดความเสียหายส่งผลให้วาล์วระบายความดันถูกเปิดค้างไว้ เป็นผลให้น้ำระบายความร้อนในวัฏจักรแรกเกิดการรั่วไหลออกสู่ภายนอก การสูญเสียน้ำหล่อเย็นส่งผลให้ปั้มน้ำมีการทำงานที่ผิดปกติ เจ้าหน้าที่ภายในโรงไฟฟ้าได้ตัดสินใจหยุดการทำงานของปั้มน้ำเพื่อ

ป้องกันการสูญเสียปี่ม และในเวลาต่อมาพวกเขาได้หยุดการทำงานของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน จึงเป็นสาเหตุให้แกนปฏิกรณ์เกิดการหลอมเหลวและส่งผลให้นิวเคลียร์กัมมันตรังสีบางส่วนเกิดการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม

วันที่ 26 เมษายน 1986 ได้เกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ขึ้นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบีล [14] ซึ่งเหตุเกิดขึ้นจากการทดลองภายในโรงไฟฟ้า เพื่อต้องการทราบว่าในกรณีที่เกิดไฟดับจากตัวจ่ายไฟฟ้าหลัก กังหันไอน้ำสามารถหมุนและป้อนไฟฟ้าให้กับปี่มน้ำได้นานเท่าใด แต่เนื่องจากเจ้าหน้าที่ขาดการอบรมวิธีการทดสอบ ประกอบกับการตัดสินใจปิดระบบความปลอดภัย จึงเป็นผลให้การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ขาดเสถียรภาพและแท่งควบคุมเกือบทั้งหมดถูกดึงออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ เจ้าหน้าที่ได้ทำการแก้ไขโดยการสอดแท่งควบคุมทั้งหมดกลับเข้าไปยังแกนเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วทำให้เครื่องปฏิกรณ์ดับอย่างกะทันหัน แต่อย่างไรก็ตามการใส่แท่งควบคุมอย่างฉับพลันส่งผลให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้านล่างของแกนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและอุณหภูมิภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงเกินขนาดในระยะเวลาสั้น เป็นสาเหตุให้เกิดไอน้ำปริมาณมากและเกิดการระเบิดในเวลาต่อมา เป็นสาเหตุให้นิวเคลียร์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลสู่ชั้นบรรยากาศ

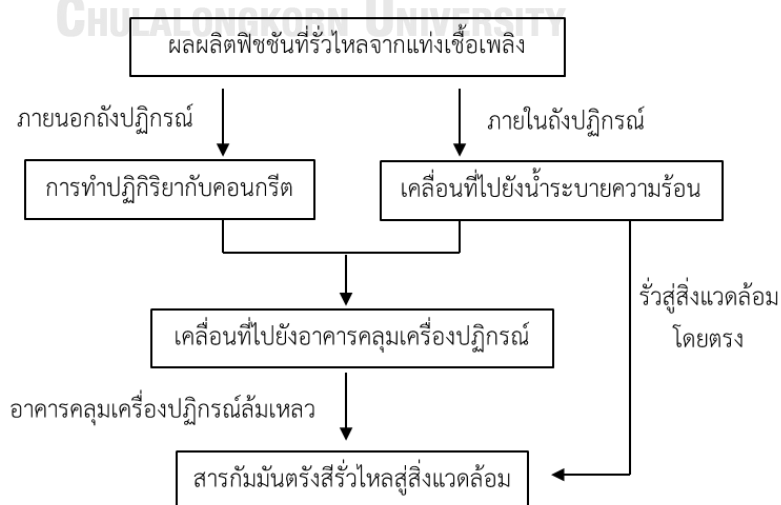
วันที่ 11 มีนาคม 2011 เกิดอุบัติเหตุขึ้นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ [15] โดยสาเหตุเกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวขนาด 9.0 ที่ภาคตะวันออกเฉียงของประเทศญี่ปุ่นซึ่งมีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ที่มหาสมุทรแปซิฟิก ส่งผลให้เกิดคลื่นสึนามิที่มีความสูง 14 เมตรพัดเข้าทำลายชายฝั่ง โดยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ คลื่นสึนามิส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าไม่ทำงานทำให้ระบบไม่สามารถส่งน้ำหล่อเย็นไประบายความร้อนเครื่องปฏิกรณ์ในหน่วยที่ 1, 2 และ 3 ได้ เป็นผลให้เชื้อเพลิงภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการหลอมเหลว ในขณะเดียวกันปลอกเชื้อเพลิงซึ่งทำจากเซอร์โคเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำส่งผลให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นภายในถังควบคุมความดัน และในเวลาต่อมาเกิดการรั่วไหลไปยังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และทำปฏิกิริยากับอากาศส่งผลให้เกิดการระเบิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์หน่วยที่ 1 หน่วยที่ 3 และหน่วยที่ 4 ของโรงไฟฟ้างดังกล่าว เป็นผลให้นิวเคลียร์กัมมันตรังสีรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม

2.2 อุบัติเหตุระดับรุนแรง (severe accident) [16]

อุบัติเหตุระดับรุนแรง คือ อุบัติเหตุที่สามารถส่งผลให้แกนปฏิกรณ์ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดการสลายตัวเนื่องจากการแตกออกจากแกนปฏิกรณ์อย่างรุนแรงหรือเกิดการหลอมละลายของแกนปฏิกรณ์อันเป็นสาเหตุมาจากการสูญเสียระบบระบายความร้อน[17]โดยลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงสามารถแบ่งได้เป็นสองระยะโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ระยะภายในถังปฏิกรณ์ (In-vessel) เมื่อแกนปฏิกรณ์สูญเสียการระบายความร้อนจากระบบหล่อเย็นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น และปลอกหุ้มเชื้อเพลิงจะเกิดความเสียหาย เป็นสาเหตุให้ผลผลิตฟิชชันที่เกิดจากการเดินเครื่องของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งสะสมตัวอยู่ระหว่างแท่งเชื้อเพลิงและปลอกหุ้มเชื้อเพลิง เช่น ธาตุซีซอน, ธาตุคริปทอน, ธาตุไอโอดีน, ธาตุซีเซียม เกิดการระเหยสู่ถังปฏิกรณ์ และเกิดการปนเปื้อนน้ำระบายความร้อน ก่อให้เกิดการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีไปสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสิ่งแวดล้อมตามรอยรั่วของท่อส่งไอน้ำตามลักษณะการเกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้า

ระยะภายนอกถังปฏิกรณ์ (ex-vessel) เมื่อแกนปฏิกรณ์สูญเสียระบบระบายความร้อนเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงเกิดการหลอมเหลวและเกิดการสะสมตัวที่ก้นของถังปฏิกรณ์ ในขณะเดียวกันความร้อนจากการหลอมเหลวของแท่งเชื้อเพลิงจะส่งผลให้ถังปฏิกรณ์เกิดความเสียหาย แท่งเชื้อเพลิงที่เกิดการหลอมเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนล่างของถังควบคุมความดัน และส่งผลให้ถังควบคุมความดันเกิดการหลอมละลาย ในช่วงนี้น้ำระบายความร้อนที่มีการเปราะเปื้อนผลผลิตฟิชชันจากแท่งเชื้อเพลิงจะเกิดการรั่วไหลสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และแท่งเชื้อเพลิงที่เกิดการหลอมเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังช่องว่างที่ทำด้วยคอนกรีต (cavity) ที่ถูกสร้างไว้เพื่อจัดเก็บเชื้อเพลิงหลอมเหลว แต่ในขณะเดียวกันแท่งเชื้อเพลิงที่เกิดการหลอมเหลวเหล่านั้นสามารถทำปฏิกิริยากับคอนกรีตและก่อให้เกิดรอยรั่วขึ้นได้ ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางส่วนภายในช่องว่างคอนกรีตเกิดการรั่วไหลสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม โดยสามารถแสดงลำดับการเกิดอุบัติเหตุทั้งระยะภายในและภายนอกถังปฏิกรณ์ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับเหตุการณ์การเกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม

อุบัติเหตุระดับรุนแรงเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเกิดรอยรั่วของท่อส่งน้ำระบาย ความร้อน การสูญเสียการทำงานของปั๊มน้ำ การสูญเสียระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน เป็นต้น งานวิจัยนี้เน้นศึกษาไปที่อุบัติเหตุระดับรุนแรงที่มีสาเหตุมาจากการสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก โรงไฟฟ้า โดยเหตุการณ์ดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3 การสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกโรงไฟฟ้า (Station blackout) [18]

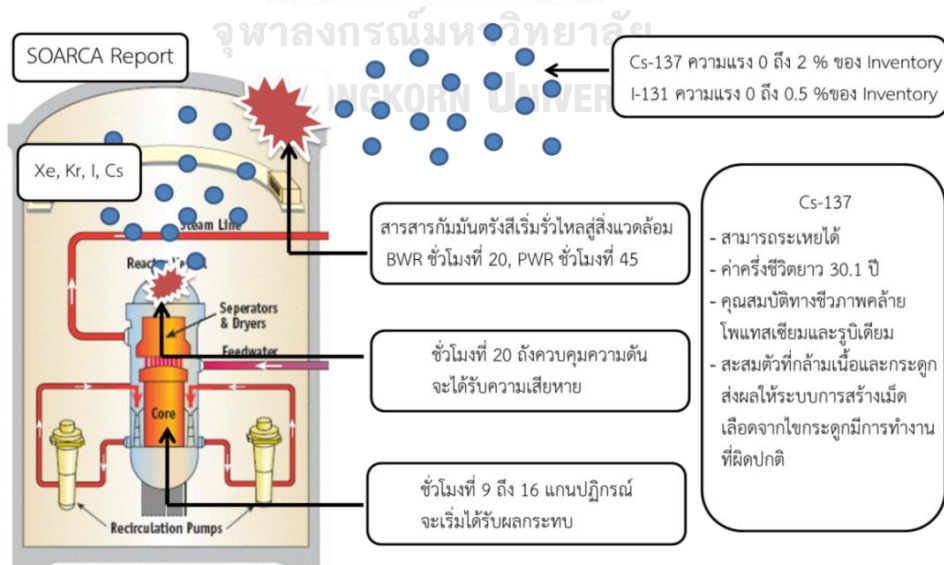
การสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกโรงไฟฟ้า เป็นอุบัติเหตุที่มีสาเหตุมาจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น การที่ระบบจ่ายไฟภายนอกโรงไฟฟ้าได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์เพลิงไหม้ น้ำท่วม หรือแผ่นดินไหว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้เน้นศึกษาอุบัติเหตุที่เกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเป็นเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดผลกระทบที่มีความรุนแรงและส่งผลกระทบต่อความเสียหายในบริเวณกว้าง โดยการสูญเสียแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกจัดเป็นอุบัติเหตุระดับรุนแรงชนิดหนึ่ง เนื่องจากผลกระทบของแผ่นดินไหวส่งผลให้แหล่งผลิตไฟฟ้าภายนอกโรงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับเกิดความเสียหาย และไม่สามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปยังโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ เป็นผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการทำงานบางส่วนภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หยุดการทำงาน เช่น ปั๊มน้ำ สเปรย์น้ำ พัดลมระบายความร้อน (Fan cooler) ระบบกังหันไอน้ำ (turbine system) เป็นต้น และมากกว่านั้นการสูญเสียแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกส่งผลให้ระบบความปลอดภัยภายในโรงไฟฟ้าหยุดการทำงาน โดยอุบัติเหตุการสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกโรงไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 Short term station blackout (STSBO) เป็นเหตุการณ์ที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวขนาด 0.5 – 1 g (PGA¹) โดยผลที่เกิดขึ้น คือ โรงไฟฟ้าสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก และแหล่งสำรองไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้ากะทันหัน ส่งผลให้แกนปฏิกรณ์เกิดความเสียหายขึ้น ชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 3 หลังจากเกิดอุบัติเหตุ จากนั้นชั่วโมงที่ 8 ถึงปฏิกรณ์เกิดความเสียหายเป็นผลให้นิวเคลียร์กัมมันตรังสีเกิดการฟุ้งกระจายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และสุดท้ายในชั่วโมงที่ 25 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เกิดความเสียหายเป็นสาเหตุให้นิวเคลียร์กัมมันตรังสีเกิดการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม

¹ PGA (peak ground acceleration) ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับระดับความแรงของแผ่นดินไหวโดยค่าในช่วง 0.34 - 0.65 และ 0.65 - 1.24 มีขนาดแผ่นดินไหวระดับ 8 และ 9 Mercalli ตามลำดับ

2.3.2 Long term station blackout (LTSBO) เป็นเหตุการณ์ที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวขนาด 0.3 – 0.5 g (PGA) ผลที่เกิดขึ้นคือโรงไฟฟ้าสูญเสียแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก แต่ยังคงมีแหล่งไฟฟ้าสำรองภายในโรงไฟฟ้า จึงทำให้ในระยะเริ่มต้นโรงไฟฟ้าไม่ได้รับผลกระทบ และเริ่มได้รับผลกระทบเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองหยุดการทำงาน โดยอุบัติเหตุลักษณะนี้ส่งผลให้แกนปฏิกรณ์เกิดความเสียหายขึ้นชั่วโมงที่ 9 นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มเกิดการรั่วไหลสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ชั่วโมงที่ 16 หลังจากเกิดอุบัติเหตุ จากนั้นอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เกิดความเสียหายและนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมชั่วโมงที่ 20 และชั่วโมงที่ 45 ในโรงไฟฟ้าเครื่องปฏิกรณ์น้ำเดือด (BWR) และโรงไฟฟ้าเครื่องปฏิกรณ์น้ำอัดแรงดัน (PWR) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุทั้งสองเหตุการณ์พบว่า LTSBO เป็นอุบัติเหตุที่มีโอกาสเกิดมากกว่า STSBO โดยค่า Core damage frequency (CDF) ของ STSBO มีค่าเพียง 3×10^{-7} per reactor-year ในขณะที่ LTSBO มีค่า 3×10^{-6} per reactor-year ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงเลือกศึกษาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณี LTSBO โดยเลือกศึกษาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม-137 (Cesium-137) เนื่องจากเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถละลายน้ำได้และมีโอกาสเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมได้สูง อีกทั้งยังเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ส่งผลกระทบในระยะยาวเนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตยาวถึง 30 ปี ซึ่งค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม-137 ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าไม่เกิน 1 เปรอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพซีเซียม-137 ทั้งหมดภายในแกนปฏิกรณ์ โดยสามารถแสดงรายละเอียดช่วงเวลาการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์จากเหตุการณ์ Station blackout ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ช่วงเวลาการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์จากเหตุการณ์ Station blackout

แต่อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นสามารถวางแผนในการจัดการ และ หาแนวทางในการป้องกันได้ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ความปลอดภัย (Safety analysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำการจำลองอุบัติเหตุที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าเพื่อหาแนวทางในการป้องกันหรือบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4 การวิเคราะห์ความปลอดภัย (Safety analysis)

การวิเคราะห์ความปลอดภัยเป็นกระบวนการที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาปัญหาหรือผลกระทบจากอุบัติเหตุที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในโรงไฟฟ้า เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ในการออกแบบระบบความปลอดภัยหรือหาแนวทางในการจัดการอุบัติเหตุ โดยการวิเคราะห์ความปลอดภัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนประกอบไปด้วย

2.4.1 Deterministic safety analysis [19] เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของอุปกรณ์หรือระบบภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หลังจากเกิดอุบัติเหตุที่ในแต่ละรูปแบบ โดยมุ่งเน้นทางด้านวิเคราะห์ พฤติกรรมของนิวตรอน, พฤติกรรมของสสารที่เคลื่อนที่ภายในอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า (thermal hydraulic), พฤติกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี, พฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (thermomechanical) โครงสร้างของอาคาร และอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า เหตุการณ์ที่ใช้วิเคราะห์ใน Deterministic safety analysis สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Design Basis Accident (DBA) คืออุบัติเหตุตามเงื่อนไขการออกแบบของโรงไฟฟ้า โดยความเสียหายของเชื้อเพลิงและการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยสามารถจัดกลุ่มอุบัติเหตุในรูปแบบ DBA ได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ Loss of coolant accident (LOCA) เป็นอุบัติเหตุสมมุติที่ระบบมีการสูญเสียน้ำระบายความร้อนเกินกว่าเกณฑ์ที่โรงไฟฟ้าออกแบบ การจำลองผลเน้นไปยังท่อของระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้า กลุ่มที่สองคือ Non- Loss of coolant accident (NON-LOCA) เป็นอุบัติเหตุสมมุติที่เกิดจากการทำงานที่ผิดพลาดของเจ้าหน้าที่ภายในโรงไฟฟ้าหรือความเสียหายของอุปกรณ์ที่นำไปสู่การสูญเสียน้ำระบายความร้อน

Beyond Design Basis Event (BDBE) เป็นอุบัติเหตุสมมุติที่ออกแบบให้มีความรุนแรงมากกว่า DBA โดยส่วนใหญ่เป็นอุบัติเหตุรูปแบบใหม่ที่ใช้สำหรับขอใบอนุญาตหรือเป็นอุบัติเหตุที่เป็นปัญหาทางด้านความปลอดภัย เช่น การเกิดการรั่วไหลของท่อน้ำในระบบระบายความร้อนพร้อมกันหลายๆท่อ (Multiple Steam generator tube rupture) การสูญเสียระบบกำจัดความร้อน (Loss of heat removal) การสูญเสียระบบส่งน้ำทั้งหมดภายในโรงไฟฟ้า (Total Loss of Feed Water) เป็นต้น

Design extension condition (DEC) เป็นอุบัติเหตุสมมุติที่ถูกรออกแบบขึ้นให้มีความรุนแรงมากกว่า Design Basis Accident และเป็นส่วนหนึ่งของ Beyond Design Basis Event โดยส่วนใหญ่ Design extension condition จะออกแบบอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาการออกแบบของสถานประกอบการเพื่อป้องกันการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีให้อยู่ในขีดจำกัดที่ยอมรับได้ การออกแบบอุบัติเหตุของ DEC มีการพิจารณาที่ซับซ้อน โดยมีการพิจารณาทั้งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในโรงไฟฟ้า และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายนอกโรงไฟฟ้ารวมถึงการพิจารณาอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการเก็บเชื้อเพลิง

Severe accident คือ อุบัติเหตุที่สามารถส่งผลให้แกนปฏิกรณ์ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดการสลายตัวเนื่องจากการแตกออกจากแกนปฏิกรณ์อย่างรุนแรงหรือเกิดการหลอมละลายของแกนปฏิกรณ์อันเป็นสาเหตุมาจากการสูญเสียระบบระบายความร้อน

2.4.2 Probabilistic safety analysis (PSA) [20] เป็นการวิเคราะห์ผลความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุ หรือความเสี่ยงในรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาจากผลรวมของโอกาสที่เกิดความเสียหายจากเหตุการณ์เริ่มต้นของอุบัติเหตุไปจนถึงเหตุการณ์สุดท้าย เพื่อใช้สำหรับประเมินความเสี่ยงในแต่ละส่วนของโรงไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา และนำผลที่ได้ไปใช้ในการวางแผนจัดการอุบัติเหตุที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลของ PSA มีทั้งหมด 3 ส่วนโดยมีรายละเอียดดังนี้

Core Damage Frequency เป็นการวิเคราะห์ผลส่วนแรกของ PSA การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้มุ่งเน้นศึกษาในด้านโอกาสความเสี่ยงที่นำไปสู่การหลอมละลายของแท่งเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ผลส่วนใหญ่เน้นทางด้านวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบภายในโรงไฟฟ้า โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปแบบโอกาสที่แท่งเชื้อเพลิงเกิดการหลอมเหลว (Core Damage Frequency) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดขึ้นจากผลรวมโอกาสการเกิดความผิดพลาดของระบบตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้นไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ส่งผลให้แกนเชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย

Radiation Release Rate to Ex-Containment เป็นขั้นตอนวิเคราะห์ผลในส่วนที่สองของ PSA โดยขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับประสิทธิภาพในการกักเก็บ หรือลดความรุนแรงของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่แกนปฏิกรณ์เกิดการหลอมละลาย โดยผลการวิเคราะห์ Core Damage Frequency ในขั้นตอนที่ผ่านมาจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับวิเคราะห์ผลในกระบวนการนี้ ซึ่งการวิเคราะห์ผลส่วนใหญ่เน้นศึกษาในด้านความเสี่ยงของระบบความปลอดภัยภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ พฤติกรรมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์สู่สิ่งแวดล้อม

Radiation Exposure and Frequency to public and environment เป็นขั้นตอนวิเคราะห์ผลในส่วนที่สามของ PSA และเป็นขั้นตอนที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ผู้ทำวิจัยทำอยู่ในปัจจุบัน ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมจากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่สองถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผล ในโปรแกรมจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ จากนั้นผลที่ได้จากการจำลองผลจะถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบทางรังสีที่ประชาชนได้รับ โดยโปรแกรมจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีทั้งมีอยู่สองรูปแบบคือ Lagrangian Particle Dispersion Models (LPDM) และ Gaussian model โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองผลแต่ละชนิดสามารถแสดงดังหัวข้อถัดไป

2.5 แบบจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ [21]

โปรแกรมจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด เช่น MACCS , OSCAAR, HMD BURN, HotSpot เป็นต้น แต่อย่างไรถึงแม้จำนวนโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลในด้านนี้จะมีจำนวนมากแต่รูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยรูปแบบที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศในปัจจุบันมีทั้งหมดสองรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 Gaussian Model เป็นรูปแบบวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่พัฒนามาจาก Diffusion equation ของ Adolph Fick และพัฒนาโดย Sutton และ Pasquill โดยแบบจำลองลักษณะนี้จะทำการจำลองผลโดยสมมติให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลมีค่ากัมมันตภาพคงที่ตลอดเวลา และกำหนดให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลมีการลอยตัวสูงขึ้นจากจุดรั่วไหลจากนั้นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมที่มีความเร็วลมคงที่ โดยพิจารณาให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการกระจายตัวออกจากทิศที่ลมเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวราบในรูปแบบ Gaussian ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมมีค่าความเข้มข้นลดลง การจำลองผลในรูปแบบ Gaussian พิจารณาให้สภาพอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาอยู่ในสถานะคงที่และสามารถจำลองการกระจายตัวได้ดีในช่วงระยะไม่เกิน 200 km

2.5.2 Lagrangian dispersion model เป็นรูปแบบในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย German Weather Service (DWD) การวิเคราะห์ผลในรูปแบบนี้ใช้อุณหภูมิจำนวนมากเป็นตัวแทนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหล และใช้ข้อมูลลมในรูปแบบ 3 มิติที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และ ข้อมูลความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศจากโปรแกรมจำลองผลทางภูมิอากาศเป็นข้อมูลนำเข้า การจำลองผลจะจำลองให้จำนวนอนุภาคที่ได้กล่าวมาข้างต้นเคลื่อนที่ไปตามวิถีการโคจรที่ขึ้นกับทิศทางลมและความแปรปรวนของสภาพอากาศโดยใช้เทคนิค Monte Carlo และพิจารณาการลดลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้น

บรรยากาศจากปัจจัย 3 ปัจจัยประกอบไปด้วย การสะสมตัวแบบเปียก การสะสมตัวแบบแห้ง และการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งความหนาแน่นของอนุภาคในแต่ละตำแหน่งบ่งบอกถึงความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ ตำแหน่งนั้น การจำลองผลในรูปแบบ Lagrangian dispersion model สามารถจำลองผลได้หลายช่วงระยะตั้งแต่ระยะ น้อยกว่า 10 km ไปจนถึงมากกว่า 100 km

จากรายละเอียดที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการจำลองผลจากรูปแบบ Lagrangian dispersion มีความละเอียดและน่าจะมีความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากใช้ข้อมูลภูมิอากาศ 3 มิติและข้อมูลความผันผวนของสภาพอากาศในการวิเคราะห์ผล แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลเหล่านั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมจำลองผลทางภูมิอากาศซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทยได้ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ โปรแกรม HotSpot ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้รูปแบบการกระจายตัวแบบ Gaussian เป็นโปรแกรมในการจำลองผล โดยโปรแกรม HotSpot [22] เป็นโปรแกรมที่กองทุนกระทรวงพลังงาน ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งโปรแกรมถูกออกแบบมาให้สามารถคาดการณ์ระดับค่ากัมมันตภาพที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุทางรังสีรูปแบบต่างๆ เช่น การระเบิดของพลูโตเนียม การระเบิดของยูเรเนียม การเกิดเพลิงไหม้พลูโตเนียม การเกิดเพลิงไหม้ยูเรเนียม การรั่วไหลของทริเทียม และสามารถจำลองผลการกระจายตัวในกรณีที่เป็น General ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดอุบัติเหตุโดยมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีรวมกันมากกว่า 2 ชนิด พร้อมทั้งยังสามารถออกแบบสถานการณ์จำลอง และสร้างนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการจำลองในรูปแบบผลรวมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้มากถึง 49 นิวไคลด์ โดยในการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในโปรแกรม HotSpot จะใช้ข้อมูลภูมิอากาศซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วลม ทิศทางลม ความเสถียรของชั้นบรรยากาศ ประกอบการจำลองผล ทำให้ผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกับสภาพอากาศที่ระบุในตัวโปรแกรม โดยรายละเอียดในการวิเคราะห์ผลและสมการที่ใช้ในการจำลองผลสามารถแสดงได้ในหัวข้อถัดไป

2.6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์อาศัยแรงดันภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เป็นแรงส่งให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการฟุ้งกระจายไปสู่ชั้นบรรยากาศ นิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้เมื่อเกิดการลอยตัวในชั้นบรรยากาศจะกระจายตัวที่ไปยังบริเวณต่างๆโดยอาศัยลมเป็นพาหะในการเคลื่อนที่ โปรแกรม HotSpot ถูกนำมาใช้เพื่อ ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านั้น โดยโปรแกรมจะทำการจำลองให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมในแนวแกน X และเกิดการแพร่กระจายออกในแนวราบและแนวตั้งในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ที่กระจายตัวในชั้นบรรยากาศจากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไนโคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมในแนวแกน X ไนโคลด์กัมมันตรังสีที่แพร่กระจายตัวในแนวราบ (จากแกน X ไปแกน Y) ไนโคลด์กัมมันตรังสีที่แพร่กระจายในแนวตั้ง (จากแกน X ไปแกน Z) ไนโคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการสะท้อนที่พื้น และการสลายตัวของไนโคลด์กัมมันตรังสีในขณะที่สารลอยตัวอยู่บนชั้นบรรยากาศ[22] จากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงสมการคำนวณค่าความเข้มข้นไนโคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศได้ตั้งสมการที่ 1

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (1)$$

C คือ ความเข้มข้นของไนโคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศ [Ci-s/m³]

Q คือ ความเข้มข้นของไนโคลด์กัมมันตรังสีที่จุดรั่วไหล(Releases point) [Ci]

H_e คือ ความสูงสุทธิผลของจุดที่รั่วออกสู่บรรยากาศ (Effective release height) [m]

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของไนโคลด์กัมมันตรังสี [s⁻¹]

x คือ ระยะทางการกระจายตัวของไนโคลด์กัมมันตรังสีตามทิศทางลม [m]

y คือ ระยะทางการกระจายตัวของไนโคลด์กัมมันตรังสีในแนวราบ [m]

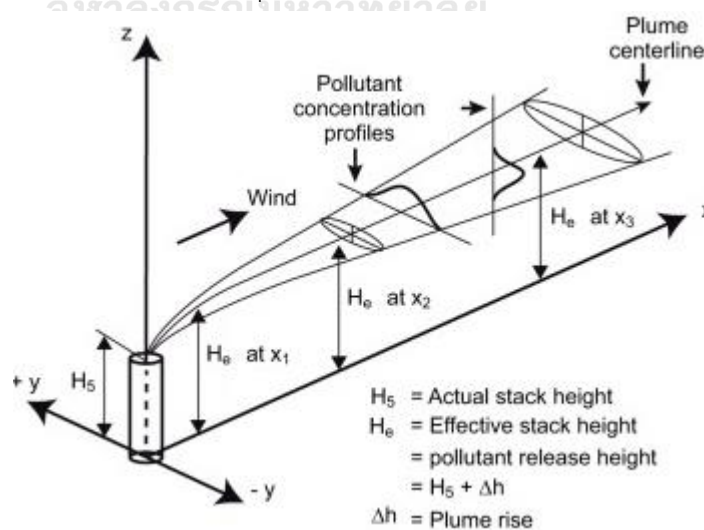
z คือ ระยะการกระจายตัวของไนโคลด์กัมมันตรังสีในแนวตั้ง [m]

σ_y คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไนโคลด์กัมมันตรังสีในแนวราบ [m]

σ_z คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไนโคลด์กัมมันตรังสีในแนวตั้ง [m]

u คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงประสิทธิผล [m/s]

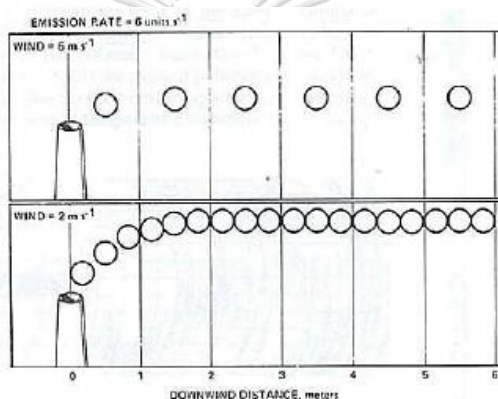
DF(x) คือ แฟกเตอร์การลดลงของกลุ่มหมอกไนโคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 3 การกระจายตัวของกลุ่มหมอกไนโคลด์กัมมันตรังสีในรูปแบบเกาส์เซียน [23]

2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

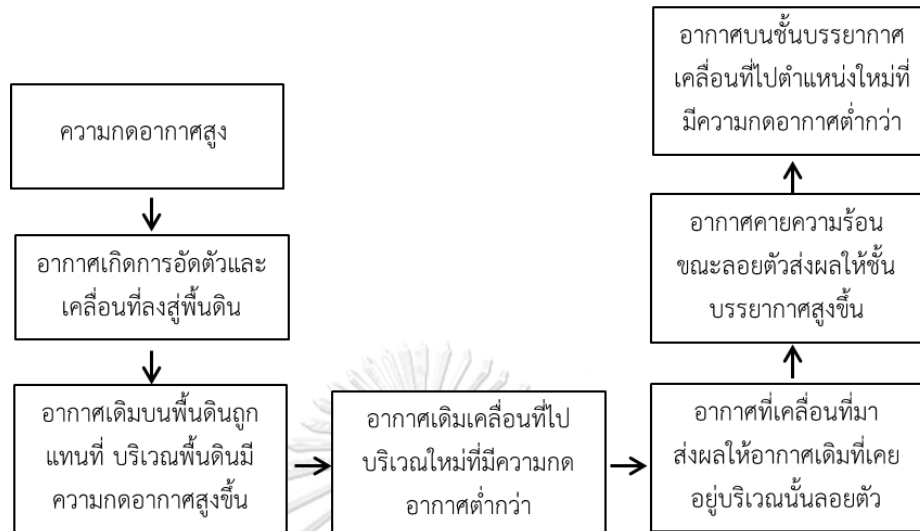
2.7.1 ความเร็วลม ความเร็วลมและทิศทางลมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี [24] เนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวบนชั้นบรรยากาศเคลื่อนที่ไปตามทิศทางลม และมีความเร็วในการเคลื่อนที่แปรผันตรงกับความเร็วลม ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเร็วลมสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณีประกอบไปด้วย ความเร็วลมต่ำและความเร็วลมสูง โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วลมต่ำจะเคลื่อนที่ได้ช้า ส่งผลให้ความหนาแน่นต่อปริมาตรอากาศของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าสูงใกล้กับบริเวณที่เกิดการรั่วไหล ในขณะที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้รับอิทธิพลจากลมที่มีความเร็วสูงจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วทำให้ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และสามารถกระจายตัวไปได้ไกล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเข้มข้นของมลพิษ [25]

2.7.2 การเคลื่อนที่ของลม [26] ลมเป็นปัจจัยสภาพอากาศชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในชั้นบรรยากาศเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความดันอากาศและความแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของลมมีอยู่สองแบบคือการเคลื่อนที่ในแนวราบและการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งการเคลื่อนที่ของทั้งสองลักษณะจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน การเคลื่อนที่ของลมในแนวตั้งเกิดขึ้นในบริเวณชั้นบรรยากาศที่มีความกดอากาศสูง โดยความกดอากาศสูงส่งผลให้อากาศเกิดการอัดตัวและเคลื่อนที่ลงมาในแนวตั้งหรือเกิดการจมตัวของอากาศ ซึ่งการจมตัวของอากาศนี้ส่งผลให้ความกดอากาศที่พื้นผิวโลกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 1 เป็นผลให้กลุ่มอากาศเดิมที่เคยอยู่บริเวณดังกล่าวต้องเคลื่อนที่ไปบริเวณอื่นที่มีความกดอากาศน้อยกว่าซึ่งกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 2 หลังจากกลุ่มอากาศดังกล่าวเคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่ 2 กลุ่มอากาศเหล่านี้จะส่งผลต่อความกดอากาศ ณ ตำแหน่งที่ 2 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กลุ่มอากาศเดิมที่เคยอยู่ในตำแหน่งที่ 2 เกิดการลอยตัวไปยังชั้นบรรยากาศ แต่ในขณะที่เกิดการลอยตัวกลุ่มอากาศเหล่านี้จะคายความร้อนทำให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความกดอากาศมีค่าสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้

กลุ่มอากาศเหล่านี้ต้องเคลื่อนที่ไปยังบริเวณอื่นที่มีความกดอากาศต่ำในเวลาต่อไป โดยสามารถแสดงแผนภาพการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบและแนวตั้งได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบและแนวตั้ง

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศโดยวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงของลมที่เคลื่อนที่ในชั้นพื้นผิว ซึ่งเป็นลมที่พัดในช่วงระยะความสูง 0 ถึง 1 km เหนือพื้นดิน โดยความเร็วลม และทิศทางของลม จะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่มีชื่อว่า แอนนิโมมิเตอร์ (anemometer) โดยเครื่องมือตรวจวัดจะถูกติดตั้งในบริเวณพื้นที่โล่งและมีความสูงเหนือพื้นดิน 10 m ลมที่พัดปะทะลูกถ้วยของแอนนิโมมิเตอร์ (cup anemometer) จะถูกแสดงค่าความเร็วลมบนมิเตอร์อ่านค่าความเร็วลมที่ต่ออยู่กับแอนนิโมมิเตอร์ ส่วนทิศทางลมจะถูกระบุโดยศรลม (wind vane) ที่ติดอยู่กับแอนนิโมมิเตอร์ ทิศที่สามารถตรวจวัดได้มีทั้งหมด 16 ทิศแต่ละทิศห่างกัน 22.5 องศา ดังแสดงในตารางที่ 1

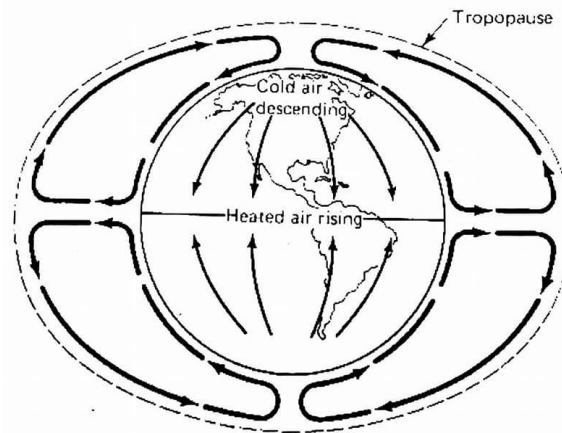


รูปที่ 6 แอนนิโมมิเตอร์ (anemometer) [27]

ตารางที่ 1 ทิศการเคลื่อนที่ของลม

ชื่อทิศ	อักษรย่อ	มุม (องศา)
ทิศเหนือ	N	0 ถึง 22.5
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ	NNW	22.6 ถึง 45.0
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	NW	45.1 ถึง 67.5
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก	WNW	67.6 ถึง 90.0
ทิศตะวันตก	W	90.1 ถึง 112.5
ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก	WSW	112.6 ถึง 135.0
ทิศตะวันตกเฉียงใต้	SW	135.1 ถึง 157.5
ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้	SSW	157.6 ถึง 180.0
ทิศใต้	S	180.1 ถึง 202.5
ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้	SSE	202.6 ถึง 225.0
ทิศตะวันออกเฉียงใต้	SE	225.1 ถึง 247.5
ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออก	ESE	247.6 ถึง 270.0
ทิศตะวันออก	E	270.1 ถึง 292.5
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันออก	ENE	292.6 ถึง 315.0
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	NE	315.1 ถึง 337.5
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ	NNE	337.6 ถึง 0

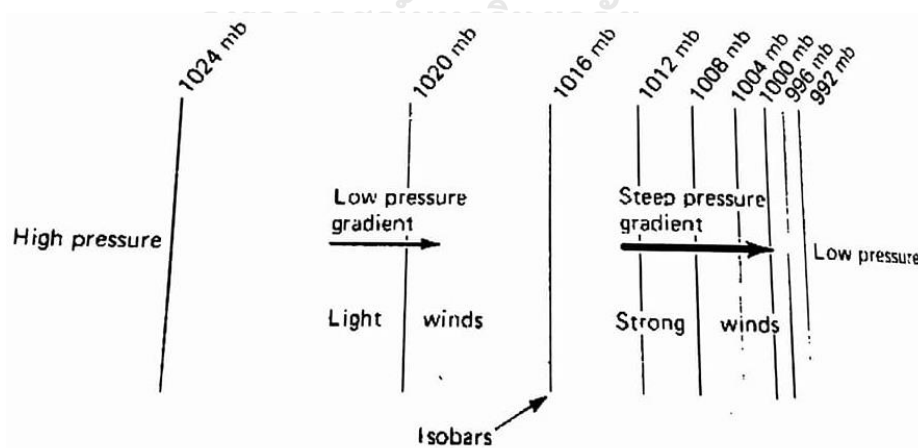
2.7.3 การหมุนเวียนบรรยากาศ [26] ข้อมูลของหัวข้อที่ 2.7.1 และ 2.7.2 แสดงให้เห็นว่า กลุ่มอากาศมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาขึ้นกับความกดอากาศของชั้นบรรยากาศ การเคลื่อนที่ของกลุ่มอากาศเหล่านี้ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศของโลก หากพิจารณาในกรณีที่โลกไม่มีการหมุนรอบตัวเองบริเวณเส้นศูนย์สูตรจะได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์มากที่สุด ส่วนขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้จะได้รับความร้อนน้อยที่สุด ผลที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้ ส่งผลให้อากาศบริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดการลอยตัวและเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลกทั้งสองที่มีอุณหภูมิเย็นกว่า จากนั้นจมตัวลงเพื่อแทนอากาศเย็น ในขณะที่เดียวกันอากาศเย็นที่ถูกทดแทนจะเคลื่อนที่ไปยังเส้นศูนย์สูตรเพื่อแทนอากาศร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีลมชั้นบนเคลื่อนที่จากเส้นศูนย์สูตรไปยังขั้วโลก และลมชั้นล่างเคลื่อนที่จากขั้วโลกมายังเส้นศูนย์อย่างคงที่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นบรรยากาศในขณะที่โลกหยุดการเคลื่อนที่ [26]

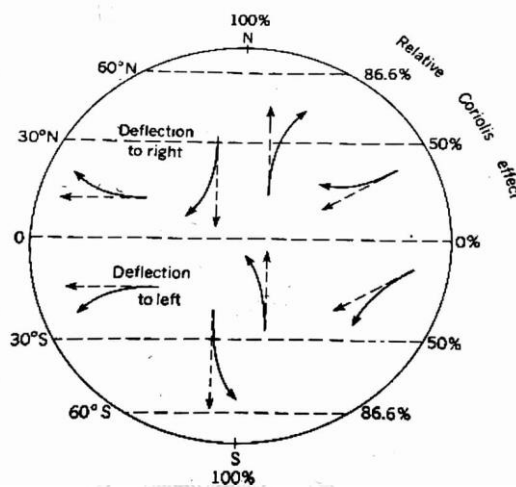
แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงโลกไม่ได้หยุดนิ่งและมีการหมุนรอบตัวเองในทิศทวนเข็มนาฬิกาประกอบกับความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวโลก และ พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังผิวโลกไม่เท่ากัน ส่งผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่ และความเร็วของลมเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปัจจัยที่ส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงประกอบไปด้วยแรง 3 ชนิด โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

แรงเกรเดียนต์ความกดอากาศ เป็นแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความกดอากาศ ซึ่งแรงชนิดนี้จะกระทำกับเส้นความกดอากาศในทิศ 90 องศา แรงเกรเดียนต์ความกดอากาศมีค่าแปรผันโดยตรงกับความเร็วของลม แรงดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกลุ่มอากาศเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความกดอากาศสูงไปยังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเกรเดียนต์ของความกดอากาศและความดันบรรยากาศ [26]

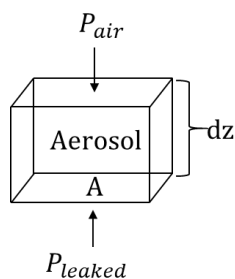
แรงคอริโอลิส เป็นแรงเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก ซึ่งแรงในส่วนนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม และทิศทางการเคลื่อนที่ของลมโดยความเร็วจะมีค่าแปรผันตามแรงดังกล่าว และทิศทางลมจะได้รับอิทธิพลจากแรงเหวี่ยงของโลกเป็นสาเหตุให้ลมที่เคยเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงระหว่างเส้นศูนย์สูตรกับขั้วโลกมีการเคลื่อนที่ต่างไปจากเดิม โดยลมตั้งแต่เส้นศูนย์สูตรไปจนถึงขั้วโลกเหนือจะมีการเคลื่อนที่เบนไปทางขวาจากเส้นทางเดิมในขณะที่ลมที่เคลื่อนที่ในช่วงเส้นศูนย์สูตรถึงขั้วโลกใต้จะเคลื่อนที่เบนไปทางซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แรงคอริโอลิสต่อการเบนของทิศทางลม [26]

แรงเสียดทาน เป็นแรงที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของพื้นผิวโลกในขณะที่ลมเคลื่อนที่ผ่าน โดยแรงเสียดทานจะทำมุมในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของลมส่งผลให้ลมมีการเคลื่อนที่ช้าลง โดยลมผิวดินจะมีความเสียดทานมากกว่าผิวน้ำและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลลดลงแปรผันตามระดับความสูงจากพื้นดินโดยที่ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเป็นระดับความสูงที่ปราศจากแรงเสียดทาน ดังนั้นลมเกิดขึ้นเหนือผิวดินจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าลมที่เกิดขึ้นเหนือผิวน้ำ หรือลมที่เกิดขึ้น ณ บริเวณสูงๆ

2.7.4 ความเสถียรของชั้นบรรยากาศ [28] นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการลอยตัวไปยังชั้นบรรยากาศ โดยอาศัยอันตรกิริยาระหว่างความดันอากาศ (P_{air}) และความดันที่สะสมในนิวไคลด์กัมมันตรังสี ($P_{aerosol}$) ซึ่งอันตรกิริยานี้ส่งผลต่อความหนาแน่นและการลอยตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี เป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเคลื่อนตัวไปยังชั้นบรรยากาศได้ โดยสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ 2



$$F_1 = F_2$$

$$(P_{leaked} - P_{air})A = mg$$

$$(P_{leaked} - P_{air})A = \rho Adzg$$

$$\Delta P = \rho k \quad \text{เมื่อ } k \text{ คือค่าคงที่ (2)}$$

รูปที่ 10 แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่ออนุภาค

จากสมการที่ 2 แสดงให้เห็นได้ว่าค่าความดันมีค่าแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น ซึ่งนั่นหมายความว่า หากผลต่างระหว่างค่าความดันที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (P_{leaked}) และค่าความดันอากาศ (P_{air}) มีค่าต่ำ ค่าความหนาแน่นของกลุ่มหมอกกัมมันตรังสีที่รั่วไหลออกมาจะมีค่าต่ำ ซึ่งถ้าหากค่าความหนาแน่นดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นของอากาศจะส่งผลให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีเหล่านั้นสามารถลอยตัวได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความดันอากาศมีค่าแปรผันตามความสูง จึงเป็นสาเหตุให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีบางส่วนที่เกิดการฟุ้งกระจายไปยังชั้นบรรยากาศลอยตัวได้ที่ความสูงระดับหนึ่ง จากนั้นลดระดับการลอยตัวลงมายังบริเวณที่มีความดันอากาศที่เหมาะสม ซึ่งนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวบนชั้นบรรยากาศเหล่านี้มีลักษณะการกระจายตัวที่แตกต่างกันขึ้นกับลักษณะความเสถียรบรรยากาศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีลอยตัวอยู่ ทั้งนี้สามารถแบ่งกลุ่มความเสถียรบรรยากาศตามคุณสมบัติการลอยตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ 3 กลุ่มโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

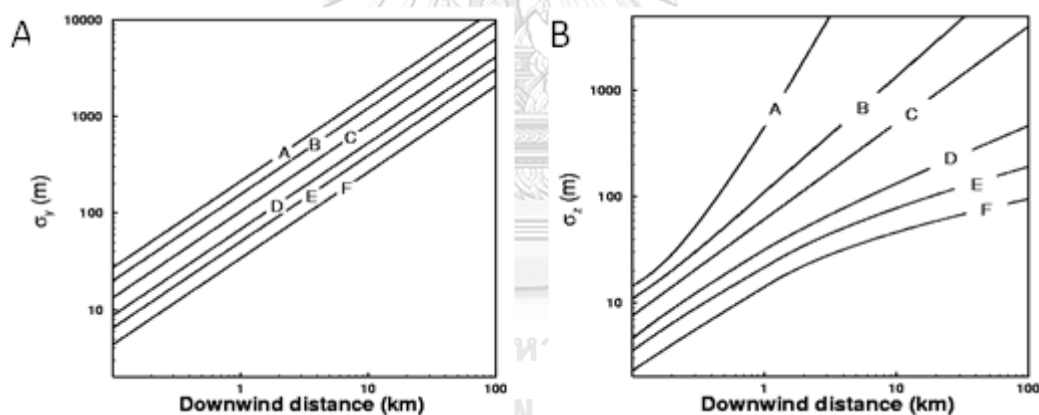
ความเสถียรบรรยากาศระดับธรรมชาติ เป็นสภาพอากาศที่มีความสูงและอุณหภูมิแปรผกผันกัน โดยอุณหภูมิของอากาศจะลดลง 1 องศาเซลเซียสทุก 100 เมตรจึงทำให้ชั้นบรรยากาศมีความกดอากาศที่หลากหลย ส่งผลให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีที่ลอยตัวขึ้นมาสามารถปรับตัวให้ความดัน และ ความหนาแน่นเท่ากับสิ่งแวดล้อมได้และเกิดการลอยตัวได้ดี ซึ่งจัดเป็นความเสถียรภาพบรรยากาศระดับ D

ความเสถียรบรรยากาศที่มีความเสถียรต่ำ เป็นสภาพอากาศที่มีความเสถียรต่ำโดยอุณหภูมิของอากาศลดลงช้ากว่าความเสถียรบรรยากาศระดับธรรมชาติ ทำให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีที่ลอยตัวขึ้นมาเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อม ส่งผลให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีเหล่านั้นไม่สามารถ

สะสมตัวในชั้นบรรยากาศได้และตกลงสู่พื้น โดยความเสถียรของชั้นบรรยากาศในลักษณะนี้ถูกจัดให้อยู่ในระดับ A, B, C

ความเสถียรบรรยากาศที่มีความเสถียรสูง เป็นสภาพอากาศที่อุณหภูมิของอากาศลดลงเร็วกว่าความเสถียรบรรยากาศระดับธรรมดา ทำให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีที่ลอยตัวขึ้นมา มีอุณหภูมิสูงกว่าสภาพแวดล้อม และอากาศในสิ่งแวดล้อมมีความหนาแน่นต่ำกว่ากลุ่มหมอกกัมมันตรังสี เป็นสาเหตุให้กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีสามารถลอยตัวขึ้นไปสะสมตัวในชั้นบรรยากาศได้ดี ความเสถียรของชั้นบรรยากาศในลักษณะนี้ถูกจัดให้อยู่ในระดับ E, F

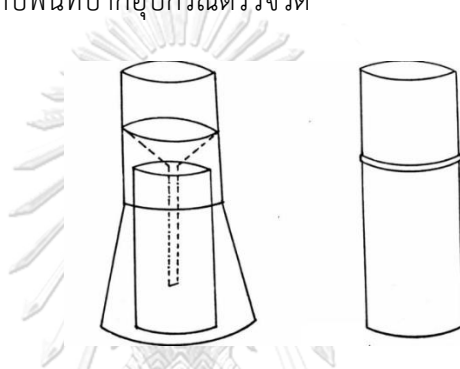
โดยแต่ละระดับความเสถียรชั้นบรรยากาศมีลักษณะการกระจายตัวในแนวราบ (แกน Y) และการกระจายตัวตั้ง (แกน Z) ที่แตกต่างกัน สภาพอากาศที่มีความเสถียรน้อย (A, B, C) นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้ดีทั้งในแนวราบ (Y) และแนวตั้ง (Z) ในขณะที่สภาพอากาศตามธรรมชาติ (D) และสภาพอากาศที่มีความเสถียรสูง (E, F) มีความสามารถในการกระจายตัวได้ปานกลาง และต่ำตามลำดับดังแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศ A คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบ (σ_y) B คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้ง (σ_z) [29]

2.7.5 ปริมาณน้ำฝน [26] น้ำบนผิวโลกเมื่อได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์จะเกิดการระเหยและเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นจะลอยตัวไปยังชั้นบรรยากาศซึ่งในขณะที่เกิดการลอยตัวก็จะมีคายความร้อนเกิดขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของไอน้ำมีค่าลดต่ำลงจนมีการเปลี่ยนสถานะเป็นละอองน้ำขนาดเล็ก และผลึกน้ำแข็งบนชั้นบรรยากาศด้วยกระบวนการควบแน่นกลายเป็นก้อนเมฆ จากนั้นเมื่อละอองน้ำและผลึกน้ำแข็งเหล่านี้เกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่เกิดกว่าแรงพยุงบนชั้นบรรยากาศ หยดน้ำหรือก้อนน้ำแข็งเหล่านี้จะตกลงมาสู่พื้นดินกลายเป็นปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเกิดหิมะ การเกิดลูกเห็บ เป็นต้น ซึ่งฝนเป็นหนึ่งปรากฏการณ์ที่

เกิดขึ้นจากกระบวนการเหล่านี้ โดยฝนเป็นปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นจากหยดน้ำที่มีแหล่งกำเนิดจากเมฆ แอลโดสเตรตัส นิมโบสเตรตัส สโตรโตคิมูลัส คิวมูลัส และคิวมูโลนิมบัส โดยขนาดของเม็ดฝนมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5 mm ถึง 2 mm และมีความเร็วเฉลี่ยในการตก 25 km/h โดยฝนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในระยะเวลานั้นๆ ส่วนเม็ดฝนที่มีขนาดเล็กจะมีระยะเวลาในการตกที่นาน การเกิดฝนจะส่งผลให้ฝนระเหย หรือสิ่งสกปรกที่ลอยตัวบนชั้นบรรยากาศตกลงสู่พื้นดิน โดยการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนจะใช้เครื่องมือวัดฝนแบบมาตรฐาน (standard rain gauge) ในการตรวจวัด ซึ่งมีรูปร่างเป็นกระบอกวางซ้อนกันสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 12 โดยชั้นนอกทำหน้าที่รองรับน้ำฝนส่วนชั้นในทำหน้าที่เก็บน้ำฝน ปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้ถูกนำมาแปลงเป็นค่าปริมาณน้ำฝนในหน่วย mm โดยใช้กระบอกตวงที่มีสเกลสัมพันธ์กับพื้นที่ปากอุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ 12 เครื่องมือวัดฝนแบบมาตรฐาน (standard rain gauge) [30]

2.8 ลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทย [30]

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตโซนร้อนทางซีกโลกเหนือซึ่งอยู่ระหว่างทวีปยุโรป ทวีปแอฟริกา และทวีปเอเชีย และในขณะเดียวกันประเทศไทยก็ตั้งอยู่ระหว่างมหาสมุทรอินเดีย และมหาสมุทรแปซิฟิก ทำให้ความดันและอุณหภูมิเหนือแผ่นดิน และเหนือมหาสมุทรมีความแตกต่างกัน เป็นผลให้เกิดลมมรสุม พัดผ่านประเทศไทย โดยมีการพัดสองรูปแบบคือพัดจากพื้นดินภาคทวีปไปยังมหาสมุทร และพัดจากมหาสมุทรมายังพื้นดินภาคทวีป การพัดของลมมรสุมแต่ละครั้งใช้เวลา 6 เดือน โดยลมมรสุมที่เกิดขึ้นในประเทศไทยแบ่งออกได้ 2 ชนิด

1. **ลมมรสุมฤดูร้อน (summer Monsoon)** เป็นลมที่เกิดขึ้นในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึง ตุลาคม ลมในลักษณะนี้พัดจากมหาสมุทรเข้าสู่พื้นผิวดินในแนวตะวันตกเฉียงใต้ของไทย ทำให้เกิดฝนขึ้น โดยเรียกลมมรสุมฤดูร้อนนี้ว่า มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (southwest Monsoon)

2. **ลมมรสุมฤดูหนาว (winter Monsoon)** เป็นลมที่พัดจากทวีปลงสู่มหาสมุทร โดยลมมรสุมชนิดนี้นำความหนาวเย็นและความแห้งแล้งมายังบริเวณที่ลมพัดผ่าน ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง

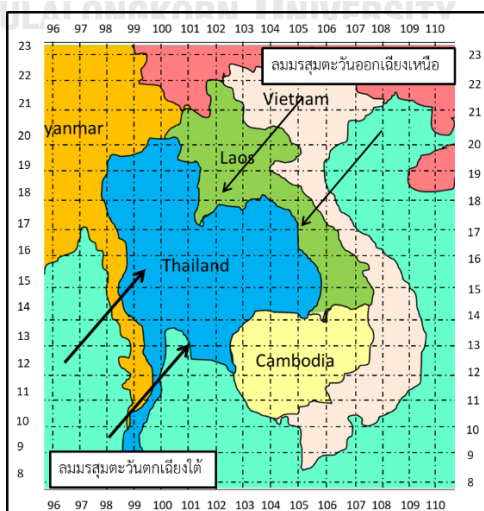
พฤศจิกายน ถึงมกราคม ลมมรสุมฤดูหนาวมีการพัดผ่านในทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ดังนั้นจึงเรียกลมมรสุมชนิดนี้ว่าลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (northwest Monsoon)

อิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองประเภทส่งผลให้เกิดฤดูกาลขึ้นสามฤดูในประเทศไทยประกอบไปด้วย ฤดูฝน ฤดูหนาว และ ฤดูร้อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ฤดูฝน ในช่วงเวลาที่ก่อให้เกิดฝนขึ้นภายในประเทศไทย โดยแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยจะเกิดฝนขึ้นในช่วงเวลาที่ต่างกันขึ้นกับช่วงของลมมรสุมที่พัดผ่าน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม จนถึงกลางเดือนตุลาคม ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดเข้าสู่ประเทศไทยส่งผลให้ภาคใต้ฝั่งตะวันตกมีฝนตกชุกในเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และตั้งแต่ภาคกลางของประเทศไทยขึ้นไปมีฝนตกชุกในช่วงเดือนสิงหาคมและกันยายน ส่วนภาคใต้ฝั่งตะวันออกได้รับอิทธิพลจากลมตะวันออกเฉียงเหนือและเกิดฝนขึ้นในช่วงเดือน พฤศจิกายน จนถึง กุมภาพันธ์

ฤดูหนาว เป็นฤดูกาลที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดพาความหนาวเย็นจากประเทศจีนและไซบีเรียที่มีความกดอากาศสูงมายังประเทศไทย ฤดูหนาวในประเทศไทยจะเกิดขึ้นในช่วง กลางเดือนพฤศจิกายนจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยจะได้รับผลกระทบมากที่สุด แต่ในขณะเดียวกันภาคใต้จะได้รับผลกระทบน้อยและเกิดฝนตกชุกในฤดูกาลดังกล่าว

ฤดูร้อน เป็นฤดูกาลที่เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ไปจนถึงเดือนพฤษภาคมโดยลมจากทะเลจีนใต้จะพัดผ่านประเทศไทยในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ประกอบกับแสงอาทิตย์เลื่อนมาอยู่ตรงกับประเทศไทยพอดีส่งผลให้ประเทศไทยมีอากาศร้อนและไม่เกิดฝนตั้งแต่ตอนกลางของประเทศไทยขึ้นไป แต่ทางตอนใต้ของประเทศไทยยังคงมีฝนอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากลมทะเลจีนใต้ได้พัดผ่านน่านน้ำและพัดพาความชุ่มชื้นบริเวณดังกล่าวมาสู่ภาคใต้ของประเทศไทย



รูปที่ 13 ทิศทางการเกิดลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

2.9 การสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี[22]

2.9.1 การสะสมตัวแบบเปียก นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กระจายตัวในชั้นบรรยากาศสามารถสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมได้เมื่อได้รับอิทธิพลของฝน โดยฝนจะทำหน้าที่ชะล้างนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศให้ตกลงสู่พื้นดิน ซึ่งค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ได้รับอิทธิพลจากการสะสมแบบเปียกสามารถคำนวณได้จากสูตรในสมการที่ 3

$$C'(x, y, z) = C(x, y, z)e^{-\Lambda x/u} \quad (3)$$

C' = ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศเมื่อได้รับอิทธิพลจากฝน (Ci/m^3)

Λ = ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฝน (s^{-1})

u = ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฝน

ปริมาณน้ำฝน (mm/hr)	สัมประสิทธิ์การเกิดฝน (S^{-1})
0.5	0.0001
1	0.0002
5	0.0006
10	0.0010
15	0.0013
20	0.0017
25	0.0020

2.9.2 การสะสมตัวแบบแห้ง การสะสมตัวแบบแห้งเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศเกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดิน ซึ่งปรากฏการณ์ที่ก่อให้เกิดการสะสมตัวแบบแห้งมีหลายรูปแบบเช่น การตกโดยแรงโน้มถ่วงโลก การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแอโรซอลกับอากาศ หรือพฤติกรรมทางฟิสิกส์ของแอโรซอล ปรากฏการณ์เหล่านี้ส่งผลให้ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศมีค่าลดลง โดยค่ากัมมันตภาพที่ได้รับอิทธิพลจากการสะสมตัวแบบแห้งสามารถคำนวณได้จากการนำค่ากัมมันตภาพ ณ ตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหลคูณกับแฟกเตอร์การลดลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$DF(x) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} dx \right]^{\frac{v \sqrt{2}}{u \sqrt{\pi}}} \quad (4)$$

$DF(x)$ = แฟกเตอร์การลดลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ

x = ระยะทางที่ลมเคลื่อนที่ (m)

v = ความเร็วในการสะสมตัว (cm/s)

u = ความเร็วลมเฉลี่ยที่ effective release height, H (m/s)

H = Effective release height (m)

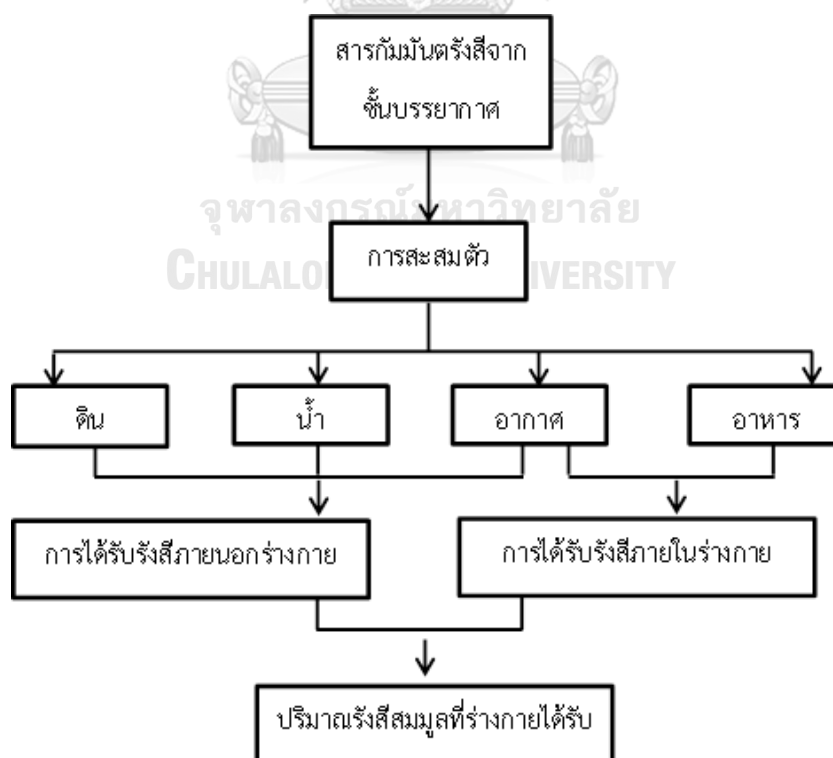
$\sigma_z(x)$ = สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน Z ในรูปฟังก์ชันของ X (m)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน Z ในกรณี Standard Terrain

ระดับความเสถียรบรรยากาศ	σ_z (meter)
A	$0.20x$
B	$0.12x$
C	$\frac{0.080x}{\sqrt{1+0.0002x}}$
D	$\frac{0.060x}{\sqrt{1+0.0015x}}$
E	$\frac{0.030x}{\sqrt{1+0.0003x}}$
F	$\frac{0.016x}{\sqrt{1+0.0003x}}$

2.10 การได้รับรังสีเข้าสู่ร่างกาย

นิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศเมื่อได้รับอิทธิพลจากการสะสมตัวแบบเปียกและการสะสมแบบแห้งจะเกิดการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณดังกล่าวได้รับผลกระทบทางรังสี ซึ่งการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากสิ่งแวดล้อมที่มีการเประอะเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย เกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การได้รับรังสีจากก้อนเมฆที่มีการแพร่กระจายนิวไคลด์กัมมันตรังสีลงสู่พื้นดิน (Cloud shine) การได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แพร่กระจายจากพื้นดินไปยังอากาศ (Ground shine) การสูดดมหรือหายใจสารแขวนลอยในอากาศที่มีการปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย (Inhalation) การอุปโภคบริโภคน้ำหรืออาหารที่ปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นต้น [22] จากปรากฏการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถจัดกลุ่มเส้นทางการได้รับรังสีของประชาชนได้เป็น 2 เส้นทาง ประกอบไปด้วย การได้รับรังสีจากภายนอก (External exposure) ซึ่งเป็นการได้รับรังสีจากการที่ร่างกายสัมผัสกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ หรืออากาศ และการได้รับรังสีภายในร่างกาย (Internal exposure) [31] เป็นการได้รับรังสีจากการกินอาหารที่ปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสี หรือหายใจในบริเวณที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีปนเปื้อนในอากาศเข้าสู่ร่างกาย โดยสามารถแสดงแผนภาพการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม และเส้นทางการได้รับรังสีของประชาชนได้ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แผนภาพแสดงเส้นทางการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ร่างกาย

2.11 การคำนวณปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ร่างกายได้รับ

จากภาพที่ 14 แสดงให้เห็นว่ามนุษย์สามารถได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกายได้ 2 เส้นทางประกอบไปด้วยการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย และการได้รับรังสีจากภายในร่างกาย ซึ่งภายในโปรแกรม HotSpot จะคำนวณปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับจากภายนอกร่างกายโดยพิจารณา 3 ปรากฏการณ์ ประกอบไปด้วย การแผ่รังสีจากพื้นดิน (ground shine) การสะท้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากพื้นดินไปยังอากาศ (resuspersion) และการซึมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย (submersion) ส่วนค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิภายในร่างกายพิจารณาจากการหายใจในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอากาศ การคำนวณปริมาณสมมูลยังผลสุทธิที่ร่างกายได้รับสามารถคำนวณได้จากการคูณกันระหว่างปริมาณรังสีสมมูล กับแฟกเตอร์การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพให้เป็นปริมาณรังสียังผล (DCF) [32] โดยสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณของปริมาณต่างๆได้ ดังต่อไปนี้

2.11.1 แฟกเตอร์การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพให้เป็นปริมาณรังสียังผล

$$DCF = \sum_T w_T h_T \quad (5)$$

DCF = แฟกเตอร์การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพให้เป็นปริมาณรังสียังผล
(Sv-m²/Bq-s) หรือ (Sv-m³/Bq-s) หรือ (Sv /Bq)

w_T = ค่าเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อ (tissue weighting factor)

h_T = ปริมาณรังสีสมมูล (equivalent dose) (Sv)

2.11.2. ค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (External effective dose)

$$EDE = \sum_i DCF_t \sum_j R_{ij} (\chi/Q) \quad (6)$$

EDE = ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (Sv)

$DCF^{(2)}$ = แฟกเตอร์การเปลี่ยนค่าปริมาณรังสีจากค่ากัมมันตภาพรังสี
ให้เป็นปริมาณรังสียังผลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี i (Sv-m²/Bq-s)
หรือ (Sv-m³/Bq-s)

R_{ij} = จำนวนไอโซโทป i ที่รั่วไหลในช่วงเวลา j (Bq)

$\chi / Q^{(3)}$ = แฟกเตอร์การกระจายตัวในอากาศที่เวลา j (s/m²) หรือ (s/m³)

⁽²⁾ ค่า DCF ของ ground shine และ resuspersion มีหน่วยเป็น (Sv-m²/Bq-s) และ (Sv-m³/Bq-s) ตามลำดับ

⁽³⁾ ค่า χ / Q ของ ground shine และ resuspersion มีหน่วยเป็น (s/m²) และ (s/m³) ตามลำดับ

2.11.3 ค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายในร่างกาย (Internal effective dose)

$$CEDE = \sum_i DCF_i \sum_j R_{ij} (\chi/Q) BR \quad (7)$$

$CEDE$ = ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับจากภายในร่างกาย (Sv)

DCF_i = แฟกเตอร์การเปลี่ยนค่าปริมาณรังสีจากค่ากัมมันตภาพรังสี

ให้เป็นปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิของนิวไคลด์กัมมันตรังสี i (Sv /Bq)

χ/Q = แฟกเตอร์การกระจายตัวในอากาศที่เวลา j (s/m^3)

BR = อัตราการหายใจ (m^3/s)

R_{ij} = จำนวนไอโซโทป i ที่รั่วไหลในช่วงเวลา j (Bq)

2.11.4 ผลรวมปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ (total effective dose equivalent)

$$TEDE = EDE + CEDE \quad (8)$$

$TEDE$ = ผลรวมปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ร่างกายได้รับ (Sv)

2.12 ขีดจำกัดการได้รับรังสี

International Commission on Radiological Protection หรือ ICRP เป็นหน่วยงานอิสระที่ไม่ขึ้นกับชาติใด ทำหน้าที่ให้คำแนะนำ และทำคู่มือเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานในการป้องกันอันตรายทางรังสี โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อช่วยกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสีในระดับนานาชาติ ระดับภูมิภาค และ ระดับประเทศ โดย ICRP ได้แบ่งกลุ่มบุคคลที่มีโอกาสได้รับรังสีออกเป็น 2 ประเภทคือ บุคคลที่ได้รับรังสีจากการปฏิบัติงาน และบุคคลทั่วไปที่ได้รับรังสีจากธรรมชาติ โดยกลุ่มบุคคลเหล่านี้จะมีขีดจำกัดการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แตกต่างกัน โดย ICRP ได้กำหนดขีดจำกัดการได้รับรังสีออกเป็นทั้ง 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือขีดจำกัดการได้รับรังสียังผลทั่วร่างกาย (effective dose) และกลุ่มที่สองคือขีดจำกัดการได้รับปริมาณรังสีสมมูล (Effective dose) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขีดจำกัดการได้รับรังสี [33]

รายการ	ผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสี	ประชาชนทั่วไป
ปริมาณรังสียังผลเฉลี่ยทั่วร่างกาย (Effective dose)	100 mSv ต่อ 5 ปีแต่ละปี ไม่เกิน 50 mSv	1 mSv ต่อ ปี
ขีดจำกัดการได้รับปริมาณรังสีสมมูลต่อปี (Effective dose)		
เลนส์ในตา	150 mSv	15 mSv
ผิวหนัง	500 mSv	50 mSv
มือและเท้า	500 mSv	-

ตารางที่ 5 ความผิดปกติของร่างกายเมื่อได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสี [34]

รายการ	ปริมาณรังสีที่ได้รับ (Sv)				
	1 - 2	2 - 6	6 - 10	10 - 50	มากกว่า 50
อาเจียน	1 Sv : 5% 2 Sv : 50%	3 Sv : 100%	100%	100%	100%
อวัยวะที่ เกิดผลเสีย	การสร้างเม็ดเลือดในร่างกาย			ทางเดินอาหาร	ระบบ ประสาท ส่วนกลาง
อาการที่ ปรากฏ	เม็ดเลือดขาว ต่ำ	เม็ดเลือดขาวต่ำมาก ตัวสี ม่วง, เลือดออกไม่หยุด ติดโรคง่าย สูงกว่า 300 เริ่มผมร่วง	ท้องร่วง, มีไข้ เสียสมดุลของ สารอิเล็กโทร ไลต์	ชักกระตุก, สัน กล้ามเนื้อ บังคับ ไม่ได้, หมดสติ	
ช่วงเวลา ปรากฏอาการ	ไม่มี	4 ถึง 6 สัปดาห์	5 ถึง 14 วัน	1 ถึง 48 ชั่วโมง	
กลับคืนสู่ปกติ	มีความหวัง	มีความหวัง	เฝ้าระวัง	หมดหวัง	หมดหวัง
ระยะเวลา กลับคืนสู่ปกติ	หลายสัปดาห์	1 ถึง 12 เดือน	มากกว่า 12 เดือน	-	-
การตาย	ไม่มี	ไม่มี	0 ถึง 80%	90 ถึง 100%	90 ถึง 100%
ระยะเวลา ตาย	ไม่มี	2 เดือน	2 เดือน	2 สัปดาห์	2 วัน
สาเหตุที่ตาย	ไม่มี	เลือดออกไม่ หยุด	ติดเชื้อโรค	ระบบหมุนเวียน หยุดทำงาน	ระบบหายใจ ไม่ทำงาน น้ำคั่งในสมอง

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองผล

1. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Report [18]

SOARCA เป็นรายงานที่คณะกรรมการกำกับดูแลนิวเคลียร์ (NRC) จัดทำขึ้นเพื่อปรับปรุงผลการวิเคราะห์อุบัติเหตุระดับรุนแรงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอดีตที่ผ่านมา ให้มีความสมจริงและมีความถูกต้องมากขึ้น โดย NRC ได้ทำการศึกษางานวิจัยของอุบัติเหตุระดับรุนแรงย้อนหลังหลายสิบปี เพื่อเก็บข้อมูลและนำข้อมูลเหล่านั้นมาปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม MELCOR และ MACCS 2 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในโรงไฟฟ้า และผลกระทบที่เกิดขึ้นภายนอกโรงไฟฟ้า การจำลองผลส่วนหนึ่งของรายงานได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ในกรณีที่โรงไฟฟ้าเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง long term station blackout ผลจากการวิเคราะห์พบว่าหลังจากเกิดอุบัติเหตุขึ้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มเกิดการรั่วไหลจากถังควบคุมความดันไปยังอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั่วโมงที่ 16 บริเวณ วาล์วระบายความดันของเครื่องควบคุมความดัน ด้วยอัตราการไหล $69.63 \text{ cm}^3/\text{s}$ จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั่วโมงที่ 45 หลังจากเกิดอุบัติเหตุเนื่องจากความดันภายในระบบมีค่าสูงเกินการออกแบบที่กำหนดไว้ โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ที่รั่วไหลออกไปมีค่ากัมมันตภาพไม่เกิน 1 เฮอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพ Cs-137 ทั้งหมดในแกนปฏิกรณ์ งานวิจัยนี้ได้นำลำดับขั้นตอนในการเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout มาใช้เป็นเงื่อนไขในการจำลองในโปรแกรม ART Mod 2 เพื่อวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพที่รั่วไหลออกจากโรงไฟฟ้า และได้นำผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การรั่วไหลของ Cs-137 จาก SOARCA มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ ART Mod 2 เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

2 การประเมินหาขอบเขตพื้นที่ควบคุมสำหรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย

เบื้องต้น: กรณีศึกษาจังหวัดสุราษฎร์ธานีและอุบลราชธานี [25]

งานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นเพื่อหาขอบเขตเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองผล หนึ่งในการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาจุดรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ก่อให้เกิดปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมากที่สุด โดยได้ทำการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปรียบเทียบกันระหว่างจุดรั่วไหลที่มีความสูง 10, 60 และ 100 m ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ความสูง 60 m และ 100 m นิวไคลด์กัมมันตรังสีส่วนใหญ่เกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้น้อยส่งผลให้ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าต่ำในขณะที่ความสูง 10 m เป็นความสูงที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการสะสมตัวได้มากที่สุด ผลการวิเคราะห์

ส่วนนี้ถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกตำแหน่งการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี การจำลองผลในส่วนที่สองได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเพื่อวิเคราะห์พื้นที่หวงห้าม(EAB) และ พื้นที่ประชาชนหนาแน่นน้อย(LPZ) ณ อำเภอ คันธุลี จังหวัดสุราษฎร์ธานี และอำเภอ สิรินคร จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นบริเวณที่คาดว่าจะก่อสร้างโรงไฟฟ้าในไทย ว่าพื้นที่เหล่านั้นมีค่าผ่านเกณฑ์ของคณะกรรมการกำกับดูแลนิวเคลียร์แห่งสหรัฐอเมริกา (U.S.NRC) หรือไม่ ผลที่ได้จากการจำลองผลพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการเคลื่อนที่ไปตามทิศที่มีความถี่ของลมมากที่สุด ซึ่งได้พัดไปยังบริเวณที่ไม่มีการอาศัยของประชาชน ส่งผลให้เขตพื้นที่หวงห้าม(EAB) และ พื้นที่ประชาชนหนาแน่นน้อย(LPZ) ของทั้งสองจังหวัดมีค่าผ่านเกณฑ์ของ U.S.NRC ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนนี้แสดงให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีส่วนใหญ่เกิดการเคลื่อนที่ไปยังทิศที่มีความถี่ในการเกิดลมสูง ดังนั้นข้อมูลส่วนนี้จึงถูกนำไปใช้ประกอบการอธิบายผลการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

2.13.2 งานวิจัยที่ยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ในงานวิจัย

1 The 2nd Meeting of the ASEAN Network on Nuclear Power Safety Research (ASEAN NPSR)

the ASEAN Network on NPSR เป็นการประชุมที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อเสริมสร้างการวิจัยและพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ในภูมิภาคอาเซียนทางด้านความปลอดภัยของพลังงานนิวเคลียร์ เพื่อให้สามารถสร้างกลยุทธ์ในการจัดการอุบัติเหตุให้สอดคล้องกับมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ภายในการประชุมมีการเผยแพร่งานวิจัยในเรื่องความปลอดภัยทางด้านรังสีของนักวิจัยแต่ละประเทศในภูมิภาคอาเซียน กลุ่มนักวิจัยจากสถาบัน Vietnam Atomic Energy Institute (VINATOM)[35] ในประเทศเวียดนามได้ทำการประเมินลักษณะการกระจายตัวของรังสีและผลกระทบทางรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang และ โรงไฟฟ้า Ninh Thuan โดยใช้ Lagrangian Particle Dispersion Model ในการจำลองผล ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าในปี 2015 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มีการเคลื่อนที่มาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของโรงไฟฟ้า และเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Northeast) และชายฝั่งตอนกลางก่อนไปทางทิศเหนือ (North center coast) ของประเทศเวียดนาม ในขณะที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan จะมีการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกและตะวันตกเฉียงใต้ของโรงไฟฟ้าส่งผลให้ ภาคตะวันออกเฉียงใต้ (southeast) ของเวียดนามได้รับผลกระทบทางรังสี ในขณะเดียวกันกลุ่มนักวิจัยจากประเทศสิงคโปร์ Singapore nuclear research and safety initiative[36] ได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan เช่นกันโดยใช้ Puff Dispersion Model ในการจำลองผล ผลที่ได้จากการ

จำลองแสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มีแนวโน้มการกระจายตัวในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองของประเทศเวียดนาม โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกของโรงไฟฟ้าจากนั้นเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้และพัดเข้าสู่ประเทศกัมพูชา โดยในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ประกอบการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

2 การศึกษาการกระจายตัวของแก๊สที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [24]

การศึกษาการกระจายตัวของแก๊สที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ได้รับอิทธิพลของสภาพอากาศ และความสูงของจุดปล่อยแก๊สที่ระดับต่างๆ ซึ่งได้คำนวณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่เกิดการแพร่กระจายจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ที่ตั้งอยู่ อ่าวไผ่ อำเภอสรรคบุรี จังหวัดชลบุรี จากสมการการแพร่กระจายของฟิคค์ (Fickian diffusion equation) และใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่ทำการตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดอากาศที่บริเวณ อ่าวไผ่ ในเวลา 1 ปี จากต้นเดือนกรกฎาคม 2516 ถึงปลายเดือนมิถุนายน 2517 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า ระดับความสูงของจุดปล่อยแก๊สและค่าความเร็วลมมีความสอดคล้องกัน โดยความเร็วลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของจุดปล่อยแก๊สมีค่าสูงขึ้น และความเร็วลมที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเป็นผลให้ความเข้มข้นของกัมมันตภาพมีค่าต่ำ โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในกระบวนการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทย และใช้เป็นข้อมูลยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์อิทธิพลของลมที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในหัวข้อ 4.1.2

3 Atmospheric dispersion modeling and radiological safety analysis for a hypothetical accident of Ghana Research Reactor-1 (GHARR-1) [37]

เป็นงานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจาก Ghana Research Reactor พร้อมทั้งประเมินปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ประชาชนได้รับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MCNPX code ในการจำลองปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และใช้โปรแกรม HotSpot สำหรับจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศพบว่า บริเวณใกล้จุดรั่วไหลระดับความเสถียรบรรยากาศที่ต่ำส่งผลให้ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าสูง ส่วนความเสถียรบรรยากาศที่สูงส่งผลให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าต่ำ แต่เมื่อระยะทาง

เพิ่มขึ้นความเสถียรบรรยากาศระดับสูงจะมีค่าปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเสถียรบรรยากาศระดับต่ำมีค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิลดลง ข้อมูลในส่วนนี้ถูกนำไปใช้เป็นเหตุผลสนับสนุนผลการวิเคราะห์ห้ระดับความเสถียรของชั้นบรรยากาศที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของ นิวไคลด์กัมมันตรังสี ในหัวข้อ 4.1.3

4 Atmospheric dispersion modeling for an accidental release from the Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1) [38]

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการประเมินผลกระทบทางรังสีที่เกิดขึ้นในกรณีที่ Pakistan Research Reactor-1 ซึ่งมีกำลังการผลิต 10 MW เกิดอุบัติเหตุ ซึ่งได้ใช้โปรแกรม ORIGIN code ในการจำลองชนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีและค่ากัมมันตภาพที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน ผลจากการจำลองทำให้ทราบว่าค่ากัมมันตภาพทั้งหมดภายในแกนปฏิกรณ์มีค่า $3.17E+17$ Bq ค่านี้ถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศ ในโปรแกรม HotSpot ประกอบกับข้อมูลสภาพอากาศที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วลมที่ตรวจวัดที่ระดับความสูง 10 เมตร ความเสถียรชั้นบรรยากาศระดับ A ถึง F ทิศทางของลม ENE โดยในการจำลองผลแบ่งอุบัติเหตุออกเป็น 2 เหตุการณ์ประกอบไปด้วย เหตุการณ์ที่ 1 นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ผ่านระบบระบายอากาศ โดยมีอัตราการรั่วไหล $25,000$ m³/h และมีสารบางส่วนถูกกักไว้ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร $15,000$ m³ ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าความเสถียรชั้นบรรยากาศที่สูงส่งผลให้ค่า Committed Effective Doses (CEDs) ต่ำในระยะทางเริ่มต้นและเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสถียรบรรยากาศที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้ดี

5 Influence of emission rate on atmospheric dispersion modeling of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [11]

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองอัตราการรั่วไหลของซีเซียม-137 จากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ฟูกูชิมะและใช้โปรแกรม SPEEDI, WSPEEDI-II, SEA-GEARN-FDM ในการจำลองผล โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศในช่วงวันที่ 11 ถึง 31 มีนาคม 2011 ผลที่เกิดขึ้นพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีมีอัตราการรั่วไหลสูงในช่วงวันที่ 11 ถึง 16 มีนาคม 2011 และวันที่ 30 มีนาคม 2011 โดยมีอัตราการปลดปล่อยสูงสุดประมาณ $10E+15$ Bq/h จากนั้นนำค่ากัมมันตภาพจากการจำลองในแต่ละวันของทั้ง 21 วัน ไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศในรูปแบบ Lagrangian particle dispersion โดยใช้ FLEXPART-WRF ในการจำลองผลพบว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการกระจายตัวและสะสมตัวสูงในทิศตะวันตกเฉียงเหนือของโรงไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่อ

ตามแนวชายฝั่ง โดยในวันที่ 15, 20-22, 25 และ 31 มีนาคม 2011 มีการสะสมตัวมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าในวันที่ 15 และ 30 มีนาคม 2011 มีการสะสมตัวสูงเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวมีอัตราการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สูง ในขณะที่วันอื่นๆได้รับอิทธิพลจากฝนทำให้เกิดการสะสมแบบเปียก ผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ถูกนำไปใช้สนับสนุนผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.11 ว่าปริมาณฝนมีผลต่อการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

2.13.3 งานวิจัยที่ใช้โปรแกรม ART Mod สำหรับจำลองอัตราการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

1 การจำลองการขนส่งซีเซียมไอโอไดด์สำหรับ ESBWR ในกรณีหลีกเลี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [17]

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ ESBWR โดยพิจารณาในกรณีที่เกิดการรั่วไหลแบบ Containment Bypass (BYP) โดยใช้โปรแกรม ART Mod2 ในการจำลองผลในกรณีที่โรงไฟฟ้ามีการจัดการอุบัติเหตุโดยการเติมน้ำเข้าไปภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ ผลจากการจำลองของโปรแกรม ART Mod2 แสดงให้เห็นว่าที่การจัดการอุบัติเหตุโดยการเติมน้ำส่งผลให้สารเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุ รูปแบบและวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลในกรณีที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในทางในการจำลองการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในกรณี long term station blackout ที่ไม่มีการจัดการอุบัติเหตุภายในโรงไฟฟ้า

2 การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2 [39]

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงโปรแกรม ART Mod 2 ให้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง Nuclear Safety Pilot Plant – 502 (NSPP-502) และ Phébus Fission Product Test 1 (Phébus FPT1) โดยทำการปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลจาก 4 ปฏิกิริยาการประกอบไปด้วย การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) เทอร์โมโฟรีซิส (thermophoresis) การตกจากแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) และ ดิฟฟิวซิโอโฟรีซิส (diffusiophoresis) เมื่อนำโปรแกรมที่ผ่านการปรับปรุงมาจำลองผลตามเงื่อนไขของการทดลอง NSPP-502 และ Phébus FPT1 พบว่าผลที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากขึ้น โปรแกรมที่ผ่านการปรับปรุงถูกนำมาใช้สำหรับจำลองการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในกรณี long term station black out ในงานวิจัยนี้

2.13.4 งานวิจัยที่ทำการจำลองการกระจายตัวของสารจากอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอดีต

1 Atmospheric transport and deposition of radionuclides released after the Fukushima Dai-ichi accident and resulting effective dose [8]

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลการกระจายตัวของ ซีเซียม-137, ซีเซียม-134, ไอโอดีน-131 ที่กระจายตัวในชั้นบรรยากาศในระยะเวลา 3 เดือนหลังจากอุบัติเหตุที่ฟูกูชิมะพร้อมทั้งได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและผลจากการตรวจวัด 206 ตำแหน่งทั่วโลก ผลจากการวิเคราะห์ทำให้พบว่า ความสูงของจุดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสี ความเร็วในการสะสมตัวแบบเปียก และ ชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีผลต่อการกระจายตัว ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากลุ่มหมอกกัมมันตรังสีมีการกระจายตัวไปทางซีกโลกเหนือและมีค่าความเข้มข้นน้อยกว่า 20 Bq/m^2 ในยุโรป

2 Modeling of long range transport pathways for radionuclides to Korea during the Fukushima Dai-ichi nuclear accident and their association with meteorological circulations [40]

เป็นงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่จากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มายังประเทศเกาหลีใต้ โดยใช้โปรแกรม FLEXPART ในการจำลองผลและใช้ข้อมูลภูมิอากาศจาก National Centers for Environmental Prediction (NCEP) และ Global Forecast System (GFS) โดยในการจำลองผลทำการจำลองทั้งหมด 3 ส่วน ในส่วนที่ 1 เป็นการจำลองผลเพื่อวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ระหว่างทวีป ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลในช่วงกลางเดือนมีนาคม 2011 จะกระจายตัวไปทางทิศเหนือของโรงไฟฟ้าและมาถึงเกาหลีในวันที่ 23 มีนาคม 2011 ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่โคจรรอบโลก ผลที่เกิดขึ้นพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ไปทางซีกโลกเหนือผ่านมหาสมุทรแปซิฟิกจากนั้นเคลื่อนที่ไปยังคาบสมุทรเกาหลีในช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011 ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลในช่วงต้นเดือนเมษายน 2011 มีการเคลื่อนที่ตามทิศทางลมผ่านทะเลตะวันตกเฉียงใต้ของญี่ปุ่นเข้าสู่คาบสมุทรเกาหลี ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉินทางรังสี

3 Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะในชั้นบรรยากาศและในมหาสมุทร โดยใช้ Lagrangian dispersion modeling และ Global ocean circulation model ตามลำดับผลที่ได้จากการจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากัมมันตภาพที่ได้จากการตรวจวัด และ ค่ากัมมันตภาพจากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้าเชอร์โนบิล ผลจากการจำลองพบว่า ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุเชอร์โนบิล ส่วนค่ากัมมันตภาพในมหาสมุทรแปซิฟิกมีค่าประมาณ 20 Bq/m^3 และใช้เวลา 4 ถึง 5 ปี ในการกระจายตัวไปถึงชายฝั่งประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะมีค่ากัมมันตภาพต่ำกว่า 3 Bq/m^3

2.13.5 งานวิจัยที่ใช้สำหรับศึกษาเป็นแนวทางในการจัดการอุบัติเหตุทางด้านรังสี

1 Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts [3]

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหลออกจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่เชอร์โนบิล และฟูกูชิมะ โดยในงานวิจัยได้มีการรวบรวมชนิดและค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม ของโรงไฟฟ้าที่เชอร์โนบิล และฟูกูชิมะจากงานวิจัยฉบับต่างๆ พร้อมทั้งประเมินการปนเปื้อน และเปรียบเทียบผลกระทบของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในแต่ละประเทศ ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมหากผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้จากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjias, Fangchenggang และ Ninh Thuan มีค่าเกินกว่า regulatory limit

2 Comprehensive Health Risk Management after the Fukushima Nuclear Power Plant Accident [41]

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการจัดการอุบัติเหตุหลังเกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ฟูกูชิมะ โดยมุ่งเป้าไปที่การป้องกันอันตรายของมนุษย์ในช่วงที่เกิดอุบัติเหตุ ซึ่งในการประเมินอุบัติเหตุ ประกอบไปด้วยการอพยพผู้คน การควบคุมห่วงโซ่อาหาร การตรวจระดับกัมมันตภาพในสิ่งแวดล้อม และอาหาร พร้อมทั้งมีการสำรวจการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกายในช่วง 4 เดือนแรกหลังเกิดอุบัติเหตุ โดยมีการประเมินผลกระทบทางรังสี 4 การประเมินประกอบไปด้วย การตรวจสอบต่อมไทรอยด์ การตรวจสุขภาพ การสำรวจสุขภาพจิต และ การสำรวจสตรีมีครรภ์ รายละเอียด

เหล่านี้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการวางแผนจัดการอุบัติเหตุ ในกรณีในประเทศไทยได้รับผลกระทบทางรังสีเกินค่า regulatory limit

3 Fukushima and Chernobyl nuclear accidents' environmental assessments and U.S. Hanford Site's waste management [42]

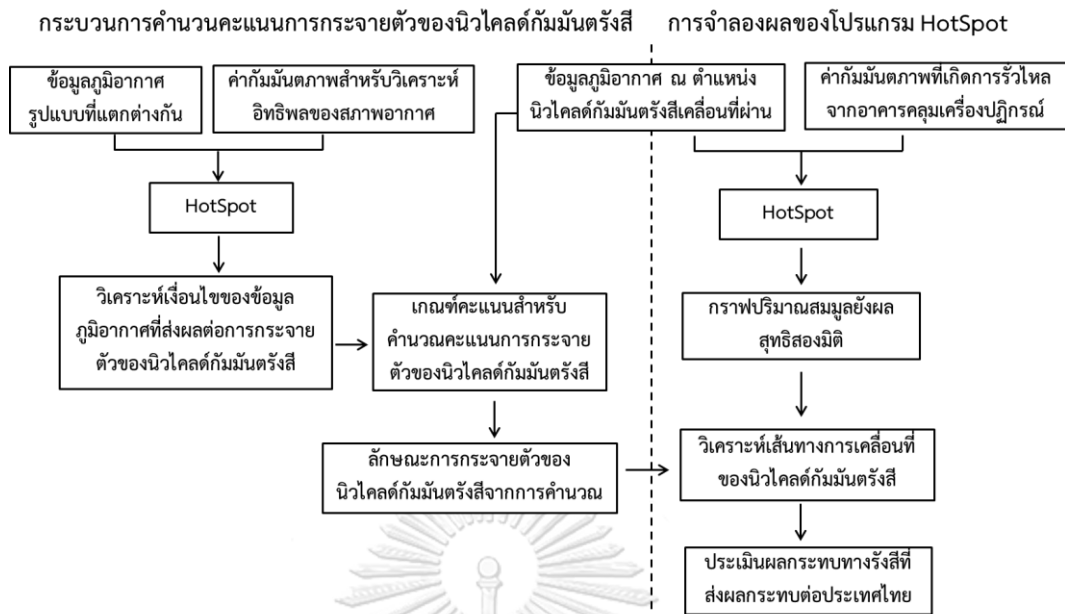
เป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงการจัดการอุบัติเหตุหลังจากเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงที่โรงไฟฟ้าฟุกุชิมะ เซอร์โนบิว และการรั่วไหลจากกากกัมมันตรังสีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แฮนฟอร์ด อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าที่ฟุกุชิมะส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีรั่วประมาณ $3.00E+17$ Bq โดยสารส่วนใหญ่ที่รั่วคือ I-131, Cs-137, Cs-134 เพื่อป้องกันอันตรายของประชาชนรัฐบาลได้มีแผนในการจัดการอุบัติเหตุครั้งนี้ กำจัดผิวดินบนสุดที่มีการเปราะเปื้อน กำจัดวัชพืชคลุมดินและใบไม้ที่ร่วงบริเวณที่อยู่อาศัย ตัดต้นไม้ กำจัดมอสที่ขึ้นตามต้นไม้ ล้างหลังคาและถนนด้วยน้ำความดันสูง ขัดพื้นผิวดินด้วยทราย กำจัดสารละลายซีเซียมที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ Zeolite อพยพประชาชนที่อยู่ในรัศมี 20 km จากบริเวณเกิดอุบัติเหตุ และบุคคลที่อาศัยอยู่พื้นที่ที่มีปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิตามกว่า 20 mSv ห้ามบริโภคอาหารที่มีความการปนเปื้อนรังสีเกิน 100 Bq/kg อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าเซอร์โนบิลทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีรั่วไหลประมาณ $1.85E+18$ Bq และเกิดการฟุ้งกระจายในอากาศและมีการปนเปื้อนในแม่น้ำ Pripjat ส่งผลให้ประชาชนได้รับผลกระทบ เพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นได้มีการจัดการอุบัติเหตุครั้งนี้ กำจัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ Zeolote, Bentonite, ถ่านกัมมันต์ และปุ๋ยแร่ (K, P, N,) จัดหาน้ำสะอาดแห่งใหม่เพื่อนำมาใช้อุปโภคบริโภค อพยพประชาชนที่อาศัยอยู่ในระยะ 30 km จากบริเวณเกิดอุบัติเหตุ ห้ามทำการประมงและใช้ประโยชน์จากป่า สร้างคลื่นป้องกันการนำท่วมบริเวณโรงไฟฟ้า พร้อมทั้งสร้างอาคารคลุมโรงไฟฟ้าเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าแฮนฟอร์ดเกิดขึ้นจากถังบรรจุกากกัมมันตรังสีที่ถูกเก็บไว้ใต้ดินเกิดการชำรุดทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีรั่วไหลผ่านทางน้ำใต้ดินไปยังแม่น้ำโคลัมเบีย โดยได้มีแนวทางในการจัดการอุบัติเหตุครั้งนี้ รื้อถอนโรงไฟฟ้าและทำการจัดเก็บกากระยะยาว กำจัดกากที่อยู่ในถังใต้ดิน บำบัดดินและน้ำใต้ดินที่มีกากเปราะเปื้อน โดยการจัดเก็บอย่างถาวรย้ายกากที่บรรจุในถังชำรุดไปยังถังที่มีความหนา 2 เท้า พร้อมทั้งทำการอัดกากกัมมันตรังสีและผนึกด้วยแก้ว จากนั้นนำไปจัดเก็บถาวรในพื้นที่จัดเก็บ มาตรการเหล่านี้ถูกใช้เป็นแนวทางในการจัดการอุบัติเหตุ

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย การคำนวณค่ากัมมันตภาพ การเตรียมข้อมูลภูมิอากาศ ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผล วิธีการจำลองการกระจายตัวในโปรแกรม Hotspot พร้อมทั้งแนวทางในการวิเคราะห์ผล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang, Yangjiang, Changjiang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทย ในกรณีที่โรงไฟฟ้างกล่าวเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout และประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ โดยกระบวนการวิเคราะห์ผลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้างกล่าวมาประเทศไทย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการวิเคราะห์ผลสองกระบวนการร่วมกัน กระบวนการแรกคือการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากข้อมูลภูมิอากาศ กระบวนการนี้จะทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาเงื่อนไขสภาวะอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวในชั้นบรรยากาศได้ดีที่สุด โดยข้อมูลภูมิอากาศในรูปแบบที่แตกต่างกันและข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีค่ากัมมันตภาพค่าคงที่จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ผลที่ได้จากการจำลองผลจะถูกนำมาวิเคราะห์หารูปแบบสภาวะอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากที่สุด จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับสร้างเกณฑ์คะแนน ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุ หรือตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านจะถูกนำมาคำนวณคะแนนตามเกณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้น ผลที่ได้จากกระบวนการนี้จะแสดงผลในรูปคะแนนการกระจายตัวในแต่ละทิศการเคลื่อนที่ของลม ทิศใดที่มีคะแนนมากหมายถึงทิศนั้นมีการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาก กระบวนการวิเคราะห์ผลในส่วนที่สองคือการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม HotSpot ในการจำลองผล ข้อมูลภูมิอากาศ บริเวณตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุหรือตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ที่ผ่าน และข้อมูลค่ากัมมันตภาพที่เกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ผลที่ได้จากการจำลองจะแสดงในรูปของค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิ จากนั้นค่าดังกล่าวจะถูกนำมาสร้างกราฟแสดงผลสองมิติ (contour graph) ผลจากทั้งสองกระบวนการจะถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ โดยสามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 กระบวนการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

กระบวนการนี้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกคือการศึกษาค่าอิทธิพลของสภาพอากาศเป็นการนำข้อมูลสภาพอากาศรูปแบบที่แตกต่างกันมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาสภาวะอากาศที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุด กระบวนการที่สองคือการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้จะนำผลการวิเคราะห์ในส่วนแรกมาใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับสร้างเกณฑ์คะแนนจากนั้นนำข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุหรือตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านมาคำนวณคะแนนการกระจายตัวตามเกณฑ์ดังกล่าว โดยรายละเอียดของแต่ละกระบวนการสามารถแสดงได้ดังนี้

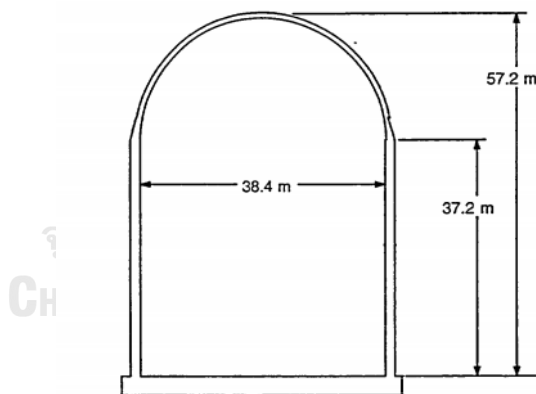
3.2.1 การศึกษาอิทธิพลของสภาพอากาศที่มีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อ ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศที่สภาวะอากาศรูปแบบต่างๆ และวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเบื้องต้น เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ประกอบการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยการดำเนินงานในส่วนนี้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศและ ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot การจำลองผลจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบไปด้วยการจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของ (1) ฝน (2) ลม และ (3) ความเสถียรของชั้นบรรยากาศ

ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ โดยในแต่ละการจำลองผลจะใช้ ข้อมูลภูมิอากาศที่แตกต่างกัน และเพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของข้อมูลภูมิอากาศอย่างเด่นชัด การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้จึงได้กำหนดให้ ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าคงที่ โดยสามารถแสดง รายละเอียดของข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี และข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

3.2.1.1 ค่ากัมมันตภาพสำหรับวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศ

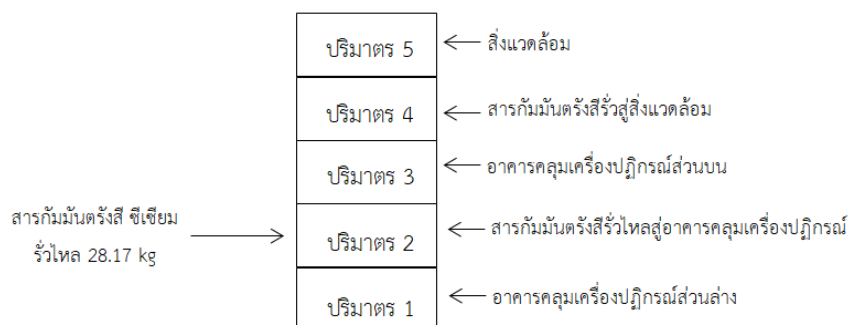
การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้จะเลือกใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม 137 (Cs-137) เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับวิเคราะห์ผล เนื่องจาก Cs-137 เป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งง่ายต่อการ รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรง และ เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ในระยะยาวเนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี โดยปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมจะใช้โปรแกรม Modified ART Mod 2 ในการจำลองผลในกรณีที่โรงไฟฟ้า เกิดอุบัติเหตุ long term station blackout โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตการจำลองผลจากโรงไฟฟ้า Surry ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ชนิดน้ำอัดแรงดัน ที่มีกำลังการผลิต 2,546 MWth และมีนิวไคลด์ กัมมันตรังสี Cs-137 ภายในแกนปฏิกรณ์ 251.7 kg พร้อมทั้งมีอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาด ความสูง 57.2 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.4 m [43] ดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 ลักษณะโครงสร้างของโรงไฟฟ้า Surry [43]

การจำลองผลจะจำลองในกรณีที่โรงไฟฟ้าเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout โดยอ้างอิงลำดับเหตุการณ์การเกิดอุบัติเหตุ และ ช่วงเวลาในการจำลองผลจาก SOARCA report volume 2 [44] โดยอุบัติเหตุ long term station blackout เป็นอุบัติเหตุในกรณีที่โรงไฟฟ้าสูญเสีย แหล่งจ่ายไฟจากภายนอก จนเป็นสาเหตุให้ระบบความปลอดภัยภายในโรงไฟฟ้าหยุดทำงาน พร้อมทั้ง สูญเสียการทำงานของ pressurizer (อุปกรณ์ควบคุมความดัน) และ reactor coolant pump seal (ซีลภายในปั๊มที่นำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของน้ำในขณะที่ปั๊มทำงาน) ชั่วโมงที่ 13.40 และ 14.46 หลังจากเกิดอุบัติเหตุ เป็นสาเหตุให้แกนปฏิกรณ์เกิดการหลอมละลาย และเกิดการรั่วไหล

ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีผ่าน hot leg ไปยังอุปกรณ์ควบคุมความดัน และเคลื่อนที่ออกสู่อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยผ่าน relief valves (วาล์วระบายความดัน) ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของอุปกรณ์ควบคุมความดัน ด้วยอัตราการไหล $69.63 \text{ cm}^3/\text{s}$ ณ ชั่วโมงที่ 16.04 หลังจากเกิดอุบัติเหตุ จากนั้นความดันภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าความดันเพิ่มขึ้นเป็น 6.76 bar ซึ่งเป็นค่าความดันที่เกินค่าเกณฑ์การออกแบบ 2.18 เท่าของโรงไฟฟ้า Surry ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผลของรายงาน SOARCA และ SOARCA ได้กำหนดให้ที่ระดับความดันดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดขึ้นประมาณชั่วโมงที่ 45.32 หลังจากเกิดอุบัติเหตุ โดยโปรแกรม Modified ART Mod 2 จะเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองเพื่อหาปริมาณการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม การจำลองผลเริ่มทำการจำลองที่เวลา 577,744 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มรั่วไหลจากวาล์วระบายความดันไปจนถึง 341,600 วินาที และแบ่งปริมาตร (volume) ที่ใช้ในการจำลองตามลักษณะทางกายภาพของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้รับผลกระทบ เมื่อพิจารณาลำดับเหตุการณ์อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลที่วาล์วระบายความดัน ซึ่งมีความสูงเหนือพื้นอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 1,133 cm ดังนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลออกมาสามารถฟุ้งกระจายและเคลื่อนที่ไปสะสมตัวได้ทั้งส่วนล่างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความสูงต่ำกว่า 1,133 cm และส่วนบนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความสูงมากกว่า 1,133 cm จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเกิดการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมบริเวณส่วนบนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นโครงสร้างปริมาตรสำหรับใช้จำลองในโปรแกรม Modified ART Mod 2 จึงประกอบไปด้วยปริมาตรทั้งหมด 5 ปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยปริมาตรที่ 2 คือบริเวณที่เกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ปริมาตรที่ 1 และปริมาตรที่ 3 คือส่วนล่างและส่วนบนของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ไปสะสมตัว ปริมาตรที่ 4 คือตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ออกสู่สิ่งแวดล้อม และปริมาตรที่ 5 คือตำแหน่งของสิ่งแวดล้อม โดยสามารถแสดงเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผล และ ขนาดโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการจำลองได้ดัง ตารางที่ 6 และตารางที่ 7



รูปที่ 17 แสดงโนดไลเซชัน (nodalization) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Surry

ตารางที่ 6 เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

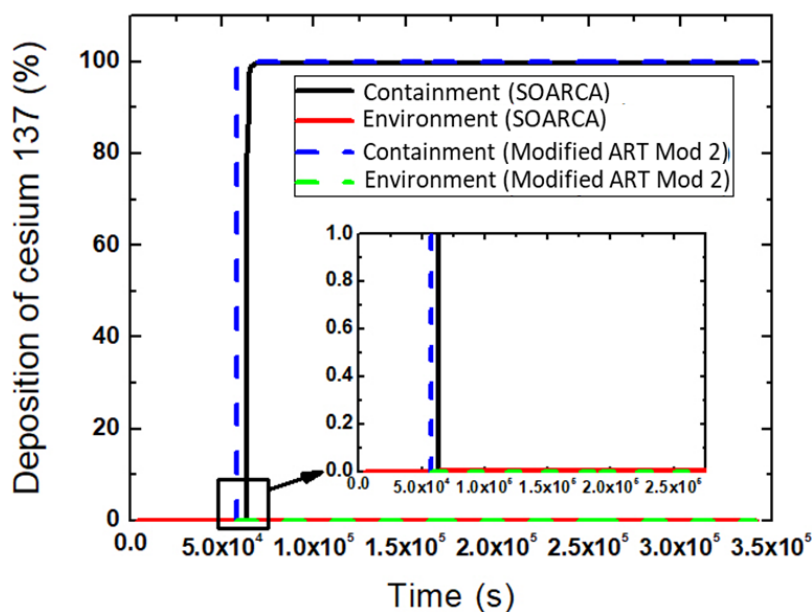
เงื่อนไขขอบเขต	Long term station blackout (SOACRA)
ความดัน [MPa]	17
อุณหภูมิผนัง [K]	990
อุณหภูมิแก๊ส [K]	990
มวลของซีซีเอ็มในแกนปฏิกรณ์ [kg]	251.7
อัตราการไหล [g/s]	2.13
ระยะเวลา [s]	341600

ตารางที่ 7 ขนาดโครงสร้างของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ Surry

ลำดับ	ปริมาตร [cm ³]	เส้นรอบวง[cm]	ความสูง[cm]
1	1.31E+10	1.21E+04	1.13E+03
2	2.32E+07	1.21E+04	0.20E-01
3	5.31E+10	1.21E+04	4.59E+03
4	1.06E+02	2.58E-01	0.20E-01
5	2.64E+11	2.41E+04	1.14E+04

ผลการจำลองจากโปรแกรม Modified ART Mod 2 แสดงให้เห็นว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีส่วนใหญ่เกิดการสะสมตัวภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (ปริมาตรที่ 1 และ 3) และเกิดการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม (ปริมาตรที่ 5) น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากขนาดรอยรั่วของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (ปริมาตรที่ 4) มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ จึงเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วจากถังควบคุมความดัน สามารถสะสมตัวภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ได้มากและมีเพียงส่วนน้อยที่รั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อนำผลการจำลองดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลการประเมินการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อมกรณี long term station blackout จากรายงาน SOARCA พบว่าผลการวิเคราะห์ของทั้งสองมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ที่รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพในแกนปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 18 แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้การประเมินผลกระทบทางรังสีมีความอนุรักษ์นิยม (conservative result) งานวิจัยนี้จึงเลือกคำนวณ

ค่ากัมมันตภาพที่ใช้การจำลองผลจาก 1 เพอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพ Cs-137 ทั้งหมดภายในแกนปฏิกรณ์เชื้อเพลิง โดยเลือกใช้ค่าข้อมูลแกนเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์น้ำอัดแรงดัน (PWR) ขนาด 3,412 MWth จากรายงาน NUREG/CR6094 [45] ซึ่งมี Cs-137 บรรจุอยู่ 2.45×10^{17} Bq ดังนั้นค่ากัมมันตภาพที่ใช้ในการประเมินผลจึงมีค่า 2.45×10^{15} Bq

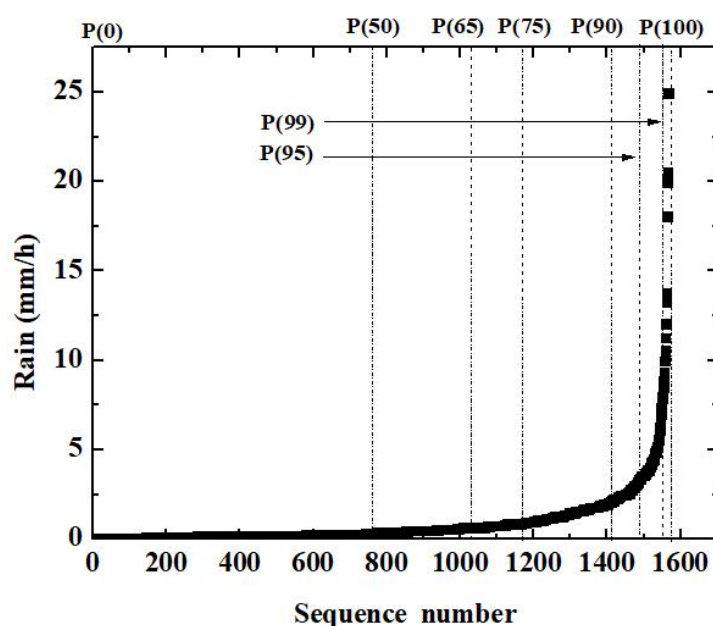


รูปที่ 18 การเปรียบเทียบปริมาณการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ระหว่างผลจำลองจาก โปรแกรม Modified ART Mod2 และ ผลจากรายงาน SOARCA

3.2.1.2 ข้อมูลภูมิอากาศรูปแบบที่แตกต่างกัน

ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้ในการจำลองผลประกอบไปด้วยข้อมูลความเร็วลม ทิศทางลม ปริมาณน้ำฝน และความเสถียรชั้นบรรยากาศที่ทำการบันทึกทุกหนึ่งชั่วโมงเป็นเวลาหนึ่งปี โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลปี 2015 จากเว็บไซต์ NOAA [46] สำหรับใช้ในการจำลองผล โดยวิธีการดาวน์โหลดและจัดเตรียมข้อมูลสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาคผนวก ค หลังจากจัดเตรียมข้อมูลภูมิอากาศทั้ง 4 กลุ่มเสร็จแล้วจะได้ข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมด 8,761 ชุด ซึ่งเป็นข้อมูลภูมิอากาศรายชั่วโมงในช่วงระยะเวลาหนึ่งปี ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับวิเคราะห์ผลโดยการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศทุกทิศทาง ณ พิกัดละติจูด 11.5 และ ลองจิจูด 109 ซึ่งเป็นข้อมูลภูมิอากาศของจังหวัด Ninh Thuan เป็นตัวแทนในการจำลองผล เพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของ ฝน ความเร็วลม และความเสถียรชั้นบรรยากาศ ว่าส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นความแตกต่างของอิทธิพลสภาพอากาศในแต่ละปัจจัยอย่างชัดเจน จึงได้แบ่งข้อมูลภูมิอากาศสำหรับวิเคราะห์ผลออกเป็น 3 ชุด ดังนี้

ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของฝนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเริ่มตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ถึง 100 เนื่องจากข้อมูลฝนในช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 50 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 19 และเพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองเกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของฝนเพียงอย่างเดียวจึงได้กำหนดให้ค่าความเร็วลมและค่าความเสถียรของชั้นบรรยากาศเป็นค่าคงที่ โดยกำหนดค่าความเร็วลมไว้ที่ค่าเฉลี่ยซึ่งมีค่า 4.5 m/s และความเสถียรชั้นบรรยากาศไว้ที่ระดับ D ซึ่งเป็นค่าฐานนิยมของข้อมูลทั้งหมดของจังหวัด Ninh Thuan

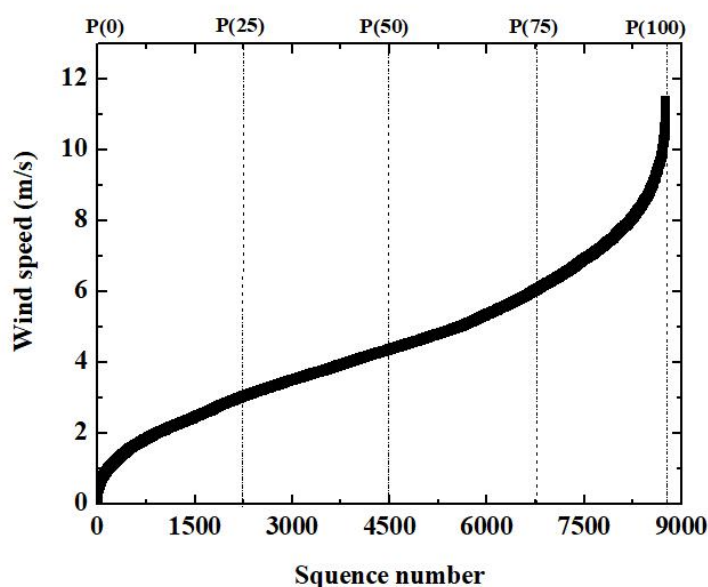


รูปที่ 19 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ต่างๆของ Ninh Thuan ที่มีค่ามากกว่า 0 mm/h

แต่อย่างไรก็ตามค่าปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการคำนวณไม่สามารถนำไปใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม HotSpot ได้โดยตรงเนื่องจากหน่วยมีความไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงหน่วย จากปริมาณน้ำฝน (mm/h) ให้เป็นสัมประสิทธิ์การตกของฝน (1/s) โดยใช้หลักการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) จากข้อมูลในตารางที่ 2 ซึ่งผลที่ได้จากการแปลงหน่วยแสดงดังตารางที่ 8 ตารางที่ 8 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผล

Percentile (%)	50	65	75	90	95	99	100
สัมประสิทธิ์การตกของฝน (1/s)	6.0E-05	1.2E-04	1.7E-04	3.0E-04	4.3E-04	8.4E-04	1.9E-03

ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเร็วลม ซึ่งข้อมูลภูมิอากาศในชุดนี้จะใช้ข้อมูลความเร็วลมที่มีความแตกต่างกันชัดเจน โดยจะเลือกใช้ข้อมูลความเร็วลมเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0, 25, 50, 75, และ 100 มาใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 20 และมีค่าดังแสดงในตารางที่ 9 พร้อมทั้งกำหนดความเสถียรชั้นบรรยากาศให้อยู่ในระดับ D ซึ่งเป็นค่าฐานนิยมของข้อมูลความเสถียรบรรยากาศทั้งหมดของ Ninh Thuan และกำหนดค่าปริมาณน้ำฝนเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่มากกว่า 0 mm/h ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงระยะเวลา 1 ปี ในจังหวัด Ninh Thuan มาหาค่าเฉลี่ยจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปคำนวณผลโดยใช้หลักการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) จากข้อมูลในตารางที่ 2 ผลที่ได้จะมีค่า $1.67 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$



รูปที่ 20 ข้อมูลความเร็วลมที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ต่างๆของจังหวัด Ninh Thuan

ตารางที่ 9 ข้อมูลความเร็วลม

Percentile (%)	0	25	50	75	100
ความเร็วลม (m/s)	0.046	2.992	4.292	5.845	11.397

ข้อมูลชุดที่ 3 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเสถียรชั้นบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูลความเสถียรของชั้นบรรยากาศระดับ A ถึง F ซึ่งเป็นระดับที่มีความเสถียรน้อยไปยังระดับที่มีความเสถียรมาก และกำหนดให้ค่าความเร็วลมและปริมาณน้ำฝนไว้ที่ค่าเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งจากข้อมูลทั้ง 3 ชุดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปรายละเอียดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ข้อมูลวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ชุดข้อมูล	ปริมาณน้ำฝน(1/s)	ความเร็วลม (m/s)	ความเสถียรชั้นบรรยากาศ
1	เปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 50, 65, 75, 90,95, 99 และ100	4.5	D
2	1.67 E-4	เปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 0, 25, 50, 75 และ 100	D
3	1.67 E-4	4.5	A, B, C, D, E, F

3.2.1.3 การจำลองผลในโปรแกรม HotSpot

หลังจากเตรียมข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี และข้อมูลภูมิอากาศเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot โดยในการจำลองผลจะแบ่งการจำลองออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนมีเงื่อนไขข้อมูลนำเข้าและวัตถุประสงค์ในการจำลองที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 11

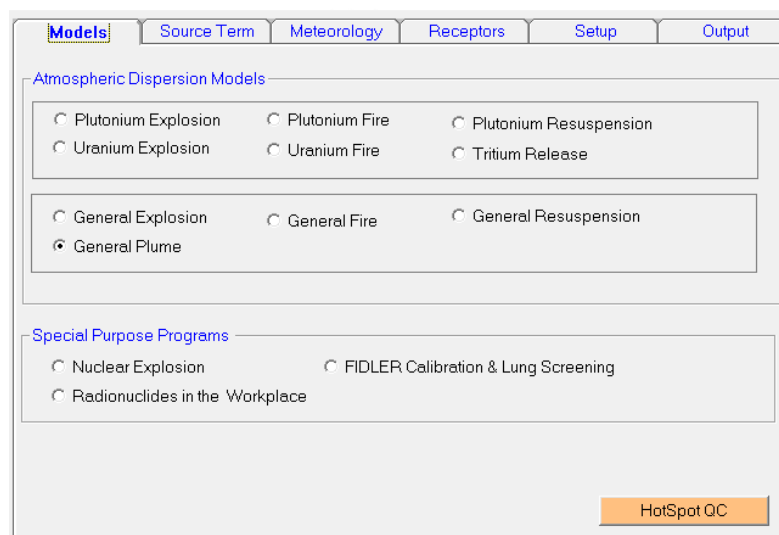
ตารางที่ 11 ข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ

การจำลองผล	ข้อมูลกัมมันตรังสี (Bq)	ข้อมูลภูมิอากาศ
การจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของฝน	2.45E+15	ข้อมูลชุดที่ 1
การจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของลม	2.45E+15	ข้อมูลชุดที่ 2
การจำลองผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเสถียรชั้นบรรยากาศ	2.45E+15	ข้อมูลชุดที่ 3

เมื่อทราบข้อมูลนำเข้าสำหรับใช้ในการจำลองผลแล้วข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าไปยังโปรแกรม HotSpot เพื่อใช้สำหรับจำลองผล โดยขั้นตอนในการใช้งานโปรแกรม HotSpot มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเลือกสถานการณ์การเกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Models)

เป็นส่วนแรกของโปรแกรม เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกการจำลองสถานการณ์การเกิดอุบัติเหตุตามความต้องการแสดงในรูปที่ 21 โดยในงานวิจัยนี้เลือกสถานการณ์การจำลองแบบ General plumes หรือสถานการณ์กลุ่มหมอกกัมมันตรังสีทั่วไปเนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะมีการกระจายตัวไปตามชั้นบรรยากาศในรูปแบบของกลุ่มหมอกกัมมันตรังสี



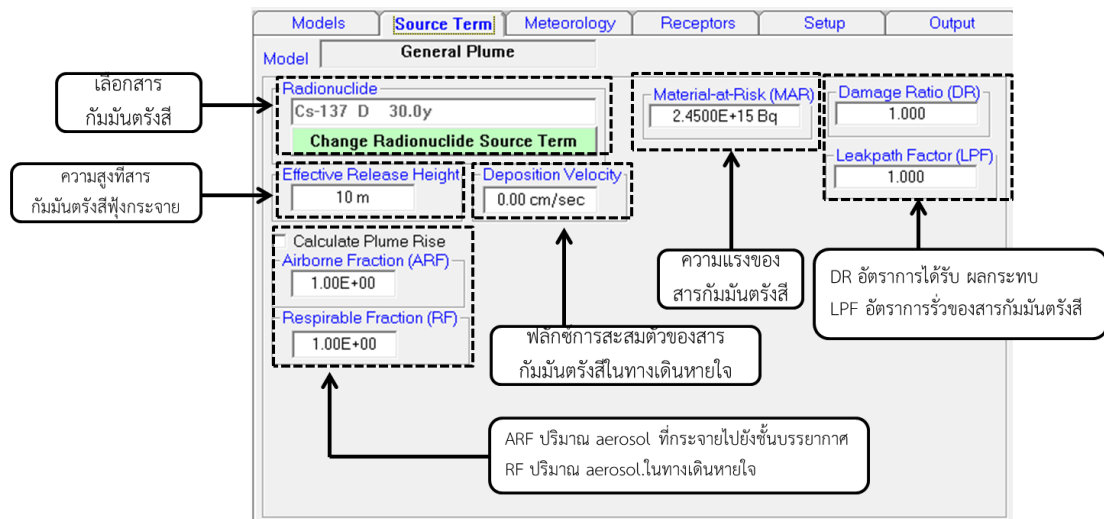
รูปที่ 21 สถานการณ์อุบัติเหตุรูปแบบต่างๆที่ใช้ในการจำลองผล

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกนิวไคลด์กัมมันตรังสีและกำหนดค่ากัมมันตภาพ (Source Term)

ขั้นตอนนี้มีเป็นขั้นตอนสำหรับกำหนดรายละเอียดข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์ผลโดยมีรายละเอียดดังนี้

- 2.1 การเลือกชนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถทำได้โดยการ กด Change Radionuclide Source Term จากนั้นกด Select nuclide แล้วเลือก Cs-137 กด Ok และ Return ตามลำดับ
- 2.2 Material at Risk (MAR) คือ ค่ากัมมันตภาพทั้งหมดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุซึ่งเป็นตำแหน่งสำหรับใส่ข้อมูล Source term
- 2.3 Effective Release Height คือ ค่าความสูงที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีฟุ้งกระจายกระจาย โดยงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 10 m เนื่องจากเป็นระยะที่มีโอกาสก่อให้เกิดค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิที่กระจายตัวมาถึงประเทศไทยมากกว่าที่ระยะ 60 และ 100 m

2.4 Deposition Velocity งานวิจัยนี้พิจารณาปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อทางเดินหายใจ เช่น inhalation, submersion และ ground shine ประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบทางรังสี ดังนั้นจึงพิจารณาความเร็วในการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีขนาดเส้นผ่านของอนุภาคต่ำกว่า $10\ \mu\text{m}$ ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะมีความเร็วในการสะสมตัว $0.3\ \text{cm/s}$ โดยสามารถแสดงตำแหน่งในการระบุข้อมูลได้ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 ตำแหน่งการระบุข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการจำลองผล

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Meteorology)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสำหรับกำหนดรายละเอียดข้อมูลสภาพอากาศสำหรับการจำลองผลการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วลม ทิศทางลม และความเสถียรของชั้นบรรยากาศ โดยมีรายละเอียดในการกำหนดข้อมูลดังต่อไปนี้

3.1 10-meter Wind Speed คือ เป็นตำแหน่งสำหรับใส่ข้อมูลความเร็วลม

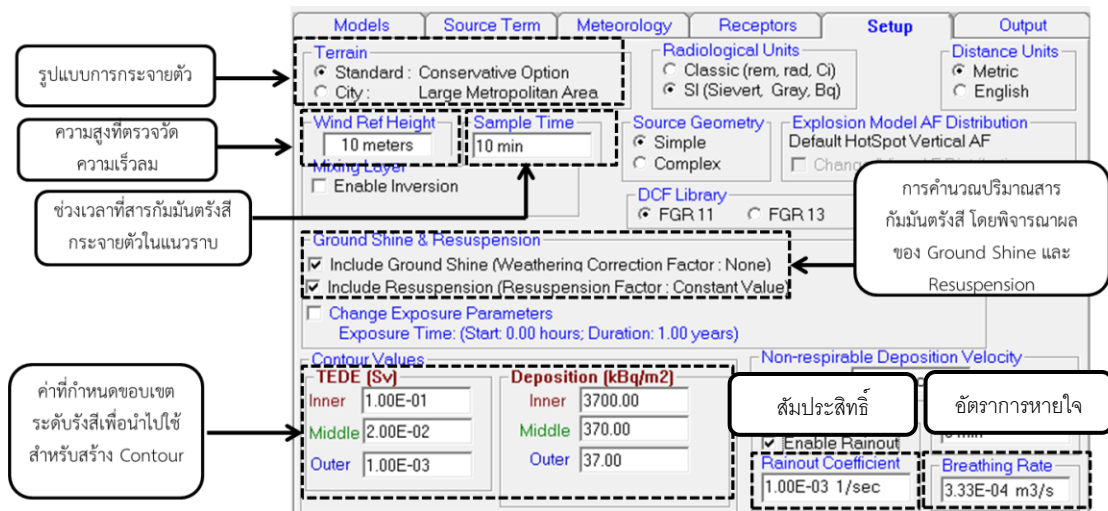
3.2 Wind Direction คือทิศทางลมที่บ่งบอกว่าลมพัดมาจากทิศใดโดย 0 องศา คือลมพัดมาจากทิศเหนือ, 90 องศาคือ ลมมาจากทิศตะวันออก, 180 องศาคือ ลมมาจากทิศใต้ และ 270 องศาคือลมมาจากทิศตะวันตก

3.3 Atmospheric Stability เป็นตำแหน่งสำหรับกำหนดระดับความเสถียรของชั้นบรรยากาศ โดยความเสถียรระดับ A มีความไม่เสถียรมาก, B มีความไม่เสถียรปานกลาง, C มีความไม่เสถียรต่ำ, D ความเสถียรระดับธรรมชาติ, E มีความเสถียรน้อย, F มีความเสถียรระดับปานกลาง, G กลางคืนที่มีลมน้อย โดยสามารถแสดงตำแหน่งในการระบุข้อมูลต่างๆได้ ดังรูปที่ 23

รูปที่ 23 รายละเอียดตำแหน่งในการระบุข้อมูลภูมิอากาศ

ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Setup)

- 4.1 Terrain คือ ลักษณะภูมิประเทศบริเวณที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการกระจายตัว งานวิจัยนี้ทำการจำลองผล โดยกำหนดเงื่อนไขให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่โดยปราศจากแรงเสียดทานจากผิวโลก ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้เลือกใช้ฟังก์ชัน Standard ซึ่งเป็นกรณีที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวในพื้นที่โล่ง
- 4.2 Wind Ref Height คือ ค่าความสูงที่ตรวจวัดความเร็วลม งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลลมระดับพื้นผิวในการวิเคราะห์ผลเนื่องจากลมในระดับพื้นผิวมีโอกาสส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสะสมตัวได้มากกว่าลมในระดับอื่นๆ เพราะเป็นระดับชั้นที่มีความเร็วลมต่ำที่สุดและมีระยะการเคลื่อนที่เพียง 0 ถึง 1 km เท่านั้น ซึ่งความสูงที่ใช้ในการตรวจสอบความเร็วลมระดับนี้ที่ค่าอยู่ที่ 10 m
- 4.3 Ground shine and Resuspension คือ เป็นบริเวณที่ให้ระบุว่าในการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต้องการคำนวณโดยรวมค่ารังสีที่ได้แพร่มาจากพื้น และรังสีที่เกิดการสะท้อนจากพื้นหรือไม่ งานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกระบวนการ
- 4.4 Wet Deposition เป็นการสะสมแบบเปียกโดยตัวโปรแกรมจะให้เราเลือกว่าจะคำนวณในรูปแบบที่มีการสะสมแบบเปียกหรือไม่ ถ้าต้องการจะต้องระบุค่าสัมประสิทธิ์น้ำฝนในช่อง Rainout coefficient ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูล ฝน
- 4.5 Breathing rate คืออัตราการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากการหายใจ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าดังกล่าวตามคู่มือการใช้งานของโปรแกรม HotSpot ที่ระบุไว้ว่าอัตราการได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีทางการหายใจต่อบุคคลมีค่า $3.33E-4 \text{ m}^3/\text{s}$



รูปที่ 24 ตำแหน่งในการระบุข้อมูลต่างๆในกระบวนการ Setup

ขั้นตอนที่ 5 ผลการจำลอง (Output)

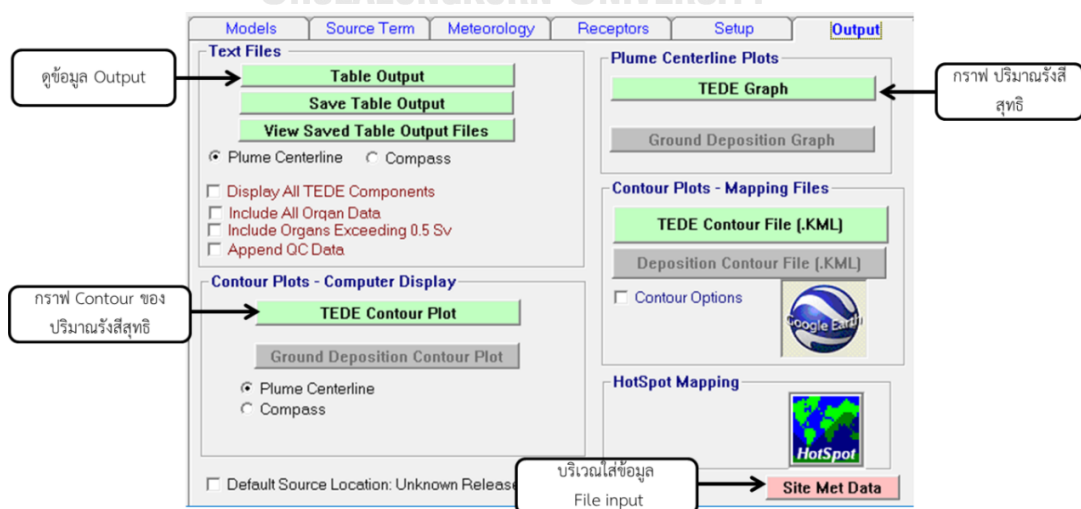
ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณผลตามเงื่อนไขข้อมูลที่ได้ระบุในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 โดยสามารถดูผลการคำนวณได้หลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 Table Output ผลที่ได้ออกมาจะเป็นตาราง Total Effective Dose Equivalent

5.2 TEDE contour plot ผลที่ได้ออกมาจะเป็นกราฟ Contour แสดงผลค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิตามขอบเขต Contour value ที่กำหนดในขั้นตอนที่ 4

5.3 TEDE graph ผลที่ได้ออกมาจะเป็นกราฟ Total Effective Dose Equivalent

5.4 Site Met Data กรณีที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณค่า Total Effective Dose Equivalent โดยมีเงื่อนไขสภาพอากาศตามความต้องการ



รูปที่ 25 ตำแหน่งแสดงผลการคำนวณรูปแบบต่างๆ

ผลที่ได้จากการจำลองผลจะถูกนำมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขสภาพอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากที่สุด เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดคะแนนข้อมูลภูมิอากาศสำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในกระบวนการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ผู้ทำวิจัยได้พัฒนาขึ้น เพื่อต้องการสร้างวิธีการสำหรับวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประชาชนได้รับโดยไม่ใช้โปรแกรมจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ (computer code) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา ซึ่งปัจจุบันทำได้เพียงวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ผลการวิเคราะห์ในส่วนดังกล่าวประกอบการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ โดยรายละเอียดการสร้างเกณฑ์คะแนนและวิธีการวิเคราะห์ผลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.2.2 การคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

กระบวนการนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนในส่วนแรกคือการสร้างเกณฑ์คะแนนสำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยเงื่อนไขสภาพอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการกระจายตัวได้ดีที่สุดจะถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับสร้างเกณฑ์คะแนน ในส่วนที่สองเป็นการคำนวณคะแนนการกระจายตัว ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุหรือตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านจะถูกนำมาคำนวณคะแนนจากเกณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยรายละเอียดแต่ละกระบวนการสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 เกณฑ์คะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ข้อมูลฝน ข้อมูลลม และ ข้อมูลความเสถียรชั้นบรรยากาศตลอดทั้งปี จะถูกนำมาจัดกลุ่มเป็น 16 กลุ่มตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลม เมื่อจัดกลุ่มเสร็จแล้วข้อมูลในแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและความน่าจะเป็น จากนั้นค่าทั้งสองจะถูกนำมาคูณกันเพื่อบ่งบอกปริมาณและโอกาสในการเกิด ฝน ลม และความเสถียรบรรยากาศที่เกิดขึ้นในทิศนั้นๆ ผลที่ได้จากการคูณทั้ง 16 กลุ่มจะถูกนำมาแบ่งเป็น 10 ช่วง แต่ละช่วงมีระยะห่าง 10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นข้อมูลแต่ละเปอร์เซ็นต์จะถูกกำหนดคะแนนตามอิทธิพลสภาพอากาศแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยข้อมูลช่วงใดที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากที่สุดจะมีคะแนนเป็น 10 ในขณะที่ข้อมูลชุดใดที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้น้อยจะมีคะแนนเป็น 1

3.2.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเบื้องต้น

ผลคูณระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลภูมิอากาศในแต่ละกลุ่มทั้งหมด 16 กลุ่ม จะถูกนำมาปรับทิศทางให้อยู่ในทิศที่อยู่ห่างกัน 180 องศา(ทิศตรงข้าม) เนื่องจากข้อมูลลมที่ดาวินโหลดจาก NOAA เป็นข้อมูลที่บันทึกในทิศที่ลมพัดผ่าน ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเกิดในทิศที่ทำมุม 180 องศา กับทิศที่ลมพัดผ่าน หลังจากปรับทิศทางข้อมูลภูมิอากาศทั้ง 16 กลุ่มเรียบร้อยแล้วข้อมูลเหล่านั้นจะถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยข้อมูลปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม และความเสถียรชั้นบรรยากาศในแต่ละทิศทาง จะถูกนำมาคำนวณคะแนนตามเกณฑ์คะแนนการกระจายตัวในหัวข้อ 3.2.2.1 จากนั้นคะแนนของลมฝนและความเสถียรของชั้นบรรยากาศในแต่ละทิศทางจะถูกนำมารวมกัน ทิศใดที่มีผลรวมคะแนนการกระจายตัวสูงหมายความว่าสภาพอากาศ ณ ทิศนั้นส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มาก ส่วนทิศที่มีผลรวมคะแนนต่ำ หมายความว่าสภาพอากาศในทิศดังกล่าวส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้น้อย ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีร่วมกับผลการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโปรแกรม HotSpot

3.3 กระบวนการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยใช้การจำลองผลของโปรแกรม HotSpot

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และเส้นทางที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang ,Fangchenggang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทย พร้อมทั้งประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะใช้ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี (source term) และข้อมูลภูมิอากาศตลอดทั้งปีของแต่ละโรงไฟฟ้าเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีร่วมกับผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเบื้องต้น และถูกนำไปใช้สำหรับประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ โดยรายละเอียดของการเตรียมข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี การเตรียมข้อมูลภูมิอากาศ และขั้นตอนในการจำลองผลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 ค่ากัมมันตภาพที่เกิดการรั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

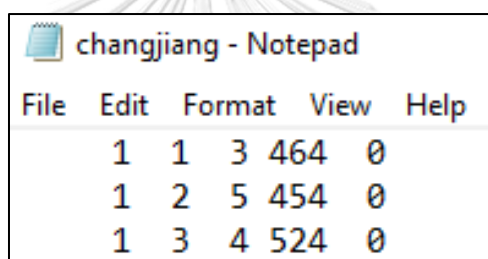
ข้อมูลค่ากัมมันตรังสี ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้ใช้เงื่อนไขเดียวกันกับข้อมูลค่ากัมมันตรังสีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลส่วนแรก โดยเลือกใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 และคำนวณค่ากัมมันตภาพจาก 1 เพอร์เซ็นต์ของค่าแกนปฏิกรณ์ (core inventory) ซึ่งค่า core inventory ของโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan คำนวณจากการเทียบบัญญัติไตรยางศ์กับค่า core inventory ของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ชนิดน้ำอัดแรงดัน (PWR) ขนาด 3,412 MWth จากรายงาน NUREG/CR6094 ซึ่งเป็นรายงานที่ได้ระบุค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิดภายในแกนปฏิกรณ์ ซึ่งทำการตรวจวัดในแท่งเชื้อเพลิงที่ถูกเปลี่ยนถ่ายออกจากเครื่องปฏิกรณ์เมื่อครบกำหนดการเปลี่ยนเชื้อเพลิง (end of cycle) จึงทำให้ค่ากัมมันตภาพที่วัดได้ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิดเป็นค่าสูงสุดในช่วงวัฏจักรการเดินเครื่อง แต่ในความเป็นจริงมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิดในแกนปฏิกรณ์ เช่น ค่าความดัน ค่ากำลังการผลิต ระยะเวลาในการเดินเครื่อง เป็นต้น ดังนั้นการคำนวณค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ในแกนปฏิกรณ์จากการเทียบบัญญัติไตรยางศ์อาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ต้องการประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีแบบง่ายและต้องการค่าที่คงความอนุรักษ์นิยม จึงได้เลือกใช้วิธีการประเมินค่ากัมมันตภาพในแกนปฏิกรณ์โดยใช้การเทียบบัญญัติไตรยางศ์ โดยผลที่ได้จากการคำนวณค่ากัมมันตภาพที่รั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม (source term) ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แห่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12 ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่ากัมมันตภาพของ Cs-137 ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในออร์เดอร์เดียวกันกับค่ากัมมันตภาพของ Cs-137 ที่เกิดการรั่วไหลจากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะซึ่งมีค่าประมาณ $12 \text{ E}+15 \text{ Bq}$ [4]

ตารางที่ 12 ค่ากัมมันตภาพ Cs-137 ที่รั่วไหลจากอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ (source term)

โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์	ชนิดของโรงไฟฟ้า	จำนวน Unit	กำลังการผลิต MWt	กัมมันตภาพ Cs-137 ที่รั่วไหล (Bq)
Changjiang [CNP-600]	PWR	2	3,860	$2.74\text{E}+15$
Yangjiang [CPR-1,000]	PWR	4	11,620	$8.24\text{E}+15$
Fangchenggang [CPR-1,000]	PWR	2	5,810	$4.12\text{E}+15$
Ninh Thuan [VVER-1,200]	PWR	2	5,837	$4.41\text{E}+15$

3.3.2 ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน

ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลใช้ข้อมูลตลอดทั้งปี ณ ตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุและตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน โดยการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้ใช้ข้อมูลปี 2015 จากเว็บไซต์ NOAA เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ผลในส่วนแรก แต่มีการจัดเตรียมข้อมูลที่แตกต่างออกไป โดยข้อมูลทั้งหมด 8,761 ชุดจะถูกป้อนเข้าไปยังไฟล์ txt และจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลนำเข้าของโปรแกรม HotSpot โดยมีรายละเอียดดังนี้ คอลัมน์ที่ 1 คือตำแหน่งของวันที่ในการตรวจวัด คอลัมน์ที่ 2 คือชั่วโมงในการตรวจวัด คอลัมน์ที่ 3 ทิศทางลม คอลัมน์ที่ 4 ความเร็วลม และ ความเสถียรบรรยากาศ คอลัมน์ที่ 5 คือปริมาณน้ำฝน โดยสามารถแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านการจัดรูปแบบได้ดังรูปที่ 26 โดยข้อมูลในบรรทัดแรกมีรายละเอียดดังนี้คือ ตรวจวัดในวันที่ 1 ชั่วโมงที่ 1 ลมเคลื่อนที่ในทิศ 3 (ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ NE) ความเร็วลม 4.6 m/s ความเสถียรบรรยากาศ ระดับ 4 (D) ปริมาณน้ำฝน 0 mm/h



File	Edit	Format	View	Help
1	1	3	464	0
1	2	5	454	0
1	3	4	524	0

รูปที่ 26 ข้อมูลภูมิอากาศในฟอร์มการใช้งานของโปรแกรม HotSpot

อย่างไรก็ตามการจัดรูปแบบข้อมูลทั้งหมด 8,761 แถวให้ตรงตามแบบฟอร์มข้อมูลนำเข้าของ HotSpot เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการจัดรูปแบบข้อมูล โดยหลังจากนำข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมดใส่ในไฟล์ txt ตามรายละเอียดด้านบนแล้วให้ทำการบันทึก โดยไม่ต้องจัดรูปแบบข้อมูลจากนั้นย้ายไฟล์ดังกล่าวไปยัง main directory ของโปรแกรม Cygwin 64 และเปิดไฟล์ txt อีกไฟล์ขึ้นพร้อมทั้งเขียนคำสั่งดังต่อไปนี้

program conversion

```
open(1,file='ชื่อไฟล์ input.txt')
open(2,file='ชื่อไฟล์ output.inp')
do k=1,8760
read(1,*) i1, i2, i3, i4, i5, i6
write(2,100) i1, i2, i3, i4, i5, i6
100 format(i6,3i3,i1,i3)
enddo
end program
```

หลังจากเขียนคำสั่งเสร็จให้ทำการบันทึกข้อมูลจากนั้นนำไฟล์ดังกล่าวไปไว้ใน main directory ของโปรแกรม Cygwin 64 เช่นกัน จากนั้นเปิดโปรแกรม Cygwin 64 เข้าไปยัง main directory แล้วใช้คำสั่ง ดังต่อไปนี้โดยพิมพ์ทีละคำสั่ง

- gfortran -c conversion.f
- gfortran -o executable
- conversion.o
- run executable

หลังจากใช้คำสั่งครบทุกคำสั่ง ไฟล์ที่ได้ออกมาจะมีนามสกุลเป็น inp และมีรูปแบบเป็นไฟล์ นำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot โดยสามารถแสดงวิธีการใช้งานได้ในลำดับถัดไป

3.3.3 การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ

ข้อมูลภูมิอากาศและข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ได้จัดเตรียมไว้จะถูกป้อนเข้าไปยังโปรแกรม HotSpot เพื่อจำลองผล ซึ่งจะมีวิธีการป้อนข้อมูลที่แตกต่างไปจากการวิเคราะห์ผลในส่วนแรกเล็กน้อย คือหลังจากป้อนข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีในหน้า Source term เสร็จให้คลิกไปยังหน้า output โดยไม่ต้องป้อนข้อมูลในหน้า meteorology, receptors และ setup จากนั้นกดที่ site met data และใส่ข้อมูลภูมิอากาศโดยการกด File เลือก Select Met File แล้วเลือกไฟล์ข้อมูลภูมิอากาศที่เราสร้างขึ้นจากหัวข้อที่ 3.2.2 จากนั้นกำหนดค่า เปอร์เซ็นต์ไทล์ ที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณในช่อง Percentile A ถึง E กำหนดลักษณะการพัดของลมโดยกด Met Data Input Format และกดที่ Create Percentile Table เพื่อให้โปรแกรมคำนวณผลการคำนวณที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปตารางแสดงค่า Total Effective Dose Equivalent ที่ เปอร์เซ็นต์ไทล์ต่างๆตามที่เรากำหนด ผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาสร้างกราฟปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่อองศา เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และตรวจสอบความถูกต้องด้วยผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเบื้องต้น แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละตำแหน่งจากโปรแกรม HotSpot ครอบคลุมพื้นที่ภายในรัศมี 200 km เท่านั้นซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวจากจุดเกิดอุบัติเหตุมายังประเทศไทย ดังนั้นในการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุด โดยทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากที่สุด จากผลการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งแรก จะเป็นเงื่อนไขในการเลือกพิจารณาตำแหน่งถัดไปสำหรับวิเคราะห์ผล โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 150 ถึง 200 km ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งใหม่จะถูกดาวน์โหลดเพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับวิเคราะห์ผลในลำดับที่สอง ส่วนข้อมูล

นิวไคลด์กัมมันตรังสีสำหรับการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่สองใช้ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ลดลงจากอิทธิพลของการสะสมตัวแบบแห้งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการสะสมตัวแบบแห้งส่งผลให้ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศมีอัตราการลดลงต่ำทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความอนุรักษ์นิยม (conservative) โดยค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ได้รับอิทธิพลจากการสะสมตัวแบบแห้งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4 ในบทที่ 2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตำแหน่งที่สองจะถูกนำมาสร้างกราฟปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิสองมิติเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ตำแหน่งที่หนึ่ง และถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาดำเนินการวิเคราะห์ผลในลำดับถัดไป การวิเคราะห์ผลแบบต่อจุดนี้จะทำต่อเนื่องกันจากจุดเกิดเหตุจนถึงเขตแดนประเทศไทย เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ครบทุกจุดแล้ว กราฟปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิสองมิติของแต่ละตำแหน่งจะถูกนำมาต่อกันเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยพิจารณาจากทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้มากที่สุดในแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผล หลังจากทราบเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแล้ว ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิบนเส้นทาง ในช่วงที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่เข้าสู่เขตแดนประเทศไทย จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า Regulatory limit (1 mSv) เพื่อประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ ซึ่งถ้าในกรณีนี้ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิในช่วงดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า 1 mSv ถือว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านั้นไม่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญ

Total Effective Dose Percentile Values

กำหนด Percentile ที่ต้องการศึกษา → Percentile-A (50 th), Percentile-B (90 th), Percentile-C (95 th), Percentile-D (99 th), Percentile-E (99.5 th)

HotSpot Default Values | Create Percentile Table

จำนวนปริมาณรังสีสุทธิ →

Write All sorted Frequency Data to Disc
Calculate Individual hourly data (No wind grouping)

Display JFD | Change Wind Group

Wind Speed Groups	Group
W0 : 0.10	Group 0 : W0 <= u <= W1
W1 : 0.50	Group 1 : W1 < u <= W2
W2 : 1.00	Group 2 : W2 < u <= W3
W3 : 2.00	Group 3 : W3 < u <= W4
W4 : 3.00	Group 4 : W4 < u <= W5
W5 : 4.00	Group 5 : W5 < u <= W6
W6 : 5.00	Group 6 : W6 < u <= W7
W7 : 6.00	Group 7 : W7 < u <= W8
W8 : 8.00	Group 8 : u > W8

Met Data Input Format: Change | MACCS2 - wind FROM sector

ลักษณะการพัดของลม

รูปที่ 27 ตำแหน่งสำหรับระบุข้อมูลในการจำลองผลส่วนที่ 2

บทที่ 4

ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ

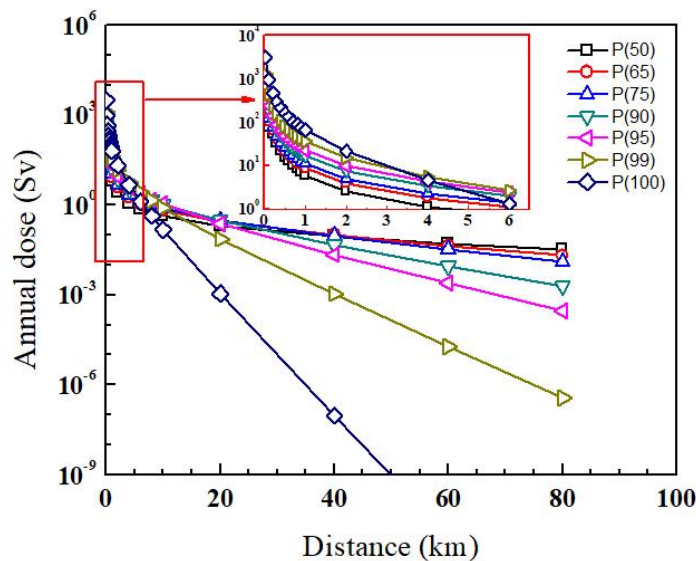
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ ผลการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มายังประเทศไทย พร้อมทั้งผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ

4.1 ผลวิเคราะห์สภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบปัจจัยทางสภาพอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม และความเสถียรของชั้นบรรยากาศ ว่าส่งผลอย่างไรต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในบรรยากาศ ทั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศจังหวัด Ninh Thuan ประเทศเวียดนามมาเป็นข้อมูลสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณน้ำฝน

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ใช้ นิวไคลด์กัมมันตรังสี Cs-137 ค่ากัมมันตภาพ 2.45 E+15 Bq เป็นข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี และใช้ข้อมูลภูมิอากาศซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วลม 4.5 m/s ความเสถียรชั้นบรรยากาศระดับ D ปริมาณน้ำฝน 0 mm/h และ ปริมาณน้ำฝนที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ 65, 75, 90, 95, 99 และ 100 เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผล ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 28

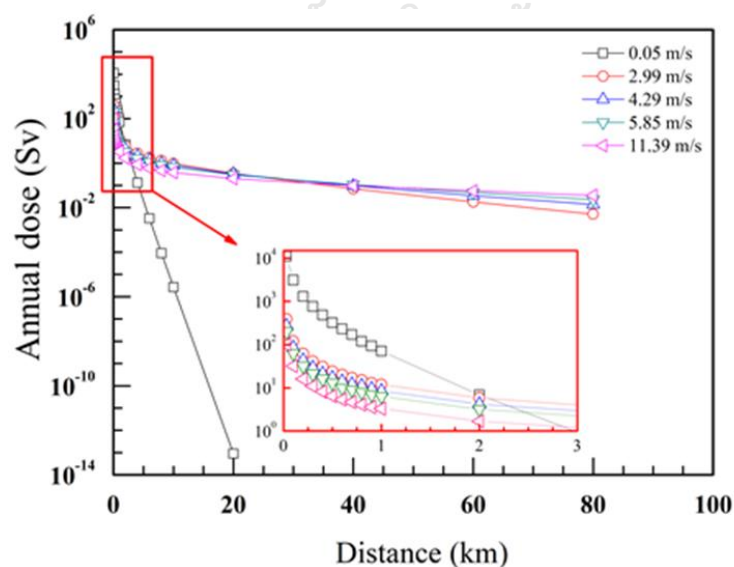


รูปที่ 28 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับอิทธิพลจากฝน โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ 50, 65, 75, 90, 95, 99, 100 โดยที่ระยะ 0 km คือจุดที่มีการรั่วไหลนิวไคลด์กัมมันตรังสี

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำฝนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ประชาชนได้รับ โดยปริมาณฝนที่สูงส่งผลให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ บริเวณใกล้จุดรั่วไหลมีค่าสูงแต่ในขณะเดียวกันเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าปริมาณรังสีปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันปริมาณฝนที่ต่ำส่งผลให้ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ ณ บริเวณใกล้จุดรั่วไหลมีค่าน้อยกว่าผลที่เกิดขึ้นจากปริมาณฝนที่สูง แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิจะมีอัตราการลดลงที่ช้ากว่า เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศสามารถถูกฝนชะล้างและเกิดการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมได้ โดยกรณีที่มีปริมาณฝนตกมากนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะถูกชะล้างจากชั้นบรรยากาศมากส่งผลให้เกิดการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมมาก แต่ในทางกลับกันจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศจะมีน้อยลง จึงเป็นผลให้ที่ระยะเริ่มต้นมีปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิสูงแต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นมีปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีที่มีฝนน้อยจะมีการชะล้างนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศน้อยเป็นผลให้ที่ระยะทางเริ่มต้นมีปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่ำ แต่ในขณะเดียวกันการสะสมตัวที่น้อยนี้ส่งผลให้มีปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศมาก จึงเป็นผลให้เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมได้มากกว่ากรณีฝนที่สูง

4.1.2 การวิเคราะห์ความเร็วม

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ใช้ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ผลในหัวข้อ 4.1.1 แต่ใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่แตกต่างกัน โดยใช้ความเสถียรบรรยากาศที่ระดับ D ค่าสัมประสิทธิ์การตกของฝน $1.67 \text{ E-}04 \text{ 1/S}$ และความเร็วมเปอร์เซ็นต์ไต้ ที่ 0, 25, 50, 75, และ 100 ซึ่งมีค่า 0.05, 2.99, 4.29, 5.87, และ 11.39 m/s ตามลำดับ ผลจากการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 29

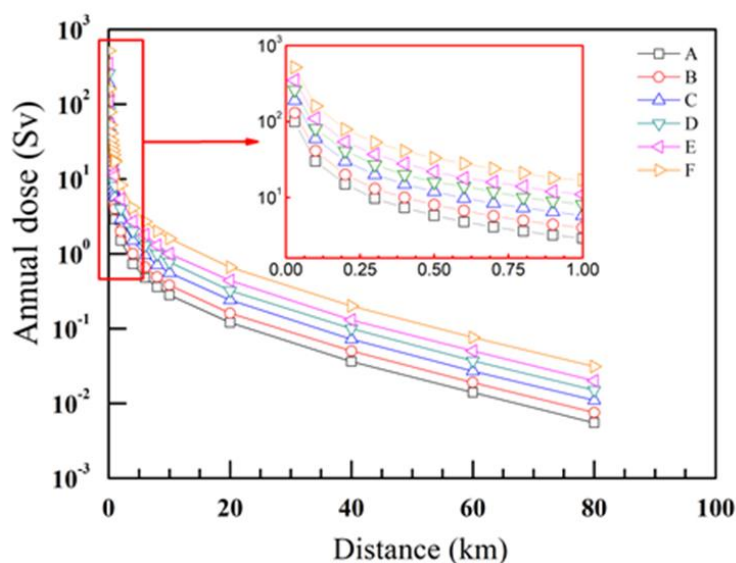


รูปที่ 29 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ได้รับอิทธิพลของความเร็วมเปอร์เซ็นต์ไต้ที่ 0, 25, 50, 75, 100 โดยที่ระยะ 0 km คือจุดรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

จากรูปที่ 29 แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมมีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยสามารถแบ่งพิจารณาได้สองส่วน ส่วนที่หนึ่งกรณีสภาพอากาศที่มีความเร็วลมต่ำ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 29 พบว่าความเร็วลมต่ำส่งผลให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าสูงเมื่ออยู่ใกล้จุดที่เกิดการรั่วไหล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีระยะทางเพิ่มขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศใช้ลมเป็นพาหะในการเคลื่อนที่ ความเร็วลมที่น้อยส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ช้า จึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มโอกาสให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ประชาชนได้รับมีค่าสูงในบริเวณใกล้จุดรั่วไหล ในขณะที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศจะมีปริมาณลดลง เป็นผลให้การสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในระยะถัดไปเกิดขึ้นน้อย และส่งผลให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าลดลง ส่วนที่สองกรณีสภาพอากาศที่มีความเร็วลมสูง ความเร็วลมที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้เร็วจึงเปรียบเสมือนการลดโอกาสในการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมทำให้บริเวณใกล้จุดรั่วไหล มีค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่ำกว่าผลที่เกิดขึ้นจากสภาพอากาศที่มีความเร็วลมต่ำ แต่ในขณะเดียวกันปริมาณรังสีที่ลอยตัวในชั้นบรรยากาศจะมีจำนวนมาก จึงส่งผลให้อัตราการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมในระยะที่ไกลออกไปมีค่ามาก ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่ประชาชนในระยะที่ไกลออกไปได้รับจึงมีค่าสูงกว่าผลที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความเร็วลมต่ำ

4.1.3 วิเคราะห์อิทธิพลของความเสถียรชั้นบรรยากาศ

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ใช้ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่นเดียวกับสองการจำลองผลที่ผ่านมา ส่วนข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้ในการจำลองผลใช้ข้อมูลความเร็วลม 4.5 m/s ค่าสัมประสิทธิ์การตกของฝน $1.67 \times 10^{-4} \text{ 1/S}$ และ ความเสถียรของชั้นบรรยากาศที่ระดับ A, B, C, D, E, F โดยผลจากการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณใกล้จุดรั่วไหลชั้นบรรยากาศที่มีความเสถียรมากที่สุด (ระดับF) ก่อให้เกิดปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมากที่สุด ในขณะที่ชั้นบรรยากาศที่มีความเสถียรต่ำสุด (ระดับ A) ส่งผลให้เกิดปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่ำสุด และเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิในแต่ละชั้นบรรยากาศมีแนวโน้มลดลง เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความสามารถในการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศที่มีความเสถียรสูงมีค่าต่ำ ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศมีปริมาณต่อปริมาตรสูง ดังนั้นเมื่อเกิดฝนนิวไคลด์กัมมันตรังสีจึงมีโอกาสตกตะกอนจากชั้นบรรยากาศได้มาก ส่วนชั้นบรรยากาศที่มีความเสถียรต่ำ นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากส่งผลให้มีความหนาแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่อปริมาตรอากาศที่มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงเป็นการลดโอกาสในการตกตะกอนจากการได้รับอิทธิพลของฝน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการตกตะกอนส่งผลให้ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศมีปริมาณลดลงจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิมีค่าต่ำเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 30 ปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิต่อระยะทางที่ได้รับอิทธิพลจากระดับความเสถียรของชั้นบรรยากาศระดับ A, B, C, D, E, F โดยที่ระยะ 0 km คือจุดรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

จากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งประกอบไปด้วยสามปัจจัยหลัก คือ ความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน และระดับความเสถียรของชั้นบรรยากาศ พบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยปริมาณน้ำฝนที่ต่ำ ความเร็วลมที่สูง และชั้นบรรยากาศที่มีความเสถียรสูง เป็นสภาวะอากาศที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้ดี โดยสภาวะอากาศดังกล่าวส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้เร็ว และสามารถสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้ในปริมาณที่สูงที่ระยะทางใดๆ ทำให้ค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิต่อระยะทางมีค่าสูง ในขณะที่ ความเร็วลมที่ต่ำ ความเสถียรชั้นบรรยากาศต่ำ และ ปริมาณน้ำฝนที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ช้าและเพิ่มโอกาสในการถูกชะล้างจากชั้นบรรยากาศลงสู่พื้นดิน ซึ่งจะทำให้ค่าปริมาณสมมูลยังผลสุทธิต่อระยะทางมีค่าสูง ในที่ระยะใกล้แหล่งเกิดอุบัติเหตุ แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิจะมีค่าต่ำกว่าผลที่เกิดขึ้นจากกรณีแรก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณฝนที่ต่ำ ความเร็วลมที่สูง และความเสถียรบรรยากาศที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปัจจัยที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้มาก

ปัจจัยทางภูมิอากาศ	ช่วงที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี
ปริมาณน้ำฝน	ต่ำ
ความเร็วลม	สูง
ความเสถียรชั้นบรรยากาศ	สูง

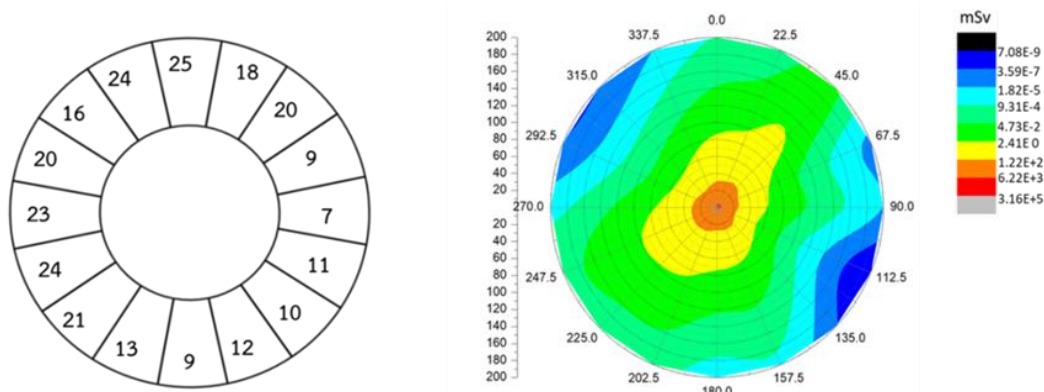
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล่านี้จะถูกนำมาใช้สำหรับสร้างเกณฑ์คะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากแต่ละโรงไฟฟ้ามายังประเทศไทย โดยข้อมูลลม ฝน และความเสถียรชั้นบรรยากาศในแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผล จะถูกนำมาจัดกลุ่มเป็น 16 กลุ่มตามทิศทางการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาแบ่งเป็น 10 เเปอร์เซ็นต์ไทม์และระยะบุงะแนน 1 ถึง 10 ตามอิทธิพลของสภาพอากาศแต่ละชนิด โดยชุดข้อมูลที่มีความเร็วลมสูง ความเสถียรบรรยากาศสูง ปริมาณน้ำฝนต่ำ จะมีคะแนนการกระจายตัวสูง ส่วนข้อมูลที่มีความเร็วลมต่ำ ความเสถียรบรรยากาศต่ำ ปริมาณฝนที่ สูง จะมีคะแนนการกระจายตัวต่ำ

4.2 การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ

การวิเคราะห์ผลในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศ ที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang , Fangchenggang, Ninh Thuan มายังประเทศไทย โดยในการวิเคราะห์ผลใช้กระบวนการในการวิเคราะห์สองกระบวนการร่วมกัน คือการนำค่ากลางของข้อมูลภูมิอากาศซึ่งเป็นค่าที่เกิดขึ้นจากผลคูณของค่าเฉลี่ยและค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสภาพอากาศแต่ละปัจจัย มาใช้สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยพิจารณาจากเกณฑ์คะแนนที่ถูกสร้างขึ้นตามผลการวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอากาศในหัวข้อที่ 4.1 กระบวนการในส่วนที่สองคือการจำลองผลด้วยโปรแกรม HotSpot การวิเคราะห์ผลในกระบวนการนี้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน และข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ได้รับอิทธิพลจากการสะสมตัวแบบแห้งเป็นข้อมูลนำเข้า สำหรับใช้ในการจำลองผล ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละตำแหน่งถูกใช้สำหรับสร้างกราฟปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิสองมิติ จากนั้นกราฟที่ได้ถูกนำมาต่อกันเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้ง 4 มายังประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม HotSpot มีขีดจำกัดในการวิเคราะห์ผลได้เพียงภายในรัศมี 200 km ต่อข้อมูลภูมิอากาศหนึ่งตำแหน่ง ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลทั้งสองกระบวนการจะใช้การวิเคราะห์ผลแบบต่อกัน โดยพิจารณาตำแหน่งถัดไปที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากผลการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งแรก โดยสามารถแสดงรายละเอียดผลจากการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งต่างๆตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang , Fangchenggang, Ninh Thuan มายังประเทศไทย ได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังไทย

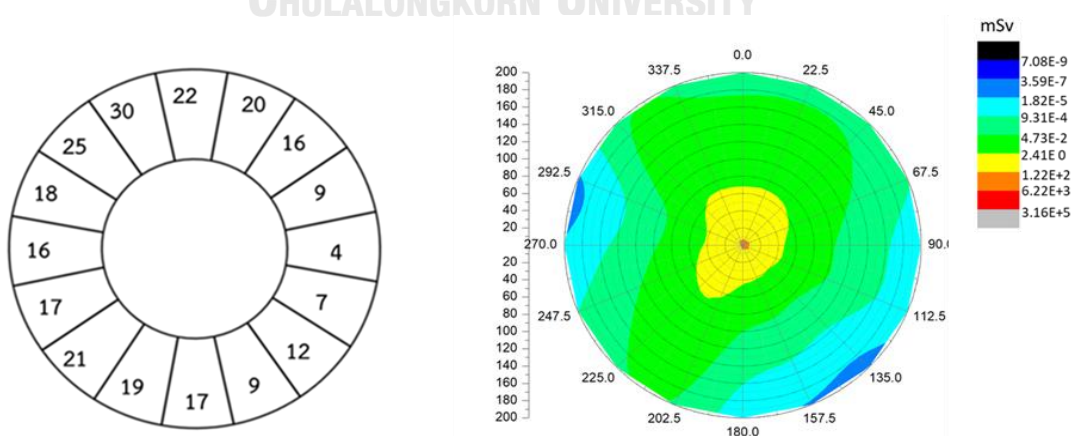
การวิเคราะห์ผลส่วนนี้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศสำหรับการวิเคราะห์ผลทั้งหมด 4 ชุด โดยสามารถแสดงค่ากลางของข้อมูลภูมิอากาศซึ่งเป็นผลคูณระหว่าง ค่าเฉลี่ย และ โอกาสความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศและเกณฑ์คะแนนการกระจายตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 19 ในภาคผนวก ก และในตารางที่ 23 ในภาคผนวก ข ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้ ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่ตั้งของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์โดยมีพิกัดอยู่ที่ละติจูด 19.5 และลองจิจูด 109 ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพอากาศในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) มีความเหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) มีคะแนนการกระจายตัวของลม ผน และความเสถียรบรรยากาศเป็น 10, 4, 10 ในขณะที่ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) มีคะแนนตามลำดับดังกล่าวเป็น 7, 8, 5 คะแนนตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นได้ว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กระจายตัวในทิศทั้งสองได้รับอิทธิพลจากลมและความเสถียรบรรยากาศสูง พร้อมทั้งได้รับอิทธิพลจากฝนในปริมาณที่ต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กระจายตัวในทิศดังกล่าวสามารถกระจายตัวได้ไกล โดยผลรวมคะแนนการกระจายตัวของทั้งสามปัจจัยในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) และตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) มีค่า 24 และ 20 คะแนนดังแสดงในรูปที่ 31 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 31 จะเห็นได้ว่าทิศเหนือ (N) และทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนข้างไปทางเหนือ (NNE) มีคะแนนการกระจายตัวที่สูงเช่นกันโดยมีคะแนน 25 และ 24 คะแนนตามลำดับแต่โรงไฟฟ้า Changjiang เป็นโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ทิศตะวันออกเฉียงเหนือของไทย นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แพร่กระจายจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากกว่าทิศอื่น ดังนั้นทิศดังกล่าวจึงถูกใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับเลือกตำแหน่งวิเคราะห์ผลในลำดับถัดไป



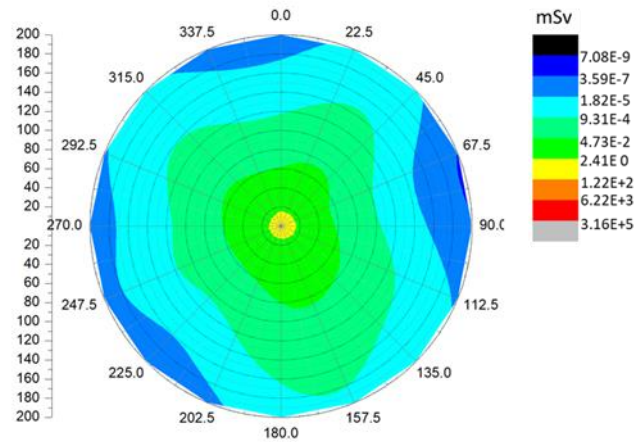
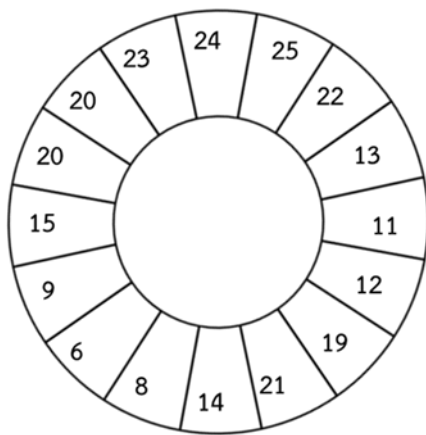
รูปที่ 31 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 2 มีพิกัดอยู่ที่ละติจูด 19.5 และลองจิจูด 109 ซึ่งตั้งอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตำแหน่งที่ 1 และมีระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 160 km ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้พบว่า ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ (NNW) ทิศเหนือ (N) ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ (NNE) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นทิศที่สภาพอากาศมีความเหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 32 แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุด ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์บางส่วนในตำแหน่งที่ 2 ในโซนตะวันออกเฉียงเหนือ ซ้อนทับกับผลการวิเคราะห์ในโซนตะวันตกเฉียงใต้ของตำแหน่งที่ 1 เมื่อตัดทิศที่มีข้อจำกัดเหล่านี้ออกไปแล้วจะมีเพียงทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เพียงทิศเดียวที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยทิศดังกล่าวมีคะแนนการกระจายตัวของ ลม ฝน และความเสถียรบรรยากาศเป็น 10, 1, 10 คะแนนตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของฝนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในทิศดังกล่าวมีค่าน้อยส่วนอิทธิพลจากลมและความเสถียรบรรยากาศมีค่าสูง ดังนั้นทิศดังกล่าวจึงเป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้ดี โดยคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในทิศนี้มีค่า 21 คะแนน ดังแสดงในรูปที่ 32

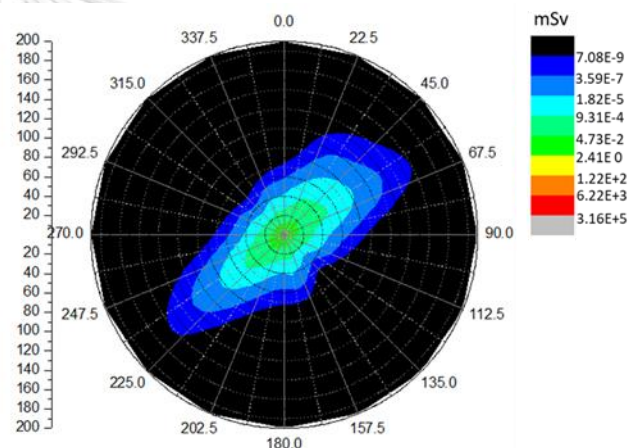
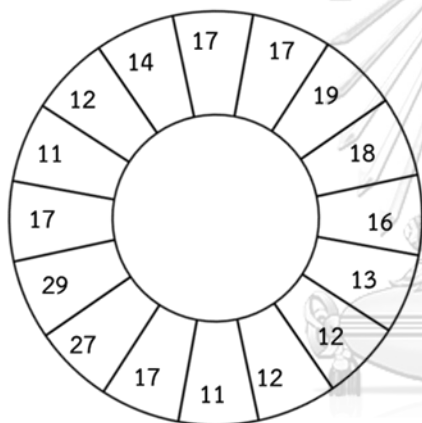
ตำแหน่งที่ 3 มีพิกัดอยู่ที่ละติจูด 18.5 และลองจิจูด 106 เป็นตำแหน่งที่อยู่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตำแหน่งที่ 2 และมีระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 160 km ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ เมื่อตัดข้อมูลที่เป็นขีดจำกัดของการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุดออกแล้วพบว่า ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSE) เป็นทิศที่ได้รับอิทธิพลจากลมและความเสถียรบรรยากาศมากที่สุดโดยมีคะแนนการกระจายตัวของลมและความเสถียรบรรยากาศเป็น 10 คะแนน และมีอิทธิพลที่เกิดจากฝน 1 คะแนน ดังนั้นจึงทำให้ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSE) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากในตำแหน่งที่ 3 โดยมีคะแนนการกระจายตัว 21 คะแนน ดังรูปที่ 33



รูปที่ 32 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย



รูปที่ 33 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 3 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย



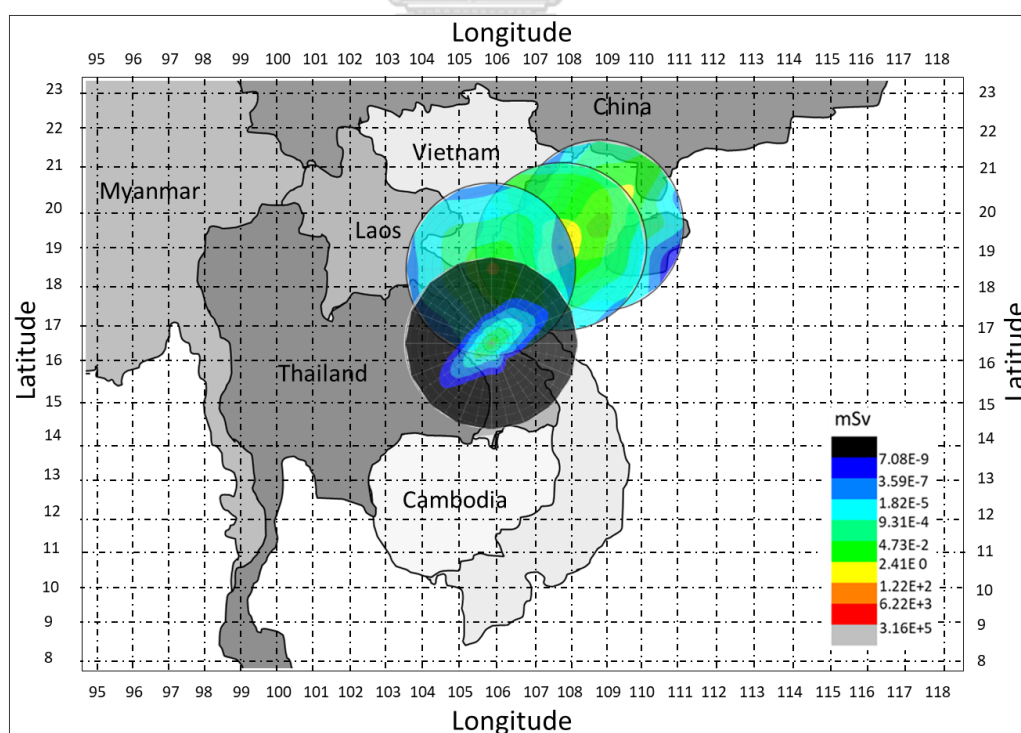
รูปที่ 34 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 4 เป็นตำแหน่งสุดท้ายในการวิเคราะห์ผลบนเส้นทางจากโรงไฟฟ้า Changjiang โดยตำแหน่งนี้มีพิกัดอยู่ที่ ละติจูด 17 และลองจิจูด 106 อยู่ในทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ของตำแหน่งที่ 3 และมีระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 150 km ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้พบว่า ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) มีความเหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุด โดยมีคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็น 27 และ 29 คะแนน แต่เมื่อพิจารณาผลการจำลองของ HotSpot พบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีมีแนวโน้มกระจายตัวในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) มากกว่าเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 34 ดังนั้นจึงได้เลือกทิศดังกล่าวสำหรับการประเมินผลกระทบทางรังสี โดยสามารถแสดงรายละเอียดตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลแต่ละตำแหน่งได้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang

ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ทิศกระจายตัว	ระยะทาง(km)
1	19.5	109	WSW	0 - 160
2	19	107.5	SW	160 - 320
3	18.5	106	SSE	320 - 470
4	17	106.5	SW	470 - 670

ดังนั้นเมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Changjiang นิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการกระจายตัวมาในโซนตะวันออกเฉียงเหนือโดยเป็นระยะทาง 320 km จากจุดรั่วไหล โดยจะมีการกระจายตัวมากที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) ในช่วง 160 km ส่วนในระยะทางที่เหลือจะมีการเคลื่อนที่มากที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังโซนตะวันออกเฉียงใต้ โดยกระจายตัวได้ดีที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ (SSE) ซึ่งจะเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 150 km จากนั้นเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) และเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยดังแสดงภาพที่ 35

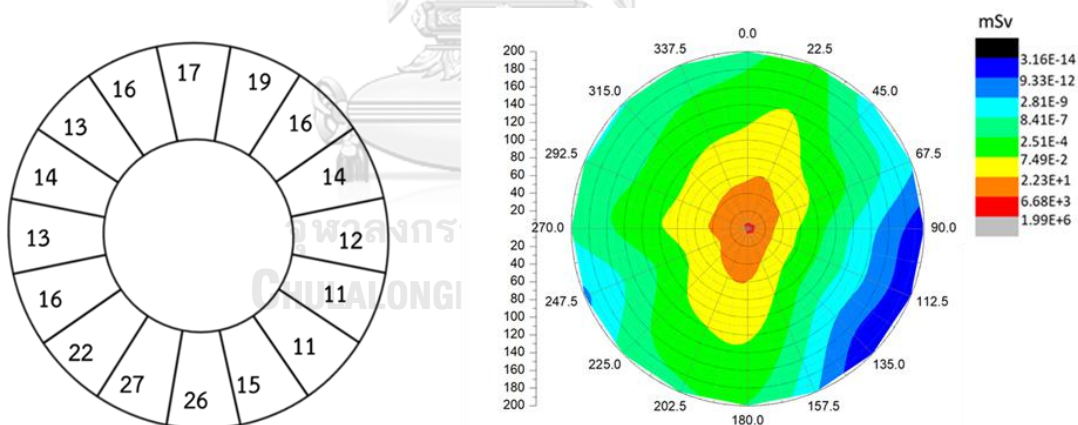


รูปที่ 35 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย

4.2.2 เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังไทย

การวิเคราะห์เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทยใช้ข้อมูลภูมิอากาศในการวิเคราะห์ทั้งหมด 6 ชุด โดยสามารถแสดงรายละเอียดค่ากลาง ข้อมูลภูมิอากาศ และเกณฑ์คะแนนที่ใช้ในการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ได้ดัง ตาราง 20 ในภาคผนวก ก. และตาราง 24 ในภาคผนวก ข. ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์แต่ละตำแหน่งมีรายละเอียดดังนี้

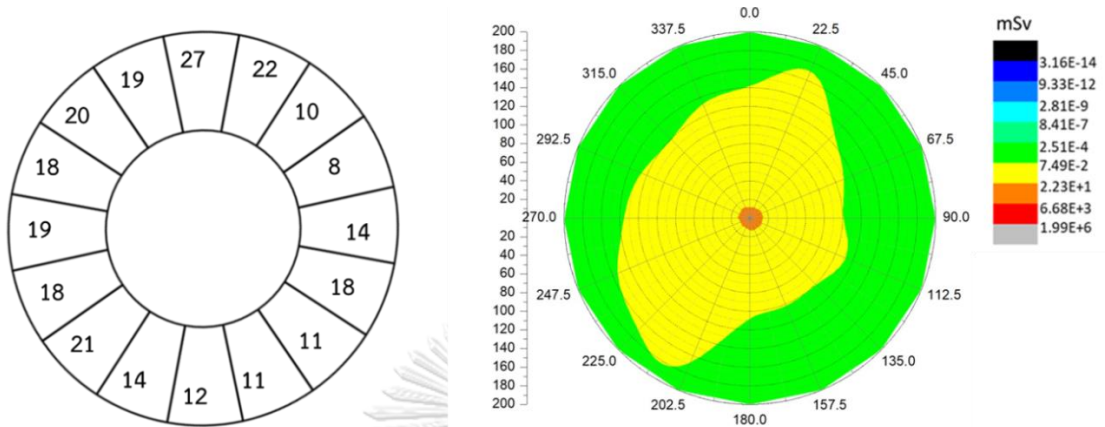
ตำแหน่งแรกที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลเป็นตำแหน่งที่ตั้งของโรงไฟฟ้า Yangjiang โดยมีพิกัดอยู่ที่ละติจูด 22 และลองจิจูด 112.5 เมื่อพิจารณาสภาพอากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าวพบว่าทิศที่สภาพอากาศเหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีอยู่ 2 ส่วน ในส่วนที่ 1 คือทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ (NNE) ซึ่งมีคะแนนการกระจายตัว 19 คะแนน ในส่วนที่สองคือ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) โดยมีคะแนนการกระจายตัว 27 คะแนน ดังแสดงในรูปที่ 36 แต่อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้า Yangjiang ตั้งอยู่ ณ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) ของตำแหน่งที่ 1 จึงมีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยได้มากกว่า ดังนั้นทิศดังกล่าวจึงถูกเลือกใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาคำแห่งถัดไปที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล



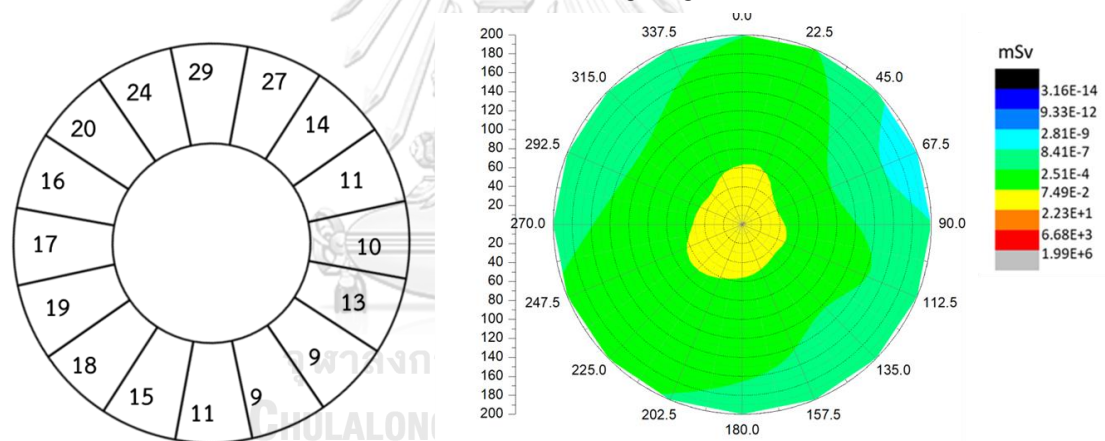
รูปที่ 36 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 2 ที่ตรงตามเงื่อนไขของผลการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งพิกัดอยู่ที่ละติจูด 20.5 และลองจิจูด 112 โดยข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้แสดงให้เห็นว่าทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) มีสภาพอากาศที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุด โดยมีคะแนนการกระจายตัวของลม ความเสถียรบรรยากาศ และฝน เป็น 10 , 10 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลมและความเสถียรบรรยากาศมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในปริมาณที่สูงในขณะที่อิทธิพล

จากฝนมีค่าต่ำ ดังนั้นสภาพอากาศ ณ บริเวณนั้นส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้ดีและเกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินน้อย โดยผลรวมคะแนนการกระจายตัวจากสภาพอากาศ ณ ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า 21 คะแนน ดังแสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 37 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายิ่งประเทศไทย

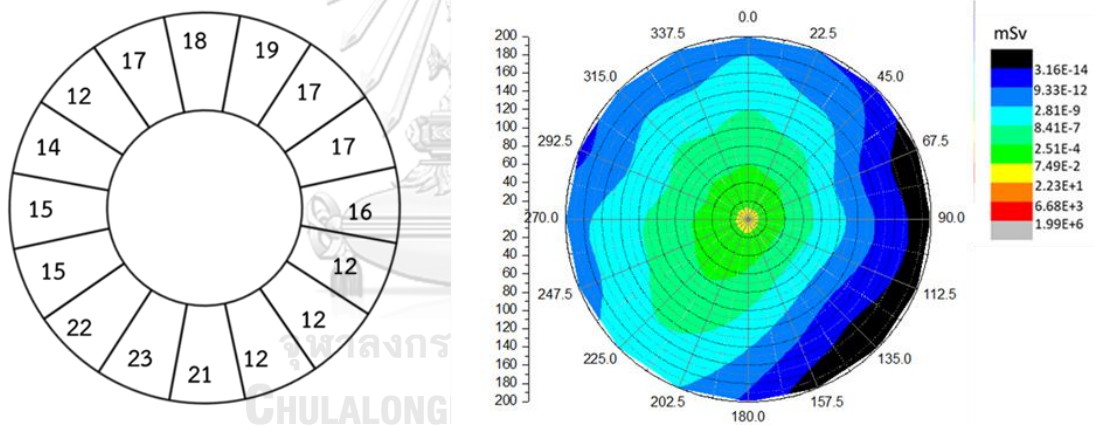


รูปที่ 38 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 3 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายิ่งประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งที่อยู่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของตำแหน่งที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 140 km มีพิกัดอยู่ที่ละติจูด 19.5 และลองจิจูด 111 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศโดยตัดข้อมูลที่เป็นขีดจำกัดของวิธีการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุดออกแสดงให้เห็นว่า ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) เป็นทิศที่มีความเหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี เนื่องจากทิศทั้งสองมีความเร็วลมและความเสถียรชั้นบรรยากาศที่สูง โดยค่าคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสองทิศมีค่า 18 และ 19 คะแนนตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการจำลองของ HotSpot พบว่าทิศ

ตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นทิศที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 38 ดังนั้นจึงเลือกทิศดังกล่าวเป็นเงื่อนไขเลือกตำแหน่งลำดับถัดไป

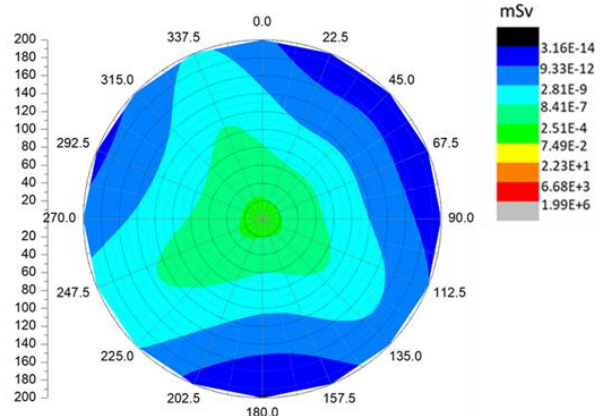
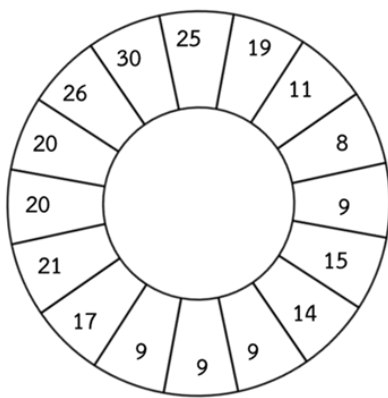
ตำแหน่งที่ 4 มีพิกัดอยู่ที่ ละติจูดที่ 17 และลองจิจูด 109 ซึ่งมีระยะห่างจากตำแหน่งที่ 3 เป็นระยะ 140 km ลักษณะภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้จะมีความเร็วลมต่ำโดยมีค่าความเร็วเฉลี่ยในแต่ละทิศทางอยู่ในช่วง 1 ถึง 2.5 m/s และมีปริมาณฝนที่ตกน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 1 mm/h แต่มีความเสถียรบรรยากาศที่สูง โดยส่วนใหญ่มีความเสถียรบรรยากาศในระดับ D สภาพอากาศในลักษณะนี้จะส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถลอยตัวได้ดีมีการสะสมตัวที่ต่ำแต่จะเคลื่อนที่ไปอย่างช้า เมื่อคำนวณคะแนนกระจายตัวในแต่ละทิศทางพบว่าทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางใต้ (SSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นทิศที่สภาพอากาศส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีกระจายตัวได้ดีที่สุดโดยมีคะแนนการกระจายตัว 23 และ 22 คะแนนตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางใต้ (SSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) ช่วยส่งเสริมให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีในทิศตะวันตกเฉียงใต้(SW)มีการกระจายตัวที่ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 39 ดังนั้นจึงเลือกทิศดังกล่าวเป็นทิศสำหรับวิเคราะห์ผลในลำดับถัดไป



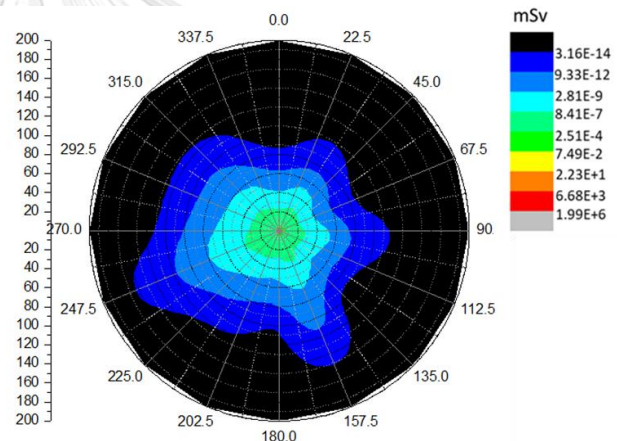
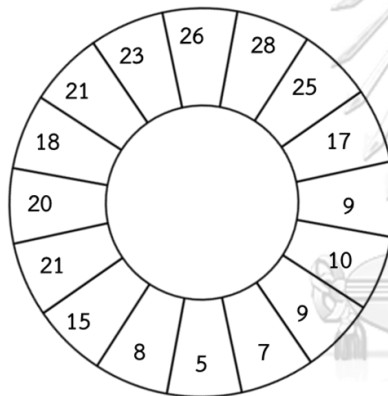
รูปที่ 39 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 5 และตำแหน่งที่ 6 มีระยะห่างจากตำแหน่งที่ 4 เป็นระยะ 180 และ 340 km ตามลำดับข้อมูลภูมิอากาศของทั้งสองตำแหน่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือมีความเสถียรบรรยากาศส่วนใหญ่อยู่ในระดับ D มีปริมาณฝนต่ำ แต่มีความแตกต่างกันที่ความเร็วลม ตำแหน่งที่ 5 มีความเร็วลมที่สูง โดยมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4 ถึง 8 m/s ในขณะที่ตำแหน่งที่ 6 มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 m/s ดังนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนผ่านตำแหน่งทั้งสองจะสามารถลอยตัวได้ดี แต่จะเคลื่อนที่ได้เร็วในช่วงตำแหน่งที่ 5 และจะเคลื่อนที่ช้าลงในตำแหน่งที่ 6 โดยทิศตะวันตกเฉียงใต้

ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ดีทั้งสองตำแหน่ง ดังในรูปที่ 40 และ 41 โดยสามารถแสดงรายละเอียดตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลได้ดังตาราง 15



รูปที่ 40 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 5 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

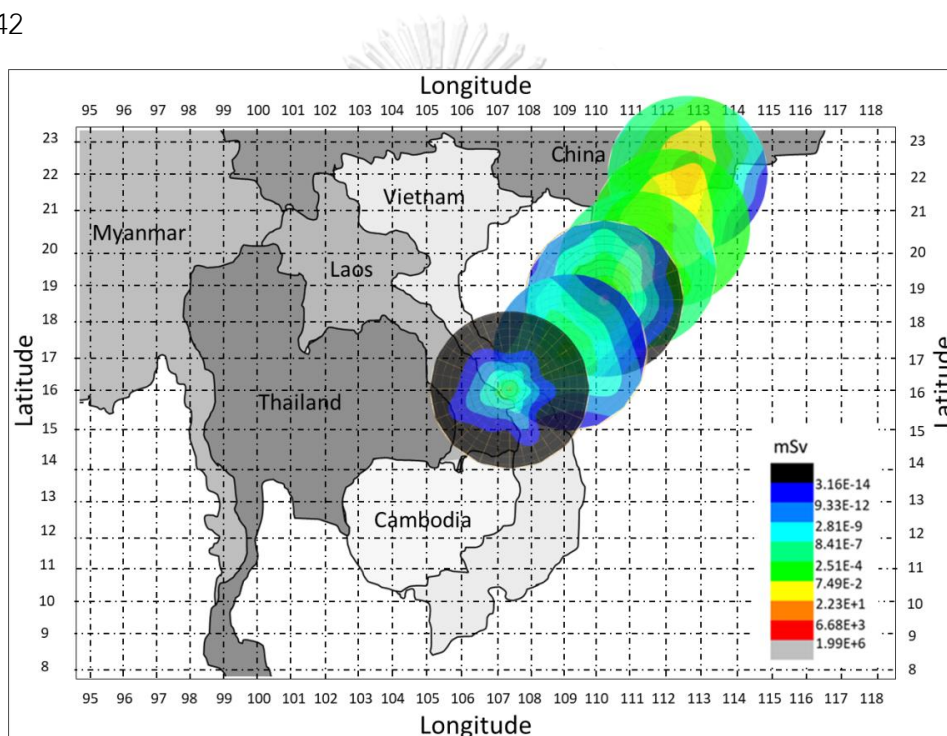


รูปที่ 41 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 6 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

ตารางที่ 15 ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang

ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ทิศกระจายตัว	ระยะทาง(km)
1	22	112.5	SSW	0 - 160
2	20.5	112	SW	160 - 300
3	19.5	111	WSW	300 - 440
4	18.5	110	SSW	440 - 620
5	17	109	WSW	620 - 780
6	16.5	107.5	WSW	780 - 980

เมื่อพิจารณาจากผลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทยมีเส้นทางการกระจายตัวที่ไม่ซับซ้อน โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มเคลื่อนที่จากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) ของตำแหน่งที่ 1 เป็นระยะทาง 160 km จากนั้นเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของตำแหน่งที่ 2 เป็นระยะทาง 140 km และเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) ในตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4 เป็นระยะทางรวมกัน 320 km สุดท้ายเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) ผ่านตำแหน่งที่ 5 และตำแหน่งที่ 6 และเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 42

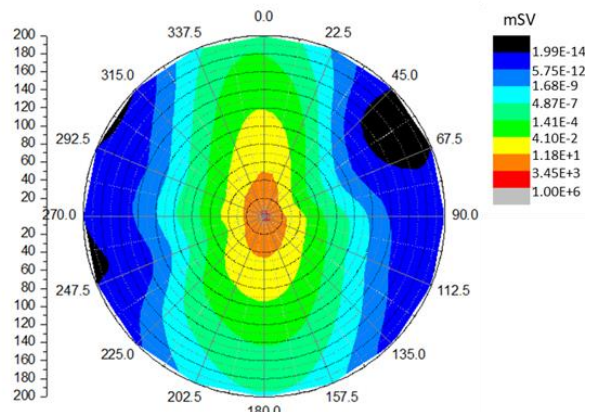
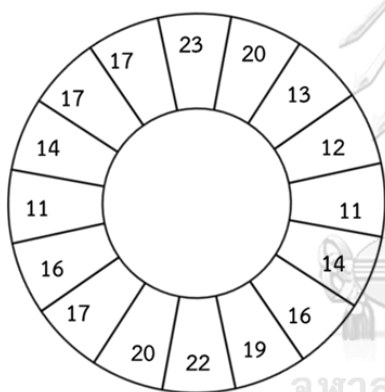


รูปที่ 42 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

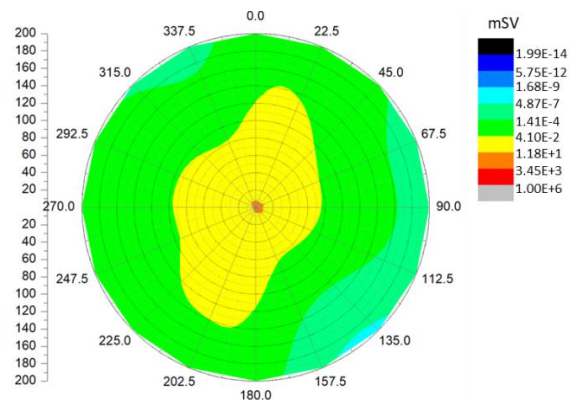
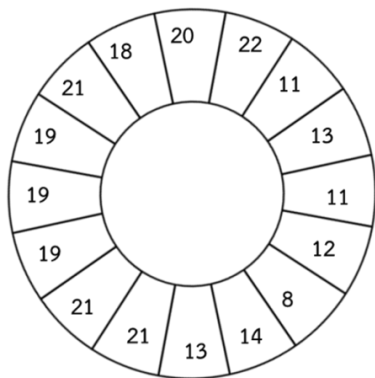
4.2.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังไทย

การวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทยใช้ข้อมูลภูมิอากาศในการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 ชุดโดยสามารถแสดงรายละเอียดค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศและเกณฑ์คะแนนที่ใช้ในการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ดัง ตารางที่ 21 ภาคผนวก ก และตารางที่ 25 ภาคผนวก ข ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์แต่ละตำแหน่งมีรายละเอียดดังนี้ ตำแหน่งที่ 1 มีพิกัดละติจูดที่ 22 และลองจิจูดที่ 108.5 ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้มีความเร็วลมต่ำและมีฝนน้อย โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยไม่เกิน 2

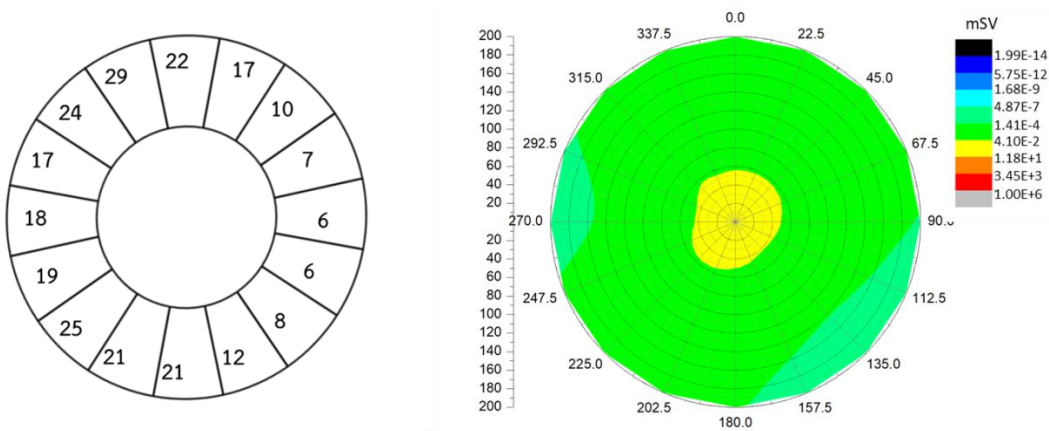
m/s และปริมาณฝนเฉลี่ยมากที่สุดที่ 1.75 mm/h ส่วนความเสถียรบรรยากาศอยู่ในระดับ D ดังนั้น นิวไคลด์กัมมันตรังสีในบริเวณนี้จะมีการเคลื่อนที่ได้ช้า และกระจายตัวได้ดี โดยทิศใต้ (S) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ดีและมีโอกาสส่งผลกระทบต่อไทยมาก โดยมีคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี 22 คะแนน รูปที่ 43 ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากตำแหน่งแรกเป็นระยะทาง 150 km และ 260 km ตามลำดับ ทั้งสองตำแหน่งมีสภาพอากาศคล้ายคลึงกับตำแหน่งที่ 1 แต่มีความเร็วลมที่สูงกว่า โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 9 m/s ดังนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 จะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศและผลการจำลองของโปรแกรม HotSpot ในแต่ละทิศทางพบว่า ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางใต้ (SSW) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้ดีในตำแหน่งที่ 2 โดยมีคะแนนการกระจายตัว 21 คะแนน ในขณะที่ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้ดีที่สุดในตำแหน่งที่ 3 โดยคะแนนการกระจายตัว 25 คะแนน ดังรูปที่ 44 และ 45 ตามลำดับ



รูปที่ 43 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย



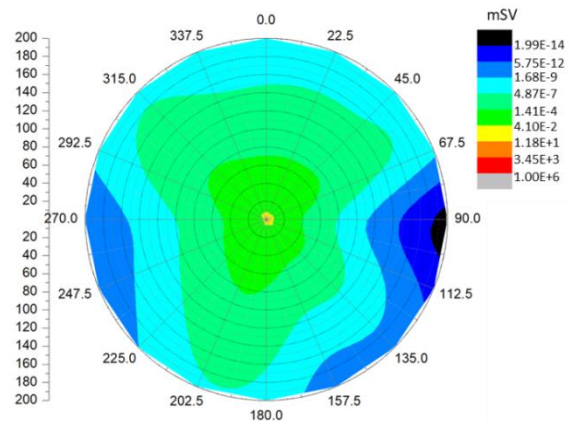
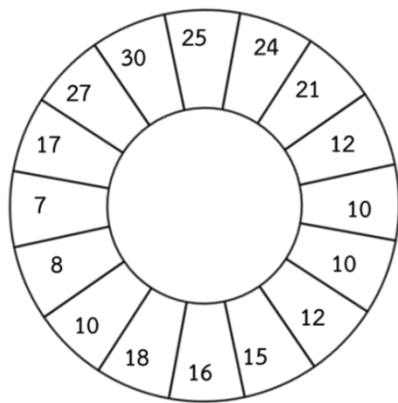
รูปที่ 44 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย



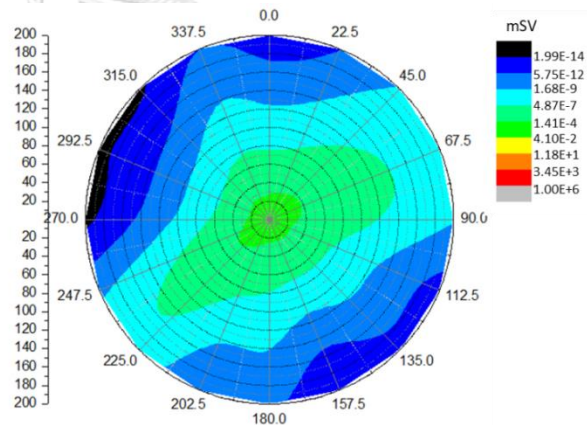
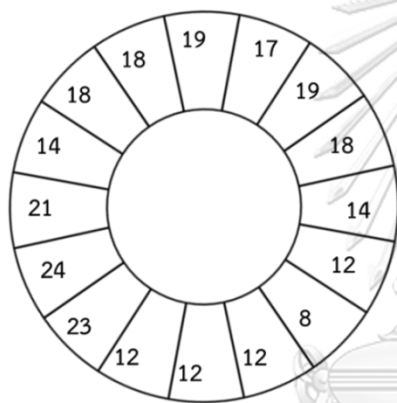
รูปที่ 45 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 3 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของ

นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 4 มีพิกัดอยู่ที่ละติจูดที่ 19 และ ลองจิจูดที่ 108 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศตำแหน่งนี้พบว่าปริมาณฝนที่ค่อนข้างสูง โดยมีค่าเฉลี่ยฝนอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 mm/h และมีความเร็วลมเฉลี่ยในช่วง 3 ถึง 7 m/s จึงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ ตำแหน่งนี้เกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้มากกว่า 3 ตำแหน่งที่ผ่านมาถึงแม้จะมีการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้เร็วก็ตาม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสภาพอากาศของทั้ง 3 ปัจจัยร่วมกันพบว่า ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างได้ (SSW) เป็นที่สารสามารถเคลื่อนที่ได้มากที่สุดโดยมีคะแนนการกระจายตัว 18 คะแนนดังแสดงในรูปที่ 46 จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ไปในทิศที่อยู่ระหว่าง ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากทิศทั้งสองมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่สูงที่สุดจากข้อมูลทั้งหมด 16 ทิศ และเป็นทิศที่มีความถี่ในการเกิดลมมากถึง 19 และ 24 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านทั้งสองทิศดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นด้วยคะแนนการกระจายตัว 24 และ 23 คะแนนตามลำดับ ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยดังแสดงในรูปที่ 47 แต่อย่างไรก็ตามผลการจำลองของโปรแกรม HotSpot แสดงให้เห็นว่าทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) มีการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากกว่า ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับประเมินผลกระทบทางรังสีที่ส่งผลต่อประเทศไทย โดยสามารถแสดงรายละเอียดตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล และเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทยได้ดังตารางที่ 16 และรูปที่ 48 ตามลำดับ



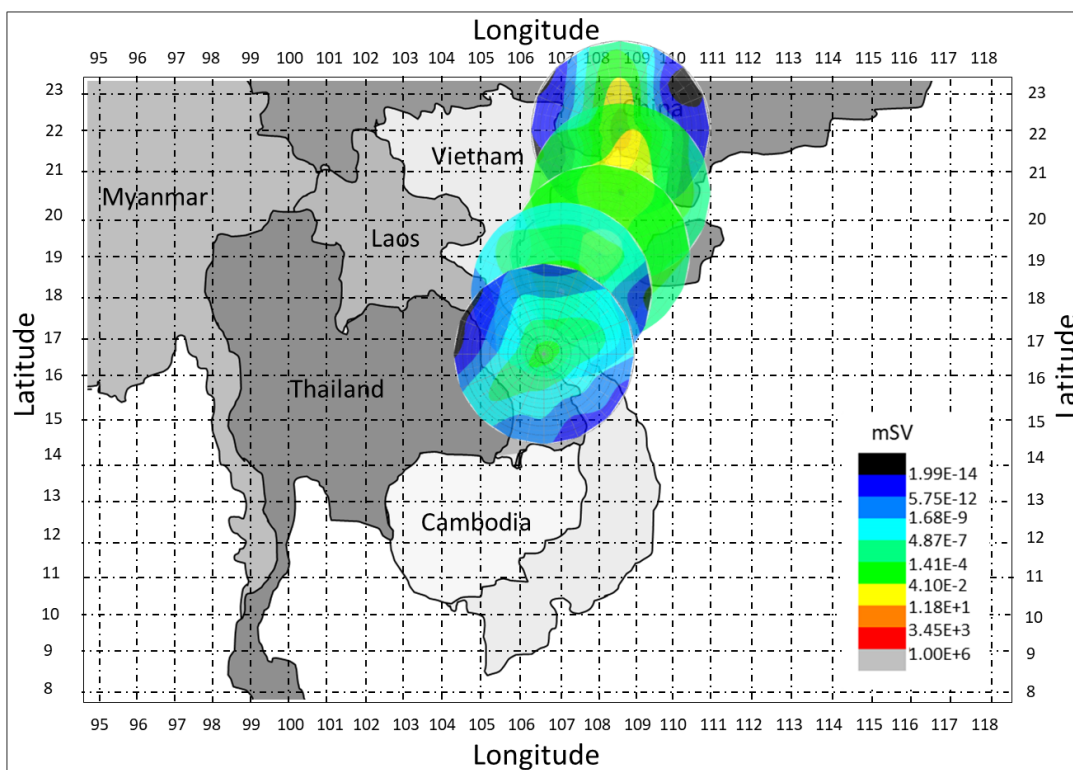
รูปที่ 46 ลักษณะการกระจายตัวของนิวเคลอ์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวเคลอ์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย



รูปที่ 47 ลักษณะการกระจายตัวของนิวเคลอ์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 5 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวเคลอ์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย

ตารางที่ 16 ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวนิวเคลอ์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang

ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ทิศกระจายตัว	ระยะทาง(km)
1	22	108.5	s	0 – 150
2	20.5	108.5	ssw	150 – 300
3	19	108	sw	300 – 480
4	18	107	ssw	480 – 590
5	16.5	106.5	sw	590 - 790



รูปที่ 48 เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังไทย

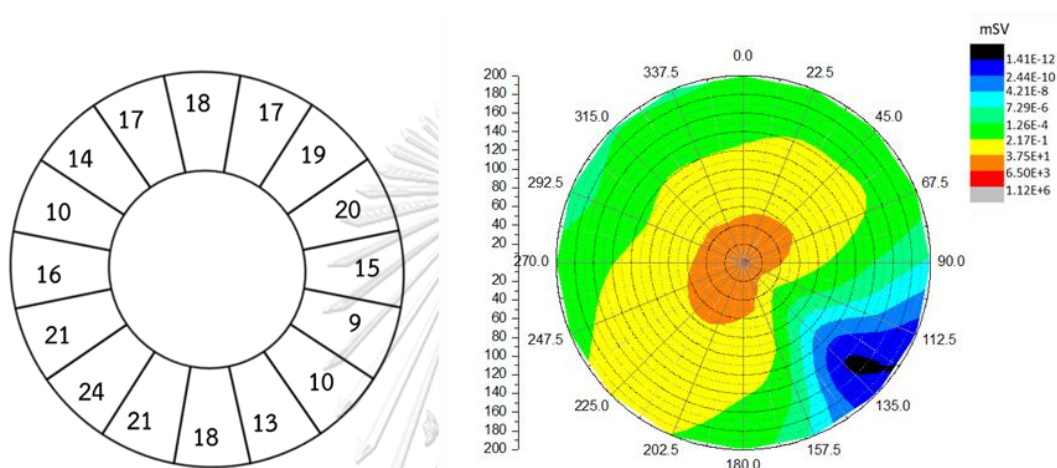
เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้า Yangjiang และ Changjiang มายังไทย โดยมีการเคลื่อนที่มาในโซนตะวันตกเฉียงใต้ของโรงไฟฟ้า แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโรงไฟฟ้าทั้งสามตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยประกอบกับโรงไฟฟ้าทั้งสามตั้งอยู่ ณ ประเทศจีนซึ่งมีความกดอากาศที่สูงกว่าไทยจึงเป็นผลให้อากาศ ณ บริเวณดังกล่าวเคลื่อนที่มายังประเทศไทยซึ่งมีความกดอากาศที่ต่ำกว่า

4.2.4 เส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังไทย

การวิเคราะห์เส้นทางเคลื่อนที่ของสารกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทยใช้ข้อมูลภูมิอากาศในการวิเคราะห์ทั้งหมด 7 ชุดโดยสามารถแสดงรายละเอียดค่ากลาง ข้อมูลภูมิอากาศ และเกณฑ์คะแนนที่ใช้ในการคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ดังตารางที่ 22 ภาคผนวก ก และตารางที่ 26 ภาคผนวก ข ตามลำดับ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่ตั้งของโรงไฟฟ้าซึ่งมีพิกัดอยู่ที่ ละติจูด 11.5 องศา ลองจิจูด 109 องศา ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้มีความเร็วลมเฉลี่ยในช่วง 2 ถึง 7 m/s และความเสถียรบรรยากาศส่วนใหญ่

อยู่ในระดับ D ปริมาณฝนเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 mm/h ภูมิอากาศในลักษณะนี้จะส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและมีการสะสมตัวลงสู่พื้นดินน้อย โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ณ ตำแหน่งนี้สามารถกระจายตัวได้ดีในสองทิศทาง คือทิศตะวันตกเฉียงใต้(SW) และทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันออก (ENE) โดยมีคะแนนการกระจายตัว 24 และ 20 คะแนน ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 49 แต่อย่างไรก็ตามทิศตะวันตกเฉียงใต้(SW) เป็นทิศที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากกว่าจึงได้เลือกทิศดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาตำแหน่งที่ 2 ที่ใช้ในการจำลองผล

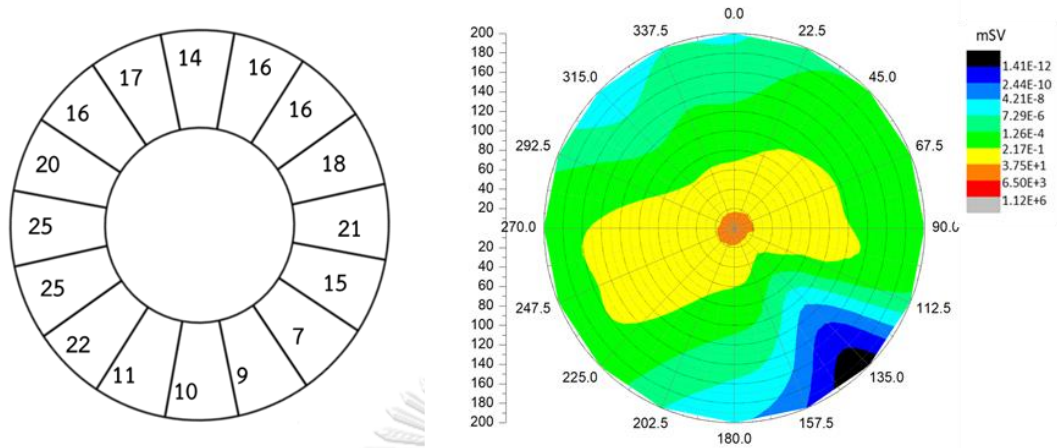


รูปที่ 49 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 1 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

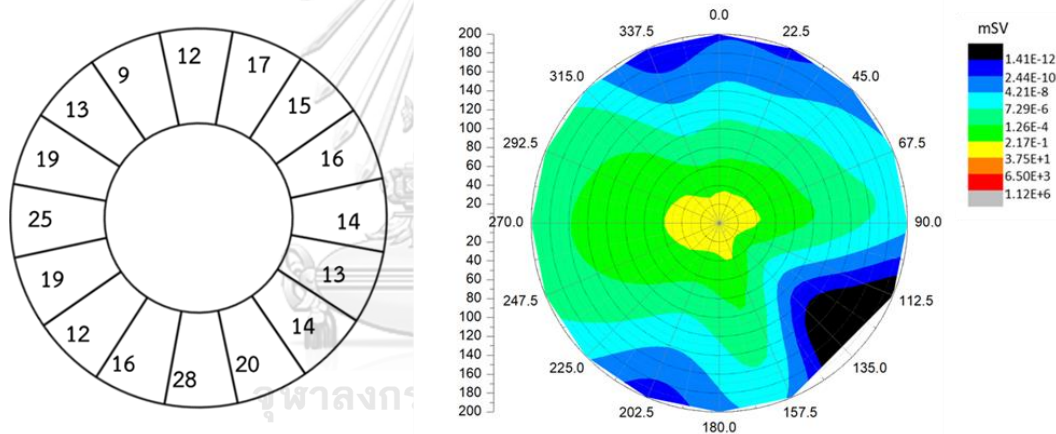
ตำแหน่งที่ 2 ที่ถูกเลือกใช้สำหรับวิเคราะห์ผลมีพิกัดอยู่ที่ ละติจูด 10.5 และลองจิจูด 108 ลักษณะสภาพอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ มีลักษณะที่เหมือนกับสภาพอากาศในตำแหน่งที่ 1 แต่มีความเร็วลมเฉลี่ยที่สูงกว่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 9 m/s โดยทิศตะวันตก (W) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) เป็นทิศที่มีความเร็วลมอยู่ในช่วงที่สูงที่สุด จึงทำให้คะแนนการกระจายตัวของทั้งสองทิศมีค่าสูงถึง 25 คะแนนดังแสดงในรูปที่ 50 แต่อย่างไรก็ตามผลการจำลองของ HotSpot แสดงให้เห็นว่าทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) มีการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากกว่า จึงเลือกทิศดังกล่าวสำหรับวิเคราะห์ผลในลำดับถัดไป

ตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งที่ถูกเลือกจากเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งมีพิกัดอยู่ที่ละติจูดที่ 10 และ ลองจิจูดที่ 106.5 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้พบว่าทิศตะวันตก (W) และทิศใต้ (S) เป็นทิศที่มีโอกาสเกิดการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูง เนื่องจากทิศทั้งสอง มีโอกาสเกิดลมพัดผ่าน 14.26 เปอร์เซ็นต์ และ 14.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีความเร็วลมเฉลี่ย

มากที่สุดจากทั้งหมด 16 ทิศจึงทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสเคลื่อนที่ผ่านทิศทั้งสองได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามทิศตะวันตก (W) เป็นทิศที่มีน้ำมรสุมผลกระทบต่อไทยมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 51



รูปที่ 50 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 2 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

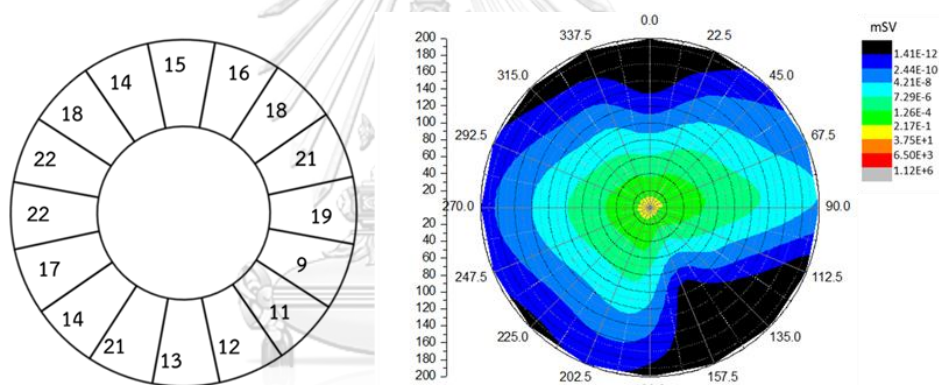


รูปที่ 51 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 3 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

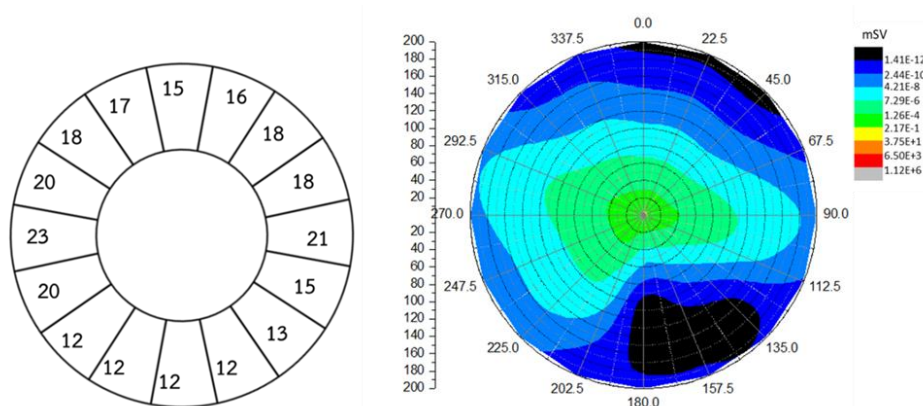
ตำแหน่งที่ 4 เป็นตำแหน่งที่อยู่ ณ พิกัดละติจูด 10 และลองจิจูด 105 โดยจะอยู่ในทิศตะวันตกของตำแหน่งที่ 3 ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้จะมีสภาพอากาศที่คล้ายคลึงกับตำแหน่งที่ 3 แต่จะมีความเร็วลมที่ต่ำกว่าโดยมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 m/s ลักษณะภูมิอากาศในทิศตะวันตก(W) และทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก (WNW) ส่งผลให้สารกระจายตัวได้ดีเนื่องจากทั้งสองตำแหน่ง มีโอกาสในการเกิดลมพัดผ่านสูง ในลำดับต้นๆของข้อมูลทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการจำลองของโปรแกรม HotSpot ประกอบการวิเคราะห์พบว่าทิศตะวันตก (W) เป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 52 ดังนั้นจึงได้ใช้ทิศดังกล่าวเป็นเงื่อนไขสำหรับเลือกตำแหน่งที่ 5 โดยตำแหน่งที่ 5 ที่ได้รับเลือกมีพิกัดละติจูดที่ 10 และ

ลองจิจูดที่ 103.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้พบว่าลมส่วนใหญ่พัดผ่านทิศตะวันตก (W) จึงทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสที่เคลื่อนที่ผ่านทิศตะวันตก (W) ได้มากกว่าในทิศอื่นๆ ดังรูปที่ 53

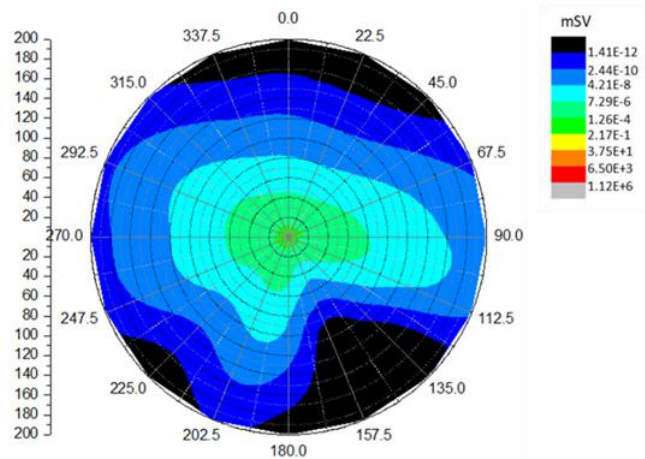
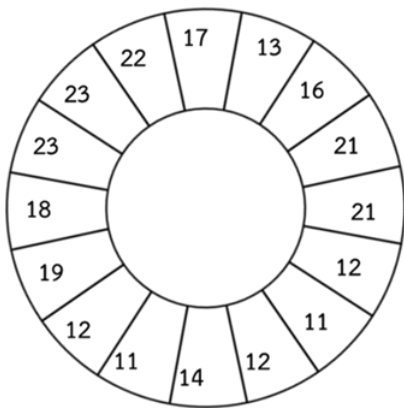
ตำแหน่งที่ 6 มีพิกัดอยู่ที่ละติจูดที่ 10 และลองจิจูดที่ 102 ข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งนี้จะมีลักษณะแตกต่างจากตำแหน่งที่ผ่านมา โดยความเร็วลมส่วนใหญ่มีการพัดในโซนตะวันตกเฉียงเหนือ และ บริเวณดังกล่าวมีฝนเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลทั้งหมด 16 ทิศ จึงทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคยเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกต่อเนื่องกันตั้งแต่ตำแหน่งที่ 2 มายังตำแหน่งที่ 5 เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังโซนตะวันตกเฉียงเหนือในตำแหน่งที่ 6 โดยทิศที่มีการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากที่สุดคือทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันตก (WNW) โดยมีคะแนนการกระจายตัวเท่ากับ 23 คะแนน ดังแสดงในรูปที่ 54 แต่เมื่อพิจารณาผลของ HotSpot พบว่า ทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันตก (WNW) มีการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากกว่าจึงใช้ข้อมูลดังกล่าวพิจารณาตำแหน่งที่ 7



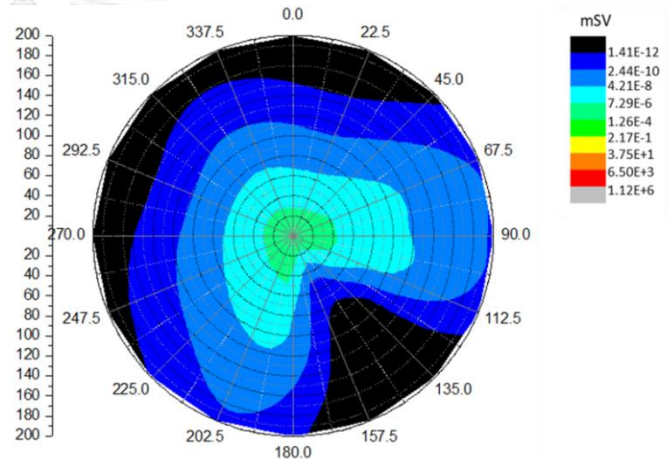
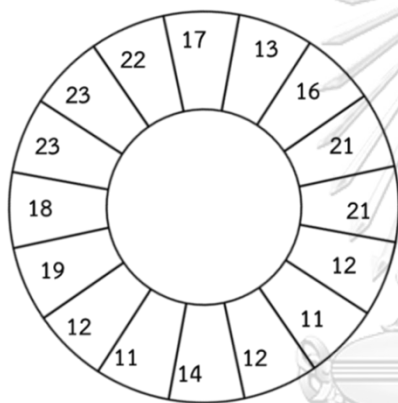
รูปที่ 52 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 4 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย



รูปที่ 53 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 5 บนเส้นทางเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย



รูปที่ 54 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 6 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

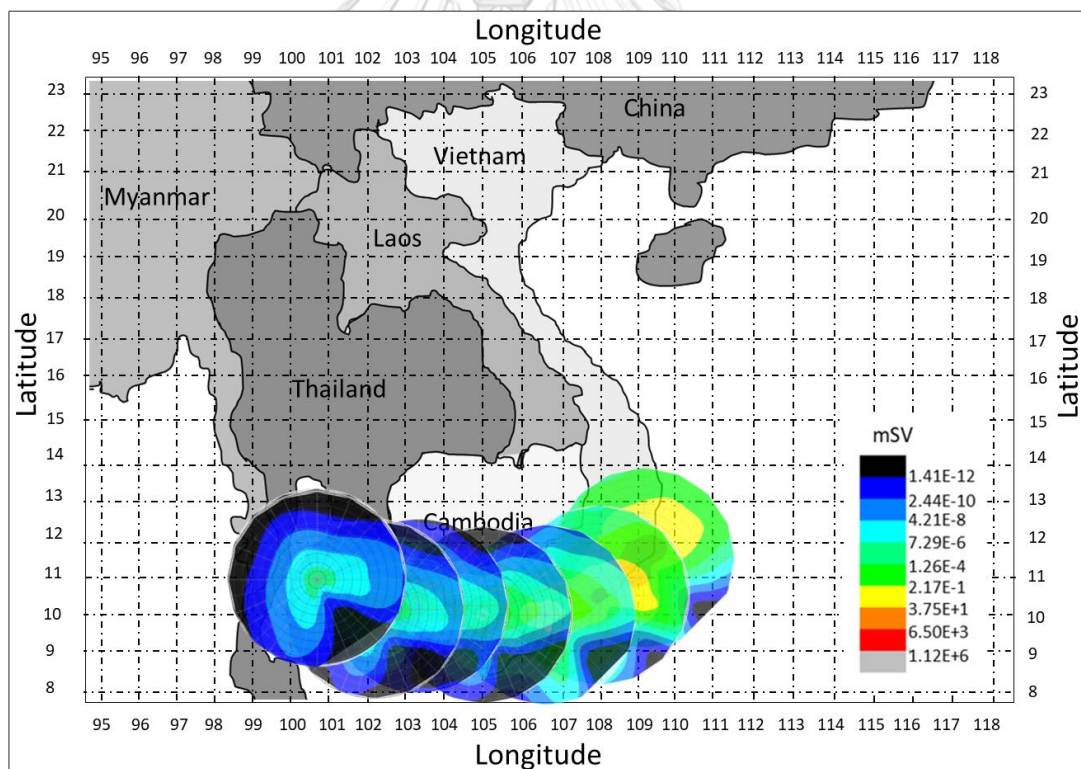


รูปที่ 55 ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตำแหน่งที่ 7 บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

ตำแหน่งที่ 7 มีพิกัดอยู่ที่ ละติจูด 11 และลองจิจูด 100.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศพบว่าทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนข้างไปทางตะวันตก (WNW) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนข้างไปทางเหนือ (NNW) เป็นทิศที่มีโอกาสเกิดลมพัดผ่านมากที่สุดโดยมีค่า 7.05, 7.86 และ 7.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากตำแหน่งที่ 6 เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในโซนตะวันตกเฉียงเหนือ เมื่อใช้ผลการจำลองของ HotSpot ประกอบการวิเคราะห์พบว่าทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) เป็นทิศที่การกระจายตัวสูงและมีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 55 โดยสามารถแสดงรายละเอียดตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและเส้นทางที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทยได้ดังตารางที่ 17 และรูปที่ 56 ตามลำดับ

ตารางที่ 17 ตำแหน่งวิเคราะห์การกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan

ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ทิศกระจายตัว	ระยะทาง (km)
1	11.5	109	sw	0 – 140
2	10.5	108	wsW	140 – 300
3	10	106.5	w	300 - 450
4	10	105	w	450 – 600
5	10	103.5	w	600 – 750
6	10	102	wnw	750 – 930
7	11	100.5	NW	930 – 1,130

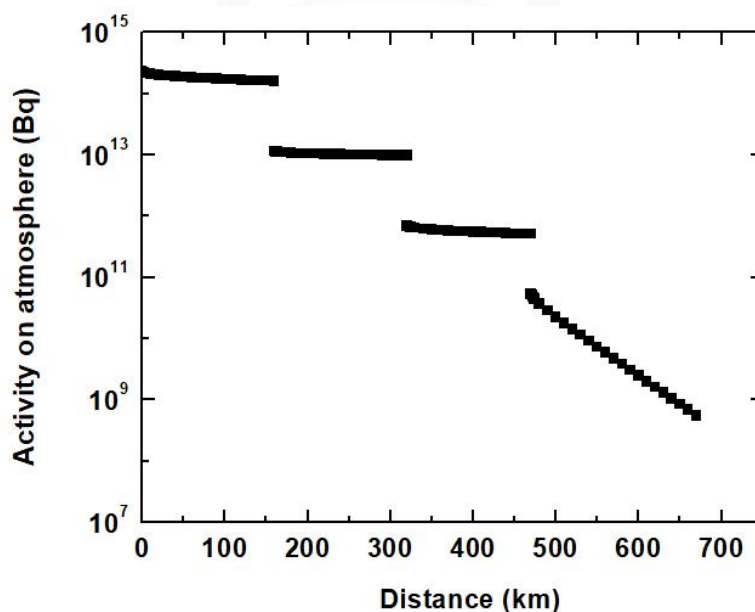


รูปที่ 56 เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

4.3 ค่ากัมมันตภาพรังสีบนชั้นบรรยากาศ

ค่ากัมมันตภาพรังสีบนชั้นบรรยากาศ คือค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจาก โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ ซึ่งค่ากัมมันตภาพเหล่านี้มีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหล และมีค่าลดลงเมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นบรรยากาศเกิดการสลายตัว หรือเกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินจาก อิทธิพลการสะสมตัวแบบเปียกและแบบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลจากการวิเคราะห์คงความ อนุรักษ์นิยม (conservative) งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าการลดลงของค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศ จากอิทธิพลการสะสมตัวแบบแห้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้ค่ากัมมันตภาพรังสีบนชั้นบรรยากาศมี ค่าสูง และมีอัตราการลดลงที่น้อยกว่ากรณีทั่วไป ดังนั้นการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้ จึงใช้เพียงข้อมูล ความเสถียรบรรยากาศ และ ความเร็วลมเท่านั้น โดยข้อมูลในทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถ กระจายตัวได้ดีที่สุด จากผลการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะถูกใช้ในการ คำนวณค่ากัมมันตภาพ ผลที่ได้จากการคำนวณจะถูกใช้เป็นข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีสำหรับจำลอง ผลในโปรแกรม HotSpot ในกระบวนการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุด เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาใช้ ประกอบการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศดังผลการ วิเคราะห์ที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.2 และใช้สำหรับประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ โดย สามารถแสดงค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่เคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang , Fangchenggang, Ninh thuan มายังประเทศไทย ได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ค่ากัมมันตภาพของ source term ที่กระจายตัว บนชั้นบรรยากาศ จากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย



รูปที่ 57 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย

การวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบนชั้นบรรยากาศจะวิเคราะห์เฉพาะทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทยใช้ข้อมูลทั้งหมด 4 ตำแหน่ง เมื่อวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 57 ซึ่งโดยปกติแล้ว เมื่อเกิดอุบัติเหตุ Long term station blackout ที่โรงไฟฟ้า Changjiang จะมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีรั่วไหลออกจากโรงไฟฟ้า $2.74E+15$ Bq โดยประมาณ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 57 จะเห็นได้ว่าค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ระยะ 0 km ซึ่งเป็นระยะที่เกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่ากัมมันตภาพต่ำกว่า เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ผลในครั้งนี้วิเคราะห์ผลตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยในตำแหน่งที่ 1 ทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดคือ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) ซึ่งในทิศดังกล่าวมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านเพียง 8.3 เพอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพทั้งหมดที่รั่วไหลออกมา

ดังนั้นค่ากัมมันตภาพ ณ ตำแหน่ง 0 km จึงมีเพียง $2.27E+14$ Bq และเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศก็จะมีค่าลดลงเนื่องจากได้รับอิทธิพลการสะสมตัวแบบแห้ง โดยข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่ 1 จะครอบคลุมผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วง 0 ถึง 160 km ส่วนในช่วงระยะทางถัดจาก 160 km ไปจนถึง 320 km เป็นผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลภูมิอากาศในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตำแหน่งที่ 2 ซึ่งมีค่าความเร็วลม 7.82 m/s และความเสถียรบรรยากาศในระดับ D โดยปริมาณรังสีที่เคลื่อนที่ผ่านทิศดังกล่าวจะมีปริมาณ 7.5 เพอร์เซ็นต์ของปริมาณรังสีทั้งหมดที่ระยะ 160 km ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่า $1.14E+13$ Bq ถึง $9.69E+12$ Bq จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีปริมาณ 7.3 เพอร์เซ็นต์ ของปริมาณรังสีทั้งหมดที่ระยะ 320 km จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSE) ในตำแหน่งที่ 3 ซึ่งมีค่าความเร็วลมเฉลี่ย 3.87 m/s และความเสถียรบรรยากาศระดับ D โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเคลื่อนที่ในทิศดังกล่าวไปจนถึงระยะทางที่ 470 km ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะมีค่ากัมมันตภาพ $5.06E+11$ Bq จากนั้นจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในตำแหน่งที่ 4 จนถึงระยะ 670 km

เมื่อพิจารณาจากภาพจะเห็นได้ว่าค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วงระยะทางนี้มีการลดลงอย่างรวดเร็ว เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความเร็วลมเฉลี่ยในทิศดังกล่าวมีค่าเพียง 2.09 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดจากทั้งหมด 4 ตำแหน่งทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีในช่วงระยะทางนี้มีการเคลื่อนที่ได้ช้าและเกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้มาก ดังนั้นค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วงระยะทางดังกล่าวจึงมีอัตราการลดลงที่เร็วกว่าในช่วงอื่น

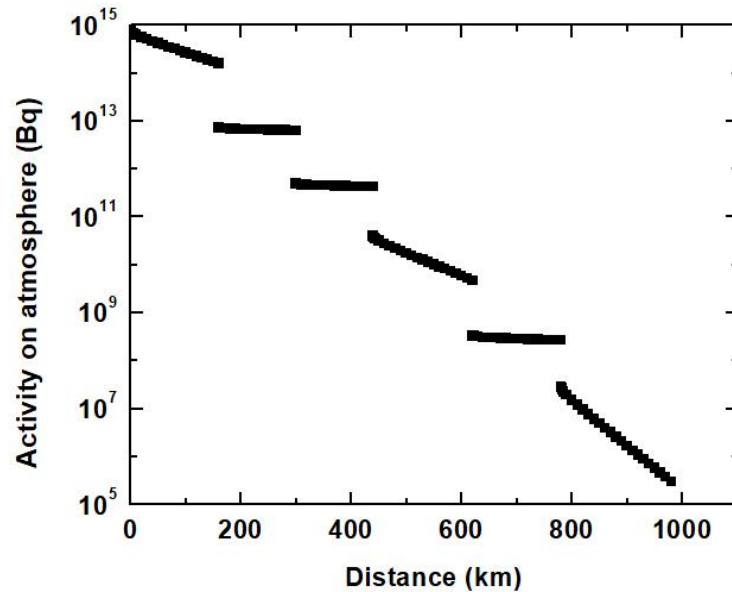
4.3.2 ค่ากัมมันตภาพของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด 6 ตำแหน่งตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 58 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงระยะ 0 ถึง 160 km นิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวน 9.0 เพอร์เซ็นต์ได้มีการเคลื่อนที่ผ่านทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางใต้ (SSW) ณ ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ 2.72 m/s ด้วยความเร็วลมที่ต่ำส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้มาก จึงเป็นผลให้ในช่วงระยะทางดังกล่าวค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นในช่วงระยะถัดจาก 160 ไปจนถึง 300 km นิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังตำแหน่งที่ 2 โดยมีนิวไคลด์กัมมันตรังสี 6.5 เพอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพทั้งหมดในระยะ 160 km เคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ซึ่งมีความเร็วลม 8.15 m/s และความเสถียรบรรยากาศในระดับ D

เมื่อพิจารณาจากภาพจะเห็นได้ว่าค่ากัมมันตภาพในช่วงดังกล่าวมีอัตราการลดลงที่ต่ำกว่าในช่วงแรก ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วลมที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและมีการสะสมตัวลงสู่พื้นดินที่ต่ำ หลังจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่เป็นระยะ 300 km แล้ว นิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวน 8.0 เพอร์เซ็นต์จากจำนวนทั้งหมดที่ระยะ 300 km จะเคลื่อนไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) เป็นระยะทาง 140 km ทิศดังกล่าวมีความเสถียรบรรยากาศระดับ D และความเร็วลมเฉลี่ย 7.8 m/s ซึ่งคล้ายคลึงกับข้อมูลภูมิอากาศในช่วงที่สอง จึงทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วงนี้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพในช่วง 160 ถึง 300 km นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ในช่วงที่ 3 จะเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 440 km และจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางใต้ (SSW) ในช่วงที่ 4 ซึ่งจะมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวน 9.6 เพอร์เซ็นต์ของค่ากัมมันตภาพทั้งหมดที่ระยะ 440 km เคลื่อนที่ในทิศทางนี้ โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเคลื่อนที่ในช่วงระยะทางถัดจาก 440 km ไปจนถึง 620 km

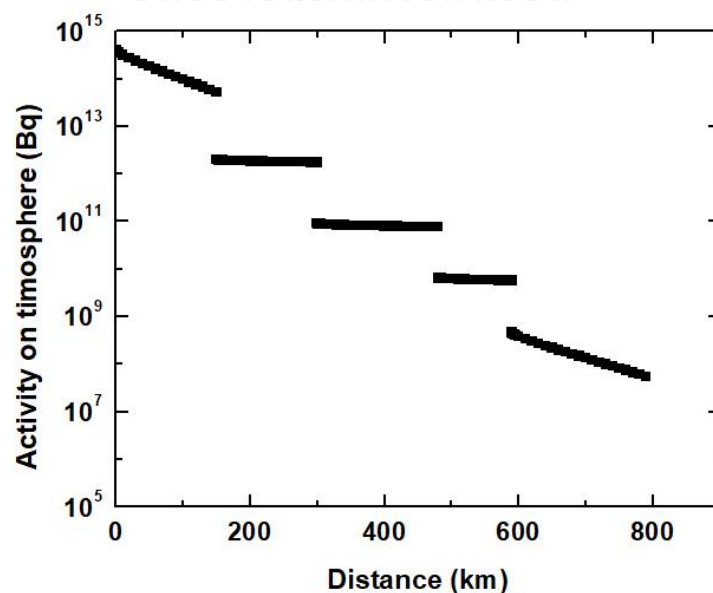
เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่ากัมมันตภาพในช่วงระยะทางดังกล่าวมีการลดลงเร็วกว่าในช่วงที่ 2 และ 3 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทิศดังกล่าวมีความเร็วลมเฉลี่ยเพียง 2.25 m/s ดังนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจึงสะสมตัวลงสู่พื้นดินได้มาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่มีระยะทางในช่วง 620 ถึง 780 km ค่ากัมมันตภาพจะมีอัตราการลดลงที่ต่ำอีกครั้ง โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งนี้จะได้รับอิทธิพลของสภาพอากาศในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) ของตำแหน่งวิเคราะห์ผลที่ 5 ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย

5.82 m/s และความเสถียรบรรยากาศระดับ D ซึ่งเป็นมีความเร็วลมที่สูงกว่าระยะทางในช่วงที่ 4 สุดท้ายจากกัมมันตรังสีจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งวิเคราะห์ผลที่ 6 ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทาง ตะวันตก (WSW) ที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 2.1 m/s และความเสถียรบรรยากาศในระดับ F ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเร็วลมต่ำที่สุด จากทั้งหมด 5 ช่วงระยะทางที่ผ่านมา ดังนั้นจึงทำให้ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วงนี้มีการลดลงเร็วที่สุด



รูปที่ 58 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

4.3.3 ค่ากัมมันตภาพรังสีของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย



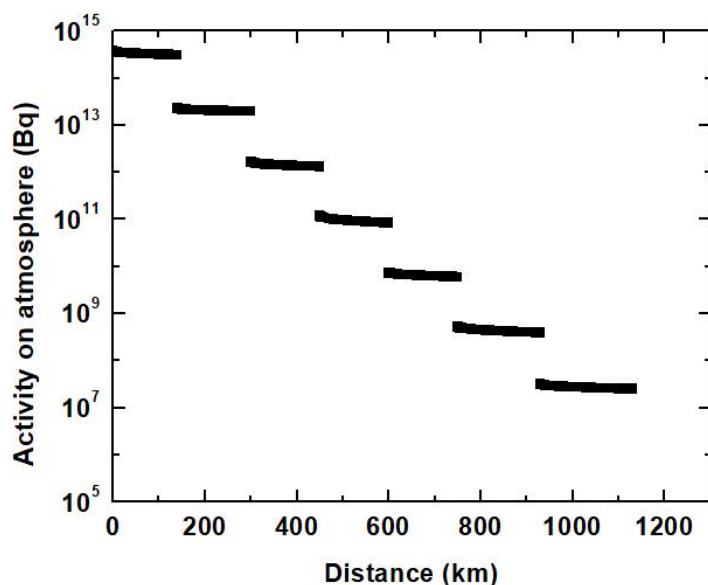
รูปที่ 59 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มายังประเทศไทย

การวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Fangchenggnag มายังประเทศไทยใช้ข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมด 5 ตำแหน่ง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 59 ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหล โดยค่ากัมมันตภาพทั้งหมดที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า $4.12E+15$ Bq แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ไปในทิศตะวันตก (S) ซึ่งเป็นทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในตำแหน่งที่ 1 พบว่ามีค่าเพียง 9.9 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นดังนั้นค่ากัมมันตภาพที่ระยะ 0 km จึงมี $4.06E+14$ Bq จากนั้นมีค่าลดลงเรื่อยๆตามระยะทางจนกระทั่งมีค่ากัมมันตภาพเหลือ $5.18E+13$ Bq ที่ระยะทาง 150 km ถือเป็นอันสิ้นสุดการเคลื่อนที่ในช่วงที่ 1 โดยค่ากัมมันตภาพที่ลดลงในช่วงนี้จะมีอัตราการลดลงเร็วกว่าช่วงที่ 2 , 3 และ 4 ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วลมที่ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีในช่วงนี้มีค่าเพียง 1.96 m/s จึงเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการสะสมตัวได้สูง

หลังจากเคลื่อนที่สิ้นสุดในตำแหน่งที่ 1 นิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวน 7.1 เปอร์เซ็นต์ จะมีการเปลี่ยนทิศทางมายังทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) ของตำแหน่งที่ 2 เป็นระยะทาง 150 km ซึ่งข้อมูลภูมิอากาศในทิศดังกล่าวประกอบไปด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 8.81 m/s และ ความเสถียรบรรยากาศระดับ D ซึ่งเป็นสภาพอากาศที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี จึงทำให้ค่ากัมมันตภาพในช่วงนี้มีอัตราการลดลงที่ต่ำ โดยค่ากัมมันตภาพในช่วงถัดจาก 150 km ถึง 300 km มีค่า $1.99E+12$ ถึง $1.74E+12$ Bq ตามลำดับ จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในช่วงที่ 3 โดยเคลื่อนที่ในช่วงระยะถัดจาก 300 km ถึง 480 km และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW) อีกครั้งในช่วงที่ 4 ซึ่งมีระยะทางถัดจาก 480 km ถึง 590 km ซึ่งข้อมูลภูมิอากาศของทั้งสองช่วงนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อมูลภูมิอากาศในช่วงที่ 2 คือมีความเร็วลมที่สูงและมีความเสถียรบรรยากาศที่อยู่ในระดับ D ทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพของทั้ง 2 ช่วงนี้มีอัตราการลดลงที่ต่ำ สุดท้ายคือการเปลี่ยนแปลงของค่ากัมมันตภาพในช่วงระยะถัดจาก 590 km ถึง 790 km การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนนี้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของตำแหน่งที่ 5 ในการวิเคราะห์ผลซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย 2.47 m/s และความเสถียรบรรยากาศในระดับ E ซึ่งส่งผลให้ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศมีค่าลดลงเร็ว ผลจากการคำนวณค่ากัมมันตภาพในช่วงดังกล่าวพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง $6.5E+09$ ถึง $5.48E+07$ Bq

4.3.4 ค่ากัมมันตภาพรังสีของ source term ที่กระจายตัวบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทยใช้ข้อมูล 7 ตำแหน่งซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 70



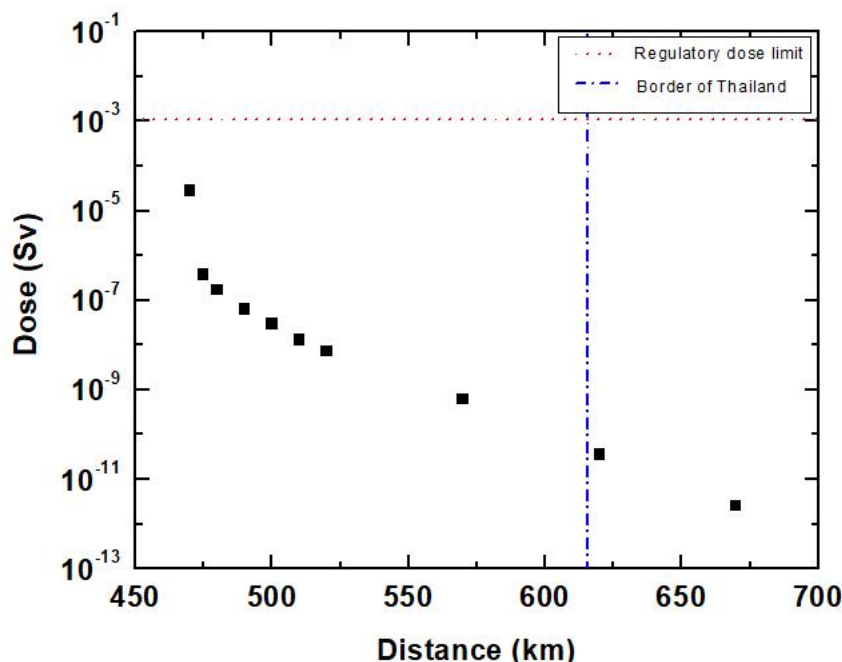
รูปที่ 60 ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

จากรูปที่ 60 แสดงให้เห็นว่าค่ากัมมันตภาพในแต่ละตำแหน่งมีแนวโน้มการลดลงอย่างคล้ายกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากข้อมูลภูมิอากาศในแต่ละตำแหน่งมีความเสถียรบรรยากาศอยู่ในระดับ D เหมือนกันทุกตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งแรกซึ่งครอบคลุมระยะทางในช่วง 0 ถึง 140 km นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีการเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) จำนวน 8.0 เพอร์เซ็นต์ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วออกมา โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 6.52 m/s ค่ากัมมันตภาพในช่วงนี้มีค่า 3.60×10^{14} Bq ที่ระยะ 0 km และมีค่า 3.07×10^{14} ที่ระยะ 140 km จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสี จำนวน 7.6 เพอร์เซ็นต์ของระยะสุดท้ายในตำแหน่งที่ 1 จะมีการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) ในตำแหน่งที่ 2 โดยเคลื่อนที่ในช่วงระยะถัดจาก 140 km ไปจนถึง 300 km ค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศในช่วงนี้มีค่ากัมมันตภาพอยู่ในช่วง 2.25×10^{13} Bq ถึง 1.94×10^{13} Bq จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวน 8.5 เพอร์เซ็นต์จากระยะ 300 km จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ 3 ในทิศตะวันตก (S) ด้วยความเร็วลม 5.65 m/s เป็นระยะทาง 150 km โดยมีค่ากัมมันตภาพที่ระยะ 450 km เท่ากับ 1.31×10^{12} Bq จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสียังคงเคลื่อนที่ในทิศตะวันตก(S)อย่างต่อเนื่องผ่านตำแหน่งที่ 4 และ 5 จนกระทั่งถึงระยะทางที่ 750 km ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าว ค่ากัมมันตภาพลดลงเหลือ 5.94×10^9 Bq จากนั้นนิว

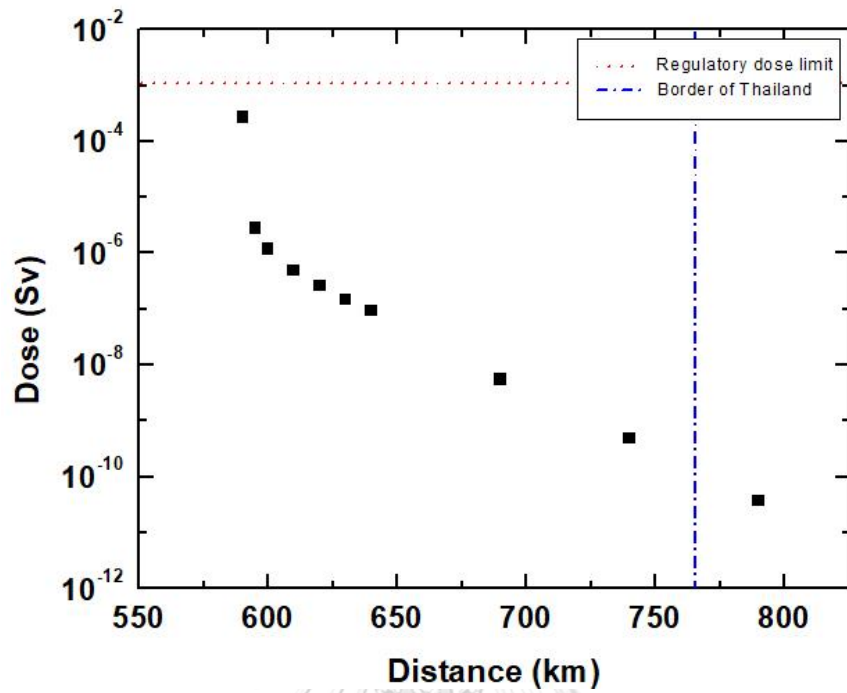
โคโลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่เข้าสู่ทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันตก (WNW) ในตำแหน่งที่ 6 ด้วยจำนวน 9.0 เพอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ผ่านมา โดยเคลื่อนที่ในช่วงถัดจาก 750 km ไปจนถึง 930 km และมีค่ากัมมันตภาพที่ระยะทางสุดท้าย $3.89\text{E}+08$ Bq สุดท้ายนิวโคโลด์กัมมันตรังสีจำนวน 8.0 เพอร์เซ็นต์ของระยะ 930 km จะเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) ของตำแหน่งที่ 7 ไปจนถึงระยะทาง 1,130 km ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 5.79 m/s และมีค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศที่ระยะ 1,130 km เท่ากับ $2.48\text{E}+07$ Bq

4.4 การประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ

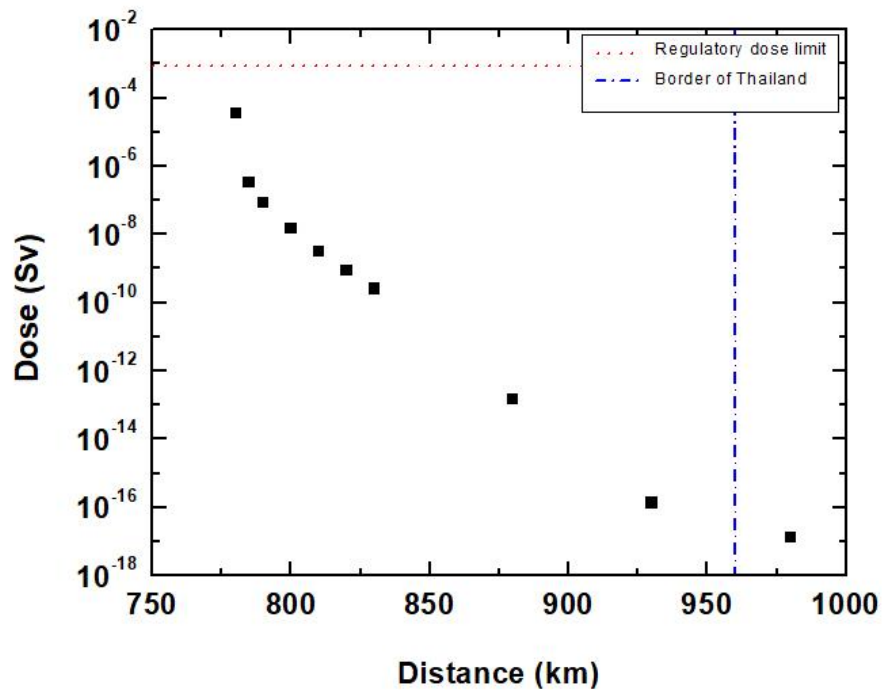
ผลจากการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวโคโลด์กัมมันตรังสีจากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า ระยะทางที่กัมมันตรังสีเคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มาถึงเขตแดนประเทศไทยคือ 620km, 960km, 770 km และ 930 km ตามลำดับ เมื่อนำค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิตามเส้นทางดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่า Regulatory limit พบว่าค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ ณ ตำแหน่งเขตแดนประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากแต่ละโรงไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 1 mSv ดังแสดงในรูปที่ 61 ถึง 64 นั้นหมายความว่า ถึงแม้โรงไฟฟ้าโรงใดโรงหนึ่งจะเกิดอุบัติเหตุ long term station backout จนเป็นสาเหตุให้นิวโคโลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม นิวโคโลด์กัมมันตรังสีเหล่านั้นจะไม่มีผลกระทบต่อประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญ



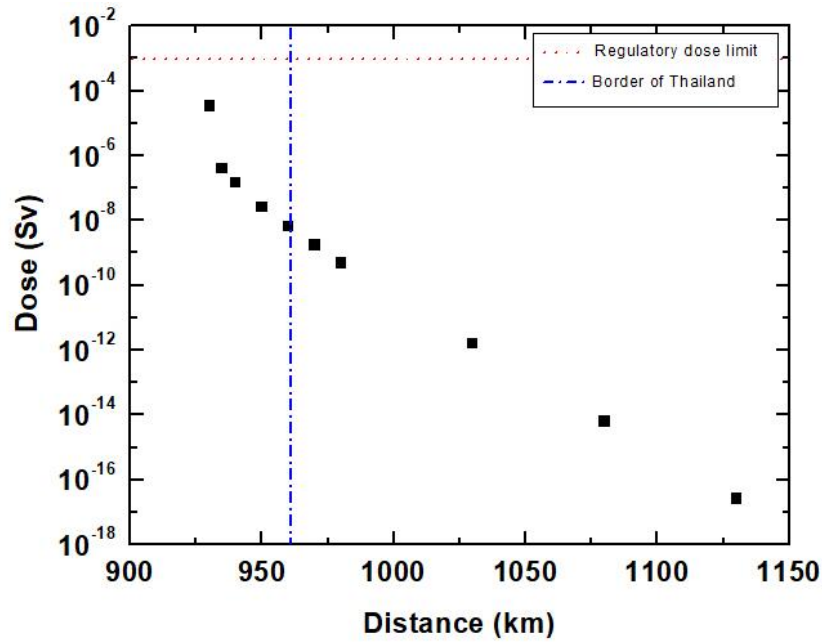
รูปที่ 61 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Changjiang



รูปที่ 62 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Yangjiang

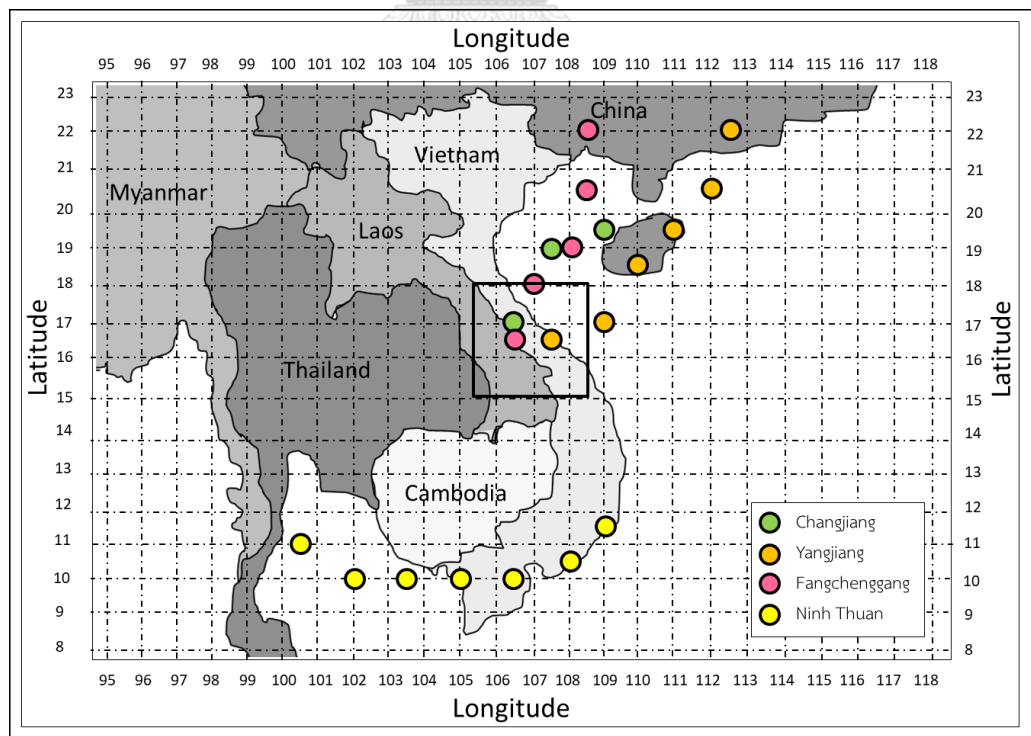


รูปที่ 63 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang



รูปที่ 64 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan

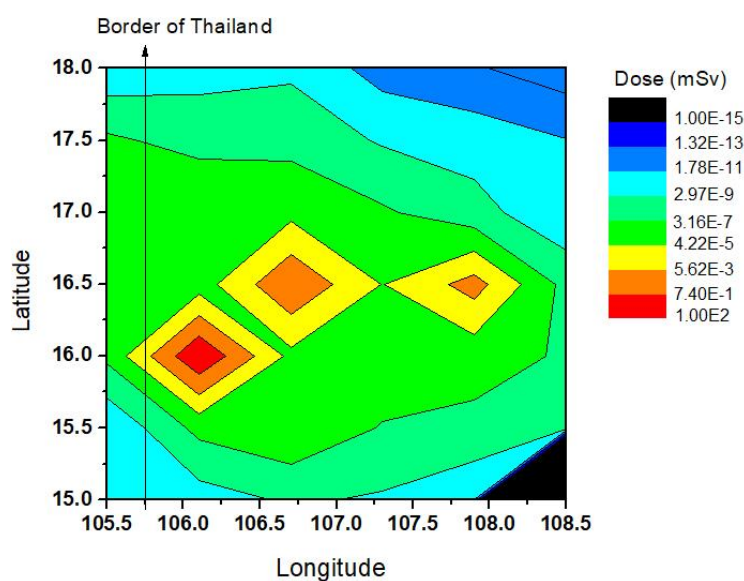
แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีรวมกันทุกโรงไฟฟ้าพบว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang และ Fangchanggang มีโอกาสเคลื่อนที่มารวมกันดังแสดงในรูปที่ 65



รูปที่ 65 ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสเคลื่อนที่มารวมกัน

จากรูปที่ 65 แสดงให้เห็นว่า ณ บริเวณละติจูดที่ 15 ถึง 18 และลองจิจูดที่ 105.5 ถึง 108.5 จุดวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Changjiang ตำแหน่งที่ 4 จุดวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Yangjiang ตำแหน่งที่ 6 และจุดวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Fangchenggang ตำแหน่งที่ 5 มีพิภักที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นหากโรงไฟฟ้าทั้งสามเกิดอุบัติเหตุระดับรุนแรงขึ้นพร้อมกัน มีความเป็นไปได้ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้งสามจะเคลื่อนที่มารวมกัน ณ บริเวณดังกล่าวแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประเมินผลกระทบทางรังสี ณ ตำแหน่งดังกล่าว โดยทำการคำนวณผลรวมปริมาณรังสีสุทธิจากทั้งสามตำแหน่ง ผลจากการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 66 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณรังสีสุทธิส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 1 mSv มีเพียงตำแหน่งในบริเวณละติจูดที่ 16 ลองจิจูดที่ 106.5 เท่านั้นที่มีค่าปริมาณรังสีสุทธิเกินกว่า 1 mSv ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งของการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุด เมื่อนำข้อมูลภูมิอากาศและข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสี ณ ตำแหน่งดังกล่าวไปจำลองผลในโปรแกรม HotSpot โปรแกรมจะทำการจำลองผลโดยพิจารณาว่าตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหลของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ดังนั้นการพิจารณาการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีบริเวณใกล้เคียงจุดวิเคราะห์ผลจึงมีค่าสูง

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลรวมปริมาณรังสีสุทธิ ณ ตำแหน่งเขตแดนประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบโดยตัดขีดจำกัดการคำนวณผลแบบต่อจุดออก พบว่าค่าผลรวมปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำกว่า 1 mSv ซึ่งนั่นหมายความว่าถึงแม้โรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang และ Fangchenggang จะเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout พร้อมกันปริมาณรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้าทั้งสามไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประเทศไทย ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์ผลแบบต่อจุดและพิจารณา นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่มาจากในทิศที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากที่สุด



รูปที่ 66 ผลรวมค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิละติจูดที่ 15 ถึง 18 และลองจิจูดที่ 105.5 ถึง 108.

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ จากกรณี โรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan เกิดอุบัติเหตุสมมุติ long term station blackout จนเป็นสาเหตุให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้าและ กระจายตัวตามชั้นบรรยากาศมาจนถึงเขตแดนประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามการประเมินผลกระทบ ทางรังสีจำเป็นต้องทราบเส้นทางการเคลื่อนที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ กระบวนการสองกระบวนการสำหรับวิเคราะห์เส้นทางดังกล่าว โดยกระบวนการแรกคือ การวิเคราะห์ ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยพิจารณาจากอิทธิพลของสภาพอากาศ ข้อมูล ภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่าน ถูกนำมาใช้คำนวณคะแนนการกระจายตัว ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตามเกณฑ์คะแนนที่สร้างขึ้นจากการศึกษาปัจจัยสภาพอากาศที่มีอิทธิพล ต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในขณะที่การวิเคราะห์ผลส่วนที่สอง ข้อมูลนิวไคลด์ กัมมันตรังสี และข้อมูลภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ผ่านจะถูกใช้เป็นข้อมูล นำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม HotSpot ครอบคลุมพื้นที่ในระยษรัศมี 200 km เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เส้นทางจาก โรงไฟฟ้าทั้ง 4 มายังประเทศไทย

ดังนั้นการวิเคราะห์ผลทั้งสองกระบวนการจึงใช้วิธีวิเคราะห์ผลแบบต่อจุด โดยผลที่ได้จาก การวิเคราะห์ครั้งแรกจะถูกนำมาวิเคราะห์หาทิศทางที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากที่สุด จากนั้นนำทิศทางดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาตำแหน่งสำหรับวิเคราะห์ผลในลำดับถัดไป การ วิเคราะห์ผลในลักษณะนี้จะทำต่อเนื่องไปจนถึงเขตแดนประเทศไทย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสอง กระบวนการจะถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และเมื่อ ทราบเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแน่ชัดแล้ว ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ ณ ตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ถึงประเทศไทย จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า Regulatory limit เพื่อประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์หัตถิทธิพลของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากการศึกษาหัตถิทธิพลของสภาวะอากาศที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี พบว่า ความเร็วลมที่เร็วที่สุด ปริมาณฝนที่ต่ำ และความเสถียรบรรยากาศที่สูง ส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากในชั้นบรรยากาศ

5.1.2 ผลการวิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสี นิวไคลด์กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Changjiang มีการกระจายตัวมาในโซนตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะทาง 320 km จากจุดรั่วไหล โดยมีการกระจายตัวมากที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) ในช่วง 160 km แรก ส่วนในระยะทางที่เหลือมีการเคลื่อนที่มากที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังโซนตะวันออกเฉียงใต้ โดยกระจายตัวได้ดีที่สุดในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ (SSE) ซึ่งเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 150 km และสุดท้ายเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในช่วงระยะ 200 km ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กระจายตัวมาจากโรงไฟฟ้า Yangjiang และ Fangchenggang มีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกัน โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้งสองมุ่งสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Fangchenggang ในช่วงแรกเกิดการกระจายตัวมาในทิศใต้ (S) ของโรงไฟฟ้าเป็นระยะ 150 km จากนั้นมีการเคลื่อนที่สลับทิศทางกันระหว่างทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ (SSW) และ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นระยะทาง 640 km ก่อนจะเคลื่อนที่เข้าสู่เขตแดนประเทศไทย ส่วนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Yangjiang มีการเคลื่อนที่ในโซนตะวันตกเฉียงใต้ของโรงไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ (SSW) เป็นระยะ 160 km และเปลี่ยนทิศทางมายังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) 140 km จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางใต้ (SSW) ในระยะ 140 km และ 160 km ตามลำดับ ก่อนจะเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) เป็นระยะทาง 360 km และเข้าสู่เขตแดนประเทศไทย

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่รั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มีลักษณะการเคลื่อนที่ที่แตกต่างจากโรงไฟฟ้าอื่น โดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมุ่งไปทางตอนใต้ของประเทศไทย โดยในช่วงระยะ 300 km แรกนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) ตามลำดับ จากนั้นนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการ

เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องไปในทิศตะวันตก (W) เป็นระยะทาง 450 km ก่อนจะเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ไปยังทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันตก (WNW) และ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) ซึ่งมีระยะทาง 180 km และ 200 km ตามลำดับ

5.1.3 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับจากแต่ละโรงไฟฟ้า เมื่อนำค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิในช่วงระยะ 200 km สุดท้ายบนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละโรงไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับค่า Regulatory limit เพื่อประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับ พบว่าค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิที่สูงที่สุดในช่วงระยะดังกล่าวของโรงไฟฟ้า Changjiang , Yangjiang, Fangchenggang และ Ninh Thuan มีค่า $2.83E-02$ mSv, $3.51E-02$ mSv, $2.68E-01$ mSv และ $3.42E-02$ mSv ตามลำดับ ค่าเหล่านี้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ปลอดภัยที่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ได้กำหนดไว้ (1mSv) ดังนั้นหากมีโรงไฟฟ้าโรงใดโรงหนึ่งเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout สารกัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่จากโรงไฟฟ้าเหล่านั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทย

5.1.4 ผลการประเมินผลกระทบทางรังสีที่ประเทศไทยได้รับในกรณีที่โรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang และ Fangchenggang เกิดอุบัติเหตุพร้อมกัน เมื่อพิจารณาผลที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 5.1.2 พบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang และ Fangchenggang มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้นถ้าในกรณีที่โรงไฟฟ้าทั้งสามเกิดอุบัติเหตุ long term station blackout พร้อมกัน มีความเป็นไปได้ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้าทั้งสามจะเคลื่อนที่มารวมกันแล้วกระจายตัวเข้าสู่ประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีของทั้งสามโรงไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากที่สุด ผลจากการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่งวิเคราะห์ผลที่ 4 ของโรงไฟฟ้า Changjiang ซึ่งตั้งอยู่ละติจูดที่ 17 ลองจิจูดที่ 106.5 ตำแหน่งวิเคราะห์ผลที่ 6 ของโรงไฟฟ้า Yangjiang ซึ่งตั้งอยู่ละติจูดที่ 16.5 ลองจิจูดที่ 107.5 และ ตำแหน่งวิเคราะห์ผลที่ 5 ของโรงไฟฟ้า Fangchenggang ซึ่งตั้งอยู่ละติจูด 16.5 ลองจิจูด 106.5 มีพิกัดอยู่ใกล้กันมากที่สุด เมื่อนำค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิของทั้งสามตำแหน่งรวมกันพบว่า ค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิในช่วงบริเวณที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่เข้าสู่เขตแดนประเทศไทยมีค่าต่ำกว่า 1 mSv ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดการรั่วไหลจากโรงไฟฟ้า Changjiang, Yangjiang และ Fangchenggan ในกรณีที่โรงไฟฟ้าทั้ง 3 เกิดอุบัติเหตุ long term station blackout พร้อมกันไม่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

การวิเคราะห์ผลแบบต่อจุดมีขีดจำกัดในด้านการคำนวณค่าปริมาณรังสีสมมูลยังผลสุทธิ โดยโปรแกรม HotSpot จะพิจารณาตำแหน่งในการวิเคราะห์ผลในแต่ละตำแหน่งเป็นจุดที่เกิดอุบัติเหตุ และจำลองผลให้บริเวณที่อยู่ใกล้ตำแหน่งดังกล่าวมีการสะสมตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาก จึงทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงในบางตำแหน่ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การจัดเตรียมข้อมูลภูมิอากาศสำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ต้องสลับทิศของข้อมูลภูมิอากาศในแต่ละทิศในมุม 180 องศา เนื่องจากข้อมูลลมที่ดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ NOAA เป็นข้อมูลลมที่พัดเข้ามายังจุดตรวจวัด ส่งผลให้ข้อมูลทิศทางลมที่ได้เป็นข้อมูลของทิศที่ลมพัดผ่านซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเกิดในทิศตรงกันข้าม ดังนั้นจึงต้องกลับทิศทางของข้อมูลภูมิอากาศให้อยู่ในทิศตรงกันข้ามเพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

5.3.2 การคำนวณคะแนนการกระจายตัวของรังสีกัมมันตรังสีใช้ผลรวมคะแนนของลม ฝน และความเสถียรชั้นบรรยากาศในอัตราส่วน 1:1:1 การคำนวณในลักษณะนี้อาจทำให้ผลที่เกิดขึ้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากปัจจัยสภาพอากาศแต่ละปัจจัยอาจส่งผลต่อการกระจายตัวในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง ควรมีการวิเคราะห์ผลเพื่อหาสัดส่วนของอิทธิพลสภาพอากาศแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี และนำสัดส่วนดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคะแนน

5.3.3 การคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในงานวิจัยนี้ได้นำค่าข้อมูลภูมิอากาศที่ทำการตรวจวัดทุก 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 1 ปี มาหาค่าเฉลี่ยและค่าความน่าจะเป็น จากนั้นนำค่าทั้งสองมาคูณกันเพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับคำนวณผล ผลที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบนี้สามารถบ่งบอกลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในรูปแบบภาพรวมที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 1 ปี แต่ไม่สามารถบ่งบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในแต่ละช่วงเวลาได้ ดังนั้นควรมีการวิเคราะห์ผลความต่างของข้อมูลภูมิอากาศในแต่ละช่วงเวลาก่อนนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณผล ผลที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบนี้จะทำให้ทราบลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา

5.3.4 การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้ใช้ข้อมูลค่ากัมมันตภาพจากการคำนวณที่ไม่ขึ้นกับเวลา และพิจารณาการลดลงของค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากอิทธิพลการสะสมตัวแบบแห้งและการสลายตัวบนชั้นบรรยากาศ จึงทำให้ข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลคงความอนุรักษ์นิยม (conservative) แต่อาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ซึ่งถ้าในกรณีที่ต้องการผลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นควรใช้ค่ากัมมันตภาพ หรือข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ขึ้นกับเวลา และควรพิจารณาการลดลงของค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากอิทธิพลของ ฝนด้วย

5.3.5 การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นเพื่อพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กระจายตัวจากโรงไฟฟ้าทั้ง 4 มายังประเทศไทย ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลภูมิอากาศสำหรับวิเคราะห์ผลเพียงปีเดียว แต่อย่างไรก็ตามสภาพอากาศในแต่ละปีอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการความแม่นยำในการวิเคราะห์ผลมากขึ้นควรทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศอย่างน้อย 3 ถึง 5 ปี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

5.3.6 งานวิจัยนี้วิเคราะห์เส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและประเมินผลกระทบทางรังสี โดยพิจารณาเฉพาะทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากและเป็นทิศที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้วนิวไคลด์กัมมันตรังสีสามารถกระจายตัวได้มากกว่าหนึ่งทิศทาง นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เคลื่อนที่ในทิศอื่นที่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประเทศไทย อาจเคลื่อนที่ไปรวมกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่แพร่กระจายมาจากโรงไฟฟ้าอื่น แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ประเทศไทยได้เช่นกัน ดังนั้นถ้าต้องการผลที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นควรวิเคราะห์ผลกระทบทางรังสีและเส้นทางที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ในทิศอื่นๆที่มากกว่าทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเคลื่อนที่ได้มากที่สุด

5.3.7 การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น ซึ่งพิจารณาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมดสี่ปัจจัย ประกอบไปด้วย ข้อมูลความเร็วลม ข้อมูลทิศทางลม ข้อมูลปริมาณน้ำฝน และข้อมูลความเสถียรของชั้นบรรยากาศ แต่ในความเป็นจริงแล้วปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีมากกว่าสี่ปัจจัย ดังนั้นถ้าต้องการผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้นควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเพิ่มเติม เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ซึ่งลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกันส่งผลให้การเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการเปลี่ยนแปลง ภูมิประเทศที่เป็นที่โล่ง นิวไคลด์กัมมันตรังสีจะกระจายตัวได้มากกว่าบริเวณที่เป็นหุบเขา ความกดอากาศเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีความกดอากาศที่สูงส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีลอยตัวบนชั้นบรรยากาศได้น้อยและเกิดการสะสมตัวลงสู่สิ่งแวดล้อมได้มาก การเปลี่ยนแปลงของ

ฤดูกาลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเช่นกันเนื่องจากในแต่ละฤดูกาลลมมีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกันดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

5.3.8 โปรแกรม HotSpot เป็นโปรแกรมจำลองผลที่มีขีดจำกัดทางด้านระยะทางซึ่งสามารถจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้เพียงในรัศมี 200 km และในขณะที่จำลองผลโปรแกรม HotSpot จะพิจารณาให้สภาพอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาอยู่ในสถานะคงที่โดยจะจำลองให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการกระจายตัวในรูปแบบ Gaussian แต่ในความเป็นจริงทิศทางการเคลื่อนที่ของลมอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งทำให้ผลการจำลองในบางส่วนคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นถ้าต้องการผลการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยควรใช้โปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการจำลองผลในระยะไกล และ ควรใช้โปรแกรมที่มีรูปแบบการจำลองการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Puff model หรือ Lagrangian particle model ที่มีการจำลองผลโดยใช้สภาพอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากขึ้น

5.3.9 การวิเคราะห์ผลในครั้งนี้พิจารณาเพียงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้าในรัศมี 1,500 km จากจุดศูนย์กลางประเทศไทยเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่นอกเขตพื้นที่ดังกล่าว มีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยเช่นกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลควรพิจารณาโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่นอกเหนือรัศมี 1,500 km ร่วมด้วย โดยควรพิจารณาโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่บนระนาบการเคลื่อนที่ของลมที่พัฒมายังประเทศไทยเช่นโรงไฟฟ้าในไต้หวัน ซึ่งมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่ทั้งหมด 3 โรงประกอบไปด้วย โรงไฟฟ้า Chinshan, Kuosheng และ Maanshan โรงไฟฟ้าเหล่านี้ตั้งอยู่ในรัศมี 2,000 km จากจุดศูนย์กลางประเทศไทย และตั้งอยู่บนระนาบลมที่พัฒมายังประเทศไทย

5.3.10 งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินผลกระทบทางรังสีเฉพาะบริเวณพื้นที่ของประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบทางรังสี แต่อย่างไรก็ตามควรมีการประเมินผลกระทบทางรังสีในประเทศอื่นๆที่อยู่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีด้วย และควรมีการวิเคราะห์ผลเพื่อหาหาระยะปลอดภัยแรกเริ่ม หรือระยะที่ประชาชนเริ่มได้รับค่าปริมาณสมมูลยั่งผลสุทธิต่ำกว่า 1 mSv เมื่อโรงไฟฟ้าแต่ละแห่งเกิดอุบัติเหตุ

ตารางที่ 18 รายละเอียดการวิเคราะห์ผลที่คงความอนุรักษ์นิยม

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ผล	ความอนุรักษ์นิยม
การคำนวณค่ากัมมันตภาพเพื่อใช้ในการจำลองผล	คงความอนุรักษ์นิยม เพราะใช้ค่ากัมมันตภาพรังสีภายในแกนปฏิกรณ์ในช่วงที่มีค่ามากที่สุด และพิจารณาการลดลงของค่ากัมมันตภาพบนชั้นบรรยากาศจากอิทธิพลการสะสมตัวแบบแห้งและการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเท่านั้น
การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี	ไม่คงความอนุรักษ์นิยมเพราะพิจารณาเพียงทิศทางที่สารเคลื่อนที่ได้มากและมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากที่สุดเพียงทิศเดียว
การประเมินผลกระทบทางรังสี	ไม่คงความอนุรักษ์นิยมเพราะ ข้อมูลปริมาณสมมูลยังผลสุทธิที่ใช้ในการประเมินผล ใช้ข้อมูลของทิศที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีโอกาสส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมากที่สุดเพียงทิศเดียว

รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. (2555).ข้อมูลการก่อสร้างโรงไฟฟ้าและ
ต้นทุน.สรุปแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย.ศ. 2555-2573 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3).
- [2] world-nuclear. Asia's Nuclear Energy Growth. [ออนไลน์]. 2018.แหล่งที่มา :
[http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/
asia-nuclear-energy-growth.aspx](http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/asia-nuclear-energy-growth.aspx). [2 /01/2018].
- [3] Steinhauser, G., Brandl, A., and Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl
and Fukushima nuclear accidents. A review of the environmental impacts.
Science of The Total Environment, 470-471: 800-817.
- [4] Povinec, P., et at. (2013). Dispersion of Fukushima radionuclides in the global
atmosphere and the ocean. Applied Radiation and Isotopes, 81: 383-392.
- [5] Huon, S., Hayashi, S., Lacey, J. P., Tsuji, H., Onda, Y., and Evrard, O. (2018). Source
dynamics of radiocesium-contaminated particulate matter deposited in an
agricultural water reservoir after the Fukushima nuclear accident. Science of
The Total Environment, 612: 1079-1090.
- [6] Hasegawa, A., Ohira, T., Maeda, M., Yasumura, S., & Tanigawa, K. (2016). Emergency
Responses and Health Consequences after the Fukushima Accident. Evacuation
and Relocation. Clinical Oncology, 28(4): 237-244.
- [7] Thao, P. Vietnam cancels nuclear power plant project. [ออนไลน์]. 2017.แหล่งที่มา :
[http://dtinews.vn/en/news/018/48049/vietnam-cancels-ninh-thuan-nuclear-
power-plant.html](http://dtinews.vn/en/news/018/48049/vietnam-cancels-ninh-thuan-nuclear-power-plant.html). [22/03/2018].
- [8]. Marzo, G.A., (2014). Atmospheric transport and deposition of radionuclides released
after the Fukushima Dai-chi accident and resulting effective dose. Atmospheric
Environment, 94: 709-722.
- [9]. Haste, T., Birchley, J., Cazzoli, E., & Vitazkova, J. (2006). MELCOR/MACCS simulation
of the TMI-2 severe accident and initial recovery phases, off-site fission product
release and consequences. Nuclear Engineering and Design, 236(10), 1099-1112.

- [10]. Homma, T., Tomita, K., & Hato, S. (2005). Uncertainty and Sensitivity Studies with The Probabilistic Accident Assessment Code OSCAAR. Nuclear Engineering and Technology, 37, 245-258.
- [11] Geng, X., Xie, Z., & Zhang, L. (2017). Influence of emission rate on atmospheric dispersion modeling of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Atmospheric Pollution Research, 8(3), 439-445.
- [12] Jacquemain, D., & nucléaire, I. (2015). Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents: Current State of Knowledge: EDP sciences.
- [13].U.S.NRC. Three Mile Island Accident. [ออนไลน์].2013.แหล่งที่มา <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html#top>. [02/03/2018].
- [14] Kortov, V., & Ustyantsev, Y. (2013). Chernobyl accident: Causes, consequences and problems of radiation measurements. Radiation Measurements, 55, 12-16.
- [15] Abe, S. (2015). The Fukushima-1 nuclear power plant accident The 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident (pp. 1-20). Boston: Woodhead Publishing.
- [16] Sehgal, B. R. (2012). Chapter 5 Fission Product Release and Transport, Sehgal, Bal Raj Nuclear Safety in Light Water Reactors (pp. 425-517). Boston: Academic Press.
- [17] พิณสุรางค์ กิตติวราพล.(2558)การจำลองการขนส่งซีเซียมไอโอดีนสำหรับ ESBWR ในกรณี หลีกเสี่ยงการกักกันโดยอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] Nuclear Regulatory Research. (2012). State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA). Retrieved from The U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [19] IAEA. (2009). Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants (Vol. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-2): International Atomic Energy Agency.
- [20] U.S.NRC. (1983). PRA Procedures Guide. Retrieved from American Nuclear Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [21] Schnadt, H., & Ivanov, I. (2012). Chapter 7 - Environmental Consequences and Management of a Severe Accident A2 - Sehgal, Bal Raj Nuclear Safety in Light Water Reactors (pp. 589-624). Boston: Academic Press.

- [22] Homann, S. G. (2014). HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. National Atmospheric Release Advisory Center Lawrence Livermore National Laboratory.
- [23] Aliyu, A. S., Ramli, A. T., & Saleh, M. A. (2015). Assessment of potential human health and environmental impacts of a nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling. *Atmósfera*, 28(1), 13-26.
- [24] นพพล มลิินทางกูร.(2520). การศึกษาการกระจายตัวของแก๊สกัมมันตรังสีที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้าปรมาณู. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [25] นิธิมา หล่อใจ.(2555). การประเมินหาขอบเขตพื้นที่ควบคุมสำหรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทยเบื้องต้น:กรณีศึกษาจังหวัดสุราษฎร์ธานีและอุบลราชธานี.ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [26] รังสรรค์ อาภาคัพพะกุล.(2547). อุตุนิยมวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 1.).กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] ทิศทางและความเร็วลม.[ออนไลน์]. 2015.แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=35&chap=6&page=t35-6-infodetail04.html>. [10/04/2018]
- [28] Bluett, J., *Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling*. (2004): The Ministry for the Environment
- [29] นพภาพร พานิช.(2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านคุณภาพอากาศ.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ.(2540).อุตุนิยมวิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 1): กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏจันทรเกษม.
- [31] Zhang, Q., et al., (2014) Radioactive airborne effluents and the environmental impact assessment of CAP1400 nuclear power plant under normal operation. *Nuclear Engineering and Design*, 280: 579-585.
- [32] Mitsubishi Heavy Industries, L., (2009)Design Control Document for the US-APWR Chapter 15 Transient and Accident Analysis in Offsite Dose Calculation.

- [33] VALENTIN, J. (2007). PUBLICATION 103. The International Commission on Radiological Protection.
- [34] วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. (2540) อุตุนิยมวิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 1.): กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏจันทรเกษม.
- [35] Vietnam Atomic Energy Institute (VINATOM). (2018). Dispersion of Radionuclides Released from Fukushima Daiichi Nuclear Accident: The 2nd Meeting of the ASEAN Network on NPSR.
- [36] Singapore nuclear research and safety initiative. (2018). Consequence Assessment of a Hypothetical Nuclear Power Plant Accident. The 2nd Meeting of the ASEAN Network on NPSR.
- [37] Muswema, J. L., Darko, E. O., Gbadago, J. K., & Boafo, E. K. (2014). Atmospheric dispersion modeling and radiological safety analysis for a hypothetical accident of Ghana Research Reactor-1 (GHARR-1). Annals of Nuclear Energy, 68, 239-246.
- [38] Raza, S. S., & Iqbal, M. (2005). Atmospheric dispersion modeling for an accidental release from the Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1). Annals of Nuclear Energy, 32(11), 1157-1166.
- [39] วศิน เวชกามา.(2559)การปรับปรุงแบบจำลองการสะสมตัวของแอโรซอลในโปรแกรม ART Mod 2.ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [40] Lee, K.-H., Kim, K.-H., Lee, J.-H., Yun, J.-Y., & Kim, C.-H. (2015). Modeling of long range transport pathways for radionuclides to Korea during the Fukushima Dai-ichi nuclear accident and their association with meteorological circulations. Journal of Environmental Radioactivity, 148, 80-91.
- [41] Yamashita, S. (2016). Comprehensive Health Risk Management after the Fukushima Nuclear Power Plant Accident. Clinical Oncology, 28(4), 255-262.
- [42] Onishi, Y. (2014). Fukushima and Chernobyl Nuclear Accidents' Environmental Assessments and U.S. Hanford Site's Waste Management. Procedia IUTAM, 10, 372-381.

- [43] Sandia National Laboratories (2002). Structural Seismic Fragility Analysis of the Surry Containment U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [44] Sandia National Laboratories. (2013). State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project. Retrieved from The U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [45] A. L. Hanson. (1994). Calculations in Support of a Potential Definition of Large Release. U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [46] Dattore, B. (2018). NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. [ออนไลน์].แหล่งที่มา: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/>.
- [47] Long, P.K., *The meteorological data TINT-VINATOM Collaboration*. 2016.
- [48] Earth Observing Laboratory. Wind Direction Quick Reference [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.eol.ucar.edu/content/wind-direction-quick-reference>. [25/02/2017].
- [49] Air Resource Laboratory. Pasquill Stability Classes [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://ready.arl.noaa.gov/READYpgclass.php>. [25/02/2017].



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลคูณระหว่างค่าเฉลี่ยและความน่าจะเป็นของข้อมูลภูมิอากาศแต่ละปัจจัย

(ค่าเหล่านี้ผ่านการกลับทิศแล้วดังนั้นในการคำนวณไม่ต้องกลับทิศอีกครั้ง)

ตารางที่ 19 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวเคลดท์กัมมันตรังสี จากโรงไฟฟ้า Changjiang มายังประเทศไทย

ทิศ	ตำแหน่งที่ 1 (19.5,109)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 2 (19,107.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	31.00	0.56	40.69	N	60.06	0.82	32.54
NNE	29.45	1.55	30.18	NNE	77.79	1.92	35.35
NE	25.39	0.45	24.34	NE	21.68	1.69	11.24
ENE	5.56	0.88	10.22	ENE	7.12	2.48	5.48
E	3.98	0.90	7.62	E	4.50	3.17	4.09
ESE	3.86	0.32	8.42	ESE	4.97	2.41	4.18
SE	7.46	0.73	12.76	SE	3.59	0.29	3.80
SSE	10.79	1.36	15.43	SSE	5.86	1.77	5.31
S	10.58	1.63	14.54	S	7.71	0.60	6.36
SSW	22.30	3.24	25.32	SSW	99.28	3.86	44.55
SW	39.82	2.66	41.07	SW	114.05	3.56	57.25
WSW	38.76	0.97	41.75	WSW	38.46	1.74	28.08
W	26.01	0.53	38.45	W	11.06	0.85	11.65
WNW	10.66	0.12	28.28	WNW	13.54	0.91	13.43
NW	8.38	0.19	23.89	NW	61.11	0.57	34.15
NNW	16.51	0.15	31.97	NNW	207.75	0.37	97.02

ต่อตาราง 19

ทิศ	ตำแหน่งที่ 3 (18.5 106)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 4 (17 106.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	29.82	1.09	39.29	N	3.86	1.38	16.24
NNE	53.35	1.57	56.35	NNE	14.57	12.53	47.03
NE	29.37	1.48	32.29	NE	26.14	11.89	63.36
ENE	7.73	0.61	13.31	ENE	13.38	1.87	31.29
E	11.56	1.98	19.74	E	1.75	0.45	6.31
ESE	16.84	4.20	20.16	ESE	0.49	0.16	2.25
SE	30.77	6.21	29.13	SE	0.29	0.09	1.45
SSE	55.17	13.48	39.63	SSE	0.23	0.07	1.02
S	29.08	9.50	21.63	S	0.53	0.35	2.21
SSW	14.86	7.52	14.55	SSW	1.60	0.19	4.81
SW	11.64	5.93	12.38	SW	60.22	0.33	120.19
WSW	9.52	1.21	11.32	WSW	34.06	0.14	75.76
W	12.25	0.73	14.71	W	2.30	0.42	9.39
WNW	20.99	0.50	20.98	WNW	0.83	0.46	4.78
NW	27.24	0.77	24.16	NW	0.65	0.36	4.31
NNW	28.58	0.66	32.67	NNW	1.05	0.44	6.22

ตารางที่ 20 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี จากโรงไฟฟ้า Yangjiang มายังประเทศไทย

ทิศ	ตำแหน่งที่ 1 (19.5,109)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 2 (20.5, 112)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	32.00	8.28	10.33	N	109.14	0.56	58.55
NNE	35.89	15.17	14.33	NNE	102.99	0.94	51.63
NE	8.75	4.17	9.39	NE	17.73	3.01	11.41
ENE	2.32	0.37	4.04	ENE	5.85	1.31	5.02
E	1.23	0.27	1.92	E	6.48	0.11	4.79
ESE	1.07	0.53	1.17	ESE	9.56	0.19	7.29
SE	2.03	2.26	2.98	SE	4.25	0.25	3.96
SSE	5.56	1.14	5.26	SSE	3.19	0.28	2.83
S	39.19	3.49	21.46	S	7.79	0.84	5.70
SSW	41.42	3.08	22.76	SSW	41.47	2.19	19.46
SW	12.82	2.18	7.91	SW	106.18	4.46	47.99
WSW	11.04	3.56	6.58	WSW	111.72	3.61	56.95
W	10.84	4.13	5.34	W	67.32	2.04	42.40
WNW	11.47	5.06	5.63	WNW	30.09	0.66	22.12
NW	11.77	5.47	5.59	NW	32.37	0.35	24.05
NNW	15.81	6.57	6.19	NNW	46.09	0.93	30.16

ต่อตารางที่ 20

ทิศ	ตำแหน่งที่ 3 (19.5, 111)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 4 (18.5, 110)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	177.06	0.55	91.15	N	15.87	0.99	30.92
NNE	92.64	0.92	51.39	NNE	22.38	3.41	42.15
NE	8.36	0.78	7.51	NE	20.29	2.60	40.85
ENE	2.26	0.22	2.64	ENE	10.78	0.78	28.99
E	3.85	0.72	3.87	E	3.71	0.19	14.77
ESE	8.97	0.94	7.34	ESE	1.91	0.12	8.21
SE	5.29	1.51	4.91	SE	1.42	0.06	6.44
SSE	5.96	0.98	4.97	SSE	3.86	0.39	13.14
S	13.36	2.15	8.75	S	16.15	0.91	37.58
SSW	37.31	2.21	21.41	SSW	32.47	1.36	56.20
SW	79.00	7.27	40.26	SW	26.37	2.27	44.93
WSW	80.54	9.77	46.81	WSW	11.14	1.12	22.90
W	44.53	6.88	32.76	W	6.69	0.62	14.67
WNW	29.35	1.52	24.21	WNW	4.13	0.30	10.16
NW	21.56	0.21	19.18	NW	4.09	0.45	10.02
NNW	40.37	0.05	28.12	NNW	6.25	0.29	13.96

ต่อตารางที่ 20

ทิศ	ตำแหน่งที่ 5 (17, 109)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 6 (16.5, 107.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	49.85	0.23	33.33	N	16.73	0.34	44.30
NNE	12.13	0.26	11.38	NNE	25.52	0.57	63.45
NE	11.97	1.62	10.70	NE	16.82	0.61	46.09
ENE	11.61	2.74	9.27	ENE	6.09	0.45	17.95
E	9.46	1.06	7.39	E	5.23	1.37	13.64
ESE	14.08	0.91	9.63	ESE	7.74	5.46	16.70
SE	12.79	0.66	8.39	SE	6.83	3.09	14.01
SSE	6.71	0.62	5.10	SSE	7.18	4.11	12.69
S	5.10	0.50	4.59	S	4.23	2.51	9.12
SSW	12.57	2.59	8.10	SSW	3.50	0.98	8.28
SW	62.58	4.62	30.09	SW	7.03	0.78	16.32
WSW	139.42	4.50	68.71	WSW	16.98	1.71	32.92
W	51.01	1.36	34.94	W	21.83	3.20	38.60
WNW	36.42	0.46	27.91	WNW	13.23	1.61	20.96
NW	53.78	0.36	37.70	NW	10.42	0.30	17.22
NNW	151.06	0.16	80.95	NNW	11.91	0.17	26.16

ตารางที่ 21 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิเวศโคลด์กัมมันตรังสี จากโรงไฟฟ้า Fangchenggang มาয়ประเทศไทย

ทิศ	ตำแหน่งที่ 1 (22,108.5)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 2 (20.5, 108.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	48.38	5.71	76.10	N	68.57	2.55	37.35
NNE	11.25	1.36	20.89	NNE	124.27	3.00	55.03
NE	1.04	0.94	3.65	NE	21.90	3.42	14.84
ENE	0.50	0.41	2.39	ENE	4.77	0.55	4.78
E	0.66	0.72	2.77	E	3.68	0.22	3.66
ESE	0.80	0.27	3.34	ESE	3.74	0.40	3.77
SE	2.89	1.12	9.03	SE	3.04	0.57	3.25
SSE	32.60	7.19	74.65	SSE	4.52	0.19	4.57
S	40.54	6.85	79.31	S	17.58	0.61	11.27
SSW	7.59	1.18	20.45	SSW	157.89	7.14	68.44
SW	2.98	1.31	10.28	SW	97.20	3.10	56.26
WSW	1.81	0.95	7.07	WSW	46.36	2.77	32.63
W	1.44	1.33	5.96	W	41.84	0.59	31.55
WNW	2.69	2.34	11.76	WNW	36.12	0.56	27.38
NW	6.74	5.32	23.01	NW	21.03	0.14	19.11
NNW	19.14	7.83	46.01	NNW	17.63	0.28	16.64

ต่อตารางที่ 21

ทิศ	ตำแหน่งที่ 3 (19, 108)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 4 (18, 107)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	74.11	1.15	38.40	N	44.83	0.87	31.91
NNE	59.94	4.11	27.66	NNE	59.26	2.03	35.95
NE	15.03	3.45	8.02	NE	33.49	1.55	19.64
ENE	7.45	3.39	4.98	ENE	12.42	1.52	9.10
E	5.26	2.14	4.83	E	4.52	1.69	6.73
ESE	4.37	1.78	3.99	ESE	11.62	2.88	12.66
SE	4.47	1.39	4.91	SE	15.55	3.65	14.40
SSE	5.68	1.15	6.49	SSE	23.05	3.64	17.87
S	15.38	0.60	13.81	S	54.00	9.87	28.95
SSW	109.02	2.42	49.67	SSW	60.42	13.60	29.61
SW	110.75	1.22	56.33	SW	21.80	6.39	14.28
WSW	28.25	0.80	21.52	WSW	13.52	4.04	12.22
W	7.91	0.50	10.12	W	12.44	4.60	12.09
WNW	10.81	0.64	12.00	WNW	37.60	3.56	26.96
NW	38.61	0.22	24.43	NW	126.74	2.10	74.50
NNW	254.17	0.52	110.75	NNW	80.08	0.51	49.89

ต่อตารางที่ 21

ทิศ	ตำแหน่งที่ 5 (16.5, 106.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	8.15	0.92	28.50
NNE	14.70	5.37	44.09
NE	23.76	7.52	46.34
ENE	19.15	3.71	33.27
E	3.68	1.82	9.54
ESE	1.05	0.61	4.10
SE	0.68	0.71	2.47
SSE	0.77	0.41	3.00
S	1.31	1.08	4.87
SSW	0.77	0.41	3.00
SW	59.03	3.23	91.93
WSW	34.07	1.41	79.93
W	2.79	0.44	13.09
WNW	1.03	0.52	5.66
NW	1.17	0.24	6.02
NNW	2.46	0.66	11.05

ตารางที่ 22 ค่ากลางข้อมูลภูมิอากาศ สำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
จากโรงไฟฟ้า Ninh Thuan มายังประเทศไทย

ทิศ	ตำแหน่งที่ 1 (11.5, 109)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 2 (10.5, 108)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	12.96	0.08	13.82	N	6.18	0.23	7.59
NNE	28.64	0.31	24.84	NNE	13.77	0.56	11.77
NE	44.93	0.28	37.80	NE	28.62	1.36	22.04
ENE	51.02	0.37	55.87	ENE	72.58	6.19	48.02
E	12.41	0.26	23.41	E	101.94	5.67	66.17
ESE	2.43	0.19	6.93	ESE	10.32	1.02	10.75
SE	1.21	0.04	5.06	SE	1.62	0.56	3.22
SSE	4.09	0.07	9.50	SSE	0.72	0.10	1.76
S	34.43	0.32	38.95	S	1.43	0.08	3.14
SSW	140.69	0.53	90.90	SSW	2.40	0.09	3.28
SW	83.05	0.22	49.07	SW	77.97	0.40	44.71
WSW	13.20	0.01	10.11	WSW	253.76	0.45	117.12
W	5.69	0.00	6.25	W	70.53	0.08	36.01
WNW	4.20	0.07	5.56	WNW	9.03	0.01	8.00
NW	4.45	0.02	5.80	NW	4.53	0.05	5.81
NNW	6.77	0.02	7.99	NNW	4.78	0.01	5.23

ต่อตารางที่ 22

ทิศ	ตำแหน่งที่ 3 (10, 106.5)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 4 (10, 105)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	11.10	1.37	14.37	N	7.69	0.21	14.17
NNE	22.65	2.17	30.59	NNE	15.20	1.88	21.26
NE	21.54	3.26	32.45	NE	38.20	9.26	43.23
ENE	23.00	2.19	30.49	ENE	73.68	13.71	65.75
E	11.14	1.11	13.77	E	52.14	9.76	40.79
ESE	6.35	0.80	9.65	ESE	4.60	1.22	5.54
SE	12.38	1.34	13.80	SE	1.39	0.15	2.96
SSE	53.16	1.70	39.09	SSE	1.24	0.11	2.80
S	81.88	0.97	55.07	S	6.93	0.19	8.65
SSW	15.17	0.02	12.97	SSW	16.96	0.14	17.85
SW	4.73	0.00	6.25	SW	9.12	1.07	13.78
WSW	15.57	0.01	13.54	WSW	20.53	2.30	26.68
W	81.41	1.43	55.07	W	41.40	3.66	46.56
WNW	53.28	2.83	39.66	WNW	40.19	1.17	46.11
NW	13.24	2.11	14.92	NW	14.55	0.38	19.91
NNW	5.82	1.30	8.88	NNW	6.34	0.16	11.51

ต่อตารางที่ 22

ทิศ	ตำแหน่งที่ 5 (10, 103.5)			ทิศ	ตำแหน่งที่ 6 (10, 102)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ		ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	19.76	0.30	18.87	N	18.27	0.16	19.93
NNE	21.99	0.82	22.06	NNE	14.52	0.64	16.76
NE	25.89	1.63	25.11	NE	25.09	1.83	25.72
ENE	52.79	9.21	43.45	ENE	60.32	7.36	45.06
E	100.18	24.36	63.34	E	107.27	8.97	63.25
ESE	32.42	5.02	23.46	ESE	21.44	2.40	13.73
SE	4.79	0.06	6.55	SE	1.76	0.11	2.32
SSE	1.32	0.02	2.91	SSE	1.07	0.02	2.19
S	1.47	0.02	3.10	S	3.52	0.02	3.86
SSW	5.04	0.25	5.86	SSW	7.93	0.20	8.13
SW	13.66	0.69	10.80	SW	11.30	0.39	11.23
WSW	34.35	1.81	25.16	WSW	29.39	2.13	24.12
W	72.28	4.38	48.40	W	49.53	3.01	38.93
WNW	58.49	2.33	42.10	WNW	53.17	1.47	41.22
NW	23.19	0.43	21.37	NW	39.77	0.18	34.19
NNW	16.19	0.25	17.20	NNW	27.78	0.06	27.71

ต่อตารางที่ 22

ทิศ	ตำแหน่งที่ 7 (11, 100.5)		
	ความเร็ว ลม	ปริมาณ ฝน	ความเสถียร บรรยากาศ
N	18.27	0.16	19.93
NNE	14.52	0.64	16.76
NE	25.09	1.83	25.72
ENE	60.32	7.36	45.06
E	107.27	8.97	63.25
ESE	21.44	2.40	13.73
SE	1.76	0.11	2.32
SSE	1.07	0.02	2.19
S	3.52	0.02	3.86
SSW	7.93	0.20	8.13
SW	11.30	0.39	11.23
WSW	29.39	2.13	24.12
W	49.53	3.01	38.93
WNW	53.17	1.47	41.22
NW	39.77	0.18	34.19
NNW	27.78	0.06	27.71

ภาคผนวก ข

เกณฑ์คะแนนสำหรับคำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ตารางที่ 23 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Changjiang

ตำแหน่งที่ 1 (19.5,109)			
ลม	ฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 4.77	2.16 - 3.24	0.00 - 9.32	1
4.78 - 7.46	1.56 - 2.15	9.33 - 12.76	2
7.47 - 9.48	1.18 - 1.55	12.77 - 14.99	3
9.49 - 10.66	0.91 - 1.17	15.00 - 23.89	4
10.67 - 13.65	0.81 - 0.90	23.90 - 24.83	5
13.66 - 22.30	0.57 - 0.80	24.84 - 28.28	6
22.31 - 25.70	0.50 - 0.56	28.29 - 31.08	7
25.71 - 29.45	0.33 - 0.49	31.09 - 38.45	8
29.46 - 34.88	0.18 - 0.32	38.46 - 40.88	9
34.89 - 39.82	0.00 - 0.17	40.89 - 41.75	10
ตำแหน่งที่ 2 (19,107.5)			
ลม	ฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 4.74	3.38 - 3.86	0.00 - 4.13	1
4.75 - 5.86	2.49 - 3.37	4.14 - 5.31	2
5.87 - 7.42	2.17 - 2.48	5.32 - 5.92	3
7.43 - 11.06	1.78 - 2.16	5.93 - 11.24	4
11.07 - 17.61	1.73 - 1.77	11.25 - 12.54	5
17.62 - 38.46	0.92 - 1.72	12.55 - 28.08	6
38.47 - 60.58	0.84 - 0.91	28.09 - 33.35	7
60.59 - 77.79	0.61 - 0.83	33.36 - 35.35	8
77.80 - 106.66	0.48 - 0.60	35.36 - 50.90	9
106.67 - 207.75	0.00 - 0.47	50.91 - 97.02	10

ต่อตารางที่ 23

ลม	ฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
ตำแหน่งที่ 3 (18.5,106)			
0.00 - 10.54	8.52 - 13.48	0.00 - 12.85	1
10.55 - 11.64	6.22 - 8.51	12.86 - 14.55	2
11.65 - 13.56	5.08 - 6.21	14.56 - 17.22	3
13.57 - 16.84	1.99 - 5.07	17.23 - 20.16	4
16.85 - 24.11	1.54 - 1.98	20.17 - 21.30	5
24.12 - 28.58	1.22 - 1.53	21.31 - 24.16	6
28.59 - 29.22	0.94 - 1.21	24.17 - 30.71	7
29.23 - 29.82	0.74 - 0.93	30.72 - 32.67	8
29.83 - 42.06	0.64 - 0.73	32.68 - 39.46	9
42.07 - 55.17	0.00 - 0.63	39.47 - 56.35	10
ตำแหน่งที่ 4 (17,106.5)			
0.00 - 1.83	6.89 - 12.53	0.00 - 0.39	1
1.84 - 2.25	1.39 - 6.88	0.40 - 0.53	2
2.26 - 4.55	0.46 - 1.38	0.54 - 0.74	3
4.56 - 4.81	0.45 - 0.45	0.75 - 1.05	4
4.82 - 6.27	0.40 - 0.44	1.06 - 1.68	5
6.28 - 9.39	0.36 - 0.39	1.69 - 2.30	6
9.40 - 23.76	0.27 - 0.35	2.31 - 8.62	7
23.77 - 47.03	0.17 - 0.26	8.63 - 14.57	8
47.04 - 69.56	0.13 - 0.16	14.58 - 30.10	9
69.57 - 120.19	0.00 - 0.12	30.11 - 60.22	10

ตารางที่ 24 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Yangjiang

ตำแหน่งที่ 1 (19.5,109)							
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน	
0.00	- 1.63	7.61	- 15.17	0.00	- 2.45	1	
1.64	- 2.32	5.70	- 7.60	2.46	- 4.04	2	
2.33	- 7.16	4.89	- 5.69	4.05	- 5.30	3	
7.17	- 10.84	4.14	- 4.88	5.31	- 5.59	4	
10.85	- 11.25	3.54	- 4.13	5.60	- 5.91	5	
11.26	- 11.77	3.09	- 3.53	5.92	- 6.35	6	
11.78	- 12.61	2.23	- 3.08	6.36	- 7.65	7	
12.62	- 19.05	1.15	- 2.22	7.66	- 9.58	8	
19.06	- 34.33	0.46	- 1.14	9.59	- 12.73	9	
34.34	- 41.42	0.00	- 0.45	12.74	- 22.76	10	
ตำแหน่งที่ 2 (20.5, 112)							
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน	
0.00	- 5.05	3.32	- 4.46	0.00	- 4.38	1	
5.06	- 6.48	2.20	- 3.31	4.39	- 5.02	2	
6.49	- 8.67	1.69	- 2.19	5.03	- 6.49	3	
8.68	- 17.73	0.95	- 1.68	6.50	- 11.41	4	
17.74	- 31.23	0.89	- 0.94	11.42	- 20.79	5	
31.24	- 41.47	0.67	- 0.88	20.80	- 24.05	6	
41.48	- 56.71	0.47	- 0.66	24.06	- 36.28	7	
56.72	- 102.99	0.29	- 0.46	36.29	- 47.99	8	
103.00	- 107.66	0.23	- 0.28	48.00	- 54.29	9	
107.67	- 111.72	0.00	- 0.22	54.30	- 58.55	10	

ต่อตารางที่ 24

ตำแหน่งที่ 3 (19.5, 111)									
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน			
0.00	-	4.57	7.09	-	9.77	0.00	-	4.39	1
4.58	-	5.96	2.22	-	7.08	4.40	-	4.97	2
5.97	-	8.66	1.85	-	2.21	4.98	-	7.42	3
8.67	-	13.36	1.52	-	1.84	7.43	-	8.75	4
13.37	-	25.46	0.97	-	1.51	8.76	-	20.29	5
25.47	-	37.31	0.93	-	0.96	20.30	-	24.21	6
37.32	-	42.45	0.76	-	0.92	24.22	-	30.44	7
42.46	-	79.00	0.56	-	0.75	30.45	-	40.26	8
79.01	-	86.59	0.23	-	0.55	40.27	-	49.10	9
86.60	-	177.06	0.00	-	0.22	49.11	-	91.15	10
ตำแหน่งที่ 4 (18.5, 110)									
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน			
0.00	-	2.81	2.45	-	3.41	0.00	-	9.11	1
2.82	-	3.86	1.37	-	2.44	9.12	-	10.16	2
3.87	-	4.11	1.07	-	1.36	10.17	-	13.55	3
4.12	-	6.25	0.92	-	1.06	13.56	-	14.67	4
6.26	-	8.73	0.71	-	0.91	14.68	-	18.83	5
8.74	-	11.14	0.46	-	0.70	18.84	-	28.99	6
11.15	-	16.01	0.35	-	0.45	29.00	-	34.25	7
16.02	-	20.29	0.30	-	0.34	34.26	-	40.85	8
20.30	-	24.38	0.16	-	0.29	40.86	-	43.54	9
24.39	-	32.47	0.00	-	0.15	43.55	-	56.20	10

ต่อตารางที่ 24

ตำแหน่งที่ 5 (17, 109)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 8.09	3.63 - 4.62	0.00 - 6.24	1
8.10 - 11.61	2.60 - 3.62	6.25 - 8.10	2
11.62 - 12.05	1.50 - 2.59	8.11 - 8.83	3
12.06 - 12.57	1.07 - 1.49	8.84 - 9.63	4
12.58 - 13.44	0.80 - 1.06	9.64 - 11.04	5
13.45 - 36.42	0.63 - 0.79	11.05 - 27.91	6
36.43 - 50.43	0.49 - 0.62	27.92 - 31.71	7
50.44 - 53.78	0.37 - 0.48	31.72 - 34.94	8
53.79 - 101.00	0.26 - 0.36	34.95 - 53.21	9
101.01 - 151.06	0.00 - 0.25	53.22 - 80.95	10
ตำแหน่งที่ 6 (16.5, 107.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 4.73	3.66 - 5.46	0.00 - 10.91	1
4.74 - 6.09	3.10 - 3.65	10.92 - 13.64	2
6.10 - 6.93	2.12 - 3.09	13.65 - 15.16	3
6.94 - 7.18	1.62 - 2.11	15.17 - 16.70	4
7.19 - 9.08	1.19 - 1.61	16.71 - 17.59	5
9.09 - 11.91	0.79 - 1.18	17.60 - 20.96	6
11.92 - 14.98	0.60 - 0.78	20.97 - 29.54	7
14.99 - 16.82	0.46 - 0.59	29.55 - 38.60	8
16.83 - 19.40	0.33 - 0.45	38.61 - 45.19	9
19.41 - 25.52	0.00 - 0.32	45.20 - 63.45	10

ตารางที่ 25 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Fangchenggang

ตำแหน่งที่ 1 (22 108.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 0.73	7.03 - 7.83	0.00 - 3.06	1
0.74 - 1.04	5.72 - 7.02	3.07 - 3.65	2
1.05 - 1.63	3.84 - 5.71	3.66 - 6.51	3
1.64 - 2.69	1.37 - 3.83	6.52 - 9.03	4
2.70 - 2.93	1.33 - 1.36	9.04 - 11.02	5
2.94 - 6.74	1.19 - 1.32	11.03 - 20.45	6
6.75 - 9.42	1.05 - 1.18	20.46 - 21.95	7
9.43 - 19.14	0.95 - 1.04	21.96 - 46.01	8
19.15 - 36.57	0.57 - 0.94	46.02 - 75.37	9
36.58 - 48.38	0.00 - 0.56	75.38 - 79.31	10
ตำแหน่งที่ 2 (20.5 108.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 3.71	3.27 - 7.14	0.00 - 3.72	1
3.72 - 4.52	3.01 - 3.26	3.73 - 4.57	2
4.53 - 11.17	2.67 - 3.00	4.58 - 8.02	3
11.18 - 17.63	0.62 - 2.66	8.03 - 14.84	4
17.64 - 21.46	0.59 - 0.61	14.85 - 17.87	5
21.47 - 36.12	0.57 - 0.58	17.88 - 27.38	6
36.13 - 44.10	0.48 - 0.56	27.39 - 32.09	7
44.11 - 68.57	0.29 - 0.47	32.10 - 37.35	8
68.58 - 110.73	0.21 - 0.28	37.36 - 55.64	9
110.74 - 157.89	0.00 - 0.20	55.65 - 68.44	10

ต่อตารางที่ 25

ตำแหน่งที่ 3 (19, 108)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 4.87	3.43 - 4.11	0.00 - 4.87	1
4.88 - 5.68	2.43 - 3.42	4.88 - 4.98	2
5.69 - 7.68	1.97 - 2.42	4.99 - 7.26	3
7.69 - 10.81	1.40 - 1.96	7.27 - 10.12	4
10.82 - 15.21	1.20 - 1.39	10.13 - 12.90	5
15.22 - 28.25	1.16 - 1.19	12.91 - 21.52	6
28.26 - 49.27	0.73 - 1.15	21.53 - 26.04	7
49.28 - 74.11	0.61 - 0.72	26.05 - 38.40	8
74.12 - 109.88	0.52 - 0.60	38.41 - 53.00	9
109.89 - 254.17	0.00 - 0.51	53.01 - 110.75	10
ตำแหน่งที่ 4 (18, 107)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 12.02	8.14 - 13.60	0.00 - 10.59	1
12.03 - 12.44	4.61 - 8.13	10.60 - 12.22	2
12.45 - 14.54	3.85 - 4.60	12.23 - 13.47	3
14.55 - 21.80	3.65 - 3.84	13.48 - 14.40	4
21.81 - 28.27	3.23 - 3.64	14.41 - 18.76	5
28.28 - 37.60	2.11 - 3.22	18.77 - 26.96	6
37.61 - 49.42	1.87 - 2.10	26.97 - 29.28	7
49.43 - 59.26	1.56 - 1.86	29.29 - 31.91	8
59.27 - 70.25	1.21 - 1.55	31.92 - 42.92	9
70.26 - 126.74	0.00 - 1.20	42.93 - 74.50	10

ต่อตารางที่ 26

ตำแหน่งที่ 5 (16.5, 106.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 0.77	4.55 - 7.52	0.00 - 3.00	1
0.78 - 1.03	3.24 - 4.54	3.01 - 4.10	2
1.04 - 1.11	1.62 - 3.23	4.11 - 5.27	3
1.12 - 1.31	1.09 - 1.61	5.28 - 6.02	4
1.32 - 2.63	0.83 - 1.08	6.03 - 10.30	5
2.64 - 3.68	0.67 - 0.82	10.31 - 13.09	6
3.69 - 11.42	0.58 - 0.66	13.10 - 30.89	7
11.43 - 19.15	0.45 - 0.57	30.90 - 44.09	8
19.16 - 28.92	0.42 - 0.44	44.10 - 63.14	9
28.93 - 59.03	0.00 - 0.41	63.15 - 91.93	10



ตารางที่ 26 เกณฑ์คำนวณคะแนนการกระจายตัวของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีแต่ละตำแหน่งวิเคราะห์ผลของโรงไฟฟ้า Ninh Thuan

ตำแหน่งที่ 1 (11.5, 109)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 3.26	0.35 - 0.53	0.00 - 5.68	1
3.27 - 4.20	0.32 - 0.34	5.69 - 6.25	2
4.21 - 5.07	0.28 - 0.31	6.26 - 7.46	3
5.08 - 6.77	0.23 - 0.27	7.47 - 9.50	4
6.78 - 12.69	0.15 - 0.22	9.51 - 11.97	5
12.70 - 13.20	0.08 - 0.14	11.98 - 23.41	6
13.21 - 31.53	0.06 - 0.07	23.42 - 31.32	7
31.54 - 44.93	0.03 - 0.05	31.33 - 38.95	8
44.94 - 67.04	0.03 - 0.02	38.96 - 52.47	9
67.05 - 140.69	0.00 - 0.02	52.48 - 90.90	10
ตำแหน่งที่ 2 (10.5, 108)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 1.53	3.52 - 6.19	0.00 - 3.18	1
1.54 - 2.40	1.03 - 3.51	3.19 - 3.28	2
2.41 - 4.66	0.57 - 1.02	3.29 - 5.52	3
4.67 - 6.18	0.46 - 0.56	5.53 - 7.59	4
6.19 - 9.68	0.33 - 0.45	7.60 - 9.38	5
9.69 - 13.77	0.11 - 0.32	9.39 - 11.77	6
13.78 - 49.58	0.10 - 0.10	11.78 - 29.03	7
49.59 - 72.58	0.09 - 0.09	29.04 - 44.71	8
72.59 - 89.95	0.04 - 0.08	44.72 - 57.09	9
89.96 - 253.76	0.00 - 0.03	57.10 - 117.12	10

ต่อตารางที่ 26

ตำแหน่งที่ 3 (10, 106.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 6.09	2.52 - 3.26	0.00 - 9.26	1
6.10 - 11.10	2.18 - 2.51	9.27 - 12.97	2
11.11 - 11.76	1.92 - 2.17	12.98 - 13.65	3
11.77 - 13.24	1.44 - 1.91	13.66 - 13.80	4
13.25 - 15.37	1.36 - 1.43	13.81 - 14.64	5
15.38 - 21.54	1.31 - 1.35	14.65 - 30.49	6
21.55 - 22.82	1.05 - 1.30	30.50 - 31.52	7
22.83 - 53.16	0.81 - 1.04	31.53 - 39.09	8
53.17 - 67.35	0.03 - 0.80	39.10 - 47.37	9
67.36 - 81.88	0.00 - 0.02	47.38 - 55.07	10
ตำแหน่งที่ 4 (10, 105)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 3.00	9.52 - 13.71	0.00 - 4.25	1
3.01 - 6.34	3.67 - 9.51	4.26 - 8.65	2
6.35 - 7.31	2.10 - 3.66	8.66 - 12.64	3
7.32 - 9.12	1.23 - 2.09	12.65 - 14.17	4
9.13 - 14.87	1.13 - 1.22	14.18 - 18.88	5
14.88 - 16.96	0.39 - 1.12	18.89 - 21.26	6
16.97 - 29.37	0.21 - 0.38	21.27 - 33.73	7
29.38 - 40.19	0.17 - 0.20	33.74 - 43.23	8
40.20 - 46.77	0.16 - 0.16	43.24 - 46.34	9
46.78 - 73.68	0.00 - 0.15	46.35 - 65.75	10

ต่อตารางที่ 26

ตำแหน่งที่ 5 (10, 103.5)							
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน	
0.00	- 3.13	7.12	- 24.36	0.00	- 4.48	1	
3.14	- 5.04	4.39	- 7.11	4.49	- 6.55	2	
5.05	- 14.92	2.08	- 4.38	6.56	- 14.00	3	
14.93	- 19.76	1.64	- 2.07	14.01	- 18.87	4	
19.77	- 22.59	0.77	- 1.63	18.88	- 21.72	5	
22.60	- 25.89	0.44	- 0.76	21.73	- 23.46	6	
25.90	- 33.39	0.29	- 0.43	23.47	- 25.13	7	
33.40	- 52.79	0.26	- 0.28	25.14	- 42.10	8	
52.80	- 65.38	0.05	- 0.25	42.11	- 45.93	9	
65.39	- 100.18	0.00	- 0.04	45.94	- 63.34	10	
ตำแหน่งที่ 6 (10, 102)							
ข้อมูลลม		ข้อมูลฝน		ความเสถียรบรรยากาศ		คะแนน	
0.00	- 2.64	5.20	- 8.97	0.00	- 3.09	1	
2.65	- 7.93	2.41	- 5.19	3.10	- 8.13	2	
7.94	- 12.91	1.99	- 2.40	8.14	- 12.48	3	
12.92	- 18.27	1.48	- 1.98	12.49	- 16.76	4	
18.28	- 23.26	0.53	- 1.47	16.77	- 22.02	5	
23.27	- 27.78	0.21	- 0.52	22.03	- 25.72	6	
27.79	- 34.58	0.18	- 0.20	25.73	- 30.95	7	
34.59	- 49.53	0.12	- 0.17	30.96	- 38.93	8	
49.54	- 56.74	0.05	- 0.11	38.94	- 43.14	9	
56.75	- 107.27	0.00	- 0.04	43.15	- 63.25	10	

ต่อตารางที่ 26

ตำแหน่งที่ 7 (11, 100.5)			
ข้อมูลลม	ข้อมูลฝน	ความเสถียรบรรยากาศ	คะแนน
0.00 - 2.64	5.20 - 8.97	0.00 - 3.09	1
2.65 - 7.93	2.41 - 5.19	3.10 - 8.13	2
7.94 - 12.91	1.99 - 2.40	8.14 - 12.48	3
12.92 - 18.27	1.48 - 1.98	12.49 - 16.76	4
18.28 - 23.26	0.53 - 1.47	16.77 - 22.02	5
23.27 - 27.78	0.21 - 0.52	22.03 - 25.72	6
27.79 - 34.58	0.18 - 0.20	25.73 - 30.95	7
34.59 - 49.53	0.12 - 0.17	30.96 - 38.93	8
49.54 - 56.74	0.05 - 0.11	38.94 - 43.14	9
56.75 - 107.27	0.00 - 0.04	43.15 - 63.25	10



ภาคผนวก ค.

การจัดเตรียมข้อมูลภูมิอากาศ

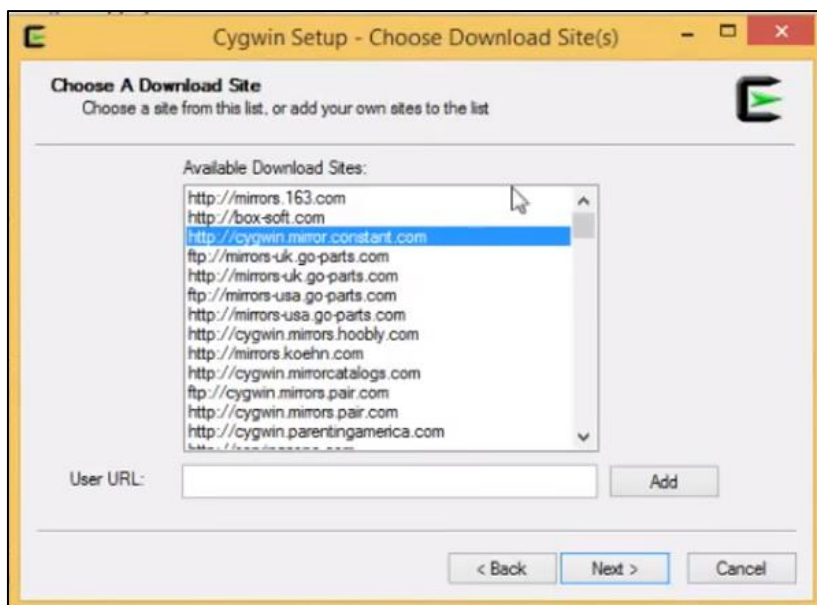
การติดตั้งโปรแกรม

การดาวน์โหลดข้อมูลจาก NOAA จำเป็นจะต้องมีโปรแกรม Wgrib2 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่แตกไฟล์ (extract file) ข้อมูลจากการดาวน์โหลด และเป็นโปรแกรมที่ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Linux ดังนั้นถ้าคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองผลที่เป็นระบบปฏิบัติการ Windows ต้องติดตั้งโปรแกรมจำลองระบบปฏิบัติการ Linux โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Cygwin64 เป็นโปรแกรมจำลองระบบปฏิบัติการ ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนในการติดตั้งดังต่อไปนี้

1. การติดตั้งโปรแกรมจำลองระบบปฏิบัติการ Linux (Cygwin64)

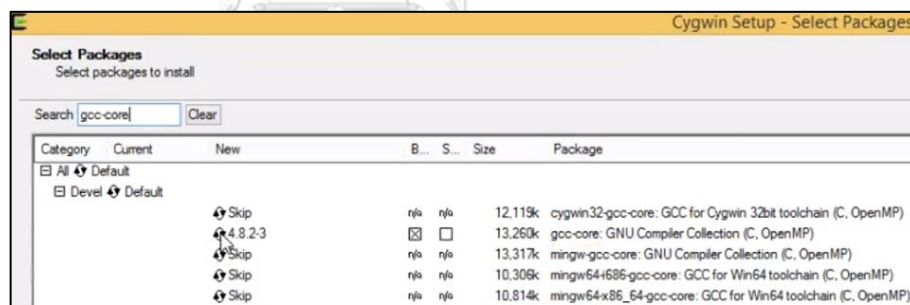
โปรแกรม Cygwin64 เป็นโปรแกรมจำลองระบบปฏิบัติการ Linux บน Windows ดังนั้นในขณะที่ติดตั้งโปรแกรมจะมีฟังก์ชันการทำงานของระบบปฏิบัติการ Linux ให้เลือกติดตั้งเป็นจำนวนมาก โดยรายละเอียดในการติดตั้งและการดาวน์โหลดฟังก์ชันต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในโปรแกรม Wgrib2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.1 ดาวน์โหลดโปรแกรม Cygwin64 ได้จาก <https://cygwin.com/install.html> ภายใต้อินเทอร์เน็ตจะมีตัวติดตั้งสำหรับ Windows 32 และ 64 bit ให้ผู้ใช้งานเลือกดาวน์โหลดตาม Windows ที่ตนเองใช้งานอยู่ปัจจุบัน
- 1.2 หลังจากดาวน์โหลดตัวติดตั้งโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการดับเบิลคลิกไฟล์ดังกล่าวและกด next เพื่อติดตั้งโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าจอ Choose A Download Site ให้เลือก Install from internet และกด next
- 1.3 โปรแกรมจะเข้าสู่หน้าจอ Select Root Install Directory ให้เลือก Root Directory ที่ C:\cygwin64 และเลือก Install for All user (RECOMMENDED) แล้วกด next จากนั้นโปรแกรมจะให้เลือกที่เก็บ Local Package Directory ซึ่งปกติโปรแกรมจะเลือกที่เก็บที่ถูกตั้งอยู่แล้ว ดังนั้นเราสามารถกด next เพื่อไปขั้นตอนต่อไปได้เลย
- 1.4 หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 1.3 ไปแล้วโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าจอ Select Your Internet Connection ให้เลือก Direct Connection และกด next
- 1.5 จากนั้นจะเข้าสู่หน้าจอ Choose A Download Site บริเวณ Available Download site ให้เลือก <http://cygwin.mirror.constant.com> จากนั้นกด next ดังแสดงรูปที่ 67



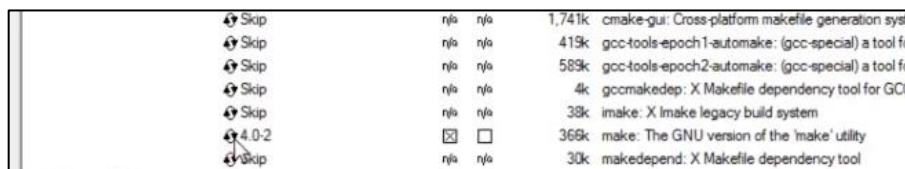
รูปที่ 67 การเลือก Available Download site

1.6 หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 1.5 จะเข้าสู่ขั้นตอนติดตั้งฟังก์ชันของ Linux โดยมีรายละเอียดฟังก์ชันที่จำเป็นต้องติดตั้งดังต่อไปนี้ ฟังก์ชัน gcc ให้พิมพ์ gcc-core ในช่อง Search จากนั้นเลือกติดตั้ง gcc-core GNU Compiler โดยการกดที่ Skip ดังรูปที่ 68



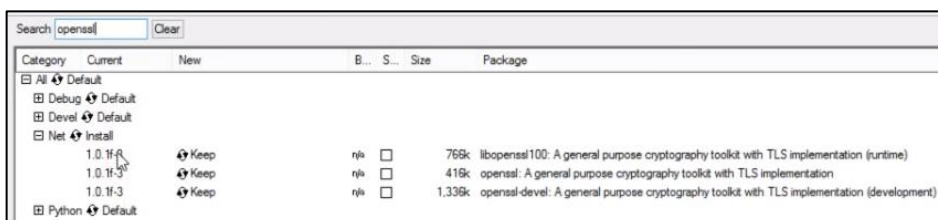
รูปที่ 68 การติดตั้งฟังก์ชัน gcc

1.7 ฟังก์ชัน make หลังจาก Search ให้เลือก Devel Default จากนั้นเลือก make the GNU version of the 'make' utility โดยกดที่ Skip ดังแสดงในรูปที่ 69

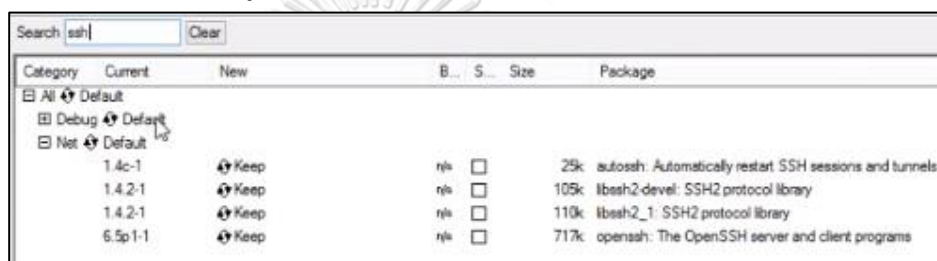


รูปที่ 69 การลงฟังก์ชัน make

- 1.8 การติดตั้งฟังก์ชัน openssl ให้เลือก Net โดยกดเครื่องหมายบวกจากนั้นเลือกติดตั้งทั้งหมด 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 70 และ ติดตั้งฟังก์ชัน ssh ให้เลือก Net โดยกดเครื่องหมายบวกจากนั้นเลือกติดตั้งทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 71

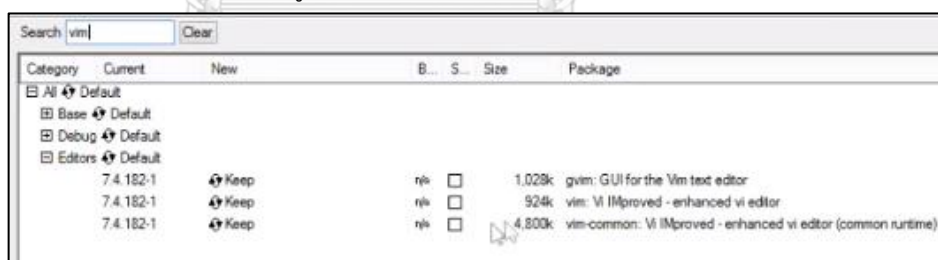


รูปที่ 70 การลงฟังก์ชัน openssl



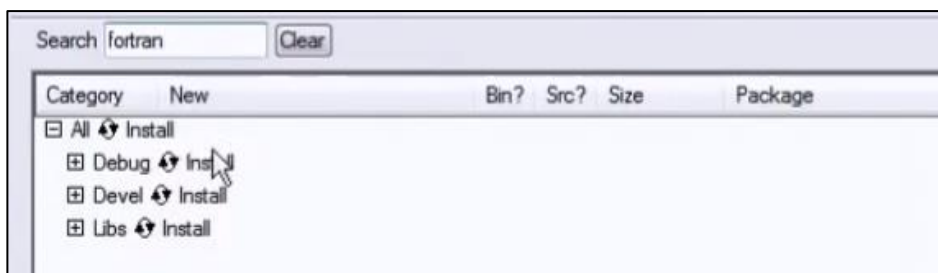
รูปที่ 71 การลงฟังก์ชัน ssh

- 1.9 การติดตั้งฟังก์ชัน Vim ให้เลือกติดตั้ง Editors โดยกดเครื่องหมายบวกจากนั้นเลือกติดตั้งทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 72



รูปที่ 72 การลงฟังก์ชัน Vim

- 1.10 การติดตั้งฟังก์ชัน scp เลือกที่ X11 จากนั้นเลือกติดตั้ง Xcmiscproto
- 1.11 การติดตั้งฟังก์ชัน ftp เลือก Net โดยกดเครื่องหมายบวกจากนั้นเลือกติดตั้งทั้งหมด
- 1.12 การติดตั้งฟังก์ชัน python ให้เลือกที่ python แล้วเลือกติดตั้งทั้งหมด
- 1.13 การติดตั้งฟังก์ชัน fortran เลือกติดตั้งทั้งหมดโดยการคลิกคำว่า default ให้กลายเป็น Install ดังแสดงในรูปที่ 73



รูปที่ 73 การลงฟังก์ชัน Fortran

- 1.14 การติดตั้งฟังก์ชัน gnuplot เลือกติดตั้งทั้งหมดโดยการคลิกคำว่า default ให้กลายเป็น Install ดังแสดงในรูปที่ 74



รูปที่ 74 การลงฟังก์ชัน gnuplot

หลังจากติดตั้งฟังก์ชันครบแล้วให้กด next โปรแกรมจะแสดงรายการฟังก์ชันทั้งหมดที่เราเลือกติดตั้งให้เราตรวจสอบว่าครบทุกฟังก์ชันหรือไม่ ถ้าไม่ครบให้กด back แล้วกลับมาเลือกฟังก์ชันที่ขาดหายไป ถ้าในกรณีที่ครบแล้วให้กด next หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำการติดตั้งฟังก์ชันทั้งหมดที่ได้เลือกไว้ตั้ง หลังจากโปรแกรมติดตั้งครบทุกฟังก์ชันแล้วให้กด Finish จากนั้นเราสามารถเข้า main directory ได้โดยการเข้าไปยังโปรแกรม Cywin64 และ พิมพ์ pwd แล้ว enter ระบบจะแจ้ง main directory ของเครื่องที่ติดตั้งโปรแกรม

2. การติดตั้งโปรแกรม Wgrib2

หลังจากติดตั้งโปรแกรม Cygwin64 เสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการติดตั้งโปรแกรม Wgrib2 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแตกไฟล์ (extract file) ข้อมูลจากการดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ NOAA โดยมีรายละเอียดในการติดตั้งดังต่อไปนี้

2.1 ดาวน์โหลดโปรแกรม Wgrib2 (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/wgrib2/wgrib2.tgz>)

จากนั้นย้ายตัวติดตั้งไปไว้ใน main directory

2.2 เปิดโปรแกรม Cywin64 จากนั้นเข้าไปยัง main directory และ extract file โดยพิมพ์คำสั่ง `tar -xzf wgrib2.tgz` หลังจาก extract file จะได้ folder ชื่อ grib 2 ให้เข้าไปยัง folder ดังกล่าวโดยพิมพ์ `cd grib 2`

2.3 จากนั้น compile program โดยฟังก์ชัน Bash ตามคำสั่งดังต่อไปนี้

- export CC=gcc
- export FC=gfortran
- make

2.4 หลังจากโปรแกรม run คำสั่ง `make` เสร็จให้ป้อนคำสั่ง `wgrib2/wgrib2 -config` และกด enter เพื่อตรวจสอบการ compile ของโปรแกรม ในกรณี compile สำเร็จ โปรแกรมจะแสดงผลดังรูปที่ 76

```
hp@DESKTOP-7QI6Q0L ~/grib2
$ wgrib2/wgrib2 -config
wgrib2 v0.2.0.6c 2/2017 Wesley Ebisuzaki, Reinoud Bokhorst, John Howard, Jaakko Hyvätti, Dusan Jovic,
Daniel Lee, Kristian Nilssen, Karl Pfeiffer, Pablo Romero, Manfred Schwarb, Gregor Schee, Arlindo da Si
lva, Niklas Sondell, Sam Trahan, Sergey Varlamov
stock build

Compiled on 15:09:35 Aug 21 2017

Netcdf package: "3.6.3" of Aug 21 2017 15:04:50 $ is installed
libaec-1.0.0.tar.gz is installed
Jasper 1.900.1 is installed
mysql package is not installed
regex package is installed
tiggie package is installed
IPOLATES ipilib.2012 is installed, default vectors:
  UGRD/VGRD VUCSH/VVCSH UFLX/VFLX UGUST/VGUST USTM/VSTM VDFUA/VDFVA MAXUW/MAXWV
  UOGRD/VOGRD UICE/VICE U-GND/V-GND
Geolocation library status (by search order)
  gctpc geolocation is enabled
  spherical geolocation is enabled
UDF package is not installed
maximum number of arguments on command line: 10000
maximum number of -match,-not,-if, and -not_if options: 2000
maximum number of -match_fs,-not_fs,-if_fs, and -not_if_fs options: 2000
maximum number of -fgrep, -egrep, -fgrep_v, -egrep_v options: 200
RPN registers: 0..19
memory files: @mem:0, @mem:1 .. @mem:19
stdout buffer length: 30000
default decoding: g2clib emulation
g2clib decoders are not installed
Supported decoding: simple, complex, r1e, ieee, png, jpeg2000, CCSDS AEC
user gribtable: (none)
C compiler: gcc (GCC) 5.4.0
Fortran compiler: gfortran
OpenMP: control number of threads with environment variable OMP_NUM_THREADS
```

รูปที่ 75 การตรวจสอบการ compile ของโปรแกรม

การดาวน์โหลดข้อมูล

เข้าไปยังเว็บไซต์ <https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/> จากนั้นทำการลงทะเบียน โดยคลิกคำว่า Register now และ กรอกรายละเอียดข้อมูลตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ในเว็บไซต์ดังแสดงใน รูปที่ 77 เมื่อกรอกข้อมูลเสร็จให้คลิกคำว่า Register จากนั้นระบบจะส่งรายละเอียดการสมัครไปยัง email ที่ท่านได้ลงทะเบียนไว้เพื่อให้ท่านกดยืนยันการลงทะเบียน หลังจากลงทะเบียนเรียบร้อยแล้ว ให้เข้าไปที่ <http://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/>, จากนั้นกดที่ data access และเลือก get a subset ดังแสดงในภาพรูปที่ 78

รูปที่ 76 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนการลงทะเบียน

Data File Downloads		Customizable Data Requests	Other Access Methods
Web Server Holdings	Globus Transfer Service (GridFTP)	Subsetting	OPeNDAP Access
Web File Listing	Request Globus Transfer	Get a Subset	Get OPeNDAP Access

รูปที่ 77 หน้าเว็บไซต์ NOAA

ภายในหน้าของ get a subset ประกอบไปด้วยสองส่วนคือ temporal selection ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ผู้ใช้งานกำหนดช่วงเวลาของข้อมูลที่ต้องการดาวน์โหลด และอีกส่วนคือ parameter selection ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับเลือกตัวแปร ที่ต้องการดาวน์โหลด ดังรูปที่ 79 โดยตัวแปรที่เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับจำลองผลในโปรแกรม HotSpot ประกอบไปด้วยตัวแปรสำหรับคำนวณความเร็วลม และทิศทางลม ซึ่งประกอบไปด้วย U-component of wind และ V-component of wind ตัวแปรสำหรับคำนวณปริมาณน้ำฝน Total precipitation และตัวแปรสำหรับคำนวณความเสถียรของชั้นบรรยากาศ Total cloud cover และ Solar elevation [47] โดยการดาวน์โหลดหนึ่งครั้งให้เลือกดาวน์โหลดหนึ่งตัวแปรเท่านั้น ยกเว้น U-component of wind และ V-component of wind สามารถดาวน์โหลดพร้อมกันได้ หลังจากเลือกตัวแปรที่ต้องการดาวน์โหลดเสร็จเรียบร้อยแล้วให้คลิกที่ continuous เว็บไซต์จะเชื่อมมายังหน้าการกำหนดเงื่อนไขตัวแปร ดังรูปที่ 80 โดยแต่ละตัวแปรจะมีเงื่อนไขในการดาวน์โหลดที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังนี้

The screenshot shows the 'Temporal Selection' and 'Parameter Selection' sections of the NOAA 'get a subset' web interface. The 'Temporal Selection' section includes a date range from 2011-01-01 00:00 to 2017-08-21 03:00, with radio buttons for 'Valid Time' and 'Initialization (Reference) Time'. The 'Parameter Selection' section has a dropdown menu set to 'None chosen' and a list of 24 parameters, each with a checkbox. The parameters are:

- 5-wave geopotential height
- 5-wave geopotential height anomaly
- Absolute vorticity
- Aerodynamic conductance
- Albedo
- Best (4 layer) lifted index
- Canopy water evaporation
- Categorical freezing rain (yes=1; no=0)
- Categorical ice pellets (yes=1; no=0)
- Categorical rain (yes=1; no=0)
- Categorical snow (yes=1; no=0)
- Clear sky downward longwave flux
- Clear sky downward solar flux
- Planetary boundary layer height
- Plant canopy surface water
- Potential evaporation rate
- Potential temperature
- Potential vorticity
- Precipitable water
- Precipitation rate
- Pressure
- Pressure reduced to MSL
- Relative humidity
- Salinity
- Sea surface height relative to geoid
- Sensible heat flux

รูปที่ 78 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนของ get a subset

The screenshot shows the 'Refine Your Selections' section of the NOAA 'get a subset' web interface. It includes several configuration options:

- Input Data Format:** WMO_GRIB2
- Output Format:** Same as input (selected), Converted to netCDF, or Converted to CSV
- Valid Date Range:** 2011-01-01 00:00 to 2018-04-26 03:00
- Parameter(s):** All available, u-component of wind, v-component of wind
- Vertical Level(s):** All available, Hybrid level: 1, Isentropic (theta) level: 270 deg K, Isentropic (theta) level: 280 deg K, Isentropic (theta) level: 290 deg K, Isentropic (theta) level: 300 deg K, Isentropic (theta) level: 310 deg K
- Gridded Product:** All available, Analysis, 1-hour Forecast, 2-hour Forecast, 3-hour Forecast, 4-hour Forecast, 5-hour Forecast
- Grid:** All available

รูปที่ 79 หน้าเว็บไซต์ NOAA ในส่วนของ การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร

เงื่อนไขตัวแปร U-component of wind และ V-component of wind

Level(s): Specified height above ground: 10 m

Product(s): 1-hour Forecast,
 2-hour Forecast,
 3-hour Forecast
 4-hour Forecast,
 5-hour Forecast
 6-hour Forecast

Grid: 0.5-deg x 0.5-deg

เงื่อนไขตัวแปร Total precipitation

Level(s): Ground or water surface

Product(s): 1-hour Accumulation (initial+0 to initial+1)
 2-hour Accumulation (initial+0 to initial+2)
 3-hour Accumulation (initial+0 to initial+3)
 4-hour Accumulation (initial+0 to initial+4)
 5-hour Accumulation (initial+0 to initial+5)
 6-hour Accumulation (initial+0 to initial+6)

Grid: 0.5-deg x 0.5-deg

เงื่อนไขตัวแปร Total cloud cover และ Solar elevation

Level(s): High cloud layer, Low cloud layer, Middle cloud layer

Product(s): 1-hour Average (initial+0 to initial+1)
 2-hour Average (initial+0 to initial+2)
 3-hour Average (initial+0 to initial+3)
 4-hour Average (initial+0 to initial+4)
 5-hour Average (initial+0 to initial+5)
 6-hour Average (initial+0 to initial+6)

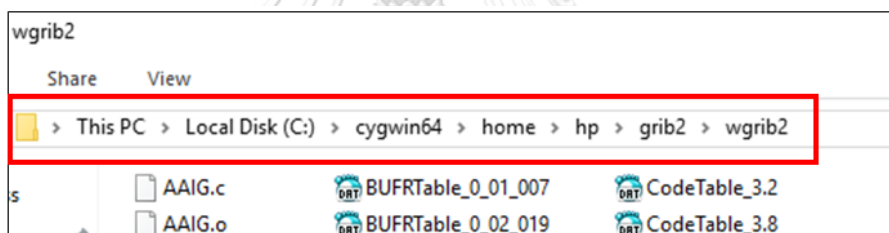
Grid: 0.5-deg x 0.5-deg

กรณีตัวแปร Solar elevation ไม่มีบันทึกไว้ในเว็บไซต์ NOAA สามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://keisan.casio.com/exec/system/1224682277> หลังจากกรอกเงื่อนไขในการดาวน์โหลดเสร็จให้กดปุ่ม click here และ submit เว็บไซต์จะส่ง link ดาวน์โหลดมายัง email ที่ท่านใช้ลงทะเบียน

หลังจากทำการดาวน์โหลดเสร็จสิ้นจะได้ไฟล์ข้อมูลชื่อ datafiles.tar ให้ย้ายไฟล์ดังกล่าวไปไว้ใน folder wgrib2 โดย folder ดังกล่าวจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เราติดตั้ง Cygwin64 ในขั้นตอนแรก ดังแสดงในรูปที่ 81 จากนั้นเปิดโปรแกรม Cygwin64 และเข้าไปยัง folder wgrib2 แล้วทำการ extract ไฟล์ โดยใช้คำสั่ง `./wgrib2 datafiles.tar -undefine out-box 109:109 11.5:11.5 -csv out.txt` หลังจาก extract ไฟล์เรียบร้อยแล้วจะได้ไฟล์ output ชื่อ out.txt

ข้อควรระวัง

- เครื่องหมาย “-” ในสูตรต้องเป็นเครื่องหมาย hyphen ไม่ใช่เครื่องหมายลบ
- พิกัดในสูตรต้องตั้งให้สอดคล้องกับไฟล์ที่ดาวน์โหลด
- ในกรณีไฟล์ที่ดาวน์โหลดไม่ใช่ชื่อ datafiles ต้องเปลี่ยนให้สอดคล้องกัน



รูปที่ 80 ตำแหน่งติดตั้งของ wgrib2

การคำนวณข้อมูลภูมิอากาศ

ข้อมูลจากการ extract file จะถูกนำมาใช้สำหรับคำนวณความเร็วลม ทิศทางลม ปริมาณน้ำฝนและความเสถียรของชั้นบรรยากาศ โดยในแต่ละการคำนวณจะมีสูตรในการคำนวณที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การคำนวณความเร็วลม [48]

$$Speed = \sqrt{V_{geo}^2 + U_{geo}^2} \quad (9)$$

V_{geo} คือ v-component of wind [m/s]

U_{geo} คือ u-component of wind [m /s]

- การคำนวณทิศทางลม

$$Direction = \arctan 2(-U_{geo}, -V_{geo}) \times Depr R \quad (10)$$

Direction คือ ค่าองศาที่ลมเคลื่อนที่ผ่าน [degree]

Derper R คือ แฟกเตอร์ในการแปลงหน่วยขนาดของมุมจากเรเดียน

เป็นองศาซึ่งมีค่า 57.29578

ผลที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 10 จะถูกนำมาแปลงเป็นทิศทางที่ลมเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมด 16 ทิศตามเงื่อนไขในตารางที่ 19

ตารางที่ 27 เงื่อนไขสำหรับวิเคราะห์ทิศทางของลม

ชื่อทิศ	อักษรย่อ	มุม (องศา)
ทิศตะวันตก	W	-168.75
ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก	WSW	-168.74 ถึง -146.25
ทิศตะวันตกเฉียงใต้	SW	-146.24 ถึง -123.75
ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้	SSW	-123.74 ถึง -101.25
ทิศใต้	S	-101.24 ถึง -78.75
ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้	SSE	-78.74 ถึง -56.25
ทิศตะวันออกเฉียงใต้	SE	-56.24 ถึง -33.75
ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออกเฉียง	ESE	-33.74 ถึง -11.25
ทิศตะวันออกเฉียง	E	-11.24 ถึง 11.25
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันออกเฉียง	ENE	11.26 ถึง 33.75
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	NE	33.76 ถึง 56.25
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ	NNE	56.26 ถึง 78.75
ทิศเหนือ	N	78.76 ถึง 101.25
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางเหนือ	NNW	101.26 ถึง 123.75
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	NW	123.76 ถึง 146.25
ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก	WNW	146.26 ถึง 168.75

- **การคำนวณปริมาณน้ำฝน**

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้สำหรับโปรแกรม Hotspot ใช้ค่าที่ได้จากตัวแปร total precipitation ได้เลย โดยพิเศษให้อยู่ในรูปจำนวนเต็มซึ่งค่าดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น mm/h

- **ความเสถียรชั้นบรรยากาศ[40]**

การคำนวณความเสถียรชั้นบรรยากาศ ใช้ตัวแปร ทั้งหมด 3 ชนิด ประกอบไปด้วย total cloud cover, wind speed และ solar elevation โดย total cloud cover และ solar elevation จะถูกใช้สำหรับคำนวณ day incoming solar radiation ตามเงื่อนไขในตารางที่ 9 เมื่อคำนวณเสร็จแล้วค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ร่วมกับ wind speed เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ระดับของความเสถียรของชั้นบรรยากาศตามเงื่อนไขในตารางที่ 10 หลังจากคำนวณค่าความเสถียรบรรยากาศเสร็จสิ้นให้เปลี่ยนจากตัวอักษรภาษาอังกฤษมาเป็นตัวเลข โดย A คือ 1, B คือ 2, C คือ 3, D คือ 4, E คือ 5 และ F คือ 6

ตารางที่ 28 เงื่อนไขสำหรับคำนวณ day incoming solar radiation

Sky Cover (Opaque or Total)	Solar Elevation Angle > 60°	Solar Elevation Angle < 60° but, > 35°	Solar Elevation Angle < 35° but, > 15°
4/8 or less or, Any amount of High Thin Clouds	Strong	Moderate	Slight
5/8 to 7/8 Middle Clouds	Moderate	Slight	Slight
5/8 to 7/8 Low Clouds	Slight	Slight	Slight

ตารางที่ 29 เงื่อนไขสำหรับคำนวณความเสถียรชั้นบรรยากาศ

Surface Wind Measured at 10 m (m / sec.)	Day Incoming Solar Radiation			Night	
	Strong	Moderate	Slight	> 4/8 cloudiness	≤4/8 cloudiness
< 2	A	A-B	B	F	F
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 - 5	B	B-C	C	D	E
5 - 6	C	C-D	D	D	D
6	C	D	D	D	D

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล นาย นรกกานต์ คุณศรีเมฆ

วัน/เดือน/ปีเกิด วันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2536

สถานที่เกิด ร้อยเอ็ด

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์พลังงาน

(เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีพุทธศักราช 2559

ประสบการณ์การทำงาน

เมษายน 2560 – กรกฎาคม 2560 รับการจ้างเหมาจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในโครงการวิจัย การพัฒนาตัวชีวิตหลักและประเมินความยั่งยืนของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย

พฤศจิกายน 2560 – เมษายน 2561 รับการจ้างเหมาจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในโครงการวิจัย การยกระดับความสามารถในการวิจัยของ สทท. เพื่อเป็นผู้นำของเครือข่ายอาเซียนเพื่องานวิจัยด้านความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

ผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่

N. Khunsrimekan , W. Vechgama, S. Rassame, K. Silva. Effects of radionuclide atmosphere dispersion from a hypothetical severe accident at Fangchenggang and Ninh Thuan Nuclear Power Stations to Thailand. ASRAM2017-1012. Yokohama, Japan, November 13-15,2017.