การประเมินความเสี่ยงของการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้ารถขนส่ง

สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
สิงหาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. เล็ก วันทา)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์

.....ประธาน
(ดร. เล็ก วันทา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันเชิง สิทธิกิจโยธิน)

.....กรรมการ
(ดร. เอมม่า อาสนจินดา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)
วันที่ 8 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. เล็ก วันทา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และประธานกรรมการในการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอบกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วันเชิง สิทธิกิจโยธิน และดร. เอมม่า อาสนจินดา กรรมการการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท พีทีที เอนเนอร์ยี่ โซลูชั่นส์ จำกัด ในการอนุเคราะห์โปรแกรมที่ใช้ในการทำแบบจำลองครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตา แด่ บุพการี บูรพาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์

54920431: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม)
คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์/ การประเมินความเสี่ยง

สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์: การประเมินความเสี่ยงของการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (RISK ASSESSMENT OF CO_2 RELEASES IN ROAD TANKER LCO_2 LOADING PROCESS) คณะกรรมการคุมงานนิพนธ์: เล็ก วันทา, Ph.D. 108 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ซึ่งต้องใช้การจำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อพิจารณาระดับความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล ชุมชน สิ่งแวดล้อม และทรัพย์สิน การจำลองสถานการณ์การรั่วไหลใช้โปรแกรม PHAST ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับเพื่อใช้จำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของสารเคมี การจำลองสถานการณ์การรั่วไหลนั้น ทำบนแผนผังจำลองของโรงงาน โดยแบ่งแบบจำลองการรั่วไหลออกเป็นสองแบบ คือ แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ กับแบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ผลการทดลองระบุว่า การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการถ่ายเทนั้น มีระดับความรุนแรงสูงมากเนื่องจากมีอันตรายถึงขั้นทำให้ผู้ที่ได้รับเข้าไปเสียชีวิตได้ และเมื่อพิจารณาร่วมกับโอกาสในการเกิดซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง คือ เกิดขึ้น 1 ครั้งในช่วง 1-5 ปี จึงได้ข้อสรุปว่า ระดับความเสี่ยง อยู่ในระดับ 4 ซึ่งเป็นความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงลงทันที ผลการทดลองยังระบุว่า ระยะปลอดภัยระหว่างจุดที่คาร์บอนไดออกไซด์รั่วไหลกับพนักงานในโรงงานเมื่อพิจารณาทั้งระยะทางในทิศใต้ลมและระยะทางในทิศขวางลม คือ 127.75 เมตรขึ้นไป ซึ่งเป็นระยะทางที่พิจารณาจากสภาวะที่อันตรายที่สุด คือ สภาพอากาศในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที พนักงานจึงจะไม่สูญเสียสติสัมปชัญญะ หรือเสียชีวิต และเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย แต่เป็นระดับความเข้มข้นมากที่สุดที่ยอมรับได้ คือ ระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สภาพอากาศในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที โรงงานควรจะตั้งอยู่ห่างจากชุมชนเป็นระยะทาง 237.06 เมตรขึ้นไป นอกจากนี้พบว่า ความเร็วลมต่ำ มีผลทำให้กลุ่มควันเดินทางไปได้ไกลกว่า และมีลักษณะกว้างกว่า ความเร็วลมสูง อีกทั้งสภาพบรรยากาศตอนกลางคืน มีผลทำให้กลุ่มควันเดินทางไปได้ไกลกว่า และมีลักษณะกว้างกว่าตอนกลางวัน ผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปรับปรุงระบบการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และใช้กำหนดระยะปลอดภัยเพื่อใช้ในแผนฉุกเฉินของโรงงานได้

54920431: MAJOR: CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING;
M.Eng. (CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING)
KEYWORDS: CARBON DIOXIDE/ RISK ASSESSMENT

SAWITA LERTSUPOCHAVANICH: RISK ASSESSMENT OF CO_2 RELEASES IN LCO2 PRODUCTION PLANT. ADVISORY COMMITTEE: LEK WANTHA, Ph.D. 108 P. 2016.

The objective of this study was to carry out risk assessment on liquid carbon dioxide (LCO_2) road tanker loading process taking place at LCO_2 production plant. Consequence modelling was required to determine level of impact to personnel, community, environment, and asset. This study used PHAST which was recommended software for modelling chemical releases. The consequence modelling was conducted on a model of LCO_2 plant under two scenarios, concentration levels that were hazardous to health and concentration levels that were not hazardous to health. The simulation results revealed that a CO_2 release from the road tanker loading process had severe impact as it could result in death from being exposed to CO_2. When likelihood was considered, it showed medium level of likelihood which meant a release incident happened once in 1-5 years. Therefore, the risk level was ranked 4 which was judged unacceptable and the plant must stop operating and must implement process modification to reduce the risk. It was found that a safety distance from the release when considering both downwind and crosswind direction at night atmosphere with the wind speed at 1.5 meters/second was 127.75 meters or more which was far enough to not cause workers unconsciousness or death. Moreover, when considering permissible exposure limit at 5,000 ppm for 8 hours duration at night atmosphere with the wind speed at 1.5 meters/second, the plant should be located at least 237.06 meters away from community. Furthermore, CO_2 cloud travelling in low wind speed and night atmosphere could go further and wider than those travelling in high wind speed and day atmosphere. The results of this study will be subsequently used for modifying LCO_2 tanker loading process and for specifying safety distance in an emergency plan

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของงานนิพนธ์ 1

วัตถุประสงค์ของงานนิพนธ์ 3

ขอบเขตการทำงานนิพนธ์ 4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานนิพนธ์ 4

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

การประเมินความเสี่ยง 5

การทำแบบจำลองผลกระทบจากสารเคมีรั่วไหล 6

การประเมินความเสี่ยงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม 6

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว 8

ถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวบนรถขนส่ง 9

ความเป็นพิษของคาร์บอนไดออกไซด์ 10

แบบจำลองการรั่วไหล 13

แบบจำลองการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา 13

แบบจำลองการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศ 19

แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว 23

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29

3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานนิพนธ์ 34

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานนิพนธ์ 34

สถานที่และกระบวนการผลิตที่ใช้ในงานวิจัย 35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	วิธีดำเนินการวิจัย	35
	กำหนดภาชนะที่เก็บสารด้วยความดัน	35
	กำหนดค่าอินพุทสำหรับภาชนะ	36
	เลือกสถานการณ์จำลอง	38
	กำหนดค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง	38
	กำหนดค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย	41
	ทำการคำนวณการรั่วไหล	41
4	ผลงานนิพนธ์	49
	ผลการจำลองสถานการณ์การรั่วไหล	49
	แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย	49
	สถานการณ์จำลองที่ 1	49
	สถานการณ์จำลองที่ 2	51
	สถานการณ์จำลองที่ 3	52
	สถานการณ์จำลองที่ 4	53
	สถานการณ์จำลองที่ 5	55
	สถานการณ์จำลองที่ 6	56
	แบบจำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย	73
	สถานการณ์จำลองที่ 7	73
	สถานการณ์จำลองที่ 8	75
	สถานการณ์จำลองที่ 9	76
	สถานการณ์จำลองที่ 10	78
	สถานการณ์จำลองที่ 11	79
	สถานการณ์จำลองที่ 12	80
	ผลการศึกษาการจำลองสถานการณ์การรั่วไหล	94
	ผลการประเมินความเสี่ยง	96
	แผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง	101

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลงานนิพนธ์และข้อเสนอแนะ	103
สรุปผลงานนิพนธ์	103
ข้อเสนอแนะ	104
แนวทางการศึกษาต่อ	104
บรรณานุกรม	105
ประวัติย่อของผู้วิจัย	108

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 การจัดระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ 6

2-2 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล 7

2-3 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย 8

2-4 ระดับความเป็นพิษของคาร์บอนไดออกไซด์ 12

3-1 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับสาร 36

3-2 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับ
ลักษณะภูมิประเทศ และขอบกั้นถัง 37

3-3 ค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง 39

3-4 ค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย 41

3-5 สภาพบรรยากาศในโปรแกรมจำลองการรั่วไหล 43

3-6 สภาพบรรยากาศที่ใช้ในการจำลองการรั่วไหล 44

3-7 ความเร็วลมเฉลี่ยของจังหวัดระยอง ปี 2550-2554 45

4-1 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 1 50

4-2 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 2 51

4-3 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 3 53

4-4 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 4 54

4-5 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 5 55

4-6 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 6 57

4-7 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 7 74

4-8 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 8 75

4-9 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 9 77

4-10 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 10 78

4-11 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 11 80

4-12 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 12 81

4-13 ระดับโอกาสในการเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว อยู่ในระดับ 3 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-14 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล……..... 97

4-15 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน……..... 97

4-16 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม……..... 98

4-17 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน……..... 98

4-18 การจัดระดับความรุนแรงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย 99

4-19 การจัดระดับความรุนแรงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย 99

4-20 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย 100

4-21 การจัดระดับความเสี่ยงอันตรายของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว 101

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 รูปแบบทั่วไปของถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวบนรถขนส่ง 10

2-2 แบบจำลองท่อสั้น และการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศของสารที่รั่วไหลอย่างต่อเนื่องออกจากรูรั่วหรือทางออกของท่อ 14

2-3 รูปทรงเรขาคณิตของกลุ่มควันที่เกิดจากการรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง 24

2-4 การระเหยของหยดของเหลว และการตกลงพื้น 26

2-5 การรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา 28

3-1 ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของโปรแกรม PHAST 35

3-2 กำหนดภาชนะที่เก็บสารด้วยความดัน บนแผนผังจำลองของโรงงาน 36

3-3 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับสาร 37

3-4 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ และขอบกั้นถัง 38

3-5 ค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง 40

3-6 ค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย 41

3-7 ปุ่มคำนวณการรั่วไหล 42

3-8 ปุ่มจำลองรูปร่างของกลุ่มควัน 42

3-9 การเลือกสภาพบรรยากาศที่ใช้ในการจำลองการรั่วไหล 44

3-10 ใส่ความเข้มข้นที่แสดงในผลการจำลองการรั่วไหล 46

3-11 ลักษณะของกลุ่มควันในมุมมองด้านบน ตามระดับความเข้มข้นที่เลือกไว้ คือ กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) แสดงบนแผนผังจำลองของโรงงาน 46

3-12 ปุ่มแสดงการจำลองการรั่วไหลลงบนกราฟ 47

3-13 ความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง 48

3-14 มุมมองด้านข้างของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-1 ภาพมุมมองด้านบนก่อนการรั่วไหล 58

4-2 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 1 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 59

4-3 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 2 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 59

4-4 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 3 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 60

4-5 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 4 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 61

4-6 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 5 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 62

4-7 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 6 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-8 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางวัน 63

4-9 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางคืน 64

4-10 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 1 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 65

4-11 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 2 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 66

4-12 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 3 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 66

4-13 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 4 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 68

4-14 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 5 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 68

4-15 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 6 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 69

4-16 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 1 ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-17 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 2 ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 70

4-18 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 3 ในตอนกลางวันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 71

4-19 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 4 ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 72

4-20 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 5 ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 72

4-21 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 6 ในตอนกลางคืนที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-22 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 7 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 83

4-23 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 8 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 84

4-24 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 9 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 85

4-25 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 10 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 86

4-26 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 11 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 87

4-27 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 12 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-28 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางวัน 89

4-29 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางคืน 90

4-30 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 7 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 91

4-31 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 8 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 91

4-32 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 9 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 92

4-33 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 10 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที 93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-34 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 11 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที 93

4-35 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 12 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 94

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของงานนิพนธ์

การประเมินความเสี่ยงในโรงงานอุตสาหกรรม หมายถึง กระบวนการวิเคราะห์ถึงปัจจัยหรือสภาพการณ์ต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้อันตรายที่มีและที่แอบแฝงอยู่ ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ และอาจก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การเกิดเพลิงไหม้ การระเบิด การรั่วไหลของสารเคมีหรือวัตถุอันตราย เป็นต้น โดยพิจารณาถึงโอกาสและความรุนแรงของเหตุการณ์เหล่านั้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายแก่ชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2543)

ทั้งนี้ เจ้าของโรงงานอุตสาหกรรม อาจเน้นการทำประเมินความเสี่ยงเฉพาะกับอันตรายที่เห็นอย่างชัดเจน เช่น การรั่วไหลของสารเคมีที่เป็นพิษ และสารไวไฟ แต่สำหรับสารที่คนทั่วไปมักจะคิดว่าไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีอยู่ในอากาศอยู่แล้ว อาจจะถูกมองข้ามไป

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง บรรจุในน้ำอัดลม เป็นส่วนประกอบในก๊าซเอ็นจีวี การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในปริมาณความเข้มข้นน้อย จะไม่มีผลต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในโรงงานผลิตหรือชุมชนใกล้เคียง แต่อย่างไรก็ตาม การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในปริมาณความเข้มข้นที่สูง อาจทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ ดังนั้น กระบวนการผลิต การจัดเก็บ การถ่ายเท และการขนส่ง จึงต้องมีการออกแบบกระบวนการอย่างปลอดภัยมากเพียงพอ

กระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ทั้งในกระบวนการผลิต การจัดเก็บ การถ่ายเท และการขนส่ง จะต้องมีความปลอดภัยเป็นอย่างมาก การควบคุมความปลอดภัยในกระบวนการผลิตและการจัดเก็บ มีการออกแบบกระบวนการซึ่งประกอบไปด้วยภาคควบคุมกระบวนการ และภาคควบคุมความปลอดภัย อุปกรณ์ในภาคควบคุมความปลอดภัยมีหน้าที่ป้องกันเหตุการณ์อันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แรงดันหรืออุณหภูมิในระบบที่สูงเกินกว่าค่าปกติ ปริมาณก๊าซออกซิเจนในกระบวนการเผาสูงเกินกว่าค่าปกติ หรือแรงดันและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในถังเก็บ สูงเกินกว่าค่าปกติ โดยทางโรงงานมีการตรวจสอบการทำงานของภาคควบคุมความปลอดภัยอย่างสม่ำเสมอ เพื่อควบคุมหรือออกแบบการผลิตและการจัดเก็บให้ปลอดภัย

การขนส่งเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญที่ต้องให้ความสนใจในเรื่องความปลอดภัยเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง คือ การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากรถขนส่งในระหว่างการขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากโรงงานผลิตไปยังโรงงานลูกค้า ยกตัวอย่างเช่น ข่าวจากเมเนเจอร์ออนไลน์เมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2554 ได้เกิดอุบัติเหตุคาร์บอนไดออกไซด์รั่วไหลจากรถขนส่งของบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่บริเวณถนนสายข้างทางต่างระดับเข้านิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง หมู่ 3 ต. ทุ่งศุขลา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี โดยอุบัติเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากวาล์วที่ปิดข้างถังบนรถนั้นชำรุด จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่บรรทุกมารั่วไหลออกมารอบ ๆ บริเวณรถ เจ้าหน้าที่ตำรวจต้องทำการปิดถนน โดยให้รถที่จะเข้านิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง ไปใช้เส้นทางอื่นเนื่องจากเกรงว่าจะเป็นอันตราย (เมเนเจอร์ออนไลน์, 2554)

ในปี 1996 ที่รัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พนักงานขับรถขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เกิดการหมดสติในระหว่างเติมคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากรถขนส่งไปยังถังเก็บในร้านอาหาร จุดที่เติมอยู่ตรงบริเวณบันไดที่ลงไปยังชั้นใต้ดินของร้านอาหาร พนักงานของร้านอาหารไปพบเขานอนหมดสติอยู่หลังจากเขาเข้ามาเติมได้ประมาณ 1 ชั่วโมง และได้โทรเรียกตำรวจ ทีมช่วยเหลือเข้าช่วยเหลือพร้อมด้วยถังอากาศสะพายหลังและหน้ากาก และพบว่าเขาเสียชีวิตแล้ว จากการสืบสวนหาสาเหตุพบว่า มีการขันสายเติมไม่แน่น จึงทำให้เกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ตรงจุดต่อระหว่างสายเติมของรถ กับสายเติมของถังเก็บที่ร้านอาหาร ประกอบกับ บริเวณจุดที่เติมนั้นเป็นจุดที่อากาศไม่ถ่ายเท จึงทำให้พนักงานขับรถได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับความเข้มข้นสูง ทำให้เสียชีวิต (OSHA, 1996)

นอกจากนี้ กระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่งมีโอกาสเกิดการรั่วไหลได้สูงมาก เนื่องจากในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในบางประเทศ ยังใช้คนในกระบวนการถ่ายเท ทุกขั้นตอนกระทำโดยพนักงานขับรถที่ผ่านการอบรม ซึ่งเป็นผู้ดำเนินการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง ตลอดจนขับรถขนส่งไปส่งยังโรงงานผู้ซื้อ โดยปราศจากภาคควบคุมกระบวนการ และภาคควบคุมความปลอดภัยแบบอัตโนมัติ ตามที่มาตรฐานสากลกำหนดไว้ ดังเช่น เหตุการณ์การรั่วไหลที่บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) ต. มาบตาพุด อ. เมือง จ. ระยอง ในเดือนมีนาคม ปี 2555 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากพนักงานขับรถได้เดินออกจากบริเวณเติม เพื่อไปคุยโทรศัพท์ ทำให้เกิดอุบัติเหตุคาร์บอนไดออกไซด์เหลวล้นถัง จากเหตุการณ์ดังกล่าว ทำให้พนักงานขับรถคนนั้นเกือบหมดสติ

การประเมินความเสี่ยงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจึงมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางให้ผู้ที่เกี่ยวข้อง ตระหนักถึงความรุนแรงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงมีงานวิจัยในประเทศอังกฤษ ที่ทำการจำลองเหตุการณ์การรั่วไหลของ

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage) หรือ CCS โดยใช้โปรแกรม IRATE/DRIFT และ โปรแกรม PHAST 6.6 เพื่อประเมินระยะทางที่เป็นอันตรายต่อชีวิต หากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในประมาณมาก ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับให้ใช้กันโดยกว้างขวาง (Harper, 2011)

งานนิพนธ์นี้มุ่งศึกษาการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่งที่ดำเนินการโดยพนักงานขับรถ ซึ่งพบว่าไม่มีงานวิจัยในต่างประเทศที่จำลองสถานการณ์เดียวกัน เนื่องจาก การออกแบบการเติมในต่างประเทศนั้นมีมาตรฐานสูงกว่า โดยที่การหยุดการเติมดำเนินการโดยระบบอัตโนมัติ จึงมีความปลอดภัยและเชื่อถือได้มากกว่าดำเนินการโดยคน นอกจากนี้งานวิจัยในต่างประเทศนั้นมักจะให้ความสำคัญกับการจำลองสถานการณ์ที่มีผลกระทบรุนแรงมาก และกระทบกับพื้นที่ในวงกว้าง เช่น การจำลองการรั่วไหลจากท่อส่งคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ และยาวหลายกิโลเมตร (Willday, McGillivray, Harper & Wardman, 2009) ซึ่งจะติดตั้งห่างจากชุมชนอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นจะต้องจำลองการรั่วไหลจากรูรั่วเล็ก ๆ หรือ ท่อขนาดเล็ก

ระดับความเสี่ยงที่ได้จากการประเมินความเสี่ยงในงานนิพนธ์นี้ จะนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความเสี่ยงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประเมินว่าความเสี่ยงที่มีอยู่นั้น อยู่ในระดับที่สูงเกินกว่าเกณฑ์หรือไม่ และจะมีวิธีลดความเสี่ยงอย่างไร

วัตถุประสงค์ของงานนิพนธ์

1. เพื่อประเมินความเสี่ยงในกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง
2. เพื่อเสนอแผนงานลดความเสี่ยง และแผนงานควบคุมความเสี่ยง ที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการปรับปรุงทางด้านความปลอดภัยให้ดียิ่งขึ้น
3. เพื่อหาระยะที่ปลอดภัย สำหรับพนักงานในโรงงานที่จะออกห่างจากจุดเกิดเหตุให้เร็วที่สุด
4. เพื่อหาระยะที่ปลอดภัย ระหว่างโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวกับชุมชน

ขอบเขตการทำงานนิพนธ์

1. ข้อมูลโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุ เป็นข้อมูลที่ได้จากประวัติการเกิดอุบัติเหตุการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในประเทศไทย ตั้งแต่พบว่ามีรายงานข่าวออกไปยังสาธารณะครั้งแรกในปี 2554 จนถึงปัจจุบันในปี 2559 เป็นระยะเวลา 5 ปี

2. จำลองความรุนแรงของอุบัติเหตุโดยใช้โปรแกรม PHAST 7.11 ของบริษัท พีทีที เอนเนอร์ยี่ โซลูชันส์ จำกัด

3. ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ใช้เกณฑ์ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา และฝ่ายบริหารด้านสุขภาพและความปลอดภัยของสหราชอาณาจักร

4. ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ใช้เกณฑ์ของกระทรวงอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ประเทศสหรัฐอเมริกา

5. ความเร็วลมใช้ที่ 1.5-5 เมตรต่อวินาที

6. การประเมินความเสี่ยงใช้เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานนิพนธ์

1. ทราบถึงระดับความเสี่ยงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง

2. มาตรการควบคุมและลดความเสี่ยงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างถูกต้องและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

3. สามารถใช้เป็นข้อกำหนดในการหาระยะที่ปลอดภัย สำหรับพนักงานในโรงงานที่จะออกห่างจากจุดเกิดเหตุให้เร็วที่สุด

4. สามารถใช้เป็นข้อกำหนดในการหาระยะที่ปลอดภัยจากโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวไปยังชุมชน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยง หมายถึง การวิเคราะห์และจัดลำดับความเสี่ยงโดยพิจารณาจากการประเมินจากโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง และความรุนแรงของผลกระทบจากเหตุการณ์ความเสี่ยง ซึ่งมีวิธีการดังนี้ (CCPS, 2000)

1. ให้คำจำกัดความ กำหนดว่าจะทำการประเมินความเสี่ยงที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือสิ่งที่ติดตั้งสิ่งใด และกิจกรรมที่ทำคืออะไร

2. ระบุอันตราย (Hazard identification) โดยพิจารณาถึงเหตุการณ์ใดบ้างที่จะก่อให้เกิดการรั่วไหล เพลิงไหม้ หรือการระเบิด

3. วิเคราะห์ความถี่ หรือโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ (Frequency analysis) โดยหาข้อมูลเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้น หรือจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ เพื่อประเมินแนวโน้มที่จะเกิดอุบัติเหตุ

4. ทำแบบจำลองผลกระทบ (Consequence modelling) ทำแบบจำลองการรั่วไหล เพลิงไหม้ หรือการระเบิด และผลกระทบต่อมนุษย์ อุปกรณ์ อาคาร สิ่งที่ติดตั้ง โดยใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองขึ้นมา

5. คำนวณความเสี่ยง (Risk calculation) เมื่อประเมินความถี่และผลกระทบของแต่ละเหตุการณ์แล้ว จะสามารถคำนวณความเสี่ยงได้

6. ประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) โดยการนำระดับความเสี่ยงที่ได้มาประเมินความเสี่ยงว่าอยู่ในช่วงที่ ยอมรับได้ ยอมรับไม่ได้ โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์การประเมินความเสี่ยง

7. ลดระดับความเสี่ยง (Risk mitigation) หากความเสี่ยงอยู่ในช่วงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องดำเนินมาตรการลดความเสี่ยง โดยการเพิ่ม เปลี่ยน หรือปรับปรุงอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต หรือเพิ่มมาตรการป้องกันการทำงานผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน แล้วต้องทำการคำนวณใหม่จนกระทั่งความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การทำแบบจำลองผลกระทบจากสารเคมีรั่วไหล

สมาคมผู้ผลิตน้ำมันและก๊าซนานาชาติ หรือ OGP ได้กล่าวถึงการทำแบบจำลองผลกระทบไว้ว่า เป็นการคำนวณค่าเชิงตัวเลข ที่อธิบายถึงผลกระทบทางกายภาพที่เชื่อถือได้ของเหตุการณ์การรั่วไหลของสาร ซึ่งสารนั้นอาจมีความไวไฟ หรือ มีความเป็นพิษ และผลกระทบนั้นอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งการทำแบบจำลองผลกระทบ สมาคมผู้ผลิตน้ำมันและก๊าซนานาชาติได้แนะนำให้ใช้ซอฟท์แวร์ เช่น CANARY ของบริษัท Quest ซอฟท์แวร์ EFFECTS ของบริษัท TNO ซอฟท์แวร์ PHAST ของบริษัท DNV ซอฟท์แวร์ TRACE ของบริษัท Safer systems ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์ที่พัฒนามายาวนานและมีระบบการจัดการคุณภาพที่ดี จากองค์กรที่มีชื่อเสียงด้านการทำซอฟท์แวร์ที่ใช้จำลองผลกระทบจากสารเคมีรั่วไหล (The International association of oil & gas producers, 2016)

การประเมินความเสี่ยงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

การจัดระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2-1 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2543)

ตารางที่ 2-1 การจัดระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ

ระดับ	รายละเอียด
1	มีโอกาสในการเกิดยาก เช่น ไม่เคยเกิดเลยในช่วงเวลาตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป
2	มีโอกาสในการเกิดน้อย เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดขึ้น 1 ครั้ง ในช่วง 5-10 ปี
3	มีโอกาสในการเกิดปานกลาง เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดขึ้น 1 ครั้ง ในช่วง 1-5 ปี
4	มีโอกาสในการเกิดสูง เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดมากกว่า 1 ครั้ง ใน 1 ปี

การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	มีการบาดเจ็บเล็กน้อยในระดับปฐมพยาบาล
2	ปานกลาง	มีการบาดเจ็บที่ต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์
3	สูง	มีการบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยที่รุนแรง
4	สูงมาก	ทุพลภาพหรือเสียชีวิต

ระดับความรุนแรงเล็กน้อย ที่มีการบาดเจ็บเล็กน้อยในระดับปฐมพยาบาล เช่น ถลอก ช้ำ บวม มีบาดแผลเล็กที่ไม่ต้องเย็บ เป็นลม ระดับความรุนแรงปานกลาง ที่มีการบาดเจ็บที่ต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์ เช่น บาดแผลที่ต้องเย็บ คลื่นไส้ อาเจียน จากการได้รับสารพิษ ซึ่งต้องเข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล หากการรักษาที่โรงพยาบาลใช้เวลารักษาเกิน 21 วัน จะจัดอยู่ในระดับความรุนแรงสูง ส่วนระดับความรุนแรงสูงมาก คือ บาดเจ็บจนถึงขั้นทุพลภาพ เช่น การสูญเสียอวัยวะหรือสูญเสียสมรรถภาพของอวัยวะหรือของร่างกาย หรือเสียชีวิต สำหรับการจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน สิ่งแวดล้อม และทรัพย์สิน จะกล่าวถึงในบทที่ 4

การจัดระดับความเสี่ยง จัดเป็น 4 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2-3 จากตารางจะเห็นว่าค่าผลลัพธ์ คือ ค่าที่ได้จากผลคูณของ ระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ กับระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ หากผลลัพธ์เท่ากับ 1-2 จะเป็นระดับความเสี่ยงระดับที่ 1 ซึ่งเป็นความเสี่ยงเล็กน้อย หากผลลัพธ์เท่ากับ 3-6 จะเป็นระดับความเสี่ยงระดับที่ 2 ซึ่งเป็นความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ต้องมีการทบทวนมาตรการควบคุม หากผลลัพธ์เท่ากับ 8-9 จะเป็นระดับความเสี่ยงระดับที่ 3 ซึ่งเป็นความเสี่ยงสูง ต้องมีการดำเนินงานเพื่อลดความเสี่ยง และหากผลลัพธ์เท่ากับ 12-16 จะเป็นระดับความเสี่ยงระดับที่ 4 ซึ่งเป็นความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงลงทันที

ตารางที่ 2-3 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย

ระดับ	ผลลัพธ์	รายละเอียด
1	1-2	ความเสี่ยงเล็กน้อย
2	3-6	ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ต้องมีการทบทวนมาตรการควบคุม
3	8-9	ความเสี่ยงสูง ต้องมีการดำเนินงานเพื่อลดความเสี่ยง
4	12-16	ความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไข เพื่อลดความเสี่ยงลงทันที

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกทำให้อยู่ในสภาพของเหลวได้ด้วยความดันสูงกว่า 5.1 บรรยากาศ ลักษณะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ มวลโมเลกุลเท่ากับ 44 กรัมต่อโมล ความดันไอ 5,730 กิโลปาสคาล มีจุดเดือดอยู่ที่ -78.5 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดระเหิดอยู่ที่ -78.5 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ ส่วนที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวอยู่ที่ประมาณ 1,077 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การทำงานกับคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ผู้ปฏิบัติงานจะต้องสวมใส่ถุงมือที่เป็นฉนวนเพื่อป้องกันการถูกกัดด้วยความเย็น

หากมีการรั่วไหลที่ความดันบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจะสะสมที่พื้นเพราะมีคุณสมบัติหนักกว่าอากาศ มีความหนาแน่น 1.8714 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 1.013 บาร์

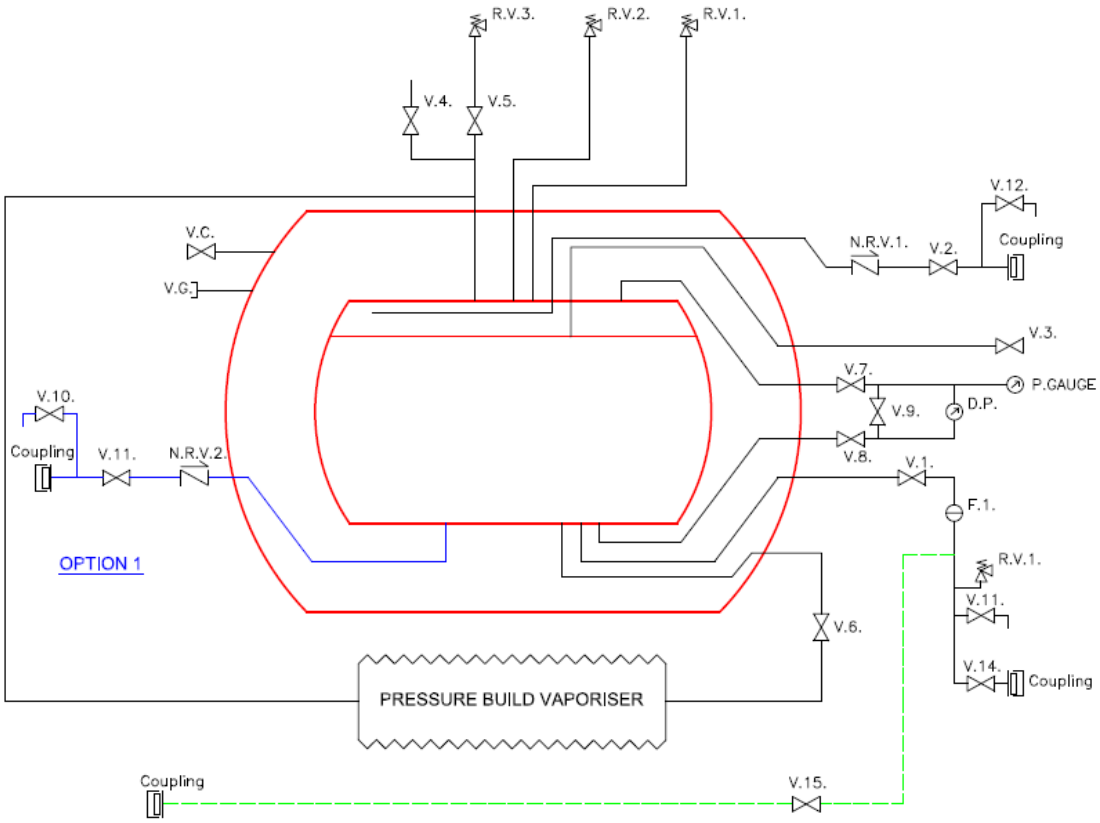
ในอุตสาหกรรมอาหาร คาร์บอนไดออกไซด์เหลว ถูกนำมาใช้เป็นสารหลักเพื่อทำความเย็นอย่างรวดเร็ว ในการทำความเย็น และการแช่แข็งอาหาร เพื่อคงรสชาติ ความสด และลักษณะของอาหาร โดยการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง และยังเป็นส่วนผสมที่สำคัญในเครื่องดื่ม เช่น น้ำอัดลม โซดา (Praxair, 2015)

ถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวบนรถขนส่ง

เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกริยากับน้ำ จะกลายเป็นกรดคาร์บอนิคทำให้สามารถกัดกร่อนผิวของวัสดุที่ใช้สำหรับทำถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำเป็นถังเก็บ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แต่เนื่องจากมีราคาแพง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุชั้นใน และใช้เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) หุ้มด้านนอก

รูปแบบถังเก็บ นิยมใช้ทั้งแบบทรงลูกปืนแนวนอน ทรงกระบอกแนวตั้ง และถังเก็บทรงกลม ขึ้นอยู่กับความจุของถังที่ต้องการ ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ถังเก็บทรงกลมมีความจุได้ถึง 2,000 ตัน และถังเก็บทรงลูกปืนแนวนอนมีความจุได้ถึง 500 ตัน ส่วนในโรงงานลูกค้าที่ต้องการนำคาร์บอนไดออกไซด์เหลวไปใช้ในอุตสาหกรรม มักจะติดตั้งถังเก็บทรงลูกปืนแนวนอนและถังเก็บทรงกระบอกแนวตั้ง ซึ่งมีความจุตั้งแต่ 6-120 ตัน การติดตั้งถังเก็บจะต้องมีการหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน เพื่อรักษาความเย็นภายในถังและไม่ให้ภายนอกถังเกิดน้ำแข็งเกาะ การเก็บรักษาคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จะเก็บที่อุณภูมิในช่วง -28.9 ถึง -15.6 องศาเซลเซียส ที่ความดันเกจในช่วง 200-312 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 13.6-21.2 บรรยากาศ (Praxair technology, 2009)

เพื่อความปลอดภัยของถังเก็บที่อยู่บนรถขนส่ง การติดตั้งวาล์วบนถังเก็บ จะต้องมีวาล์วนิรภัยเพื่อป้องกันความดันภายในถังสูงเกินไป และมีวาล์วล้นบนถังเก็บ เพื่อป้องกันการถ่ายเทสารเข้าไปจนล้นถัง ดังแสดงในภาพที่ 2-1 จากภาพ แสดงให้เห็นวาล์วนิรภัย R.V.1, R.V.2, R.V.3 และวาล์วล้น V.3 (Wessingtoncryogenics, 2016)



ภาพที่ 2-1 รูปแบบทั่วไปของถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวบนรถขนส่ง (Wessingtoncryogenics, 2016)

ความเป็นพิษของคาร์บอนไดออกไซด์

ในสภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศสูง ผู้ที่หายใจเข้าสู่ร่างกายจะมีอาการตั้งแต่ปวดศีรษะ หายใจถี่ วิงเวียน หูอื้อ ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นแรง คลื่นไส้ ไปจนถึงสูญเสียสติสัมปชัญญะ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดผ่านทางปอด ผู้ที่หายใจเข้าไปจะยังไม่แสดงอาการจนกระทั่งปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นจนแทนที่ออกซิเจนในอากาศ ภาวะการขาดออกซิเจนในสภาพอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์จะทำให้มีอาการปวดเมื่อย ปวดศีรษะ สับสน ตาพร่า คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ สมองถูกทำลาย และเสียชีวิตในที่สุด

คู่มือคำเตือนเพื่อความปลอดภัยของคาร์บอนไดออกไซด์ ของบริษัท แพรกซ์แอร์ เทคโนโลยี (Praxair technology, 2009) ระบุว่า เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง เกิดอันตรายขึ้น กระทรวงอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational safety and health administration หรือ OSHA) และ

การประชุมของนักสุขอนามัยอุตสาหกรรมของรัฐบาลอเมริกา (American conference of governmental industrial hygienists หรือ ACGIH) จึงได้กำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย (Permissible exposure limit หรือ PEL) หรือเรียกอีกอย่างว่า ระดับค่าที่เป็นขีดจำกัด (Threshold limit value หรือ TLV) ไว้ที่ 5,000 ส่วนในล้านส่วน (0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในอากาศ) ในเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน นอกจากนี้ สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (The national institute for occupational safety and health หรือ NIOSH) ได้กำหนดขีดจำกัดของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายระยะสั้น (Short term exposure limit หรือ STEL) ไว้ที่ 30,000 ส่วนในล้านส่วน (3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในอากาศ) ในเวลา 15 นาที และกำหนดความเข้มข้นระดับที่เป็นอันตรายทันทีต่อชีวิตหรือสุขภาพ (Immediately dangerous to life or health concentrations หรือ IDLH) ไว้ที่ 40,000 ส่วนในล้านส่วน (4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในอากาศ) ในเวลา 30 นาที

ฝ่ายบริหารด้านสุขภาพและความปลอดภัยของสหราชอาณาจักร (Health and safety executive หรือ HSE) กำหนดความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และระยะเวลาที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย หรือที่เรียกว่าระดับที่กำหนดความเป็นพิษ (Specified level of toxicity หรือตัวย่อ SLOT) ซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพดังนี้ (HSE, 2016)

1. เกิดการรบกวนอย่างรุนแรงกับประชากรในบริเวณที่เกิดเหตุรั่วไหล
2. ประชากรจำนวนมากที่สูดดมเข้าไปจำเป็นต้องได้รับความช่วยเหลือทางการแพทย์
3. ประชากรบางส่วนได้รับบาดเจ็บร้ายแรง จำเป็นต้องได้รับการรักษาอย่างยาวนาน
4. ประชากรที่ร่างกายอ่อนแออาจจะเสียชีวิต มีแนวโน้มที่ทำให้ 1-5 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มตัวอย่างเสียชีวิตจากการสูดดมเพียงครั้งเดียว ในความเข้มข้นและระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้การกำหนดค่า SLOT ขึ้นก็เพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนไดออกไซด์นำไปใช้ในการประเมินความเสี่ยง

สรุประดับความเป็นพิษของคาร์บอนไดออกไซด์ จากแหล่งอ้างอิงที่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ระดับความเป็นพิษของคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้น (ส่วนในล้านส่วน)	ระยะเวลาที่ได้รับ (นาที)	อาการ	หมายเหตุ	หน่วยงาน
250-350			ระดับปกติกลางแจ้ง	
350-1,000			ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	
5,000	480 (8 ชั่วโมง)	ง่วงนอน, กระตุ้น การหายใจ	Permissible exposure limit (PEL) Recommended exposure limit (REL) Threshold limit value (TLV)	OSHA NIOSH ACGIH
30,000	15	มีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง (สูญเสียสติสัมปชัญญะ) กระตุ้น การหายใจ	Short term exposure limit (STEL)	NIOSH
40,000	30	มีลักษณะแสดงอาการเป็นพิษ	Immediately dangerous to life or health concentrations (IDLH)	NIOSH
69,000	30	เสียชีวิต	Specified level of toxicity 1-5% fatality (SLOT)	HSE

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

ความเข้มข้น (ส่วนในล้านส่วน)	ระยะเวลาที่ได้รับ (นาที)	อาการ	หมายเหตุ	หน่วยงาน
72,000	20	เสียชีวิต	Specified level of toxicity 1-5% fatality (SLOT)	HSE
79,000	10	เสียชีวิต	Specified level of toxicity 1-5% fatality (SLOT)	HSE
86,000	5	เสียชีวิต	Specified level of toxicity 1-5% fatality (SLOT)	HSE
10,5000	1	เสียชีวิต	Specified level of toxicity 1-5% fatality (SLOT)	HSE

แบบจำลองการรั่วไหล

แบบจำลองการรั่วไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม PHAST 7.11 ซึ่งต้องใช้ประกอบกันทั้งหมด 3 แบบจำลอง คือ (DNV SOFTWARE, 2012 a)

1. แบบจำลองการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady-state or non-time varying discharge model)

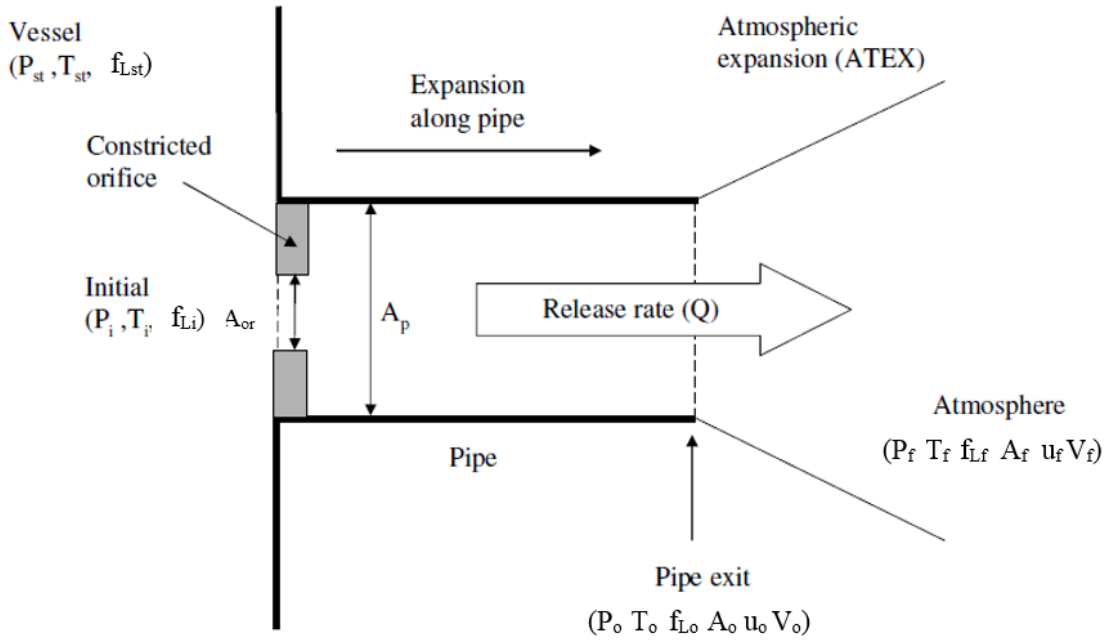
เนื่องจากการเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เป็นการเก็บในสถานะของเหลวในถังเก็บด้วยความดัน 230 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การรั่วไหลที่จุดที่อยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวจึงเป็นการรั่วไหลแบบเย็นที่ความดันสูง (High pressure cold release) ความดันในถังถูกรักษาไว้โดยการทำความดันให้เท่ากับถังเก็บลูกอื่น ๆ ผ่านทางท่อก๊าซ หรือเรียกว่าการปรับระดับความดัน (Balance pressure) เมื่อเกิดการรั่วไหลจากถังเก็บเองก็ดี หรือการรั่วไหลจากท่อที่ต่อกับถังเก็บก็ดี จะไม่ทำให้สภาพในถังเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้แบบจำลองการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาได้ ซึ่งมีด้วยกัน 4 แบบจำลองย่อย คือ 1) แบบจำลองการรั่วไหลอย่างต่อเนื่องจากรูรั่วบนถังเก็บ (Orifice model)

2) แบบจำลองการรั่วไหลอย่างต่อเนื่องจากท่อสั้นที่ต่อกับถังเก็บ (Pipe model) ซึ่งรวมถึงการรั่วไหลจากวาล์วนิรภัย (Safety valve) หรือฝาครอบปะทุ (Rupture disc) 3) แบบจำลองการรั่วไหลซึ่งเกิดขึ้นหลังจากถังเก็บแตกออกทั้งลูก (Instantaneous model) 4) แบบจำลองการรั่วไหลจากการระบายไอของสารในส่วนที่เป็นไอในถังเก็บในระหว่างการเติม (Vent from vapour space model)

ในงานวิจัยนี้ ได้จำลองเหตุการณ์การรั่วไหลจากท่อล้นของรถขนส่ง จึงได้เลือกใช้แบบจำลองที่ 2 คือ แบบจำลองการรั่วไหลอย่างต่อเนื่องจากท่อสั้นที่ต่อกับถังเก็บ ซึ่งมีทฤษฎีดังนี้

1.1 ทฤษฎีของแบบจำลอง (Model theory)

แบบจำลองของท่อสั้นและการรั่วไหลจากท่อสั้นที่ติดอยู่กับถังเก็บ แสดงดังในภาพที่ 2-2 ระหว่างถังเก็บกับท่อ มีรูเปิด (Constriced orifice) ที่มีพื้นที่หน้าตัด A_{or} อยู่ ซึ่งน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A_p) การขยายตัวของสารตั้งแต่ทางออกของท่อไปยังสภาวะอากาศโดยรอบจะถูกจำลองด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า แบบจำลองการขยายตัวที่สภาวะอากาศ (Atmospheric expansion: ATEX model)



ภาพที่ 2-2 แบบจำลองท่อสั้น และการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศของสารที่รั่วไหลอย่างต่อเนื่องออกจากรูรั่วหรือทางออกของท่อ (DNV SOFTWARE, 2012 a)

1.2 ค่าอินพุทของแบบจำลองท่อสั้น มีดังนี้

1.2.1 ข้อมูลของถังเก็บ คือ ความดันในถังเก็บ P_{st} (ปาสคาล) อุณหภูมิในถังเก็บ T_{st} (เคลวิน) อัตราส่วนของของเหลว f_{Lst} (เปอร์เซ็นต์) มวลของของเหลว (กิโลกรัม)

1.2.2 ข้อมูลของท่อ คือ พื้นที่หน้าตัดตรงทางเข้าของท่อ A_{or} (ตารางเมตร) พื้นที่หน้าตัดของท่อ A_p (ตารางเมตร) ความขรุขระของพื้นผิวท่อ e (เมตร) ความยาวท่อ L_p (เมตร) ระดับความสูงของเครื่องสูบ ΔH_p (เมตร)

1.2.3 จำนวนวาล์ว ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ วาล์วตัดเมื่ออัตราการไหลเกินกว่าปกติ (Excess flow valve) วาล์วกันการไหลย้อนกลับ (Non-return valve) วาล์วปิด (Shut-off valve) (หน่วยเป็นต่อเมตร) และปริมาณการสูญเสียความเร็วของวาล์วทั้ง 3 ประเภท (Velocity head loss)

1.2.4 อุปกรณ์ที่ติดกับท่อ (Fitting) คือ จำนวนของข้อต่อ (Coupling) ท่อแยก (Junction) ท่อโค้ง (Bend) (หน่วยเป็นต่อเมตร)

1.2.5 ข้อมูลบรรยากาศ คือ ความดันบรรยากาศ P_a (ปาสคาล) อุณหภูมิบรรยากาศ T_a (เคลวิน) ความชื้นสัมพัทธ์ r_h (เปอร์เซ็นต์)

1.3 หลังจากการคำนวณค่าอินพุท โดยใช้แบบจำลองท่อสั้นแล้ว จะได้ค่าเอาท์พุทดังนี้

1.3.1 สภาวะที่ทางออกของท่อ คือ ความดัน P_o (ปาสคาล) อุณหภูมิ T_o (เคลวิน) อัตราส่วนของของเหลว f_{Lo} (เนื่องจากในตอนรั่วไหลนั้น สารที่รั่วไหลไม่ได้กลายเป็นก๊าซทั้งหมดในทันที มีบางส่วนยังเป็นของเหลวและรวมอยู่ในกลุ่มควันที่แพร่ไปในอากาศ อัตราส่วนของของเหลวจึงหมายถึงอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ ของกลุ่มควันที่แพร่กระจายไปในอากาศ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

1.3.2 อัตราการรั่วไหลเชิงมวล Q (กิโลกรัมต่อวินาที)

1.3.3 ความเร็วที่ทางออกของท่อ u_o (เมตรต่อวินาที)

1.3.4 สัมประสิทธิ์การรั่วไหล C_D (ไม่มีหน่วย)

1.4 แบบจำลองท่อสั้นนี้ มีการสมมติค่าดังนี้

1.4.1 สภาวะของสารที่ทางเข้าของท่อ มีค่าเท่ากันกับในถังเก็บ (ความดันในถังเก็บ P_{st} อุณหภูมิในถังเก็บ T_{st} อัตราส่วนของของเหลว f_{Lst})

1.4.2 ใช้หลักการอนุรักษ์มวลตลอดแนวท่อ

1.4.3 ใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานตลอดแนวท่อ โดยที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านทางผนังท่อ

1.4.4 ใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมตลอดแนวท่อ

1.4.5 พื้นที่หน้าตัดของท่อคงที่ตลอดแนวท่อ

1.4.6 แนวการไหล ขนานไปกับท่อตลอดจนทางออกของท่อดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการรั่วไหล (Discharge coefficient: $C_D > 1$)

1.5 สถานการณ์จำลอง (Scenario)

แบบจำลองของท่อสั้นใช้ได้กับสถานการณ์จำลอง 3 สถานการณ์ คือ 1) การแตกหักของท่อ (Line rupture) ตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (Full-bore rupture) 2) การปล่อยออกจากวาล์วนิรภัย 3) การแตกออกของฝาครอบปะทุ ซึ่งในที่นี้ สถานการณ์จำลอง คือ การล้นออกมาจากท่อล้นของรถขนส่งผ่านทางท่อขนาด 2 นิ้ว จึงสามารถใช้สถานการณ์เดียวกันกับการแตกหักของท่อตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางได้

การรั่วไหลจากถังบรรจุผ่านทางท่อที่แตกหักตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น รูเปิดที่ทางเข้าของท่อจึงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ($A_{or} = A_p$) และในสถานการณ์นี้มีเครื่องสูบติดตั้งอยู่ก่อนทางเข้าของท่อด้วย จึงมีระดับความสูงของเครื่องสูบ (Pump head: ΔH_p) เป็นค่าอินพุทด้วย

1.6 การพัฒนาแบบจำลอง (Model development)

สำหรับการรั่วไหลของของเหลว ความดันในถังเก็บถูกทำให้เพิ่มสูงขึ้นโดยรวมค่าระดับความสูงทั้งหมดด้วย คือ ระดับความสูงของของเหลวในถังเก็บ (Liquid head: ΔH_L) และระดับความสูงของเครื่องสูบ (Pump head: ΔH_p) เรียกรวมว่าค่า ΔH ($\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_p$) ส่วนอุณหภูมิในถังเก็บนั้นเป็นอุณหภูมิคงที่ จากนั้นแบบจำลองจะใช้กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม เพื่อให้ได้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สภาวะทางออกของท่อ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

จากกฎการอนุรักษ์มวล ฟลักซ์มวล (Mass flux) หรืออัตราการเคลื่อนที่ของมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่มวลนั้นไหลผ่าน คงที่ตลอดแนวท่อ สำหรับความยาวเชิงอนุพันธ์ dl จึงเขียนได้ดังสมการ 2-1

$$\frac{dG}{dl} = 0 \tag{2-1}$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน $e_o - e_i = q - w$ เมื่อ i แทนสภาวะที่ทางเข้าของท่อ และ o แทนสภาวะที่ทางออกของท่อ e คือ พลังงานภายใน q คือ ความร้อนที่ใส่ให้ระบบ w คือ งานที่เกิดขึ้น ซึ่งเท่ากับ $p_o v_o - p_i v_i + w_{sh}$ (งานของลูกสูบ) และเนื่องจากเราจะพิจารณาของไหลที่เคลื่อนที่

จึงเพิ่มพลังงานจลน์เข้าไปรวมกับพลังงานภายในด้วย ตัวแปรเหล่านี้พิจารณาเป็นค่าจำเพาะ เพื่อไม่ให้ขึ้นกับมวล ดังนั้น k คือ พลังงานจลน์จำเพาะ = $u^2/2$ และ p คือ ความดัน v คือ ปริมาตรจำเพาะ จะได้

$$e_o - e_i + k_o - k_i = q - w_{sh} - p_o v_o + p_i v_i \tag{2-2}$$

$$e_o + p_o v_o - e_i - p_i v_i + \frac{u_o^2}{2} - \frac{u_i^2}{2} = q - w_{sh} \tag{2-3}$$

เอนทาลปี $h = e + pv$ แทนลงในสมการ 2-3 จะได้

$$h_o + \frac{u_o^2}{2} - h_i - \frac{u_i^2}{2} = q - w_{sh} \tag{2-4}$$

เนื่องจากไม่มีความร้อนไหลเข้าออกจากระบบ และไม่มีงานจากลูกสูบ และความเร็วที่ทางเข้าของท่อหรือ $u_i = 0$ จะได้

$$h_i = h_o + \frac{u_o^2}{2} \tag{2-5}$$

$$0 = \frac{dh_o}{dl} + u_o \frac{du_o}{dl} \tag{2-6}$$

และจากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$dP + G^2 dv = -\frac{4\tau_o}{D} dl \tag{2-7}$$

เมื่อ τ_o คือ ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อต่อต้านทิศทางการไหล (ปาสคาล)

G คือ ฟลักซ์มวล ตลอดแนวท่อ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที) = ρu

v คือ ปริมาตรจำเพาะ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (เมตร)

ปัจจัยแรงเสียดทานแฟนนิ่ง (Fanning friction factor) f คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนกับผลคูณของพลังงานจลน์กับความหนาแน่น ดังในสมการที่ 2-8

$$f = \frac{\tau_o}{\rho\frac{u^2}{2}} \tag{2-8}$$

แทนค่า ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) v_o ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของความหนาแน่น ($1/\rho_o$) จะได้

$$f = \frac{2\tau_o v}{u^2} \tag{2-9}$$

นำค่า τ_o จากสมการ 2-9 แทนค่าในสมการ 2-7 และจาก $G = \rho u$ และ $\rho = 1/v$ จะได้

$$dP + G^2 dv = -2\frac{fG^2 v}{D} dl \tag{2-10}$$

นำ $G^2 v$ หารตลอดจะได้

$$dF = \frac{dP}{G^2 v} + \frac{dv}{v} = -2\frac{f}{D} dl \tag{2-11}$$

เมื่อ F คือ แรงเสียดทานตลอดความยาวของท่อ

จากนั้นอินทิเกรตตามความยาวท่อตั้งแต่จุดที่ทางออกของท่อไปถึงทางเข้าของท่อ จะได้

$$F_{friction} = -\frac{4}{D}\int_{P_o}^{P_i}. fdl = \frac{2}{G^2}\int_{P_o}^{P_i}\frac{dP}{v} - 2\ln\left(\frac{v_o}{v_i}\right) \tag{2-12}$$

ด้านขวาของสมการ 2-12 จะหาฟลักซ์มวล G ได้ จะต้องทราบ v ที่เป็นฟังก์ชั่นของ P พิจารณาสมการ 2-4 พลังงานรวมที่ตำแหน่งใด ๆ คือ

$$E = h + \frac{u^2}{2} \tag{2-13}$$

พลังงานที่ทางเข้าของท่อหาได้โดยแทนค่า $G = \rho u$ หรือ $G = u/v$ ดังนั้น $u^2 = (Gv)^2$ จะได้

$$E_i = h_i + \frac{(Gv_i)^2}{2} \quad (2\text{-}14)$$

เมื่อ E_i คือ พลังงานที่ทางเข้าของท่อ h_i และ v_i คือ ค่าเอลทาลปีจำเพาะและปริมาตรจำเพาะ ซึ่งเป็นค่าที่ทราบ จากนั้นสามารถพิจารณาสภาวะที่ความดันที่ทางออก P_o ใด ๆ ได้ โดยใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน

จากสมการ 2-12 การอินทิเกรต $\int f dl$ นั้นมีความจำเป็นเนื่องจากปัจจัยแรงเสียดทานแฟนนิ่ง f นั้นไม่คงที่ตลอดความยาวของท่อเพราะมีอุปกรณ์ที่ติดกับท่อ และมีวาล์วติดตั้งอยู่ ซึ่งในโปรแกรมจะไม่ได้คำนวณค่า f ออกมาให้แต่จะคำนวณค่าแรงเสียดทานตลอดความยาวของท่อ $F_{friction}$ ให้ ซึ่งค่า $F_{friction}$ นั้นจะรวมแรงเสียดทานจากผนังท่อ F_{wall} แรงเสียดทานที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ติดกับท่อ $F_{fitting}$ แรงเสียดทานที่เกิดจากวาล์ว F_{valve} และการแรงเสียดทานที่ทางเข้าของท่อ F_{entry}

อัตราการไหลเชิงมวล Q (กิโลกรัมต่อวินาที) สามารถหาได้จาก

$$Q = A_o G_o \quad (2\text{-}15)$$

ระยะเวลาที่รั่วไหล t (วินาที) สามารถหาได้จาก

$$t = \frac{M_{st}}{Q} \quad (2\text{-}16)$$

เมื่อ M_{st} คือ มวลที่อยู่ในถังเก็บ (กิโลกรัม)

2. แบบจำลองการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศ (Atmospheric expansion model: ATEX)

หลังจากที่ได้ใช้แบบจำลองการรั่วไหลอย่างต่อเนื่องจากท่อสั้นที่ต่อกับถังเก็บ ซึ่งได้คำนวณหาอัตราการรั่วไหล Q และสภาวะต่าง ๆ ที่ทางออกของท่อ คือ ความดัน P_o อุณหภูมิ T_o อัตราส่วนของของเหลว f_{Lo} ได้แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะต้องใช้แบบจำลองการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศ คำนวณการขยายตัวของสารจากสภาวะตั้งแต่ทางออกของท่อ ไปจนถึงสภาวะบรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-2

2.1 ค่าอินพุทของแบบจำลอง

จากภาพที่ 2-2 จะเห็นว่าสภาวะเริ่มแรกของแบบจำลองการขยายตัว คือ สภาวะที่ทางออกของท่อ (เรียกว่า out) ซึ่งแสดงด้วย

2.1.1 อุณหภูมิที่ทางออก (Out temperature) T_o (เคลวิน)

2.1.2 อัตราส่วนของของเหลว f_{Lo} ซึ่งใช้ในกรณีที่เป็นการรั่วไหลสองสถานะ เช่น ทั้งไอและของเหลว

2.1.3 ความดันที่ทางออก (Out pressure) P_o (ปาสคาล)

2.1.4 ความเร็วที่ทางออก (Out velocity) u_o (เมตรต่อวินาที)

2.1.5 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) v_o (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม) ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของความหนาแน่น $(1/\rho_o)$

2.2 ค่าเอาท์พุทของแบบจำลอง

หลังจากการคำนวณค่าอินพุท โดยใช้แบบจำลองการขยายตัวแล้ว จะได้ค่าเอาท์พุท ซึ่งเป็นสภาวะสุดท้ายหลังจากขยายตัว (Final condition) แสดงด้วย

2.2.1 อุณหภูมิสุดท้าย (Final temperature) T_f (เคลวิน)

2.2.2 อัตราส่วนของของเหลว f_{Lf} ซึ่งใช้ในกรณีที่เป็นการรั่วไหลสองสถานะ เช่น ทั้งไอและของเหลว

2.2.3 ความดันสุดท้าย ซึ่งก็คือ ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) P_f (ปาสคาล)

2.2.4 ความเร็วสุดท้าย (Final velocity) u_f (เมตรต่อวินาที)

2.2.5 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) v_f (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม) ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของความหนาแน่น $(1/\rho_f)$

2.2.6 พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย (Final area) A_f (ตารางเมตร)

2.2.7 เอนทาลปีจำเพาะ (Specific enthalpy) h_f (จูล)

2.3 ทฤษฎีของแบบจำลอง (Model theory)

ตามพื้นที่ของการขยายตัวนั้น ได้สมมติว่า เป็นการไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous flow) ที่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิ (Thermal equilibrium) แบบจำลองจะใช้กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อให้ได้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สภาวะสุดท้ายหลังการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศ

จากกฎการอนุรักษ์มวล อัตราการไหลเชิงมวลสุดท้ายที่สภาวะบรรยากาศเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางออกของท่อ

$$Q_f = Q_o \tag{2-17}$$

$$\rho_f A_f u_f = \rho_o A_o u_o \tag{2-18}$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$F = ma = m\frac{\Delta u}{\Delta t} \tag{2-19}$$

ความดันของของไหลจะสร้างแรงทำให้ของไหลไหลไปได้ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ดังนั้นแรง F จึงเท่ากับ PA

$$-(P_f A_f - P_o A_o) = m\frac{u_f - u_o}{t} \tag{2-20}$$

$$P_o A_o - P_f A_f = Q(u_f - u_o) \tag{2-21}$$

พื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดความยาวท่อ A_o=A_f และแทนค่า Q จากสมการ 2-18 จะได้

$$(P_o - P_f)A_o = \rho_f A_f u_f^2 - \rho_o A_o u_o^2 \tag{2-22}$$

$$\rho_f A_f u_f^2 = \rho_o A_o u_o^2 + (P_o - P_f)A_o \tag{2-23}$$

จากสมการ 2-4 เมื่อ Q และ $W_{sh} = 0$ จะได้ว่าพลังงานสุดท้ายเท่ากับพลังงานเริ่มต้น ในที่นี้พลังงานสุดท้าย คือ พลังงานที่สภาวะบรรยากาศ และพลังงานเริ่มต้น คือ พลังงานที่ทางออกของท่อ จะได้ว่า

$$h_f + \frac{1}{2}u_f^2 = h_o + \frac{1}{2}u_o^2 \tag{2-24}$$

สมการ 2-24 นั้นได้มาจากการพิจารณาตัวแปรแบบจำเพาะซึ่งไม่ขึ้นกับมวล หากพิจารณาตัวแปรแบบขึ้นกับมวลต้องเอา $Q = \rho A u$ คูณทั้งสองข้างจะได้

$$\rho_f A_f u_f[h_f + \frac{1}{2}u_f^2\ ] = \rho_o A_o u_o[h_o + \frac{1}{2}u_o^2] \tag{2-25}$$

โดยเอนทาลปีจำเพาะที่ทางออกของท่อ h_o จะเป็นฟังก์ชันของ ความดัน อุณหภูมิ อัตราส่วนของของเหลวที่ทางออกของท่อ หรือ $h_o = h(P_o, T_o, f_{Lo})$ ส่วนเอนทาลปีจำเพาะที่สภาวะสุดท้าย h_f (หรือที่สภาวะบรรยากาศนั่นเอง) จะเป็นฟังก์ชันของ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของของเหลวที่สภาวะบรรยากาศ หรือ $h_f = h(P_a, T_f, f_{Lf})$

นอกจากนี้ยังใช้สมการเอนทาลปีดังนี้

$$h_f = f_{Lf}h_L + (1 - f_{Lf})h_V \tag{2-26}$$

เมื่อ h_L คือ เอนทาลปีจำเพาะของของเหลว (Specific liquid enthalpy)

h_V คือ เอนทาลปีจำเพาะของไอ (Specific vapour enthalpy)

2.4 การแก้สมการข้างต้นสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

2.4.1 จากสมการ 2-18 แทนค่า $\rho_f = \rho_o A_o u_o / A_f u_f$ เข้าไปในสมการ 2-23 จะได้ค่า u_f คือ

$$u_f = u_o + \frac{(P_o - P_a)}{\rho_o u_o} \tag{2-27}$$

2.4.1 จากสมการ 2-18 ทำให้สมการ 2-25 ลดรูปได้ และจะได้ค่า h_f คือ

$$h_f = h_o - \frac{1}{2}[u_f^2 - u_o^2] \tag{2-28}$$

2.4.2 หาค่าอุณหภูมิสุดท้าย T_f และ อัตราส่วนของของเหลวสุดท้าย f_{Lf} ได้จากสมการ 2-26 ซึ่งการรั่วไหลนี้เป็นการรั่วไหลของของเหลวซึ่งอุณหภูมิของของเหลวต่ำมาก T_f จึงต่ำกว่าจุดเดือดของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว และ $f_{Lf} = 1$ ค่า T_f จะหาได้จากสมการ 2-26

2.4.3 หาค่าความหนาแน่นสุดท้าย ρ_f ได้เนื่องจาก ρ_f เป็นฟังก์ชั่นของ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิสุดท้าย และอัตราส่วนของของเหลวสุดท้าย หรือ $\rho_f = \rho_f(P_a, T_f, f_{Lf})$

2.4.4 หาค่าพื้นที่หน้าตัดสุดท้าย A_f โดยหาจากสมการ 2-18

3. แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว (Unified dispersion model: UDM)

3.1 ภาพรวมของแบบจำลอง

หลังจากที่ได้ใช้แบบจำลองการรั่วไหลอย่างต่อเนื่องจากท่อสั้นที่ต่อกับถังเก็บ และแบบจำลองการขยายตัวในสภาวะบรรยากาศ คำนวณการขยายตัวของสารจากสภาวะตั้งแต่ทางออกของท่อ ไปจนถึงสภาวะบรรยากาศไปแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจำเป็นต้องใช้แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว เพื่อที่จะคำนวณการแพร่กระจายในอากาศ ของสารที่รั่วไหลออกมาด้วยความดัน ซึ่งในแบบจำลองนี้ที่เรียกว่าแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว เป็นเพราะว่าได้รวมโมดูลหลายโมดูลเข้าด้วยกัน ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

อันตรายจากการรั่วไหลของสารเป็นพิษหรือสารไวไฟนั้น พบว่า ความรุนแรงจะมากกว่าเมื่อเป็นการรั่วไหลของของเหลวที่เก็บด้วยความดัน (Pressurized liquid) เนื่องจาก เมื่อเกิดการรั่วไหลแล้ว จะก่อตัวเป็นกลุ่มละอองในอากาศ (Aerosol cloud) ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าการรั่วไหลของกลุ่มควันของไอ (Vapour cloud) หรือกลุ่มควันของก๊าซ (Gas cloud) สิ่งที่สำคัญ คือต้องมีการคำนวณอัตราส่วนของของเหลวที่ระเหยหรืออยู่ในรูปหยดของละอองในอากาศ (Aerosol droplet) ซึ่งก็คือ การคำนวณอัตราส่วนของของเหลวที่รั่วไหลออกมาแต่ยังไม่ระเหยและได้ตกลงพื้น (Rainout) ซึ่งของเหลวส่วนนี้จะไหลรวมกันอยู่ที่พื้นลักษณะเหมือนแอ่งของเหลว (Pool on the ground) และระเหยในเวลาต่อมา ทำให้ระยะเวลาของอันตรายยาวนานขึ้น

แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียวนั้น จะต้องรวมการทำนายของโมดูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ เข้าไว้ด้วยกัน

3.1.1 ข้อมูลการรั่วไหล (อัตราการรั่วไหล อัตราส่วนการเกิดกลุ่มละอองในอากาศ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของของเหลว)

3.1.2 การแพร่กระจายแบบความเร็วสูง (การเคลื่อนที่ของของไหลผ่านอากาศ วิถีโคจร ของของไหลก่อนจะแตะพื้น)

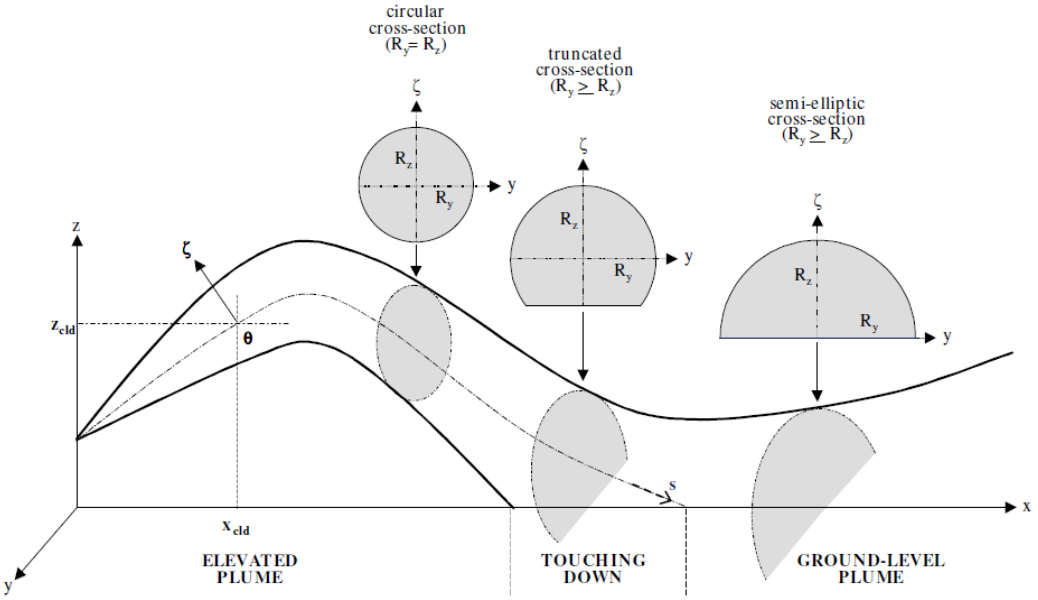
3.1.3 อุณหพลศาสตร์ (การระเหยของหยดของเหลว วิถีโคจรของหยดของเหลว การตกลงพื้น)

3.1.4 ข้อมูลของแอ่งของเหลว (การแผ่ขยายเป็นแอ่งของเหลว การระเหยจากแอ่งของเหลว การเจือจางของกลุ่มควันเมื่อเคลื่อนตัวผ่านผิวหน้าของแอ่งของเหลว)

3.1.5 การแพร่กระจายลำดับที่สอง (คือ การแพร่กระจายของของเหลวส่วนที่ตกลงพื้นไปในอากาศ และเข้าไปรวมกับกลุ่มควันที่แพร่กระจายไปก่อนหน้า)

ในโปรแกรม PHAST ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียวในการคำนวณทุกเหตุการณ์ดังที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด และสร้างออกมาเป็นภาพ โดยหลังจากที่เกิดการรั่วไหลขึ้นแล้ว จะมีการคำนวณการแพร่กระจายในทิศทางใต้ลม การเปลี่ยนรูปร่างของกลุ่มควันเมื่อกระทบกับพื้น (Touchdown) และแพร่กระจายต่อไปบนพื้นผิว ส่วนที่ยังไม่ได้ระเหยทันทีแต่ไหลลงบนพื้นและระเหยจากพื้นต่อ แบบจำลองจะสมมติว่า สภาวะของอากาศโดยรอบนั้นคงที่ เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ โดยเป็นฟังก์ชันของความสูง ดังนั้น โปรไฟล์ที่สร้างขึ้นสำหรับตัวแปรเหล่านี้ จะเป็นฟังก์ชันของความสูงในแนวตั้ง

ภาพที่ 2-3 แสดงรูปร่างของกลุ่มควันที่แพร่กระจายในอากาศในทิศใต้ลมภายหลังจากที่เกิดการรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง พิกัดต่าง ๆ มีดังนี้ x คือ ระยะทางในทิศใต้ลม y คือ ระยะทางในทิศขวางลม z คือ ระยะทางในแนวตั้ง ซึ่งค่า x = 0 แสดงถึงจุดที่เกิดการรั่วไหล ค่า y = 0 แสดงถึงจุดที่อยู่บนเส้นกึ่งกลางของกลุ่มควัน ค่า z = 0 คือ จุดระดับพื้นดิน ในส่วนของกลุ่มควันก็มีพิกัด s คือ ความยาวส่วนโค้ง ซึ่งวัดตามแนวกึ่งกลางของกลุ่มควัน ค่า s = 0 แสดงถึงจุดที่รั่วไหล



ภาพที่ 2-3 รูปทรงเรขาคณิตของกลุ่มควันที่เกิดจากการรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง
(DNV SOFTWARE, 2012 b)

จากภาพที่ 2-3 จะพบว่า

ถ้า $R_z = R_y$ หน้าตัดขวางของกลุ่มควันจะเป็นรูปวงกลม

ถ้า $R_z << R_y$ หน้าตัดขวางของกลุ่มควันจะกว้าง

ถ้า $R_z >> R_y$ หน้าตัดขวางของกลุ่มควันจะสูงและแคบ

ในกรณีการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา พิกัด ζ แสดงถึงทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวกึ่งกลางของกลุ่มควัน และตั้งฉากกับแกน y ด้วย มุม θ คือ มุมระหว่างแนวกึ่งกลางของกลุ่มควันและจุดตัดที่ $z = z_{cld}$ และ $x = x_{cld}$ ความสัมพันธ์ระหว่าง z กับ ζ คือ $z = z_{cld} + \zeta \cos\theta$ (cld ย่อมาจาก cloud)

3.2 ข้อมูลอินพุท

ข้อมูลอินพุทของแบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว คือ ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณการรั่วไหล ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วย

3.2.1 ระดับความสูงที่รั่วไหล Z_R (เมตร)

3.2.2 ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ อุณหภูมิที่รั่วไหล อัตราส่วนของของเหลว (ถ้าเป็นการรั่วไหลแบบสองสถานะ) ขนาดของหยดของเหลวในตอนเริ่มต้น

3.2.3 ข้อมูลอื่น ๆ เช่น มุมที่รั่วไหล θ_R อัตราการรั่วไหลโดยมวล (กิโลกรัมต่อวินาที) ความเร็วในการรั่วไหล (เมตรต่อวินาที) ระยะเวลาในการรั่วไหล (วินาที)

3.3 การคำนวณการแพร่กระจาย

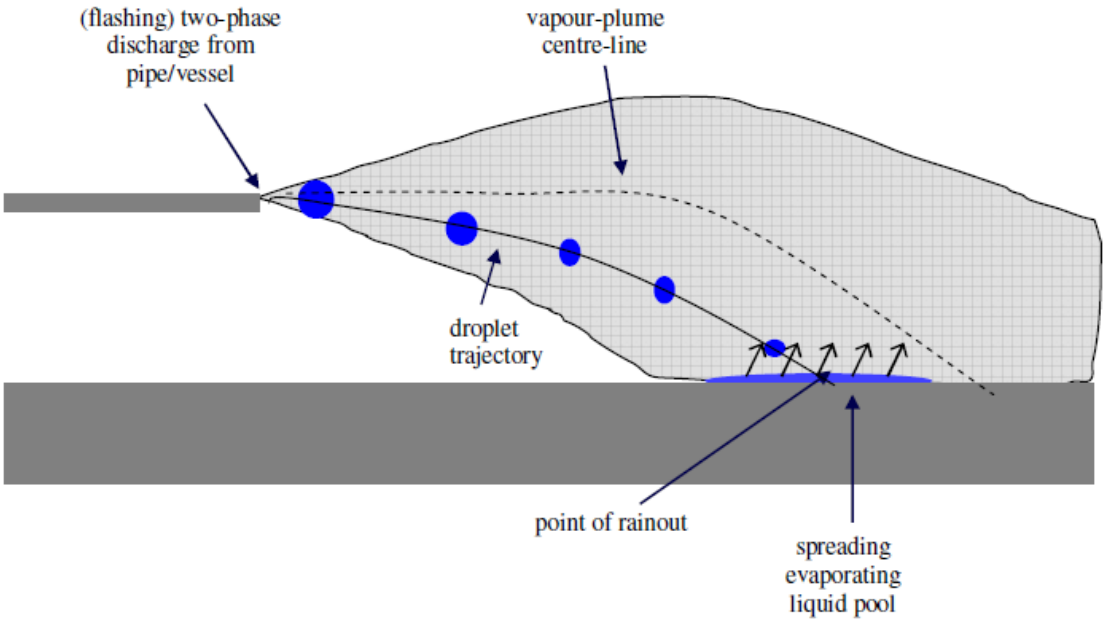
3.3.1 การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน การแตะพื้น และการยกตัวขึ้น

หลังจากที่เกิดการรั่วไหล กลุ่มละอองในอากาศ และกลุ่มไอของของเหลวก็ถูกจำลองเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่มีหน้าตัดแนวขวางเป็นวงกลม และแบนออกเป็นวงรีเมื่อกลุ่มละอองและกลุ่มไอนั้นอยู่ในสภาพคงตัว ดังภาพที่ 2-3 เมื่อแตะพื้นโมเมนตัมจะถูกอนุรักษ์ และหน้าตัดแนวขวางจะกลายเป็นรูปวงรีที่ถูกตัดยอด หลังจากนั้นกลุ่มควันจะอยู่ที่ระดับเดิมเนื่องจากองค์ประกอบในแนวตั้งของโมเมนตัมถูกเปลี่ยนไปเป็นโมเมนตัมในทิศใต้ลมและขวางลม เวลาผ่านไป กลุ่มควันอาจจะลอยตัวแล้วยกตัวขึ้น

แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียวจะจำลองกลุ่มควันเมื่อเกิดการแตะพื้น การยกตัวขึ้น และโปรไฟล์ความเข้มข้นที่จะเกิดการแพร่ มากขึ้นไปในทิศทางใต้ลม จุดที่ใกล้กับการรั่วไหลจะมีความเร็วของกลุ่มควันสูงกว่าความเร็วของอากาศโดยรอบมาก กลไกที่สำคัญของการเจือจางของกลุ่มควัน เรียกว่า การเคลื่อนที่ของของไหลผ่านอากาศด้วยความเร็วสูง (Jet entrainment) ความเร็วในแนวเส้นกึ่งกลางของกลุ่มควันจะลดลงจนกระทั่งกลไกของก๊าซหนักหรือการแพร่กระจายลำดับที่สองนั้นกลายเป็นกลไกที่เด่นชัดกว่า

3.3.2 การระเหยของหยดของเหลว การตกลงพื้น และการแผ่ขยายเป็นแอ่งของเหลวที่พร้อมระเหย (Droplet evaporation, rainout, pool speading/ evaporation)

โมดูลสำหรับจำลองการระเหยของหยดของเหลว จะถูกนำไปรวมกับการคำนวณการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านอากาศ และการคำนวณความโค้งของกลุ่มควัน ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การระเหยของหยดของเหลว และการตกลงพื้น (DNV SOFTWARE, 2012 b)

การเกิดหยดของเหลวจะถูกจำลองขึ้น และการตกลงพื้นจะเกิดขึ้นเมื่อหยดของเหลวตกกระทบพื้นหรือผนังของขอบกั้นถังบรรจุ ตำแหน่งที่มีการตกลงพื้น จะถูกใช้ไปพิจารณาว่าแอ่งของเหลวจะอยู่ภายในหรือภายนอกขอบกั้นถังบรรจุ การตกลงพื้นจะทำให้เกิดแอ่งของเหลว ซึ่งจะแผ่ขยายและระเหยต่อของเหลวที่อยู่ในแอ่งของเหลวนั้นจะถูกจำลองเป็นรูปแบบแอ่งของเหลววงกลม จนกระทั่งมันไปแตะผนังของขอบกั้นถังบรรจุ (ถ้ามี) หรือจนกระทั่งมันไปถึงจุดที่แอ่งของเหลวเข้าสู่ภาวะคงตัว หรืออัตราการระเหยและการละลายเท่ากันกับอัตราการไหลของมวลที่เข้าแอ่งของเหลว ไอจากการที่ของเหลวในแอ่งของเหลวระเหย จะถูกรวมกลับเข้าไปในกลุ่มควันตามฟังก์ชันของเวลา

3.3.3 การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเท น้ำ-ไอ จากพื้นผิวดิน

หลังจากที่กลุ่มควันแตะพื้น การถ่ายเทความร้อนระหว่างกลุ่มควันกับพื้นผิวดิน จะถูกนำมาคิดด้วย ในกรณีที่การแพร่กระจายเกิดขึ้นเหนือน้ำ การถ่ายเทระหว่างน้ำกับไอ จากบนพื้นผิวดิน จะถูกนำมาคิดเช่นกัน

3.3.4 ตัวแปรของการแพร่กระจาย

ตัวแปรของการแพร่กระจายของกลุ่มควัน สามารถจะพิจารณาเป็น

3.3.4.1 การไหลโดยมวลของกลุ่มควัน (ซึ่งรวมถึง มวลของสิ่งแปลกปลอม มวลของอากาศแห้ง และมวลน้ำในอากาศด้วย)

3.3.4.2 ตำแหน่งของกลุ่มควัน

3.3.4.3 โมเมนตัมของกลุ่มควัน

3.3.4.4 อุณหภูมิของกลุ่มควัน

ตัวแปรเหล่านี้จะถูกพิจารณาโดยใช้ หลักการอนุรักษ์มวล หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกลุ่มควันและตำแหน่งของกลุ่มควัน และหลักการอนุรักษ์พลังงาน

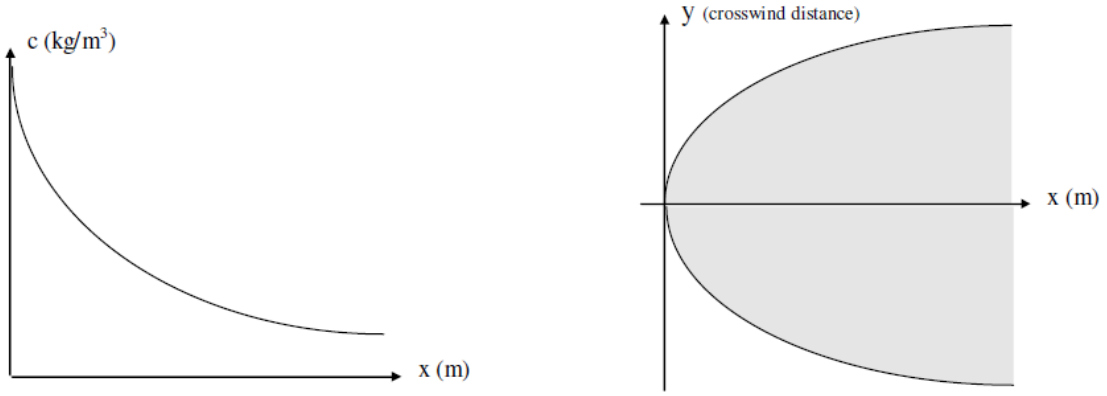
3.4 แบบจำลองสำหรับการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

แบบจำลองนี้ ประเมินตัวแปรการแพร่กระจายเป็นฟังก์ชันของระยะทางในทิศใต้ลม ซึ่งตัวแปรพื้นฐานมีดังนี้ อัตราการไหลของกลุ่มควันในแนวตั้ง (กิโลกรัมต่อวินาที) โมเมนตัมส่วนเกินในแนวนอนและแนวตั้ง (กิโลกรัมเมตรต่อวินาที^{2}) ตำแหน่งในแกนนอนและแกนตั้งในทิศใต้ลม ความร้อนที่เพิ่มขึ้นซึ่งมาจากพื้นผิวราบ (จูลต่อวินาที) ไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากพื้นผิวราบ (กิโลกรัมต่อวินาที) ความกว้างของกลุ่มควัน (เมตร)

ซึ่งต้องพิจารณาการแก้กลุ่มสมการอนุพันธ์ในทิศทางใต้ลม ซึ่งสมการเหล่านี้จะแสดงการอนุรักษ์มวล (จากการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านอากาศ และน้ำบนพื้นผิวดินที่ถูกเพิ่มเข้าไป) การอนุรักษ์โมเมนตัม ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกลุ่มควันและตำแหน่งของกลุ่มควัน ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทน้ำ-ไอน้ำ และสมการการแผ่ขยายในแนวขวางลม

ข้อมูลของหยดของเหลวพิจารณาจากแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ตัวแปรต่าง ๆ คือ มวล ความเร็ว ตำแหน่ง อุณหภูมิ จะได้มาจากการแก้สมการที่แสดงการระเหยของหยดของเหลว การอนุรักษ์โมเมนตัมของหยดของเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและตำแหน่งของหยดของเหลว การอนุรักษ์พลังงานของหยดของเหลว

ความเข้มข้น C ได้มาจากโปรไฟล์ $c = c(x, y, \zeta)$ ดังแสดงในภาพที่ 2-5



(ก) (ข)

ภาพที่ 2-5 การรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (โดยสมมติว่าจุดรั่วไหลอยู่ระดับพื้นดิน) (ก) ความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกลุ่มควัน (ข) รูปร่างของกลุ่มควันซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางในทิศใต้ลม x (DNV SOFTWARE, 2012 b)

3.5 โปรไฟล์ของความเข้มข้น และรูปทรงเรขาคณิตของกลุ่มควัน (Cloud geometry) ของแบบจำลองการแพร่กระจายสำหรับการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

แบบจำลองการแพร่กระจายแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายชนิดของการรั่วไหลได้หลายรูปแบบ ลักษณะเด่นของแบบจำลอง คือ การทำนายโปรไฟล์ของความเข้มข้น ความเร็ว อุณหภูมิ สำหรับการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา การรั่วไหลอย่างต่อเนื่องนั้นมีการขยายตัวจากจุดที่รั่วไหลไปตามทิศทางใต้ลม ดังแสดงในภาพที่ 2-3

โปรไฟล์ของความเข้มข้นที่ตำแหน่ง x, y, z ใด ๆ อธิบายได้ด้วยสมการการแพร่กระจายของ Gaussian (Adel, 2008)

$$c\,(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\pi_y\sigma_z u}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right).\left\{\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)+\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\} \quad (2\text{-}29)$$

เมื่อ $H = h + \Delta h$ โดยที่ h คือ ความสูงจากพื้นของจุดที่รั่วไหล Δh คือ ระยะในแนวตั้งจากจุดรั่วไหลไปจนถึงเส้นกึ่งกลางของกลุ่มควัน u ในที่นี้ คือ ความเร็วลม σ_y คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในทิศทางขวางลม σ_z คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้ง ซึ่งเป็นค่าที่บอกความปั่นป่วนของบรรยากาศ หากสภาพบรรยากาศไม่คงที่ มีความปั่นป่วนมาก ค่า σ จะสูง หากสภาพบรรยากาศคงที่ มีความปั่นป่วนน้อย ค่า σ จะต่ำ

เมื่อเปลี่ยนพิกัด z เป็นพิกัด ζ และลดรูปสมการลง จะได้โปรไฟล์ของความเข้มข้นที่ใช้ในโปรแกรม ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Ooms, Mahieu, & Zelis, 1974)

$$c(x,y,\zeta) = c_0(x)F_v(\zeta)F_h(y) \tag{2-30}$$

$$F_v(\zeta) = \exp\left\{-\left|\frac{\zeta}{R_z(x)}\right|^{n(x)}\right\} \tag{2-31}$$

$$F_h(y) = \exp\left\{-\left|\frac{y}{R_y(x)}\right|^{m(x)}\right\} \tag{2-32}$$

สัมประสิทธิ์จากสมการข้างต้น คือ

$$R_y = \sqrt{2}\sigma_y \tag{2-33}$$

$$R_z = \sqrt{2}\sigma_z \tag{2-34}$$

ถ้าค่า m และ n เท่ากับ 2 จะได้ตามสมการ Gaussian ค่า m และ n ที่แตกต่างกันให้ผลโปรไฟล์ของความเข้มข้นที่ต่างกัน โดยที่ค่า m และ n ยิ่งมาก จะทำให้รูปร่างของกลุ่มควันยิ่งเป็นมุมแหลมมาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Witlox, Harper, Oke and Stene (2013) ได้ทำการวิจัยความถูกต้อง (Validate) ของโปรแกรม PHAST ในการจำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบกับการทดลองการรั่วไหลจริง โดยได้ทำการทดลองสร้างถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวรูปทรงลูกปืนแนวนอนเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ความดันต่าง ๆ ในช่วง 82-158 บาร์ อุณหภูมิในช่วง 0-150 องศาเซลเซียส มีรูรั่วขนาด 1/4 1/2 และ 1 นิ้ว มีเครื่องตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจน 43 เครื่อง โดยวางในทิศทางใต้ลมห่างจากจุดรั่วไหล 5 10 15 20 40 60 และ 80 เมตร ที่ระดับความสูงจากพื้น 0.3 1 และ 3 เมตร และวางในทิศทางขวางลม ทำมุม -20 องศา และ 20 องศา กับทิศทางของการรั่วไหล เครื่องตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจนจะต่อเข้ากับเครื่อง CO_2 analyzer 2 เครื่อง เพื่อแสดงปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองโดยการวัดค่าอัตราการไหล

เชิงมวลและค่าความเข้มข้นของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์ที่เดินทางไปถึงจุดที่วางเครื่องตรวจวัด (ตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.65 เมตรต่อวินาที) พบว่า ค่าที่ได้นั้น มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม PHAST โดยแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

Harper (2011) ได้ทำการศึกษาเรื่องการประเมินอันตรายของคาร์บอนไดออกไซด์ระดับรุนแรง โดยการประเมินผลกระทบที่ตามมาจากการได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่เป็นระดับอันตราย และในระยะเวลาที่นานมากพอที่จะเกิดการสะสมในร่างกายจนเกิดอันตรายได้ โดยได้ศึกษาความเสี่ยงของกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage) หรือ CCS เนื่องจาก กระบวนการนี้มักจะอยู่ในโรงงานที่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง (8,000-30,000 ตันต่อวัน) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกจับและทำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากนั้นจะถูกขนส่งไปตามท่อ ไปยังถังเก็บ

สาเหตุที่มีการศึกษาในเรื่องดังกล่าว เพราะหากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์นี้ อาจทำให้เกิดผลกระทบในระดับที่รุนแรง ครอบคลุมบริเวณกว้าง และมีจำนวนคนที่จะได้รับผลกระทบมาก จึงได้ทำการประเมินอันตรายที่เกิดจากอุบัติการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จากถังที่บรรจุคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก และอภิปรายถึงอันตรายระดับรุนแรงที่มีแนวโน้มสูงที่จะเกิดขึ้นจากเหตุการณ์นั้น

ในการประเมินอันตรายของคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระดับที่กำหนดความเป็นพิษ (Specified level of toxicity หรือตัวย่อ SLOT) ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่า 1-5 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มตัวอย่างจะเสียชีวิตจากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่กำหนด (HSE, 2016) และได้ทำการสร้างสถานการณ์จำลองขึ้นมาหลายสถานการณ์ โดยใช้โปรแกรม 2 โปรแกรมด้วยกัน คือ IRATE/DRIFT และ PHAST 6.6 เพื่อประเมินระยะทางที่เป็นอันตราย (Hazardous distance) หากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในปริมาณมาก ซึ่งเป็นระยะทางที่หากมีผู้ที่อยู่ภายในบริเวณนั้น อาจจะเสียชีวิตได้ ระยะทางที่เป็นอันตรายนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณของสารที่รั่วไหล ความดันของสาร อุณหภูมิของสาร และสภาพอากาศ เช่น ความเร็วลม เวลากลางวัน เวลากลางคืน ในการประเมินระยะทางที่เป็นอันตราย โดยใช้โปรแกรม IRATE/DRIFT เขาได้สร้างสถานการณ์จำลองว่าถังเก็บขนาด 60 ตัน บรรจุคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของแข็งหรือน้ำแข็งแห้ง ได้แตกออกทั้งใบที่ความดัน 10 บาร์ ส่งผลให้น้ำแข็งแห้งนั้นระเหิดกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมตัวเป็นกลุ่มควัน พบว่าระยะทางที่คน 1-5 เปอร์เซ็นต์จะเสียชีวิต อยู่ที่ 160 เมตร (เวลากลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที) และที่ 125 เมตร (เวลากลางคืน ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที) อีกสถานการณ์หนึ่งเขาเปลี่ยนปริมาณน้ำแข็งแห้งเป็น 40 ตัน พบว่า พบว่าระยะทางที่คน 1-5 เปอร์เซ็นต์จะเสียชีวิต อยู่ที่ 140 เมตร (เวลา

กลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที) และที่ 107 เมตร (เวลากลางคืน ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที) ส่วนในการประเมินระยะทางที่เป็นอันตราย โดยใช้โปรแกรม PHAST 6.6 เขาได้สร้างสถานการณ์จำลองว่าถังเก็บขนาด 50 100 200 500 1,000 และ 2,000 ตัน บรรจุคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่อุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน ได้แตกออกทั้งใบ พบว่า ระยะทางที่เป็นอันตรายนั้นเริ่มตั้งแต่ 28 เมตร ไปจนถึง 118 เมตร และสรุปผลการประเมินอันตรายได้ว่า ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในถังเก็บยิ่งมาก หากเกิดการรั่วไหลระยะทางที่เป็นอันตรายยิ่งไปได้ไกลขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เก็บด้วยความดันเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เก็บด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า หากเกิดการรั่วไหล ระยะทางที่เป็นอันตรายจะไปได้ไกลกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เก็บด้วยอุณหภูมิเท่ากัน แต่ความดันต่างกัน คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เก็บด้วยความดันที่สูงกว่า หากเกิดการรั่วไหล ระยะทางที่เป็นอันตรายจะไปได้ไกลกว่าเล็กน้อยจนแทบจะไม่แตกต่าง สภาพอากาศตอนกลางวันและกลางคืน มีผลกับระยะทางที่เป็นอันตราย โดยที่ตอนกลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ระยะทางที่เป็นอันตรายจะไปได้ไกลกว่าตอนกลางคืน ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที เพียงเล็กน้อย

Willday, McGillivray, Harper and Wardman (2009) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระยะทางที่เป็นอันตรายระหว่างท่อส่งคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ กับท่อส่งก๊าซธรรมชาติขนาดที่เท่ากัน เนื่องจากในขณะนั้นคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้จัดในอยู่ในกลุ่มของสารอันตรายภายใต้กฎหมายความปลอดภัยของท่อส่ง การควบคุมท่อส่งคาร์บอนไดออกไซด์จึงยังไม่เข้มงวดเท่ากับการควบคุมท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างสถานการณ์จำลอง โดยใช้โปรแกรม PHAST 6.6 เพื่อประเมินระยะทางที่เป็นอันตราย ของการรั่วไหลของของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากท่อส่งขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 736.6 มิลลิเมตร (ประมาณ 29 นิ้ว) ความยาว 18 กิโลเมตร แตกออกทั้งท่อ และได้ใช้ระดับที่กำหนดความเป็นพิษ (SLOT) ที่กลุ่มตัวอย่าง 1-5 เปอร์เซ็นต์จะเสียชีวิตในเวลา 25 นาที จากการสูดดมเข้าไป แล้วเปรียบเทียบกับระยะทางที่เป็นอันตราย ของการรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเมื่อรั่วไหลแล้วเกิดติดไฟทันที เกิดเป็นลูกไฟขนาดใหญ่ ระยะทางที่เป็นอันตรายจึงเป็นระยะทางที่กลุ่มตัวอย่าง 1-5 เปอร์เซ็นต์จะเสียชีวิตจากรังสีความร้อน โดยการจำลองนั้นมีการใช้ค่าความดันในท่อที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 32 15 10 และ 7 บาร์ ผลการจำลองพบว่า ที่ความดัน 32 15 และ 10 บาร์ ระยะทางที่เป็นอันตรายของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ คือ 306, 204, 164 เมตร ตามลำดับ (เวลากลางคืน ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที) ซึ่งไกลกว่าระยะทางที่เป็นอันตรายของท่อส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 136.33 160.42 143.75 เมตร ตามลำดับ (เวลากลางคืน ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที) มีเพียงค่าความดันขนาด 7 บาร์ เท่านั้น ที่ระยะทางที่เป็นอันตรายของ

ท่อส่งก๊าซธรรมชาติ คือ 138 เมตร และระยะทางที่เป็นอันตรายของท่อส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 126.13 เมตร ที่ถือว่าใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงได้ข้อสรุปว่า ระยะทางที่เป็นอันตรายของท่อส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น เท่า ๆ กับระยะทางที่เป็นอันตรายของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ที่ความดัน 7 บาร์ จึงควรแก้ไขกฎหมายความปลอดภัยของท่อส่ง โดยจัดคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในกลุ่มของสารอันตรายภายใต้กฎหมายดังกล่าวด้วย เพื่อให้การควบคุมท่อส่งคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มงวดมากยิ่งขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาเรื่องการประเมินอันตรายของคาร์บอนไดออกไซด์ จะให้ความสำคัญไปที่กระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ และเป็นการสร้างสถานการณ์ที่รุนแรง เช่น การสร้างสถานการณ์จำลองการรั่วไหลจากการที่ถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์แตกออกทั้งใบ หรือ การรั่วไหลจากการแตกหักของท่อส่งคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่ยาวหลายกิโลเมตร เพื่อดูผลกระทบในวงกว้าง เนื่องจากในกระบวนการดังกล่าวมีการวางท่อห่างจากชุมชนอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นที่จะต้องจำลองสถานการณ์การรั่วไหลจากรูรั่วเล็ก ๆ หรือ ท่อขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม การศึกษาเรื่องการประเมินอันตรายของคาร์บอนไดออกไซด์ จากสถานการณ์ที่รุนแรงน้อยกว่า และมีระดับที่ผลกระทบรุนแรงรองลงมา ก็ถือว่ามีความสำคัญเช่นเดียวกัน แต่ปัจจุบันยังขาดแคลนงานวิจัยในสถานการณ์ดังกล่าว งานนิพนธ์นี้ จึงต้องการทำการศึกษาผลกระทบจากการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บเข้ารถขนส่ง เพื่อดูผลกระทบต่อพนักงานในโรงงาน และชุมชนที่ตั้งอยู่รอบโรงงาน เหตุผลที่เลือกสถานการณ์การรั่วไหลจากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บเข้ารถขนส่ง เพราะว่าในบางโรงงาน ยังมีระบบการถ่ายเทโดยให้พนักงานขับรถเป็นผู้ดำเนินการทั้งหมด และหยุดการถ่ายเทโดยการสังเกต คาร์บอนไดออกไซด์ที่ล้นออกมาจากรถขนส่ง ผ่านทางท่อล้น ซึ่งผิดจากหลักการปฏิบัติที่ดีในการถ่ายเทของเหลวที่มีความเย็นสูงออกจากรถขนส่ง (Asia industrial gases association, 2006) ที่ได้ระบุไว้ว่า หลักเกณฑ์การวัดปริมาณสารที่ถ่ายเทเข้ารถขนส่งควรจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้ 1) วัดปริมาณสารมาก่อน ตั้งแต่จากโรงผลิต เพื่อให้รู้ปริมาณแน่นอนที่จะถ่ายเทเข้ารถขนส่ง และให้ทำการบันทึกไว้ที่โรงผลิตด้วยว่านำสารออกมาเท่าไร 2) ทำการตรวจสอบน้ำหนักรถหลังจากจบขั้นตอนการถ่ายเทเข้ารถขนส่ง ก่อนที่จะให้รถขนส่งเดินทางออกไปจากโรงผลิต 3) ควบคุมปริมาณสารที่ขนส่งไปกับปริมาณที่ระบุในใบส่งของที่นำไปให้กับโรงงานลูกค้า ซึ่งต้องเป็นปริมาณที่เท่ากัน เพื่อไม่ให้มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดหรือเกิดการทุจริตขึ้นได้

การที่จะทำการวัดปริมาณสารตามเกณฑ์ดังกล่าวได้ จำเป็นจะต้องใช้สะพานชั่งน้ำหนักเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องมีค่าแสดงน้ำหนักของสารที่ถ่ายเทเข้ารถไปและน้ำหนักสุดท้ายของรถ ก่อนจะออกเดินทางไปยังโรงงานลูกค้า และพิมพ์ออกมาในใบส่งของด้วย อย่างไรก็ตาม พบว่ามีการใช้วิธีการในการวัดปริมาณสารในรูปแบบอื่น แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำตามเกณฑ์ที่กำหนดได้ วิธีการเหล่านั้น เช่น 1) การติดวาล์วล้นและเปิดทิ้งไว้เพื่อดูสารที่ล้นออกมาเมื่อถ่ายเทสารเข้ารถขนส่งได้ถึงตำแหน่งความสูงที่ต้องการ ซึ่งวิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการวัดปริมาณสารที่ถูกต้อง เนื่องจากขึ้นอยู่กับมุมเอียงของรถ และในบางครั้งรถที่เข้ามายังโรงงานผลิต มีสารคงค้างเหลืออยู่ในรถด้วย จึงไม่สามารถบอกปริมาณที่แท้จริงที่ถ่ายเทเพิ่มเติมเข้าไปในรถได้ 2) การติดตั้งมาตรวัดการไหล (Flow meter) ที่ท่อด้านที่ถ่ายเทสารเข้ารถขนส่ง ซึ่งวิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการวัดปริมาณสารที่ถูกต้องเช่นกัน หากไม่ทราบปริมาณสารที่คงค้างเหลืออยู่ในรถก่อนที่รถจะเข้ามายังโรงงานผลิต

การถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้ารถขนส่งโดยที่ใช้วิธีการในการวัดปริมาณสารโดยการสังเกตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ออกมาจากวาล์วล้นผ่านออกมาทางท่อล้น แล้วจึงหยุดการถ่ายเทโดยการปิดเครื่องสูบนั้น พบว่าเป็นอันตรายอย่างมาก หากพนักงานขับรถที่ทำการถ่ายเทสารเกิดความประมาท โดยอาจจะออกจากบริเวณรถไปเข้าห้องน้ำหรือคุยโทรศัพท์ ไม่ได้สังเกตุสารที่จะล้นออกมาตลอดเวลา ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวล้นออกมาปริมาณมากทั่วบริเวณ เป็นเหตุให้ตนเองหรือผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นถึงแก่ชีวิตได้ งานนิพนธ์นี้จึงต้องการศึกษาอันตรายดังกล่าว เพื่อยืนยันถึงความรุนแรง และผลกระทบต่อชีวิต เพื่อเป็นประโยชน์ในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงระบบการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น รวมถึงการจัดวางตำแหน่งของพื้นที่ในโรงงานและชุมชนให้เหมาะสม เพื่อปกป้องทุกชีวิตหากเกิดสถานการณ์รุนแรงเช่นนี้ขึ้น

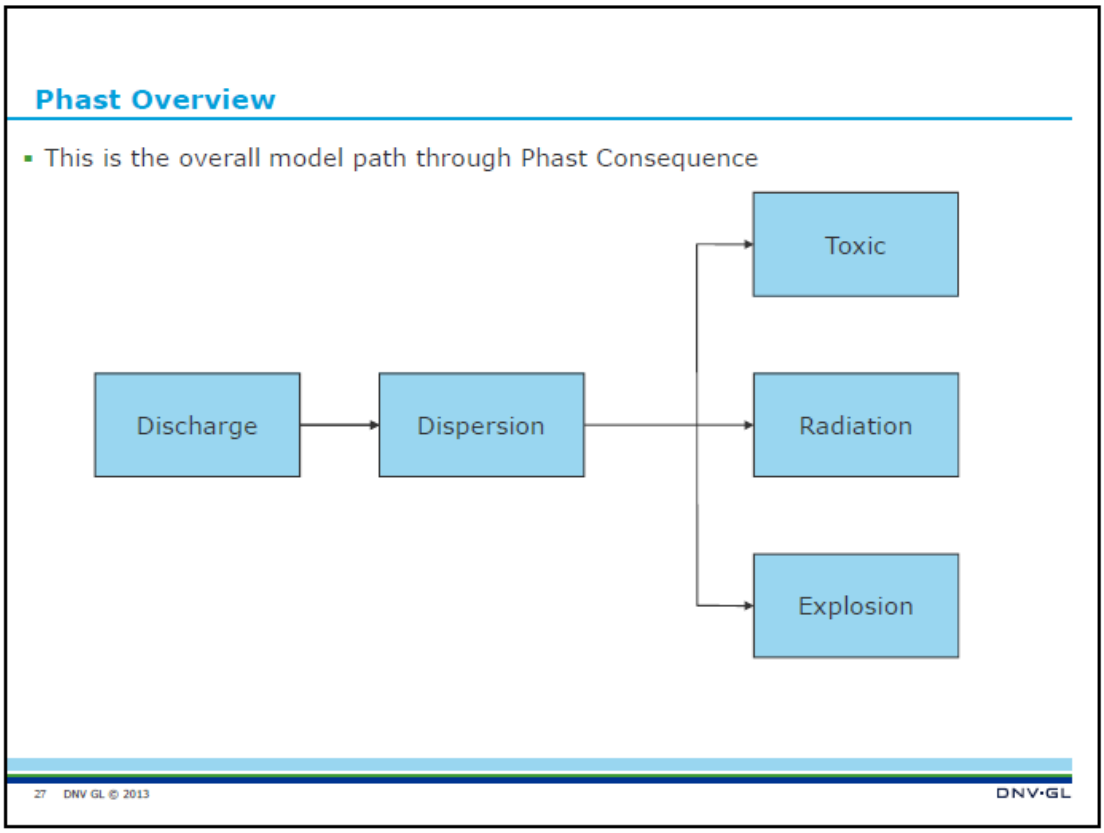
บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานนิพนธ์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานนิพนธ์

โปรแกรมที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย คือ PHAST Version 7.11 ของบริษัทผู้ผลิต คือ DNV ใช้งานผ่าน license ของบริษัท PTT Energy Solutions

การทำแบบจำลองผลกระทบจากสารเคมีรั่วไหลของโปรแกรม PHAST 7.11 จะเห็นได้จากแผนผังแสดงขั้นตอนการจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-1 การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากการนำข้อมูลอินพุทต่าง ๆ ทั้งข้อมูลที่เกี่ยวกับสาร เช่น ชนิดของสารที่รั่วไหล ความดัน อุณหภูมิ สถานะ ข้อมูลที่เกี่ยวกับถังเก็บ เช่น ปริมาณของสารในถังเก็บ สภาพภูมิประเทศที่วางถัง ขนาดของขอบกั้นถัง ข้อมูลของการรั่วไหล เช่น ลักษณะของการรั่วไหล (รั่วไหลจากรูรั่ว รั่วไหลจากท่อ รั่วไหลจากวาล์วนิรภัย รั่วไหลจากฝาครอบปะทุ) ขนาดของรูรั่ว หรือขนาดของท่อที่เกิดการรั่วไหล ความยาวท่อ ตำแหน่งและทิศทางที่เกิดการรั่วไหล เป็นต้น มาทำแบบจำลองการรั่วไหล เพื่อหาอัตราการรั่วไหลของสาร หรือ Discharge หลังจากนั้น จะเข้าสู่แบบจำลองการแพร่ในอากาศหรือ Dispersion โดยการนำข้อมูลอินพุทที่เกี่ยวกับสภาพบรรยากาศ เช่น กลางวัน กลางคืน และความเร็วลม มาจำลองรูปร่างของกลุ่มควัน และระยะทางที่กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กัน จะเดินทางไปถึง ในส่วนของการแสดงผลกระทบ หากเป็นสารที่มีความเป็นพิษ (Toxic) สิ่งที่จะต้องแสดงผล คือ ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย และระยะเวลาที่ได้รับสารพิษนั้น หากเป็นสารที่ไวไฟ อาจจะติดไฟในทันทีที่รั่วไหล เกิดเป็นเพลิงไหม้ ทำให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นได้รับอันตรายจากปริมาณรังสีความร้อน (Radiation) หากสารไวไฟนั้นไม่ได้ติดไฟในทันที แต่รั่วไหลออกมาตลอดเวลาและสะสมพลังงานขึ้นเรื่อย ๆ จะเกิดการระเบิด (Explosion) ขึ้นได้ ทำให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้น หรือ สิ่งก่อสร้าง ได้รับอันตรายจากคลื่นการระเบิด (Blast)

ในงานนิพนธ์นี้ ได้จำลองสถานการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ซึ่งมีความเป็นพิษ แต่เป็นสารที่ไม่ติดไฟ จึงใช้โปรแกรมจำลองเพื่อดูผลกระทบถึงอันตรายจากความเป็นพิษเป็นหลัก



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของโปรแกรม PHAST (DNV software, 2014)

สถานที่และกระบวนการผลิตที่ใช้ในงานวิจัย

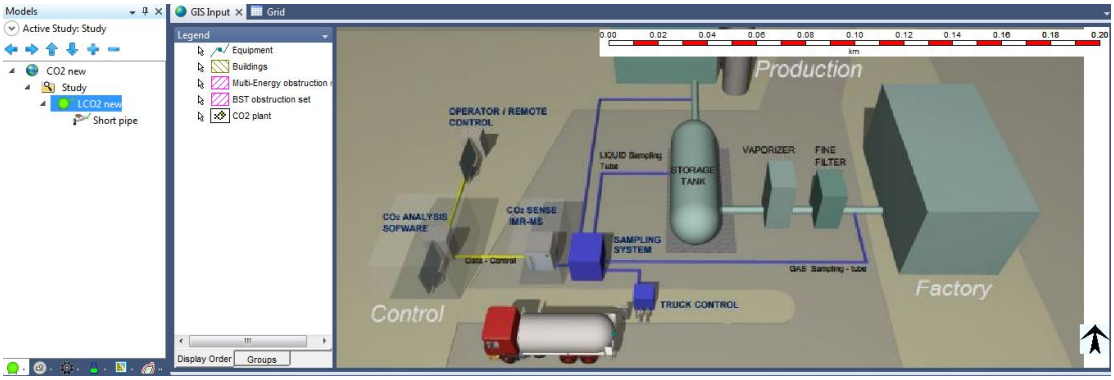
สถานที่และข้อมูลของกระบวนการผลิตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้สถานที่จำลองของบริษัท Pentatech ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตถังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลว และใช้ข้อมูลการเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวของ บริษัท Linde group ประเทศเยอรมัน (The Linde group, 2013)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กำหนดภาชนะที่เก็บสารด้วยความดัน

ภาชนะที่ใช้เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลว คือ ภาชนะรูปทรงกระบอก และเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวไว้ปริมาณ 500 ตัน โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นอยู่ในสภาพอิ่มตัว และเก็บที่ความดัน 230 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ประมาณ 15.85 บาร์) อุณหภูมิ -26 องศาเซลเซียส ภาชนะตั้งอยู่ที่ระดับสูงจากพื้น 1 เมตร และไม่มีขอบปูนกั้นบริเวณรอบภาชนะ ซึ่งสามารถใส่ใน

โปรแกรมโดยเลือก Insert > Pressure vessel แล้ววางจุดไปที่ตำแหน่งของภาชนะบนแผนผังโรงงาน ตามภาพที่ 3-2 จะเห็นตำแหน่งของภาชนะคือตำแหน่งของ Storage tank ตรงกลาง รูปทรงลูกปืน



ภาพที่ 3-2 กำหนดภาชนะที่เก็บสารด้วยความดัน บนแผนผังจำลองของโรงงาน (Pentatech, 2015)

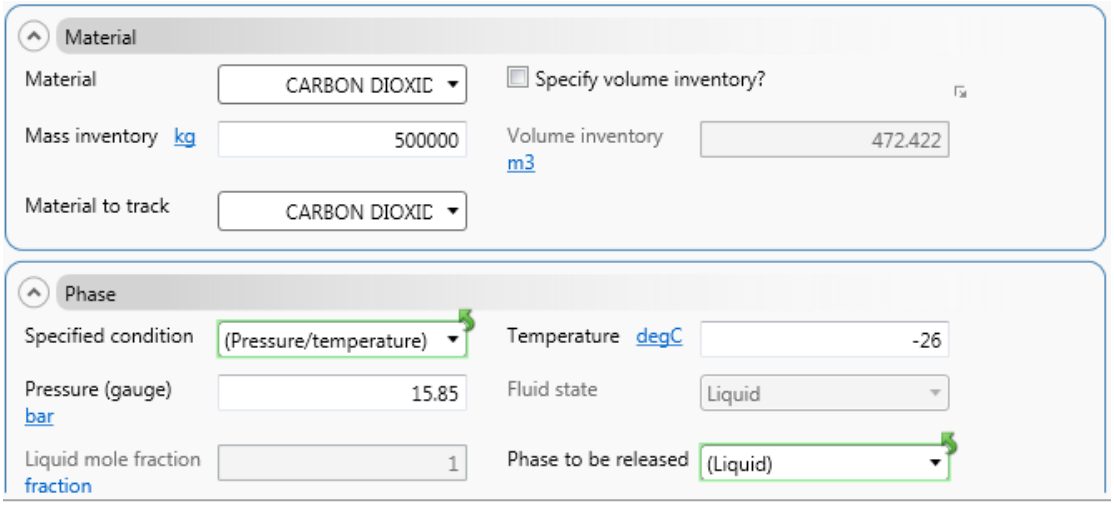
2. กำหนดค่าอินพุทสำหรับภาชนะ

หลังจากที่ภาชนะที่เก็บสารด้วยความดันถูกสร้างขึ้น กำหนดค่าอินพุทได้ดังนี้

2.1 ค่าอินพุทส่วนที่เกี่ยวกับสาร ดังแสดงในตารางที่ 3-1 และภาพที่ 3-3

ตารางที่ 3-1 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับสาร

หัวข้อ	ค่าอินพุท
<u>ส่วนที่เกี่ยวกับสาร</u>	
สาร	คาร์บอนไดออกไซด์
ปริมาณของสารที่มีอยู่	500,000 กิโลกรัม
สภาวะที่ระบุ	อุณหภูมิ/ ความดัน
อุณหภูมิ	-26 องศาเซลเซียส
ความดัน	ความดันเกจ 15.85 บาร์
สถานะที่จะรั่วไหล	ของเหลว

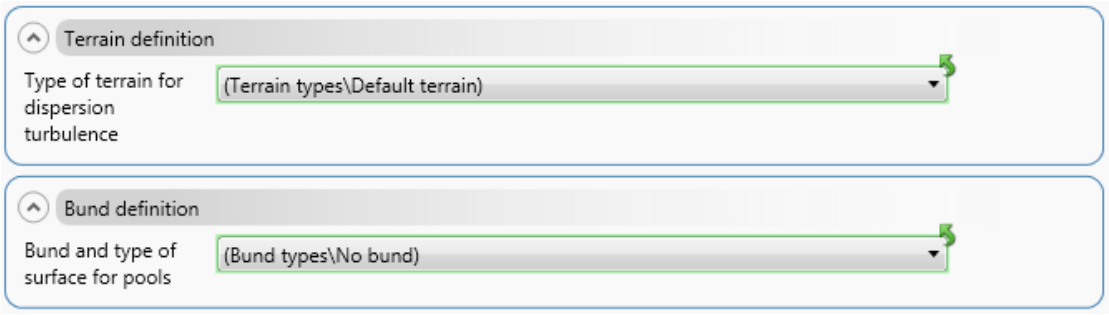


ภาพที่ 3-3 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับสาร

2.2 ค่าอินพุทส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ และขอบกั้นถัง ในที่นี้ใช้เป็นค่าที่กำหนดโดยโปรแกรม คือเป็นพื้นดิน และเนื่องจากบริเวณถังเก็บไม่มีการสร้างขอบกั้น จึงใส่ว่าไม่มีขอบกั้น ดังแสดงในตารางที่ 3-2 และภาพที่ 3-4

ตารางที่ 3-2 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ และขอบกั้นถัง

หัวข้อ	ค่าอินพุท
<u>ส่วนข้อมูลของขอบกั้น และภูมิประเทศ</u>	
ลักษณะภูมิประเทศ	กำหนดโดยโปรแกรม (default)
ลักษณะขอบกั้น	ไม่มีขอบกั้น (no bund)



ภาพที่ 3-4 ค่าอินพุทสำหรับภาชนะที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ และขอบกั้นถัง

3. เลือกสถานการณ์จำลอง

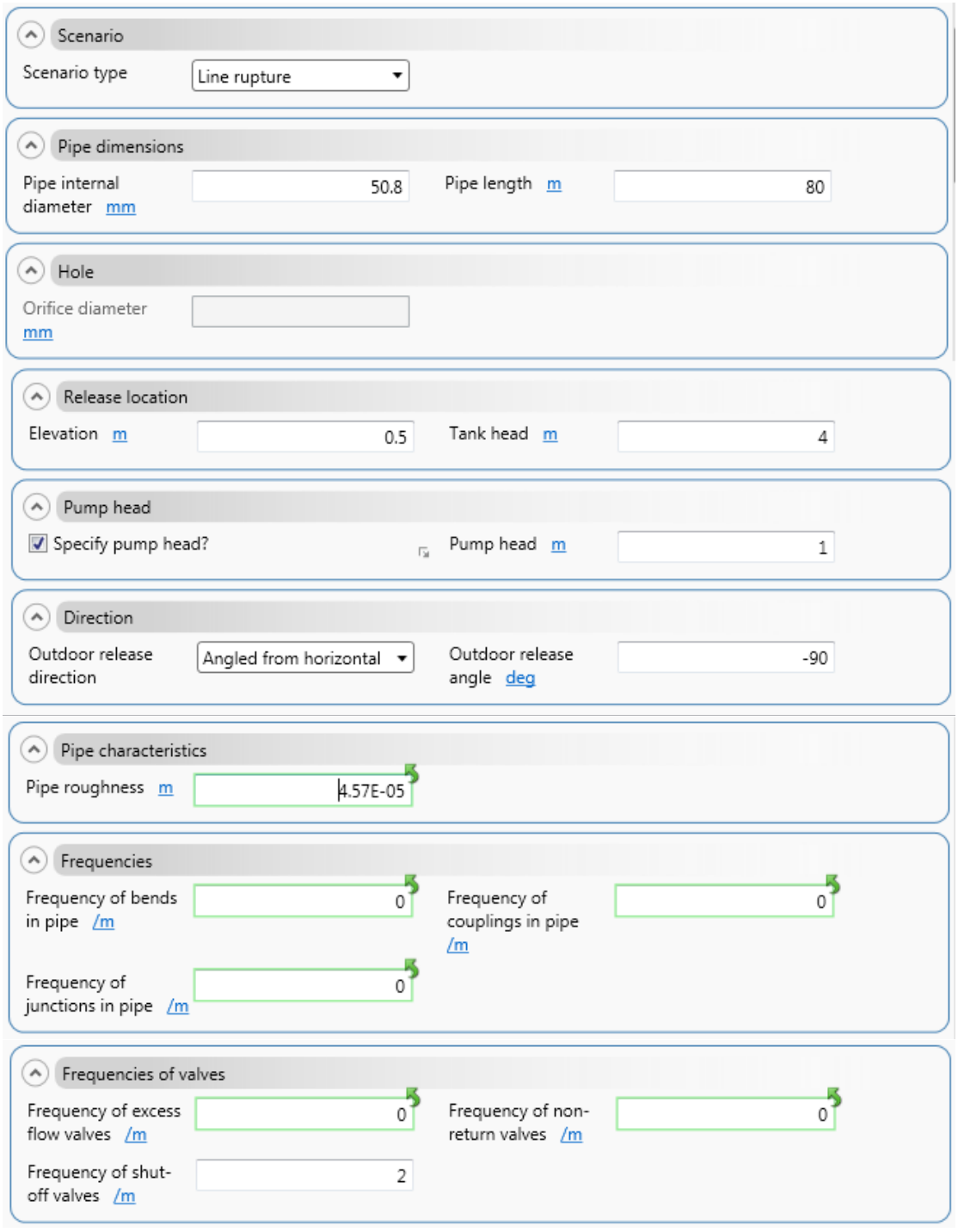
สำหรับการสร้างแบบจำลองความเสียหายของระบบท่อนั้น มี 2 ประเภท คือ แบบจำลองท่อสั้น (Short pipe scenario) กับแบบจำลองท่อสั้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time varying short pipe scenario) เนื่องจากความดันในถังถูกรักษาไว้โดยการทำความดันให้เท่ากับถังเก็บลูกอื่น ๆ ผ่านทางท่อก๊าซที่ต่อถึงกัน หรือเรียกว่าการปรับระดับความดัน เมื่อเกิดการรั่วไหลจากถังเก็บเองก็ดี หรือการรั่วไหลจากท่อที่ต่อกับถังเก็บก็ดี จะไม่ทำให้สภาพในถังเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้แบบจำลองการรั่วไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาได้ ในที่นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองท่อสั้น

4. กำหนดค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง

จากสถานการณ์จำลองที่ใช้แบบจำลองท่อสั้น กำหนดค่าอินพุทซึ่งเป็นการประมาณค่าจากแผนผังจำลองของโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 3-3 และภาพที่ 3-5

ตารางที่ 3-3 ค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง

หัวข้อ	ค่าอินพุท
<u>ส่วนสถานการณ์จำลอง</u>	
ประเภทของสถานการณ์จำลอง	ท่อแตก (Line rupture)
เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในท่อ	50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)
ความยาวท่อ	80 เมตร
ความสูงจากพื้นของจุดที่รั่วไหล (Elevation)	0.5 เมตร
ระดับความสูงของของเหลวในถังเก็บที่เหนือกว่าจุดที่รั่วไหล (Tank head)	4 เมตร
ระดับความสูงของเครื่องสูบที่เหนือกว่าจุดที่รั่วไหล (Pump head)	1 เมตร
ทิศทางของการรั่วไหลภายนอกอาคาร (Outdoor release direction)	ทำมุม -90 องศากับแนวนอน (Angled from horizontal) เนื่องจากท่อล้นชี้ลงพื้นดิน
ความขรุขระของท่อ (Pipe roughness)	0.0457 มิลลิเมตร (ค่า default ของท่อเหล็กกล้าคาร์บอน)
จำนวนวาล์ว	2



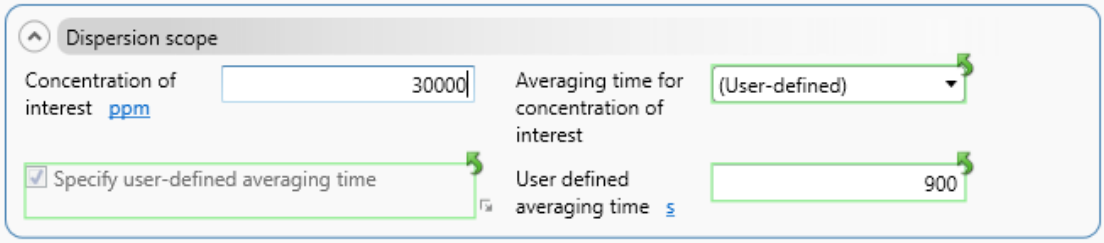
ภาพที่ 3-5 ค่าอินพุทสำหรับสถานการณ์จำลอง

5. กำหนดค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย

ค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย จะต้องใส่ระดับความเข้มข้นที่สนใจ ซึ่งเป็นจุดที่จะให้โปรแกรมหยุดคำนวณ จากบทที่ 2 ระดับความเข้มข้นที่เป็นพิษจนทำให้คนสูญเสียสติสัมปชัญญะไปจนถึงเสียชีวิต จะเริ่มตั้งแต่ 30,000 ส่วนในล้านส่วน เป็นต้นไป ดังนั้นระดับความเข้มข้นที่สนใจจึงใส่ค่า 30,000 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้จะต้องกำหนดระยะเวลาเฉลี่ยสำหรับระดับความเข้มข้นที่สนใจ ในที่นี้ใส่ค่า 900 วินาที เนื่องจากระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ดังกล่าว จะทำให้ผู้ที่สูดดมเข้าไปสูญเสียสติสัมปชัญญะได้ จะต้องสูดดมไม่น้อยกว่า 15 นาที หรือ 900 วินาทีนั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และภาพที่ 3-6

ตารางที่ 3-4 ค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย

หัวข้อ	ค่าอินพุท
<u>ส่วนการแพร่กระจาย</u>	
ระดับความเข้มข้นที่สนใจ ซึ่งเป็นจุดที่จะให้โปรแกรมหยุดคำนวณ	30,000 ส่วนในล้านส่วน
ระยะเวลาเฉลี่ยสำหรับระดับความเข้มข้นที่สนใจ (Averaging time for concentration of interest)	กำหนดเองโดยผู้ใช้ (User-defined)
ระยะเวลาเฉลี่ยที่กำหนดเองโดยผู้ใช้	900 วินาที



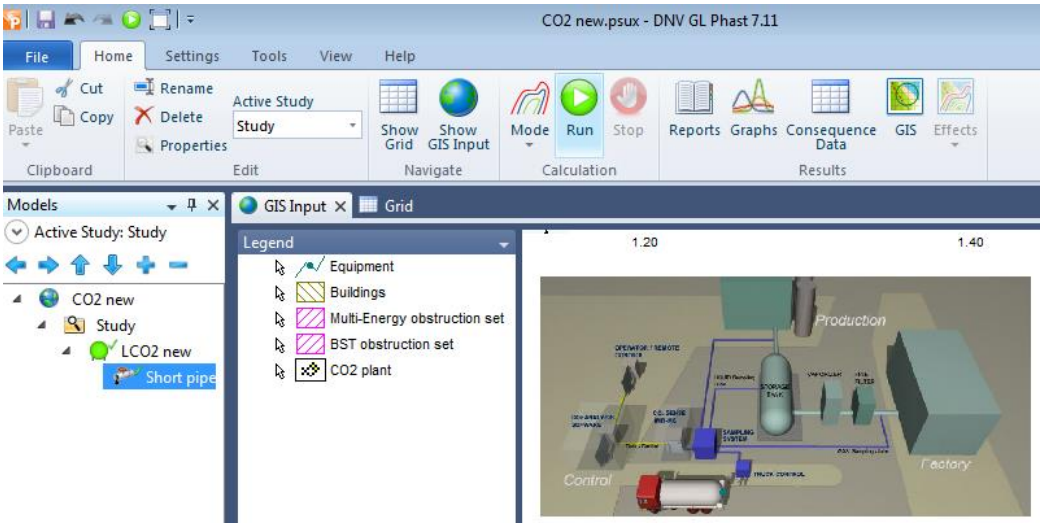
ภาพที่ 3-6 ค่าอินพุทสำหรับการแพร่กระจาย

6. ทำการคำนวณการรั่วไหล

ขั้นตอนในการคำนวณการรั่วไหล ทำได้ดังนี้

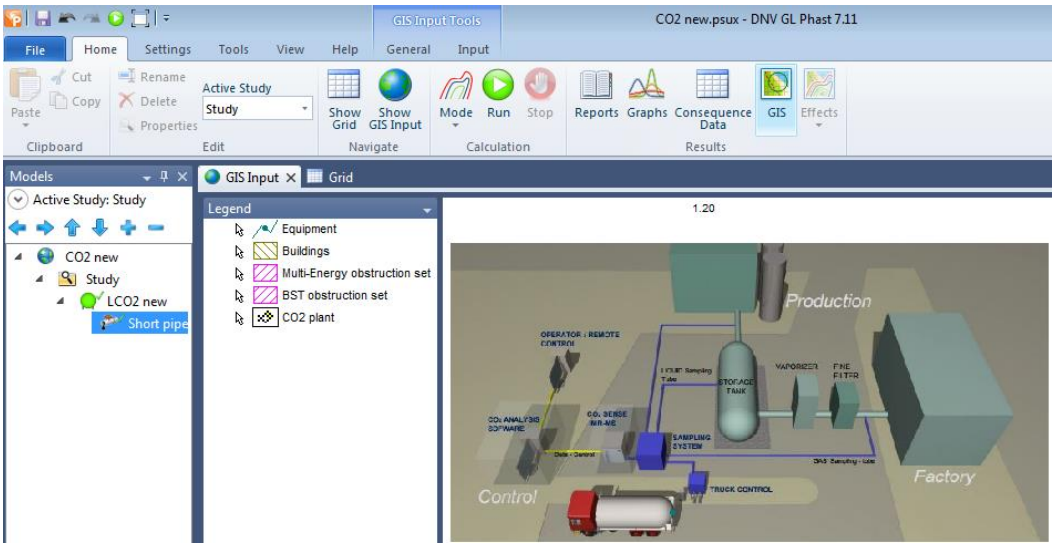
6.1 เลือกแบบจำลองท่อสั้น

6.2 กดปุ่มคำนวณการรั่วไหล (Run) ดังแสดงในภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 ปุ่มคำนวณการรั่วไหล

6.3 เมื่อโปรแกรมคำนวณการรั่วไหลเสร็จแล้ว กดปุ่ม GIS เพื่อให้โปรแกรมจำลองรูปร่างของกลุ่มควัน ดังแสดงในภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 ปุ่มจำลองรูปร่างของกลุ่มควัน

6.4 เลือกสภาพบรรยากาศที่ต้องการ

สภาพบรรยากาศที่มีอยู่ในโปรแกรมจำลองการรั่วไหล แบ่งเป็น 7 สภาพบรรยากาศ ดังแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 สภาพบรรยากาศในโปรแกรมจำลองการรั่วไหล

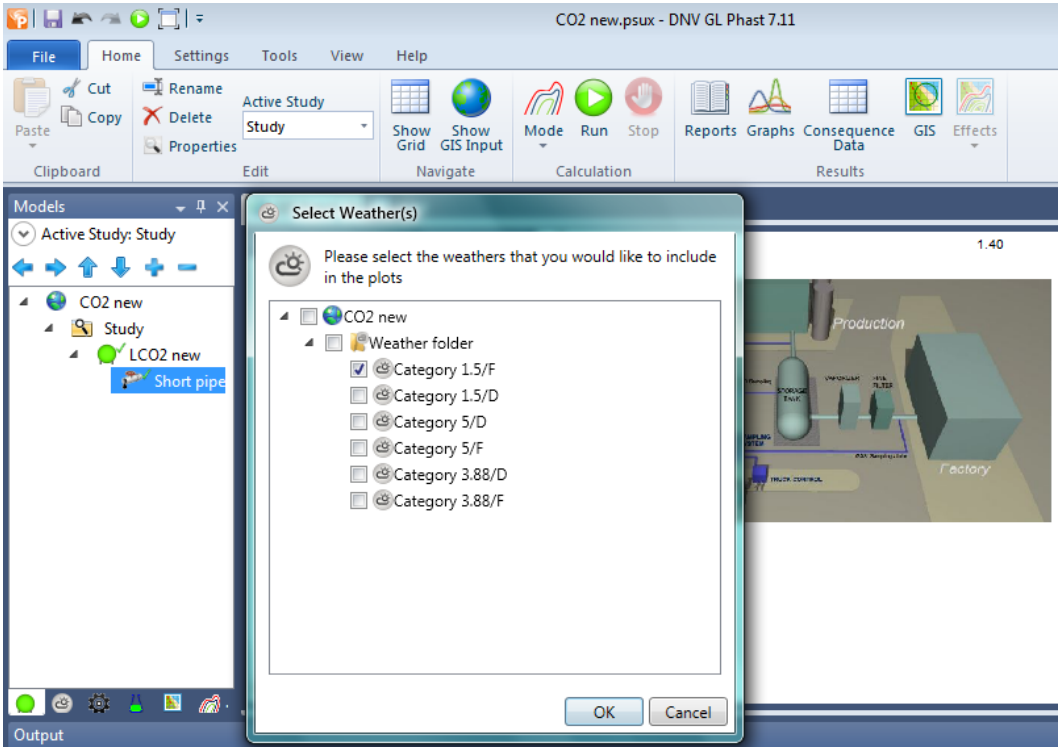
สภาพบรรยากาศ	คำอธิบาย
A	กลางวัน สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่อย่างมาก มีแดด และมีลมเล็กน้อย
B	กลางวัน สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ มีแดดน้อยกว่าแบบ A มีลมมากกว่าแบบ A
C	กลางวัน สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ปานกลาง มีแดดมากและมีลมแรงมาก
D	กลางวัน สภาพบรรยากาศกลาง ๆ มีแดดเล็กน้อย มีลมแรง
E	กลางคืน สภาพบรรยากาศคงที่ปานกลาง มีลมน้อยกว่าแบบ D
F	กลางคืน สภาพบรรยากาศคงที่ในตอนกลางคืน มีเมฆปานกลาง มีลมเล็กน้อยถึงปานกลาง
G	เป็นสภาพบรรยากาศคงที่มาก และมีหมอก

สภาพบรรยากาศคงที่ หมายถึง สภาพอากาศที่สงบ อาจจะมีฝนหรือหิมะตกอย่างช้า ๆ และคงที่ อาจจะมีแดด แต่สภาพอากาศจะไม่เปลี่ยนอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามความสูงจากระดับน้ำทะเล (The UCAR Center for science education, 2016)

สภาพบรรยากาศไม่คงที่ หมายถึง สภาพอากาศที่ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยอาจมีสัญญาณเตือนเพียงเล็กน้อย สภาพบรรยากาศไม่คงที่นี้ อาจทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองได้ อุณหภูมิจะต่ำลงเมื่อมีระดับความสูงเพิ่มขึ้นจากระดับน้ำทะเล

สภาพบรรยากาศกลาง ๆ หมายถึง สภาพบรรยากาศที่อยู่ระหว่างสภาพบรรยากาศคงที่และสภาพบรรยากาศไม่คงที่ เป็นสภาพอากาศที่มีแดดเล็กน้อย มีลมแรง อุณหภูมิค่อนข้างคงที่เมื่อมีระดับความสูงเพิ่มขึ้นจากระดับน้ำทะเล

ในงานนิพนธ์นี้ ใช้สภาพบรรยากาศ 2 สภาพ คือ สภาพบรรยากาศ D แทนเวลากลางวัน และสภาพบรรยากาศ F แทนเวลากลางคืน ซึ่งเป็นสภาพบรรยากาศที่แนะนำให้ใช้ในการทำแบบจำลองการรั่วไหล เนื่องจากเกิดขึ้นได้มากที่สุด (HSE, 2016) และในงานนิพนธ์จะแบ่งย่อยเพิ่มขึ้นอีกเป็น 6 แบบ ตามความเร็วลม คือ 1.5/F 1.5/D 3.88/F 3.88/D 5/F 5/D ดังแสดงในภาพที่ 3-9 ความหมายของแต่ละสภาพบรรยากาศ ดังแสดงในตารางที่ 3-6



ภาพที่ 3-9 การเลือกสภาพบรรยากาศที่ใช้ในการจำลองการรั่วไหล

ตารางที่ 3-6 สภาพบรรยากาศที่ใช้ในการจำลองการรั่วไหล

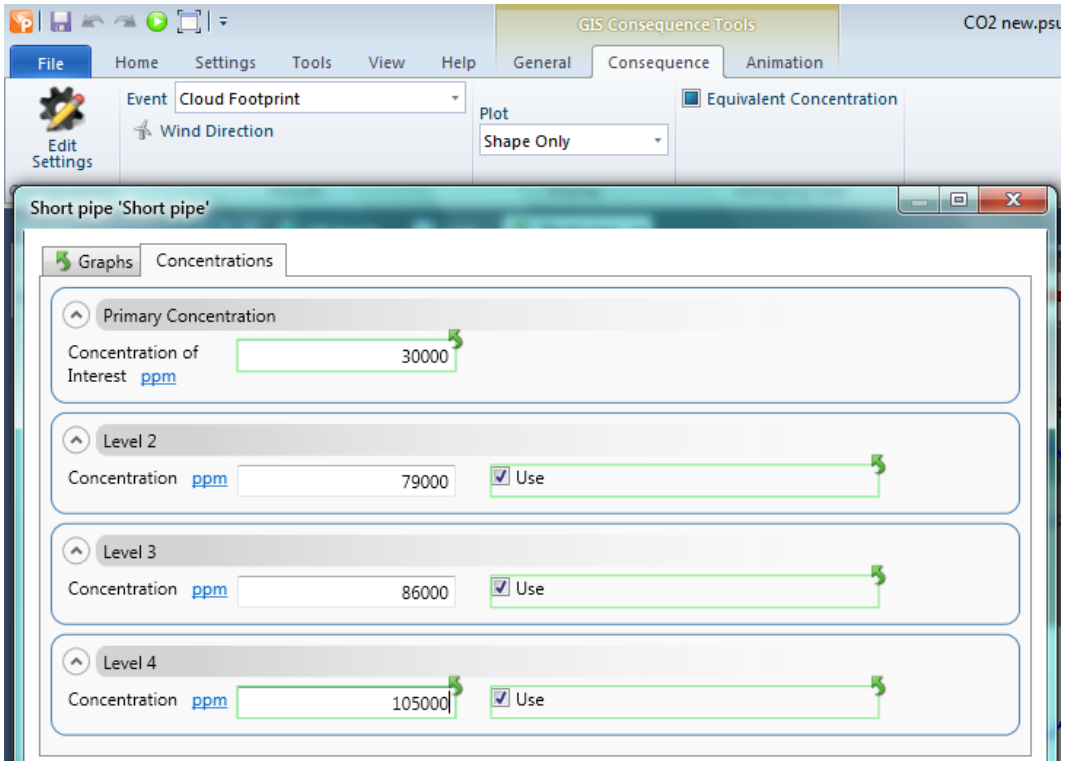
สภาพบรรยากาศ	คำอธิบาย	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
1.5/D	กลางวัน สภาพบรรยากาศกลาง ๆ	1.5
3.88/D	กลางวัน สภาพบรรยากาศกลาง ๆ	3.88
5/D	กลางวัน สภาพบรรยากาศกลาง ๆ	5
1.5/F	กลางคืน สภาพบรรยากาศคงที่	1.5
3.88/F	กลางคืน สภาพบรรยากาศคงที่	3.88
5/F	กลางคืน สภาพบรรยากาศคงที่	5

โดยความเร็วลมที่ใช้จำลองการรั่วไหล พิจารณาจากความเร็วลมระดับต่ำ คือ 1.5 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมเฉลี่ยของจังหวัดระยอง ระหว่างปี 2550-2554 คือ 3.88 เมตรต่อวินาที ดังตารางที่ 3-7 และความเร็วลมระดับสูงคือ 5 เมตรต่อวินาที

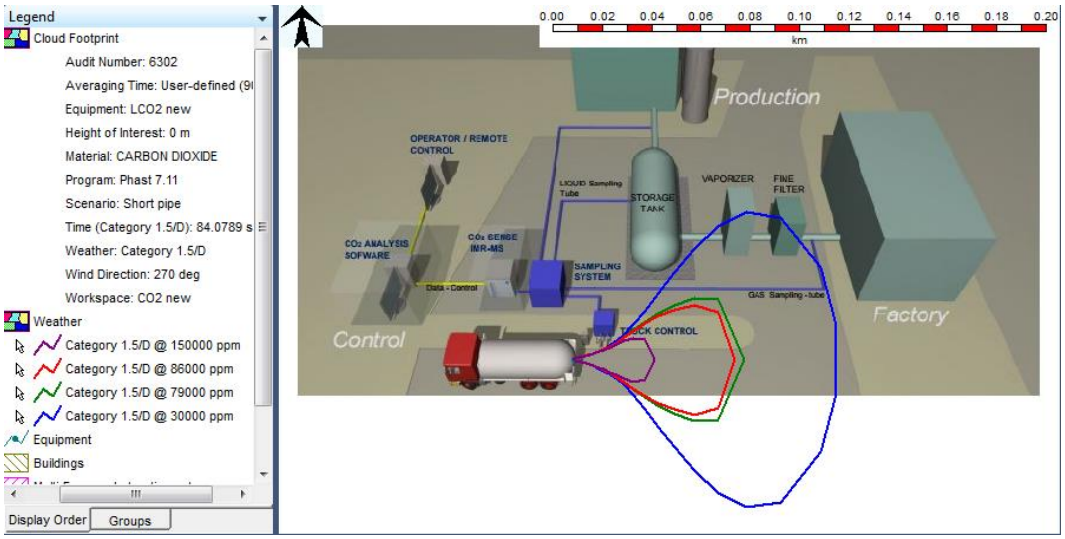
ตารางที่ 3-7 ความเร็วลมเฉลี่ยของจังหวัดระยอง ปี 2550-2554 (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2557)

ปี	ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
2550	3.70
2551	3.78
2552	3.62
2553	3.77
2554	4.57

6.5 เลือกระดับความเข้มข้นที่จะแสดงในผลการจำลองการรั่วไหล 4 ระดับ ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ในที่นี้เลือกที่ 30,000 ส่วนในล้านส่วน 79,000 ส่วนในล้านส่วน 86,000 ส่วนในล้านส่วน และ 105,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่รุนแรง ทำให้สูญเสียสติสัมปชัญญะไปจนถึงเสียชีวิตได้ ตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 หลังจากนั้น โปรแกรมจะแสดงรูปร่างของกลุ่มควันที่รั่วไหลตามระดับความเข้มข้นที่เลือกไว้แสดงบนแผนผังจำลองของโรงงาน ดังตัวอย่างในภาพที่ 3-11



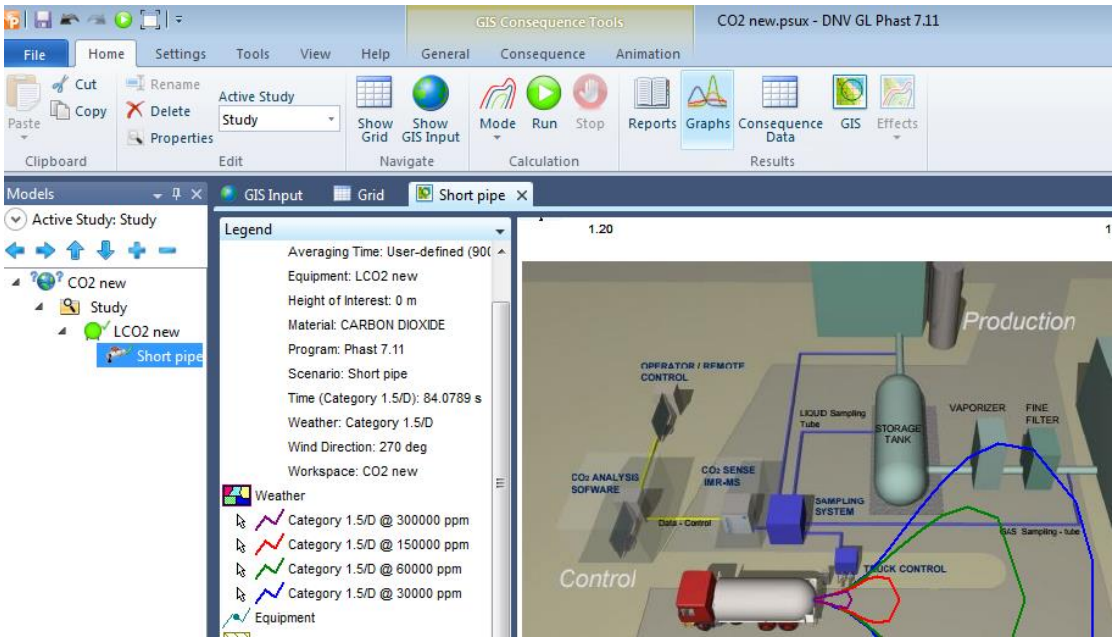
ภาพที่ 3-10 ใส่ความเข้มข้นที่แสดงในผลการจำลองการรั่วไหล



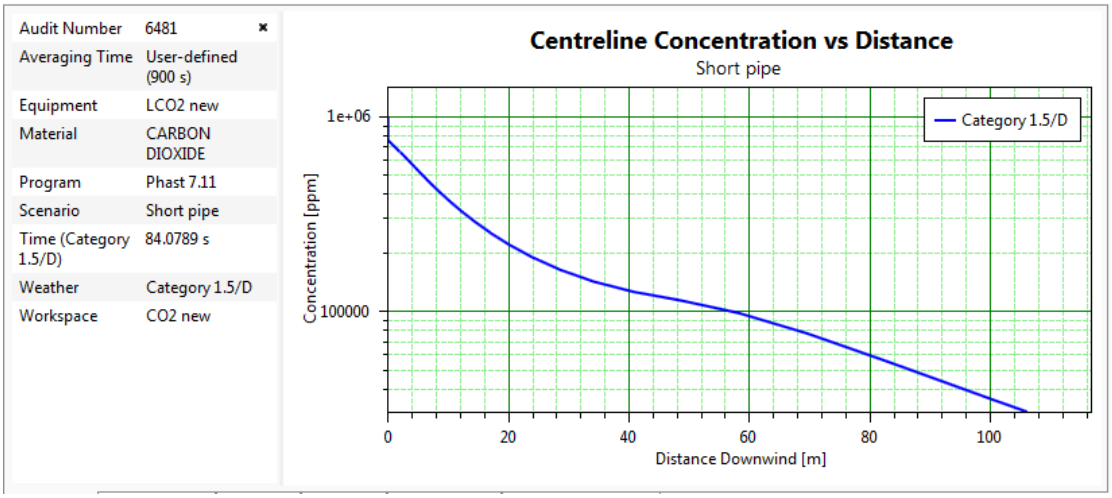
ภาพที่ 3-11 ลักษณะของกลุ่มควันในมุมมองด้านบน ตามระดับความเข้มข้นที่เลือกไว้ คือ กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) แสดงบนแผนผังจำลองของโรงงาน

จากภาพที่ 3-11 กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่เลือกไว้ คือ 30,000 ส่วนในล้านส่วน แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน แสดงด้วยเส้นสีเขียว กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน แสดงด้วยเส้นสีแดง กลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้นมากที่สุด คือ 105,000 ส่วนในล้านส่วนแสดงด้วยเส้นสีม่วง

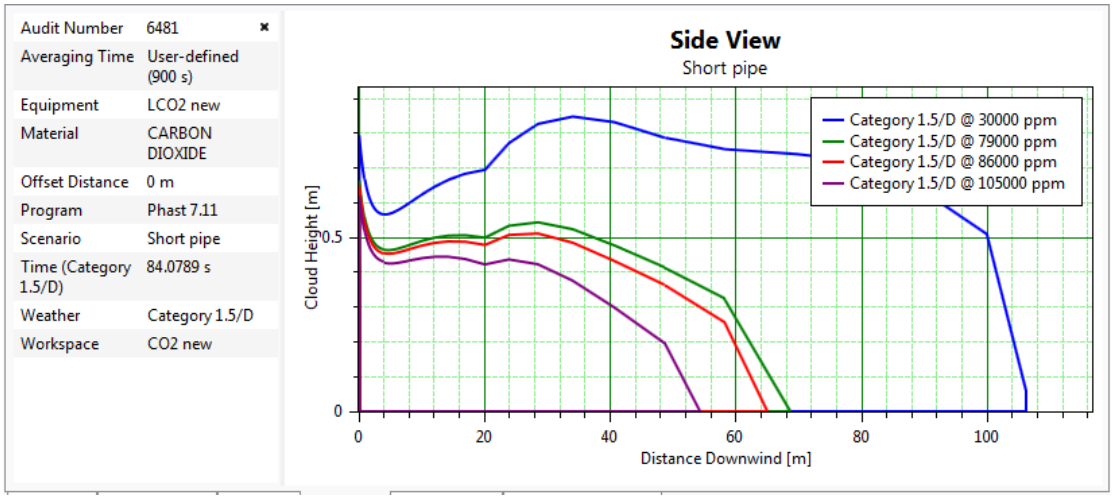
นอกจากนี้ สามารถแสดงการจำลองการรั่วไหลลงบนกราฟได้ โดยกดปุ่ม graph ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ซึ่งจะแสดงให้เห็นความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ดังตัวอย่างในภาพที่ 3-13 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความเข้มข้นของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากที่รั่วไหล เทียบกับระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง ซึ่งความเข้มข้นเริ่มจากมากที่สุด คือ 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดที่รั่วไหล (ระยะทาง 0 เมตร) ไปจนถึงระดับความเข้มข้นที่สนใจ ภาพที่ 3-14 แสดงให้เห็นมุมมองด้านข้างของกลุ่มควัน ที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง



ภาพที่ 3-12 ปุ่มแสดงการจำลองการรั่วไหลลงบนกราฟ



ภาพที่ 3-13 ความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง



ภาพที่ 3-14 มุมมองด้านข้างของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง

บทที่ 4
ผลงานนิพนธ์

ผลการจำลองสถานการณ์การรั่วไหล

จากการจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในระหว่างการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ล้นออกมาจากท่อล้นของรถขนส่งผ่านทางท่อขนาด 2 นิ้ว ได้ผลการจำลองดังนี้

1. อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 10.9773 กิโลกรัมต่อวินาที หากไหลจนหมดถัง 500 ตัน ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง

2. แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย แสดงระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง รวมถึงความกว้าง และรูปร่างของกลุ่มควัน โดยพิจารณาจากระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายถึงชีวิต แสดงในสถานการณ์จำลองที่ 1 ถึงสถานการณ์จำลองที่ 6

3. แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย แสดงระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง รวมถึงความกว้าง และรูปร่างของกลุ่มควัน โดยพิจารณาจากระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต แสดงในสถานการณ์จำลองที่ 7 ถึงสถานการณ์จำลองที่ 12

แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย

แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย แบ่งเป็น 6 การทดลอง คือ การรั่วไหลที่เกิดขึ้นตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.5 3.88 และ 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และการรั่วไหลที่เกิดขึ้นตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 3.88 และ 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

1. สถานการณ์จำลองที่ 1

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที แสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 1

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 1.5/D	105,000	14.83	54.3	31.16	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางวัน 1.5/D	86,000	22.18	64.97	41.69	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางวัน 1.5/D	79,000	24.99	68.7	45.48	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางวัน 1.5/D	30,000	59.68	106.92	84.07	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

จากสถานการณ์จำลองที่ 1 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 31.16 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 54.3 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 14.83 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 41.69 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 64.97 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 22.18 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 45.48 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 68.7 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 24.99 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ

ความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 84.07 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 106.92 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 59.68 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

2. สถานการณ์จำลองที่ 2

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 2

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 3.88/D	105,000	7.85	40.78	10.43	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางวัน 3.88/D	86,000	9.17	45.34	12.25	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางวัน 3.88/D	79,000	9.8	47	12.89	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางวัน 3.88/D	30,000	17.55	71.13	22.46	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

จากสถานการณ์จำลองที่ 2 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 10.43 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 40.78 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 7.85 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 12.25 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 45.34 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 9.17 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 12.89 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 47 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 9.8 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 22.46 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 71.13 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 17.55 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

3. สถานการณ์จำลองที่ 3

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-3

จากสถานการณ์จำลองที่ 3 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 7.60 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 37.65 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 5.88 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 8.61 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 41.09 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 6.79 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

ตารางที่ 4-3 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 3

สภาพอากาศและความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 5/D	105,000	5.88	37.65	7.60	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางวัน 5/D	86,000	6.79	41.09	8.61	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางวัน 5/D	79,000	7.13	43.01	9.20	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางวัน 5/D	30,000	12.74	65.41	15.74	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 9.20 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 43.01 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 7.13 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 15.74 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 65.41 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 12.74 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

4. สถานการณ์จำลองที่ 4

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 4

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 1.5/F	105,000	54.55	60	85.78	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางคืน 1.5/F	86,000	67.93	66.18	99.14	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางคืน 1.5/F	79,000	72.78	68.44	104.06	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางคืน 1.5/F	30,000	127.75	97.96	164.24	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

จากสถานการณ์จำลองที่ 4 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 85.78 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 60 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 54.55 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 99.14 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 66.18 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 67.93 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 104.06 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 68.44 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 72.78 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ

ความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 164.24 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 97.96 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 127.75 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

5. สถานการณ์จำลองที่ 5

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 5

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 3.88/F	105,000	18.34	37.44	21.11	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางคืน 3.88/F	86,000	20.43	40.08	23.3	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางคืน 3.88/F	79,000	21.22	41.41	24.41	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางคืน 3.88/F	30,000	34.72	59.61	39.56	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

จากสถานการณ์จำลองที่ 5 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 21.11 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 37.44 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 18.34 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 23.3 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 40.08 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 20.43 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 24.41 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 41.41 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 21.22 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 39.56 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 59.61 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 34.72 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

6. สถานการณ์จำลองที่ 6

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่หมดสติไปจนถึงเสียชีวิต ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-6

จากสถานการณ์จำลองที่ 6 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น หลังจากเกิดการรั่วไหลแล้ว 14.69 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 32.85 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 13.05 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 1 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน

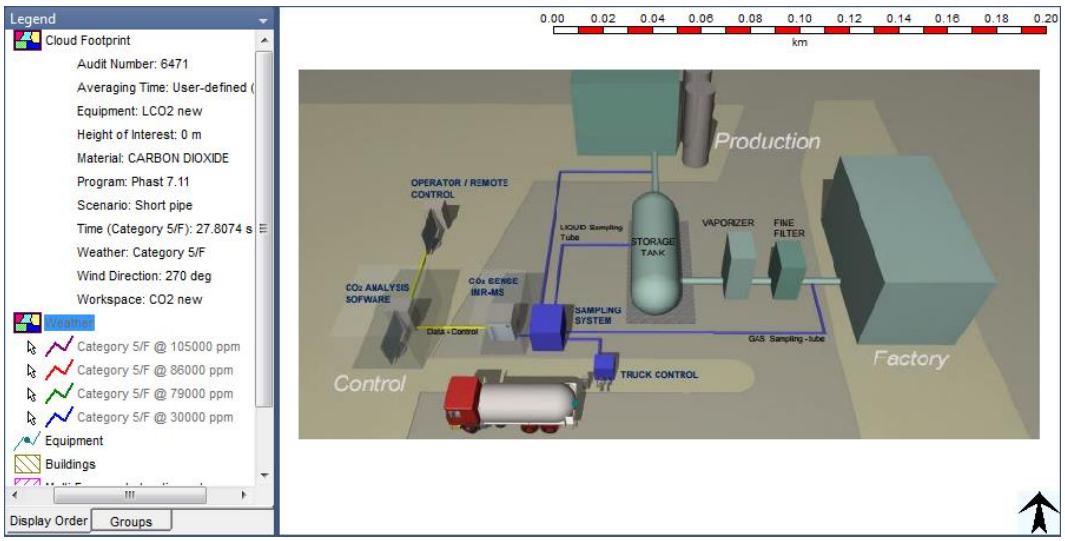
หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 16.48 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 35.62 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 14.3 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 5 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 86,000 ส่วนในล้านส่วน

ตารางที่ 4-6 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 6

สภาพอากาศและความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	เวลาที่กลุ่มควันใช้เดินทาง (วินาที)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (นาที)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 5/F	105,000	13.05	32.85	14.69	เสียชีวิต	1	SLOT
กลางคืน 5/F	86,000	14.3	35.62	16.48	เสียชีวิต	5	SLOT
กลางคืน 5/F	79,000	15.28	36.97	17.35	เสียชีวิต	10	SLOT
กลางคืน 5/F	30,000	25.26	53.68	27.80	สูญเสียสติสัมปชัญญะ	15	STEL

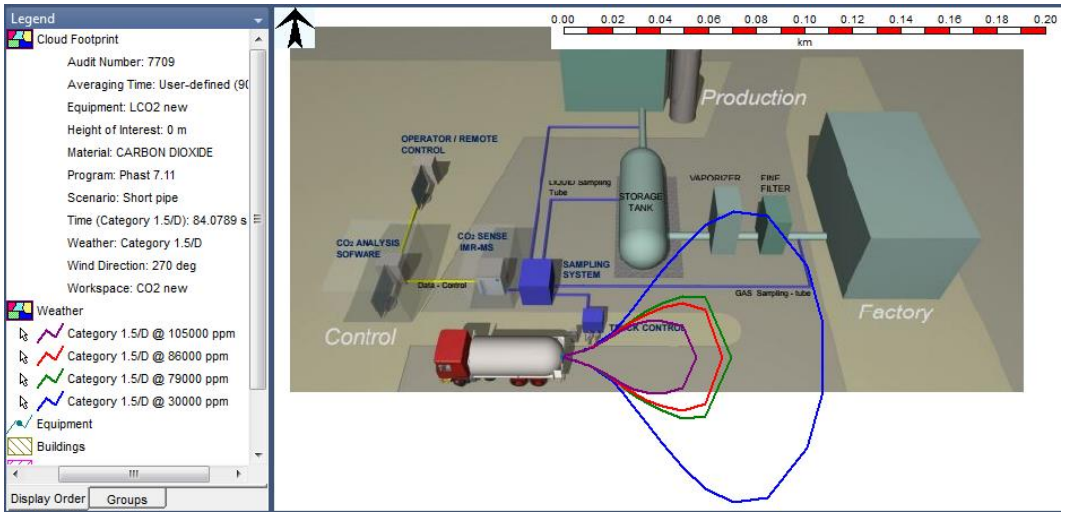
หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 17.35 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 36.97 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 15.28 เมตร จะเสียชีวิตภายใน 10 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 79,000 ส่วนในล้านส่วน

หลังจากการรั่วไหลผ่านไปแล้ว 27.80 วินาที พนักงานที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 53.68 เมตร หรือห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางขวางลมภายในระยะทาง 25.26 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที จากการสูดดมคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน

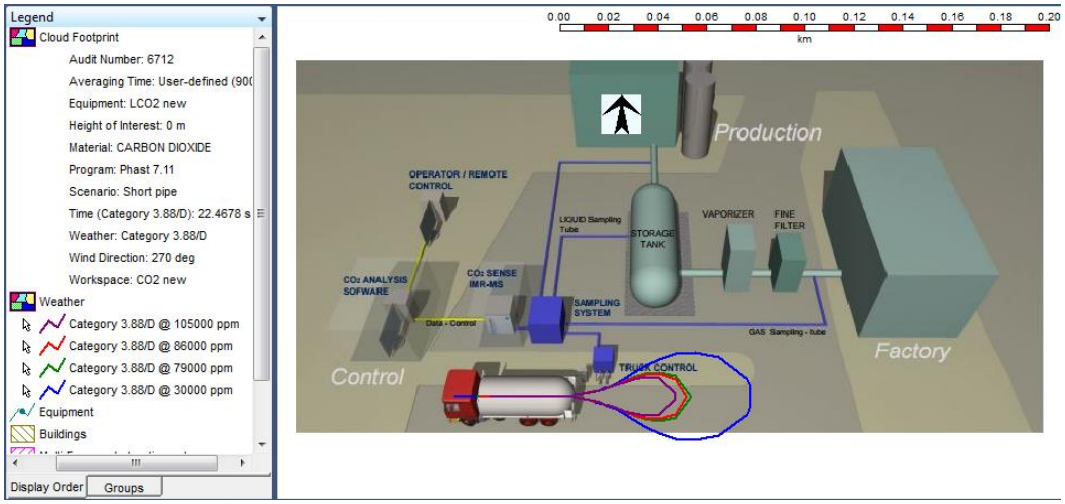


ภาพที่ 4-1 ภาพมุมมองด้านบนก่อนการรั่วไหล

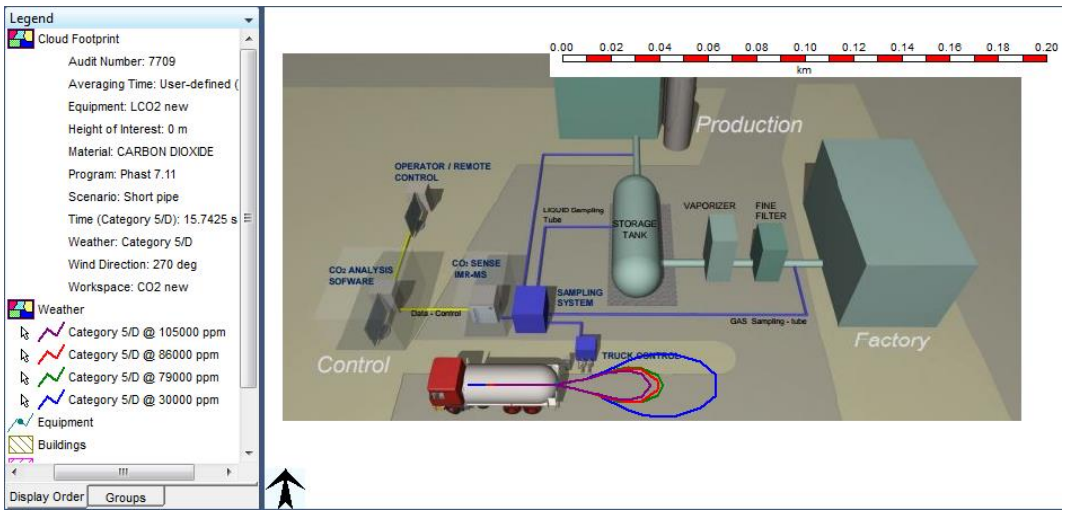
จากภาพที่ 4-2, 4-3 และภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่า ในตอนกลางวัน เมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลที่สุดในทุกความเข้มข้น ไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลรองลงมาตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความกว้างของกลุ่มควัน ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะกว้างมากที่สุด ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะมีความกว้างรองลงมาตามลำดับ



ภาพที่ 4-2 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 1 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



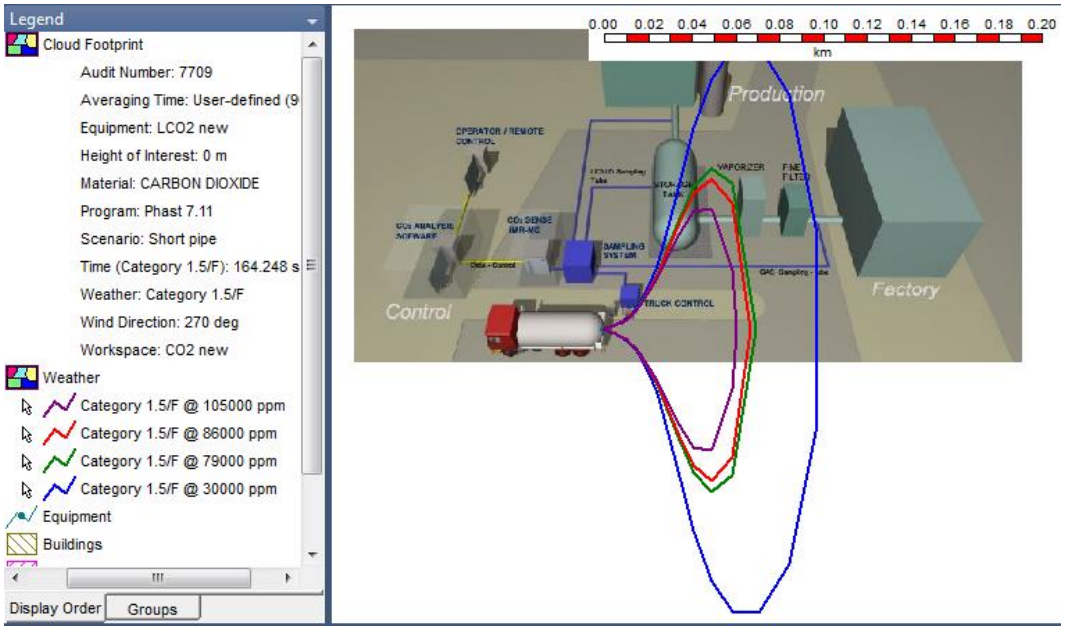
ภาพที่ 4-3 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 2 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที



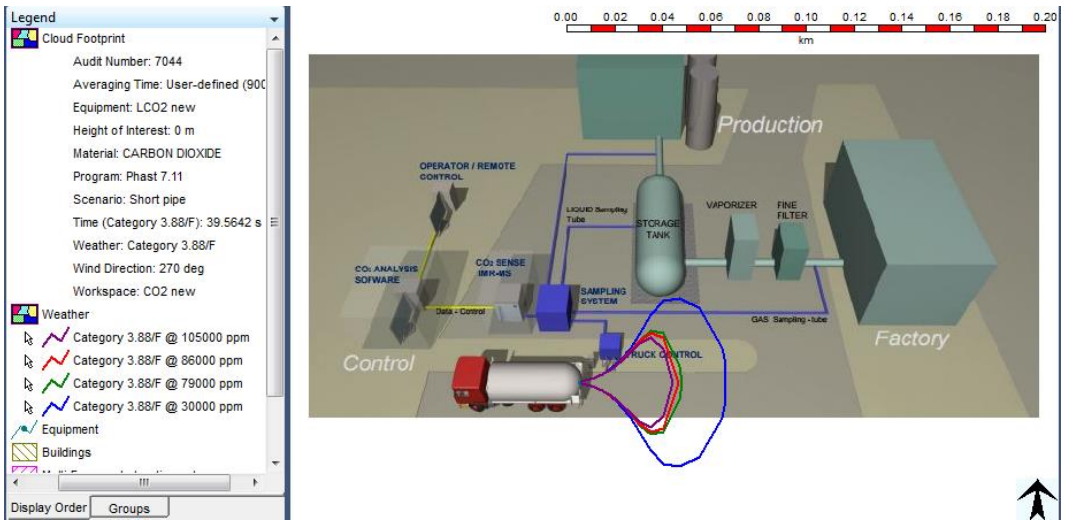
ภาพที่ 4-4 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 3 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 4-5, 4-6 และภาพที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่า ในตอนกลางคืน เมื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลที่สุดในทุกความเข้มข้น ไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลรองลงมาตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความกว้างของกลุ่มควัน ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะกว้างมากที่สุด ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะมีความกว้างรองลงมาตามลำดับ

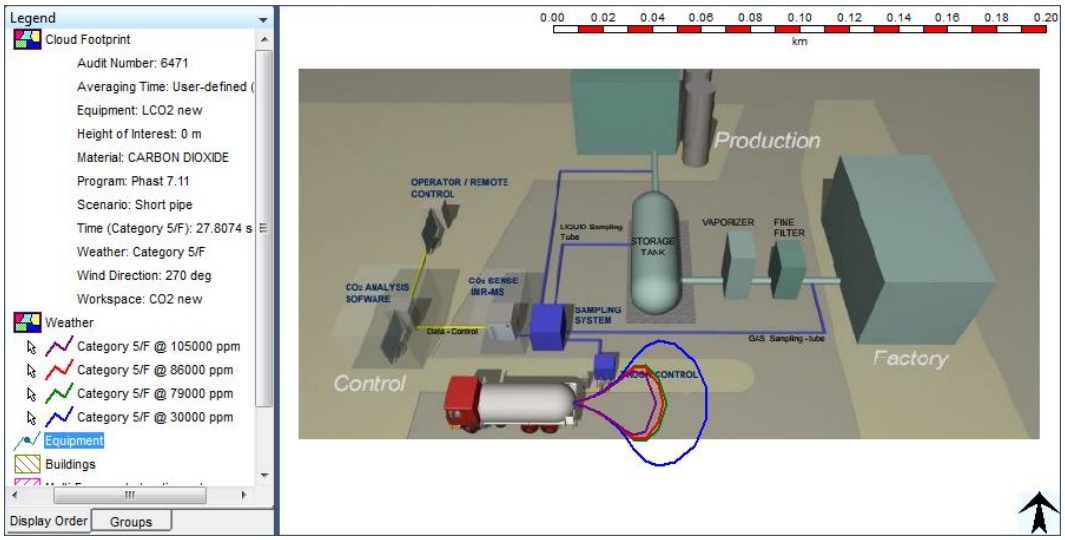
ดังนั้นจากภาพที่ 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6 และภาพที่ 4-7 สามารถสรุปได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นเวลากลางวันหรือเวลากลางคืน กลุ่มควันของคาร์บอนไดออกไซด์จะเดินทางไปได้ไกลกว่าและกว้างกว่าเมื่อความเร็วลมต่ำกว่า เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศเพราะมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศอีกด้วย (อุณหภูมิก่อนการรั่วไหลประมาณ -26 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจะสะสมอยู่ที่ระดับพื้นดิน และหากรั่วไหลในบรรยากาศที่ความเร็วลมสูง ปริมาตรของอากาศจะเข้ามาผสมกับกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะลดลง แต่หากรั่วไหลในบรรยากาศที่ความเร็วลมต่ำ ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะยังคงสูง เพราะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ หรืออธิบายได้ด้วยสมการ 2-29 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วลมสูง ค่าความเข้มข้นจะต่ำ ดังนั้นที่พิกัดเดียวกัน สถานการณ์ที่ความเร็วลมสูงกว่า ค่าความเข้มข้นที่พิกัดนั้นจะต่ำกว่า



ภาพที่ 4-5 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 4 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

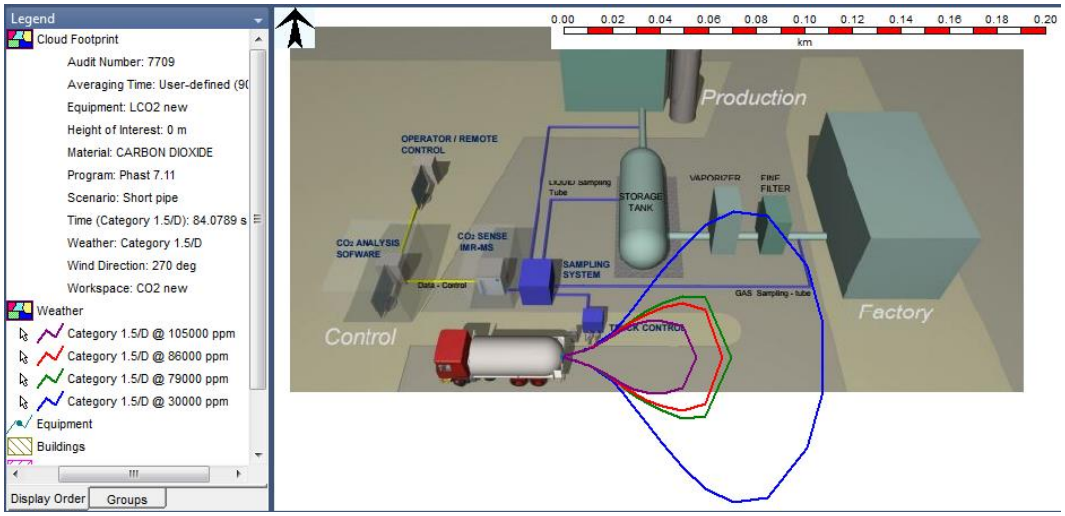


ภาพที่ 4-6 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 5 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที

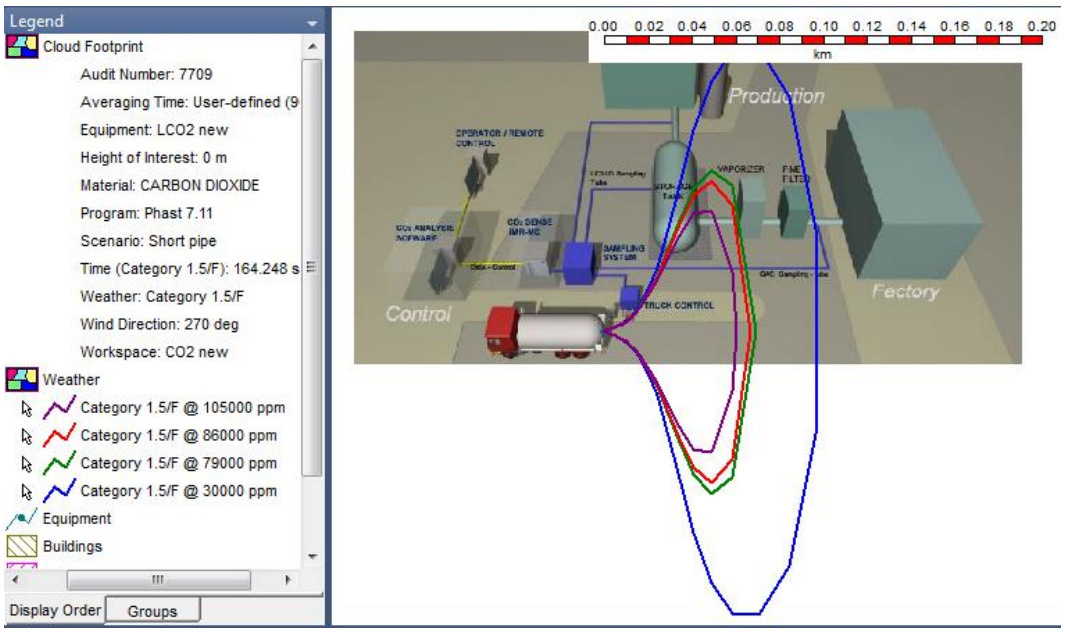


ภาพที่ 4-7 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 6 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

เพื่อเป็นการหาความแตกต่างของการรั่วไหลในตอนกลางวันกับกลางคืน จึงแสดงให้เห็นในภาพที่ 4-8 และภาพที่ 4-9 โดยเปรียบเทียบให้เห็นระหว่าง การรั่วไหลในตอนกลางวัน คือ ภาพที่ 4-8 กับตอนกลางคืน คือ ภาพที่ 4-9 ที่ระดับความเร็วลมเท่ากัน คือ 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่า กลุ่มควันเดินทางไปได้ระยะทางพอ ๆ กัน แต่ความกว้างของกลุ่มควันจะต่างกันอย่างชัดเจน โดยในตอนกลางคืน กลุ่มควันจะลักษณะกว้างกว่าตอนกลางวัน เนื่องจาก ตามคำอธิบายสภาพบรรยากาศในบทที่ 3 สภาพบรรยากาศ D (ตอนกลางวัน) นั้น คือ สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ ส่วนสภาพบรรยากาศ F (ตอนกลางคืน) เป็นสภาพบรรยากาศที่คงที่ หรือเรียกได้ว่า สภาพบรรยากาศ D ปั่นป่วนกว่า สภาพบรรยากาศ F เมื่อมีความปั่นป่วนมาก จะเพิ่มการผสมกันระหว่างกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ดังนั้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันจะลดลง ในขณะที่ สภาพบรรยากาศ F เป็นสภาพบรรยากาศคงที่ ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะยังคงสูง เพราะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ หรืออธิบายได้ด้วยสมการ 2-9 จะเห็นว่าเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายสูงหรือสภาพบรรยากาศมีความปั่นป่วนสูง ค่าความเข้มข้นจะต่ำ ดังนั้นที่พิกัดเดียวกัน สถานการณ์ที่สภาพบรรยากาศปั่นป่วนมากกว่า ค่าความเข้มข้นที่พิกัดนั้นจะต่ำกว่า



ภาพที่ 4-8 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางวัน

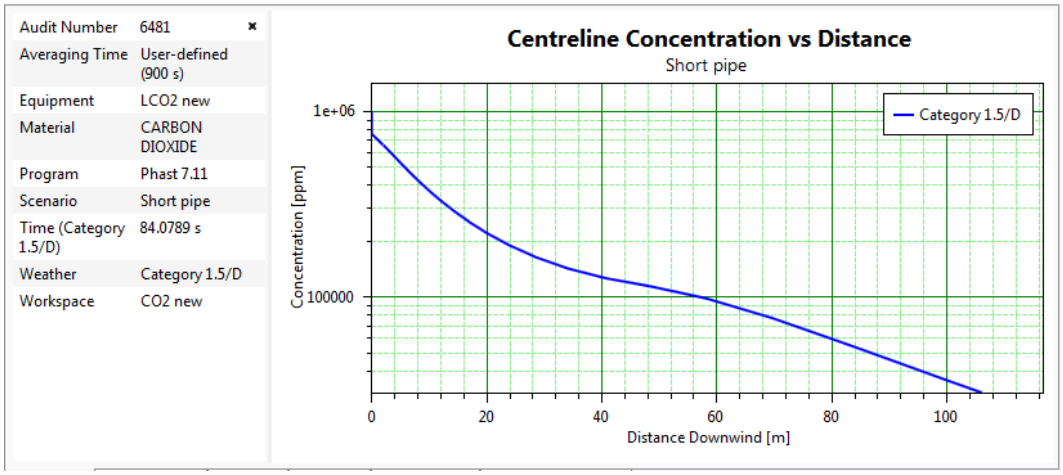


ภาพที่ 4-9 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางคืน

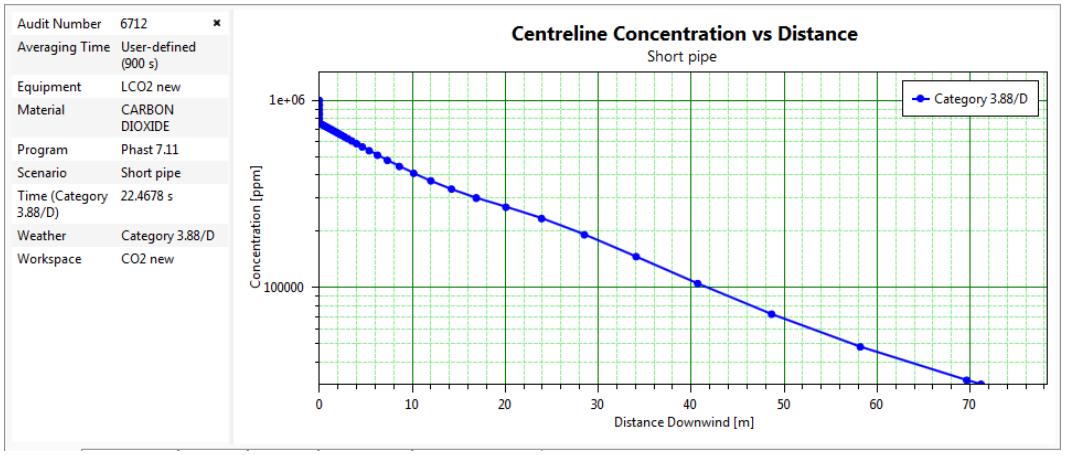
ภาพที่ 4-10, 4-11 และภาพที่ 4-12 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความเข้มข้นของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากที่รั่วไหลในตอนกลางวัน เทียบกับระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง ซึ่งความเข้มข้นเริ่มจากมากที่สุด คือ 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดที่รั่วไหล (ระยะทาง 0 เมตร) ไปจนถึงระดับความเข้มข้นที่สนใจ ซึ่งในสถานการณ์จำลองที่ 1 ถึง 3 ระดับความเข้มข้นที่สนใจจะเป็นระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย คือ 30,000 ส่วนในล้านส่วน จึงได้ใส่เป็นค่าอินพุทให้โปรแกรมหยุดคำนวณเมื่อกลุ่มควันเดินทางไปถึงระดับความเข้มข้นที่ 30,000 ส่วนในล้านส่วน จากภาพจะเห็นได้ว่า ภาพที่ 4-10 ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 84.07 วินาที วัดระยะทางได้ 106.92 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 106.92 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที

ภาพที่ 4-11 ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 22.46 วินาที วัดระยะทางได้ 71.13 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 71.13 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที

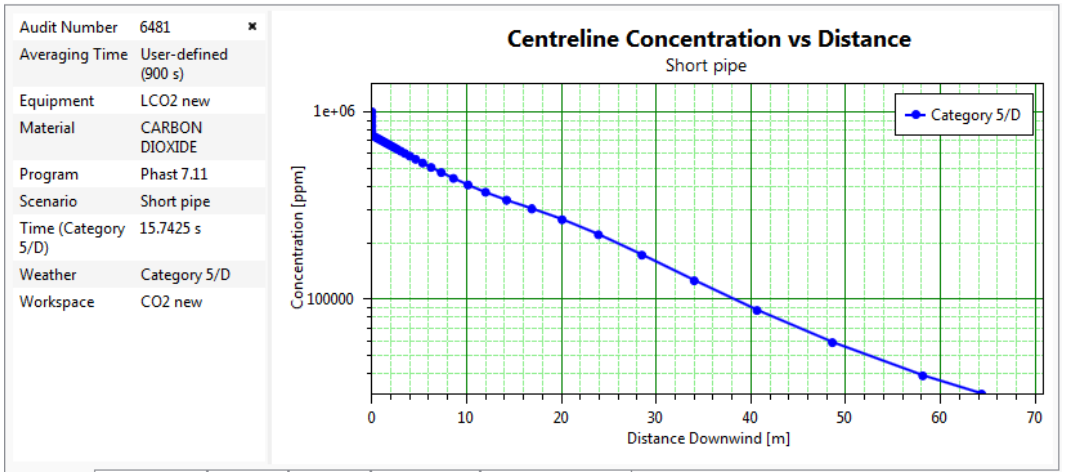
ภาพที่ 4-12 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 15.74 วินาที วัดระยะทางได้ 65.41 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 65.41 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 1 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 2 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 3 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

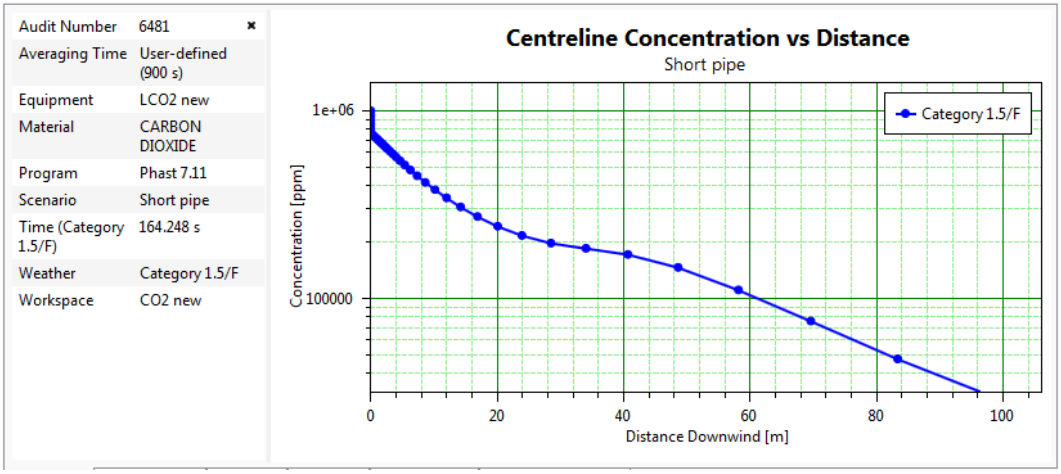
ภาพที่ 4-13, 4-14 และภาพที่ 4-15 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความเข้มข้นของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากที่รั่วไหลในตอนกลางคืน เทียบกับระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง ซึ่งความเข้มข้นเริ่มจากมากที่สุด คือ 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดที่รั่วไหล (ระยะทาง 0 เมตร) ไปจนถึงระดับความเข้มข้นที่สนใจ ซึ่งในสถานการณ์จำลองที่ 4 ถึง 6 ระดับความเข้มข้นที่สนใจจะเป็นระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย คือ 30,000 ส่วนในล้านส่วน จึงได้ใส่เป็นค่าอินพุทให้โปรแกรมหยุดคำนวณเมื่อกลุ่มควันเดินทางไปถึงระดับความเข้มข้นที่ 30,000 ส่วนในล้านส่วน

จากภาพจะเห็นได้ว่า ภาพที่ 4-13 ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 164.24 วินาที วัดระยะทางได้ 97.96 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 97.96 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที

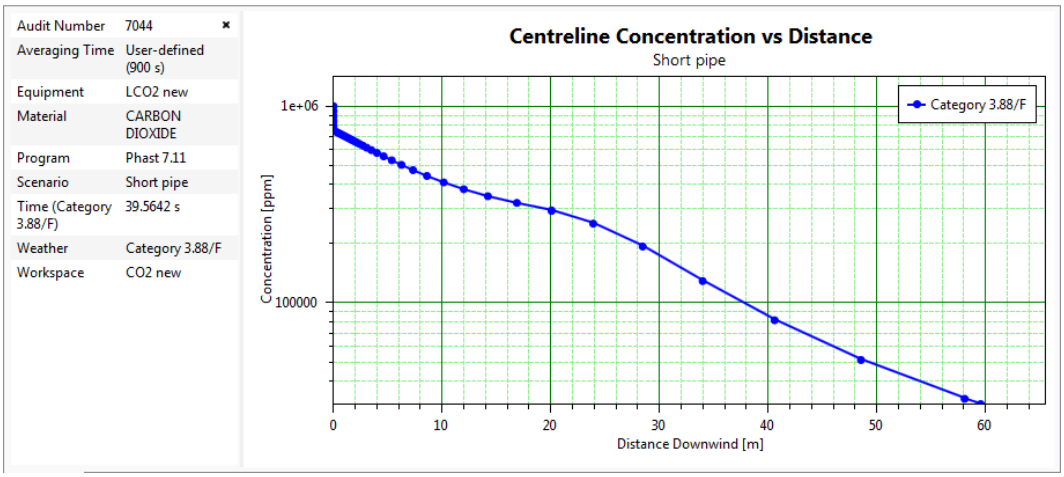
ภาพที่ 4-14 ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 39.56 วินาที วัดระยะทางได้ 59.61 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 59.61 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที

ภาพที่ 4-15 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันเริ่มเดินทางจากความเข้มข้น 1,000,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จุดรั่วไหล และเดินทางต่อไปด้วยความเข้มข้นต่ำลงเรื่อย ๆ เพราะผสมกับอากาศ จนถึงระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลาเดินทางประมาณ 27.80 วินาที วัดระยะทางได้ 53.68 เมตร หากมีคนอยู่ที่จุดนี้ สูดดมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะสูญเสียสติสัมปชัญญะภายใน 15 นาที และหากมีคนอยู่ที่ใกล้กับจุดรั่วไหลมากกว่า 53.68 เมตร จะสูญเสียสติสัมปชัญญะหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตภายในระยะเวลาน้อยกว่า 15 นาที

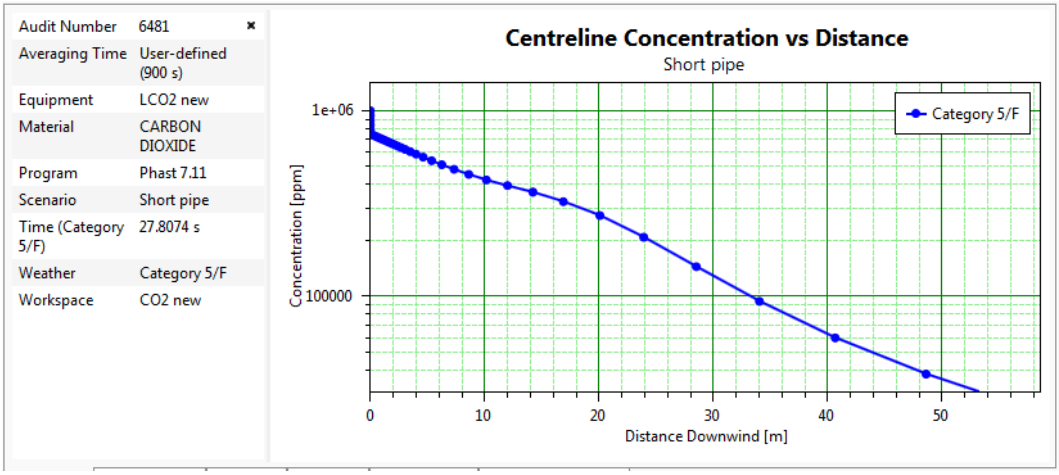
ดังนั้น ข้อมูลจากภาพที่ 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14 และภาพที่ 4-15 สามารถสรุปได้ว่า การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่ความเร็วลมต่ำ กลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์จะเดินทางไปได้ไกลกว่าที่ความเร็วลมสูง เนื่องจากในบรรยากาศที่ความเร็วลมต่ำ กลุ่มควันจะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ การลดลงของความเข้มข้นจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ และจะค่อย ๆ เคลื่อนตัวและแพร่กระจายไปในอากาศอย่างช้า ๆ จึงเดินทางไปได้ไกล แต่หากรั่วไหลในบรรยากาศที่ความเร็วลมสูง ปริมาตรของอากาศจะเข้ามาผสมกับกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะลดลงเร็วกว่า จึงเดินทางไปได้ใกล้กว่า



ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 4 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

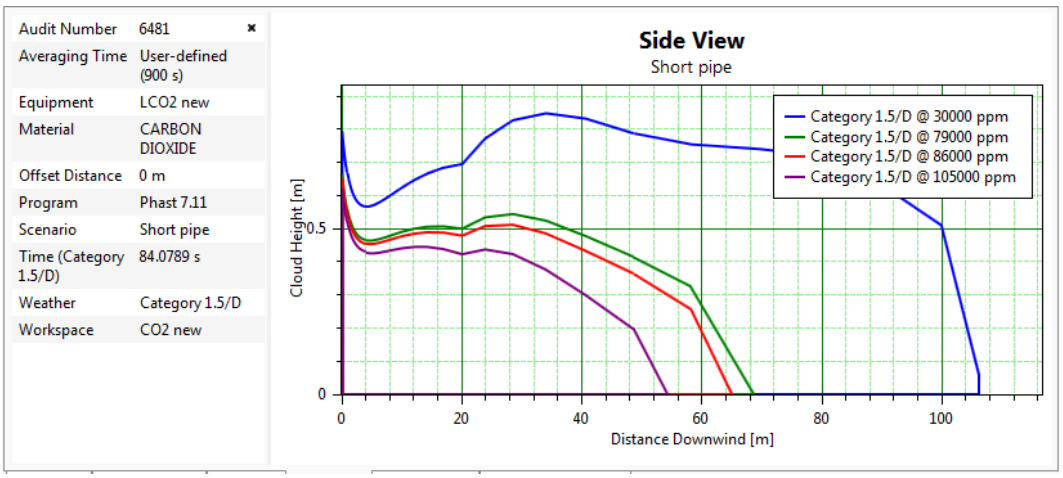


ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 5 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที

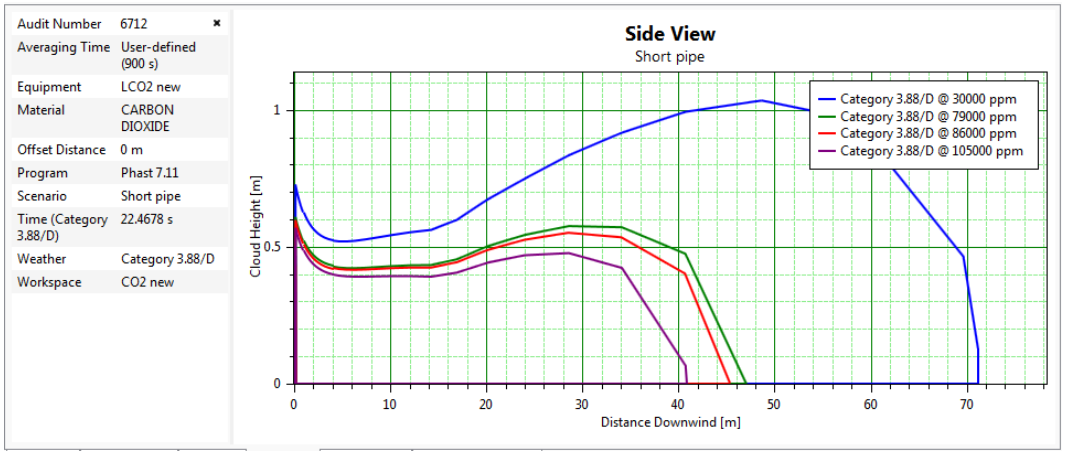


ภาพที่ 4-15 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 6 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

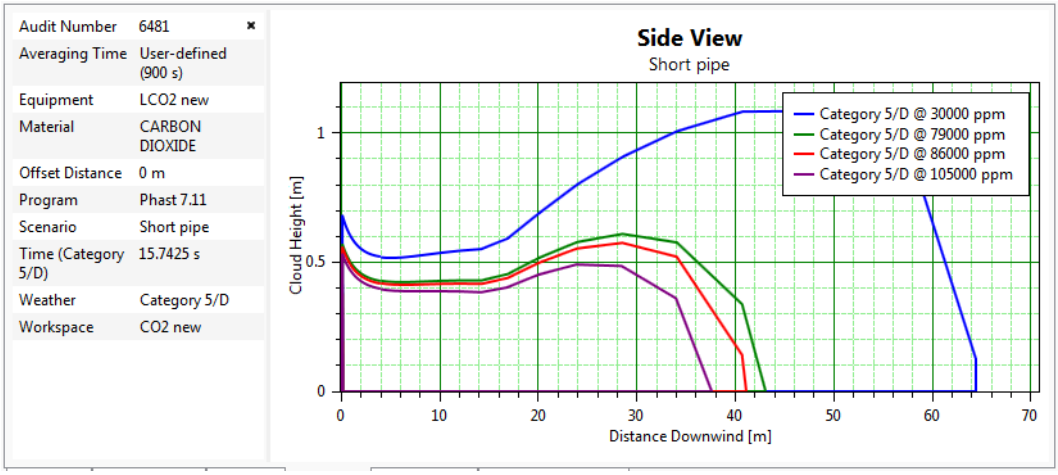
ภาพที่ 4-16, 4-17 และภาพที่ 4-18 แสดงมุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนกลางวันของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ที่ความเร็วลมต่างกัน โดย ภาพที่ 4-16 คือ ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-17 คือ ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-18 คือ ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที พบว่า รูปร่างของกลุ่มควันเมื่อมองจากด้านข้างนั้นไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วลม ส่วนความสูงของกลุ่มควันเมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 0.5-0.6 เมตรในทุกความเร็วลม ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 0.85-1.1 เมตรในทุกความเร็วลม



ภาพที่ 4-16 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 1 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-17 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 2 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที

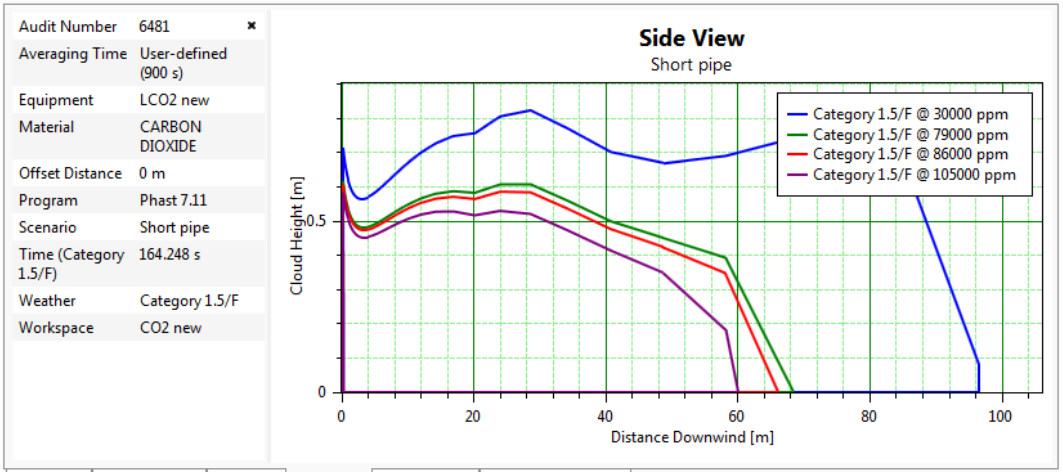


ภาพที่ 4-18 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 3 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

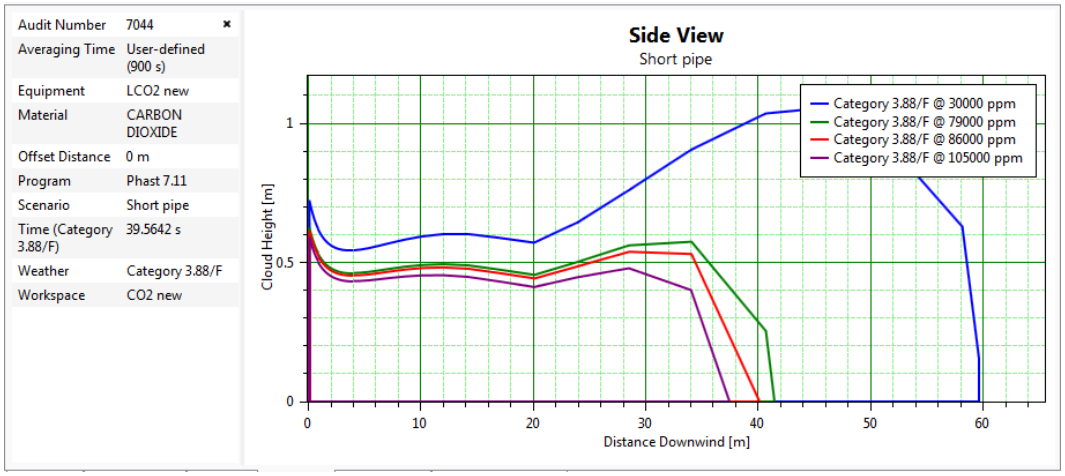
ภาพที่ 4-19, 4-20 และภาพที่ 4-21 แสดงมุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนกลางคืนของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ที่ความเร็วลมต่างกัน โดย ภาพที่ 4-19 คือ ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-20 คือ ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-21 คือ ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที พบว่า รูปร่างของกลุ่มควันเมื่อมองจากด้านข้างนั้นไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วลม ส่วนความสูงของกลุ่มควันเมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 0.4-0.6 เมตรในทุกความเร็วลม ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 0.8-1.1 เมตรในทุกความเร็วลม

เมื่อมองภาพของกลุ่มควันในมุมมองด้านข้างในภาพที่ 4-16, 4-17, 4-18, 4-19, 4-20 และภาพที่ 4-21 เปรียบเทียบกับภาพของกลุ่มควันในมุมมองด้านบนในภาพที่ 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6 และภาพที่ 4-7 แล้วแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศนั้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มควันจะไปในทิศทางตามลม (แนวนอน) และทิศทางขวางลม (แนวขวาง) ซึ่งจะเป็นลักษณะเดินทางไปได้ไกลและกว้าง แต่จะไม่ลอยขึ้นสูง ดังนั้นคนที่อยู่เหนือจากจุดรั่วไหล

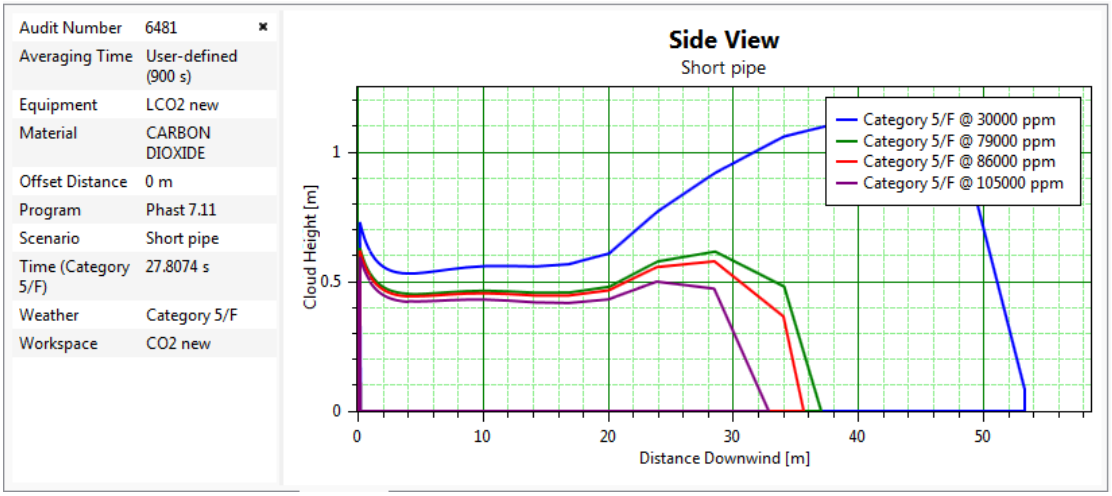
เกินกว่า 1.1 เมตร เช่น ทำงานอยู่บนนั่งร้าน จะไม่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย



ภาพที่ 4-19 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 4 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-20 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 5 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-21 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 86,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 79,000 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 30,000 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทาง ในการทดลองที่ 6 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

แบบจำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย

แบบจำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นไม่เป็นอันตราย แบ่งเป็น 6 การทดลอง คือ การรั่วไหลที่เกิดขึ้นตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.5 3.88 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และการรั่วไหลที่เกิดขึ้นตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 3.88 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

1. สถานการณ์จำลองที่ 7

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ (Permissible exposure limit: PEL) คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ตามค่าอ้างอิงของกระทรวงอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational safety and health administration หรือ OSHA) ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 7

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 1.5/D	5,000	124.74	189.75	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางวัน 1.5/D	1,000	227.6	293.56	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางวัน 1.5/D	350	354.24	522.77	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางวัน 1.5/D	250	391.83	644.7	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

จากสถานการณ์จำลองที่ 7 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 189.75 เมตร และทิศทางขวางลม 124.74 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้นการหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้ (U.S. bureau of land management, 2016)

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 293.56 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 227.6 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 522.77 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 354.24 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 644.7 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 391.83 เมตร ในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

2. สถานการณ์จำลองที่ 8

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 8

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 3.88/D	5,000	38.51	143.83	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางวัน 3.88/D	1,000	78.96	244.84	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางวัน 3.88/D	350	132.84	455.29	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางวัน 3.88/D	250	148.14	555.79	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

จากสถานการณ์จำลองที่ 8 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 143.83 เมตร และทิศทางขวางลม 38.51 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้นการหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 244.84 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 78.96 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 455.29 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 132.84 เมตร ในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 555.79 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 148.14 เมตร ในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

3. สถานการณ์จำลองที่ 9

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-9

จากสถานการณ์จำลองที่ 9 พบว่า ในเวลากลางวัน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 138.63 เมตร และทิศทางขวางลม 28.39 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้นการหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้

ตารางที่ 4-9 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 9

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางวัน 5/D	5,000	28.39	138.63	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางวัน 5/D	1,000	60.85	237.65	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางวัน 5/D	350	100.96	429.35	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางวัน 5/D	250	113.21	522.28	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 237.65 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 60.85 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 429.35 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 100.96 เมตร ในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 522.28 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 113.21 เมตร ในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

4. สถานการณ์จำลองที่ 10

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 10

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 1.5/F	5,000	237.06	175.03	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางคืน 1.5/F	1,000	460.17	450.12	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางคืน 1.5/F	350	714.87	1142.15	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางคืน 1.5/F	250	781.65	1542.76	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

จากสถานการณ์จำลองที่ 10 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลม ภายในระยะทาง 175.03 เมตร และทิศทางขวางลม 237.06 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้น

การหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 450.12 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 460.17 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1,142.15 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 714.87 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1,542.76 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 781.65 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

5. สถานการณ์จำลองที่ 11

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-11

จากสถานการณ์จำลองที่ 11 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 117.48 เมตร และทิศทางขวางลม 68.75 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้นการหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 386.75 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 147.28 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ตารางที่ 4-11 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 11

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 3.88/F	5,000	68.75	117.48	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางคืน 3.88/F	1,000	147.28	386.75	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางคืน 3.88/F	350	227.98	1023.92	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางคืน 3.88/F	250	248.52	1345.83	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1,023.92 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 227.98 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1,345.83 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 248.52 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

6. สถานการณ์จำลองที่ 12

จำลองสถานการณ์การรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ตั้งแต่ระดับปกติกลางแจ้ง ไปจนถึง ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ซึ่งสถานการณ์จำลองนี้ จำลองการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพอากาศตอนกลางคืน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ผลของสถานการณ์จำลองที่ 12

สภาพอากาศ และความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ระดับความเข้มข้นที่สนใจ (ส่วนในล้านส่วน)	ความกว้างครึ่งหนึ่งของกลุ่มควัน (เมตร)	ระยะทางที่กลุ่มควันเดินทางไปถึง (เมตร)	อันตรายหากได้รับสารพิษภายในระยะเวลาที่กำหนด	เวลาที่กำหนด (ชั่วโมง)	ค่าอ้างอิง
กลางคืน 5/F	5,000	64.82	141.31	ง่วงนอน กระตุ้นการหายใจ	8	PEL
กลางคืน 5/F	1,000	99.28	290.28	ระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี	-	
กลางคืน 5/F	350	154.81	706.76	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	
กลางคืน 5/F	250	187.27	1258.97	ระดับปกติกลางแจ้ง	-	

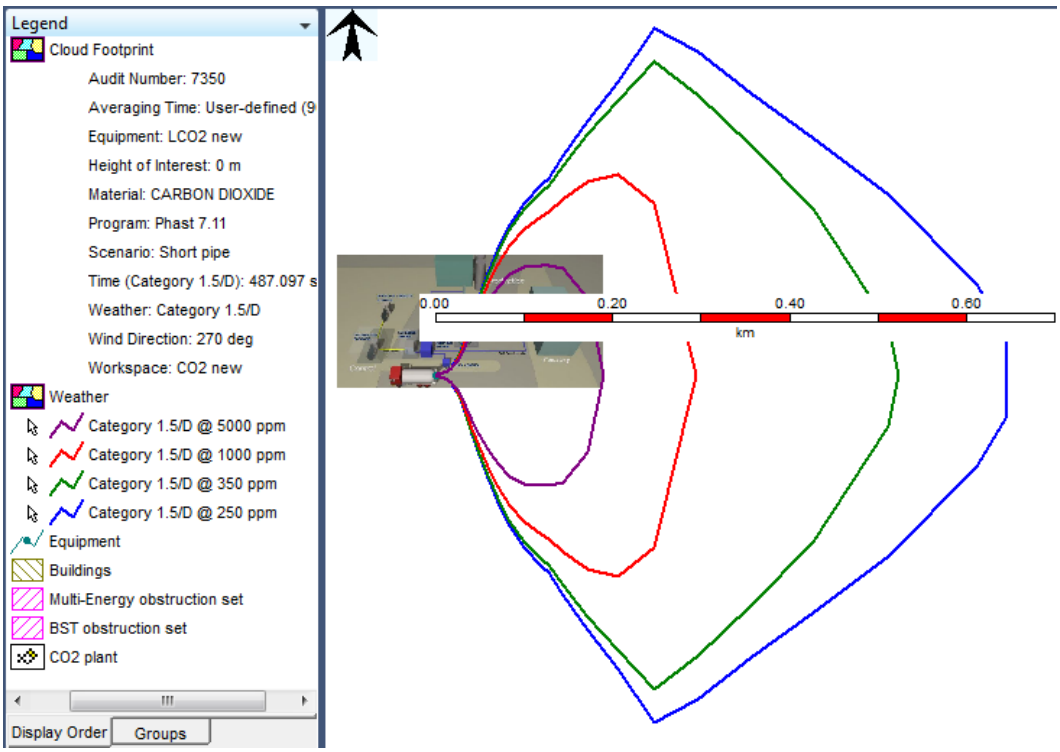
จากสถานการณ์จำลองที่ 12 พบว่า ในเวลากลางคืน ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที หากมีการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเกิดขึ้น ชุมชนที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลไปในทิศทางใต้ลมภายในระยะทาง 141.31 เมตร และทิศทางขวางลม 64.82 เมตร จะได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป จะมีอาการง่วงนอน และมีการกระตุ้นการหายใจ ซึ่งชุมชนภายในระยะทางดังกล่าว ไม่ควรสูดดมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่านี้เกินกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากหากเกินกว่านั้นจะมีผลต่อการทำงานของปอดได้

ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเรื่อย ๆ ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 290.28 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 99.28 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับปกติในอาคารที่มีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

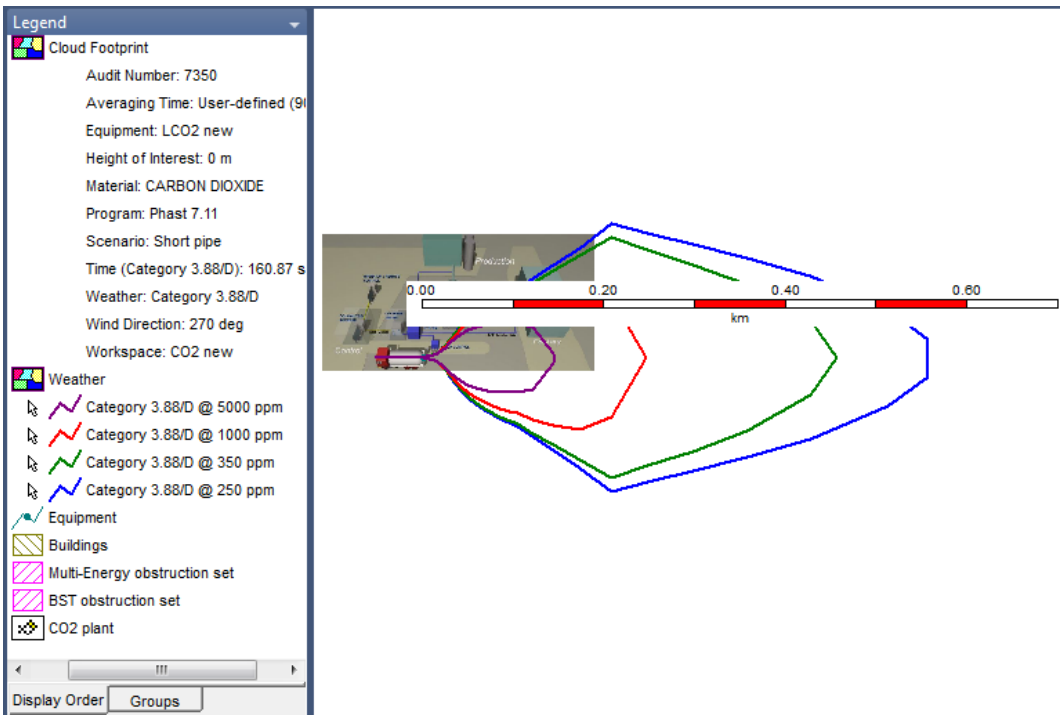
ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 706.76 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 154.81 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 350 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใด

ที่ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1,258.97 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 187.27 เมตรในทิศทางขวางลม วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปกติกลางแจ้ง ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไป จะไม่เกิดอันตรายแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน

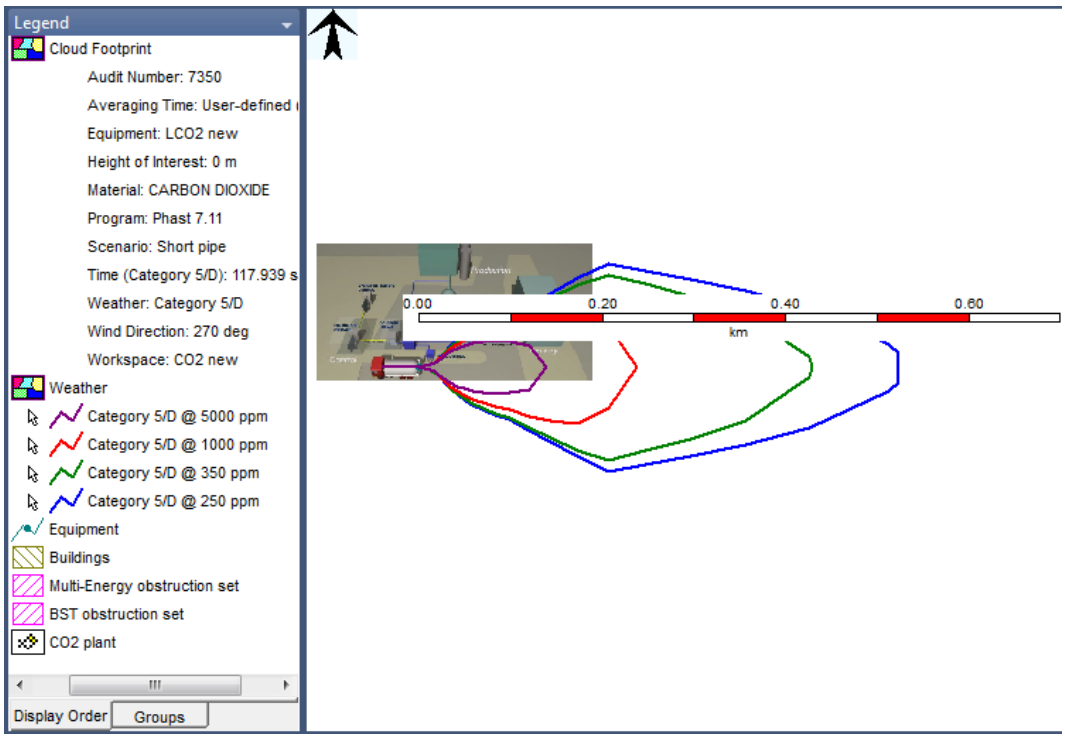
จากภาพที่ 4-22, 4-23 และภาพที่ 4-24 แสดงให้เห็นว่า ในตอนกลางวัน เมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลที่สุดในทุกความเข้มข้น ไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลรองลงมาตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความกว้างของกลุ่มควัน ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะกว้างมากที่สุด ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะมีความกว้างรองลงมาตามลำดับ



ภาพที่ 4-22 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 7 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

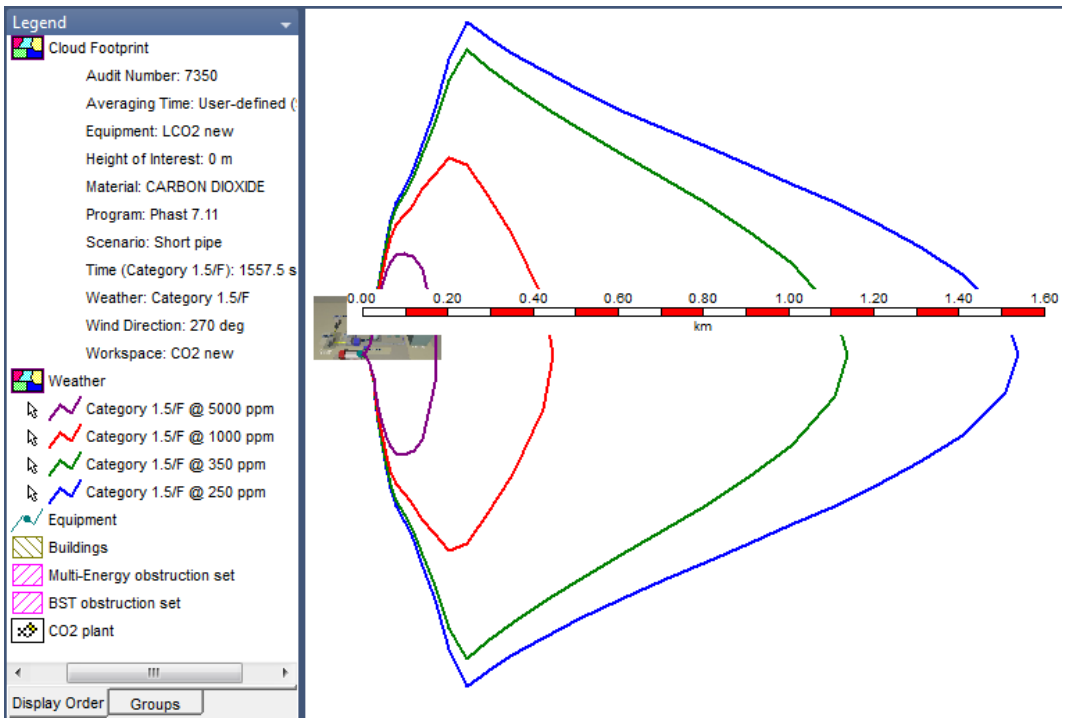


ภาพที่ 4-23 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 8 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที

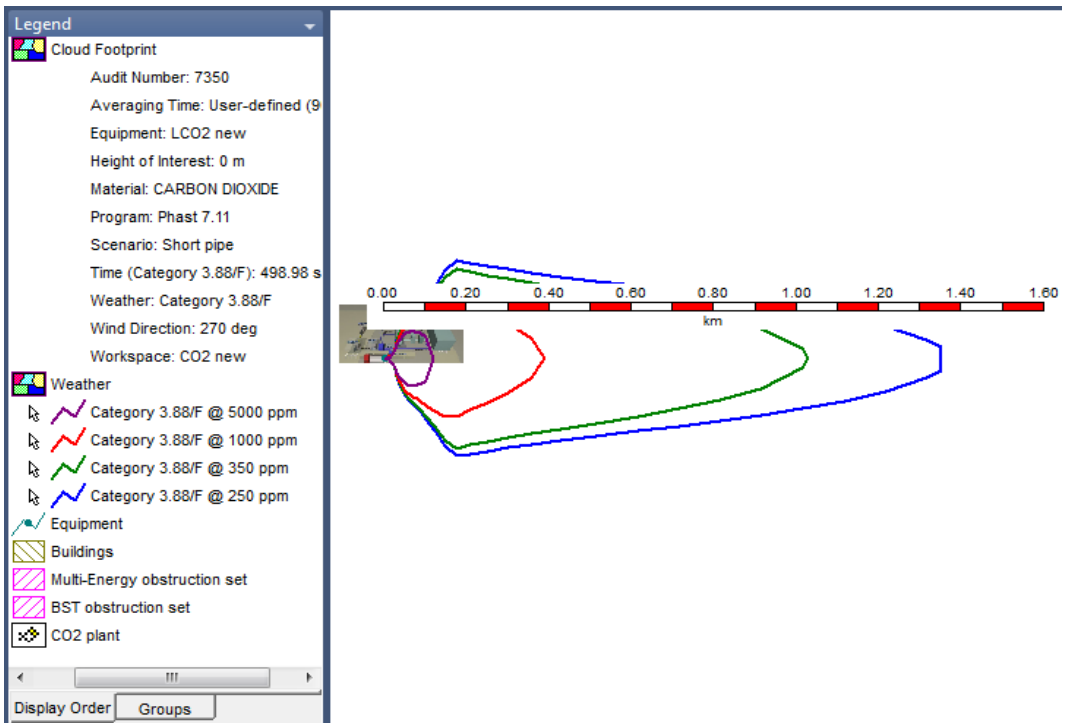


ภาพที่ 4-24 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 9 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

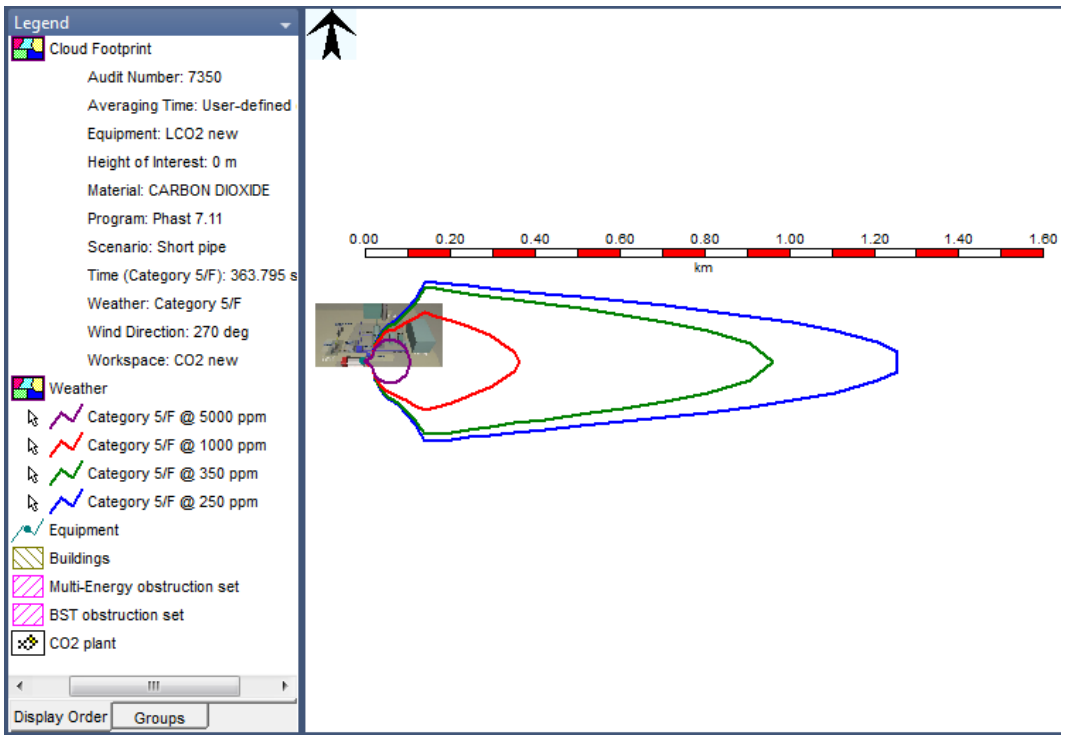
จากภาพที่ 4-25, 4-26 และภาพที่ 4-27 แสดงให้เห็นว่า ในตอนกลางคืน เมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลที่สุดในทุกความเข้มข้น ไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลรองลงมาตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความกว้างของกลุ่มควัน ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะกว้างมากที่สุด ส่วนที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที กลุ่มควันจะมีความกว้างรองลงมาตามลำดับ



ภาพที่ 4-25 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 10 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



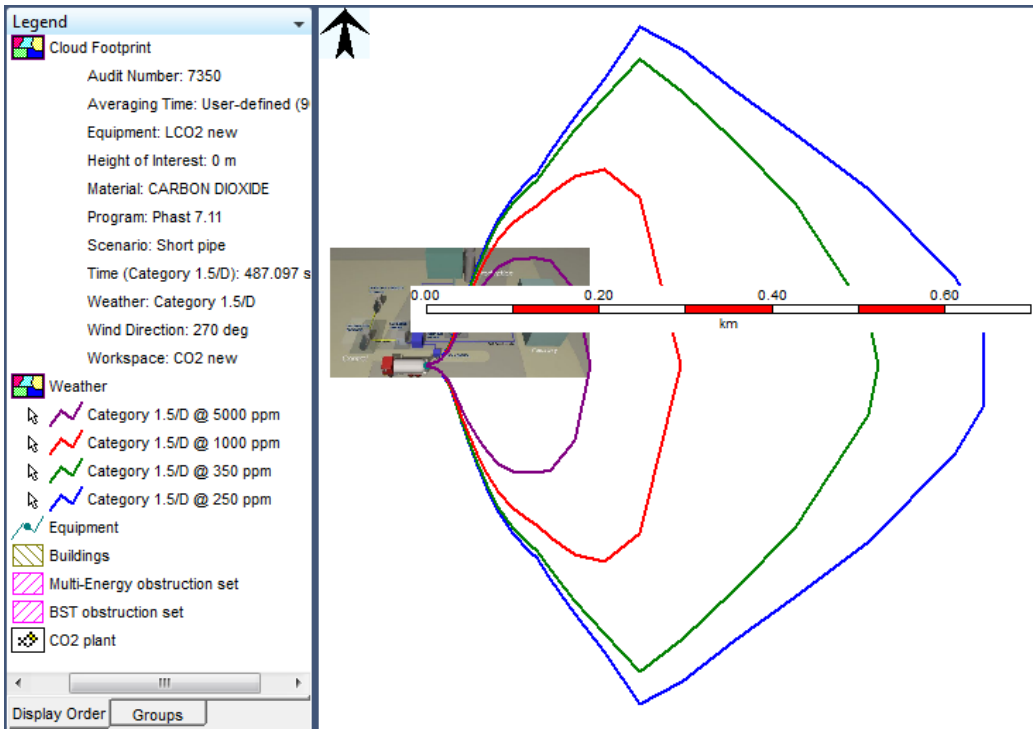
ภาพที่ 4-26 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 11 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที



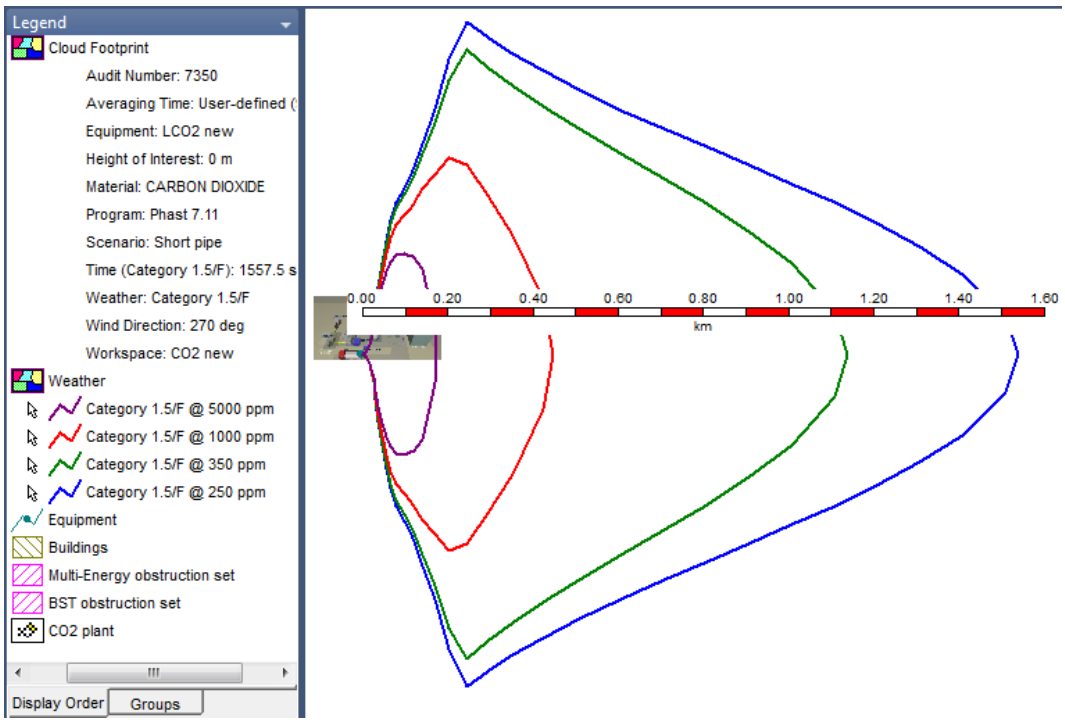
ภาพที่ 4-27 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหลของการทดลองที่ 12 แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

ดังนั้นจากภาพที่ 4-22, 4-23, 4-24, 4-25, 4-26 และภาพที่ 4-27 สามารถสรุปได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นเวลากลางวันหรือเวลากลางคืน กลุ่มควันของคาร์บอนไดออกไซด์จะเดินทางไปได้ไกลกว่าและกว้างกว่า เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศเพราะมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศอีกด้วย (อุณหภูมิก่อนการรั่วไหลประมาณ -26 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจะสะสมอยู่ที่ระดับพื้นดิน และหากรั่วไหลในบรรยากาศที่ความเร็วลมสูง ปริมาตรของอากาศจะเข้ามาผสมกับกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะลดลง แต่หากรั่วไหลในบรรยากาศที่ความเร็วลมต่ำ ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะยังคงสูง เพราะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ หรืออธิบายได้ด้วยสมการ 2-29 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วลมสูง ค่าความเข้มข้นจะต่ำ ดังนั้นที่พิกัดเดียวกัน สถานการณ์ที่ความเร็วลมสูงกว่าค่าความเข้มข้นที่พิกัดนั้นจะต่ำกว่า

เพื่อเป็นการหาความแตกต่างของการรั่วไหลในตอนกลางวันกับกลางคืน จึงแสดงให้เห็นในภาพที่ 4-28 และภาพที่ 4-29 โดยเปรียบเทียบให้เห็นระหว่าง การรั่วไหลในตอนกลางวัน คือ ภาพที่ 4-28 กับตอนกลางคืน คือ ภาพที่ 4-29 ที่ระดับความเร็วลมเท่ากัน คือ 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่า กลุ่มควันในตอนกลางคืนเดินทางไปได้ไกลกว่า และความกว้างของกลุ่มควันมากกว่า เนื่องจาก ตามคำอธิบายสภาพบรรยากาศในบทที่ 3 สภาพบรรยากาศ D (ตอนกลางวัน) นั้น คือ สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ ส่วนสภาพบรรยากาศ F (ตอนกลางคืน) เป็นสภาพบรรยากาศที่คงที่ หรือเรียกได้ว่า สภาพบรรยากาศ D ปั่นป่วนกว่า สภาพบรรยากาศ F เมื่อมีความปั่นป่วนมาก จะเพิ่มการผสมกันระหว่างกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ดังนั้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันจะลดลง ในขณะที่ สภาพบรรยากาศ F เป็นสภาพบรรยากาศคงที่ ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะยังคงสูง เพราะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ หรืออธิบายได้ด้วยสมการ 2-9 จะเห็นว่าเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายสูงหรือสภาพบรรยากาศมีความปั่นป่วนสูง ค่าความเข้มข้นจะต่ำ ดังนั้นที่พิกัดเดียวกัน สถานการณ์ที่สภาพบรรยากาศปั่นป่วนมากกว่า ค่าความเข้มข้นที่พิกัดนั้นจะต่ำกว่า

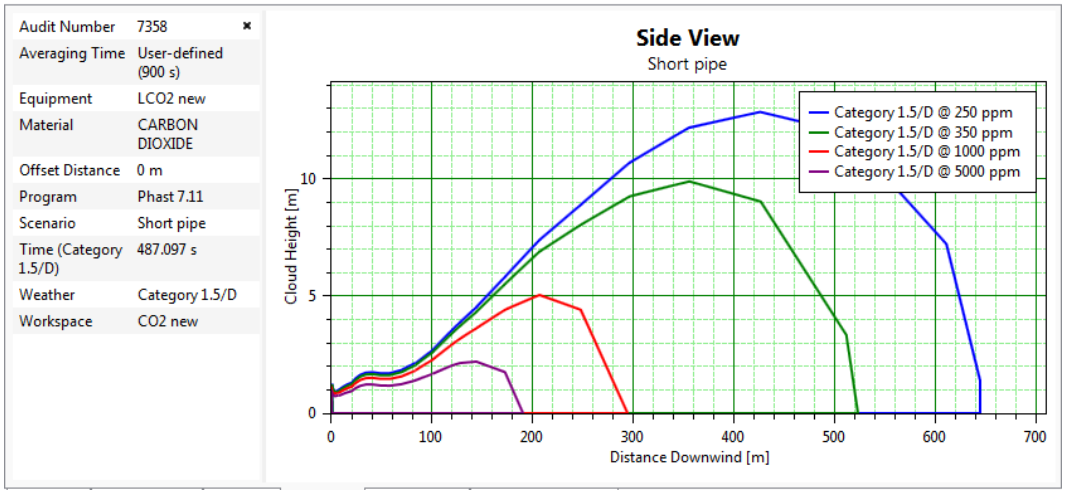


ภาพที่ 4-28 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางวัน

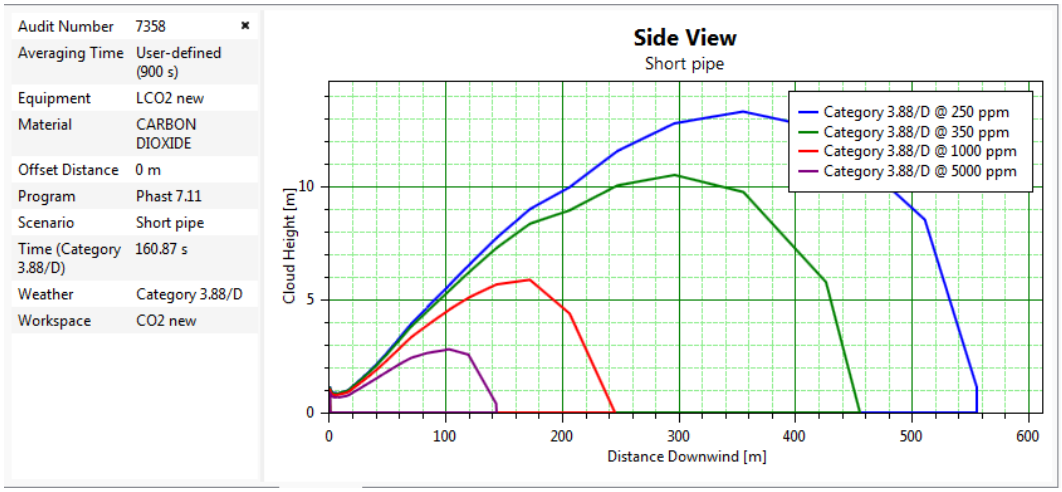


ภาพที่ 4-29 ภาพมุมมองด้านบนหลังการรั่วไหล แสดงกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ที่ทิศทางลม 270 องศา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที สภาพบรรยากาศตอนกลางคืน

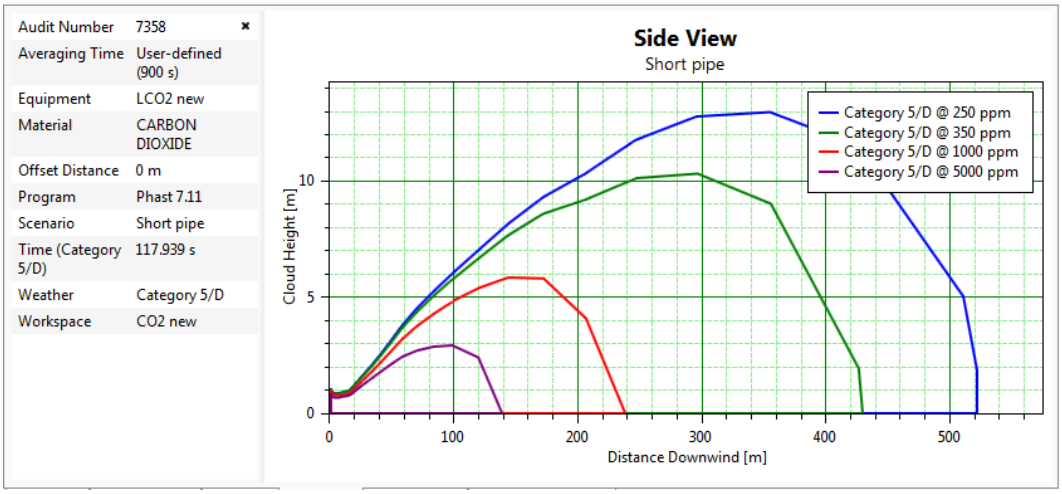
ภาพที่ 4-30, 4-31 และภาพที่ 4-32 แสดงมุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนกลางวันของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ที่ความเร็วลมต่างกัน โดยภาพที่ 4-30 คือ ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-31 คือ ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-32 คือ ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที พบว่า รูปร่างของกลุ่มควันเมื่อมองจากด้านข้างนั้นไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วลม ส่วนความสูงของกลุ่มควันเมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 3 เมตรในทุกความเร็วลม ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 6 เมตรในทุกความเร็วลม ที่ระดับความเข้มข้น 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 10 เมตรในทุกความเร็วลม ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 13 เมตรในทุกความเร็วลม



ภาพที่ 4-30 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 7 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-31 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 8 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที

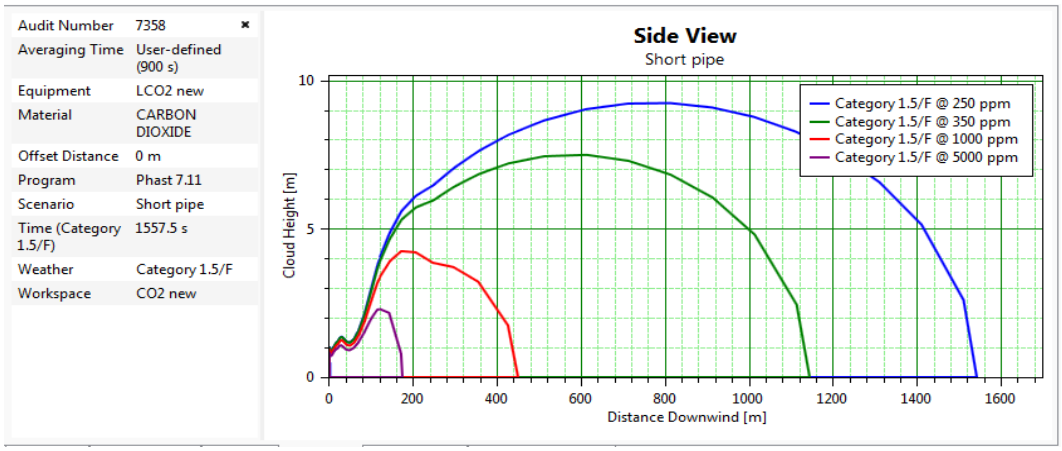


ภาพที่ 4-32 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 9 ในตอนกลางวัน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

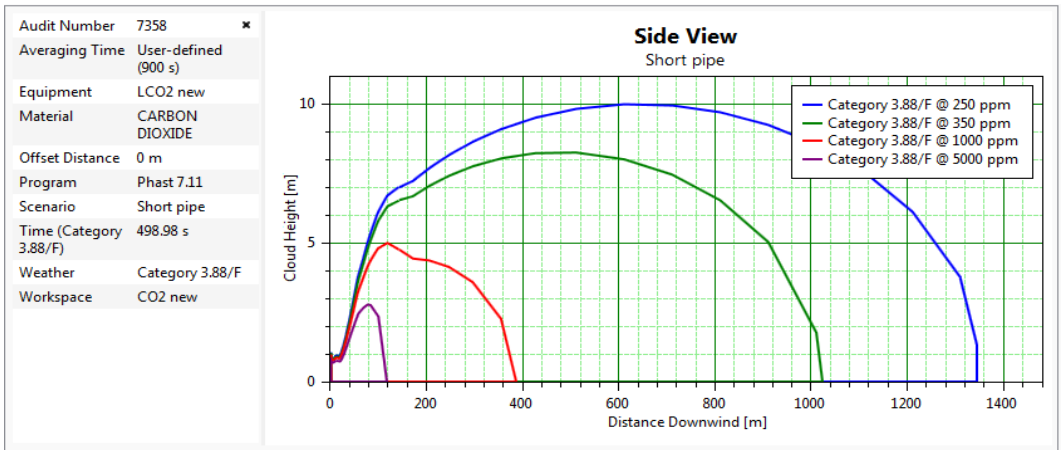
ภาพที่ 4-33, 4-34 และภาพที่ 4-35 แสดงมุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนกลางคืนของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง), 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) ซึ่งจะเห็นความสูงของกลุ่มควันเทียบกับระยะทาง ที่ความเร็วลมต่างกัน โดยภาพที่ 4-33 คือ ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-34 คือ ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที ภาพที่ 4-35 คือ ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที พบว่า รูปร่างของกลุ่มควันเมื่อมองจากด้านข้างนั้นไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วลม ส่วนความสูงของกลุ่มควันเมื่อเทียบระดับความเข้มข้นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 3 เมตรในทุกความเร็วลม ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 5 เมตรในทุกความเร็วลม ที่ระดับความเข้มข้น 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 7 เมตรในทุกความเร็วลม ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) กลุ่มควันมีความสูงประมาณ 10 เมตรในทุกความเร็วลม

เมื่อมองภาพของกลุ่มควันในมุมมองด้านข้างในภาพที่ 4-30, 4-31, 4-32, 4-33, 4-34 และภาพที่ 4-35 เปรียบเทียบกับภาพของกลุ่มควันในมุมมองด้านบนในภาพที่ 4-22, 4-23, 4-24, 4-25, 4-26 และภาพที่ 4-27 แสดงให้เห็นว่า คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ

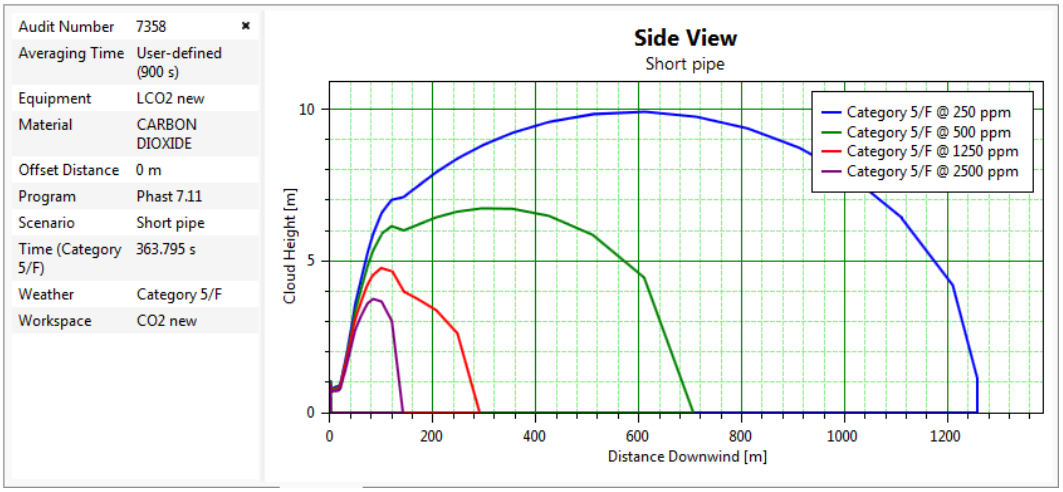
การเคลื่อนที่ของกลุ่มควันจะไปในทิศทางตามลม (แนวนอน) และทิศทางขวางลม (แนวขวาง) ซึ่งจะเป็นลักษณะเดินทางไปได้ไกลและกว้าง แต่จะไม่ลอยขึ้นสูง



ภาพที่ 4-33 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 10 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-34 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 11 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 3.88 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4-35 มุมมองด้านข้างหลังการรั่วไหลของกลุ่มควันที่มีระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน (สีม่วง) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (สีแดง) 350 ส่วนในล้านส่วน (สีเขียว) 250 ส่วนในล้านส่วน (สีน้ำเงิน) เทียบกับระยะทางในการทดลองที่ 12 ในตอนกลางคืน ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

ผลการศึกษาการจำลองสถานการณ์การรั่วไหล

จากการทดลองศึกษาการจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว พบว่า

1. ความเร็วลม ส่งผลให้การแพร่กระจายของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศแตกต่างกัน อธิบายได้ด้วยสมการ 2-29 หากความเร็วลมยิ่งต่ำ ที่พิกัดใดๆ ความเข้มข้นของกลุ่มควันจะยังคงสูง จึงเสมือนว่ากลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลกว่าและกว้างกว่า ก่อนที่จะเจือจางลง

2. สภาพบรรยากาศตอนกลางวันและกลางคืน ส่งผลให้การแพร่กระจายของกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ แตกต่างกัน โดยที่ ตอนกลางคืน กลุ่มควันจะเดินทางไปได้ไกลกว่าและจะมีลักษณะกว้างกว่า กลุ่มควันในตอนกลางวัน เนื่องจากสภาพบรรยากาศ D (ตอนกลางวัน) นั้น คือ สภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ ส่วนสภาพบรรยากาศ F (ตอนกลางคืน) เป็นสภาพบรรยากาศที่คงที่ หรือเรียกได้ว่า สภาพบรรยากาศ D ปั่นป่วนกว่า สภาพบรรยากาศ F เมื่อมีความปั่นป่วนมากจะเพิ่มการผสมกันระหว่างกลุ่มควันคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศ ดังนั้น ความเข้มข้นของกลุ่มควันจะลดลง ในขณะที่ สภาพบรรยากาศ F เป็นสภาพบรรยากาศคงที่ ความเข้มข้นของกลุ่มควันก็จะยังคงสูง เพราะผสมกับอากาศอย่างช้า ๆ หรืออธิบายได้ด้วยสมการ 2-9 จะเห็นว่าเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายสูงหรือสภาพบรรยากาศมีความปั่นป่วนสูง ค่าความเข้มข้นจะต่ำ

ดังนั้นที่พิกัดเดียวกัน สถานการณ์ที่สภาพบรรยากาศปั่นป่วนมากกว่า ค่าความเข้มข้นที่พิกัดนั้นจะต่ำกว่า

3. รูปร่างของกลุ่มควันเมื่อมองจากด้านข้างนั้นไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วลม และพบว่า ความเร็วลมและสภาพบรรยากาศ ไม่มีผลต่อความสูงของกลุ่มควัน เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศนั้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มควันจะไปในทิศทางตามลม (แนวนอน) และทิศทางขวางลม (แนวขวาง) ซึ่งจะเป็นลักษณะเดินทางไปได้ไกลและกว้าง แต่จะไม่ลอยขึ้นสูง

4. หากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นและไม่สามารถแก้ไขสถานการณ์ได้ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้พนักงานขับรถหรือพนักงานในโรงงานสูญเสียสติสัมปชัญญะ และสามารถไปแจ้งทีมตอบโต้สถานการณ์ฉุกเฉิน เข้ามากอบกู้สถานการณ์ได้ พนักงานจะต้องวิ่งออกจากจุดรั่วไหลไปถึงระยะที่ปลอดภัย ซึ่งถ้าเป็นในตอนกลางวัน ระยะทางที่ปลอดภัยจะต้องอยู่ห่างจากจุดรั่วไหลในทิศทางใต้ลม 106.92 เมตร และในทิศทางขวางลม 59.68 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณการรั่วไหลในตอนกลางวัน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ส่วนในตอนกลางคืน ระยะทางที่ปลอดภัยจะต้องอยู่ห่างจากจุดรั่วไหลในทิศทางใต้ลม 97.96 เมตร และในทิศทางขวางลม 127.75 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณการรั่วไหลในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

5. เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้คนในชุมชนได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อร่างกายเกินกว่าระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 5,000 ส่วนในล้านส่วน ใน 8 ชั่วโมง ตามค่าอ้างอิงของกระทรวงอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของประเทศสหรัฐอเมริกา ชุมชนจะต้องอยู่ห่างจากจุดรั่วไหลในโรงงานไม่ต่ำกว่า 175.03 เมตร (ในทิศทางใต้ลม) และไม่ต่ำกว่า 237.06 เมตร (ในทิศทางขวางลม) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณการรั่วไหลในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

6. การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่เท่ากับคาร์บอนไดออกไซด์ระดับปกติกลางแจ้งไปได้ไกลจนถึงระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดรั่วไหลออกไป 1542.76 เมตร ในทิศทางใต้ลม และ 781.65 เมตรในทิศทางขวางลม ซึ่งเป็นจุดที่วัดปริมาณความเข้มข้นได้ 250 ส่วนในล้านส่วน จากการคำนวณการรั่วไหลในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

ผลการประเมินความเสี่ยง

จากเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สามารถประเมินความเสี่ยงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากกระบวนการถ่ายเทจากถังเก็บเข้ารถขนส่ง ได้ดังนี้

1. โอกาสในการเกิดเหตุการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บ ไปยังรถขนส่ง จัดอยู่ในระดับ 3 คือ มีโอกาสในการเกิดปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 4-13 เนื่องจาก ประวัติการเกิดอุบัติเหตุการรั่วไหล ตั้งแต่พบว่ามีรายงานข่าวครั้งแรกในปี 2554 จนถึงปัจจุบันในปี 2559 เป็นระยะเวลา 5 ปี เกิดขึ้น 1 ครั้ง จึงจัดอยู่ในโอกาสในการเกิดปานกลาง เพราะความถี่ในการเกิด เกิดขึ้น 1 ครั้ง ในช่วง 1-5 ปี

ตารางที่ 4-13 ระดับโอกาสในการเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว อยู่ในระดับ 3

ระดับ	รายละเอียด
1	มีโอกาสในการเกิดยาก เช่น ไม่เคยเกิดเลยในช่วงเวลาตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป
2	มีโอกาสในการเกิดน้อย เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดขึ้น 1 ครั้ง ในช่วง 5-10 ปี
3	มีโอกาสในการเกิดปานกลาง เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดขึ้น 1 ครั้ง ในช่วง 1-5 ปี
4	มีโอกาสในการเกิดสูง เช่น ความถี่ในการเกิด เกิดมากกว่า 1 ครั้ง ใน 1 ปี

2. การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ แบ่งเป็น ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อบุคคลดังแสดงในตารางที่ 4-14 ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อชุมชนดังแสดงในตารางที่ 4-15 ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 4-16 ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สินดังแสดงในตารางที่ 4-17 ระดับความรุนแรงของเหตุการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บ ไปยังรถขนส่ง เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายในสถานการณ์จำลองที่ 1 ถึง 6 ที่ความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน ทุกสถานการณ์จำลองพบว่า ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล อยู่ในระดับ 4 เนื่องจากทำให้บุคคลเสียชีวิตได้ ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน อยู่ในระดับ 1 เนื่องจาก ระยะทางในทิศใต้ลมและในทิศขวางลม ยังอยู่ภายในบริเวณโรงงาน ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อยู่ในระดับ 1 เนื่องจาก ไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน อยู่ในระดับ 1 เนื่องจาก ไม่ได้ก่อให้เกิดทรัพย์สินเสียหาย ดังนั้น

ความรุนแรงสูงสุดจึงอยู่ในระดับ 4 ทุกสถานการณ์จำลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-18

เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายในสถานการณ์จำลองที่ 7 ถึง 12 ที่ความเข้มข้น 105,000 ส่วนในล้านส่วน ทุกสถานการณ์จำลองพบว่า ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล อยู่ในระดับ 1 เนื่องจากทำให้บุคคลแค่ง่วงนอน หรือมีการกระตุ้นการหายใจเท่านั้น ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน อยู่ในระดับ 1 เนื่องจากทำให้บุคคลในชุมชนแค่ง่วงนอน หรือมีการกระตุ้นการหายใจเท่านั้น ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อยู่ในระดับ 1 เนื่องจาก ไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน อยู่ในระดับ 1 เนื่องจาก ไม่ได้ก่อให้เกิดทรัพย์สินเสียหาย ดังนั้นความรุนแรงสูงสุดจึงอยู่ในระดับ 1 ทุกสถานการณ์จำลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-14 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	มีการบาดเจ็บเล็กน้อยในระดับปฐมพยาบาล
2	ปานกลาง	มีการบาดเจ็บที่ต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์
3	สูง	มีการบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยที่รุนแรง
4	สูงมาก	ทุพลภาพหรือเสียชีวิต

ตารางที่ 4-15 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	ไม่มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน หรือมีผลกระทบเล็กน้อย
2	ปานกลาง	มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน และแก้ไขได้ในระยะเวลาสั้น
3	สูง	มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน และต้องใช้เวลาในการแก้ไข
4	สูงมาก	มีผลกระทบรุนแรงต่อชุมชนเป็นบริเวณกว้าง หรือหน่วยงานของรัฐต้องเข้าดำเนินการแก้ไข

ตารางที่ 4-16 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย สามารถควบคุมหรือแก้ไขได้
2	ปานกลาง	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมปานกลาง สามารถแก้ไขได้ในระยะเวลาสั้น
3	สูง	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรุนแรง ต้องใช้เวลาในการแก้ไข
4	สูงมาก	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรุนแรงมาก ต้องใช้ทรัพยากรและเวลานานในการแก้ไข

ตารางที่ 4-17 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	ทรัพย์สินเสียหายน้อยมากหรือไม่เสียหายเลย
2	ปานกลาง	ทรัพย์สินเสียหายปานกลางและสามารถดำเนินการผลิตต่อไปได้
3	สูง	ทรัพย์สินเสียหายมากและต้องหยุดการผลิตในบางส่วน
4	สูงมาก	ทรัพย์สินเสียหายมากและต้องหยุดการผลิตทั้งหมด

ตารางที่ 4-18 การจัดระดับความรุนแรงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย

สถานการณ์	ความเข้มข้น (ส่วนในล้านส่วน)	ระยะทางใต้ลม (เมตร)	ระยะทางขวางลม (เมตร)	ระยะเวลาที่ได้รับสาร (นาที)	ระดับความเสี่ยงต่อ				ระดับความเสี่ยงสูงสุด
					บุคคล	ชุมชน	สิ่งแวดล้อม	ทรัพย์สิน	
1	105,000	54.3	14.83	1	4	1	1	1	4
2	105,000	40.78	7.85	1	4	1	1	1	4
3	105,000	37.65	5.88	1	4	1	1	1	4
4	105,000	60	54.55	1	4	1	1	1	4
5	105,000	37.44	18.34	1	4	1	1	1	4
6	105,000	32.85	13.05	1	4	1	1	1	4

ตารางที่ 4-19 การจัดระดับความรุนแรงของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตราย

สถานการณ์	ความเข้มข้น (ส่วนในล้านส่วน)	ระยะทางใต้ลม (เมตร)	ระยะทางขวางลม (เมตร)	ระยะเวลาที่ได้รับสาร (นาที)	ระดับความเสี่ยงต่อ				ระดับความเสี่ยงสูงสุด
					บุคคล	ชุมชน	สิ่งแวดล้อม	ทรัพย์สิน	
7	5,000	189.75	124.74	8	1	1	1	1	1
8	5,000	143.83	38.51	8	1	1	1	1	1
9	5,000	138.63	28.39	8	1	1	1	1	1
10	5,000	175.03	237.06	8	1	1	1	1	1
11	5,000	117.48	68.75	8	1	1	1	1	1
12	5,000	141.31	64.82	8	1	1	1	1	1

3. การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย แบ่งเป็น 4 ระดับดังแสดงในตารางที่ 4-20 ซึ่งระดับความเสี่ยงของเหตุการณ์การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บ ไปยังรถขนส่ง เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายในสถานการณ์จำลองที่ 1 ถึง 6 จัดอยู่ในระดับ 4 ทุกสถานการณ์ และเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายในสถานการณ์จำลองที่ 7 ถึง 12 จัดอยู่ในระดับ 2 ทุกสถานการณ์ สรุปได้ว่ากระบวนการดังกล่าวมีความเสี่ยงที่สูงระดับ 4 หรือความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงลงทันที ดังแสดงในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-20 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย

ระดับ	ผลลัพธ์	รายละเอียด
1	1-2	ความเสี่ยงเล็กน้อย
2	3-6	ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ต้องมีการทบทวนมาตรการควบคุม
3	8-9	ความเสี่ยงสูง ต้องมีการดำเนินงานเพื่อลดความเสี่ยง
4	12-16	ความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงลงทันที

ตารางที่ 4-21 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย ของการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

สถานการณ์จำลองที่	ระดับโอกาส	ระดับความรุนแรง	ผลคูณ	ระดับความเสี่ยง
1	3	4	12	4
2	3	4	12	4
3	3	4	12	4
4	3	4	12	4
5	3	4	12	4
6	3	4	12	4
7	3	1	3	2
8	3	1	3	2
9	3	1	3	2
10	3	1	3	2
11	3	1	3	2
12	3	1	3	2

แผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง

แผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง หมายถึง แผนงานลดความเสี่ยง และแผนงานควบคุมความเสี่ยง หากผลการประเมินความเสี่ยง อยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ จะต้องหยุดดำเนินการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงก่อนดำเนินงานต่อไป โดยจัดทำแผนงานลดความเสี่ยงและแผนงานควบคุมความเสี่ยงดังต่อไปนี้

1. แผนงานลดความเสี่ยง

1.1 ยกเลิกการใช้พนักงานขับรถในการเฝ้าดูคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เติมเต็มรถขนส่ง และล้นออกมาทางท่อล้น แล้วจึงหยุดเครื่องสูบ

1.2 เปลี่ยนระบบการเติมเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งทำได้โดยการติดตั้งสะพานชั่ง และเครื่องวัดและส่งค่าน้ำหนัก (Load cell transmitter) เพื่อชั่งน้ำหนักของรถขนส่งในระหว่างการเติม หากเติมคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจนถึงน้ำหนักที่ต้องการแล้ว เครื่องวัดและส่งค่าน้ำหนัก จะส่ง

ค่าน้ำหนักไปที่ระบบควบคุมแบบกระจายหรือ DCS (Distributed control system) เพื่อสั่งให้เครื่องสูบหยุดทำงาน

1.3 ระบุระยะทางที่ปลอดภัยหากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ลงในแผนฉุกเฉิน หากเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวและไม่สามารถแก้ไขสถานการณ์ได้ให้รีบออกห่างจากจุดรั่วไหลเป็นระยะไม่ต่ำกว่าระยะปลอดภัย คือ 127.75 เมตรขึ้นไป และการเข้าเผชิญเหตุจะต้องดำเนินการโดยทีมตอบโต้สถานการณ์ฉุกเฉินประจำโรงงานที่สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจเท่านั้น และทำการฝึกซ้อมแผนฉุกเฉินเป็นประจำทุกปี

2. แผนงานควบคุมความเสี่ยง

2.1 ทำการบำรุงรักษาสะพานชั่งให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกปี

2.2 ทำการปรับตั้งเครื่องวัดและส่งค่าน้ำหนักให้อ่านค่าอย่างถูกต้องทุกปี

2.3 ทดสอบระบบการหยุดเครื่องสูบอัตโนมัติทุกปี

บทที่ 5
สรุปผลงานนิพนธ์และข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานนิพนธ์

งานนิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่า การรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จากความประมาทของพนักงานขับรถในกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บ เข้ารถขนส่งนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้พนักงานขับรถหรือพนักงานที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย จนอาจทำให้สูญเสียสติสัมปชัญญะหรือเสียชีวิตได้ และมีโอกาสเกิดเหตุการณ์รั่วไหลขึ้นได้บ่อย ผลการประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงลงทันที

เมื่อความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้ จำเป็นต้องมีแผนงานลดความเสี่ยง คือ ยกเลิกการใช้พนักงานขับรถเปลี่ยนมาใช้ระบบอัตโนมัติแทน และแผนงานควบคุมความเสี่ยง คือ ต้องทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ของระบบอัตโนมัติที่ติดตั้งขึ้นมา

จากการจำลองสถานการณ์การรั่วไหลทำให้สามารถกำหนดระยะที่ปลอดภัยระหว่างจุดที่รั่วไหลกับพนักงานขับรถหรือพนักงานในโรงงานเมื่อพิจารณาทั้งระยะทางในทิศใต้ลมและระยะทางในทิศขวางลม คือ 127.75 เมตรขึ้นไป สำหรับพนักงานในโรงงานที่จะออกห่างจากจุดเกิดเหตุให้เร็วที่สุด ซึ่งเป็นระยะทางที่พิจารณาจากสภาวะที่อันตรายที่สุด คือ สภาพอากาศในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

และเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายรุนแรงถึงขั้นสูญเสียสติสัมปชัญญะหรือเสียชีวิต แต่เป็นระดับความเข้มข้นที่ไม่ควรจะได้รับเป็นระยะเวลานานเกินไป คือ ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามค่าอ้างอิงของกระทรวงอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า ระยะที่ปลอดภัยระหว่างโรงงานและชุมชน คือ 237.06 เมตรขึ้นไป ซึ่งเป็นระยะทางที่พิจารณาจากสภาวะที่อันตรายที่สุด คือ สภาพอากาศในตอนกลางคืน ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที แต่ในสถานการณ์จริง การเข้าแก้ไขสถานการณ์การรั่วไหลจะดำเนินการทันทีโดยทีมตอบโต้สถานการณ์ฉุกเฉินในโรงงาน จึงเป็นไปได้ยากที่คาร์บอนไดออกไซด์จะรั่วไหลนานถึง 8 ชั่วโมง ระยะที่ปลอดภัยดังกล่าวจึงอาจเป็นการประเมินที่ไม่สมเหตุสมผล

ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บ เข้ารถขนส่ง ควรจะเปลี่ยนเป็นระบบอัตโนมัติ เพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตของพนักงานในโรงงาน

2. การจัดวางตำแหน่งของอาคารที่มีพนักงานในโรงงานอาศัยอยู่ เช่น ห้องควบคุม หรืออาคารสำนักงาน ควรจะอยู่ห่างจากบริเวณที่มีการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้ารถขนส่งไม่ต่ำกว่าระยะปลอดภัย คือ 127.75 เมตรขึ้นไป และควรจะอยู่ชั้นสองขึ้นไป เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะสะสมอยู่ที่ระดับพื้นดิน

แนวทางการศึกษาต่อ

การประเมินความเสี่ยงในโรงงานที่มีการผลิต หรือมีการเก็บสารอันตราย เป็นสิ่งที่ทุกโรงงานจะต้องปฏิบัติตามกฎหมาย การจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของสารที่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย มีประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาว่า ความเสี่ยงนั้นมีระดับรุนแรงเพียงใด ควรจะลงทุนเพื่อหามาตรการมาแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการให้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้นหรือไม่ และควรเว้นระยะห่างระหว่างจุดที่อันตรายกับตำแหน่งที่มีคนอาศัยอยู่หรือชุมชนในบริเวณใกล้เคียงเท่าใด งานนิพนธ์นี้สามารถใช้เป็นตัวอย่างและเป็นแนวทางในการศึกษาความเสี่ยงในโรงงานอื่นได้ทุกประเภท รวมถึงการขนส่งสารอันตรายบนท้องถนน หรือการวางท่อส่งสารอันตรายบนพื้นดินจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ซึ่งหากเป็นสารประเภทไวไฟ จะต้องประเมินความเสี่ยงของการเกิดเพลิงไหม้และและระเบิดควบคู่ไปด้วย

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2543). *ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543*. เข้าถึงได้จาก http://www.diw.go.th/hawk/law/safety/regulation4.pdf

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2557). *รายงานสถานการณ์พลังงานจังหวัดระยอง โครงการบูรณาการแผนยุทธศาสตร์พลังงานระดับกลุ่มจังหวัดตามยุทธศาสตร์ประเทศ.* เข้าถึงได้จาก http://www.thaienergydata.in.th/download/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A2%E0%B8%AD%E0%B8%87.pdf

เมเนเจอร์ออนไลน์. (2554). *ชาวบ้านแตกตื่นรถบรรทุกสารคาร์บอนไดออกไซด์รั่วฟุ้งกระจายทั่วขณะขับเข้านิคมฯแหลมฉบัง*. เข้าถึงได้จาก http://www.manager.co.th/Local/ViewNews.aspx?NewsID=9540000069560

Adel A., (2008). *On the atmospheric dispersion and Gaussian plume model*. Retrieved from http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/corfu/wwai/wwai04.pdf

Asia industrial gases association. (2006). *Good practices guide for loading and unloading of cryogenic liquid tankers*. Retrieved from http://www.asiaiga.org/docs/AIGA%20040_06%20Good%20practices%20guide%20for%20loading%20&%20unloading%20of%20cryogenic%20liquid%20tankers_reformat%20Jan%2012.pdf

CCPS. (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition*. New York: John Wiley & Sons.

DNV software. (2012 a). *UDM theory document*

DNV software. (2012 b). *ATEX theory document*

DNV software. (2014). *Phast Advanced Training*

Harper P., (2011). *Assessment of the major hazard potential of carbon dioxide*. Retrieved from http://www.hse.gov.uk/carboncapture/assets/docs/major-hazard-potential-carbon-dioxide.pdf

HSE. (2016). *Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment.* Retrieved from http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/spctecosd30.pdf

Ooms G., Mahieu A. P., & Zelis F. (1974). The plume path of vent gases heavier than air. *Loss prevention and safety promotion in the process industries, 1,* 211-219. Delft: The hague

OSHA. (1996). *OSHA Hazard Information Bulletins Potential Carbon Dioxide (CO2) Asphyxiation Hazard When Filling Stationary Low Pressure CO2 Supply Systems*. Retrieved from https://www.osha.gov/dts/hib/hib_data/hib19960605.html

Pentatech. (2015). *ROAD-TANK AUTOMATIC LOADING SYSTEM NEW 2015 Version*. Retrieved from http://www.pentatech.it/download/16_Road-Tank-automatic-loading.pdf

Praxair. (1997). *Carbon dioxcide, refrigerated liquid safety data sheet P-4573.* Retrieved from http://www.praxair.com/~/media/praxairus/Documents/SDS/Carbon%20Dioxide/Liquiflow%20Liquid%20Carbon%20Dioxide%20Medipure%20Gas%20CO2%20Safety%20Data%20Sheet%20SDS%20P4573.pdf?la=en

Praxair. (2015). *Praxair safety data sheet.* Retrieved from http://www.praxair.com/~/media/praxairus/Documents/SDS/Carbon%20Dioxide/Carbon%20Dioxide%20Medipure%20CO2%20Safety%20Data%20Sheet%20SDS%20P4574.pdf?la=en

Praxair technology. (2009). *Safety precautions for carbon dioxide*. Retrieved from http://catalogs.praxairdirect.com/i/27114-safety-precautions-for-carbon-dioxide/33

The European Chemical Industry Council. (2013). *Best Practice Guidelines for Safe (Un) Loading of Road Freight Vehicles*. Retrieved from http://www.cefic.org/Documents/IndustrySupport/Transport-and-Logistics/Best%20Practice%20Guidelines%20-%20General%20Guidelines/Best-Practice-Guidelines-for-Safe-Un-Loading-of-Road-Freight-Vehicles.pdf?epslanguage=en

The International Association of Oil & Gas Producers. (2016). *Risk Assessment Data Directory: Consequence modelling*. Retrieved from http://www.ogp.org.uk/pubs/434-07.pdf

The Linde group. (2013). *Bulk Carbon Dioxide Delivery*. Retrieved from https://nsc.linde.com/Public/CO2%20Del%20pump%20TRO-19-08.pdf

The UCAR Center for Science Education. (2016). *Stable and unstable air*. Retrieved from https://eo.ucar.edu/kids/sky/air3.htm

University of st andrews. (2016). *Climate and Weather Systems*. Retrieved from https://www.st-andrews.ac.uk/~dib2/climate/lapserates.html

U.S. bureau of land management. (2016). *Appendix C Health Risk Evaluation for Carbon Dioxide (CO2).* Retrieved from http://www.blm.gov/style/medialib/blm/wy/information/NEPA/cfodocs/howell.Par.2800.File.dat/25apxC.pdf

Wessingtoncryogenics. (2016). *CRYO PACK 3000*. Retrieved from http://www.wessingtoncryogenics.co.uk/products/iso-containers/cryo-pack-3000/

Willday J., McGillivray A., Harper P., & Wardman, M. (2009). *A comparison of hazard and risks for carbon dioxide and natural gas pipelines*. Retrieved from https://www.icheme.org/~/media/Documents/Subject%20Groups/Safety_Loss_Prevention/Hazards%20Archive/XXI/XXI-Paper-057.pdf

Witlox Henk W.M., Harper M., Oke A., & Stene, J. (2013). Phast validation of discharge and atmospheric dispersion for pressurised carbon dioxide releases. *Journal of loss prevention in the process industries, 30*, 243-255.