

แบบจำลองค่าที่ดีที่สุดสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณา
ต้นทุนด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน

Optimization Model for Industrial Location in Industrial Estate Problem
under Risk Cost from Emergency Case

นิรุทธิ์ วัฒนะแสง^{1,2}, กสิณ รังสิกรรพม^{1*}
Niroot Wattanasang^{1,2}, Kasin Ransikarbun^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 34190

²ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 10160

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 34190

²Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University 10160

*Corresponding author e-mail: kasinphd@gmail.com

(Received: 24 May 2020, Revised: 3 December 2020, Accepted: 17 December 2020)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศได้มีการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นพื้นที่ในการประกอบกิจการของโรงงานอุตสาหกรรมและเป็นการส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมให้เจริญเติบโต รวมถึงการเพิ่มจำนวนของนิคมอุตสาหกรรมเพื่อเป็นการรองรับการขยายตัวทางภาคเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยด้านการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมในปัจจุบันยังมีจำกัด นอกจากนี้งานวิจัยที่มีอยู่ก็พิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนเพียงอย่างเดียว โดยงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาปัจจัยด้านความเสี่ยงที่ส่งผลต่อการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม โดยเริ่มจากพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม โดยในกรณีศึกษาจะแบ่งประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทโรงงานที่มีลักษณะอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป นอกจากนี้ยังได้จำลองผลกระทบของความรุนแรงจากกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้โปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการจำลองได้ออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานให้มีมูลค่าความเสียหายน้อยที่สุด คือ 47,970,000 บาท ซึ่งถือว่าเป็นมูลค่าน้อยที่สุด และพบว่าตำแหน่งของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกกำหนดให้อยู่บริเวณพื้นที่ลึกเข้าไปด้านในนิคมอุตสาหกรรมและมีการกระจายของโรงงาน เพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่เสี่ยงที่ได้รับผลกระทบเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน โดยมีบางส่วนที่ถูกเลือกให้ตั้งในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงซึ่งเป็นพื้นที่ขนาดเล็กและได้รับผลกระทบน้อย ซึ่งผลจากการบูรณาการการศึกษาระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการตัดสินใจออกแบบที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมหรือออกแบบสถานที่ที่ต้องการศึกษาต่าง ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: การออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรม, แบบจำลองค่าที่ดีที่สุด, แบบจำลอง ALOHA, นิคมอุตสาหกรรม, ต้นทุนด้านความเสี่ยง

Abstract

Many countries, nowadays, had established industrial estates with an aim to operate industrial activities and support the growing industrial sector. In addition, an increasing trend of new industrial estates is arising to support economics and business expansion. However, studies that focus on factory location for industrial estates are scarce. In addition, existing studies only cover the cost criterion. In this study, we propose the Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model to determine the location of factory plants in an industrial estate with a focus on the risk-cost criterion. The model classifies two types of industrial plants, which are hazardous-material factory and general-type factory. In order to incorporate the safety factor, the model considers the risk and severity in an emergency case simulated using the Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) program. The simulation results are used as input for the developed MILP model. The results with the minimum risk cost at 47,970,000 Baht show that location of most industrial plants are located at the outer area of the industrial estate. These locations are scatteringly located around the boarder of industrial estate, given a consideration of the high-risk areas in an emergency situation. Although there are a few areas of high risk chosen for plant assignments, these areas are relatively small in size, allowing minimal impact. The integrated mathematical and simulation model in this research can be further used as a tool to support design decisions for other industrial locational studies.

Keywords: Industrial Plant Location, Optimization Model, ALOHA Simulation, Industrial Estate, Risk-Cost Criterion

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศมีการปรับตัวและพัฒนากระบวนการเชิงธุรกิจให้มีความก้าวหน้าและทันต่อกระแสของการเปลี่ยนแปลง เช่น มีการส่งเสริมเทคโนโลยีทางด้านดิจิทัล ทางด้านการท่องเที่ยว รวมถึงการส่งเสริมทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งการให้ความสำคัญในการส่งเสริมทางด้านอุตสาหกรรมเป็นผลทำให้หลาย ๆ ประเทศมีการขยายตัวเพิ่มพื้นที่สำหรับรองรับการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มเขตเศรษฐกิจพิเศษหรือพื้นที่สำหรับสร้างนิคมอุตสาหกรรม การให้สิทธิพิเศษสำหรับการลงทุนเพื่อเป็นการดึงดูดนักลงทุน โดยจากรายงานของ United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) แสดงข้อมูลปี ค.ศ. 2018 พบว่ามีจำนวนเขตเศรษฐกิจพิเศษสะสมรวม 5,400 แห่ง โดยเพิ่มจากปี ค.ศ. 1975 จำนวน 79 แห่ง (UNCTAD, 2019) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของพื้นที่อุตสาหกรรมอย่างมาก

โดยในประเทศไทยเอง จำเป็นต้องมีการพัฒนาและเตรียมความพร้อมในการเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม โดยได้มีการจัดตั้งเขตนิคมอุตสาหกรรมในแต่ละภูมิภาคจำนวนทั้งหมด 55 นิคม

อุตสาหกรรม โดยกระจายครอบคลุม 16 จังหวัดทั่วประเทศ (BOI, 2016) ซึ่งยังไม่รวมถึงเขตเศรษฐกิจพิเศษที่จะเพิ่มขึ้นในอีก 10 จังหวัด ซึ่งได้มีการดำเนินการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 จนถึงปัจจุบัน (IEAT, 2020)

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของจำนวนนิคมอุตสาหกรรมที่มากขึ้นนี้แม้จะมีข้อดีในด้านการรองรับการลงทุนและการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม แต่ก็มีความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินในกรณีการเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือเหตุการณ์ไม่คาดคิด เนื่องจากความเสี่ยงของโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายรูปแบบมากขึ้น ซึ่งยังรวมถึงปัญหาความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เช่นการเกิดเหตุการณ์ไฟไหม้ หรือการระเบิดหรือเกิดเหตุการณ์สารเคมีรั่วไหลของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละนิคมอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียอย่างมาก ซึ่งจำเป็นต้องมีการพิจารณามาตรการในการบริหารจัดการและป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ หรือเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนออกแบบพิจารณาพื้นที่สำหรับเป็นสถานที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรม (Wattanasang & Ransikarbum, 2019)



รูปที่ 1 แสดงแนวโน้มการเพิ่มจำนวนเขตเศรษฐกิจพิเศษทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975-2018 (UNCTAD, 2019)

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้ง (Location Problem) ที่เหมาะสมของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยพิจารณาปัจจัยทางด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน ซึ่งพิจารณาการเกิดผลกระทบและความสูญเสียของชีวิตทรัพย์สินในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉิน ทั้งนี้ ปัจจัยทางด้านความเสี่ยง เป็นการสะท้อนถึงการพิจารณาความปลอดภัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้การพิจารณาความเสียหายและความเสี่ยงจากกรณีการเกิดเหตุฉุกเฉินในนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming – MILP) สำหรับปัญหาการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งทำการพิจารณาความเสี่ยงของการเกิดเหตุฉุกเฉิน จากการใช้โปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงจากการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของสารเคมี โดยพิจารณาความรุนแรงของสารเคมีที่เกิดขึ้น

สำหรับในการศึกษานี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นคือ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (MILP) สำหรับปัญหาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม

ภายใต้ปัจจัยทางด้านความปลอดภัย โดยเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของสารเคมีจากกรณีการเกิดเหตุการณ์ระเบิด และการฟุ้งกระจายโดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ สำหรับเหตุการณ์ความรุนแรงด้วยโปรแกรม ALOHA ซึ่งเป็นการบูรณาการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. ทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะปัญหาที่เกี่ยวกับการพิจารณาการวางแผนของโรงงานอุตสาหกรรม พบว่างานวิจัยที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบสถานที่ตั้งของโรงงาน (Facility Location Problem) ในระบบเครือข่าย (Network) รวมถึงปัญหาการออกแบบแผนผังของกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม (Facility Layout Problem) ที่มุ่งเน้นการจัดการภายในโรงงาน โดยพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนที่ต่ำที่สุด เช่น การศึกษาการออกแบบแผนผังกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเกี่ยวกับโรงงานปิโตรเคมี โดยพิจารณาความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตหลัก เช่น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายขนถ่ายวัตถุดิบและระบบไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ปริมาณท่อที่ใช้งาน ระบบปั๊มดูดวัตถุดิบ และเนื้อที่ที่ใช้งาน โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของการออกแบบให้มีความต้นทุนต่ำที่สุดด้วยการใช้วัตถุดิบน้อยที่สุด และระบบท่อสำหรับ

วัตถุดิบขั้นสุด เป็นต้น (Caputo et al., 2015; Wu et al., 2016) นอกจากนี้ Chae and Regan (2016) ได้ออกแบบแผนผังของโรงงาน โดยพิจารณาการดูแลจัดการ ระบบสาธารณูปโภค และอุปกรณ์เครื่องจักร โดยจำลองแผนผังในลักษณะแบบต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการใช้วัตถุดิบให้ต่ำที่สุด เป็นต้น

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งในระดับของนิคมอุตสาหกรรม (Industrial Estate Layout) ซึ่งเป็นการศึกษาในขอบเขตที่กว้างมากขึ้น มีผู้ดำเนินการศึกษาและวิจัยน้อย ซึ่งยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ดังตัวอย่างเมื่อไม่นานมานี้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการวางแผนตำแหน่งวางผังของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นที่ปัจจัยทางด้านต้นทุน ควบคู่กับปัจจัยทางด้านความปลอดภัยมากขึ้น เช่น การศึกษาโดยจำลองแผนผังขอบเขตของนิคมอุตสาหกรรมและกำหนดตำแหน่งการวางผังของโรงงานอุตสาหกรรมโดย Wang et al. (2017) ซึ่งพบว่าการจัดการตำแหน่งแผนผังของโรงงานอุตสาหกรรมอย่างเหมาะสมจะสามารถลดต้นทุนในการติดตั้งระบบท่อและลดความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งพื้นที่ที่จะศึกษาออกเป็นโซนพร้อมทั้งวิเคราะห์ตำแหน่งการวางผังของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมอย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นกรณีศึกษาในต่างประเทศ และควรมีการบูรณาการร่วมกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วย (Kim et al., 2016; Ransikarbum et al., 2017; Chanthakhot & Ransikarbum, 2019; Wattanasang & Ransikarbum, 2019; Ransikarbum, 2020)

สำหรับงานวิจัยที่เน้นการพิจารณาด้านความปลอดภัยในโรงงาน พบว่ามีการนำความเสี่ยงที่อาจเกิดเหตุฉุกเฉินมาพิจารณา เช่น การทำการศึกษาและออกแบบแผนผังกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณาการแพร่กระจายของสารเคมี และแก๊สพิษ ด้วยการกำหนดแผนผังและตำแหน่งติดตั้งของพื้นที่ต่าง ๆ เช่น ห้องควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงาน และพิจารณาตำแหน่งการจัดวางเพื่อป้องกันผลกระทบจากการสัมผัสสารเคมีรั่วไหล (Yuan et al., 2013; Alves et al., 2016) นอกจากนี้ Medina-Herrera et al. (2014) ได้นำวิธีการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk Assessment – QRA) มาใช้ใน

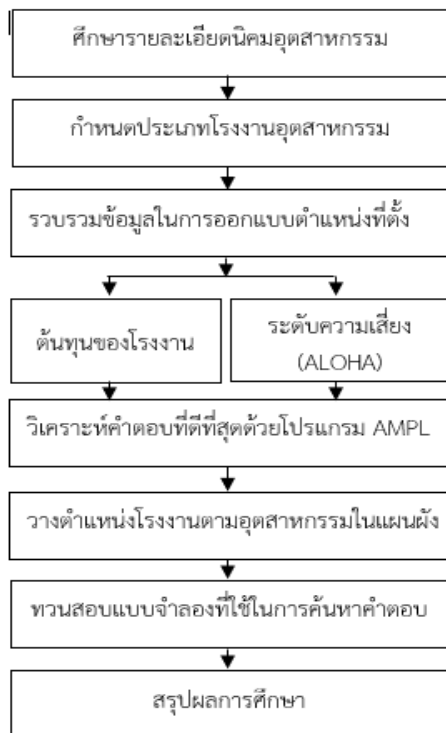
การศึกษาออกแบบแผนผังโรงงานให้มีความเหมาะสมที่สุดซึ่งได้จำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาตำแหน่งของอุปกรณ์และกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนที่เป็นปัจจัยด้านความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน กระบวนการผลิต และอุปกรณ์ นอกจากนี้ Patsiatzis et al. (2004) ได้ศึกษาปัจจัยด้านความปลอดภัยของแผนผังกระบวนการผลิตของอาคารโรงงานสารเคมีที่โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ เครื่องมือ จำนวนและประเภทของอุปกรณ์ โดยมีการออกแบบติดตั้งของอุปกรณ์ความปลอดภัยเข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อเป็นการป้องกันและลดโอกาสของการการเกิดอุบัติเหตุและความเสี่ยงที่อาจทำให้เกิดความเสียหายของบริษัท

ในส่วนของการจำลองความรุนแรงกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นหนึ่งในโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้คือโปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALPHA) ซึ่งนำมาใช้ในการจำลองทิศทางและระยะการแพร่กระจายของสารเคมีเพื่อคาดการณ์ความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น โดยผลการศึกษาการออกแบบแผนผังภายในโรงงานผลิตแอมโมเนียและพิจารณามูลค่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากกรณีการเกิดเหตุฉุกเฉินกรณีแอมโมเนียรั่วไหลที่จากการระเบิดที่มีสาเหตุมาจากแรงดันในกระบวนการผลิตหลักที่เกินมาตรฐานของกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนของการผลิต และการบำรุงรักษา (Rahman et al., 2014) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ ALPHA สำหรับศึกษาประเมินผลกระทบโดยจำลองการรั่วไหลและการระเบิดของถังเก็บและจ่ายก๊าซแอลพีจีในโรงงานผลิตขึ้นส่วนรถยนต์และโรงงานผลิตเครื่องปรับอากาศชนิดแยกส่วน โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Chanthakhot et al., 2014) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เป็นการบูรณาการระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีอยู่อย่างจำกัด

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณามุมมองด้าน

ความปลอดภัย จากการวิเคราะห์ต้นทุนจากความเสี่ยงจากกรณี เหตุฉุกเฉิน โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนในการศึกษาการออกแบบที่ตั้งของโรงงาน อุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม

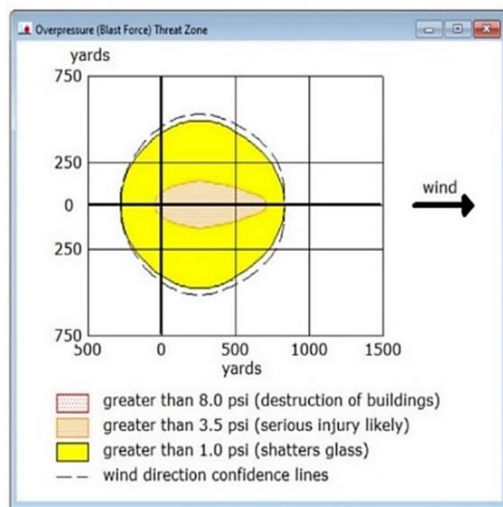
โดยในการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงาน อุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมเริ่มต้นจากการกำหนด ขอบเขตโดยใช้กรณีศึกษาของเขตนิคมอุตสาหกรรมในภาค ตะวันออกของประเทศไทย โดยการกำหนดประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรมที่พิจารณามีลักษณะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความ เป็นอันตรายในกระบวนการผลิต และมีความเสี่ยงสูงต่อ การเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น มีแก๊สไวไฟ สารพิษ และสารเคมี อันตราย เป็นต้น และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิต ทั่ว ๆ ไป ที่มีความเป็นอันตรายน้อย โดยรูปแบบของปัญหาที่

ศึกษาเป็นแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Single objective optimization model) คือพิจารณาปัจจัยด้านความเสี่ยงจาก ความเสียหายของการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณา ความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งข้อมูลทำการรวบรวม เพื่อพิจารณามี 2 ส่วนคือ ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมที่ ออกแบบให้จัดตั้งในแต่ละพื้นที่ของกริดและข้อมูลระดับความ เสี่ยงที่ได้จากการนำผลการจำลองการเกิดเหตุฉุกเฉินด้วย โปรแกรมจำลอง ALOHA มาแทนค่าในแต่ละพื้นที่ของกริดซึ่ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

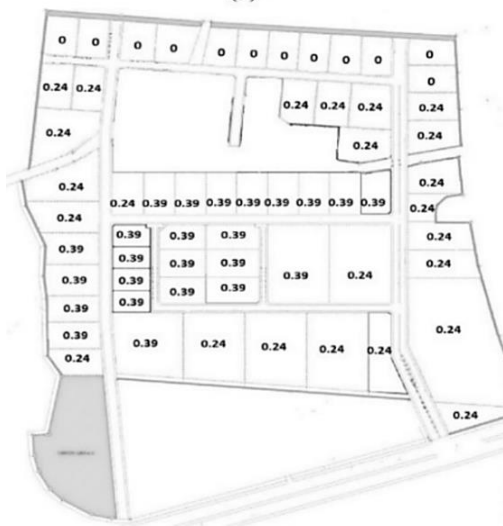
โดยการจำลองการเกิดเหตุฉุกเฉินเป็นการจำลองการ แพร่กระจายของสารเคมีในอากาศจากรูปแบบการรั่วไหลหรือ การระเบิด รวมทั้งสามารถระบุข้อมูลระดับที่จะเกิดอันตราย โดยในการศึกษานี้ ได้ใช้โปรแกรม ALOHA มาใช้เพื่อจำลองการ แพร่กระจายและการระเบิดของสารเคมีในกรณีศึกษา โดยใช้ สารเคมีประเภท Hydrogen Sulfide (H_2S) โดยผลที่ได้จาก โปรแกรม ALOHA จะแสดงลักษณะของทิศทางการแพร่ กระจายของแรงดันที่เกิดขึ้นตามสภาพภูมิอากาศของพื้นที่และ นำผลของความรุนแรงจากการระเบิดและการฟุ้งกระจายของ สารเคมี มาพิจารณาความน่าจะเป็นของระดับความเสี่ยงในแต่ละ พื้นที่ (Wang et al., 2017) ของกริดซึ่งสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (1)

$$Y = -15.6 + 1.93 \ln p^0 \quad (1)$$

โดยรูปแบบของจำลองการแพร่กระจายการระเบิดของ สารเคมีและความน่าจะเป็นของระดับความเสี่ยงสามารถแสดง ในรูปที่ 3



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) การจำลองการแพร่กระจายของสารเคมีและ (b) ระดับความเสียหายของแต่ละพื้นที่

เมื่อได้ข้อมูลระดับความเสียหายของแต่ละพื้นที่ของกริดแล้ว ขั้นตอนต่อไป เป็นการนำข้อมูลที่ได้จาก ALOHA มาแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MILP ที่พัฒนาขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยสำหรับการตัดสินใจการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยในการศึกษานี้จะกำหนดแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชันเป้าหมายแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Function) โดยพิจารณาปัญหาในการหาค่าแบบน้อยที่สุด (Minimization Problem) จากปัจจัยทางด้านความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดเหตุการณ์ ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผู้เชี่ยวชาญของ

โรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงได้ทดสอบนำแบบจำลองไปวิเคราะห์ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีเพื่อหาระยะของการติดตั้งในกรณีไม่มีความสูญเสียด้วย (Wattanasang & Ransikarbun, 2020)

ทั้งนี้ ได้กำหนดรายละเอียดการศึกษาประกอบไปด้วย ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) สมการข้อจำกัดต่าง ๆ (Constraints) ตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ (Decision Variables) รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Parameters) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

3.1 สมมติฐานในงานวิจัย

- มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ เป็นการพิจารณาจากต้นทุนในการก่อสร้างของอาคารแต่ละขนาด ซึ่งต้นทุนการก่อสร้างขึ้นกับขนาดของกริดในนิคมอุตสาหกรรมของกรณีศึกษา
- ความเสียหายจากความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเป็นการพิจารณาความเสี่ยงจากก๊าซ H_2S ในโปรแกรม ALOHA ซึ่งความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของสารเคมีเช่นเดียวกัน
- ข้อกำหนดด้านระยะห่างระหว่างโรงงานต่าง ๆ ในกรณีศึกษานี้ เป็นการใช้อัตราที่สะท้อนมาจากกฎหมาย รวมถึงจากความต้องการของผู้มีอำนาจในการตัดสินใจในนิคมอุตสาหกรรม

3.2 Notations

เซต (Set)

G คือ พื้นที่กริด (Grid) ของนิคมอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นลักษณะตาราง แสดงด้วย k

P คือ จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทที่จัดตั้งในแต่ละพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรม แสดงด้วย i

P^{TX} คือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีวัตถุดิบและสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายสูง $\in P$

P^{ID} คือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ที่ไม่มีสารเคมีที่มีความเป็นอันตราย $\in P$

พารามิเตอร์ (Parameters)

d_k^x คือ ระยะทางตามแนวแกน X ของตารางโดยเริ่มต้นที่ด้านหน้านิคมอุตสาหกรรมจนถึง k^{th} ; $k \in G$

d_k^y คือ ระยะทางตามแนวแกน Y ของตารางโดยเริ่มต้นที่ด้านหน้านิคมอุตสาหกรรมจนถึง k^{th} , $k \in G$

r_k คือ ระดับความเสี่ยงของพื้นที่แต่ละพื้นที่ในนิคมอุตสาหกรรมโดยใช้ผลจากโปรแกรม ALOHA, $k \in G$

c_k^{fc} คือ ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมตามขนาดของพื้นที่ที่จัดตั้ง, $k \in G$

$d_{i,j}^{TX_ID}$ คือ ระยะห่างน้อยที่สุดสำหรับการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเป็นอันตรายกับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป (เมตร), $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

$m_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$ คือ ระยะห่างมากที่สุดสำหรับการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเป็นอันตรายกับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป (เมตร), $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

B_{ik} คือ ตัวแปรแบบ 0-1 (Binary) สำหรับเลือกที่จะตั้งโรงงานอุตสาหกรรม (1) หรือไม่เลือกตั้งโรงงานอุตสาหกรรม (0) สำหรับ $k \in G$, $i \in P$

$SEP_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$ คือ ตัวแปรเสริมแบบ 0-1 (Binary) ในการกำหนดระยะห่างเพื่อความปลอดภัยระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

X_i คือ ระยะทางตามแนวแกน X ของโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกตั้ง $i \in P$

Y_i คือ ระยะทางตามแนวแกน Y ของโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกตั้ง $i \in P$

3.3 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective functions)

ในงานวิจัยนี้ ใช้การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายทางด้านความปลอดภัยในนิคมอุตสาหกรรม โดยสมการที่ (1) แสดงฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งคิดจากต้นทุนทางด้านความเสี่ยงกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นลักษณะปัญหาแบบค่าตอบ ที่น้อยที่สุด (Minimization)

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i \in P} \sum_{k \in G} \{r_k c_k^{fc}\} B_{i,k} \quad (1)$$

3.4 สมการข้อจำกัด (Constraints)

ในการศึกษานี้ มีการกำหนดสมการเงื่อนไขทางด้านข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในปัญหาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 สมการข้อจำกัดไม่ให้ตำแหน่งที่ตั้งวางซ้อนทับกัน (Non-overlapping Constraint)

สมการที่ (2) และสมการที่ (3) แสดงข้อจำกัดที่ทำให้แน่ใจว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกพิจารณาให้ตั้งในพื้นที่เขตนิคมอุตสาหกรรมจะไม่ทับซ้อนกัน โดยสมการที่ (2) จะเป็นการกำหนดให้แต่ละโรงงานต้องถูกวางตำแหน่งในพื้นที่ของแผนผังของนิคมอุตสาหกรรม ส่วนสมการที่ (3) กำหนดว่าสำหรับแต่ละพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรมอาจทำการตั้งโรงงานหรือไม่ตั้งโรงงานก็ได้

$$\sum_{k \in K} B_{i,k} = 1 \quad ; \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} B_{i,k} \leq 1 \quad ; \forall k \in G \quad (3)$$

3.4.2 สมการข้อจำกัดในการคำนวณระยะห่างของโรงงานอุตสาหกรรม (Distance constraints)

หลังจากที่ทราบตำแหน่งโรงงานบนพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมแล้ว ในการตั้งโรงงานบนพื้นที่สามารถวัดระยะทางตามแนวแกน X จากจุดอ้างอิงจุดเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ตั้งบนแผนผังซึ่งแทนด้วย d_k^x และระยะทางตามแนวแกน y จากจุดอ้างอิงจุดเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ตั้งบนแผนผังซึ่งแทนด้วย d_k^y ของแต่ละตำแหน่งที่ตั้งได้ ซึ่งจะทำให้ทราบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานของ X_i, Y_i ตามสมการที่ (4)-(7)

$$-m(1 - B_{i,k}) \leq (d_k^x - X_i) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (4)$$

$$(d_k^x - X_i) \leq m(1 - B_{i,k}) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (5)$$

$$-m(1 - B_{i,k}) \leq (d_k^y - Y_i) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (6)$$

$$(d_k^y - Y_i) \leq m(1 - B_{i,k}) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (7)$$

3.4.3 สมการข้อจำกัดของระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม (Separation-distance constraints for minimum condition)

ชุดสมการข้อจำกัดต่อไป เป็นการกำหนดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างโรงงาน สำหรับแนวคิดทางด้านความปลอดภัยของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งช่วยให้ลดความเสียหายในกรณีเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินได้ (Jung et al., 2010) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$|x_i - x_j| + |y_i - y_j| \geq d_{i,j} ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \quad (8)$$

ทั้งนี้เนื่องจากสมการข้อจำกัดนี้เป็นรูปแบบของ non-linear ซึ่งอยู่ในรูป absolute value ดังนั้น สามารถทำการถอดค่า absolute ออกและแปลงสมการให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรง (linear) ได้ โดยกำหนดระยะห่างเพื่อความปลอดภัยระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสารเคมีอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ได้ดังแสดงในสมการที่ (9) – (13)

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-1} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-1})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-2} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-2})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-3} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-3})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-4} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-4})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} SEP_{i,j}^{TX-ID-1} + SEP_{i,j}^{TX-ID-2} + SEP_{i,j}^{TX-ID-3} + \\ SEP_{i,j}^{TX-ID-4} \geq 1 ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (13)$$

3.4.4 สมการข้อจำกัดของระยะห่างมากที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม (Separation-distance constraints for maximum condition)

สมการเงื่อนไขชุดต่อไปเป็นการพิจารณาระยะห่างระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณาเงื่อนไขให้มีระยะห่างกันไม่เกินข้อกำหนด ($m_{i,j}$) ของทางนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$|x_i - x_j| + |y_i - y_j| \leq m_{i,j} ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \quad (14)$$

ทั้งนี้เนื่องจากสมการเป็นรูปแบบของ non-linear ในรูป absolute value ซึ่งสามารถแปลงสมการให้เป็นรูปแบบเชิงเส้นตรง (linear) ได้ ดังแสดงในสมการที่ (15) – (19)

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-1} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-2} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-3} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-4} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} m_{i,j}^{TX-ID-1} + m_{i,j}^{TX-ID-2} + m_{i,j}^{TX-ID-3} + \\ m_{i,j}^{TX-ID-4} \geq 1 ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (19)$$

3.4.5 สมการข้อจำกัดของประเภทของตัวแปร (Variable-type Constraint)

สมการเงื่อนไขส่วนสุดท้ายกำหนดลักษณะของตัวแปรที่ใช้ในสมการและอสมการ ที่ (20)–(23)

$$B_{i,k} \in \{0,1\} ; \forall_{i,k} \quad (20)$$

$$X_i \geq 0 ; \forall_i \quad (21)$$

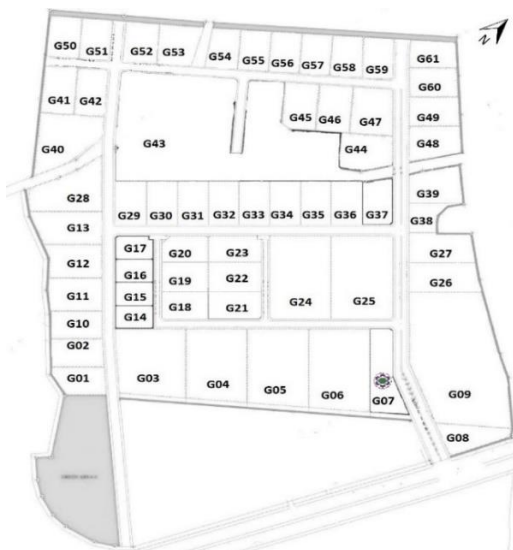
$$Y_i \geq 0 ; \forall_i \quad (22)$$

$$SEP_{i,j}^{TX-ID-1,2,3,4} \in \{0,1\} ; \forall_{i,j} \quad (23)$$

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กรณีศึกษาของนิคมอุตสาหกรรม

นิคมอุตสาหกรรมที่ดำเนินการศึกษาในงานวิจัยนี้ ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยนิคมอุตสาหกรรมจะตั้งใกล้กับถนนหลัก โดยมีเส้นทางสำหรับเข้าและออกจากนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งมีการกำหนดเป็น 2 เส้นทาง คือเส้นทางแรกอยู่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ เป็นทางเข้าหลักซึ่งติดกับถนนเส้นหลัก และเส้นทางที่สองอยู่ทางด้านทิศตะวันตกเป็นทางเข้ารองซึ่งติดกับถนนคู่ขนาน ทั้งนี้ ภายในนิคมอุตสาหกรรมจะมีการแบ่งพื้นที่เป็นสัดส่วนขนาดต่าง ๆ จำนวน 61 พื้นที่ (grids) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงแผนผังนิคมอุตสาหกรรมโดยแบ่งพื้นที่ตามกริด

ทั้งนี้ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมถูกพิจารณาให้จัดตั้งในพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้บนแผนผังซึ่งจะมีขนาดแตกต่างกัน โดยได้กำหนดขนาดพื้นที่ของตารางกริดในนิคมอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ตามข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดข้อมูลของขนาดพื้นที่ ระยะห่าง และต้นทุนของโรงงานแต่ละประเภท

ประเภทของพื้นที่	ขนาดพื้นที่ (ตร.ม)	ต้นทุนความเสียหาย (บาท)	ระยะห่างระหว่างโรงงาน (เมตร)
	BSA (2019)	Thai Appraisal (2018)	
ขนาดเล็ก	น้อยกว่า 5,000	น้อยกว่า 39,000,000	น้อยกว่า 340

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทของพื้นที่	ขนาดพื้นที่ (ตร.ม)	ต้นทุนความเสียหาย (บาท)	ระยะห่างระหว่างโรงงาน (เมตร)
	BSA (2019)	Thai Appraisal (2018)	
ขนาดใหญ่	มากกว่า 10,000	มากกว่า 78,000,000	มากกว่า 681

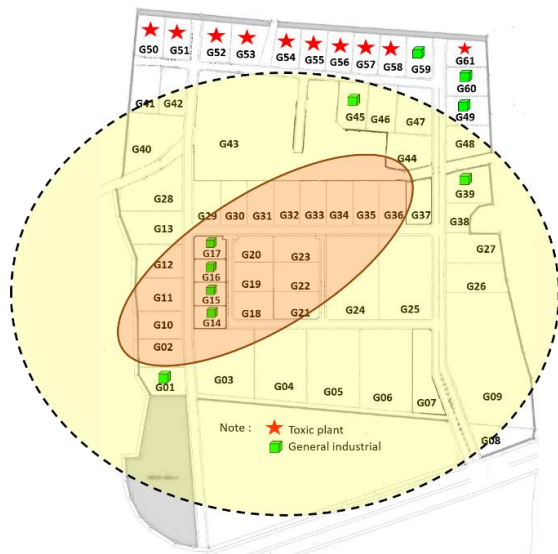
จากข้อมูลในตาราง สามารถทำการแบ่งขนาดของพื้นที่ (Area Type) ตามแผนผังของนิคมอุตสาหกรรมได้เป็น 3 ขนาด คือพื้นที่ขนาดเล็ก พื้นที่ขนาดกลาง และพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งความแตกต่างของขนาดพื้นที่ จะส่งผลกับต้นทุนทางด้านความเสี่ยงในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ฉุกเฉิน โดย ส่งผลให้อาคารของโรงงานอุตสาหกรรมเกิดความเสียหายในระดับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้จำลองการจัดตั้งโรงงานแต่ละประเภทจำนวนทั้งสิ้น 20 โรงงาน ซึ่งประมาณการจากจำนวนโรงงานที่ประกอบกิจการในนิคมอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

4.2 ผลการหาค่าที่ดีที่สุด

ปัจจัยทางด้านต้นทุนด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน ซึ่งนำมาใช้แทนการพิจารณาความปลอดภัยที่นำมาพิจารณาในการเลือกตำแหน่งสำหรับตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ พิจารณาถึงมูลค่าความเสียหายของโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จากโอกาสที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกออกแบบให้ตั้งในแต่ละกริดจะสัมผัสระดับความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินซึ่งมีระดับความน่าจะเป็นในช่วง 0-1 เพื่อพิจารณาการก่อให้เกิดความเสียหายต่อการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่นั้น ๆ

ทั้งนี้ ในการแสดงผลจากการระเบิดนั้น สามารถจำลองรัศมีการแพร่กระจายของความรุนแรงด้วยโปรแกรม ALOHA ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินแล้ว จะเกิดการแพร่กระจายส่งผ่านของแรงดันจากการระเบิดของก๊าซไฮโดรซัลไฟด์ (H_2S) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ ระดับความดันสูงสุดเท่ากับ 3.5 psi (24.2 kPa) ซึ่งมีความเป็นอันตรายมากโดยแทนด้วยสัญลักษณ์เส้นที่บ่งบอกภายในรูปวงรี และระดับความดันสูงสุดจากการระเบิด 1.0 psi (6.9 kPa) ซึ่ง

มีความเป็นอันตรายน้อยกว่า โดยแทนด้วยสัญลักษณ์พื้นที่วงกลมเส้นปะ



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการจัดตั้งโรงงานนิคมอุตสาหกรรม

ทั้งนี้ ในการหาคำตอบจากฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการ โดยกำหนดให้มูลค่าความเสียหายกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินให้มิต่ำน้อยที่สุด โดยพิจารณาระดับความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้คอมพิวเตอร์พกพา (Laptop) i5-8250U CPU @ 3.4 GHz and 8.0 GB of RAM โปรแกรม AMPL และใช้ CPLEX Solver เวอร์ชัน 12.9.0 ในการค้นหาคำตอบ พบว่าสามารถแสดงผลได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดมูลค่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน

โรงงานอุตสาหกรรม/ (กริด)	โอกาสสัมผัสความเสี่ยง	ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม (บาท)	มูลค่าความเสียหายแต่ละกริด (บาท)
P1 (G51)	0	24,375,000	0
P2 (G50)	0	24,375,000	0
P3 (G53)	0	24,375,000	0
P4 (G52)	0	24,375,000	0
P5 (G57)	0	24,375,000	0
P6 (G61)	0	18,281,250	0
P7 (G56)	0	24,375,000	0
P8 (G54)	0	24,375,000	0
P9 (G55)	0	24,375,000	0

ตารางที่ 2 (ต่อ)

โรงงานอุตสาหกรรม/ (กริด)	โอกาสสัมผัสความเสี่ยง	ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม (บาท)	มูลค่าความเสียหายแต่ละกริด (บาท)
P10 (G58)	0	24,375,000	0
P11 (G59)	0	24,375,000	0
P12 (G60)	0	29,250,000	0
P13 (G45)	0.24	21,937,500	5,265,000
P14 (G49)	0.24	29,250,000	7,020,000
P15 (G39)	0.24	29,250,000	7,020,000
P16 (G17)	0.39	14,625,000	5,703,750
P17 (G16)	0.39	14,625,000	5,703,750
P18 (G15)	0.39	14,625,000	5,703,750
P19 (G14)	0.39	14,625,000	5,703,750
P20 (G2)	0.24	24,375,000	5,850,000

ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะตำแหน่งของการจัดตั้งตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกเลือกให้อยู่บริเวณพื้นที่ด้านในของนิคมอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่นอกขอบเขตของรัศมีที่ได้รับผลกระทบได้แก่ พื้นที่ G49 – G61 จำนวน 13 โรงงาน อย่างไรก็ตาม พบว่ามี 3 โรงงาน (G1, G39, G45) ถูกออกแบบให้อยู่ในขอบเขตของรัศมีที่ได้รับผลกระทบเล็กน้อย และ 4 โรงงาน (G14 – G17) อยู่ในพื้นที่ความเสี่ยงสูงซึ่งอธิบายได้ว่า พื้นที่เหล่านี้เป็นพื้นที่ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ที่หากเกิดอันตราย จะส่งผลให้เกิดมูลค่าความเสียหายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ตามฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนดให้การออกแบบตำแหน่งที่ตั้งมีต้นทุนความเสียหายน้อยที่สุด นอกจากนี้ ตำแหน่งที่ตั้งที่ได้ เป็นไปตามข้อจำกัดของสมการเงื่อนไขที่กำหนดระยะที่ตั้งของโรงงานแต่ละแห่ง โดยโรงงานที่เป็นโรงงานประเภททั่วไปซึ่งมีความเป็นอันตรายน้อย จะถูกออกแบบให้ตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้กัน โดยเมื่อพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดโดยรวมที่อาจเกิดขึ้นจากกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินจะมีมูลค่าเท่ากับ 47,970,000 บาท ซึ่งน้อยที่สุด โดยการวิเคราะห์และประมวลผลในการหาคำตอบที่ดีที่สุดใช้ระยะเวลาสั้น ซึ่งแสดงรายละเอียดการประมวลผลของจำนวนตัวแปรตัดสินใจและสมการข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดจำนวนตัวแปรและสมการเงื่อนไข

รายละเอียด	จำนวน
ตัวแปรตัดสินใจ	
$B_{i,k}$	1,220
X_i	20
Y_j	20
$SEP_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$	400
สมการข้อจำกัด	
ชุดที่ 1. สมการข้อจำกัดกำหนดตำแหน่งที่ตั้งวางไม่ซ้อนทับกัน	81
ชุดที่ 2. สมการข้อจำกัดในการคำนวณระยะห่างของโรงงานอุตสาหกรรม	4,880
ชุดที่ 3. สมการข้อจำกัดของระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม	400
ชุดที่ 4. สมการข้อจำกัดของระยะห่างมากที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม	400

5. สรุปผลและแนวทางการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบค่าที่ดีที่สุด และทำการพิจารณาปัจจัยด้านความเสียหายจากความเสี่ยงในการเกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งเป็นการพิจารณาประเด็นด้านความปลอดภัยในการตัดสินใจ โดยคำนวณจากมูลค่าความเสียหายและความเสี่ยงที่เกิดจากเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการบูรณาการผลการวิจัยร่วมกับโปรแกรมแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ALOHA ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการระเบิดของสารเคมีในกรณีศึกษา โดยรูปแบบการตัดสินใจของตำแหน่งของโรงงานอุตสาหกรรมมีลักษณะกระจายตัวเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถูกออกแบบให้อยู่บริเวณพื้นที่ลึกเข้าไปด้านในนิคมอุตสาหกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน โดยยังคงมีโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนถูกออกแบบให้อยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสความเป็นอันตรายมาก ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของพื้นที่ที่ทั้ง 4 โรงงานถูกกำหนดให้ต้องมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ทำให้ความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจะมีมูลค่าน้อยกว่าพื้นที่อื่น ๆ ทั้งนี้ ผลการศึกษาจากการใช้โปรแกรม ALOHA ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

สามารถนำมาใช้ในการจำลองความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณาจากความเสี่ยงที่แพร่กระจายไปยังพื้นที่อื่น ๆ ในเขตนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงที่แพร่กระจายซึ่งเหมาะในการนำไปใช้พิจารณาจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

ทั้งนี้ การศึกษาในกรณีตัวอย่างนี้เป็นการศึกษาในเขตนิคมอุตสาหกรรมซึ่งผู้ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนผังได้ โดยอาจขยายขอบเขตในการศึกษา เช่น การเพิ่มปัจจัยที่ใช้พิจารณา โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในกรณีศึกษาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น รูปแบบของพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมที่ใหญ่ขึ้น หรือในระดับจังหวัดหรือระดับภูมิภาค โดยปรับเปลี่ยนรายละเอียดแต่ละปัจจัยให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาของกรณีศึกษา นอกจากนี้รูปแบบของการหาคำตอบสำหรับการศึกษานี้เป็นการหาคำตอบด้วยวิธีค่าแม่นยำ (Exact) ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของปัญหาในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม หากมีจำนวนตัวแปรปริมาณมากและปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้น อาจจำเป็นต้องใช้วิธีการค้นหาคำตอบในกลุ่มของวิธีการประมาณค่า เช่น Metaheuristic นอกจากนี้การจำลองผลกระทบจากกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน อาจพิจารณาเพิ่มขอบเขตของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบกับพื้นที่เสี่ยงที่มีอยู่ในชุมชน เนื่องจากอาจทำให้เกิดกรณีการแพร่กระจาย และระดับของอันตรายที่แตกต่างกัน รวมถึงอาจพิจารณาปัจจัยที่ครอบคลุมและเกี่ยวข้องกับความยั่งยืน (Sustainability) ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ (Economics) ด้านสังคม (Social) และด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental) ซึ่งอาจนำเครื่องมือด้านการวิเคราะห์แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) กระบวนการตัดสินใจแบบหลากหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Analysis) และการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision-Support System) (Ransikarbum & Mason, 2016; Ransikarbum et al., 2017; Oh et al., 2019, Chaiyaphan & Ransikarbum, 2020, Puchongkawarin & Ransikarbum, 2020; Ransikarbum et al., 2020, Wattanasang & Ransikarbum, 2021) มาร่วมวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- Alves, D. T. S., de Medeiros, J. L., & Ofelia de Queiroz, F. A. (2016). Optimal determination of chemical plant layout via minimization of risk 20.to general public using Monte Carlo and Simulated Annealing techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 202-214.
- BOI. (201 9 , Apr 24) . *Thailand Board of Investment*. <https://www.boi.go.th/>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., Palumbo, M., & Salini, P. (2015). Safety- based process plant layout using genetic algorithm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 139-150.
- Chae, J., & Regan, A. C. (2016). Layout design problems with heterogeneous area constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 198-207.
- Chaiyaphan, C., & Ransikarbum, K. (2020). Criteria analysis of food safety using the Analytic Hierarchy Process (AHP)-a case study of Thailand's fresh markets. In E3S Web of Conferences (Vol. 141, p. 02001). EDP Sciences.
- Chanthakhot, W., Wattanaseang, N., Wiselsa, K., & Ransikarbum, K. (2018, July) . *Computer Simulation- based Impact Assessment of LPG Storage Tank's Leakage and Explosion in Split-type Air Conditioner Factory* [Paper presentation] . In 2018 IE Network Conference, Bangkok, Thailand.
- Chanthakhot, W. , & Ransikarbum, K. (2019, December) . *Numerical Simulation for Fire Emergency Planning in a Home Appliances Factory* [Paper presentation] . In 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C) IEEE. Bangkok, Thailand.
- IEAT. (2020, March 2) . *Annual Report 2018*. <https://www.ieat.go.th/annual-report>
- Jung, S., Ng, D., Laird, C. D., & Mannan, M. S. (2010). A new approach for facility siting using mapping risks on a plant grid area and optimization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(6), 824-830.
- Kim, J., Ransikarbum, K., Kim, N., & Paik, E. (2016, May). Agent-based simulation modeling of low fertility trap hypothesis. In Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (pp. 83-86).
- Medina-Herrera, N., Jiménez-Gutiérrez, A., & Grossmann, I. E. (2014). A mathematical programming model for optimal layout considering quantitative risk analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 68, 165-181.
- Oh, Y., Ransikarbum, K., Busogi, M., Kwon, D., & Kim, N. (2019). Adaptive SVM-based real-time quality assessment for primer-sealer dispensing process of sunroof assembly line. *Reliability Engineering & System Safety*, 184, 202-212.
- Patsiatzis, D. I., Knight, G., & Papageorgiou, L. G. (2004). An MILP approach to safe process plant layout. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(5), 579-586.
- Puchongkawarin, C., & Ransikarbum, K. (2020). An Integrative Decision Support System for Improving Tourism Logistics and Public Transportation in Thailand. *Tourism Planning & Development*, 1-16.
- Rahman, S. M. T., Salim, M. T., & Syeda, S. R. (2014). Facility layout optimization of an ammonia plant based on risk and economic analysis. *Procedia Engineering*, 90, 760-765.
- Ransikarbum, K. (2020). Analysis of Traffic Flow at a Red Light Intersection using Computer Simulation technique. *Thai Journal of Operations Research: TJOR*, 8(2), 1-14.
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016). Multiple- objective analysis of integrated relief supply and network restoration in humanitarian logistics operations. *International Journal of Production Research*, 54(1), 49-68.
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016). Goal programming-based post- disaster decision making for integrated relief distribution and early- stage network restoration. *International Journal of Production Economics*, 182, 324-341.
- Ransikarbum, K., Kim, N., Ha, S., Wysk, R. A., & Rothrock, L. (2017). A highway-driving system design viewpoint using an agent-based modeling of an affordance-based finite state automata. *IEEE Access*, 6, 2193-2205.
- Ransikarbum, K., Ha, S., Ma, J., & Kim, N. (2017). Multi-objective optimization analysis for part-to- Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 35-46.
- Ransikarbum, K., Pitakaso, R., & Kim, N. (2020). A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization. *Applied Sciences*, 10(15), 5159.
- Thai Appraisal. (2018, March 3). *The 2018 costs of constructions*. <http://www.thaiappraisal.org/thai/value/value.php>
- BSA. (2019, March 1). *Building inspection law*. <http://www.bsa.or.th/>

UNCTAD. (2020, February 24). World investment reports 2019:

Special Economic Zones. <https://unctad.org/>

Wang, R., Wu, Y., Wang, Y., & Feng, X. (2017). An industrial area layout design methodology considering piping and safety using genetic algorithm. *Journal of cleaner production*, 167, 23-31.

Wattanasang, N., & Ransikarbum, K. (2019, December). *Cost Optimization Model for Plant Assignment in Industrial Estate Planning. In 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C) IEEE*, Bangkok, Thailand.

Wattanasang, N. & Ransikarbum, K. (2020). Sites Selection of industrial estates for Thailand Border's Special Economic Zones using Data Envelopment Analysis. *UBU Engineering Journal*, 13(2), 14-26.

Wattanasang, N., & Ransikarbum, K. (2021). Model and Analysis of Economic-and Risk-Based Objective Optimization Problem for Plant Location within Industrial Estates Using Epsilon-Constraint Algorithms. *Computation*, 9(4), 46.

Wu, Y., Wang, Y., & Feng, X. (2016). A heuristic approach for petrochemical plant layout considering steam pipeline length. *Chinese journal of chemical engineering*, 24(8) , 1032-1037

Yuan, X. U., Zhenyu, W. A. N. G., & Qunxiong, Z. H. U. (2013). An improved hybrid genetic algorithm for chemical plant layout optimization with novel non-overlapping and toxic gas dispersion constraints. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21(4), 412-419.

7. ชีวประวัติ



Niroot Wattanasang received the B.Sc. in Industrial Hygiene and Safety from Burapha University and M.Eng. Degree in Safety Engineering and Environmental Management from Kasetsart University. Currently, he is pursuing the Ph.D. degree in Industrial Engineering at Ubon Ratchathani University. He also works as the safety instructor and consultant. His research interest includes Safety Management and Multi Criteria Decision Analysis.



Kasin Ransikarbum received the B.Eng., M.S., and Ph.D. Degrees in Industrial Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi; Pennsylvania State University, USA; and Clemson University, USA, respectively. He was also a postdoctoral researcher at Ulsan National Institute of Science and Technology, Republic of Korea. Currently, he works at the Industrial Engineering, Ubonratchathani University, Thailand. His research interest includes supply chain modeling and applied optimization and simulation.