การประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวห้องปฏิบัติการครัวร้อน ด้วยโปรแกรม ALOHA และ Google Earth ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานี

อรวรรณ ชำนาญพุดซา[1*] ชัยวัฒน์ เผดิมรอด[2]

บทคัดย่อ

ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือ LPG เมื่อรั่วไหลจะเกิดไฟไหม้และระเบิด ทำให้ผิวหนังไหม้ ขาดอากาศหายใจและเสียชีวิตได้ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแพร่กระจาย และการระเบิดเมื่อมีการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวแบบอัดอากาศ ขนาด 48 กิโลกรัม จำนวน 5 ถัง ของห้องปฏิบัติการครัวร้อนด้วยโปรแกรม ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) และ Google earth ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานี โดยการจำลองสถานการณ์ 3 ฤดู พบว่าที่ระดับ ERPG-3 (ความเข้มข้น 33,000 ppm) ระดับ ERPG-2 (ความเข้มข้น 17,000 ppm) และระดับ ERPG-1 (ความเข้มข้น 5,500 ppm) ในฤดูหนาวมีระยะการรั่วไหลสูงสุดที่ระยะ 194 , 325 และ 620 เมตรตามลำดับ โดยแพร่กระจายไปทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ การรั่วไหลแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟ พบว่าฤดูฝนค่าขีดจำกัดบนที่ระเบิดได้ (60 %LEL ความเข้มข้น 12,600 ppm) และค่าขีดจำกัดล่างที่ระเบิดได้ (10 %LELความเข้มข้น 2,100 ppm) มีรัศมีการรั่วไหลสูงสุดที่ 55 และ 137 เมตรตามลำดับ ฤดูร้อนพบการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ Jet fire ที่ทำให้เกิดเปลวไฟที่ความสูง 4 เมตรทำให้ผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 10 เมตรได้รับอันตรายถึงขั้นเสียชีวิต และพบว่าเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ BLEVE เป็นลูกไฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เมตร โดยฤดูร้อนทำให้เกิดรังสีความร้อนที่ระดับความเข้ม 10 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ทำให้ผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 45 เมตรได้รับอันตรายถึงชีวิตและโครงสร้างอาคารถูกทำลาย ดังนั้น ทางมหาวิทยาลัยแห่งนี้ควรจัดทำแผนการตอบโต้ภาวะฉุกเฉินที่ครอบคลุมการแพร่กระจายที่ระดับ ERPG-1,2 และ 3 ค่าระดับความเข้มที่ปลอดภัยและระดับความเข้มของการแผ่รังสีความร้อน เพื่อลดการสัมผัสที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ และนำข้อมูลไปใช้ในการจัดทำแผนตอบโต้เหตุฉุกเฉินในสถานศึกษาและชุมชนที่ใกล้เคียงที่มีความเสี่ยงในแบบเดียวกันกับมหาวิทยาลัยแห่งนี้ต่อไป

คำสำคัญ: ก๊าซปิโตรเลียมเหลว, การรั่วไหล, โปรแกรม ALOHA, ห้องปฏิบัติการครัวร้อน , Google earth, ERPG

---

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี อีเมล: Orawan.cham@vru.ac.th

[2] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อีเมล: Chaiwat.p@fph.tu.ac.th

Evaluation of Liquefied Petroleum Gas Release of the Culinary Laboratory by ALOHA and Google Earth in a University, Pathum Thani Province

Orawan Chamnanphudsa[1*] Chaiwat Phadermrod[2]

Abstract

Liquefied Petroleum Gas or LPG is classified as highly flammable which typically causes fire and gas explosion. It may concern adverse health effects, such as severe burns on skin, asphyxiation and death. The purpose of this study is to investigate scenarios of LPG releasing and explosion from compressed LPG cylinder (weight 48 kg, 5 tanks) leakage from the culinary laboratory by using the ALOHA software and Google Earth in three seasons. The results showed that the winter weather could induce the maximum leakage level at ERPG-3 (33,000 ppm of LPG), ERPG-2 (17,000 ppm of LPG) and ERPG-1 (5,500 ppm of LPG) at 194, 325 and 620 meters of distribution radius respectively. The distribution direction predicted was in the northeast direction of generation source. In rainy season, the vapor cloud leakage pattern was illustrated when the upper (60%LEL) and lower explosion limits (10%LEL) was in the range of 2,100-12,600 ppm. At this condition, the distribution radius could reach 55-137 meters. The simulation results also revealed that the summer condition could induce fires and explosions. The explosions could be a jet fire with 4 meters of fire height that can be lethal potential to the people who would be in the 10 meters of radius. The explosion of BLEVE was also presented in the summer which can create the fire with 8 meters of diameter and the thermal radiation intensity, 10 kw/m2, can expand to 45 meters of long distance. It could be a potential lethal death for people who exposes to this thermal effect for more than 60 seconds and can destroy the building structure. These results pointed that the case study area should conduct the emergency response plan which covers the LPG leakage levels at ERPG-1, 2 and 3 conditions.

---

[1] *Lecturer of Occupational Health and Safety in Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail:* Orawan.cham@vru.ac.th

[2] *Lecturer of Occupational Health and Safety in Public Health, Thammasat University, e-mail: Chaiwat.p@fph.tu.ac.th*

The Level of Concern (LOC) in compassing with the thermal effects should be set, monitored and controlled to reduce the exposure risk and prevent health effects. This study can be applied to nearby communities or other cases settlings to initiate their emergency plan responding to the risks from similar aspects.

Keywords: Liquefied Petroleum Gas (LPG), Release, ALOHA, Culinary Laboratory, Google earth, ERPG

บทนำ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงจากการรั่วไหลของสารเคมีในบรรยากาศได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ โปรแกรม ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) ซึ่งได้พัฒนาโดยหน่วยงาน U.S. Environmental Protection Agency และ National Oceanic and Atmospheric Administration ของประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อออกแบบการตอบสนองกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินกรณีเกิดสารเคมีรั่วไหล การเกิดอัคคีภัย รวมถึงการระเบิด (U.S. Department of Veterans Affairs, 2021) โดยใช้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของสารเคมี สภาพภูมิประเทศ ลักษณะการรั่วไหล เพื่อวิเคราะห์ขอบเขตผลกระทบที่เกิดขึ้น (กระทรวงสาธารณสุข, 2564) และนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Google earth ที่ใช้สำหรับการดูภาพถ่ายทางอากาศ ที่สามารถบอกเส้นทางผังเมือง แผนที่การคมนาคมที่เป็นงานด้านภูมิสารสนเทศ GIS (Geographic Information System) ทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นปัจจุบันมากยิ่งขึ้น (วันวิสาข์ เสาศิริ, 2559)

ปัจจุบันมีการนำโปรแกรม ALOHA (สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสมุทรปราการ, 2564) เช่น กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ได้จัดทำเอกสารวิชาการเรื่องการดำเนินการตอบโต้ภาวะฉุกเฉินด้านเคมี และรังสี เพื่อความพร้อมของบุคลากรในการตอบโต้เหตุฉุกเฉินจากสารเคมี (กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2564) กรมควบคุมมลพิษ จัดทำคู่มือการปกป้องประชาชนจากเหตุฉุกเฉินสารเคมีรั่วไหล โดยมีข้อมูลบ่งชี้พื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบและกลุ่มประชาชนที่อาจได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของสารเคมีและสามารถอพยพหรือหลบภัยในอาคารตามสภาพการรั่วไหลของสารเคมี (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) นอกจากนี้มีการใช้โปรแกรม ALOHA ในสถานประกอบการต่าง ๆ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์เชิงสมรรถนะเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตด้วยโปรแกรม ALOHA และ Pathfinder กรณีศึกษาโรงงานประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบและระยะสัญจรของเส้นทางอพยพหนีไฟมีความแตกต่างกันในสถานการณ์ต่าง ๆ ที่กำหนด จึงควรมีการกำหนดเส้นทางอพยพหนีไฟเพื่อให้ระยะเวลาในการอพยพเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนดที่ไม่เกิน 5 นาที และเพิ่มตำแหน่งจุดรวมพล 2 จุด เพื่อให้สอดคล้องกับประเภทของอันตรายจากสารเคมีที่เกิดรั่วไหลที่เกิดขึ้น (อภิวัฒน์ เขียวอร่ามและสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ, 2563) 2) การประเมินการรั่วไหลของสารก๊าซปิโตรเลียมเหลวในโรงงานผลิตถุงมือยางด้วยโปรแกรม ALOHA และ MARPLOT จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ยังมีผลต่อการแพร่กระจายของสารประกอบอินทรีย์ พื้นที่เปิดโล่งจะมีรัศมีการแพร่กระจายที่มากกว่าพื้นที่ป่าและชุมชน (มุจลินทร์ อินทรเหมือน และคณะ, 2563) 3) การจัดการระบบฐานข้อมูลเพื่อรองรับสถานการณ์การสารเคมีรั่วไหลด้วยผลการศึกษาที่ได้จะวิเคราะห์ตาม Emergency response planning guidelines (ERPG) จากการศึกษาพบว่าการรั่วไหลของ Phosgene, chlorine และ epichlorohydrin ตามลำดับ จึงควรวิเคราะห์ผลกระทบพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต (Tseng J.M. et.al, 2012) 4) การรั่วไหลของแอมโมเนียในเขตอุตสาหกรรมที่มีสภาวะอากาศแตกต่าง

กัน ผลการศึกษาพบว่า ในฤดูที่แตกต่างกัน พื้นที่ได้รับผลกระทบ ความเป็นพิษ และประชากรที่ได้รับผลกระทบต่างกัน สามารถนำไปใช้ในการจัดทำแผนอพยพในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้ (Anjana et al., 2018) 5) การสร้างแบบจำลองการรั่วไหล ไฟไหม้ ระเบิดจากถังบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว ผลการศึกษาพบว่าก๊าซที่ความเข้มข้น 33,000 ppm มีการรั่วไหลในระยะทาง 11 กิโลเมตร จะทำให้เกิดการเสียชีวิตและได้รับผลกระทบที่ระดับ AGEL-3 (Beheshti & Dehghan, 2018) 6) การประเมินผลกระทบของประชาชนในพื้นที่ที่มีถังเก็บก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้โปรแกรม ALOHA และ GIS พบว่าเมื่อมีการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว และมีสภาวะอากาศทางอุตุนิยมวิทยาที่เหมาะสม จะทำให้เกิด Jet fire , flash fire , vapor cloud explosion หรือ Boiling liquid expansion vapor explosion ได้ (Anjana et al., 2015) จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าโปรแกรม ALOHA ยังไม่สามารถใช้ได้ทันทีเมื่อเกิดเหตุการณ์สารเคมีรั่วไหล เนื่องจากขาดข้อมูลที่นำเข้าในโปรแกรม แต่โปรแกรม ALOHA ใช้ในการทำนายพื้นที่เกิดเหตุหลังเกิดเหตุการณ์เพื่อเฝ้าระวังทางสุขภาพและวางแผนรองรับเหตุการณ์ฉุกเฉินล่วงหน้าได้เป็นอย่างดี

ก๊าซปิโตรเลียมเหลวในประเทศไทย ประกอบด้วยโพรเพนและบิวเทน ในอัตราส่วนร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดมีความไวไฟ เมื่อเกิดการรั่วไหลอาจทำให้เกิด 1) ไฟไหม้หรือระเบิด LPG สามารถติดไฟได้ง่ายเมื่อมีอากาศผสมในอัตราส่วนที่อยู่ในพิกัดของการระเบิด และมีประกายไฟ 2) ขาดอากาศหายใจ LPG ไม่เป็นพิษ แต่หนักกว่าอากาศ เมื่อเกิดการรั่วไหลจะเข้าไปแทนที่อากาศ ทำให้ขาดอากาศหายใจจนทำให้เสียชีวิต (ชัยวัฒน์ เผดิมรอด และคณะ, 2564) และ 3) ผิวหนังไหม้จากความเย็นจัด ถ้า LPG หยดหรือกระเด็นมาถูกผิวหนัง ความเย็นที่เกิดจากการระเหยโดยฉับพลันอาจทำให้ผิวหนังไหม้ได้ทันที จากข้อมูลข้างต้นยังไม่พบการศึกษาวิจัยการประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวขณะมีการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการครัวร้อนในสถานศึกษา ซึ่ง 3 องค์ประกอบของการเกิดอัคคีภัยเกิดจาก 1) เชื้อเพลิงจากของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ไฟฟ้า และสารเคมีบางชนิดที่ติดไฟได้ 2) ความร้อนจากการประกอบและปรุงอาหาร และ 3) ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งถ้าองค์ประกอบทั้งสามอยู่ในระดับที่เพียงพอและเหมาะสมเมื่อเกิดก๊าซ LPG รั่วไหลจะส่งผลให้เกิดไฟไหม้และอาจเกิดการระเบิดได้ที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของนักศึกษา บุคลากร และคนในชุมชนรอบมหาวิทยาลัยได้ จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจทำการศึกษาการประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวด้วยโปรแกรม ALOHA และ Google earth ของห้องปฏิบัติการครัวร้อน ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานี เพื่อศึกษาการแพร่กระจาย และการระเบิดเมื่อมีการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว เพื่อเป็นแนวทางตอบโต้เหตุฉุกเฉินกรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดการรั่วไหลในสถานศึกษาแห่งนี้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการแพร่กระจาย และการระเบิดเมื่อมีการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวออกจากถังเก็บก๊าซปิโตรเลียมเหลวของห้องปฏิบัติการครัวร้อน ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานี

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยโดยใช้โปรแกรม ALOHA ร่วมกับ Google earth เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาในการประเมินการแพร่กระจายของสารเคมีประเภทก๊าซที่รั่วไหลไปในอากาศ และแสดงข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์บนแผนที่อิเล็กทรอนิกส์

เครื่องมือ โปรแกรม ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres) version 5.4.7 เป็นระบบที่ฟรีลิขสิทธิ์ และโปรแกรม Google earth pro version 7.1 เป็นฟรีลิขสิทธิ์

การเก็บและรวบรวมข้อมูล

1. ตำแหน่งที่ตั้งที่ใช้วิเคราะห์ทำการศึกษาที่จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย พื้นที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 2.0 เมตร เลือกพื้นที่ไม่ใช่ US และอยู่ในตำแหน่งที่ละติจูด 14 องศา 8 ลิปดา และ 4.79 ฟิลิปดาเหนือและลองจิจูด 100 องศา 36 ลิปดาและ 52 ฟิลิปดาตะวันออก เขตเวลา -7 อ้างอิงตามข้อแนะนำในโปรแกรม ALOHA และเลือกใช้เวลามาตรฐาน อาคารได้รับผลกระทบเป็นอาคารสองชั้น และพื้นที่ สถานที่รอบที่เก็บถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว ประกอบด้วย

ทิศเหนือ ติดกับสถานีบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว บ้านเรือนประชาชน ตลาด และหอพัก

ทิศใต้ ติดกับถนนกว้าง 5 เมตรภายในมหาวิทยาลัย หอประชุม ธนาคาร ร้านสะดวกซื้อ ลานกิจกรรม และอาคารเรียนและสำนักงานขนาด 4 ชั้น

ทิศตะวันออก ติดกับร้านค้า อาคารเรียนและสำนักงานขนาด 9 ชั้น

ทิศตะวันตก ติดกับอาคารเรียนและสำนักงานขนาด 4 ชั้น

2. ข้อมูลสารเคมีในโปรแกรม ALOHA ไม่มีฐานข้อมูลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยตรง ผู้วิจัยจึงใช้อัตราส่วนจากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (SDS) ในอัตราส่วนโพรเพนร้อยละ 60 และบิวเทนร้อยละ 40 (วันวิสาข์ เสาศิริ, 2559) โดยใช้ข้อมูลสารเคมีโพรเพนในโปรแกรม ALOHA ดังนี้

สารเคมี : ก๊าซโพรเพน (C_3H_8)

CAS Number: 74-98-6

น้ำหนักโมเลกุล : 44.10 กรัม/โมล

จุดเดือด : - 42.00 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของการจุดติดไฟ : 460-580 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นของไอก๊าซ : 1.5 เท่า

ความหนาแน่นของก๊าซปิโตรเลียมเหลว : 0.51

ขีดจำกัดของการติดไฟ : ร้อยละ 2.0 – 10.0 ของก๊าซในอากาศ

สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 15 องศาเซลเซียส : 0.00300 ต่อ 1 องศาเซลเซียส

IDLH : 2100 ppm

3. ข้อมูลสภาพอากาศโดยใช้ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาจังหวัดปทุมธานีช่วงปี 2563 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2564) เป็นค่าเฉลี่ยตามฤดูกาลทั้งปี ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลมโดยวัดที่ระดับความสูง 10 เมตร ปริมาณเมฆปกคลุมบนท้องฟ้า และความชื้นสัมพัทธ์ โดยในฤดูร้อนจะมีอุณหภูมิ ความเร็วลมสูงกว่าฤดูฝนและฤดูหนาว ตามลำดับ แต่มีความชื้นต่ำกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ และแต่ละฤดูจะมีทิศทางลมที่แตกต่างกันทำให้มีการแพร่กระจายของสารเคมีที่รั่วไหลแตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลสภาพอากาศ

รายการ	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน
ความเร็วลม (Knots)	2.52	2.22	3.10
ทิศทางลม	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออกเฉียงใต้
อุณหภูมิ (°C)	29.7	28.2	30.9
ความชื้น (%)	78.7	71.4	69.5

4. ข้อมูลแหล่งกำเนิดการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจากถังบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) แบบอัดอากาศรูปทรงกระบอก ขนาด 48 กิโลกรัม ความสูง 140 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร มีปริมาณสารเคมีในถังร้อยละ 85 ของปริมาตรถังเพื่อให้มีที่ว่างในการขยายตัวของก๊าซ มี LPG ที่เป็นของเหลวในถัง 75.48 ลิตร ที่ความดัน 7 บาร์ และอุณหภูมิสารเคมี 21 องศาเซลเซียส โดยปริมาณเก็บสูงสุด 5 ถัง ในพื้นที่โล่ง บริเวณโดยรอบเป็นอาคารชั้นเดียว ทำการจำลองสถานการณ์ 4 รูปแบบ คือ 1) Toxic Area of Vapor Cloud จำลองสถานการณ์การเกิดรูรั่วขนาด 5 มิลลิเมตรที่ข้อต่ออ่อน (Flexible connection failure) บริเวณวาล์วที่หัวถังก๊าซปิโตรเลียมที่ความสูง 100 เซนติเมตร 2) Flammable area of vapor cloud 3) การระเบิดแบบ Jet fire และ 4) การระเบิดแบบ BLEVE โดยจำลองสถานการณ์แบบละ 1 ครั้งในเวลากลางวัน ระยะเวลาในการจำลองการรั่วไหลเท่ากับ 60 นาที ในฤดูกาล 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูหนาว และฤดูฝน

การวิเคราะห์ข้อมูลและการประมวลผล

1. ค่าที่ได้จากการประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมโดยใช้โปรแกรม ALOHA คือพื้นที่ที่ได้รับก๊าซโพรเพนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ 3 ระดับที่แบ่งตาม Emergency response planning guidelines ได้แก่

1) ERPG-1 เป็นความเข้มข้นของสารในอากาศที่อาจเริ่มมีผลต่อสุขภาพ เมื่อได้รับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีผลต่อสุขภาพเพียงเล็กน้อย ชั่วคราว กลิ่นไม่มากจนเป็นการรบกวน

2) ERPG-2 เป็นความเข้มข้นของสารในอากาศที่อาจเริ่มมีผลต่อสุขภาพ เมื่อได้รับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีผลต่อสุขภาพเพียงเล็กน้อย สามารถหายได้เอง (Reversible) ไม่ทำให้ให้เกิดความสูญเสียความสามารถในการป้องกันตนเอง เช่น หลีกหนีจากพื้นที่ เป็นต้น

3) ERPG-3 เป็นความเข้มข้นของสารในอากาศที่เริ่มมีผลต่อสุขภาพ เมื่อได้รับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีผลต่อสุขภาพในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิต (Experiencing or developing life-threatening health effects) (American Industrial Hygiene Association, 2021)

2. ระดับอันตรายของการได้รับสัมผัสสารเคมีแบบเฉียบพลัน (Acute Exposure Guideline Levels: AEGL) ได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้

1) AEGL-1 บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูงกว่านี้ คาดว่าประชาชนทั่วไปหรือคนที่อ่อนแอกว่าปกติอาจรู้สึกไม่สบาย ระคายเคือง ผลกระทบหรืออาการนั้นคงอยู่ชั่วคราว

2) AEGL-2 บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูงกว่านี้ คาดว่าประชาชนทั่วไปหรือคนที่อ่อนแอกว่าปกติอาจได้รับผลกระทบที่ไม่สามารถรักษาหายได้ หรือผลกระทบนั้นคงอยู่เป็นเวลานาน

3) AEGL-3 บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูงกว่านี้ คาดว่าประชาชนทั่วไปหรือคนที่อ่อนแอกว่าปกติอาจได้รับผลกระทบต่อสุขภาพที่เป็นอันตรายถึงแก่ชีวิต (สมโชค สุยะสา และคณะ, 2559)

3. ระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัย (Level of Concern: LOC) ค่าความเข้มข้นที่สามารถระเบิดได้ ในโปรแกรม ALOHA แบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่

1) 10% LEL คือ ระดับความเข้มข้นของสารเคมีที่ระดับ 10% ของค่าที่จะเกิดการติดไฟหรือระเบิดได้ต่ำสุด (Lower Explosive Limit)

2) 60% LEL คือ ระดับความเข้มข้นของสารเคมีที่ระดับ 60% ของค่าที่จะเกิดการติดไฟหรือระเบิดได้ต่ำสุด (Lower explosive limit) ความเข้มข้นระดับนี้ พบว่า สามารถเกิดกลุ่มก้อนของสารเคมีที่สามารถระเบิดได้ (วันวิสาข์ เสาศิริ, 2559)

4. บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความเข้มของการแผ่รังสี แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

1) ระดับความเข้ม 10 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ได้รับอันตรายถึงขั้นเสียชีวิต และโครงสร้างอาคารถูกทำลาย

2) ระดับความเข้ม 5 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ได้รับอันตรายเกิดแผลไหม้ลึกระดับ 2

3) ระดับความเข้ม 2 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ได้รับอันตรายเกิดแผลพุพอง (สมโชค สุยะสา และคณะ, 2559)

4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม ALOHA โดยอธิบาย Footprint ของค่าความเข้มข้น รัศมีการแพร่กระจาย ขอบเขตพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ และนำเสนอผลการประเมินการแพร่กระจาย พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบบนแผนที่โดยใช้โปรแกรม Google earth (ธนวัฒน์ เทียมทะนงค์, 2563)

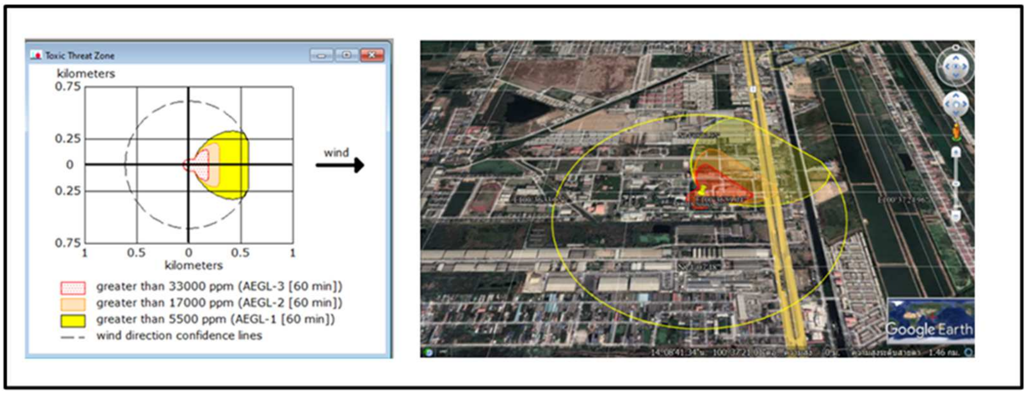
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว เพื่อกำหนดระยะที่ปลอดภัยในการป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และระเบิดจากการรั่วไหลของก๊าซโพรเพน 1 ครั้งใน 3 ฤดู พบว่า

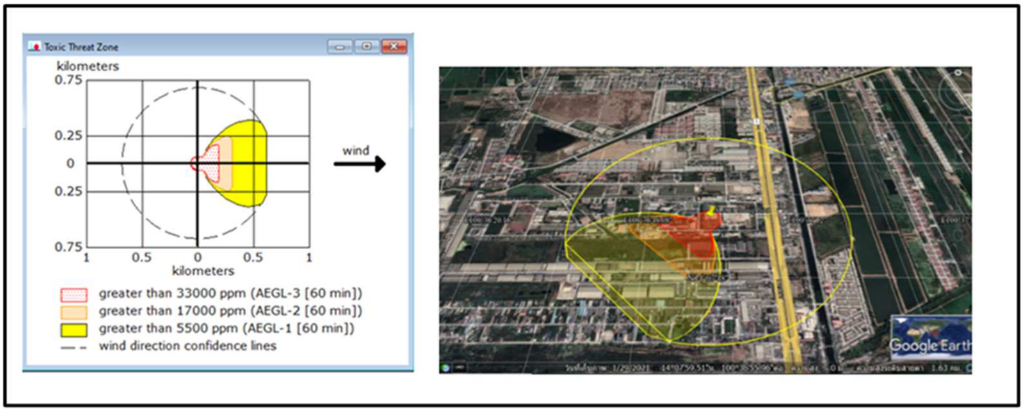
1. กรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลและไม่ติดไฟใน 3 ฤดู ปี 2563 ตามระดับค่า ERPG ที่ระดับความเข้มข้น 33,000, 17,000 และ 5,500 ppm ทำให้ผู้ได้รับผลกระทบเสียชีวิต (AEGL-3) ไม่สามารถรักษาหายได้ (AEGL-2) และไม่สบาย ระคายเคือง (AEGL-1) ตามลำดับ พบว่า ในฤดูหนาวระยะทางในการแพร่กระจายมากที่สุด 194, 325 และ 620 เมตรตามลำดับ ฤดูฝนระยะทางในการแพร่กระจายรองลงมาที่ 185, 295 และ 570 เมตรตามลำดับ ส่วนฤดูร้อนระยะทางที่แพร่กระจายได้น้อยที่สุด 170, 263 และ 498 เมตรตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวในกรณีไม่ติดไฟในแต่ละฤดูปี 2563

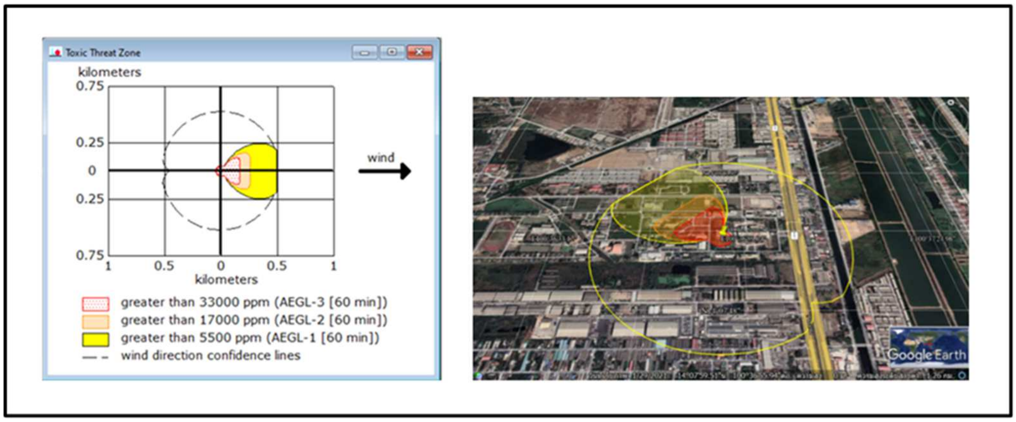
Toxic Area of Vapor Cloud	อันตรายต่อสุขภาพแบบเฉียบพลัน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน
33,000 ppm (ERPG-3)	อันตรายถึงขั้นเสียชีวิต (AEGL-3)	185 m.	194 m.	170 m.
17,000 ppm (ERPG-2)	ไม่สามารถรักษาหายได้ (AEGL-2)	295 m.	325 m.	263 m.
5,500 ppm (ERPG-1)	ไม่สบาย ระคายเคือง (AEGL-1)	570 m.	620 m.	498 m.



ภาพที่ 1 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวในกรณีไม่ติดไฟในฤดูฝน



ภาพที่ 2 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวในกรณีไม่ติดไฟในฤดูหนาว



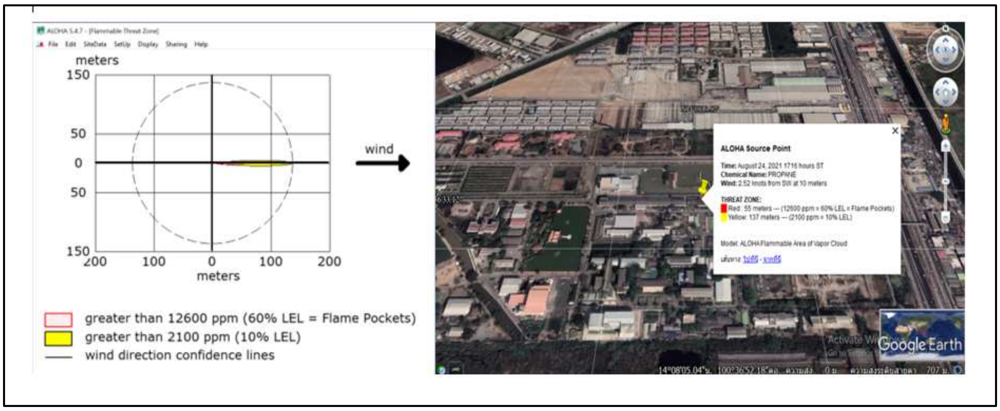
ภาพที่ 3 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวในกรณีไม่ติดไฟในฤดูร้อน

2. กรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟในแต่ละฤดูปี 2563 ในระยะเวลาการรั่วไหลต่อเนื่อง 60 นาที พบว่า ความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้จากปริมาณของความเข้มข้นของโพรเพนอยู่ในช่วงที่

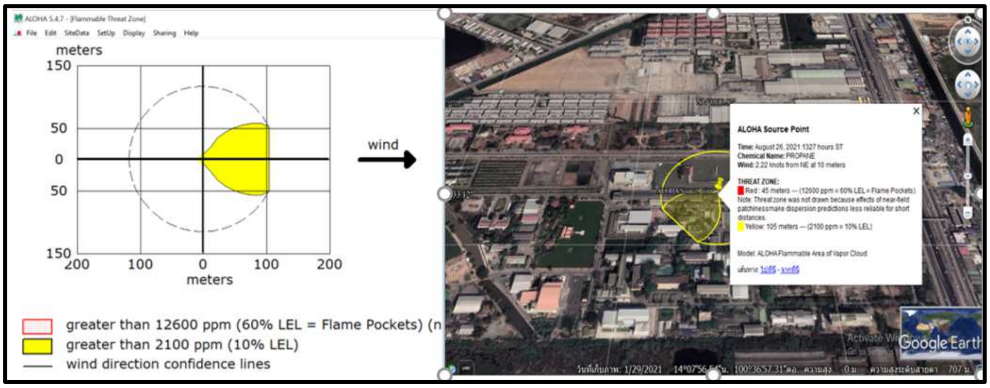
ระเบิดได้ มีค่าขีดจำกัดบนของการระเบิด 12,600 ppm และค่าขีดจำกัดล่างของการระเบิด 2,100 ppm เมื่อประมวลผลด้วยโปรแกรม ALOHA ของค่าขีดจำกัดบนที่ระเบิดได้ (60 %LEL) และค่าขีดจำกัดล่างที่ระเบิดได้ (10 %LEL) พบว่าในฤดูฝนมีรัศมีการรั่วไหลและระเบิดอยู่ในช่วง 55-137 เมตร รองลงมาคือ ฤดูหนาวอยู่ในช่วง 45-105 เมตร และฤดูร้อนอยู่ในช่วง 33-84 เมตร ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟในแต่ละฤดูปี 2563

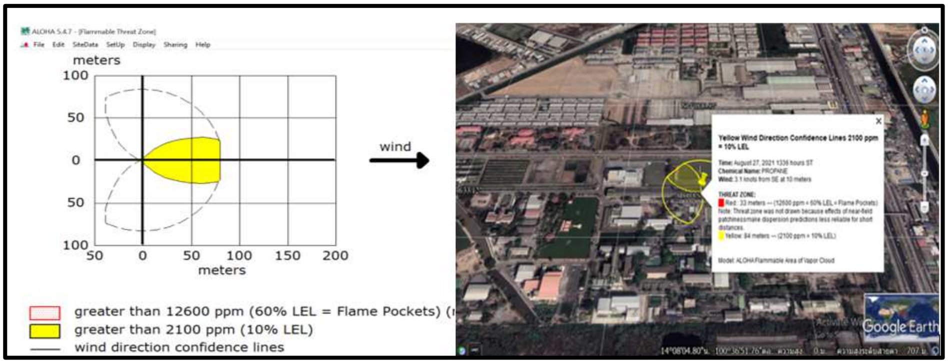
Flammable area of Vapor Cloud	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน
12,600 ppm (60 %LEL)	55 m.	45 m.	33 m.
2,100 ppm (10% LEL)	137 m.	105 m.	84 m.



ภาพที่ 4 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟในฤดูฝน



ภาพที่ 5 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟในฤดูหนาว

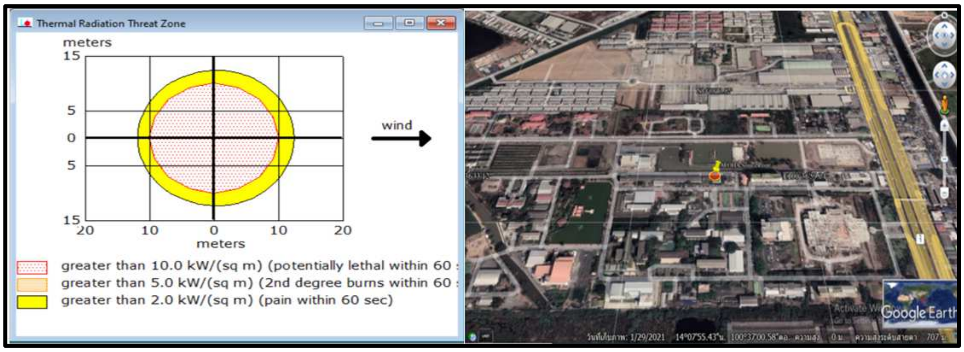


ภาพที่ 6 ผลการจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวแบบกลุ่มหมอกก๊าซไวไฟในฤดูร้อน

3. กรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ Jet fire พบว่า เมื่อก๊าซรั่วไหลออกมาจะเกิดการระเบิดทันที ทำให้ลุกไหม้คล้ายคบเพลิง ระยะเวลาการเผาไหม้ 60 นาที อัตราการเผาไหม้สูงสุด 48.6 กิโลกรัมต่อนาที และปริมาณการเผาไหม้ 1,354 กิโลกรัม ความยาวของเปลวไฟในฤดูร้อนสูงสุด 4 เมตร รองลงมาคือฤดูฝนและฤดูหนาว 3 เมตร โดยทำให้เกิดรังสีความร้อนที่ระดับความเข้ม 10,5 และ 2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ทำให้ผู้ได้รับผลกระทบเสียชีวิต แผลไหม้ระดับ 2 และมีแผลพุพองตามลำดับ โดยผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 10 เมตรได้รับอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้

ตารางที่ 4 ข้อมูลก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ Jet fire ในแต่ละฤดูปี 2563

Jet fire	อันตราย	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน
ความสูงเปลวไฟ		3 m.	3 m.	4 m.
10 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	เสียชีวิต	10 m.	10 m.	10 m.
5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	แผลไหม้ระดับ 2	10 m.	10 m.	10 m.
2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	แผลพุพอง	13 m.	13 m.	13 m.

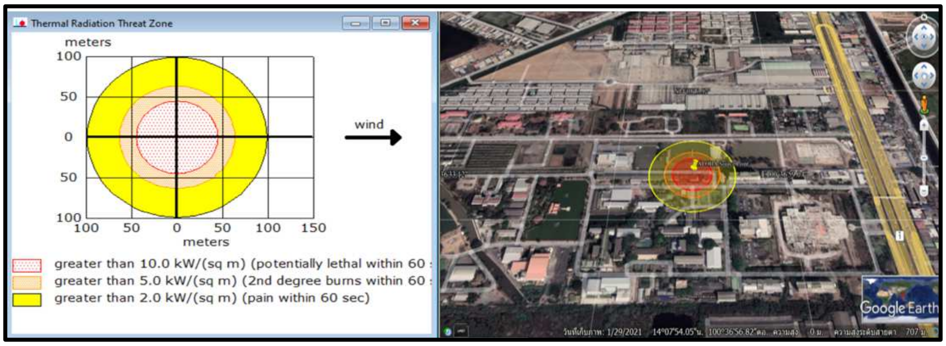


ภาพที่ 7 ผลการจำลองก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ Jet Fire

4. กรณีการระเบิดแบบ BLEVE (Boiling Liquid Evaporating Vapor Explosion) พบว่า เมื่อภาชนะบรรจุได้รับความร้อนจนไม่สามารถรับแรงดันได้ ทำให้เกิดการระเบิดและปรากฏเป็นลูกไฟ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เมตร ระยะเวลาเผาไหม้ 2 วินาที ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาวทำให้ผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 45, 49 และ 49 เมตรเกิดรังสีความร้อนที่ระดับความเข้ม 10 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ได้รับอันตรายถึงชีวิตและส่งผลให้โครงสร้างอาคารถูกทำลาย ผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 63, 69 และ 69 เมตรเกิดรังสีความร้อนที่ระดับความเข้ม 5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ได้รับอันตรายจากแผลไหม้ระดับ 2 และผู้ที่อยู่ภายในรัศมี 99, 107 และ 108 เมตรเกิดรังสีความร้อนที่ระดับความเข้ม 2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ได้รับอันตรายจากแผลพุพอง

ตารางที่ 5 ข้อมูลก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ BLEVE แต่ละฤดูปี 2563

BLEVE	อันตราย	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน
10 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	เสียชีวิต	49 m.	49 m.	45 m.
5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	แผลไหม้ระดับ 2	69 m.	69 m.	63 m.
2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร	แผลพุพอง	107 m.	108 m.	99 m.



ภาพที่ 8 ผลการจำลองก๊าซปิโตรเลียมเหลวเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดแบบ BLEVE

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าในฤดูร้อนจะทำให้ผู้ที่มีปฏิบัติงานใกล้พื้นที่จุดเกิดเหตุได้รับผลกระทบจากที่เริ่มมีผลต่อสุขภาพและอาจได้รับอันตรายถึงขั้นเสียชีวิต ส่งผลให้เกิดระเบิดและโครงสร้างอาคารเกิดการพังทะลายได้มากกว่าฤดูหนาวและฤดูฝน เนื่องด้วยฤดูร้อนมีอุณหภูมิและความเร็วลมสูง มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้ก๊าซที่หนักกว่าอากาศไม่สามารถรวมตัวได้ จึงทำให้ก๊าซเกิดการแพร่กระจายได้รวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับ Beheshti et al., (2018) ที่พบว่าในฤดูกาลที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดอันตรายที่แตกต่างกัน โดยฤดูร้อนจะมีอันตรายมากกว่าฤดูฝนและฤดูหนาว เนื่องจากฤดูร้อนอากาศจะมีความเสถียรกว่าฤดูอื่น และการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับ มุจลินทร์ อินทรเหมือน และคณะ (2563) ที่พบว่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่าจะแพร่กระจายได้ระยะทางที่น้อยกว่า และพบว่าเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินจุดรวมพลจะอยู่ในระยะที่ไม่ปลอดภัย จึงควรพิจารณาจุดรวมพลให้สอดคล้อง

กับสถานการณ์ในทุกฤดู ซึ่งสอดคล้องกับ สมโชค สุยะสา และคณะ (2559) ที่ได้เสนอแนะให้มีการกำหนดจุดรวมพลให้ห่างจากรัศมีการเกิด BLEVE และการศึกษานี้ได้เสนอแนะให้มีการจัดทำแผนการตอบโต้ภาวะฉุกเฉินให้ครอบคลุมคนและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายที่ระดับ ERPG-1,2 และ 3 ค่าขีดจำกัดของการระเบิดและเกิดรังสีความร้อนซึ่งสอดคล้องกับ Beheshti et al., (2018) ที่เสนอแนะให้มีวางแผนรองรับเหตุการณ์ฉุกเฉินเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดกับประชาชนโดยรอบพื้นที่เกิดเหตุด้วย ทั้งนี้การใช้โปรแกรม ALOHA จะไม่สามารถใช้โปรแกรมได้อย่างรวดเร็ว ใช้เป็นเพียงการทำนายพื้นที่ที่มีการแพร่กระจายของสารเคมีหลังเหตุการณ์สงบแล้ว เพื่อเฝ้าระวังทางสุขภาพ เนื่องจากขาดข้อมูลในการนำเข้าโปรแกรม การใช้โปรแกรมมีความซับซ้อน และมีข้อจำกัดหลายประการ (ชรินทร์ เย็นใจ และคณะ, 2558) จึงทำให้โปรแกรมไม่สามารถคำนวณค่าได้หรือค่าที่ได้ไม่ถูกต้อง เช่น โปรแกรมจะไม่สามารถคำนวณค่าได้ถ้ามีการรั่วไหลของสารผสมหรือสารละลาย มีความเร็วลมต่ำกว่า 1 เมตร/วินาที มีการรั่วไหลในอาคารปิดทึบ และอากาศที่เสถียรมาก ส่วนระยะห่างแหล่งรั่วไหลไม่ถูกต้องและสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง ทำให้โปรแกรมคำนวณข้อมูลได้ไม่ถูกต้อง (วันวิสาข์ เสาศิริ, 2559) ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ในปี 2563 โดยการใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมและทิศทางลมในแต่ละฤดู เพื่อใช้วางแผนรองรับเหตุการณ์ฉุกเฉินล่วงหน้าในรอบปีเท่านั้น หากวันที่เกิดเหตุรั่วไหลจริงในสถานศึกษาแห่งนี้ อาจทำให้ค่าทางสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไป จึงควรมีการนำข้อมูลในวันเกิดเหตุจริงเข้าโปรแกรมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำกับสถานการณ์จริงต่อไป

สรุป

จากผลการศึกษาการรั่วไหลและการระเบิดของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยการใช้โปรแกรม ALOHA และ Google earth พบว่า ก๊าซปิโตรเลียมทำให้เกิดการรั่วไหลแบบ Toxic area of vapor cloud และ Flammable area of vapor cloud ส่งผลผู้ที่ได้รับผลกระทบไม่สบาย ระคายเคือง รักษาไม่หาย และเสียชีวิตได้ และเมื่อเกิดการระเบิดแบบ Jet Fire และ BLEVE จะทำให้เกิดผู้ได้รับผลกระทบได้รับอันตรายจากแผลพุพอง แผลไหม้ระดับ 2 และอาจอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้ โปรแกรม ALOHA และ Google earth สามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วกับสารเคมีทุกตัวที่มีฐานข้อมูลในโปรแกรม จึงทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายเมื่อเกิดเพื่อประกอบการตัดสินใจเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้น และสามารถทำแผนที่การกระจายของสารเคมีที่แสดงผลบนภาพถ่ายดาวเทียมได้ทันท่วงที แต่โปรแกรมมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถคำนวณผลได้ถ้ามีสารเคมีที่มีการรั่วไหลมากกว่า 1 ตัว ในพื้นที่เกิดเหตุเดียวกันได้ หรือมีข้อมูลทางภูมิอากาศที่ไม่ครบถ้วน

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. มหาวิทยาลัยแห่งนี้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการจัดทำแผนการตอบโต้ภาวะฉุกเฉินให้ครอบคลุมคนและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายที่ระดับ ERPG-1,2 และ 3 ค่าขีดจำกัดของการระเบิดและเกิดรังสีความร้อน

2. มหาวิทยาลัยแห่งนี้ควรจัดให้มีการฝึกซ้อมแผนการอพยพกรณีรั่วไหลของสารเคมี เพื่อลดผลกระทบต่อชีวิตและสุขภาพจากการสัมผัสก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่เกิดการรั่วไหล ร่วมกับหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องและคนในชุมชนรอบมหาวิทยาลัย

3. มหาวิทยาลัยแห่งนี้ควรพิจารณาจุดรวมพลเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินเพิ่มเติม เพื่อให้จุดรวมพลไม่อยู่ในระยะรัศมีการรั่วไหล และการระเบิดจากการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งถัดไป

1. การวิจัยครั้งนี้สามารถนำผลประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวของห้องปฏิบัติการครัวร้อนไปใช้กับห้องปฏิบัติการอื่น ๆ ในมหาวิทยาลัยแห่งนี้ สถานศึกษาอื่น หรือสถานประกอบการในพื้นที่ใกล้เคียงที่มีการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวและมีข้อมูลสภาพอากาศรูปแบบเดียวกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำแผนตอบโต้เหตุฉุกเฉินกรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหล

2. ควรมีการจัดทำฐานข้อมูลเพื่อรองรับสถานการณ์ฉุกเฉินกรณีสารเคมีรั่วไหลกับสารเคมีทุกชนิดที่มีการใช้ในมหาวิทยาลัยแห่งนี้และมีในโปรแกรม ALOHA และจัดทำแผนเตรียมความพร้อมและตอบโต้เพื่อรองรับการรั่วไหลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา จังหวัดปทุมธานี เพื่อมาสร้างการประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวห้องปฏิบัติการครัวร้อน ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง จังหวัดปทุมธานี ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. (2564). **การเตรียมความพร้อมและตอบโต้ภาวะฉุกเฉินด้านสารเคมีสำหรับการอบรมหลักสูตรการพัฒนาศักยภาพทีมปฏิบัติการตอบโต้ภาวะฉุกเฉินด้านสารเคมีและรังสี ระดับพื้นที่สำหรับเจ้าหน้าที่สาธารณสุข (ครู ก.).** สืบค้นจาก http://envocc.ddc.moph.go.th/uploads/media/manual/Readiness_01.pdf

กรมควบคุมมลพิษ. (2564). **จัดทำคู่มือการปกป้องประชาชนจากเหตุฉุกเฉินสารเคมีรั่วไหล.** สืบค้นจาก

https://www.pcd.go.th/publication/11960/

กรมอุตุนิยมวิทยา. (2564). **ภูมิอากาศปทุมธานี.** สืบค้นจาก http://climate.tmd.go.th/data/province/ภาคกลางตอนบน/ภูมิอากาศปทุมธานี.pdf

กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. (2564). **คู่มือการเตรียมความพร้อมและตอบโต้ภาวะฉุกเฉินทางสาธารณสุข กรณีอุบัติภัยสารเคมี.** สืบค้นจาก https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1171220210826082606.pdf

ชรินทร์ เย็นใจ และวันเพ็ญ วิโรจนกูฏ. (2558). **การพัฒนาระบบฐานข้อมูลเพื่อรองรับสถานการณ์ฉุกเฉินกรณี สารเคมีรั่วไหลด้วย โปรแกรม ALOHA, MARPLOT, Google earth และ Microsoft Excel.** วารสารสาธารณสุข มหาวิทยาลัย บูรพา, 10(1), 15-25.

ชัยวัฒน์ เผดิมรอด, อรวรรณ ชำนาญพุดซา และจินต์จุฑา ขำทอง. (2564). **ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดอุบัติเหตุของพนักงานดับเพลิงเทศบาลเมืองท่าโขลง จังหวัดปทุมธานี.** วารสารวิจัยและนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2(3), 38-62.

ธนวัฒน์ เทียมทะนงค์. (2563). **แบบจำลองผลกระทบการรั่วไหลจากถังเก็บก๊าซปิโตรเลียมเหลว และการจำลองการอพยพไปยังจุดรวมพล.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มุจลินทร์ อินทรเหมือน และคณะ. (2563). **การประเมินการรั่วไหลของสารก๊าซปิโตรเลียมเหลวในโรงงานผลิตถุงมือยางด้วยโปรแกรม ALOHA และ MARPLOT.** วารสารวิชาการสาธารณสุข, 29(2), 211-220.

วันวิสาข์ เสาศิริ. (2559). **การประเมินการแพร่กระจายและการระเบิดของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจากการรั่วไหลของสถานีบริการก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในกรุงเทพมหานคร ด้วยโปรแกรม ALOHA.** การค้นคว้าอิสระสาธารณสุขศาตรมหาบัณฑิต คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สมโชค สุยะสา, สมภพ จรุงธรรมโชติ และสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ. (2559). **การประเมินผลกระทบการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์.** การประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 13 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 8-9 ธันวาคม 2559. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม.

สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสมุทรปราการ. (2564). **ALOHA (AREAL LOCATION OF HAZARDOUS ATMOSPHERES).** สืบค้นจาก http://www.spko.moph.go.th/wp-content/uploads/2017/03/AlohaThai.pdf

อภิวัฒน์ เขียวอร่าม และสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ. (2563). **การวิเคราะห์เชิงสมรรถนะเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิต**

ด้วยโปรแกรม ALOHA และ Pathfinder กรณีศึกษาโรงงานประกอบชิ้นส่วนยานยนต์. การประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, 28 ส.ค. 2563. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี.

American Industrial Hygiene Association. ERPGs. (2021). **Emergency Response Planning Guidelines (ERPGs)**. Retrieved from: https://www.aiha.org/get-involved/aiha-guideline-foundation/erpgs

Anjana N.S., Amarnath A., Chithra S.V., Harindranathan Nair, M.V., & Jose, S.K. (2015). **Population vulnerability assessment around a LPG storage and distribution facility near Cochin using ALOHA and GIS**. International Journal of Engineering Science Invention, 4(6), 23-31.

Anjana, N.S., Amarnath, A., & Nair, M.H. (2018). **Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system**. Journal of environmental management, 210, 201-209.

Beheshti M.H., Dehghan S.F., Hajizadeh R., Jafari S.M., & Koohpaei A. (2018). **Modelling the consequences of explosion, fire and gas leakage in domestic cylinders containing LPG**. *Annals of Medical and Health Sciences Research*.

Tseng, J.M., Su, T.S., & Kuo, C.Y. (2012). **Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA.** Procedia Engineering, 45,384 – 389

U.S. Department of Veterans Affairs. (2021). **ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)**. Retrieved from: https://www.oit.va.gov/Services/TRM/ToolPage.aspx?tid=9015#:~:text=Description%3A,and%20respond%20to%20chemical%20emergencies.