



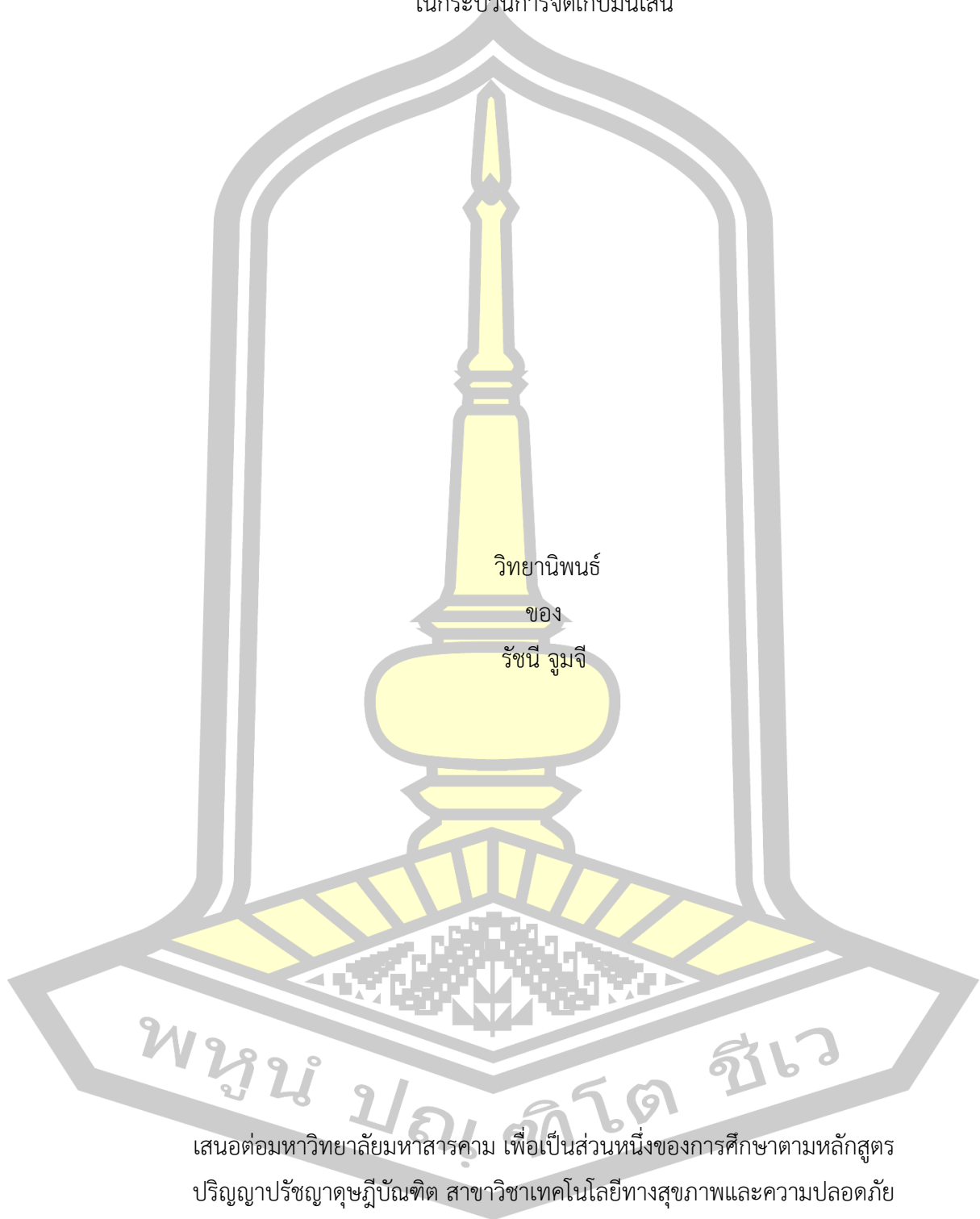
การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ เพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่น
ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

วิทยานิพนธ์
ของ
รัชณี จูมจี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย
ตุลาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ เพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่น
ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

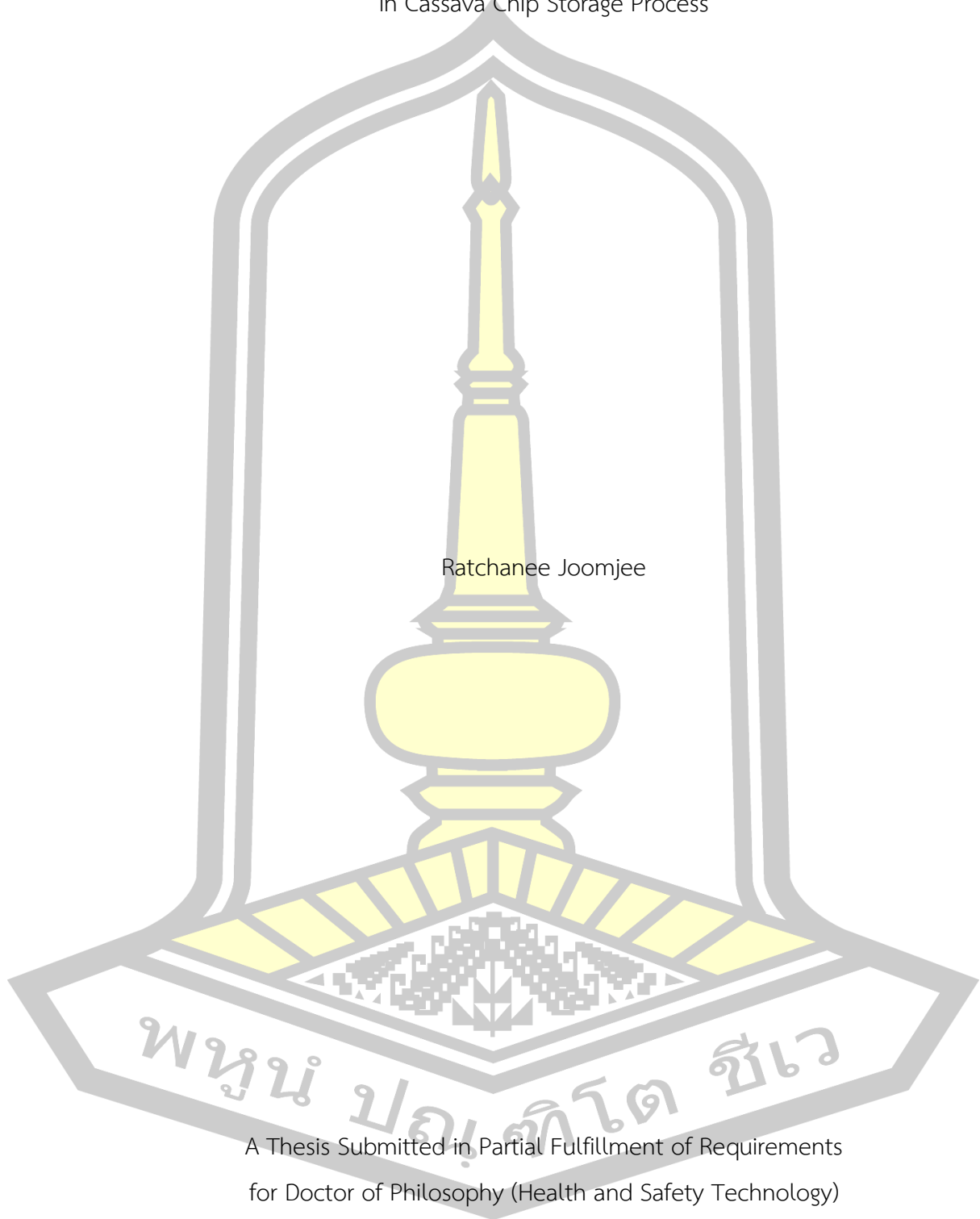


ตุลาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Quantitative Risk Assessment to Improve Dust Explosion Protection Systems
in Cassava Chip Storage Process

Ratchanee Joomjee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Health and Safety Technology)

October 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวรัชณี จุมจี แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทาง
สุขภาพและความปลอดภัย ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. เฉลิมชัย ชัยกิตติภรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. วิศิษฐ์ ทองคำ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. อารุณ เกตุสาคร)

กรรมการ

(รศ. ดร. จินดาวัณย์ วิบูลย์อุทัย)

กรรมการ

(รศ. ดร. สันติสิทธิ์ เขียวเงิน)

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผศ. ดร. เฉลิมสิริ เทพพิทักษ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

(รศ. ดร. สุมัทนา กลางคาร)

คณบดีคณะสาธารณสุขศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ เพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่น ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น		
ผู้วิจัย	รัชณี จุมจี		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ์ ทองคำ รองศาสตราจารย์ ดร. อารุณ เกตุสาคร		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

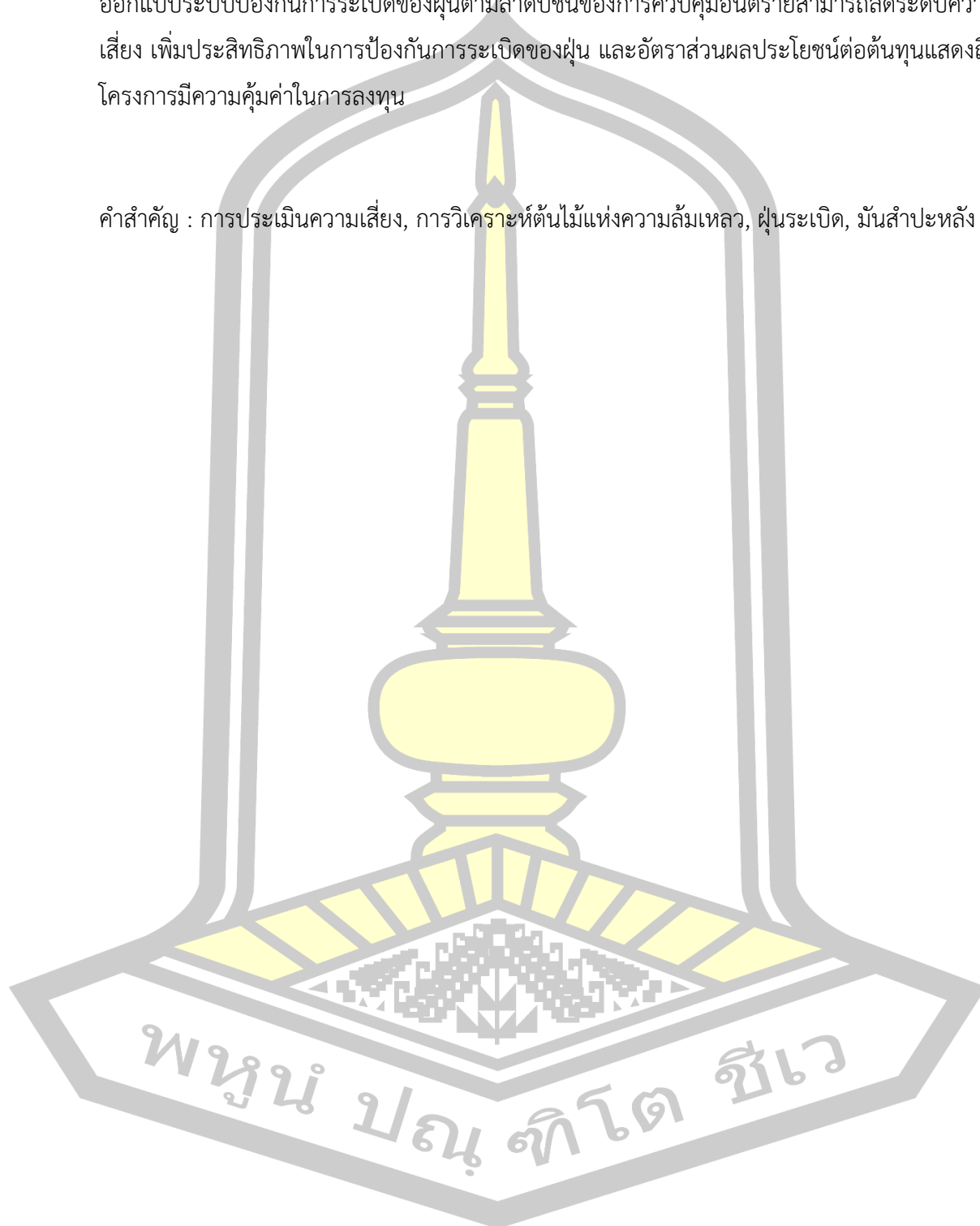
บทนำ: การระเบิดของฝุ่นเกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมหลายแห่งและส่งผลกระทบต่อทั่วโลก ทำให้เกิดการบาดเจ็บ เสียชีวิต ทรัพย์สิน และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ศึกษาปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดของฝุ่น การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่น และศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

ระเบียบวิธีวิจัย: การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา ดำเนินการศึกษาในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในจังหวัดอุบลราชธานี เครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ แบบการประเมินความเสี่ยงด้วยแผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ฟิชชี การใช้ลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Expert Choice 11 สถิติที่ใช้คือความถี่ สัดส่วน และร้อยละ

ผลการศึกษา: ขนาดของฝุ่นมันเส้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $16.71 \mu\text{m}$ ปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น พบว่า โอกาสการเกิดการระเบิดของฝุ่น ร้อยละ 98.50 มาจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น ร้อยละ 99.80 ความร้อน ร้อยละ 98.00 ระดับความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นอยู่ในระดับ 5 (ความเสี่ยงสูงมาก)การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย ประกอบด้วย การป้องกันการระเบิดของฝุ่นจากการขจัด การควบคุมทางวิศวกรรม และการบริหารจัดการ ประสิทธิภาพการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นทำให้ระดับความเสี่ยงลดลงเหลือระดับ 4 (ความเสี่ยงสูง) ประสิทธิภาพการป้องกันการระเบิดฝุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.74 และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน มากกว่า 1 การลงทุน แสดงถึงโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน

สรุปผลการศึกษา: ผู้คนในกระบวนจัดเก็บมันเส้นสามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดของผู้คนตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตรายสามารถลดระดับความเสี่ยง เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการระเบิดของผู้คน และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนแสดงถึงโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ : การประเมินความเสี่ยง, การวิเคราะห์หัดันไม้แห่งความล้มเหลว, ผู้คนระเบิด, มันสำปะหลัง



TITLE	Quantitative Risk Assessment to Improve Dust Explosion Protection Systems in Cassava Chip Storage Process		
AUTHOR	Ratchanee Joomjee		
ADVISORS	Assistant Professor Wisit Thongkum , Ph.D. Associate Professor Arroon Ketsakorn , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Health and Safety Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

Introduction: Dust explosions occur in various industries globally, leading to injuries, fatalities, property damage, and environmental impacts. This study aimed to find the dimension of cassava chip dust, find the basic factors and risk assessment that influence dust explosions, design the dust explosion prevention system, and find the effectiveness of improving the dust explosion prevention system in the Cassava chip storage process.

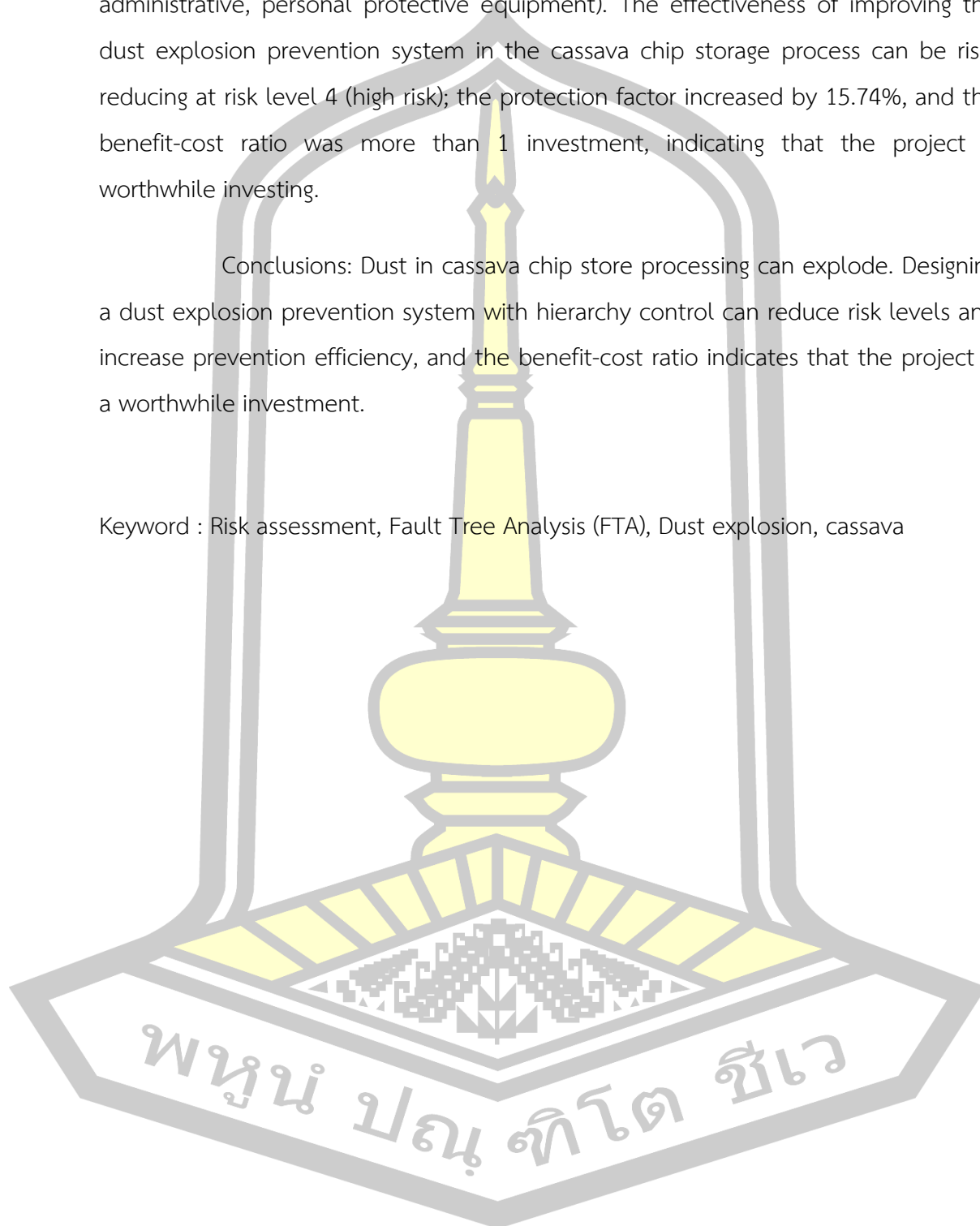
Methods: This study is a research and development. The sample size is a cassava starch factory in Ubon Ratchathani Province. The study was conducted between June 2022 and March 2024. The tools include risk assessment with Failure Tree Analysis (FTA), Analytical Hierarchy Process (AHP), fuzzy and hierarchy control. Analyzed with the Expert Choice 11 program. The statistics used were frequency, proportion, and percentage.

Results: Findings: The dimension of cassava chip dust was 16.71 μm . Based on the results of the risk assessment utilizing the FFTA-AHP technique, it finds key factors of the basic event probability of dust explosion in the cassava storage process were: dust dispersion at 98.80%, ignition sources at 98.00%, and risk level 5 (very high risk). The design of the dust explosion prevention system in the cassava

storage process applied hierarchy control (elimination, engineering controls, administrative, personal protective equipment). The effectiveness of improving the dust explosion prevention system in the cassava chip storage process can be risk-reducing at risk level 4 (high risk); the protection factor increased by 15.74%, and the benefit-cost ratio was more than 1 investment, indicating that the project is worthwhile investing.

Conclusions: Dust in cassava chip store processing can explode. Designing a dust explosion prevention system with hierarchy control can reduce risk levels and increase prevention efficiency, and the benefit-cost ratio indicates that the project is a worthwhile investment.

Keyword : Risk assessment, Fault Tree Analysis (FTA), Dust explosion, cassava



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ์ ทองคำ และรองศาสตราจารย์ ดร.อารุณ เกตุสาคร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ มา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เฉลิมชัย ชัยกิตติภรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จินดาวัลย์ วิบูลย์อุทัย รศ.ดร.สันติสิทธิ์ เขียวเงิน และ ผศ.ดร.เฉลิมสิริ เทพพิทักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาแนะนำ และตรวจทานแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์เพิ่มเติม ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้บริหารสถานประกอบการที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ และช่วยเหลือการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและก่อให้เกิดการพัฒนาที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

รัชณี จุมจี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 คำถามการวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	7
2.1 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น.....	7
2.2 การระเบิดฝุ่น.....	9
2.3 การเกิดการระเบิดฝุ่น.....	18
2.4 การประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่น.....	45
2.5 หลักการบริหารจัดการความปลอดภัยในสถานประกอบการ.....	72
2.6 การวิจัยและพัฒนา (Research & Development).....	76
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	77

2.8 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	83
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	100
3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	100
3.2 สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล	101
3.3 การดำเนินการศึกษา.....	101
บทที่ 4 ผลการศึกษา	117
4.1 การศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น	117
4.2 ศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นใน กระบวนการจัดเก็บมันเส้น	118
4.3 การออกแบบ และปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น	158
4.4 การศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่น ในกระบวนการจัดเก็บ มันเส้น	174
บทที่ 5 สรุป และอภิปรายผลการศึกษา.....	182
5.1 สรุปผลการศึกษา	182
5.2 อภิปรายผลการศึกษา	182
5.3 ข้อเสนอแนะการศึกษา.....	185
บรรณานุกรม	187
ภาคผนวก	195
ภาคผนวก ก แบบสอบถามสำหรับการสนทนากลุ่ม.....	196
ภาคผนวก ข หนังสือการรับรองด้านจริยธรรมการวิจัย	210
ภาคผนวก ค คู่มือความปลอดภัยในการป้องกันการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง	213
ประวัติผู้เขียน	269

สารบัญตาราง

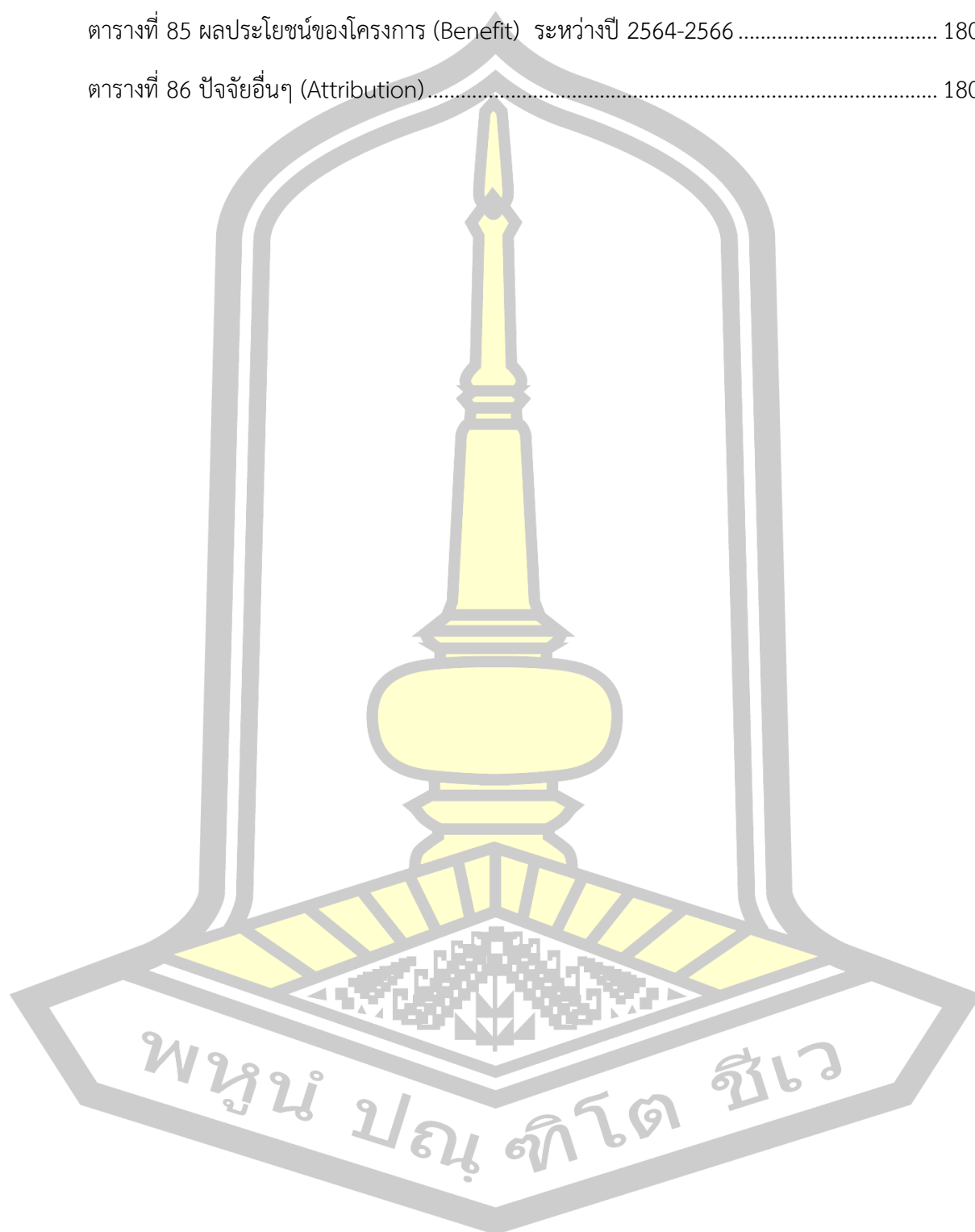
	หน้า
ตารางที่ 1 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศจีน และได้หัววัน พ.ศ. 2548-2560	11
ตารางที่ 2 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทย พ.ศ. 2545-2552	15
ตารางที่ 3 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทย	15
ตารางที่ 4 อุณหภูมิที่จุดติดไฟของฝุ่นชนิดต่าง ๆ แยกตามลักษณะของฝุ่น	23
ตารางที่ 5 การจัดกลุ่มฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ (Dust hazard class)	25
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดระหว่างฝุ่นชนิดต่าง ๆ	25
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดฝุ่นที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม หรือรูปร่างไม่สม่ำเสมอ	26
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดฝุ่นที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม	26
ตารางที่ 9 ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจมีฝุ่นระเบิดได้	35
ตารางที่ 10 ระบบการให้คะแนน แผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrix)	46
ตารางที่ 11 ตัวอย่าง Qualitative risk assessment (5x4) matrix	47
ตารางที่ 12 ตัวอย่าง Semiquantitative risk assessment (5x4) matrix	48
ตารางที่ 13 โอกาสในการเกิดของเหตุการณ์ (Likelihood)	48
ตารางที่ 14 ระดับของความรุนแรงของเหตุการณ์ (Severity)	48
ตารางที่ 15 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง	49
ตารางที่ 16 การจัดระดับโอกาสในการเกิดของเหตุการณ์ ANSIZ 10	49
ตารางที่ 17 การจัดระดับผลกระทบของเหตุการณ์ ANSIZ 10	49
ตารางที่ 18 Risk Matrix (ANSIZ 10)	50
ตารางที่ 19 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง (ANSIZ 10)	50
ตารางที่ 20 มาตรการป้องกัน (Protection Factor) (ANSIZ 10)	51

ตารางที่ 21 การจัดระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ	51
ตารางที่ 22 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล	52
ตารางที่ 23 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน	52
ตารางที่ 24 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	52
ตารางที่ 25 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน	53
ตารางที่ 26 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย	53
ตารางที่ 27 รูปแบบสัญลักษณ์ FTA.....	55
ตารางที่ 28 แสดงชุดของตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่	58
ตารางที่ 29 ตารางเมตริกที่ใช้ในการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์เป็นคู่ (Pairwise Comparison).....	59
ตารางที่ 30 ค่า RI จากการสุ่มตัวอย่าง	61
ตารางที่ 31 ตารางเมตริกที่แสดงถึงเป้าหมายการตัดสินใจภายใต้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบ	62
ตารางที่ 32 ค่าความสำคัญตามทฤษฎีของ Chang แสดงระดับความสำคัญของการเปรียบเทียบคู่ ..	69
ตารางที่ 33 ความหมายตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ใน Fuzzy	106
ตารางที่ 34 ระดับของคะแนนโอกาสการเกิด และระดับของโอกาสในการเกิดและระดับผลกระทบ	114
ตารางที่ 35 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุการพังกระจายของฝุ่น.....	121
ตารางที่ 36 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุการพังกระจายของฝุ่น	121
ตารางที่ 37 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุการพังกระจายของฝุ่น.....	121
ตารางที่ 38 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	123
ตารางที่ 39 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุ ความผิดพลาดของพนักงาน ..	123
ตารางที่ 40 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุ ความผิดพลาดของพนักงาน	124
ตารางที่ 41 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	125
ตารางที่ 42 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุความร้อนจากกะป้อลำเลียง.....	126
ตารางที่ 43 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุความร้อนจากกะป้อลำเลียง	126

ตารางที่ 44 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของความร้อนจากมอเตอร์.....	128
ตารางที่ 45 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุความร้อนจากมอเตอร์.....	128
ตารางที่ 46 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุความร้อนจากมอเตอร์.....	128
ตารางที่ 47 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	130
ตารางที่ 48 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	130
ตารางที่ 49 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	130
ตารางที่ 50 ค่าผลกระทบในการเกิดเหตุการณ์ และค่าโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ FTA-AHP.....	134
ตารางที่ 51 คะแนนความเสี่ยง (Risk matrix).....	137
ตารางที่ 52 การประเมิน Fuzzy AHP เพื่อหาความผิดพลาดของการฟุ้งกระจายของฝุ่น	138
ตารางที่ 53 เมตริกซ์ฟัซซี การฟุ้งกระจายของฝุ่น.....	139
ตารางที่ 54 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น	139
ตารางที่ 55 การประเมิน Fuzzy AHP ความผิดพลาดของพนักงาน.....	141
ตารางที่ 56 เมตริกซ์ฟัซซี เพื่อหาความผิดพลาดของพนักงาน	141
ตารางที่ 57 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของพนักงาน.....	142
ตารางที่ 58 การประเมิน Fuzzy AHP การเกิดฝุ่นระเบิดจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง.....	144
ตารางที่ 59 เมตริกซ์ฟัซซี ความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง.....	144
ตารางที่ 60 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง	145
ตารางที่ 61 การประเมิน Fuzzy AHP ความร้อนจากมอเตอร์.....	147
ตารางที่ 62 เมตริกซ์ฟัซซี เพื่อหาความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์.....	147
ตารางที่ 63 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์.....	148
ตารางที่ 64 การประเมิน Fuzzy AHP ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์.....	149

ตารางที่ 65 เมตริกซ์ฟิชชี เพื่อหาความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	150
ตารางที่ 66 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	150
ตารางที่ 67 ค่าผลกระทบ และค่าโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ จาก FFTA-AHP	155
ตารางที่ 68 คะแนนความเสี่ยง (Risk Assessment Matrix)	156
ตารางที่ 69 การเปรียบเทียบผลกระทบ และโอกาสการเกิด ระหว่าง FTA-AHP กับ FFTA-AHP .	157
ตารางที่ 70 แนวทางการป้องกันด้วยลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) จากการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น	159
ตารางที่ 71 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) การกำจัด (Elimination).....	160
ตารางที่ 72 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการจัด	160
ตารางที่ 73 การเปรียบเทียบคู่ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls).....	162
ตารางที่ 74 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)	162
ตารางที่ 75 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) การบริหารจัดการ.....	163
ตารางที่ 76 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การบริหารจัดการ.....	163
ตารางที่ 77 การคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น.....	165
ตารางที่ 78 การคำนวณช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) ในกะพ้อ	166
ตารางที่ 79 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification).....	172
ตารางที่ 80 การคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น.....	174
ตารางที่ 81 การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) หลังดำเนินระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น	175
ตารางที่ 82 การเปรียบเทียบการให้คะแนนตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ก่อนและหลังการปรับปรุง.....	176
ตารางที่ 83 ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2565-2566	178

ตารางที่ 84 ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2564-2566	179
ตารางที่ 85 ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit) ระหว่างปี 2564-2566	180
ตารางที่ 86 ปัจจัยอื่นๆ (Attribution).....	180



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น.....	7
ภาพที่ 2 อุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของกระบวนการจัดเก็บมันเส้น.....	9
ภาพที่ 3 การระเบิดฝุ่นในช่วงปี พ.ศ. 2528 – พ.ศ. 2555.....	10
ภาพที่ 4 สถิติการเกิดการระเบิดฝุ่นในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท.....	10
ภาพที่ 5 บริเวณที่เกิดการระเบิดในกระบวนการผลิตน้ำตาล.....	14
ภาพที่ 6 แสดงผลกระทบจากการระเบิดฝุ่นมันเส้นที่ทำให้ชุดไซโคลน และชุด Hopper	17
ภาพที่ 7 แสดงผลจากการลุกไหม้ไฟบริเวณไส้กรองอากาศใต้ไซโคลนร้อน.....	17
ภาพที่ 8 แสดงอาคารโรงงาน บริเวณไซโคลนเย็น และห้องบรรจุแบ่งเสียหายจากการระเบิด	18
ภาพที่ 9 องค์ประกอบของการเกิดไฟ การลุกติดไฟ และการระเบิด.....	18
ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบช่วงความเข้มข้นของฝุ่น (g/m^3).....	19
ภาพที่ 11 ตัวอย่างการต่อลงดิน (Grounding) และการเชื่อมต่อฝาก (Bonding).....	21
ภาพที่ 12 ค่าความดันอากาศเมื่อเกิดการระเบิดภายในพื้นที่ปิดที่ความเข้มข้นของฝุ่น	24
ภาพที่ 13 การเกิดระเบิดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2	27
ภาพที่ 14 แสดงการระเบิดฝุ่นที่กองอยู่ที่พื้น.....	28
ภาพที่ 15 Pressure–Time Graph of a Vented Deflagration	39
ภาพที่ 16 Deflagration Vent Panel and Support Grid	39
ภาพที่ 17 แสดงการติดตั้งช่องระบายในระบบดูดฝุ่น (Vented Dust Collector).....	40
ภาพที่ 18 ตัวอย่าง การตรวจจับและระงับการระเบิด ของแบ่งบรรจุในถังเก็บขนาด 1 m^3	41
ภาพที่ 19 Dust Collector Suppression System.....	41
ภาพที่ 20 การแยกพื้นที่ทางกล (Mechanical isolation).....	42
ภาพที่ 21 การแยกพื้นที่ทางเคมี (Chemical isolation).....	43

ภาพที่ 22 แสดงบริเวณความเข้มข้นฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ ในกระบวนการอบแป้งมันสำปะหลัง	44
ภาพที่ 23 Risk Analysis and Risk Assessment.....	45
ภาพที่ 24 ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง.....	45
ภาพที่ 25 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTA.....	55
ภาพที่ 26 แสดงการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้ เพื่อหาสาเหตุย่อยโดยพิจารณาจากห้าเหลี่ยมของ การระเบิด.....	56
ภาพที่ 27 แสดงโครงสร้างลำดับชั้น AHP	57
ภาพที่ 28 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น AHP	62
ภาพที่ 29 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น AHP	63
ภาพที่ 30 ตัวอย่างการแสดงผลวิเคราะห์และประมวลผลด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป Expert Choice	64
ภาพที่ 31 ตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) กับตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy).....	65
ภาพที่ 32 ขั้นตอนการประมวลผล ตรรกะแบบคลุมเครือ.....	65
ภาพที่ 33 ขั้นตอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	66
ภาพที่ 34 การอนุมาน (Inference).....	66
ภาพที่ 35 การอนุมาน (Inference).....	67
ภาพที่ 36 การอนุมาน (Inference).....	67
ภาพที่ 37 ฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	68
ภาพที่ 38 ตัวเลขสมาชิกของสามเหลี่ยมฟัซซี่	70
ภาพที่ 39 ลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls).....	73
ภาพที่ 40 หลักการป้องกันที่ตำแหน่งของความเสี่ยง (Hazard prevention: HP).....	74
ภาพที่ 41 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	77
ภาพที่ 42 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	85
ภาพที่ 43 กรอบแนวคิดระยะที่ 1	110
ภาพที่ 44 กรอบแนวคิดระยะที่ 2	112

ภาพที่ 45 กรอบแนวคิดระยะที่ 3	113
ภาพที่ 46 กรอบแนวคิดระยะที่ 4	116
ภาพที่ 47 แสดงลักษณะของฝุ่นมันเส้น จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN.....	117
ภาพที่ 48 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA)	119
ภาพที่ 49 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ สาเหตุการฟุ้งกระจายของฝุ่น จาก Expert Choice 11.	122
ภาพที่ 50 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	123
ภาพที่ 51 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) จาก Expert Choice 11	124
ภาพที่ 52 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA ความผิดพลาดของพนักงาน.....	125
ภาพที่ 53 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) จาก Expert Choice 11	127
ภาพที่ 54 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) ...	127
ภาพที่ 55 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ มอเตอร์ (Motor) จาก Expert Choice 11	129
ภาพที่ 56 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP มอเตอร์ (Motor).....	129
ภาพที่ 57 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้จากความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) จาก Expert Choice 11.....	131
ภาพที่ 58 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor).....	132
ภาพที่ 59 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP แหล่งจุดติดไฟ (Ignition source)....	133
ภาพที่ 60 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP การระเบิดฝุ่นมันเส้น	134
ภาพที่ 61 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP	136
ภาพที่ 62 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP การฟุ้งกระจายของฝุ่น	140
ภาพที่ 63 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความผิดพลาดของพนักงาน.....	143
ภาพที่ 64 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP กะพ้อลำเลียง.....	147

ภาพที่ 65 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP มอเตอร์.....	149
ภาพที่ 66 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์.....	152
ภาพที่ 67 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความร้อน (Ignition source).....	153
ภาพที่ 68 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP การระเบิดฝุ่นมันเส้น.....	154
ภาพที่ 69 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด.....	161
ภาพที่ 70 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls).....	162
ภาพที่ 71 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls).....	164
ภาพที่ 72 แนวทางการป้องกันด้วยลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) จากการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น.....	164
ภาพที่ 73 การออกแบบช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting).....	167
ภาพที่ 74 การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector).....	168
ภาพที่ 75 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้งถังดับเพลิงในพื้นที่จัดเก็บมันเส้น.....	169
ภาพที่ 76 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้ง ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร.....	169
ภาพที่ 77 การคำนวณการติดตั้ง และปริมาณน้ำสำรองตามมาตรฐาน.....	170
ภาพที่ 78 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) ในกะพ้อ.....	171
ภาพที่ 79 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ในกระบวนการผลิต.....	172



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การระเบิดของฝุ่นส่งผลกระทบต่อทั่วโลก ทำให้เกิดการบาดเจ็บ เสียชีวิต เกิดความสูญเสียต่อคนและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก (Prasad et al., 2021) รวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ที่มีการระเบิด ช่วงปี พ.ศ. 2528- 2555 พบสถิติการระเบิดของฝุ่นทั่วโลกมีมากกว่า 2,000 ครั้ง ประเทศที่มีการระเบิดส่วนใหญ่จะเป็นประเทศที่มีการพัฒนาทางอุตสาหกรรม ประเทศที่มีอัตราการเกิดอุบัติเหตุสูงสุด ได้แก่ จีน ร้อยละ 38.10 สหรัฐอเมริกา ร้อยละ 18.70 และแคนาดา ร้อยละ 6.40 (Yuan et al., 2015) การระเบิดของฝุ่นอันตรายมักเกิดในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเคมี พ.ศ. 2541-2564 พบสถิติฝุ่นระเบิดสูงสุดในประเทศจีน มีจำนวน 67 ครั้ง ส่งผลให้มีผู้เสียชีวิต 547 ราย และบาดเจ็บ 600 ราย (Guan et al., 2023) ในสหรัฐอเมริกาพบอันตรายจากการระเบิดของฝุ่น จำนวน 281 ครั้งในช่วง 25 ปีที่สิ้นสุดในปี พ.ศ. 2548 ส่งผลให้มีผู้เสียชีวิต 119 ราย บาดเจ็บ 718 ราย และสูญเสียทรัพย์สินในกระบวนการผลิตล้านดอลลาร์ (Ebadat, 2010) นอกจากนี้ยังพบรายงานสถิติการเกิดอุบัติเหตุในช่วง พ.ศ. 2549-2563 มีการระเบิดของฝุ่น จำนวน 211 ส่งผลให้มีผู้เสียชีวิต 70 ราย และบาดเจ็บ 452 ราย (Pang et al., 2023) ในประเทศไทยมีรายงานการระเบิดของฝุ่นจำนวน 5 ครั้ง การระเบิดของฝุ่นมันเส้น จำนวน 2 ครั้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) องค์ประกอบของการระเบิดของฝุ่น มี 5 องค์ประกอบ (The Dust Explosion Pentagon) ได้แก่ ฝุ่นมันเส้น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) การระเบิดของฝุ่นมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในกลุ่มหมอกฝุ่น ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเกิดขึ้น และทำให้เกิดการระเบิด (Amyotte & Eckhoff, 2010) วัสดุที่ทำให้เกิดการระเบิดของฝุ่น ได้แก่ วัสดุอินทรีย์ธรรมชาติ วัสดุอินทรีย์สังเคราะห์ ถ่านหิน และโลหะ ความร้อนจากการเผาไหม้ของวัสดุจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่สามารถปล่อยออกมาจากการระเบิดได้ (Eckhoff, 2003) จากรายงานสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National Fire Protection Association: NFPA) ระบุว่าฝุ่นที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 420 μm (0.017 นิ้ว) ฝุ่นจะผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (NFPA 664, 2018) องค์ประกอบของการเกิดการระเบิดของฝุ่นประกอบด้วย เชื้อเพลิง (ฝุ่น) ออกซิเจน ความร้อน การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตหมอกฝุ่นเรียกว่า ห้าเหลี่ยมการระเบิดของฝุ่น (The dust explosion pentagon) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) สาเหตุที่ทำให้เกิดการระเบิดของฝุ่นมักมาจากแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน เช่น ไฟฟ้าสถิต

อุปกรณ์ดักจับฝุ่น ความล้มเหลวของอุปกรณ์เครื่องจักร และการฟุ้งกระจายของฝุ่น เป็นต้น (Wei et al., 2020) การระเบิดของฝุ่นอินทรีย์ยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ (Barozzi et al., 2020) ประเทศไทยถือเป็นอีกพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นสูงเนื่องจากมีพื้นที่การเพาะปลูก และอุตสาหกรรมอาหารจำนวนมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เพราะประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังมากถึง 8,910 ไร่ ผลผลิต 2,891,000 ตัน มีอัตราการผลิตมากอยู่ในลำดับที่ 3 ของโลกรองจากประเทศไนจีเรีย และคองโก พื้นที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังมีมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2562) จังหวัดอุบลราชธานีถือเป็นแหล่งเพาะปลูกจัดอยู่ใน 5 ลำดับแรกของประเทศ พื้นที่การเพาะปลูกรองจากจังหวัดนครราชสีมา จังหวัดกำแพงเพชร จังหวัดชัยภูมิ และจังหวัดกาญจนบุรี ผลผลิตของมันสำปะหลังที่ส่งออกต่างประเทศจะอยู่ในรูปของมันเส้น มันสำปะหลังอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563) จากการศึกษาดังกล่าวจึงทำให้สถานประกอบการหลายแห่งเริ่มให้ความสำคัญในการศึกษาเพื่อป้องกันอันตราย และประเมินความเสี่ยงจากการระเบิดฝุ่น ซึ่งได้มีการนำเทคนิคการประเมินความเสี่ยงที่มีความหลากหลายมาใช้ แต่ละเทคนิคที่ถูกเลือกมาใช้นั้นจะขึ้นกับลักษณะของแหล่งที่มาของความเสี่ยง และปัจจัยประกอบในการวิเคราะห์ เทคนิคที่นำมาใช้มีทั้งการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative risk management) (Ikwan et al., 2021) และการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk management) การจำลองสถานการณ์การระเบิดของฝุ่น (Dust explosion simulation code) การประยุกต์ใช้ลำดับชั้นของมาตรการควบคุม (The hierarchy of controlling) (Abuswer et al., 2013) การวิเคราะห์เทคนิคการวิเคราะห์ค่าต่ำสุดเท่าที่จะต่ำได้และสมเหตุสมผล (As low as reasonably: ALARP) ผังแสดงเหตุและผล (Cause consequence diagram: CCD) ระบบการควบคุมการกระจาย (Distributed control system : DCS) การป้องกันอันตรายแบบวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects analysis: FMEA) การวิเคราะห์ความวิกฤติ ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects criticality analysis : FMECA) การป้องกันอันตรายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis : FTA) (Barozzi et al., 2020) ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย FTA ถือเป็นอีกเทคนิคที่เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้ประเมินความเสี่ยงอย่างกว้างขวางทั้งอุตสาหกรรมขนส่ง อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมพลังงานนิวเคลียร์ อุตสาหกรรมการบิน อวกาศ และอุตสาหกรรมบริการ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่เข้าใจง่าย ชัดเจน มีความน่าเชื่อถือ สามารถระบุปัจจัยความผิดพลาด ความล้มเหลวของเหตุการณ์พื้นฐานได้ (Basic event) (Shi et al., 2018) นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวและการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับประเมินความเสี่ยงการเกิดฝุ่นระเบิดในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น (Fault Tree Analysis-Analytic Hierarchy Process :FTA-

AHP) ทำให้เกิดความแม่นยำ เกิดความครอบคลุมในการหาสาเหตุ ความผิดพลาดจากกระบวนการผลิต สามารถระบุค่าความเสี่ยงสูงสุดที่อาจทำให้เกิดการระเบิดของฝุ่นที่อาจเกิดจากเครื่องจักร และอุปกรณ์ควบคุมการผลิตได้ (ศราวุฒิ ไชยรัตน์, 2564) ยิ่งกว่านี้การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวและการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการประเมินความเสี่ยงการระเบิดของฝุ่น (Fault tree analysis-Fuzzy: FFTA) ทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุพื้นฐานการระเบิดของฝุ่นได้ดีชัดเจน ลดความคลุมเครือ ระบุระดับความสำคัญของเหตุการณ์พื้นฐาน และเรียงลำดับของเหตุการณ์ทั้งหมด ทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจ นำไปสู่การกำหนดมาตรการควบคุม ปรับปรุงแก้ไข การบริหารจัดการเพื่อป้องกันการระเบิดของฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Li et al., 2017; Liu et al., 2020; Shi et al., 2018)

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ามีการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ยังขาดการประเมินความเสี่ยงในการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบ โดยเฉพาะวัสดุที่เสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น และการศึกษาปัจจัยที่มีความเสี่ยงจากผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดของฝุ่นมันเส้น ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และการศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น รวมทั้งให้สอดคล้องกับเป้าหมายแผนบูรณาการด้านการวิจัยของประเทศ ตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development goals : SDGs) ในประเด็น SDG3 รับรองการมีสุขภาพ และความเป็นอยู่ที่ดีของทุกคนทุกช่วงอายุ (Good health and well-being) SDG8 ส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ต่อเนื่องครอบคลุมและยั่งยืนการจ้างงานที่มีคุณค่า (Decent work and economic growth) และ SDG9 พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่พร้อมรับการเปลี่ยนแปลง ส่งเสริมการปรับตัวให้เป็นอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนทั้งถึง และสนับสนุนนวัตกรรม (Industry innovation and infrastructure)

1.2 คำถามการวิจัย

1.2.1 ขนาดของฝุ่นมันเส้นมีขนาดที่สามารถทำให้เกิดระเบิดได้หรือไม่

1.2.2 ความเสี่ยงของการเกิดการระเบิดของฝุ่นมันเส้นของอุปกรณ์ควบคุมในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น เป็นอย่างไร

1.2.3 การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นควรเป็นอย่างไร

1.2.4 ผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บ
มันเส้น เป็นอย่างไร

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น
- 1.3.2 เพื่อศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิด
ฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น
- 1.3.3 เพื่อออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น
- 1.3.4 เพื่อศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการ
จัดเก็บมันเส้น

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

- 1.4.1 สามารถนำผลการศึกษาไปใช้ในการป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บ
มันเส้น
- 1.4.2 สามารถลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น
- 1.4.3. สถานประกอบการมีระบบบริหารจัดการด้านการป้องกันการระเบิดฝุ่นใน
กระบวนการจัดเก็บมันเส้นที่มีประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา
การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาขนาดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น
การประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น โดยการประยุกต์ใช้วิธี
FFTA-AHP การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และการศึกษาผล
การปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

- 1.5.2 ขอบเขตด้านประชากร
ประชากรศึกษา คือ คณะกรรมการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น จำนวน 16 คน
มาจากกระบวนการสุ่มแบบ Disproportionate stratified sampling ได้กลุ่มตัวอย่าง 4 กลุ่ม กลุ่ม
ละ 4 คน ประกอบด้วย กลุ่มผู้บริหาร กลุ่มพนักงานงานฝ่ายผลิต กลุ่มวิศวกร และกลุ่มเจ้าหน้าที่
ความปลอดภัย

1.5.3 ขอบเขตด้านพื้นที่

พื้นที่ในการศึกษา คือ กระบวนการผลิตมันเส้นใน โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง จังหวัดอุบลราชธานี ที่มีระบบลำเลียงประกอบด้วย กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) อุปกรณ์ชุดมอเตอร์ (Motor) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

1.5.4 ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลาในการศึกษา ระหว่าง เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 - มีนาคม พ.ศ. 2567

1.6 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 การระเบิดฝุ่น (Explosion) หมายถึง การระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นที่เกิดขึ้นในพื้นที่ปิด ที่เกิดจากการเพิ่มความดันภายในเกิดระเบิดเกิดขึ้น

1.6.2 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น หมายถึง กระบวนการที่มีระบบลำเลียงด้วยชุดอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย ระบบลำเลียงโดยสายพาน ระบบลำเลียงโดยกะพ้อ เพื่อลำเลียงมันเส้นไปเก็บในโกดังจัดเก็บเตรียมเข้าสู่กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในลำดับถัดไป

1.6.3 ระบบลำเลียงโดยกะพ้อ (Bucket Elevator) หมายถึง ระบบลำเลียงที่ถูกออกแบบตามกำลังการผลิต (Capacity) ที่เพื่อขนถ่าย ออกแบบเพื่อใช้ในการลำเลียงมันเส้น

1.6.4 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ หมายถึง การประเมินโอกาสที่อาจก่อให้เกิดอันตราย สูญเสีย หรือขัดขวางการดำเนินงานความเสี่ยงวัดจากความเป็น (Probability) แสดงค่าคะแนนความเสี่ยง และระดับความเสี่ยงเป็นตัวเลข

1.6.5 Fault Tree Analysis (FTA) หมายถึง เทคนิคที่ใช้ในการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นมันเส้น เพื่อหาสาเหตุย่อยของเหตุการณ์ จนสามารถหาสาเหตุที่แท้จริงของเหตุการณ์การระเบิดได้

1.6.6 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) หมายถึง เทคนิคที่นำมาวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาปัจจัยที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นมันเส้น มาเรียงลำดับ และจัดโครงสร้างของปัญหา เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจในการนำปัจจัยเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นมันเส้น ไปทำแผนบริหารจัดการความเสี่ยงในลำดับต่อไป

1.6.7 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy) หมายถึง เทคนิคที่นำมาใช้ในการตัดสินใจปัญหาที่มีความคลุมเครือ เป็นแนวทางการตัดสินใจจากการวิเคราะห์ชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นมันเส้น

1.6.8 FFTA หมายถึง การวิเคราะห์โดยการประยุกต์เทคนิค Fuzzy กับเทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis: FTA) เพื่อลดความคลุมเครือ เป็นแนวทางการตัดสินใจจากการวิเคราะห์ชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นมันเส้น

1.6.9 FFTA -AHP หมายถึง การประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค FTA ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ Fuzzy และเทคนิค AHP เพื่อจัดการกับข้อมูลที่มีความคลุมเครือ เป็นแนวทางในการตัดสินใจกำหนดมาตรการป้องกันแก้ไขกับความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นน้ำมัน

1.6.10 ออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บน้ำมัน หมายถึง การออกแบบระบบการจัดเก็บน้ำมันโดยอาศัยองค์ประกอบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) โดยมีการจัดลำดับการป้องกันที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปจนถึงระดับการป้องกันที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ประกอบด้วย การขจัด การแทนที่ การควบคุมทางวิศวกรรม การควบคุมทางการบริหารจัดการ และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล

1.6.11 การศึกษาผลการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่น หมายถึง การศึกษาผลจากการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บน้ำมันในด้านความเสี่ยง ประสิทธิภาพการป้องกันของระบบ และการประเมินผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนของการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่น



บทที่ 2

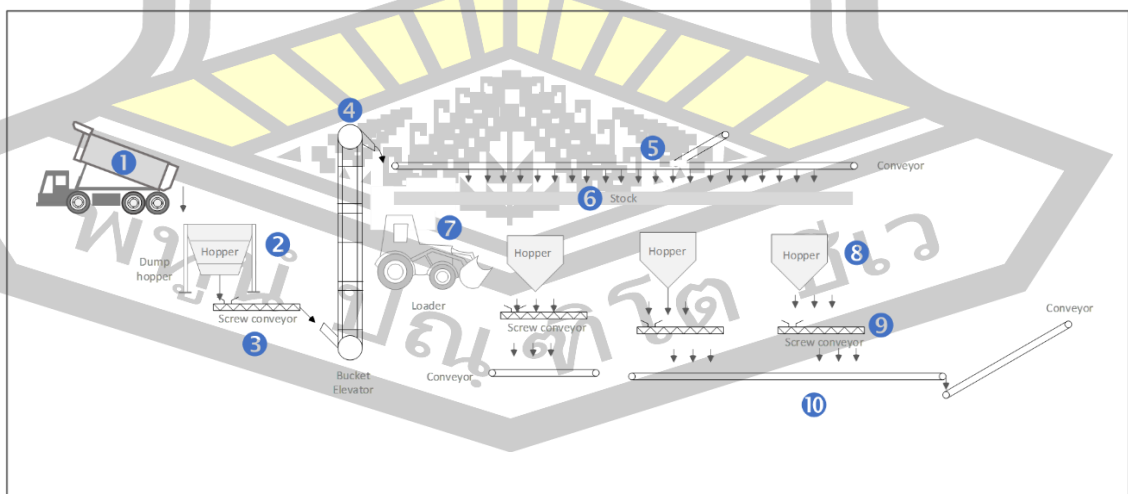
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) ศึกษาเพื่อศึกษาขนาดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และการศึกษาผลการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิต แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

- 2.1 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น
- 2.2 ผลกระทบจากการระเบิดฝุ่น
- 2.3 การเกิดการระเบิดฝุ่น
- 2.4 การประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่น
- 2.5 หลักการบริหารจัดการความปลอดภัยในสถานประกอบการ
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.7 กรอบแนวคิดการวิจัย

2.1 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น

กระบวนการจัดเก็บมันเส้น คือกระบวนการที่มีระบบลำเลียงด้วยชุดอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยกะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) อุปกรณ์ชุดมอเตอร์ (Motor) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) ดังแสดงในภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น พบอุปกรณ์ เครื่องจักร ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิด ดังนี้

1) กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการขนถ่ายมันเส้นในแนวตั้ง ประกอบด้วย

(1) ลูกกะพ้อ (Bucket) ทำหน้าที่ขุดหรือตักวัสดุจากด้านล่างลำเลียงไปส่วนหัวเพื่อจ่ายวัสดุ

(2) สายพาน (Rubber Belt) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการลำเลียงลูกกะพ้อ

(3) น็อต (Nut) ทำหน้าที่ยึดติด ลูกกะพ้อ (Bucket) กับสายพาน (Rubber Belt)

2) มอเตอร์ (Motor) เป็นเครื่องต้นกำลัง หรือให้กำเนิดพลังงานในการขับเคลื่อนระบบลำเลียง อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ประกอบด้วย

(1) มอเตอร์ อุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear) และ

(2) ตลับลูกปืน หรือ แบริ่ง (Bearing) ในเพลลาขับ ทำหน้าที่รับน้ำหนัก และถ่ายเทแรงที่เกิดขึ้นจากแกนหมุนหรืออุปกรณ์ที่มีการหมุนไปสู่ลูกเหล็กที่บรรจุอยู่ภายใน และลดแรงเสียดทาน ทำให้เพลลาหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ

(3) สกรูตัวหนอน (Set Screw) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดชิ้นส่วนเครื่องจักร

3) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) เป็นอุปกรณ์ลำเลียงที่สามารถจะนำมันเส้นไปจ่ายตรงตำแหน่งที่ต้องการในตำแหน่งใดก็ได้ ซึ่งจะมีความแตกต่างจากสายพานลำเลียงทั่วไปที่สามารถจ่ายวัสดุได้เพียงตำแหน่งเดียว ประกอบด้วย

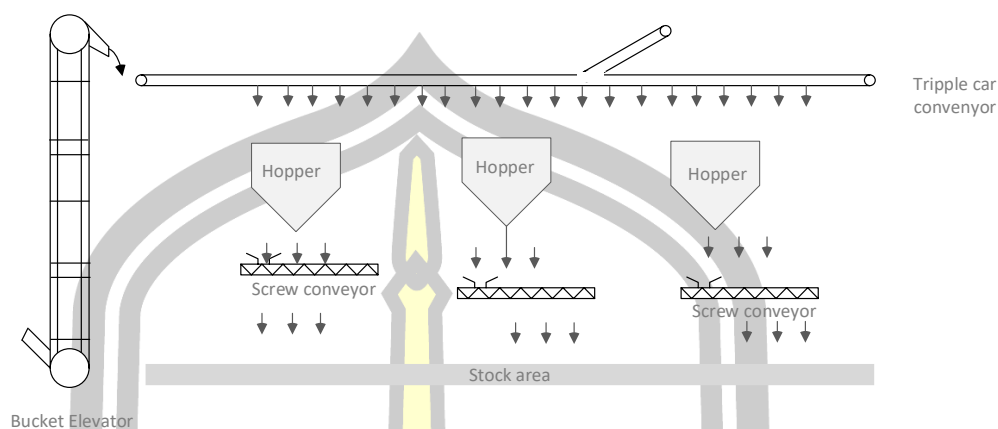
(1) ชุดขับ (Motor drive) เป็นตัวส่งกำลังให้กับล้อสายพาน เพื่อขับเคลื่อนสายพานและวัสดุขนถ่ายให้เคลื่อนที่

(2) ลูกกลิ้ง (Roller) เป็นตัวรองรับสายพาน

(3) สายพาน (Belt) เป็นส่วนที่ใช้รองรับวัสดุขนถ่ายจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง ตัวกลางความหมายก็คือเมื่อสายพานหมุนไปครบรอบแล้วก็จะเวียนมา ทำงานแบบซ้ำๆ ไปเรื่อยๆ

(4) ล้อสายพาน (Pulleys) เป็นตัวรองรับ ขับสายพาน และควบคุมแรงดึงในสายพาน และ

(5) มอเตอร์เกียร์ (Gear motor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงขับจาก Motor driver เพื่อให้สายพานเคลื่อนตัวไปอย่างต่อเนื่อง หรือหยุดขึ้นอยู่กับการควบคุมในการขนถ่าย



ภาพที่ 2 อุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

2.2 การระเบิดฝุ่น

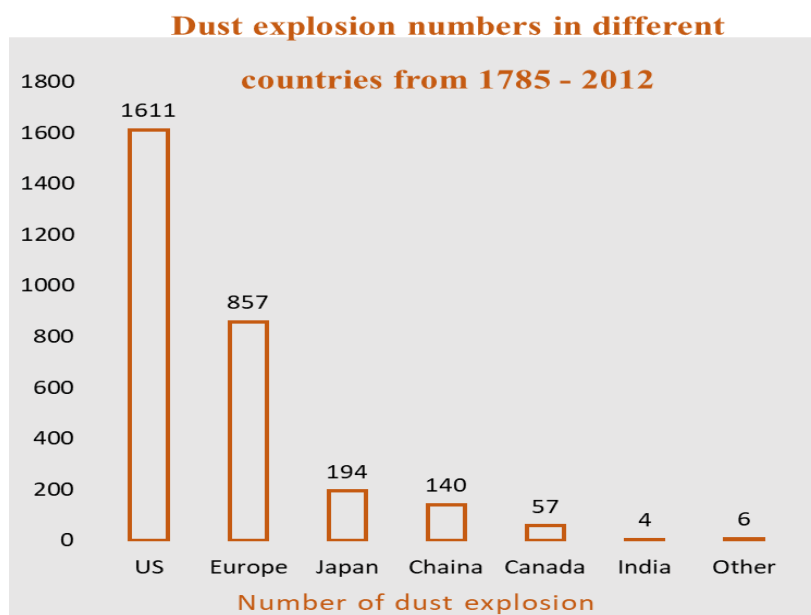
2.2.1 สถิติการระเบิดฝุ่น

สถิติการระเบิดฝุ่นในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศในแต่ละครั้งก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังไม่ทราบถึงสาเหตุการระเบิดฝุ่น ลักษณะของอันตรายและวิธีการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งได้มีการรวบรวมสถิติการเกิดการระเบิดฝุ่นทั้งในและต่างประเทศ มีรายละเอียดดังนี้ (Yuan et al., 2015)

2.2.1.1 สถิติการระเบิดฝุ่นในต่างประเทศ

สถิติการระเบิดฝุ่นพบในประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ ในช่วงปี พ.ศ. 2328 – พ.ศ. 2555 พบการระเบิดฝุ่นมากกว่า 2,000 ครั้ง พบมากที่สุดในสหรัฐอเมริกาจำนวน 1,611 ครั้ง ยุโรปจำนวน 857 ครั้ง ญี่ปุ่น จำนวน 194 ครั้ง จีน จำนวน 140 ครั้ง แคนาดา จำนวน 57 ครั้ง อินเดีย จำนวน 4 ครั้ง และพื้นที่อื่น ๆ จำนวน 6 ครั้ง (Yuan et al., 2015) ดังแสดงในภาพที่ 3-4

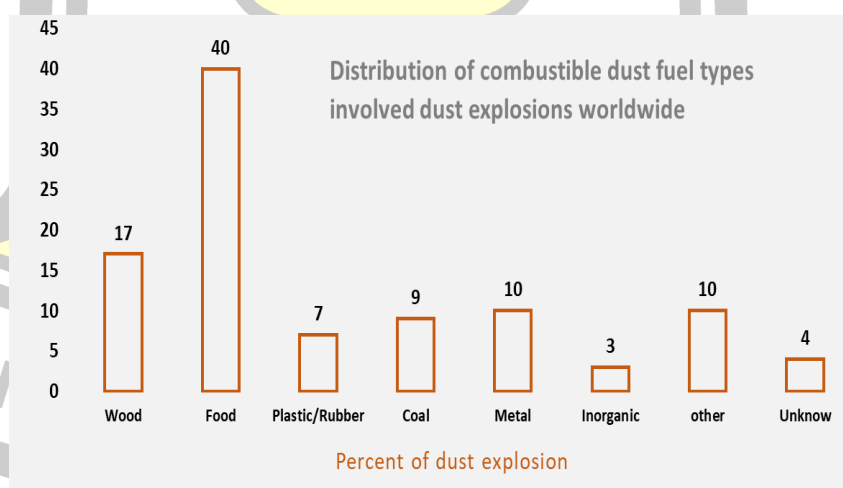
พูน ปณ จิต ชเว



ภาพที่ 3 การระเบิดฝุ่นในช่วงปี พ.ศ. 2528 – พ.ศ. 2555

ที่มา: Wei et al (2020)

การระเบิดฝุ่นพบมากที่สุดในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมไม้ อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมถ่านหิน อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สถิติการเกิดการระเบิดฝุ่นในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

ที่มา: Wei et al (2020)

จากสถิติการการระเบิดฝุ่นในประเทศจีน และได้หวั่น พ.ศ. 2548-2560 มีการเสียชีวิตมากที่สุดคือ การระเบิดของในเหมืองถ่านหินประเทศจีนที่มีจำนวนผู้เสียชีวิตมากที่สุดสามลำดับแรกคือ เกิดการระเบิดของถ่านหิน จำนวนผู้เสียชีวิต 171 คนเกิดการระเบิดฝุ่นโลหะ (Dust deflagration) ในกระบวนการขัดเงา เสียชีวิต 146 คน เกิดการระเบิดฝุ่นจากกระบวนการผลิตแป้ง (Starch process) เสียชีวิต 19 คน (Wei et al., 2020) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศจีน และได้หวั่น พ.ศ. 2548-2560

ลำดับที่	วันที่เกิดเหตุ	ประเทศ	ผลกระทบ	สาเหตุการระเบิด
1	25 ก.ย. 48	ไต้หวัน	- เสียชีวิต 1 คน	เกิดการระเบิดใน gearbox จากการ ทำงานของผู้รับเหมา ในกระบวนการ หยุดมอเตอร์ (lifting brake motor)
2	27 พ.ย. 48	จีน	- เสียชีวิต 171 คน	เกิดการระเบิดของถ่านหิน
3	16 มิ.ย. 49	จีน	- เสียชีวิต 10 คน - บาดเจ็บ 30 คน	เกิดการระเบิดฝุ่น อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsification)
4	13 ม.ค. 51	จีน	- เสียชีวิต 7 คน - บาดเจ็บ 33 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นกำมะถัน
5	3 ธ.ค. 51	ไต้หวัน	- บาดเจ็บ 1 คน	เกิดการระเบิดจากไฟฟ้าสถิต (static electricity) ระหว่างการปรับปรุง เครื่องจักร ในกระบวนการ feeding operation
6	18 ม.ค. 52	ไต้หวัน	- บาดเจ็บ 1 คน	เกิดการระเบิดจากไฟฟ้าสถิต (static electricity) ระหว่างการปรับปรุง เครื่องจักร ในกระบวนการ feeding operation
7	8 ก.ย. 52	จีน	- บาดเจ็บ 2 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นซิลิกอน (Silicon powder)
8	24 ก.พ. 54	จีน	- เสียชีวิต 19 คน - บาดเจ็บ 49 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นจากกระบวนการผลิต แป้ง (starch process)

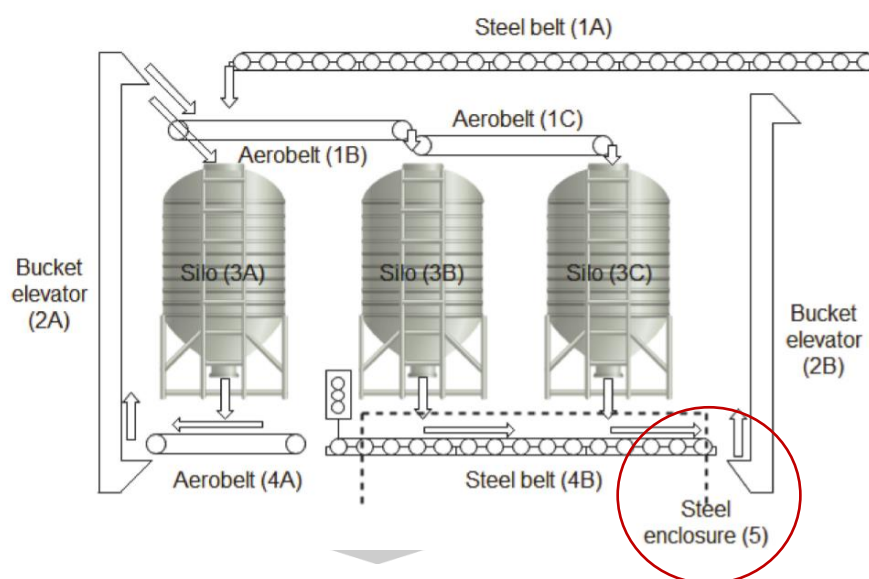
ตารางที่ 1 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศจีน และได้หวัน พ.ศ. 2548-2560 (ต่อ)

ลำดับที่	วันที่เกิดเหตุ	ประเทศ	ผลกระทบ	สาเหตุการระเบิด
9	8 พ.ค. 54	จีน	- บาดเจ็บ 10 คน	เกิดการระเบิดฝุ่น (Dust deflagration) ในกระบวนการขัดเงา
10	20 พ.ค. 55	จีน	- เสียชีวิต 3 คน - บาดเจ็บ 15 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นในท่อตักฝุ่น (dust collection) ในกระบวนการขัดเงา โรงงานอิเล็กทรอนิกส์
11	16 ก.ย. 55	จีน	-	การระเบิดจากการอุดตันของ ABS power ในพื้นที่แห้งของ ระบบบำบัดอากาศแบบเปียก (wet scrubbing towe)
12	10 ม.ค. 56	ไต้หวัน	-	เกิดการระเบิดของถ่านหินจากการเสื่อมสภาพของฉนวนหุ้มสายเคเบิล (cable insulation) เกิดความร้อนจากการอาร์คสายดิน (grounding)
13	13 พ.ย. 56	จีน	- บาดเจ็บ 7 คน	การระเบิดฝุ่นอะลูมิเนียมในท่อ สาเหตุจากไฟฟ้าสถิต (static electricity)
14	2 พ.ค. 57	จีน	- บาดเจ็บ 1 คน	การระเบิดฝุ่น สาเหตุจากไฟฟ้าสถิต (static electricity) ในกระบวนการ phenolic resin dust feeding operation
15	14 ก.พ. 57	ไต้หวัน	-	เกิดไฟไหม้ จากความร้อนฝุ่น BPA ในฝ้าย ฉนวนกันความร้อนของถังหลอมเหลว
16	1 ม.ค. 58	จีน	- บาดเจ็บ 3 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นโลหะ ใน chemical plant
17	2 ส.ค. 58	จีน	-	การระเบิดฝุ่นโลหะ ใน chemical plant
18	2 พ.ค. 58	จีน	- เสียชีวิต 1 คน - บาดเจ็บ 9 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น (starch dust) ในกระบวนการบรรจุแป้งข้าวโพด

ตารางที่ 1 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศจีน และได้หวัน พ.ศ. 2548-2560 (ต่อ)

ลำดับที่	วันที่เกิดเหตุ	ประเทศ	ผลกระทบ	สาเหตุการระเบิด
19	4 เม.ย. 58	จีน	- เสียชีวิต 8 คน - บาดเจ็บ 9 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นกรดสเตียริก (stearic acid) ในกระบวนการผลิตเม็ดสเตียริก
20	27 พ.ค. 58	จีน	- บาดเจ็บ 5 คน	เกิดการระเบิดฝุ่น ในห้องเก็บฝุ่นของอุปกรณ์บรรจุภัณฑ์สิ่งทอ (extile packaging equipment)
21	26 มิ.ย. 58	จีน	-	เกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการผลิตบริษัทBiotechnology company
22	8 ก.พ. 58	จีน	- เสียชีวิต 146 คน - บาดเจ็บ 114 คน	เกิดการระเบิดฝุ่นโลหะ (Dust deflagration) ในกระบวนการขัดเงา
23	19 ก.ย. 58	ไต้หวัน	-	การระเบิดระหว่างการลำเลียงถ่านหินในสายพานลำเลียง สาเหตุเกิดการเสียดสีของเพลาลูกกลิ้งขนาดใหญ่และตกลงมาทำให้เกิดความร้อนสูงในพื้นที่
24	21 ก.พ. 59	ไต้หวัน	-	เกิดการระเบิดจากไฟฟ้าสถิต (static ignition) ในถังบรรจุฝุ่นแคลเซียมสเตียเรตที่มีแรงดันสูง (calcium stearate dust)
25	22 ม.ค. 60	ไต้หวัน	-	เกิดการระเบิดของผงกำมะถันจากการเสียดสี และแตกหักของสายพานลำเลียงทำให้เกิดความร้อนขึ้น
26	21 มี.ค. 60	ไต้หวัน	-	เกิดการระเบิดของผง ABS ในไซโล เกิดความร้อนขณะที่มีการเชื่อมในบริเวณดังกล่าว

กรณีศึกษา การระเบิดฝุ่นในต่างประเทศเกิดขึ้นที่โรงงานผลิตน้ำตาล (Imperial Sugar manufacturing facility) ประเทศสหรัฐอเมริกา เหตุการณ์เกิดขึ้นวันที่ 7 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 เหตุการณ์คือ มีการระเบิดฝุ่นน้ำตาลในอาคารชั้น 1 ของอาคารบรรจุภัณฑ์ บริเวณช่องปิดของสายพาน (Enclosed steel belt conveyor) ทำหน้าที่ลำเลียงเม็दनน้ำตาลออกจากไซโล หลังจากที่เกิดการระเบิดได้มีการสอบสวนอุบัติเหตุ พบบริเวณดังกล่าวมีการสะสมน้ำตาลจำนวนมาก และการระเบิดขึ้นครั้งที่ 2 (Secondary dust explosion) เกิดขึ้น เป็นการระเบิดที่รุนแรงทำให้มีการแพร่กระจายฝุ่นควันทั่วทั้งอาคาร คณะกรรมการได้สอบสวนและหาสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุจากกระบวนการผลิตน้ำตาล การลำเลียงขนส่งน้ำตาลในระบบสกรูและสายพานลำเลียง (Screw and belt conveyors) ท่อลำเลียงทำด้วยสแตนเลส มีถ้วยตัก (Bucket) ทำหน้าที่ตักน้ำตาลจากโรงกลั่นไปเก็บที่ไซโลสูง 32 เมตร และลำเลียงในกระบวนการผลิตน้ำตาลชนิดพิเศษ ซึ่งบริเวณที่เกิดเหตุเป็นพื้นที่ปิด (Steel enclosure) อยู่ด้านล่างสายพานลำเลียงน้ำตาลของไซโล 3C ลำเลียงน้ำตาลมาจากไซโล 3B สาเหตุการระเบิด เกิดจากอุปกรณ์เครื่องจักรในระบบลำเลียงไม่มีการติดตั้งช่องระบายอากาศและการเกิดประกายไฟ ไม่มีระบบกำจัดฝุ่นป้องกันความเข้มข้นของน้ำตาลในอากาศไม่ให้เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด รวมทั้งอุปกรณ์เครื่องจักรขาดการบำรุงรักษา การทำความสะอาด ทำให้เกิดการสะสมและการอุดตันของน้ำตาลบริเวณท่อทางออกของไซโล และเมื่อมีการทำความสะอาดทำให้น้ำตาลตกหล่น มีการสะสมของฝุ่นน้ำตาลบริเวณใต้สายพานลำเลียงจำนวนมาก รวมทั้งการทำงานผิดปกติของลูกกลิ้ง ทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้เกิดการระเบิดครั้งที่ 2 ขึ้น (Barozzi et al., 2020) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 บริเวณที่เกิดการระเบิดในกระบวนการผลิตน้ำตาล

ที่มา: Barozzi (2020)

2.2.1.1 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทย

สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทยมีจำนวน 5 ครั้ง พบการระเบิดฝุ่นมันเส้น จำนวน 2 ครั้ง การระเบิดฝุ่นไม้ ครีมนิยม และข้าวโพดอย่างละครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ตารางที่ 2 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทย พ.ศ. 2545-2552

ชนิดฝุ่นระเบิด	จำนวน (ครั้ง)	เสียชีวิต (คน)	บาดเจ็บ (คน)	ความเสียหาย
แป้งมันสำปะหลัง	2	2	7	8 ล้านบาท
ไม้	1	-	9	0.2 ล้านบาท
ครีมนิยม	1	-	-	16 ล้านบาท
ข้าวโพด	1	-	-	10 ล้านบาท

นอกจากนี้การระเบิดฝุ่นในประเทศไทย ได้มีการรวบรวมจากจากหนังสือพิมพ์ และอินเทอร์เน็ต พบเกิดอุบัติเหตุฝุ่นมันเส้น จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งมีอุบัติเหตุที่ร้ายแรงที่สุดเกิดขึ้น ณ บริษัทชัยภูมิสตาร์ช จังหวัดชัยภูมิ ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 2 คน บาดเจ็บจำนวน 31 คน ดังแสดงรายละเอียดแต่ละเหตุการณ์ ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศไทย

วันที่เกิดเหตุ	สถานประกอบการ	จังหวัด	ผลกระทบ	สาเหตุการระเบิด
25 มี.ค. 61	บริษัทไทยน้ำมัน สำปะหลัง จำกัด	อุดรธานี	- บาดเจ็บ 7 คน - ความเสียหาย ไม่ได้ระบุ	เครื่องร้อน เนื่องจากการ เร่งการผลิต
28 ธ.ค. 61	โรงงานแป้งมัน สำปะหลัง อ.สีคิ้ว	นครราชสีมา	- บาดเจ็บ 6 คน - ความเสียหาย ไม่ได้ระบุ	เครื่องจักรที่ใช้อบแป้งมันใช้ งานตลอดทั้งวัน เพื่อเร่งผลิต

ตารางที่ 3 สถิติการระเบิดฝุ่นในประเทศ (ต่อ)

วันที่เกิดเหตุ	สถานประกอบการ	จังหวัด	ผลกระทบ	สาเหตุการระเบิด
19 ม.ค. 60	บริษัทบลูเวฟสตาร์ช จำกัด	ลพบุรี	- บาดเจ็บ 4 คน - เสียชีวิต 1 คน - ความเสียหาย 10 ล้าน	เกิดเพลิงไหม้ลุกไหม้ขึ้นที่เครื่องจักร
29 ส.ค.57	บริษัทเนเชอรัลซัพพลาย	อุดรธานี	- บาดเจ็บ 4 คน - ความเสียหายไม่ได้ระบุ	ท่อแรงดันโรงงานแป่งมันสำปะหลังอุดรธานีระเบิด พนักงานปิดระบบบายอากาศ ไม่รอให้เครื่องเย็น
25 ก.พ 54	บริษัทชัยภูมิสตาร์ช	ชัยภูมิ	- บาดเจ็บ 31 คน - เสียชีวิต 2 คน - ความเสียหายไม่ได้ระบุ	การระเบิดทำให้กระบวนการบ่มแก๊สเสียหาย
6 ส.ค. 54	บริษัท แป้งมันอีสาน จำกัด	นครราชสีมา	- บาดเจ็บ 10 คน - ความเสียหายไม่ได้ระบุ	เกิดจากการที่มีแป้งมันเข้าไปอุดตันท่ออบแป้งมันทำให้ท่ออบแป้งระเบิด
8 พ.ค. 52	โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	-	- บาดเจ็บ 3 คน - ความเสียหาย 8 ล้าน	- อาจเกิดจากแป้งหามาตีความชื้นสูงเกิดการจับตัวเป็นก้อน สะสมอยู่ใต้สลิ๊งเกอร์ เมื่อได้รับความร้อน ลูกติดไฟเกิดการระเบิดในท่ออบแป้งระเบิด

กรณีศึกษา การระเบิดฝุ่นในประเทศไทย เกิดการระเบิดจากฝุ่นมันเส้นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง วันที่ 8 พฤษภาคม 2552 ทำให้พนักงานได้รับบาดเจ็บจากการถูกไฟลวก ผู้บาดเจ็บเป็นทำหน้าที่ควบคุมชุดอบแป้ง ไชโคลนเย็น และบรรจุแป้งในห้อยบรรจุ เหตุการณ์ดังกล่าวทำให้ทรัพย์สินเสียหายกว่า 8 ล้านบาท อาคารโรงงานส่วนที่เสียหาย ได้แก่ ผนัง หลังคา บริเวณชุด

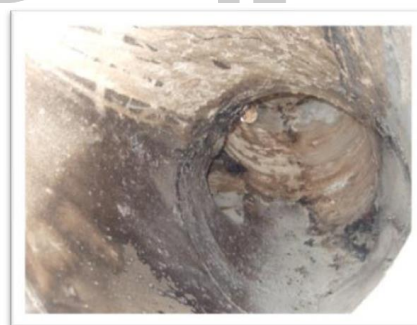
ไซโคลนเย็น และห้องบรรจุแป้ง ดังแสดงในภาพที่ 6-8 สาเหตุอาจเกิดจาก 2 สาเหตุ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สาเหตุที่ 1 เกิดการระเบิดที่ท่ออบแป้ง หรือชุดไซโคลนร้อน ความเสียหายไม่มาก และถูกระบายออกที่ประตูระบายอากาศ (Deflagration vent door) บริเวณท่ออบแป้ง สาเหตุอาจเกิดจากแป้งหมักมีความชื้นสูงและเกิดการจับตัวเป็นก้อน สะสมอยู่ที่สลิทเกอร์ เมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดการลุกติดไฟ จนทำให้เกิดการระเบิดในท่ออบแป้งขึ้น

สาเหตุที่ 2 เกิดจากโรตารีวาล์วของ Hopper ไซโคลนร้อนใหม่ ไม่สามารถทำงานได้ ทำให้แป้งสะสมใน Hopper และเกิดการลุกติดไฟ เปลวไฟลามขึ้นไปด้านบนของไซโคลนร้อน ซึ่งจะมีฝุ่นออกจากท่ออบแป้งและเกิดการระเบิดในท่ออบแป้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)



ภาพที่ 6 แสดงผลกระทบจากการระเบิดฝุ่นมันเส้นที่ทำให้ชุดไซโคลน และชุด Hopper
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)



ภาพที่ 7 แสดงผลจากการลุกไหม้ไฟบริเวณไส้กรองอากาศใต้ไซโคลนร้อน
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

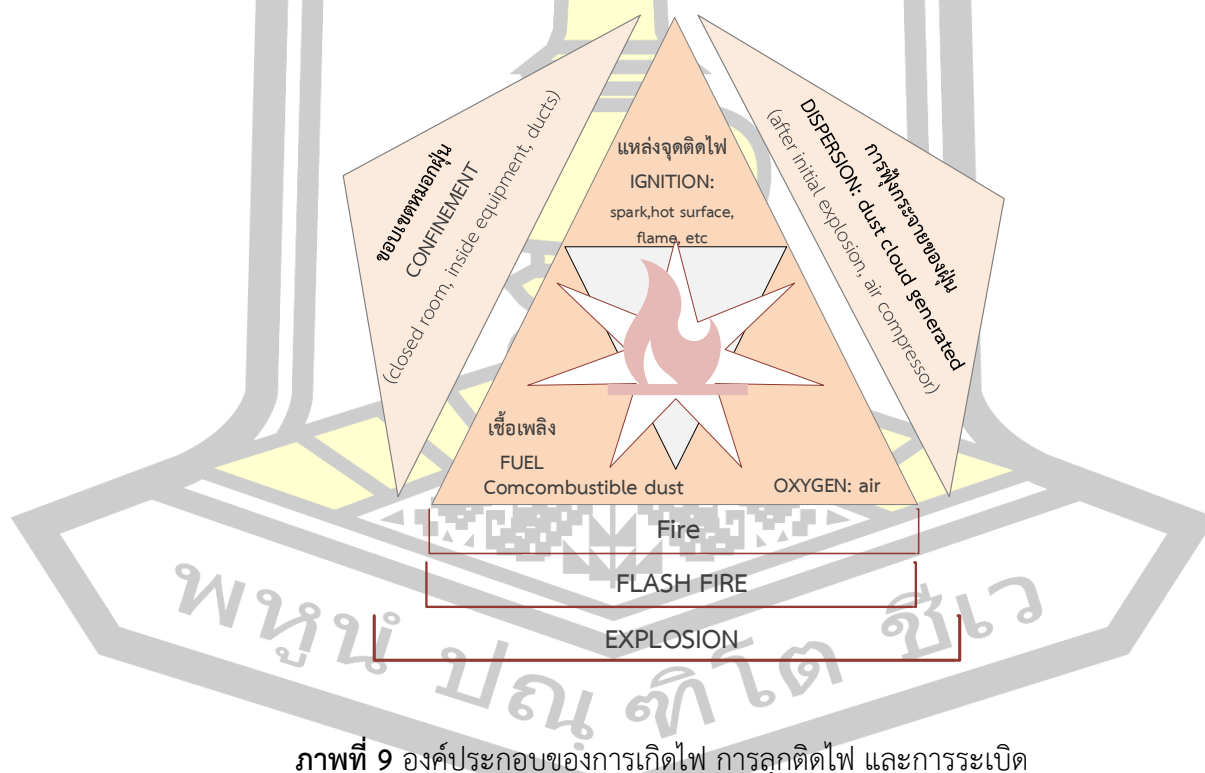


ภาพที่ 8 แสดงอาคารโรงงาน บริเวณไซโคลนเย็น และห้องบรรจุแบ่งเสียหายจากการระเบิด
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

2.3 การเกิดการระเบิดฝุ่น

2.3.1 องค์ประกอบการระเบิดฝุ่น

การระเบิดฝุ่น เกิดจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสม รวมทั้งมีความร้อน หรือประกายไฟ ออกซิเจนในอากาศ จะสามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟ และเกิดการระเบิดได้ ดังแสดงในภาพที่ 9

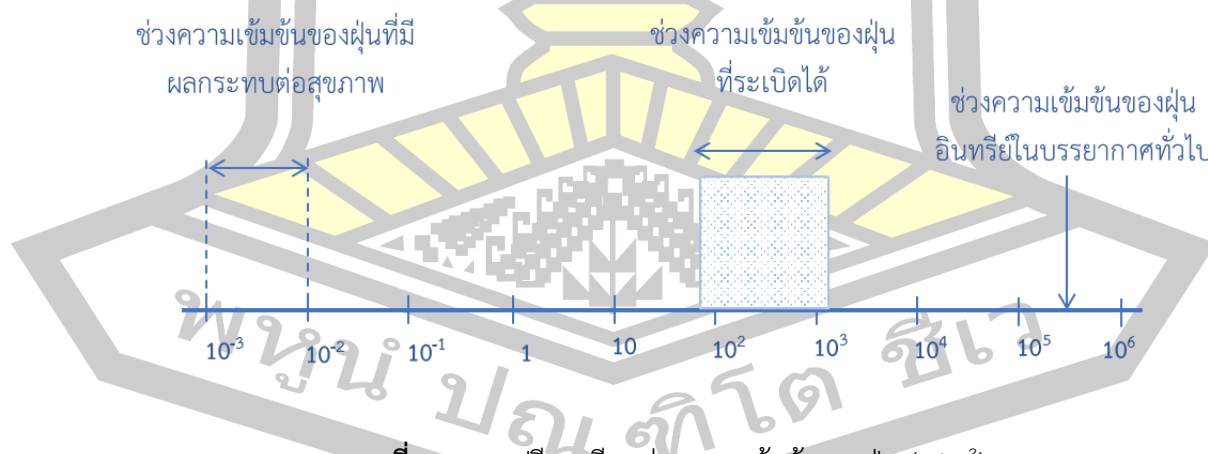


ภาพที่ 9 องค์ประกอบของการเกิดไฟ การลุกติดไฟ และการระเบิด
ที่มา: NFPA 654 (2020)

องค์ประกอบเกิดการระเบิดฝุ่น ประกอบด้วย เชื้อเพลิง (ฝุ่น) ออกซิเจน ความร้อน การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตหมอกฝุ่น (ถ้าเทียบการระเบิดฝุ่น: The dust explosion pentagon) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1.1 เชื้อเพลิง (Fuel) (NFPA 654, 2020) ได้ระบุขนาดฝุ่นที่สามารถเกิดการระเบิดต้องมีขนาดเล็กกว่า 500 ไมโครเมตร (μm) สามารถอยู่ในบรรยากาศจนกลายเป็นหมอกฝุ่น (Dust cloud) หากฝุ่นมีความชื้นสูงจะทำให้เกิดการลู่ไหมดิบชื้น หรือลู่ไหมดิบยาก (% Moisture) รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมี เช่น อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (Carbon atomic /Hydrogen atomic) และความเข้มข้นของฝุ่นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ชนิดของฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ ได้แก่ ฝุ่นอินทรีย์ (Organic dusts) เช่น ฝุ่นมันเส้น ฝุ่นไม้ ผงน้ำตาล ฝุ่นอินทรีย์ (Inorganic dust) ส่วนฝุ่นที่เกิดจากการสังเคราะห์ของสารเคมี เช่น ฝุ่นเม็ดพลาสติก ฝุ่นยา หรือยาฆ่าแมลง ฝุ่นถ่านและถ่านหิน ฝุ่นโลหะ เช่น ผงอะลูมิเนียม แมกนีเซียม สังกะสี เป็นต้น

2.3.1.2 การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of dust particles) ช่วงความเข้มข้นที่ฝุ่นลู่ไหมดิบ หรือระเบิดได้ ประมาณ $50\text{--}100\text{ g/m}^3$ ถึง $2\text{--}3\text{ Kg/m}^3$ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฟุ้งกระจายของฝุ่นขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดอนุภาคฝุ่น และความรุนแรงของการระเบิดจะขึ้นกับความเข้มข้นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum concentration) จะให้ค่าความรุนแรงของการระเบิดฝุ่นสูงสุด ซึ่งค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ระเบิดได้จะมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นฝุ่นที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ ดังแสดงในภาพที่ 10 ส่วนค่าความเข้มข้นของฝุ่นต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการระเบิด (Minimum explosible concentration : MEC) $100\text{ g/m}^3\text{--kg/m}^3$



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบช่วงความเข้มข้นของฝุ่น (g/m^3)

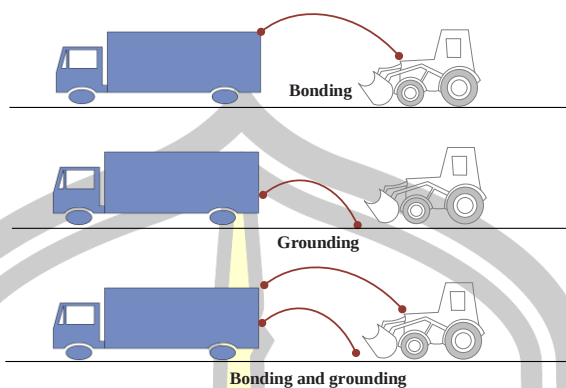
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

2.3.1.3 ขอบเขตหมอกฝุ่น (Confinement of the dust cloud) หมายถึง ขอบเขตที่เกิดหมอกฝุ่นปกคลุมในพื้นที่ปิด หรือพื้นที่จำกัด เช่น การเกิดหมอกฝุ่นในเครื่องบด เครื่องผสม ตะแกรงคัดขนาด เครื่องอบแป้ง ไซโคลน สายพานลำเลียง ไซโล และท่อลำเลียงด้วยลม เมื่อเกิดการลุกติดไฟ (Flash fire) ในพื้นที่อับอากาศจะทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้น ความรุนแรงการระเบิดขึ้นกับขนาดของการระเบิด และโครงสร้างพื้นที่ปิด

2.3.1.4 ออกซิเจนในอากาศ (Oxygen) มีผลต่อความเร็วในการเผาไหม้ จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิเปลวไฟ ความเร็วในการเผาไหม้ ทำให้เกิดอัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดัน ให้ระดับล่างสำหรับการเผาไหม้ (Lower explosive limit: LEL) ปริมาณออกซิเจนที่มากกว่าร้อยละ 20.9 จะทำให้เกิดฝุ่นลุกติดไฟได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การควบคุมออกซิเจนในภาชนะปิด จะสามารถควบคุมปริมาณออกซิเจนได้ง่ายกว่าในสภาพบรรยากาศทั่วไป

2.3.1.5 แหล่งจุดติดไฟ (Ignition sources) คือ แหล่งพลังงานที่สามารถกระตุ้น การแพร่ขยายของเปลวไฟ ทำให้เกิดการขยายเป็นวงกว้างเมื่อมีการสัมผัสกับฝุ่นในบรรยากาศ พลังงานที่ทำให้เกิดการระเบิดนั้นจะมีค่าแตกต่างกันตามขนาดและชนิดของฝุ่น ซึ่งแหล่งจุดติดไฟมีหลายประเภท ได้แก่

- 1) แหล่งจุดติดไฟจากพื้นผิวที่มีความร้อน (Hot surfaces)
- 2) แหล่งจุดติดไฟจากเปลวไฟ (Flames) ก๊าซร้อน (Hot gases) รวมถึงอุณหภูมิที่มีความร้อนในกระบวนการผลิต
- 3) แหล่งจุดติดไฟจากประกายไฟจากเครื่องจักรกล (Mechanically generated sparks) เช่น ความร้อน ของตลับลูกปืน ลูกกลิ้ง สิ่งแปลกปลอมในเครื่องผลิต เครื่องบดย่อย และเครื่องคัดขนาด การใช้เครื่องมืออุปกรณ์จำพวกค้อนและไขควง เป็นต้น
- 4) แหล่งจุดติดไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical apparatus) เช่น มอเตอร์ไฟ การเปิด-ปิดสวิตช์ไฟฟ้า การลัดวงจรของอุปกรณ์ไฟฟ้า การแตกกระเปาะของหลอดไฟ เป็นต้น
- 5) แหล่งจุดติดไฟจากการรั่วของกระแสไฟฟ้า (Stray electric currents) ได้แก่ ความร้อนจากสนิมแบบแคโทดิก (Cathodic) การกัดกร่อน (Corrosion)
- 6) แหล่งจุดติดไฟจากไฟฟ้าสถิต (Static electricity) เกิดจากกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ เช่น กระบวน การบดย่อย การคัดแยกขนาด การลำเลียงด้วยลม และมักพบในอุปกรณ์จำพวกท่อขนส่ง สายพานลำเลียง เครื่องตักเก็บฝุ่น ถังบรรจุ การป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าสถิต ต้องมีการต่อลงดิน (Grounding) และการเชื่อมต่อฝาก (Bonding) เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ ให้ไหลผ่านลงดิน และไม่ให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างการต่อลงดิน (Grounding) และการเชื่อมต่อฝาก (Bonding)

7) แหล่งจุดติดไฟจากฟ้าผ่า (Lightning) หลังจากที่เกิดฟ้าผ่าจะทำให้เกิดความร้อนและแรงระเบิดเกิดกระแสไหลผ่านจะมีแรงบิดขึ้นในตัวนำ

8) แหล่งจุดติดไฟจากความถี่คลื่นวิทยุ (Radio frequency) ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ตั้งแต่ 10^4 Hz ถึง $3 \cdot 10^{12}$ Hz

9) แหล่งจุดติดไฟจากรังสีไอออไนซ์ (Ionizing radiation) คือรังสีที่มีพลังงานสูงสามารถก่อให้เกิดไอออนในตัวกลาง ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีนิวตรอน รังสีในกลุ่มนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า รังสีปรมาณู (Atomic radiation)

10) แหล่งจุดติดไฟจากอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) คือคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป นำไปใช้สำหรับควบคุมเป้าหมายในระยะไกลแบบเจาะจง (Ultrasonic remote control) และใช้อัลตราโซนิกส์ ในเครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner)

11) แหล่งจุดติดไฟจากกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic compression) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนความร้อนไม่สามารถถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมได้ทัน และเกิดคลื่นกระแทก (Shock waves) ระบายการแพร่กระจาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของตัวกลางอย่างกะทันหัน แบบไม่ต่อเนื่อง

12) แหล่งจุดติดไฟจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และการลุกไหม้ในตัวเองของฝุ่น (Self-ignition of dust)

2.3.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดฝุ่น

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดฝุ่น แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ ความไวในการจุดติดไฟ (Ignition sensitivity) ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum explosible concentration: MEC) ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟ (Minimum ignition temperature: MIT)

ค่าพลังงานต่ำสุดในการจุดติดไฟ (Minimum ignition energy: MIE) และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (Maximum permissible oxygen Concentration) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) มีรายละเอียดดังนี้

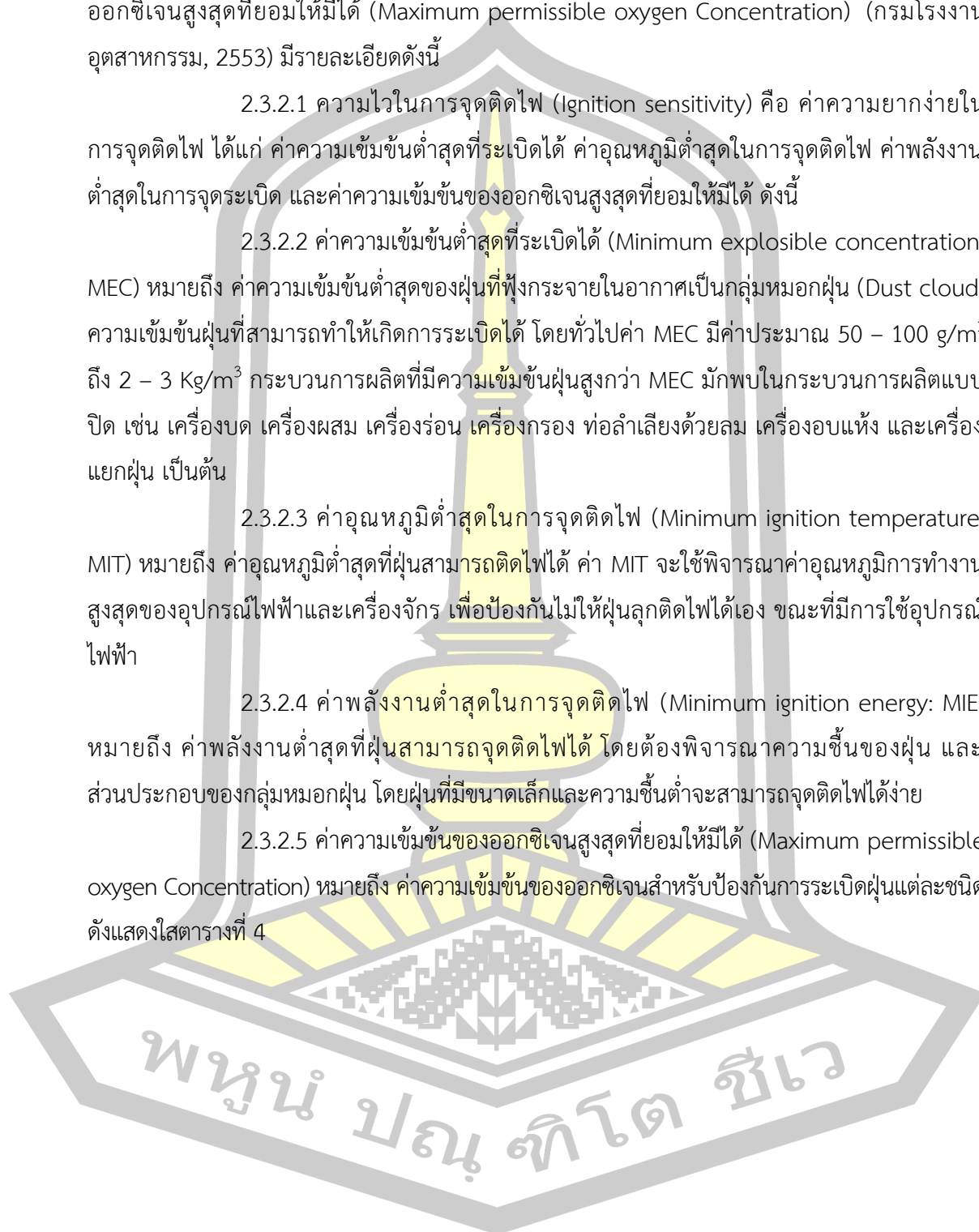
2.3.2.1 ความไวในการจุดติดไฟ (Ignition sensitivity) คือ ค่าความยากง่ายในการจุดติดไฟ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟ ค่าพลังงานต่ำสุดในการจุดระเบิด และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ ดังนี้

2.3.2.2 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum explosible concentration: MEC) หมายถึง ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของฝุ่นที่ฟุ้งกระจายในอากาศเป็นกลุ่มหมอกฝุ่น (Dust cloud) ความเข้มข้นฝุ่นที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ โดยทั่วไปค่า MEC มีค่าประมาณ $50 - 100 \text{ g/m}^3$ ถึง $2 - 3 \text{ Kg/m}^3$ กระบวนการผลิตที่มีความเข้มข้นฝุ่นสูงกว่า MEC มักพบในกระบวนการผลิตแบบปิด เช่น เครื่องบด เครื่องผสม เครื่องร่อน เครื่องกรอง ท่อลำเลียงด้วยลม เครื่องอบแห้ง และเครื่องแยกฝุ่น เป็นต้น

2.3.2.3 ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟ (Minimum ignition temperature: MIT) หมายถึง ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ฝุ่นสามารถติดไฟได้ ค่า MIT จะใช้พิจารณาค่าอุณหภูมิการทำงานสูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องจักร เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ติดไฟได้เอง ขณะที่มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า

2.3.2.4 ค่าพลังงานต่ำสุดในการจุดติดไฟ (Minimum ignition energy: MIE) หมายถึง ค่าพลังงานต่ำสุดที่ฝุ่นสามารถจุดติดไฟได้ โดยต้องพิจารณาความชื้นของฝุ่น และส่วนประกอบของกลุ่มหมอกฝุ่น โดยฝุ่นที่มีขนาดเล็กและความชื้นต่ำจะสามารถจุดติดไฟได้ง่าย

2.3.2.5 ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (Maximum permissible oxygen Concentration) หมายถึง ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสำหรับป้องกันการระเบิดฝุ่นแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4

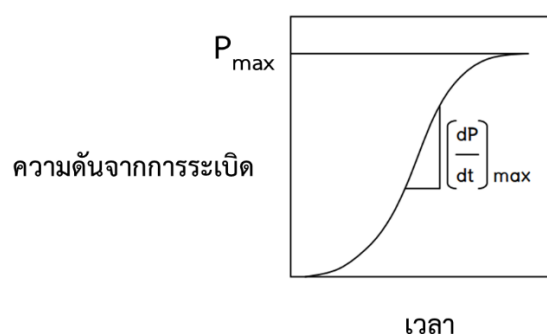


ตารางที่ 4 อุณหภูมิที่จุดติดไฟของฝุ่นชนิดต่าง ๆ แยกตามลักษณะของฝุ่น

ชนิดของฝุ่น	อุณหภูมิต่ำสุด ที่จุดติดไฟ (MIT) (°C)						อุณหภูมิที่ยอมให้มีได้ (°C)					
	กอง ฝุ่น	หมอก ฝุ่น	450.. >300	300.. >280	280.. >260	260.. >230	230.. >215	215.. >200	200.. >180	180.. >165	165.. >160	160.. >135
Cotton	350	560			275							
Brown coal	225	380										150
Cellulose	370	500		295								
Cereals	290	420						215				
Wood resin	290	500						215				
Sawdust (wood)	300	400					225					
Cocoa	460	580	385									
Copra	290	470						215				
Cork	300	470					225					
Fodder concentrate	295	525					220					
Linen	230	440										155
Milk powder	340	440			265							
Paper	300	540					225					
Pectin sugar	380	410			273*							
Soya	245	500								170		
Starch	290	440						215				
Hard coal	245	590								170		
Tobacco	300	450					225					
Tapioca	290	450						215				
Tea	300	510					225					
Peat	295	360					220					
Wheat flour	450	480	320*									
Sugar beet	290	460						215				
Cellulose ether	275	330							200			
Isosorbide dinitrate	240	220										146*
Unvulcanised rubber	220	460										145
Petroleum coke	280	690						205				
Polysaccharide derive	270	580							195			

ที่มา: ข้อมูลจาก BARTEC 330G mbH เยอรมนี

อุณหภูมิที่ยอมให้มีได้ของหมอกฝุ่น คือ ค่าอุณหภูมิ $2/3$ ของอุณหภูมิจุดติดไฟของหมอกฝุ่น ส่วนอุณหภูมิที่ยอมให้มีได้ของกองฝุ่น คือ ค่าอุณหภูมิจุดติดไฟของกองฝุ่น ลบด้วย 75 ค่าความรุนแรงของการระเบิด (Explosion severity) คือ ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดภายในพื้นที่ปิด (Maximum explosion pressure: P_{max}) และอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความดันเทียบกับเวลา $(dP/dT)_{max}$ หรือ ค่าความรุนแรงของการระเบิด (Explosion violence) เวลา และความดันที่เกิดจากการระเบิดจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของฝุ่น ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ค่าความดันอากาศเมื่อเกิดการระเบิดภายในพื้นที่ปิดที่ความเข้มข้นของฝุ่น

Abbasi and Abbasi ได้อธิบายการคำนวณค่าความรุนแรงของการระเบิด (Deflagrate Index: K_{st}) จากสมการที่ 1

$$K_{st} = (dP/dT)_{max} \times V^{1/3} \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ $(dP/dT)_{max}$ คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันสูงสุดเทียบกับเวลา

V คือ ค่าปริมาตรที่ทำการทดสอบ คือ 20 ลิตร หรือ 1 ลบ.ม.

K_{st} คือ ค่าความรุนแรงของการระเบิด (bar.m/s)

ความอันตรายของฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ สามารถแบ่งระดับได้จากค่า K_{st} ซึ่งแรงดันสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดฝุ่นมันเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 8 – 12 Bar gage (barg) โดยค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดเท่ากับ 8.4 barg ค่าความรุนแรงของการระเบิดเท่ากับ 150 K_{st} จัดอยู่ในกลุ่ม ST1 คือ การระเบิดไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับฝุ่นชนิดอื่นที่ระเบิดได้ แต่สามารถสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างของอาคารและเครื่องจักรขนาดใหญ่ได้เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจัดกลุ่มฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ (Dust hazard class)

ค่า K_{st} (bar.m/s)	กลุ่มของฝุ่นที่เกิดการระเบิด	ระดับอันตราย
0	ST 0	ไม่เกิดการระเบิด
0 – 200	ST 1	เกิดการระเบิดไม่รุนแรง
200 - 300	ST 2	เกิดการระเบิดรุนแรง
> 300	ST 3	เกิดการระเบิดรุนแรงมาก

ที่มา: NFPA 652 (2019)

การระเบิดระหว่างฝุ่นมันเส้นชนิดต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (MEC) ของฝุ่นมันเส้นมีค่าสูงกว่าฝุ่นมันเส้นชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 6-8

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดระหว่างฝุ่นชนิดต่าง ๆ

Materail	Mass Median Diameter (μ m)	Minimum Flammable Concentration(g/m ³)	P_{max}	$K St$ (bar-m/s)	Dust Hazard Class
Cellulose	33	60	9.7	229	2
Cellulose pulp	42	30	9.9	62	1
Cork	42	30	9.6	202	2
Corn	28	60	9.4	75	1
Egg white	17	125	8.3	38	1
Milk, powdered	83	60	5.8	28	1
Milk,nonfat, dry	60	-	8.8	125	1
Soy flour	20	200	9.2	110	1
Starch, corn	7	-	10.3	202	2
Starch, rice	18	60	9.2	101	1
Starch, wheat	22	30	9.9	115	1
Sugar	30	200	8.5	138	1
Sugar, milk	27	60	8.3	82	1
Sugar, beet	29	60	8.2	59	1
Tapioca	22	125	9.4	62	1
Whey	41	125	9.8	140	1
Wood flour	29	-	10.5	205	2

ที่มา: NFPA 652 (2019)

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดฝุ่นที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม หรือรูปร่างไม่สม่ำเสมอ

Particle Size (d50) (μm)	BET (m ² /g)	MEC (g/m ³)	P_{max} (psi)	dP/dt_{max} (psi/sec)	K_{St} (bar·m/sec)	MIE (mJ)
53	0.18	170	123	3,130	59	-
42	0.19	70	133	5,720	107	-
32	0.34	60	142	7,950	149	10
32	0.58	65	133	8,880	167	11
30	0.10	60	-	-	-	10
28	0.11	55	140	6,360	119	11
28	0.21	55	146	8,374	157	11
9	0.90	65	165	15,370	288	4
7	0.74	90	153	17,702	332	12
6	0.150	80	176	15,580	292	3.5
6	0.70	75	174	15,690	294	3
5	1.00	70	-	-	-	4
4	0.78	75	167	15,480	291	3.5

ที่มา: NFPA 652 (2019)

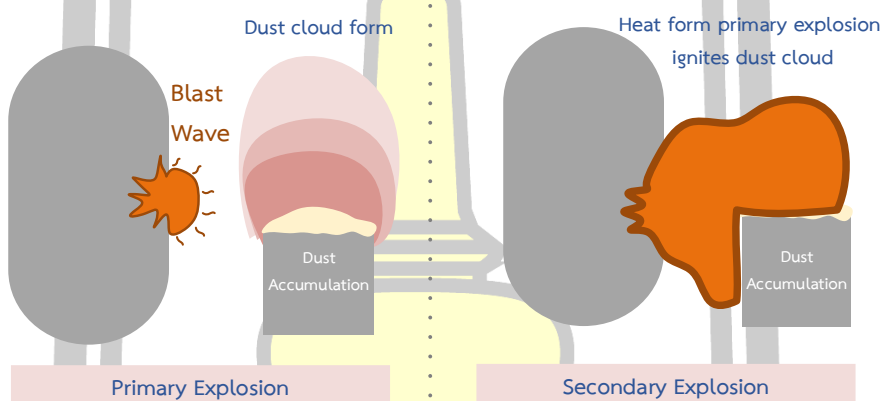
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดฝุ่นที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม

Particle Size (d50) (μm)	BET (m ² /g)	MEC (g/m ³)	P_{max} (psi)	dP/dt_{max} (psi/sec)	K_{St} (bar·m/sec)	MIE (mJ)
63	0.15	120	101	1,220	23	N.I.
36	0.25	60	124	4,770	90	13
30	0.10	60	140	5,940	111	13
15	0.50	45	148	10,812	203	7
15	0.30	55				8
6	0.53	75	174	16,324	306	6
5	1.30		167	14,310	269	
5	1.00	70	155	14,730	276	6
3	2.50	95	165	15,900	298	3
2	3.00	130				

ที่มา : NFPA 652 (2019)

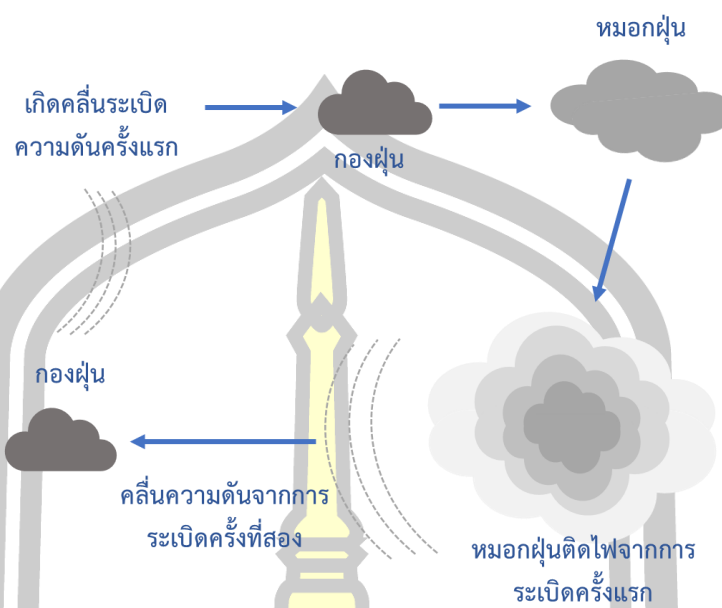
2.3.3 ลักษณะการระเบิดฝุ่น

การระเบิดฝุ่นมีโอกาสเกิดทั้งในพื้นที่จำกัดและพื้นที่โล่ง เมื่อเกิดการระเบิดแล้วอาจมีการเกิดการระเบิดครั้งที่สอง หรือมีการระเบิดอย่างต่อเนื่อง และการระเบิดในพื้นที่จำกัดจะมีความรุนแรงกว่าการระเบิดในพื้นที่โล่ง เพราะมีแรงดันที่สูงกว่า ลักษณะการระเบิดฝุ่นจะมี 2 ลักษณะ คือ การระเบิดแบบปฐมภูมิ (Primary explosion) เป็นการระเบิดครั้งแรก และหากไม่มีการติดตั้งช่องระบายที่เพียงพอ อาจทำให้เกิดการแตกเสียหายของภาชนะบรรจุได้ ส่งผลให้เกิดกลุ่มหมอกฝุ่นขึ้น และรับพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา ก่อให้เกิดการระเบิดครั้งที่ 2 การระเบิดแบบทุติยภูมิ (Secondary explosion) จะมีความรุนแรงมากกว่าการระเบิดแบบปฐมภูมิ และอาจทำให้เกิดการระเบิดแบบต่อเนื่อง ผลกระทบเป็นแบบโดมิโน (Domino effect) ดังแสดงในภาพที่ 13 -14



ภาพที่ 13 การเกิดระเบิดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพที่ 14 แสดงการระเบิดฝุ่นที่กองอยู่ที่พื้น
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

2.3.4 ชนิดของฝุ่นระเบิดได้

ตามมาตรฐานสำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational safety and health administration: OSHA) และสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National fire protection association: NFPA) คณะกรรมการสอบสวนความปลอดภัยและอันตรายจากสารเคมีของสหรัฐ (The US Chemical safety and hazard investigation Board: CSB) และ กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United states department of agriculture: USDA) ได้กำหนดถึงลักษณะหรือสมบัติของฝุ่นระเบิดได้ของแต่ละหน่วยงาน ดังนี้

2.3.4.1 การแบ่งชนิดฝุ่นระเบิดตาม OSHA มีการแบ่งฝุ่นระเบิดออกเป็น 6 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (Agricultural Products) มี 13 ชนิด ได้แก่

- | | | |
|---------------------|-----------------|--------------|
| - Egg white | - Starch, rice | - Tapioca |
| - Milk, powdered | - Starch, wheat | - Whey |
| - Milk, nonfat, dry | - Sugar | - Wood flour |
| - Soy flour | - Sugar, milk | |
| - Starch, corn | - Sugar, beet | |

กลุ่มที่ 2 ฝุ่นจากผลผลิตทางการเกษตร (Agricultural Dusts) มี 54 ชนิด ได้แก่

- | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| - Alfalfa | - Lemon peel dust | - Rice flour |
| - Apple | - Lemon pulp | - Rice starch |
| - Beet root | - Linseed | - Rye flour |
| - Carrageen | - Locust bean gum | - Semolina |
| - Carrot | - Malt | - Soybean dust |
| - Cocoa bean dust | - Oat flour | - Spice dust |
| - Cocoa powder | - Oat grain dust | - Spice powder |
| - Coconut shell dust | - Olive pellets | - Sugar (10x) |
| - Coffee dust | - Onion powder | - Sunflower |
| - Corn meal | - Parsley (dehydrated) | - Sunflower seed dust |
| - Cornstarch | - Peach | - Tea |
| - Cotton | - Peanut meal and skins | - Tobacco blend |
| - Cottonseed | - Peat | - Tomato |
| - Garlic powder | - Potato | - Walnut dust |
| - Gluten | - Potato flour | - Wheat flour |
| - Grass dust | - Potato starch | - Wheat grain dust |
| - Green coffee | - Potato starch | - Wheat starch |
| - Hops (malting) | - Rice dust | - Xanthan gum |

กลุ่มที่ 3 ฝุ่นถ่าน (Carbonaceous Dusts) มี 12 ชนิด ได้แก่

- | | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| - Charcoal, activated | - Lampblack | - Cellulose |
| - Charcoal, wood | - Lignite | - Cellulose pulp |
| - Coal, bituminous | - Peat, 22%H ₂ O | - Cork |
| - Coke, petroleum | - Soot, pine | - Corn |

กลุ่มที่ 4 ฝุ่นสารเคมี (Chemical Dusts) มี 14 ชนิด ได้แก่

- | | |
|--------------------|---|
| - Adipic acid | - Carboxy methylcellulose- Paraformaldehyde |
| - Anthraquinone | - Dextrin |
| - Ascorbic acid | - Lead stearate |
| - Calcium acetate | - Methyl-cellulose |
| - Calcium stearate | - Sulfur |
| | - Sodium ascorbate |
| | - Sodium stearate |

กลุ่มที่ 5 ฝุ่นโลหะ (Metal Dusts) มี 5 ชนิด ได้แก่

- Aluminum
- Iron carbonyl
- Zinc
- Bronze
- Magnesium

กลุ่มที่ 6 พลาสติก (Plastic Dusts) มี 18 ชนิด ได้แก่

- (Poly) Acrylamide
- Phenolic resin
- (Poly) Acrylonitrile
- Urea-formaldehyde/cellulose, molded
- (poly) Methyl acrylate
- (poly) Vinyl acetate/ethylene copolymer
- (Poly) Ethylene (low-pressure process)
- (poly) Vinyl alcohol
- Epoxy resin
- (poly) Vinyl butyral
- Melamine resin
- (poly) Vinyl chloride/ethylene/
- Melamine, molded (phenol-cellulose)
- vinyl acetylene suspension copolymer
- Melamine, molded (wood flour and mineral filled phenol-formaldehyde)
- vinyl acetylene emulsion copolymer
- (poly) Methyl acrylate, emulsion polymer
- (poly) Vinyl chloride

2.3.4.2 การแบ่งชนิดฝุ่นระเบิดตาม NFPA มีการแบ่งฝุ่นระเบิดออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่ม E วัสดุ (Material) มี 26 ชนิด ได้แก่

- Aluminum, atomized collector fines
- Aluminum, A422 flake
- Aluminum cobalt alloy (60-40)
- Aluminum copper alloy 50-50)
- Aluminum lithium alloy (15% Li)
- Aluminum magnesium alloy (Dowmetal)

- Aluminum nickel alloy (58-42)
- Zirconium Hydride (93.6% Zr, 2.1% H₂)
- Aluminum silicon alloy (12% Si)
- Boron, commercialamorphous (85% B)
- Calcium Silicide
- Chromium, (97%) electrolytic, milled
- Ferronmanganese, medium carbon
- Ferrosilicon (88%, 9%Fe)
- Ferrotitanium (19% Ti, 74.1% Fe, 0.06% C)
- Iron, 98%, H₂ reduced
- Magnesium, GradeB, milled
- Iron, 99%, Carbonyl
- Manganese
- Silicon, 96%, milled
- Tantalum
- Thorium, 1.2%, O₂
- Tin, 96%, atomized (2% Pb)
- Titanium, 99%
- Titanium Hydride, (95% Ti, 3.8% H₂)
- Vanadium, 86.4%

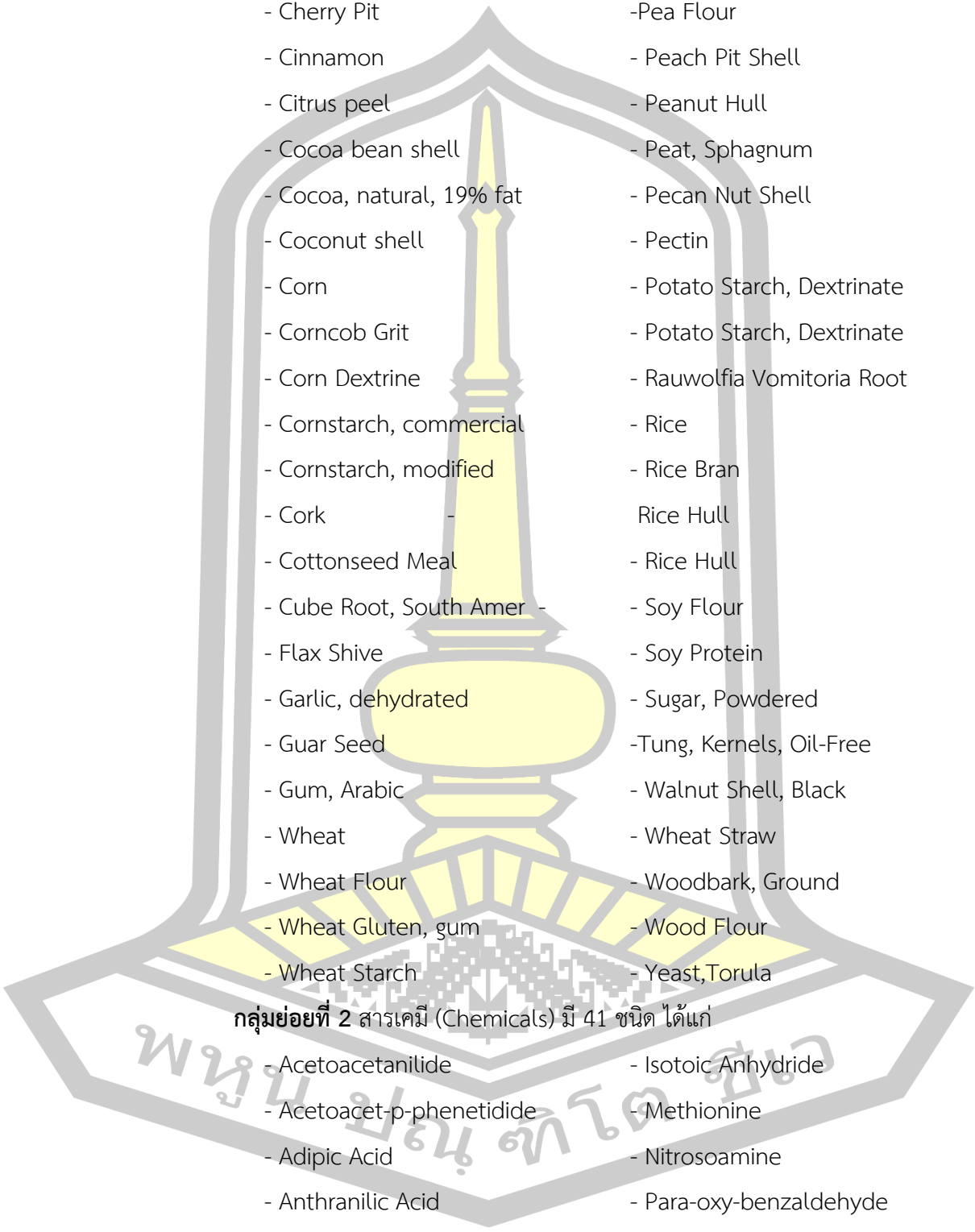
กลุ่ม F ถ่าน (Carbonaceous dusts) มี 10 ชนิด ได้แก่

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| - Asphalt (Blown Petroleum Resin) | - Gilsonite |
| - Charcoal | - Pitch, Coal Tar |
| - Coal, Kentucky Bituminous | - Shale, Oil |
| - Coal, Pittsburgh Experimental | - Lignite, California |
| - Coal, Wyoming | - Pitch, Petroleum |

กลุ่ม G ฝุ่นที่ไม่จัดในกลุ่ม E หรือ F โดยแบ่งเป็น 8 กลุ่มย่อย ได้แก่

กลุ่มย่อยที่ 1 ฝุ่นจากผลผลิตทางการเกษตร (Agricultural Dusts) มี 56 ชนิด คือ

- | | |
|----------------|---------------|
| - Alfalfa meal | - Hemp Hurd |
| - Almond shell | - Lycopodium |
| - Apricot Pit | - Malt Barley |

- 
- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| - Cellulose | - Milk, Skimmed |
| - Cherry Pit | -Pea Flour |
| - Cinnamon | - Peach Pit Shell |
| - Citrus peel | - Peanut Hull |
| - Cocoa bean shell | - Peat, Sphagnum |
| - Cocoa, natural, 19% fat | - Pecan Nut Shell |
| - Coconut shell | - Pectin |
| - Corn | - Potato Starch, Dextrinate |
| - Corncob Grit | - Potato Starch, Dextrinate |
| - Corn Dextrine | - Rauwolfia Vomitoria Root |
| - Cornstarch, commercial | - Rice |
| - Cornstarch, modified | - Rice Bran |
| - Cork | Rice Hull |
| - Cottonseed Meal | - Rice Hull |
| - Cube Root, South Amer | - Soy Flour |
| - Flax Shive | - Soy Protein |
| - Garlic, dehydrated | - Sugar, Powdered |
| - Guar Seed | -Tung, Kernels, Oil-Free |
| - Gum, Arabic | - Walnut Shell, Black |
| - Wheat | - Wheat Straw |
| - Wheat Flour | - Woodbark, Ground |
| - Wheat Gluten, gum | - Wood Flour |
| - Wheat Starch | - Yeast,Torula |

กลุ่มย่อยที่ 2 สารเคมี (Chemicals) มี 41 ชนิด ได้แก่

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| - Acetoacetanilide | - Isotoic Anhydride |
| - Acetoacet-p-phenetidine | - Methionine |
| - Adipic Acid | - Nitrosoamine |
| - Anthranilic Acid | - Para-oxy-benzaldehyde |
| - Aryl-nitrosomethylamide | - Paraphenylene Diamine |
| - Azelaic Acid | - Paratertiary Butyl Benzoic Acid |
| - 2,2-Azo-bis-butyronitrile | - Pentaerythritol |

- Benzoic Acid
- Benzotriazole
- Bisphenol-A
- Chloroacetoacetanilide
- Diallyl Phthalate
- Dicumyl Peroxide (suspended on CaCO₃), 40-60
- Dimethyl Isophthalate
- Dimethyl Terephthalate
- 3,5-Dinitrobenzoic Acid
- Dinitrotoluamide
- Diphenyl
- Ditertiary Butyl Paracresol
- Ethyl Hydroxyethyl Cellulose
- Phenylbetanaphthylamine
- Phthalic Anhydride
- Phthalimide
- Salicylanilide
- Sorbic Acid
- Stearic Acid, Aluminum Salt
- Stearic Acid, Zinc Salt
- Sulfur
- Terephthalic Acid
- Hydroxyethyl Cellulose
- Hexamethylene Tetramine
- Fumaric Acid

กลุ่มย่อยที่ 3 ยา (Drugs) มี 9 ชนิด ได้แก่

- 2-Acetylamino-5-nitrothiazole
- 2-Amino-5-nitrothiazole
- Aspirin
- Gulasonic Acid, Diacetone
- Mannitol
- Nitropyridone
- 1-Sorbose
- Vitamin B1, mononitrate
- Vitamin C(Ascorbic Acid)

กลุ่มย่อยที่ 4 Dyes, Pigments และ Intermediates มี 4 ชนิด ได้แก่

- Beta-naphthalene-azoDimethylaniline
- Green Base Harmon Dye
- Red Dye Intermediate
- Violet 200 Dye

กลุ่มย่อยที่ 5 ยากำจัดศัตรูพืช (Pesticides) มี 10 ชนิด คือ

- Benzethonium Chloride
- Bis(2-Hydroxy-5-chlorophenyl) methane
- Crag No.974
- Dieldrin (20%)-2,6-Ditertiary-butyl paracresol
- Dithane
- Ferbam

- Sevin
- α, α -
- Trithiobis(N,N Dimethylthio-formamide)
- Manganese Vancide

กลุ่มย่อยที่ 6 Thermoplastic resins and molding compounds มี 12 ชนิด

ได้แก่

- Acetal resin Acetal, Linear (Polyformaldehyde)
- Acrylic resins
- Cellulosic resins
- Chlorinated polyether resin
- Nylon (Polyamide) resin
- Polycarbonate resin
- Polyethylene resins
- Polymethylene resin
- Polypropylene resin
- Rayon resin
- Styrene resins
- Vinyl resins

กลุ่มย่อยที่ 7 Thermosetting resins and molding compounds มี 6 กลุ่มย่อย

คือ

- Allyl resin
- Amino resins
- Epoxy resins
- Phenolic resins
- Polyester resins
- Polyurethane resins

กลุ่มย่อยที่ 8 Special resins and molding compounds มี 15 ชนิด ได้แก่

- Alkyl Ketone Dimer Sizing Compound
- Cashew Oil, Phenolic, Hard
- Chlorinated Phenol
- Coumarone-Indene, Hard
- Ethylene Oxide Polyme Ethylene
- Maleic Anhydride Copolymer
- Lignin, Hydrolized, Wood Type, Fines
- Maleic Anhydride Copolyme
- Petroleum Resin (Blown Asphalt)
- Petrin Acrylate Monomer
- Rosin, DK
- Rubber, Crude, Hard (33%S)
- Shellac
- Sodium Resinate
- Styrene

2.3.4.3 ชนิดฝุ่นระเบิด แบ่งตาม กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United states department of agriculture: USDA) ได้กำหนดฝุ่นที่มีศักยภาพในการระเบิดได้เป็น 8 ชนิด ได้แก่

- 1) Carbon เช่น Coal, Peat, Charcoal, Coke, Lampblack

- 2) Fertilizers เช่น Bone meal, Fish meal, Blood flour
- 3) Food Products and by Products เช่น Starches, Sugars, Flour, Cocoa, Powdered milk, Grain dust
- 4) Metal Powders เช่น Aluminum, Magnesium, Zinc, Iron
- 5) Resins, Waxes and Soaps เช่น Shellac, Rosin, Gum-Sodium resinate, Soap powder, waxes
- 6) Spices, Drugs and Insecticides เช่น Cinnamon, Pepper, Gentian, Pyrethrum, Tea fluff
- 7) Wood, Paper, Tanning materials เช่น Wood flour, Wood dust, Cellulose, Cork, Bark
- 8) Miscellaneous เช่น Hard Rubber, Sulfur, Tobacco, Many Plastics

2.3.5 ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น

จากการศึกษาข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการระเบิดฝุ่นทั้งในประเทศและต่างประเทศ ได้มีการแบ่งประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ภายในประเทศที่อาจมีฝุ่นระเบิดตามลำดับประเภท หรือชนิดของโรงงานตามบัญชีท้ายกฎกระทรวง พ.ศ. 2535 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจมีฝุ่นระเบิดได้

ประเภทหรือชนิดของโรงงาน	ชนิดฝุ่นที่ระเบิดได้	ลำดับที่
โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเมล็ดพืช หรือหัวพืช อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง		9
1. การทำแป้ง	แป้ง	9 (652)
2. การป่นหรือบด เมล็ดพืช หรือหัวพืช	ฝุ่น	9 (3)
โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ถ่านหิน หรือลิกไนต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง ดังต่อไปนี้		
1. การทำเชื้อเพลิงก้อนหรือเชื้อเพลิงสำเร็จรูปจากถ่านหินหรือลิกไนต์ที่แต่งแล้ว	ถ่านหิน	50 (652)
2. โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิตและหรือจำหน่ายไอน้ำ (Steam Generating)		102

ตารางที่ 9 ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจมีฝุ่นระเบิดได้ (ต่อ)

ประเภทหรือชนิดของโรงงาน	ชนิดฝุ่นที่ระเบิดได้	ลำดับที่
<u>เฉพาะที่มีการเก็บในไซโล</u> 1. การเก็บรักษาหรือลำเลียงพืช เมล็ดพืช หรือผลิตผลจากพืชในไซโล โกดัง หรือคลังสินค้า 2. การสกัดน้ำมันจากพืช ฯ 3. การทำอาหารผสมหรืออาหารสำเร็จรูปสำหรับเลี้ยงสัตว์ 4. การป่นหรือบดพืช เมล็ดพืช ฯ 5. การทำ ป่น หรือบดมอลค์ 6. การทำเบียร์	ธัญพืช	2 (5) 7 (1) 15 (1) 15 (652) 19 (1) 19 (652)
การเลื่อย ไซ ซอย เซาะร่องหรือการแปรรูปไม้ ฯ การทำวงกบ ขอบประตู ฯ การทำไม้วีเนียร์ หรือไม้อัดทุกชนิด โรงงานผลิตเครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งภายในอาคารจากไม้ ฯ	ไม้	34 (1) 34 (652) 34 (3) 37
การเลื่อย ไซ ซอย เซาะร่องหรือการแปรรูปไม้ ฯ การทำวงกบ ขอบประตู ฯ การทำไม้วีเนียร์ หรือไม้อัดทุกชนิด โรงงานผลิตเครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งภายในอาคารจากไม้ ฯ	ไม้	34 (1) 34 (652) 34 (3) 37
การทำน้ำตาลทรายดิบหรือน้ำตาลทรายขาว การทำน้ำตาลทรายดิบหรือน้ำตาลทรายขาวให้บริสุทธิ์ การทำน้ำตาลก้อนหรือน้ำตาลผง	น้ำตาล ทราย	11(3) 11(NFPA654) 11 (5)
การทำเนยเทียม ครีมเทียม หรือน้ำมันผสมสำหรับปรุงอาหาร	อาหาร	7 (5)
โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการถลุง หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตเหล็กหรือเหล็กกล้าขั้นต้น (Iron and Steel Basic Industries) โรงงานที่มีการใช้โลหะที่มีลักษณะเป็นผง เช่น Aluminium, Chromium, Iron, Magnesium, Manganese, Tantalum, Tin, Titanium และ Vanadium	โลหะ	59

ตารางที่ 9 ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจมีฝุ่นระเบิดได้ (ต่อ)

ประเภทหรือชนิดของโรงงาน	ชนิดฝุ่นที่ระเบิดได้	ลำดับที่
1. โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิตยางเรซินสังเคราะห์ ยางอีลาสโตเมอร์ พลาสติกหรือเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งมีโซไยแก้ว 2. การทำพลาสติกเป็นเม็ด แท่ง ท่อ หลอด แผ่น ชื่น ผง หรือรูปทรงต่าง ๆ โรงงานทำพลาสติกหรือเรซินที่เป็นผง เช่น Acrylic resins, Cellulosic resins, Nylon resins, Polycarbonate resins, Polyethylene resins, Polymethylene resins, Polypropylene resins, Rayon resins, Styrene resins, Vinyl resins, Epoxy resins, Phenolic resins, Polyester resins และ Polyurethane resins เป็นต้น	พลาสติก	44 53 (5)
1. โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้าย หรือเส้นใย การทอ 2. เตรียมเส้นด้ายสำหรับการทอ โรงงานถักผ้า ผ้าลูกไม้หรือเครื่องนุ่งห่มด้วยด้ายหรือเส้นใย	ฝุ่น เส้นใยผ้า	22 (652) 24
โรงงานผลิตเยื่อหรือกระดาษ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง ได้แก่ การทำกระดาษ กระดาษแข็ง หรือกระดาษที่ใช้ในการก่อสร้าง ชนิดที่ทำจากเส้นใย (Fiber) หรือ แผ่นกระดาษไฟเบอร์	กระดาษ	38 (652)
โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยา อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง (เฉพาะที่มีการบดหรือทำยาให้เป็นผง)	ยา	46
โรงงานผลิตคาร์บอนดำ	คาร์บอนดำ	48 (6)
โรงงานผลิต ซ่อม หล่อหรือหล่อตอกยางนอกหรือยางในสำหรับยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยเครื่องกล คนหรือสัตว์ (เฉพาะโรงงานผลิตยางรถยนต์ และผลิตยาง)	ยาง	51
โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียจากโรงงาน มาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรมเฉพาะโรงงานที่นำโลหะ กระดาษ และพลาสติกเก่ากลับมาใช้ใหม่	โลหะ กระดาษ พลาสติก เก่า	106

จากการศึกษาจะพบว่า การระเบิดฝุ่น เกิดจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสม รวมทั้งมีความร้อน หรือประกายไฟ ออกซิเจนในอากาศ จะสามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟ และเกิดการระเบิดได้ ประเด็นที่สำคัญที่ควรพิจารณาจาก 5 องค์ประกอบของการเกิดฝุ่น ที่เป็นสาเหตุสำคัญของการป้องกันการระเบิด คือ แหล่งจุดติดไฟ ซึ่งมีที่มาจากหลายประเภท ได้แก่ แหล่งจุดติดไฟจากพื้นผิวที่มีความร้อน (Hot surfaces) แหล่งจุดติดไฟจากเปลวไฟ (Flames) ก๊าซร้อน (Hot gases) รวมถึงอนุภาคที่มีความร้อนในกระบวนการผลิต แหล่งจุดติดไฟจากประกายไฟจากเครื่องจักรกล (Mechanically generated sparks) แหล่งจุดติดไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical apparatus) แหล่งจุดติดไฟจากการรั่วของกระแสไฟฟ้า (Stray electric currents) และแหล่งจุดติดไฟจากไฟฟ้าสถิต (Static electricity)

2.3.6 การป้องกันการระเบิดฝุ่น

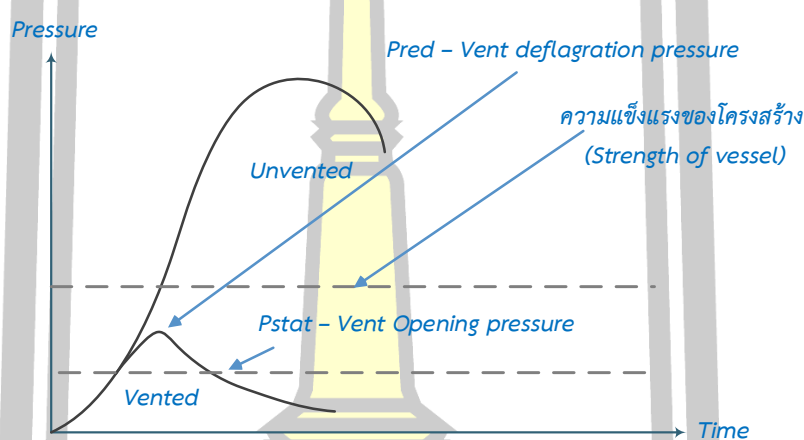
การป้องกันการระเบิดฝุ่น นอกจากการพิจารณาองค์ประกอบของฝุ่น และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดฝุ่น สามารถนำมาเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการป้องกันการระเบิดฝุ่น ได้แก่ ภาชนะบรรจุ (Containment) การแทนที่ด้วยก๊าซเฉื่อย (Inerting) การระบายความร้อน (Deflagration venting) การตรวจจับ และระงับ การระเบิด (Deflagration suppression) และการแยกพื้นที่ออกจากการระเบิด (Deflagration isolation) (NFPA654, 2020)

1) ภาชนะบรรจุ (Containment) คือ กระบวนการที่ออกแบบถังบรรจุให้ทนต่อแรงดัน ทนการยุบตัวจากการระเบิดให้ได้มากที่สุด ทั้งนี้การเลือกรูปของถังบรรจุขึ้นสุดท้ายขึ้นอยู่กับแรงดันเริ่มต้นสูงสุดในถังก่อนที่จะเกิดการยุบตัว NFPA 69 จำกัดแรงดันสูงสุดของถังบรรจุเท่ากับ 30 psi (207 kPa) ซึ่งการออกแบบถังบรรจุให้มีความแข็งแรง สามารถทนรับแรงดันระเบิดได้ ควรหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุที่มีพื้นผิวเรียบ รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีการเชื่อมและการยึดอื่นๆ ในตัวภาชนะบรรจุ ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ต้นทุนในการดำเนินการสูง และถังบรรจุทำด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักมากอาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างของอาคาร

2) การแทนที่ด้วยก๊าซเฉื่อย (Inerting) คือการลดความเข้มข้นของออกซิเจนในพื้นที่ปิดเพื่อให้มีปริมาณต่ำกว่าระดับที่จะสามารถลุกติดไฟได้ ก๊าซเฉื่อยที่แนะนำ เช่น ไนโตรเจน (Nitrogen) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ต้นทุนการติดตั้งและการบำรุงรักษาสูง และก๊าซเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงาน

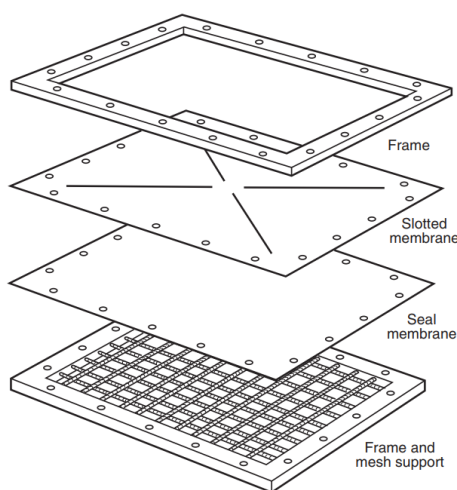
3) การระบายความร้อน (Deflagration venting) มักทำเป็นแผง หรือประตู ติดกับโครงสร้างของอุปกรณ์ เพื่อลดแรงดันการขยายตัวของก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ หลักการทำงานของ Deflagration venting จะช่วยระบายก๊าซไวไฟออกสู่บรรยากาศภายนอกได้โดยตรง ช่องระบายความร้อนจะเปิดขึ้นตามแรงดันที่กำหนดไว้ (P_{stat}) ออกสู่บรรยากาศโดยตรง ซึ่งจะทำให้

เกิดแรงดันย้อนกลับมาในถังบรรจุ (P_{red}) การออกแบบต้องให้มั่นใจว่าแรงดัน P_{red} มีค่าน้อยกว่าแรงดันในถังบรรจุ เพื่อป้องกันการแตกหักของถังบรรจุ ดังแสดงในภาพที่ 2.16 ลักษณะของแผงระบายอากาศจะเป็นแผงแบน หรือโดมยึดกับพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน อาจทำด้วยวัสดุที่สามารถแตกหลุด หรือ สวิง และไม่ควรใช้วัสดุที่อาจแตกเป็นชิ้นเพราะจะทำให้เกิดอันตรายได้ การติดตั้งอาจมีติดตั้งระบบสุญญากาศ (Vacuum support arrangement) หรือ อุปกรณ์ต้านแรงดันลม (Support against high winds) เพิ่มเติมได้ด้วยอย่าง Deflagration venting แบบโดมที่ออกแบบเพื่อทนทานต่อแรงดันลม ดังแสดงในภาพที่ 15-16



ภาพที่ 15 Pressure-Time Graph of a Vented Deflagration

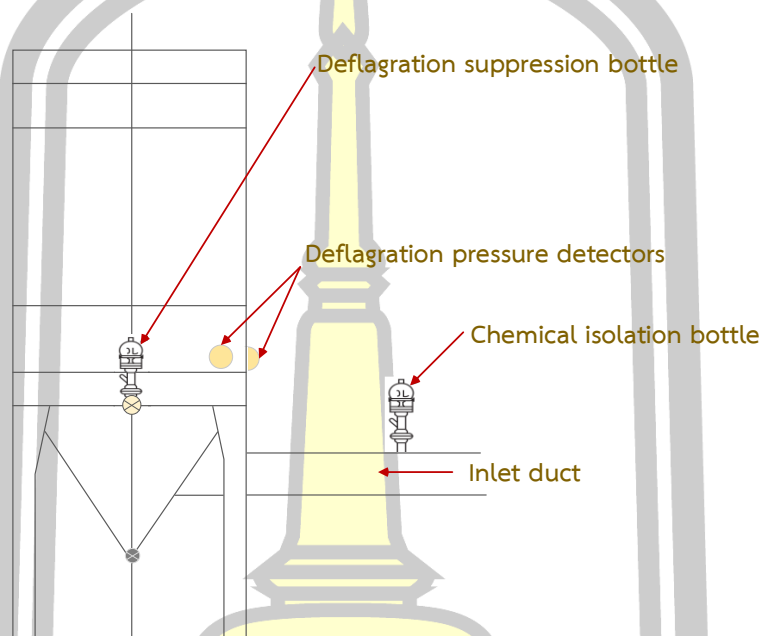
ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)



ภาพที่ 16 Deflagration Vent Panel and Support Grid

ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

ข้อจำกัดของ Deflagration venting คือ อาจทำให้เกิดการลุกติดไฟเข้าไปภายในส่วนประกอบ โดยเฉพาะวัสดุที่ติดไฟง่าย เช่น ถุงกรอง (Bag filter) อาจมีลูกไฟ (Fireball) ออกมาทางช่องระบายอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ และห้ามติดตั้งในกระบวนการที่มีความเป็นพิษ หรือกัดกร่อน ตัวอย่างการออกแบบช่องระบายในระบบดูดฝุ่น (Vented Dust Collector) ดังแสดงในภาพที่ 17



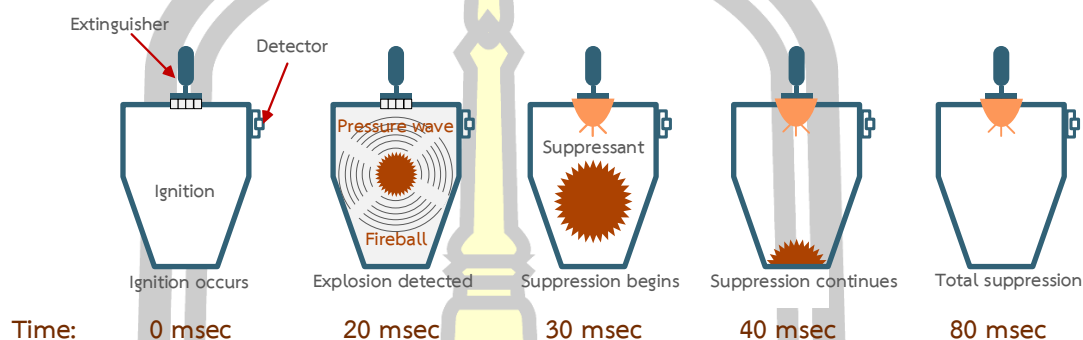
ภาพที่ 17 แสดงการติดตั้งช่องระบายในระบบดูดฝุ่น (Vented Dust Collector)

ที่มา: ตัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

การออกแบบ Deflagration venting เพื่อให้เกิดความปลอดภัย ควรพิจารณาประเด็นต่อไปนี้ แรงปฏิกิริยา (Reaction forces) ไฟหลังการระเบิด (Postexplosion fires) ความเป็นพิษของวัสดุ หรือการกัดกร่อน (Material toxicity or corrosiveness) หลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร (Good manufacturing practices) ประสิทธิภาพการระบายอากาศ (Vent efficiency) การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในกระบวนการอื่น (Connections to other process equipment) แรงดันย้อนกลับของช่องระบายอากาศ (Vent duct backpressure) ฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) พื้นที่ระบายอากาศที่ปลอดภัย (Safe venting area) การป้องกันแบบสุญญากาศ (Vacuum protection) และพื้นที่ตั้ง (Location)

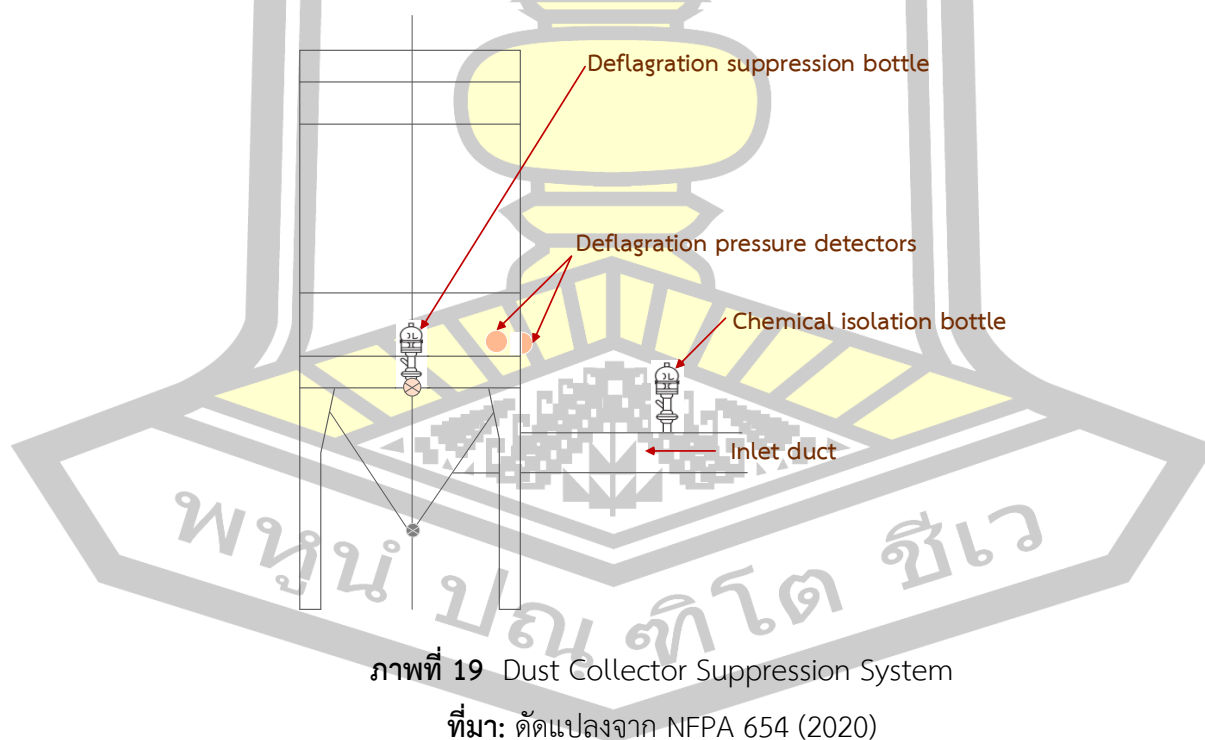
4) การตรวจจับและระงับการระเบิด (Deflagration suppression) คือกระบวนการทำงานของระบบดับเพลิงที่สูงสามารถตรวจจับและดับไฟก่อนที่แรงดันจะเกิดตัวขึ้น หลักการของทำงาน Deflagration suppression คือ เมื่อมีการก่อตัวของลูกไฟ (Fire ball) จะขยายตัวด้วย

ความเร็ว 9 m/sec คลื่นแรงดันเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 335 m/sec อุปกรณ์จะสามารถตรวจจับ (Deflagration detector) แรงดัน หรือเปลวไฟ และสัญญาณส่งผ่านไปยังชุดควบคุม เพื่อกระตุ้น อุปกรณ์ดับเพลิงให้สามารถทำงานได้อย่างทันท่วงที กระบวนการทั้งหมดใช้เวลาเป็นมิลลิวินาที (Milliseconds) ดังแสดงในภาพ 18-19



ภาพที่ 18 ตัวอย่าง การตรวจจับและระงับการระเบิด ของแป้งบรรจุในถังเก็บขนาด 1 m³

ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

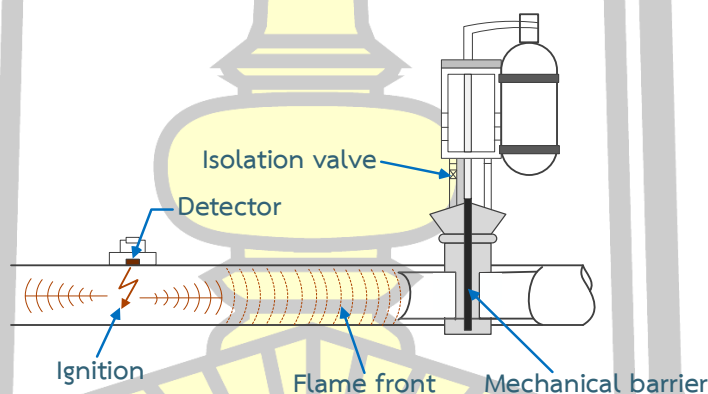


ภาพที่ 19 Dust Collector Suppression System

ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

5) การแยกพื้นที่ออกจากการระเบิด (Deflagration isolation) คือ การแยกพื้นที่ของอุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดการระเบิดเพื่อตรวจจับและระงับการระเบิด หรือการติดตั้งช่องระบายอากาศ (Explosion venting) เช่น ถังเก็บฝุ่น ไซโล กะป้อ แต่ยังมีจุดเสี่ยงจากการเชื่อมอุปกรณ์ดังกล่าวกับส่วนประกอบอื่นๆ ในกระบวนการผลิต เช่น ท่อ และท่ออาจเป็นตัวนำการแพร่กระจายก๊าซร้อน เปลวไฟไปยังส่วนอื่น ของกระบวนการผลิตได้ ซึ่งควรต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เพราะถือว่าเป็นจุดที่ควรเฝ้าระวัง การแยกพื้นที่ออกจากการระเบิดสามารถทำได้ทั้งทางเคมี หรือทางกล (NFPA 68) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

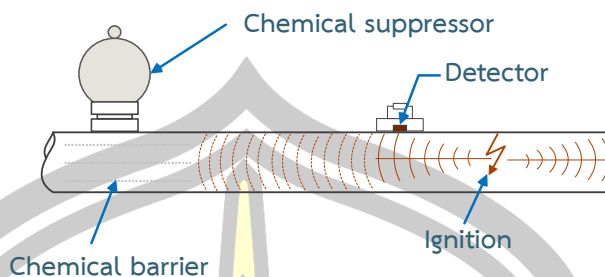
(1) การแยกพื้นที่ทางกล (Mechanical isolation) สามารถทำได้โดยการติดตั้งวาล์วล็อกอากาศแบบโรตารี (Rotary airlock valve) ในถังเก็บแป้ง หรือในวาล์วล็อกอากาศแบบโรตารี (Rotary Airlock Valve) เพื่อป้องกันเปลวไฟ ความร้อน หรือแรงดันไหลย้อนกลับไปในถังเก็บ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งวาล์วใบมีดแบบเร็ว (High-speed knife gate valve) ซึ่งเป็นวาล์วชนิดที่ตรวจจับแรงดันด้วยแสง (Optical detector) หรือ ตรวจจับด้วยแรงดัน และเปลวไฟ (deflagration pressure or flame) โดยทั่วไปวาล์วชนิดนี้จะมีความแข็งแรง สามารถทนรับแรงดันได้ 150 psi (1035 kPa) ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การแยกพื้นที่ทางกล (Mechanical isolation)

ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

(652) การแยกพื้นที่ทางเคมี (Chemical isolation) ทำได้โดยการใช้สารดับเพลิงเข้าไปในระบบท่ออย่างรวดเร็ว โดยจะมีอุปกรณ์ตรวจจับ ได้แก่ สวิตช์ควบคุมความดัน (Pressure switch) หรือ อุปกรณ์ตรวจจับด้วยแสง (Optical detector) เมื่ออุปกรณ์สามารถตรวจจับได้ จะทำการปล่อยสารดับเพลิงออกมาอย่างรวดเร็ว เพื่อควบคุมและป้องกันการแพร่กระจายของเปลวไฟ ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การแยกพื้นที่ทางเคมี (Chemical isolation)

ที่มา: ดัดแปลงจาก NFPA 654 (2020)

2.3.7 ตัวอย่างการประเมินจุดเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น

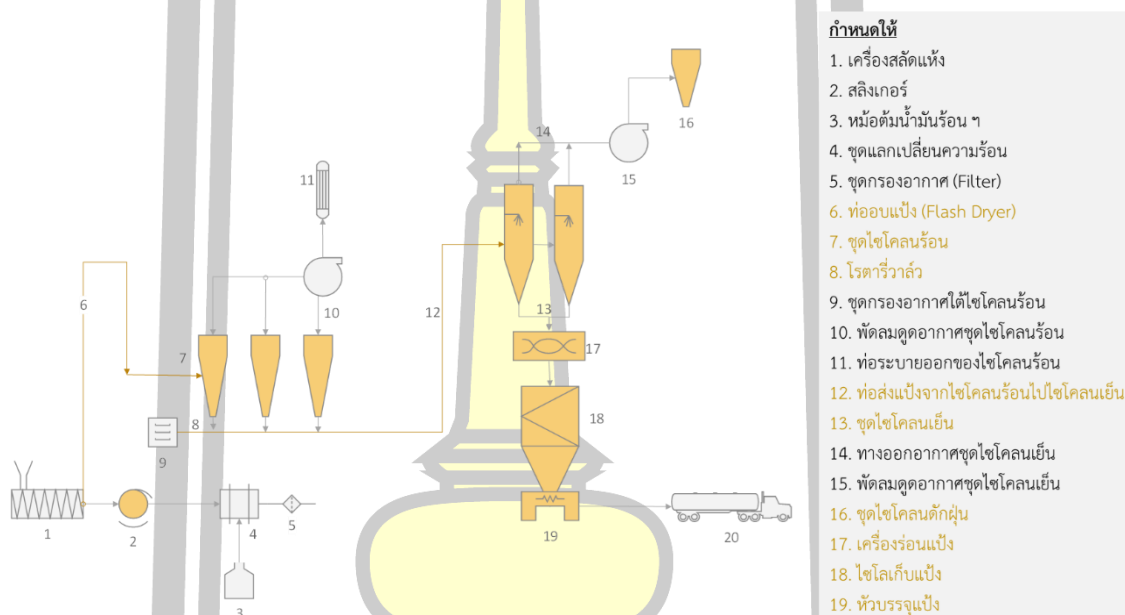
การประเมินจุดเสี่ยงต่อการระเบิด ต้องประเมินทุกขั้นตอนการผลิต โดยพิจารณาจาก ห้าองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่นมันเส้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) โดยแนวทางการประเมิน ความเสี่ยงดังต่อไปนี้

1) เชื้อเพลิง (Fuel) หมายถึงฝุ่นที่สันดาปได้ เมื่อแป้งมันผ่านตะแกรงร่อน จะเป็น แป้งหมดที่ขนาดใหญ่กว่า $420\ \mu\text{m}$ ร้อยละ 99.16 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแป้งมีความชื้นสูงจะเกิดการ เกาะตัว และเมื่อแป้งหมดผ่านสลิเกอร์ขึ้นไป 2-4 เมตร แป้งจะแห้งและเกิดการปะทะกันของแป้ง กับท่ออบแป้งทำให้มีขนาดเล็กลง พบในบริเวณท่ออบแป้ง ไชโคลนร้อน ไชโคลนเย็น ตะแกรงร่อนใน ไชโคล และบริเวณบรรจุ แป้งจะมีขนาดเล็กกว่า $420\ \mu\text{m}$ มากกว่า 97.96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นฝุ่น ที่เกิดการสันดาปได้

2) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of Dust Particles) กระบวนการผลิตแป้ง มันสำปะหลังส่วนใหญ่จะใช้ระบบลำเลียงแป้งด้วยลม จึงเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นในอากาศตั้งแต่ท่อ อบแป้ง ชุดไชโคลนร้อน ท่อทางออกไชโคลนร้อนด้านบน พัดลมดูดอากาศไชโคลนร้อนท่อส่งแป้งจาก ไชโคลนร้อนไปไชโคลนเย็น ชุดไชโคลนเย็น ท่อทางออกด้านบนไชโคลนเย็น พัดลมดูดอากาศไชโคลน เย็น ชุดไชโคลนตกฝุ่น เครื่องร่อนแป้ง และไซโลเก็บแป้ง นอกจากนี้ยังพบฝุ่นมันเส้นในพื้นที่ทั่วไป บริเวณห้องบรรจุแป้งที่มีการสะสมหนาแน่นกว่า $0.80\ \text{mm}$. ขึ้นไป จะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเมื่อมี การใช้ลมเป่าเพื่อทำความสะอาด

จากการศึกษาของ Echoff (2003) พบความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของฝุ่นมันเส้นเท่ากับ $125\ \text{g/m}^3$ และจากผลการตรวจวัดและการคำนวณ และมักพบฝุ่นมันเส้นที่มีความเข้มข้นมากกว่า $125\ \text{g/m}^3$ บริเวณเหนือสลิเกอร์ 2-4 เมตร ท่ออบแป้ง ไชโคลนร้อน ท่อไชโคลนร้อน ท่อส่งแป้ง จากไชโคลนร้อนไปไชโคลนเย็น ไชโคลนเย็น ท่อไชโคลนเย็น ภายในตะแกรงร่อนแป้ง ไชโคลบรรจุ

แป้งใต้ตะแกรงร้อน ไชโคลนดักฝุ่นที่ทางออกของไชโคลนเย็น มีความเข้มข้นของหมอกฝุ่นอยู่ในช่วง MEC ดังแสดงในภาพที่ 2.22 บริเวณที่แสดงแถบสีส้ม หรือตารางที่ 2.8 แสดงจุดเสี่ยงที่มีความเข้มข้นฝุ่นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 125 g/m กรณิโรตารีวาล์วไม่ทำงาน เกิดการอุดตันใต้โรตารีวาล์ว หรือขณะหยุดและเริ่มเดินเครื่องอาจทำให้ความเข้มข้นฝุ่นอยู่ในช่วง MEC ดังนั้นทำให้มีจุดเสี่ยงเพิ่มขึ้น เช่น ทางออกของไชโคลนร้อน พัดลมไชโคลนร้อน ทางออกไชโคลนเย็น และพัดลมไชโคลนเย็น ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงบริเวณความเข้มข้นฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ ในกระบวนการอบแป้งมันสำปะหลัง
ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

3) ขอบเขตหมอกฝุ่น (Confinement of the Dust Cloud) หมอกฝุ่นจะอยู่ในขอบเขตที่จำกัดเกือบทั้งหมด เนื่องจากการผลิตในระบบปิด ได้แก่ บริเวณลำเลียงระบบท่อลมไชโคลนร้อน ตะแกรงร่อนแป้ง ไชโล ซึ่งเป็นพื้นที่มีโอกาสที่จะเกิดกลุ่มหมอกฝุ่น

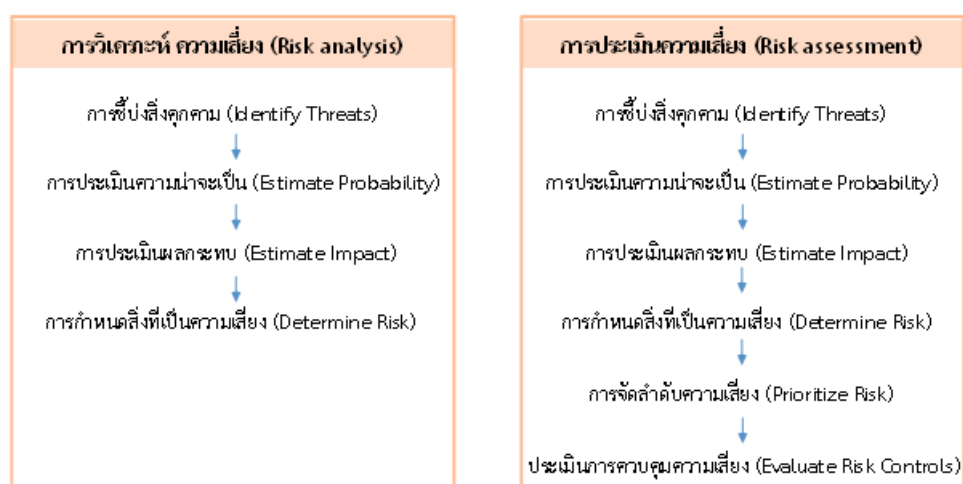
4) ออกซิเจน (Oxygen) ในกระบวนการการลำเลียงแป้งมันสำปะหลังจะใช้ลมเป็นตัวลำเลียง ซึ่งลมที่เกิดขึ้นมาจากการบรรยากาศทั่วไปภายนอก มีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 20.9 เป็นปริมาณที่เพียงพอที่จะช่วยให้เกิดการลุกติดไฟได้ตลอดเวลา

5) แหล่งจุดติดไฟ (Ignition Sources) จากผลการศึกษาของ BARTEC พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้กองฝุ่นมันเส้นลุกติดไฟ เท่ากับ 290 °C แต่ถ้าเป็นหมอกฝุ่นมันเส้นจะมีอุณหภูมิจุดติดไฟเท่ากับ 450 °C แต่จากการศึกษา กระบวนการผลิต ไม่พบว่ามีจุดใดที่อุณหภูมิสูงถึง 220 °C ซึ่ง

ช่วงทำงานปกติจะไม่เกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นได้ ในกรณีที่กระบวนการผลิตเกิดความผิดพลาดทำให้เกิดความร้อนสูง หรือมีประกายไฟเกิดขึ้นจึงจะสามารถทำให้เกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นได้ ดังนั้น แหล่งจุดติดไฟเป็นพื้นที่ควรระวังเพราะจะทำให้เกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นได้

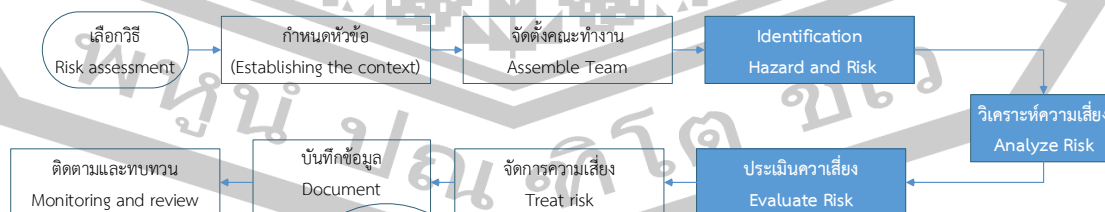
2.4 การประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่น

ความเสี่ยง (Risk) คือ โอกาสที่อาจก่อให้เกิดอันตราย สูญเสีย หรือขัดขวางการดำเนินงาน ความเสี่ยงวัดจากความน่าจะเป็น (Probability) และผลกระทบต่อองค์กร (Impact) การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) เป็นกระบวนการบ่งชี้ (Identifying) การประเมินความน่าจะเป็น และผลกระทบที่จะเกิดขึ้น จัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Prioritizing risks) นำไปสู่การบริหารจัดการความเสี่ยงนั้นๆ (Popov et al., 2016) การวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk analysis) และการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) มีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 23-24



ภาพที่ 23 Risk Analysis and Risk Assessment

ที่มา: ISO 31000/ANSI/ASSEZ690.2-2011



ภาพที่ 24 ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง

ที่มา: IEC/ISO 31010.2009

แผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrix) เป็นระบบการให้คะแนน ความเสี่ยงแบบเมทริกซ์ กำหนดความรุนแรงและระดับความเสี่ยง ของเหตุการณ์ เพื่อให้สามารถเห็น ภาพความเสี่ยงได้อย่างชัดเจน ง่ายต่อการตัดสินใจสำหรับการนำไปจัดทำแผนบริหารจัดการความ เสี่ยงในลำดับต่อไป แผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrices) มีหลายประเภท ขึ้นกับการนำไปเลือกใช้ให้เกิดความเหมาะสมกับลักษณะของความเสี่ยง (Popov et al., 2016) ดัง แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ระบบการให้คะแนน แผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrix)

System	Values	Risk factors	Matrix type	Risk level
ANSI B11.0-2015	Qualitative	Probability (P) of occurrence x Severity (S) of harm	4x4	ความเสี่ยง 4 ระดับ สูง (High) ปานกลาง (Medium) น้อย (Low) น้อยมาก (Negligible)
ANSI Z10-2012	Qualitative	Likelihood (L) of exposure x Severity (S) of injury or illness	5x4	ความเสี่ยง 4 ระดับ สูงมาก (High) สูง (Serious) ปานกลาง (Medium) ต่ำ (Low)
ISO 31010/ANSI Z690.3-2012	Semiquantitative	Likelihood (L) x Consequence (C)	5x6	ความเสี่ยง 5 ระดับ I สูงสุด (Highest) II III IV V ต่ำสุด (Lowest)
MIL-STD 882E	Qualitative	Probability (P) x Severity (S)	6x4	ความเสี่ยง 5 ระดับ สูงมาก (High) สูง (Serious) ปานกลาง (Medium) น้อย (Low) น้อยมาก (Eliminate)

ตารางที่ 10 ระบบการให้คะแนน แผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrix)(ต่อ)

System	Values	Risk factors	Matrix type	Risk level
ANSI Z590.3 PtD	Semiquantitative	Probability (P) x Severity (S)	5x5	ความเสี่ยง 4 ระดับ สูงมาก (Very high risk) สูง (High risk) ปานกลาง (Medium risk) น้อย (Low risk)

การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative Risk Models) เป็นการค้นหาสาเหตุปัจจัย และผลกระทบของความเสี่ยง รวมถึงวิเคราะห์ระบบการควบคุมที่มีอยู่เดิมจะนำไปสร้างเป็นเกณฑ์กำหนดระดับ การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative risk assessment) เป็นการประเมินความน่าจะเป็นและผลกระทบของเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น ความเสี่ยงจะถูกจัดลำดับความสำคัญโดยการจัดกลุ่มผลลัพธ์เป็นหมวดหมู่ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ และระดับความเสี่ยง แปรผลออกมาเป็นระดับความเสี่ยงสูงความเสี่ยงปานกลาง และ ความเสี่ยงต่ำ ตามเกณฑ์การประเมินเชิงคุณภาพ (Popov et al., 2016) ดังแสดงในตารางที่ 11-15

ตารางที่ 11 ตัวอย่าง Qualitative risk assessment (5x4) matrix

ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์	←ความรุนแรง หรืออาการบาดเจ็บ เจ็บป่วยที่เกิดขึ้น →			
	Negligible	Marginal	Critical	Catastrophic
Frequent	Medium	Serious	High	High
Probable	Medium	Serious	High	High
Occasional	Low	Medium	Serious	High
Remote	Low	Medium	Medium	Serious
Improbable	Low	Low	Low	Medium

การประเมินความเสี่ยงกึ่งปริมาณ (Semiquantitative risk models) เป็นการใช้ข้อมูลเชิงคุณภาพ แต่การแสดงค่าคะแนนความเสี่ยง และระดับความเสี่ยงเป็นตัวเลข ที่มาจากของผลคูณความรุนแรง และความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ (Popov, 2016) ดังแสดงในตารางที่ 12-15

ตารางที่ 12 ตัวอย่าง Semiquantitative risk assessment (5x4) matrix

ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์	← ความรุนแรง หรืออาการบาดเจ็บ เจ็บป่วยที่เกิดขึ้น →			
	Negligible(1)	Marginal (2)	Critical (3)	Catastrophic (4)
Frequent (5)	5	10	15	20
Probable (4)	4	8	12	16
Occasional (3)	3	6	9	12
Remote (2)	2	4	6	8
Improbable (1)	1	2	3	4

ตารางที่ 13 โอกาสในการเกิดของเหตุการณ์ (Likelihood)

ระดับ	ระดับความรุนแรง	ความหมาย
5	Frequent	มีแนวโน้มเกิดขึ้นมากกว่า 1 ครั้งในรอบปี
4	Probable	มีแนวโน้มเกิดขึ้นในรอบปี
3	Occasional	มีแนวโน้มเกิดขึ้นในรอบ 2 ปี
2	Remote	มีแนวโน้มเกิดขึ้นในรอบ 3 ปี
1	Improbable	ไม่เคยเกิดขึ้นในรอบ 5 ปี

ตารางที่ 14 ระดับของความรุนแรงของเหตุการณ์ (Severity)

ระดับ	ระดับความรุนแรง	ความหมาย
4	Catastrophic	มีผู้เสียชีวิตอย่างน้อยหนึ่งราย การบาดเจ็บรุนแรง จำเป็นต้องรับการรักษาในโรงพยาบาล ความเสียหายมากกว่า 250,000 ดอลลาร์สหรัฐ
3	Critical	หยุดกระบวนการผลิต ให้เกิดการบาดเจ็บทางร่างกายร้ายแรง ทุพพลภาพถาวร ความเสียหายมากกว่า 50,000 ดอลลาร์สหรัฐ
2	Marginal	ทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือหยุดกระบวนการบางพื้นที่ ความเสียหายมากกว่า 1,000 ดอลลาร์สหรัฐ
1	Low	มีการบาดเจ็บเล็กน้อย ไม่ต้องต้องปฐมพยาบาลเบื้องต้น ความเสียหายน้อยกว่า 1,000 ดอลลาร์สหรัฐ

ตารางที่ 15 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง

ระดับความเสี่ยง (Risk level)	ระดับคะแนน (Risk scores)	มาตรการดำเนินการ (Action)
Very high	≥ 12	หยุดกระบวนการผลิต ต้องดำเนินการแก้ไขทันที
High	8-10	ต้องดำเนินการแก้ไขตามตามลำดับความเสี่ยง
Moderate	4-6	ควรดำเนินการแก้ไข
Low	1-3	สามารถดำเนินการได้ตามความเหมาะสม

ตัวอย่างการประเมินความเสี่ยงกึ่งปริมาณ (Semiquantitative risk models) โดยใช้มาตรฐานของ ANSIZ 10 ที่มีการประยุกต์ใช้กับการมาตรการควบคุมความเสี่ยงของ Hierarchy of control (Popov et al., 2016) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 16-20

ตารางที่ 16 การจัดระดับโอกาสในการเกิดของเหตุการณ์ ANSIZ 10

โอกาสในการเกิด (Likelihood)	ความหมาย (Description)	ระดับ (Rating)
สูงมาก (Most likely)	เป็นเหตุการณ์ที่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นมากที่สุด	5
สูง (Possible)	เป็นเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ เกิดขึ้นเป็นปกติ	4
ปานกลาง (Conceivable)	เป็นเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต	3
น้อย (Remote)	ไม่เคยเกิดขึ้นในรอบหลายปี	2
น้อยมาก (Inconceivable)	เป็นไปได้จริงและไม่เคยเกิดขึ้น	1

ตารางที่ 17 การจัดระดับผลกระทบของเหตุการณ์ ANSIZ 10

ความรุนแรง (Severity)	ความหมาย (Description)	ระดับ (Rating)
ร้ายพิบัติ	ทำให้เกิดการสูญเสีย เสียชีวิต บาดเจ็บ เจ็บป่วยรุนแรง ต่อผู้ปฏิบัติงาน ชุมชน และสิ่งแวดล้อม	5
สูง	ทำให้เกิดการบาดเจ็บทางร่างกายร้ายแรง ทุพพลภาพถาวร	4
ปานกลาง	ทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือการเจ็บป่วยที่ต้องรับการรักษาพยาบาล	3
น้อย	ทำให้เกิดการบาดเจ็บที่ต้องปฐมพยาบาลเบื้องต้นเท่านั้น	2
น้อยมาก	บาดเจ็บเล็กน้อย ไม่ต้องต้องปฐมพยาบาลเบื้องต้น	1

ประเมินผลความเสี่ยง (Evaluate Risk) มีหลายวิธีซึ่งประเมินเชิงคุณภาพเป็นอีกวิธีที่นำมาใช้ในการหาผลลัพธ์ในรูปแบบเมทริกซ์ของความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

การประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk Assessment and Ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรงและโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยการใช้แผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk Matrix)

ตารางที่ 18 Risk Matrix (ANSIZ 10)

Risk Matrix			S = Severity (ความรุนแรง)				
			น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
			1	2	3	4	5
L = Likelihood (โอกาส)	สูงมาก	5	5	10	15	20	25
	สูง	4	4	8	12	16	20
	ปานกลาง	3	3	6	9	12	15
	น้อย	2	2	4	6	8	10
	น้อยมาก	1	1	2	3	4	5
	เกณฑ์ความเสี่ยง (Criteria)						

ตารางที่ 19 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง (ANSIZ 10)

ระดับความเสี่ยง (Risk level)	ระดับคะแนน (Risk scores)	มาตรการดำเนินการ (Action)
ต่ำ	1-4	สามารถดำเนินการได้ตามดุลพินิจ
ปานกลาง	5-8	ต้องดำเนินการแก้ไขในเวลาที่เหมาะสม
สูง	9-14	ต้องจัดการให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ต่อไป
สูงมาก	15-25	จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที

ตารางที่ 20 มาตรการป้องกัน (Protection Factor) (ANSIZ 10)

มาตรการป้องกัน (Protection Factor)	(Multiplier)
การขจัด (Elimination)	0.1
การแทนทดแทน (Substitution)	0.4
การควบคุมทางวิศวกรรมหลายรูปแบบ (Engineering - Multiple)	0.6
การควบคุมทางวิศวกรรมรูปแบบเดียว (Engineering - Single)	0.7
การเตือน (Warning)	0.8

หลักเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงตามแบบของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ให้ใช้หลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้ พิจารณาถึงโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยจัดระดับโอกาสเป็น 4 ระดับ 21-25

ตารางที่ 21 การจัดระดับโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ

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

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

ความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่จะก่อให้เกิดผลกระทบที่อาจเกิดต่อบุคคล ชุมชน ทรัพยากร หรือสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด โดยจัดระดับความรุนแรงเป็น 4 ระดับ

พหุ ประสิทธิภาพ ชีว

ตารางที่ 22 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล

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

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

ตารางที่ 23 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชน

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	ไม่มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน หรือมีผลกระทบเล็กน้อย
2	ปานกลาง	มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน และแก้ไขได้ในระยะเวลานั้น
3	สูง	มีผลกระทบต่อชุมชนรอบโรงงาน และต้องใช้เวลาในการแก้ไข
4	สูงมาก	มีผลกระทบรุนแรงต่อชุมชนบริเวณกว้าง หน่วยงานรัฐต้องเข้าแก้ไข

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

ตารางที่ 24 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

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

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

ตารางที่ 25 การจัดระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน

ระดับ	ความรุนแรง	รายละเอียด
1	เล็กน้อย	ทรัพย์สินเสียหายน้อยมาก หรือไม่เสียหายเลย
2	ปานกลาง	ทรัพย์สินเสียหายปานกลางและสามารถดำเนินการผลิตต่อได้
3	สูง	ทรัพย์สินเสียหายมากและต้องหยุดการผลิตในบางส่วน
4	สูงมาก	ทรัพย์สินเสียหายมากและต้องหยุดการผลิตทั้งหมด

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

การจัดระดับความเสี่ยง พิจารณาถึงผลลัพธ์ของระดับโอกาสคูณกับระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อบุคคล ชุมชน ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม หากระดับความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อบุคคล ชุมชน ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม มีค่าแตกต่างกัน ให้เลือกระดับความเสี่ยงที่มีค่าสูงกว่าเป็นผลของการประเมินความเสี่ยงในเรื่องนั้นๆ ระดับความเสี่ยงจัดเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตาราง 26

ตารางที่ 26 การจัดระดับความเสี่ยงอันตราย

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

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543)

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk models) เป็นการกำหนดค่าความรุนแรงของผลที่ตามมาและโอกาสที่จะเกิดขึ้น มีการกำหนดค่าระดับความเสี่ยงชัดเจนตามระบบ หรือมาตรฐานที่สร้างขึ้นเป็นตัวเลขเชิงปริมาณ ซึ่งการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk assessment) เป็นการประเมินความน่าจะเป็นและผลกระทบของเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น ความเสี่ยงจะถูกจัดลำดับเป็นตัวเลข

การประเมินความเสี่ยงมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของความเสี่ยง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการประเมินความเสี่ยง และให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ในการศึกษารครั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk models) และการประเมินความเสี่ยงกึ่งปริมาณ (Semiquantitative risk models) โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ คือ FFTA-AHP มีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

2.4.1 การชี้บ่งอันตราย และประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (Abuswer et al., 2007) เป็นเทคนิคที่เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้ประเมินความเสี่ยงอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่เข้าใจง่าย ชัดเจน มีความน่าเชื่อถือ สามารถระบุปัจจัยความผิดพลาด ความล้มเหลวของเหตุการณ์พื้นฐานได้ ชัดเจน (Shi et al., 2018) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุเดี่ยว หรือสาเหตุร่วมเพื่อนำไปสู่การกำหนดมาตรการป้องกันต่อไป (Jurca et al., 2022) มีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

2.4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Fault Tree Analysis (Abuswer et al., 2013; Spasenic et al., 2022)

1) การกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้น เป็นเหตุการณ์แรก (Top event) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีผลกระทบร้ายแรงตามมา

2) พิจารณาโอกาสของปัญหา ซึ่งสาเหตุการเกิดการระเบิดฝุ่นอาจเกิดจากหลายสาเหตุร่วมกันกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ “And gate” หรือสาเหตุของ เหตุการณ์ย่อยเหตุการณ์ใด เหตุการณ์หนึ่งเท่านั้น กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ “OR gate”

3) วิเคราะห์หาสาเหตุย่อย (Fault tree event or Intermediate event) ที่ทำให้เกิดการระเบิดฝุ่น โดยพิจารณาห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The Dust Explosion Pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น

4) วิเคราะห์หาสาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ จากห้าเหลี่ยมของการระเบิด จากกระบวนการทำงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ ระบบความปลอดภัย ความผิดพลาดจากพนักงาน และการบริหารจัดการ เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นปกติ (Basic event) วิเคราะห์จนพบเหตุการณ์สิ้นสุดของการเกิดการระเบิด

5) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปภาพแผนภูมิต้นไม้ ดังแสดงในภาพที่ 25



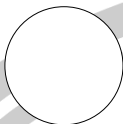
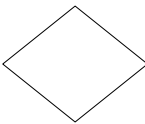
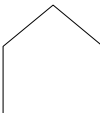
ภาพที่ 25 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTA

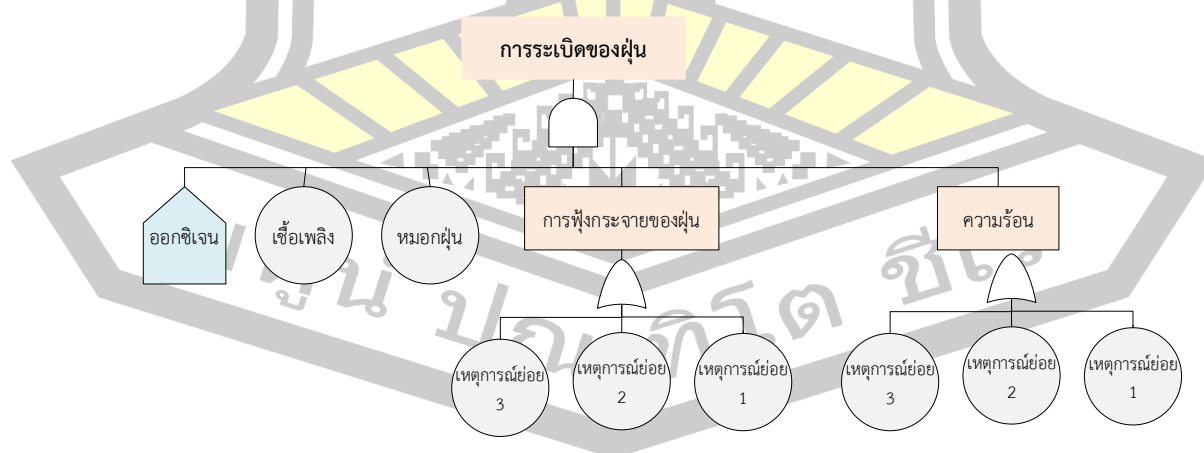
2.4.1.2 การวิเคราะห์หาสาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ สามารถแสดงการวิเคราะห์ในรูปแบบสัญลักษณ์ Gate Symbol และ Event Symbol ลงในรูปภาพแผนภูมิต้นไม้ ดังแสดงในตารางที่ 27 และภาพที่ 26

ตารางที่ 27 รูปแบบสัญลักษณ์ FTA

รูปแบบ	สัญลักษณ์	ชื่อ	ความหมาย
Gate Symbol		AND Gate	เหตุการณ์เกิดจากสาเหตุหลายเหตุการณ์ร่วมกัน
		OR gate	เหตุการณ์เกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง
		Inhibit Gate	เหตุการณ์เกิดขึ้นเมื่อมีเงื่อนไข

ตารางที่ 27 รูปแบบสัญลักษณ์ FTA (ต่อ)

รูปแบบ	สัญลักษณ์	ชื่อ	ความหมาย
Event Symbol		Basic Event	เหตุการณ์ย่อยพื้นฐานที่อาจเกิดขึ้นได้ ไม่ต้องวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป เป็นสาเหตุแรกของ Top Event
		Fault Event	เหตุการณ์ที่ต้องทำการวิเคราะห์หาเหตุการณ์ย่อยต่อไป
		Undeveloped Event	เหตุการณ์ย่อยที่ทำการวิเคราะห์หาต่อไปยังไม่ได้ จนกว่าจะมีข้อมูลมาสนับสนุน
		External Event	เหตุการณ์ธรรมชาติ หรือปัจจัยภายนอก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุม หรือแก้ไขได้
		Condition Event	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้ เมื่อเหตุการณ์ย่อยมีเงื่อนไขเพิ่มเติม
Transfer Symbol		Transfer Symbol	สัญลักษณ์การวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้ที่มีการย้ายไปยังแผนภูมิต้นไม้อื่น

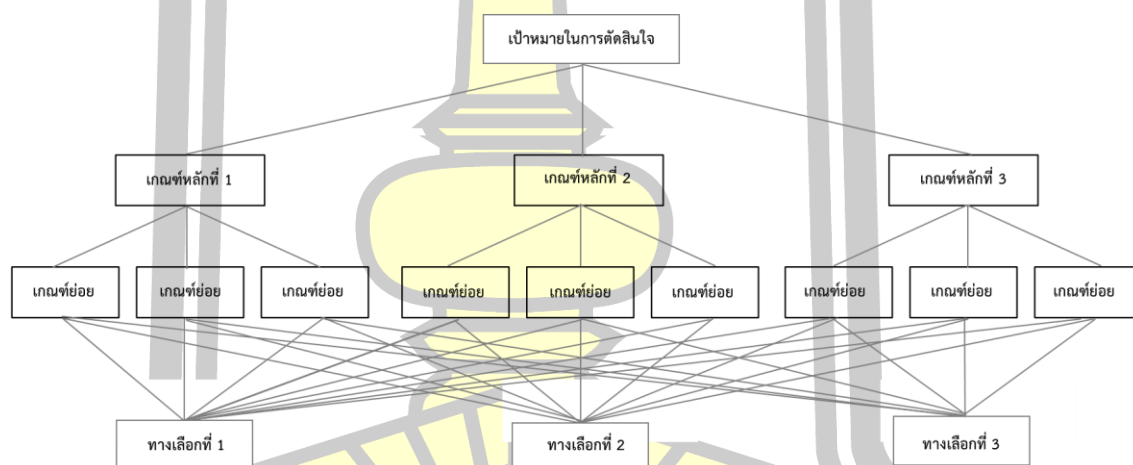


ภาพที่ 26 แสดงการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้ เพื่อหาสาเหตุย่อยโดยพิจารณาจากห้าเหลี่ยมของการระเบิด

2.4.2 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น Analytic Hierarchy Process (AHP)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1980 โดย Thomas L. Saaty เป็นเทคนิคใช้ในการตัดสินใจเลือก หรือเรียงลำดับทางเลือกของปัญหาที่ต้องใช้การตัดสินใจที่ซ้ำซ้อน โดยสร้างรูปแบบการตัดสินใจให้เป็นโครงสร้างลำดับชั้น และนำข้อมูลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์สรุปแนวทางเลือกที่เหมาะสม การดำเนินการของวิธี AHP มี 4 ขั้นตอน (Marhavidas et al., 2022; Najafi & Afraze, 2011; Zhang et al., 2023) ดังต่อไปนี้

2.4.2.1 การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างเป็นลำดับชั้น (Hierarchy Structure) แต่ละระดับชั้นประกอบไปด้วยเกณฑ์ในการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหาระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมาย โดยรวมซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัยขึ้นอยู่กับว่าแผนภูมินั้นมีทั้งหมดกี่ระดับชั้น ที่สำคัญที่สุดปัจจัยต่างๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญเท่ากัน หากมีความสำคัญแตกต่างกันมากควรแยกปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยกว่าลงไปอยู่ระดับชั้นถัดไป ตัวอย่างแผนภูมิลำดับชั้นโครงสร้าง AHP แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงโครงสร้างลำดับชั้น AHP

2.4.2.2 การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทีละคู่ (Pairwise comparisons) จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นโครงสร้างโดยใช้วิธี Principle of Hierarchic Composition การวินิจฉัยจะแสดงออกมาในรูปของมาตราส่วนของระดับความพึงพอใจที่เป็น ตัวเลข 1 ถึง 9 ในตารางเมตริกเนื่องจากตารางเมตริก คือเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่ๆหรือจับคู่ นอกจากจะช่วยอธิบายเกี่ยวกับการเปรียบเทียบแล้วตารางเมตริกยังสามารถทดสอบความสอดคล้องกันของการ

วินิจฉัยและสามารถวิเคราะห์ถึงความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญ เมื่อการวินิจฉัยเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย ในการวินิจฉัยเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ ผู้วินิจฉัยจะกำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นระดับความเข้มข้นของความสำคัญด้วยตัวเลข 1 ถึง 9 เป็นผู้ให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบโดยการเปรียบเทียบของ (เกณฑ์หรือทางเลือก) ทีละคู่ (Pairwise comparison) โดยเริ่มจากชั้นบนลงสู่ชั้นล่าง โดยแบ่งระดับความสำคัญ หรือความชอบ (AHP Measurement scale) ดังแสดงในตารางที่ 2.28 หลังจากที่เราทราบความเห็นที่ผู้วินิจฉัยในรูปของคะแนนความสำคัญ หรือความชอบจากการเปรียบเทียบในแต่ละคู่แล้ว จะทำการคำนวณหาน้ำหนักของความสำคัญ (Weight) หรือลำดับความสำคัญสัมพัทธ์ (Relative priority) ในขั้นนั้น ทำการวิเคราะห์ทีละชั้นจากชั้นบนลงล่างจนครบทุกชั้น จะทราบคะแนนความสำคัญรวมของทางเลือกตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (Saaty, 1990) ดังแสดงในตารางที่ 28

ตารางที่ 28 แสดงชุดของตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่

ระดับความเข้มข้น ของความสำคัญ	ความหมาย
1	มีความสำคัญเท่ากัน (Equal Importance)
2	↓
3	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย (Moderate Importance)
4	↓
5	มีความสำคัญกว่ามากในระดับปานกลาง (Strong Importance)
6	↓
7	มีความสำคัญมากกว่าในระดับค่อนข้างมาก (Extreme Importance)
8	↓
9	มีความสำคัญมากกว่าในระดับมากที่สุด

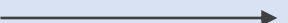
ที่มา: Saaty, 1980

2.4.2.3 การสังเคราะห์ (Synthesis) โดยการพิจารณาจากลำดับความสำคัญทั้งหมดของเหตุการณ์ จากการเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดควรได้รับเลือก (Saaty, 1990)

1) การวิเคราะห์เมตริก ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{1n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 29 ตารางเมตริกที่ใช้ในการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์เป็นคู่ (Pairwise Comparison)

เป้าหมายการ ตัดสินใจ	เกณฑ์ในการวิเคราะห์			
	A ₁	A ₂		A _n
A ₁	1	3	-	-
A ₂	1/3	1	-	-
↓	-	-	-	-
A _n	-	-	-	1

จากตาราง 29 จะเห็นภายใต้เป้าหมายตัดสินใจ หลักเกณฑ์ A1 ในแถวแนวนอนจะถูกรับเทียบกับ A1 ถึง An ในแถวแนวตั้งของ A1 และดำเนินการเช่นเดียวกันในแถวต่อไปจนครบทุกแถว ซึ่งผู้ตัดสินใจจะเกิดคำถามว่าหลักเกณฑ์ที่มีความสำคัญ หรือมีอิทธิพลมากกว่าหลักเกณฑ์อื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบในระดับใด AHP จะให้ตัวเลข 1 ถึง 9 แทนค่าพูดของการเปรียบเทียบ ตัวเลข 1 ถึง 9 นี้ แสดงมาตราส่วนวัดระดับความแตกต่างระหว่าง 2 หลักเกณฑ์ที่ถูกเปรียบเทียบเกิดจากความชำนาญและประสบการณ์ภายใต้กรอบของเหตุผลโดยไม่เกิดความลำเอียงของผู้วินิจฉัย (Saaty, 1990)

2) การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometric Mean Method) ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเกิดจากการนำเอาตัวเลขที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยมาคูณกัน แล้วนำเอา แล้วผลคูณนั้นมาถอดรากที่สองตามจำนวนตัวเลขนั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$v = (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}$$

สมการที่ 2.1

- เมื่อ a_{ij} = ค่าตัวเลขในตารางเมตริก
 V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต
 n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

3) การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนของทางเลือก เป็นการวิเคราะห์หาน้ำหนักคะแนนของทางเลือกนั้นเกิดจากการสังเคราะห์ข้อมูลของแต่ละทางเลือก ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.0$$

เมื่อ W_i = น้ำหนักคะแนนของแต่ละหลักเกณฑ์
 V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต
 n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

4) การวิเคราะห์ความสอดคล้อง เป็นการคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผลในการให้คะแนน ด้วยการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่ละคู่ของหลักเกณฑ์ทั้งหมดกำหนดเป็นการนำผลรวมของค่าแต่ละหลักเกณฑ์ในแถวตั้ง แต่ละแถวมาคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแถวนอนแต่ละแถว แล้วนำผลคูณที่ได้มารวมกัน ผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลรวมนี้เรียกว่า Eigen Values สูงสุด (λ_{max}) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n [\sum_{j=1}^n a_{ij} w_i] \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

ถ้าตารางเมตริกมีความสอดคล้องกันของเหตุผลสมบูรณ์ 100 %

$\lambda_{max} =$ จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ (n)

ถ้าตารางเมตริกไม่มีความสอดคล้องกัน

$\lambda_{max} >$ จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index : CI) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

n = จำนวนหลักเกณฑ์

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$CR = \frac{CI}{RI}, CR < 0.1$$

สมการที่ 2.5

แปลผลค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) โดยผลการคำนวณหาอัตราส่วนความสอดคล้องที่ได้หาก CR มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่าภายในชุดของดุลยพินิจนั้นจะมีความสอดคล้องอย่างสมบูรณ์ แต่หาก CR มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าความไม่สอดคล้องจะเทียบเท่ากับดุลยพินิจที่ได้จากการสุ่ม ถ้า CR มีค่ามาก (โดยทั่วไปค่าวิกฤตจะอยู่ที่ 0.1) แสดงว่าดุลยพินิจนั้นไม่น่าเชื่อถือ โดยช่วงที่จะยอมรับได้ของค่า CR ขึ้นอยู่กับขนาดของเมตริก (Saaty, 1990) ดังแสดงในตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ค่า RI จากการสุ่มตัวอย่าง

ขนาดของตารางเมตริก	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่า RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

5) การวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญ สามารถหาได้จากการนำผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งของแต่ละแถวของตารางเมตริก ดังแสดงในตารางที่ 2.30

แถวตั้ง A1 มีค่าผลรวม = $(1+2+5 = 8)$

แถวตั้ง A2 มีค่าผลรวม = $(1/2+1+2 = 3.5)$

แถวตั้ง A3 มีค่าผลรวม = $(1/5+1/2+1 = 1.70)$

นำตัวเลขแต่ละช่องของแถว หาค่าด้วยผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งนั้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่มีนัยสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยต่างๆ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

เช่น แถวตั้ง A1 = $1/8, 2/8, 4/8$

แถวตั้ง A2 = $(1/2)/3.5, 1/3.5, 2/3.5$

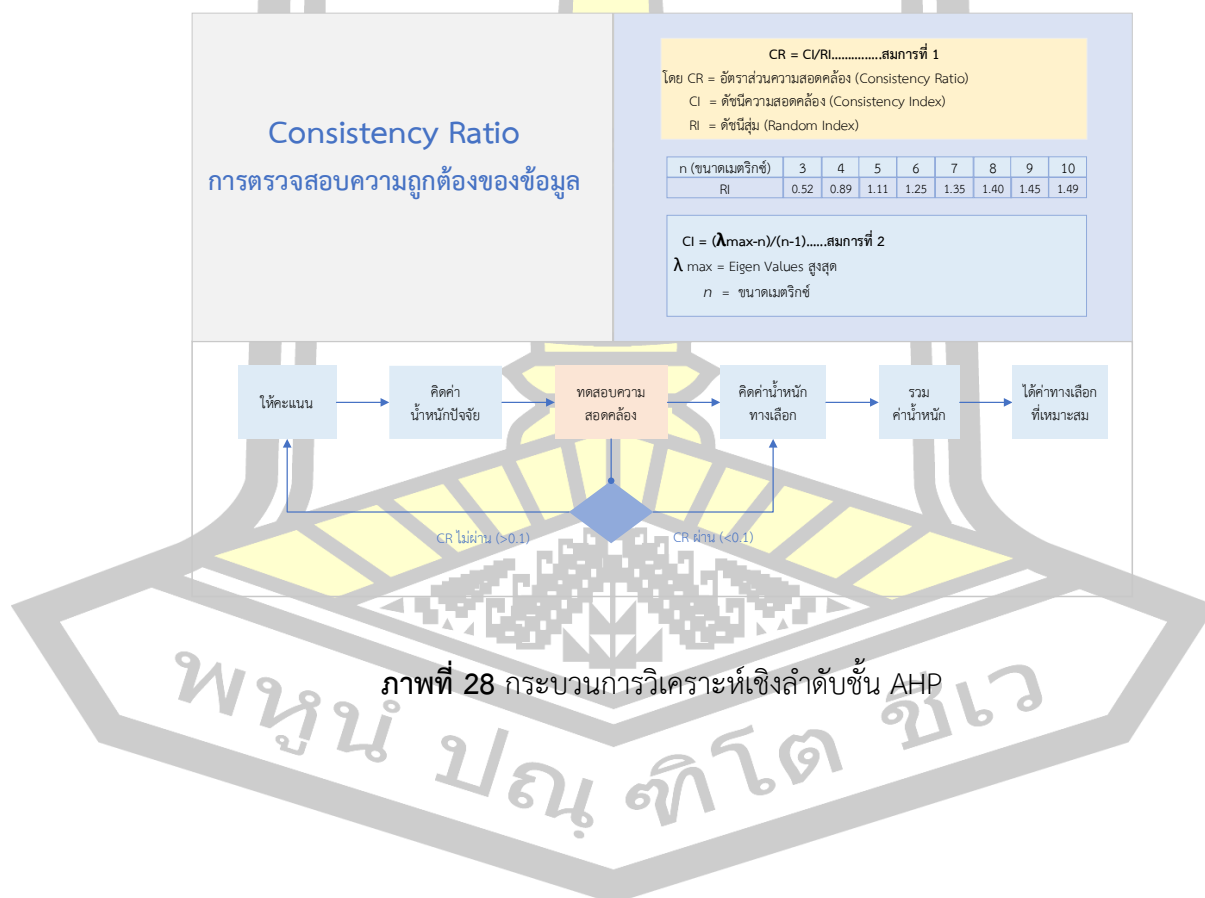
แถวตั้ง A3 = $(1/5)/1.70, (1/2)/1.70, 1/1.70$

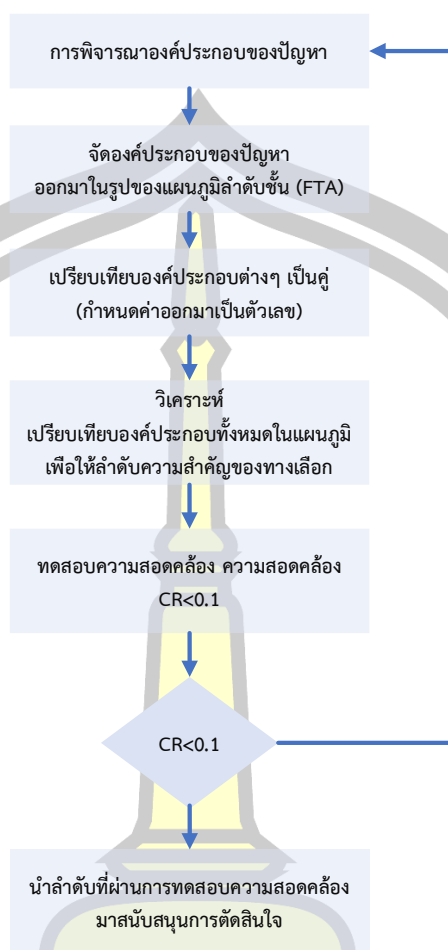
พจน บณ จิต ชเว

ตารางที่ 31 ตารางเมตริกที่แสดงถึงเป้าหมายการตัดสินใจภายใต้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบ

เป้าหมายในการตัดสินใจ	A ₁	A ₂	A ₃	ลำดับความสำคัญ
A ₁	1	1/2	1/5	0.125
A ₂	2	1	1/2	0.250
A ₃	5	2	1	0.625
Σ	8	3.5	1.7	

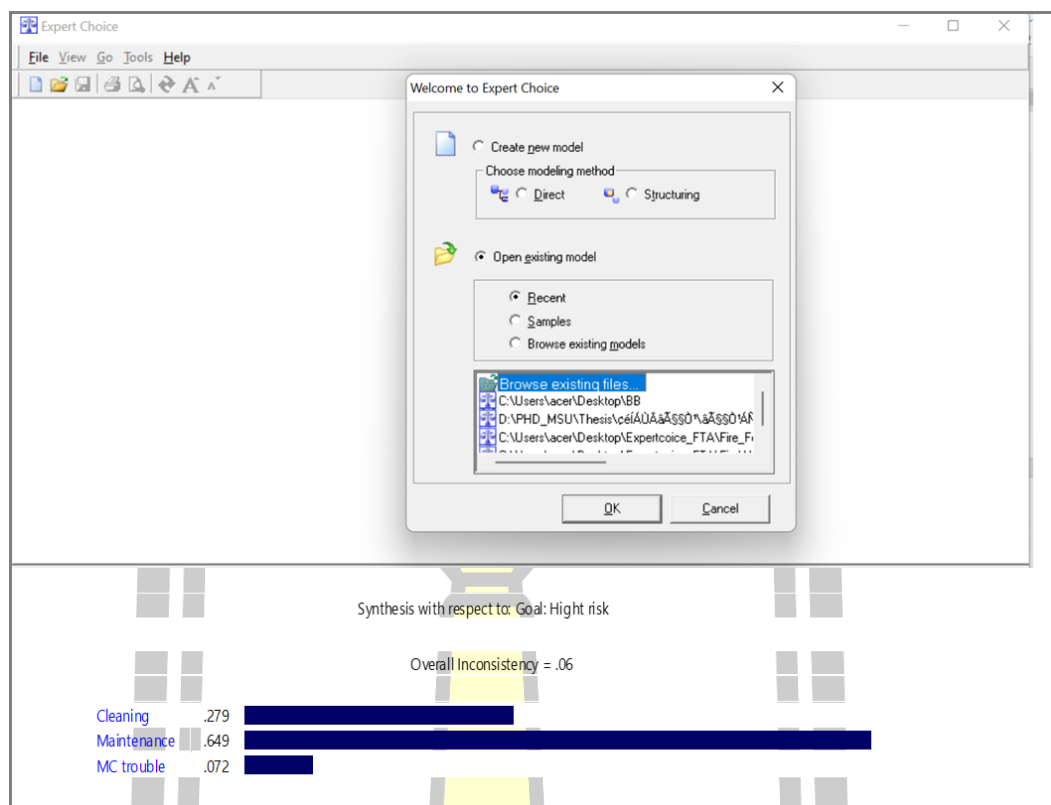
6) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อปัจจัยในการวินิจฉัย (Sensitivity Analysis) จะทำการทดสอบหลังจากเสร็จจากกระบวนการทั้งหมด สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังภาพที่ 28-30





ภาพที่ 29 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น AHP

2.4.2.2 การวิเคราะห์ AHP ด้วย โปรแกรม Expert Choice Expert Choice เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่อยู่บนพื้นฐานของกระบวนการ ลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เป็นวิธีการที่มีความสามารถและเข้าใจง่ายในการทำการตัดสินใจ ทำการออกแบบสอบถามตามรูปแบบโครงสร้างปัญหาตามกระบวนการลำดับชั้น ทำการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยทำให้ได้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจากการเปรียบเทียบ ความสำคัญของปัจจัยเป็นคู่ ๆ จากผู้ที่เกี่ยวข้องแต่ละท่านในการหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลค่าน้ำหนักของปัจจัยที่วิเคราะห์ รวมทั้งตรวจสอบความสอดคล้องของค่าน้ำหนักเฉลี่ย ว่าสามารถนำไปใช้ สำหรับการตัดสินใจได้หรือไม่ โดยใช้ทฤษฎีไอเกนเวกเตอร์มาช่วยตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล โดยข้อมูลจะถูกวิเคราะห์และประมวลผลด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป Expert Choice

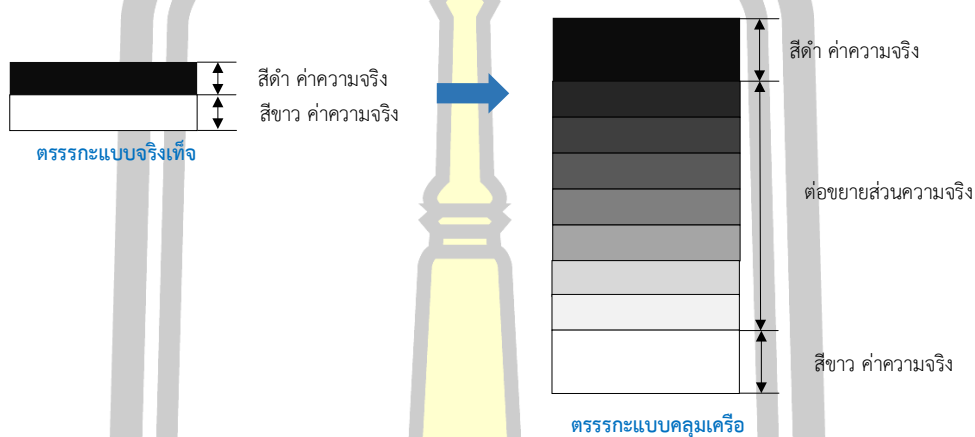


ภาพที่ 30 ตัวอย่างการแสดงผลวิเคราะห์และประมวลผลด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป Expert Choice

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy)

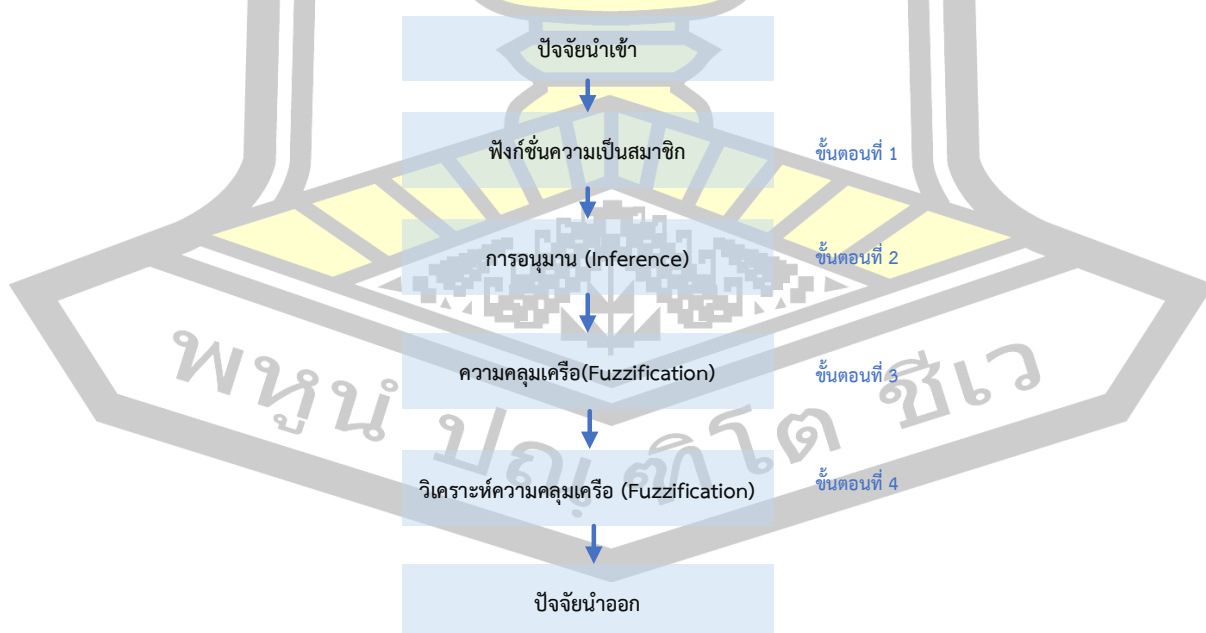
กระบวนการลำดับชั้นแบบเดิม AHP ไม่สามารถจัดการกับการตัดสินใจที่มีความคลุมเครือได้อย่างสมบูรณ์ จึงได้มีการนำทฤษฎี Fuzzy มาใช้ร่วมกับ AHP ซึ่ง Fuzzy ได้ออกแบบมาเพื่อจัดการกับข้อมูลที่มีความคลุมเครือ โดยการจัดการด้วยตรรกะ แสดงผลในรูปแบบตัวเลขจากการแปลงภาษาเป็นตัวเลข และแสดงในรูปแบบสามเหลี่ยมเพราะง่ายต่อความเข้าใจและนำไปใช้ในการคำนวณ จากฟังก์ชันสามเหลี่ยม Fuzzy กับการเปรียบเทียบคู่ของ AHP แสดงออกในรูปแบบของตัวเลข ซึ่งมีความใกล้เคียงกับความคิดของมนุษย์ มีการประมาณข้อมูลและใช้ความไม่แน่นอนในการตัดสินใจการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลในวิธีการ Fuzzy โดยการคงรูปแบบการเปรียบเทียบระดับความสำคัญเชิงคู่ของปัจจัย มีการแปลงภาษาระดับความสำคัญในการเปรียบเทียบภาษาพูดให้เป็นตัวเลข ด้วยการใช้ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy numbers: TFNs) แทนการใช้ตัวเลขเดี่ยว 1-9 (Alhassan et al., 2023; Tennakoon et al., 2023)

2.4.3.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของ ข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลเลียนแบบวิถีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy) มีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) กับตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy)

2.4.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล ตรรกะแบบคลุมเครือ มีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 32



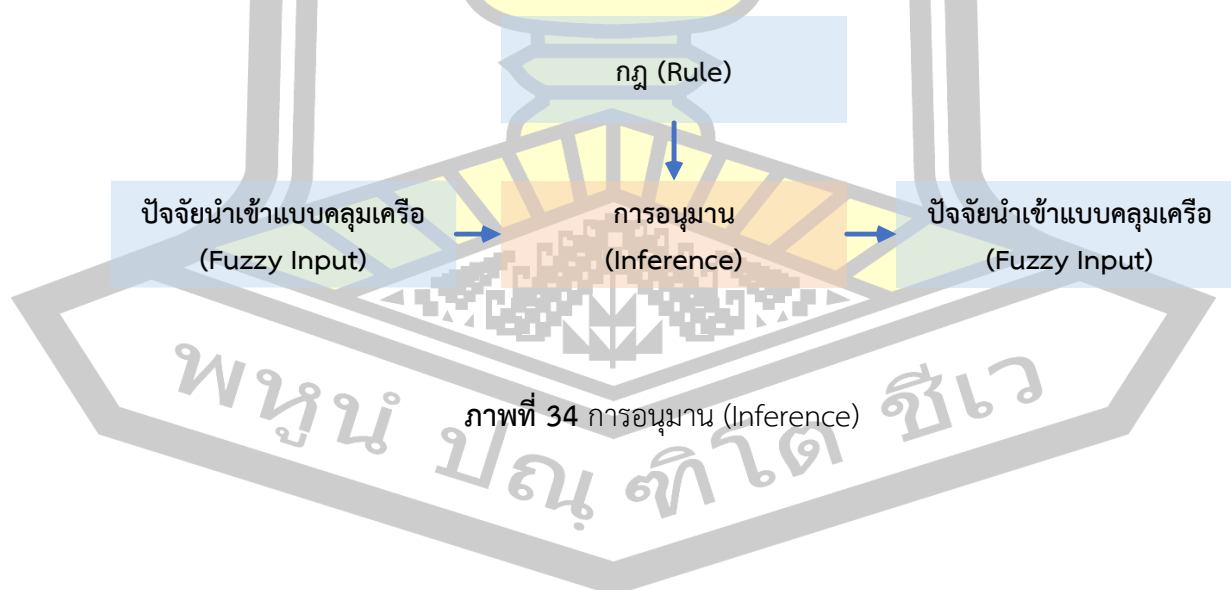
ภาพที่ 32 ขั้นตอนการประมวลผล ตรรกะแบบคลุมเครือ

ขั้นตอนที่ 1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เป็นการแปลงการนำเข้าแบบทวินัย เปลี่ยนเป็นการนำเข้าแบบตัวแปร Fuzzy โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละการนำเข้า (Input) และสำคัญต่อการนำออก (Output) เป็นการกำหนดภาษา Fuzzy ดังแสดงในภาพที่ 33



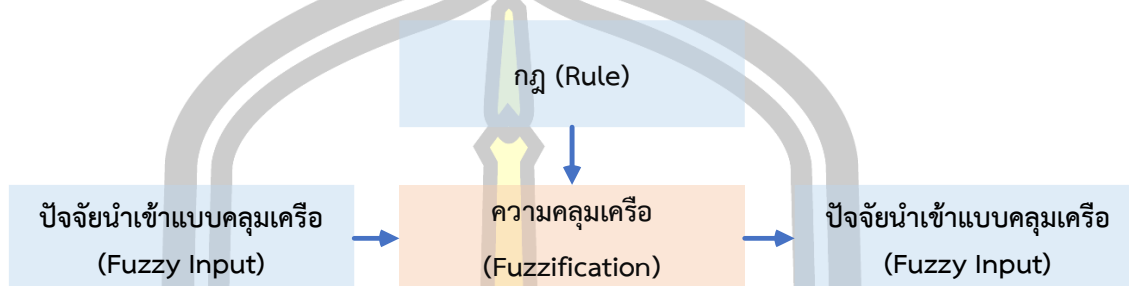
ภาพที่ 33 ขั้นตอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ขั้นตอนที่ 2 การอนุมาน (Inference) เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการนำเข้าทั้งหมด ที่เกี่ยวกับการนำออกโดยอาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะมีการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ดังแสดงในภาพที่ 34



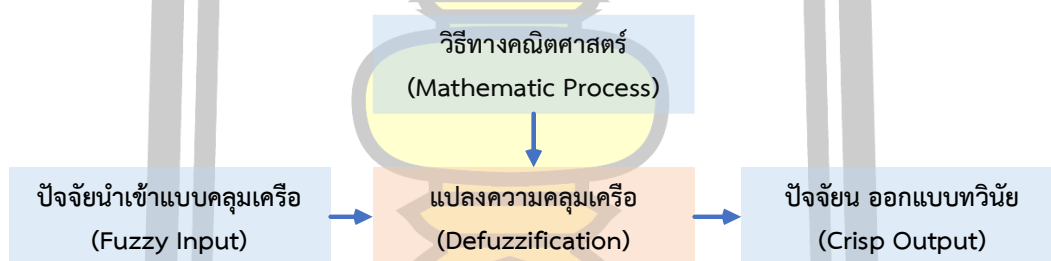
ภาพที่ 34 การอนุมาน (Inference)

ขั้นตอนที่ 3 ความคลุมเครือ (Fuzzification) เป็นการหา Fuzzy Output โดยการนำกฎการควบคุมในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผล Fuzzy Input โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การอนุมาน (Inference)

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ความคลุมเครือ (Fuzzification) เป็นขั้นตอนการสรุปเหตุผล Fuzzy โดยเปลี่ยน Fuzzy Output ให้เป็นทวินัยนำออก เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบ ดังแสดงในภาพที่ 36

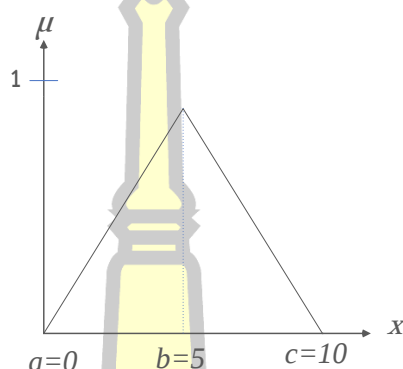


ภาพที่ 36 การอนุมาน (Inference)

2.4.3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกัน หรือสมมาตรกันทุกประการได้ (Alhassan et al., 2023; Tennakoon et al., 2023) ดังแสดงในภาพที่ 37

1) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ

$$\text{Triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{a-b}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$



ภาพที่ 37 ฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2) การวิเคราะห์ข้อมูลของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี การประยุกต์ใช้ขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ของวิธีการ AHP และ Fuzzy เข้าด้วยกันโดยการคงรูปแบบการเปรียบเทียบระดับความสำคัญเชิงคู่ของปัจจัยแต่ในการแปลงภาษาระดับความสำคัญในการเปรียบเทียบซึ่งเป็นภาษาพูดให้เป็นตัวเลขจะใช้ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy numbers : TFNs) มาแทนการใช้ตัวเลขเดี่ยว 1-9 โดยที่รูปแบบตัวเลขฟัซซีจะเป็น (l, m, u) มี m เป็นค่ากลางของ $\mu_M(x)$ และ l, u เป็นค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามลำดับของเลขสมาชิกแทนได้ด้วยสมการที่ 2.7

$$\mu(x/M) = \begin{cases} 0, & x < l \\ (x-l)/(m-l), & l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m), & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

กำหนดให้ l และ u เป็นค่าขอบเขตล่างและบนของสมาชิกตามลำดับ และ m เป็นค่ากลาง โดย Triangular Fuzzy Number ถูกแสดงในรูป (l, m, u) ที่มีกฎการบวกและการคูณกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.8-2.11

การบวกกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) + (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

การลบกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) - (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

การคูณกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) \times (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

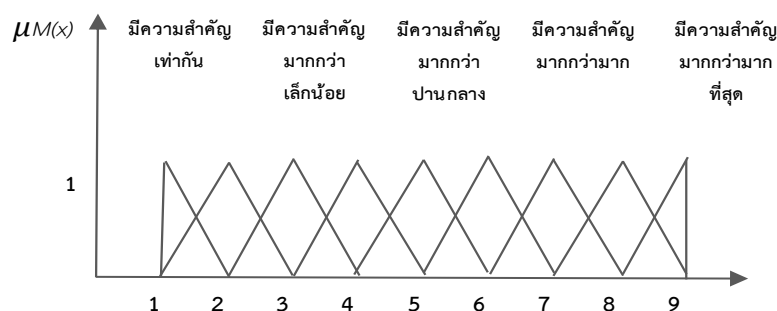
การหารกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

การแปลงภาษาพูดมาเป็นตัวเลขฟัซซี่ดังแสดง ตารางที่ 32 โดยสามารถ แสดงในรูปแบบสามเหลี่ยมฟัซซี่ (Alhassan et al., 2023) ได้ดังภาพที่ 38

ตารางที่ 32 ค่าความสำคัญตามทฤษฎีของ Chang แสดงระดับความสำคัญของการเปรียบเทียบคู่

ตัวเลขฟัซซี่แบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy scale)	ระดับการให้ความสำคัญ (Linguistic scale)
(1,1,3)	มีความสำคัญเท่ากัน
(1,3,5)	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย
(3,5,7)	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง
(5,7,9)	มีความสำคัญมากกว่ามาก
(7,9,9)	มีความสำคัญมากกว่ามากที่สุด



ภาพที่ 38 ตัวเลขสมาชิกของสามเหลี่ยมฟัซซี

Chang (1996) ได้แสดงวิธีการคำนวณเพื่อแปลงภาษาพูดมาเป็นตัวเลขฟัซซี และแสดงข้อมูลในรูปแบบสามเหลี่ยมฟัซซี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

การกำหนดขอบเขตการพิจารณาโดยกำหนดให้

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ เป็นเซตวัตถุ (Objective set) หรือทางเลือก

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ เป็นเซตหลักเกณฑ์ หรือ เป้าหมาย (Gold set)

การวิเคราะห์ขอบเขต g_i ของวัตถุที่นำมาวิเคราะห์ความคลุมเครือ มีหลักเกณฑ์การดำเนินการดังนี้

กำหนดขอบเขตการพิจารณา

กำหนดให้ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ เป็นเซตวัตถุ (Objective set) หรือทางเลือกให้ $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ เป็นเซตหลักเกณฑ์ หรือ เป้าหมาย (Gold set) และในการวิเคราะห์แต่ละทางเลือกจะถูกนำมาวิเคราะห์สำหรับแต่ละหลักเกณฑ์ ดังนั้น การวิเคราะห์ขอบเขต (ความคลุมเครือ) สำหรับแต่ละวัตถุสามารถแสดงได้ ดังนี้

$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$ สำหรับ $i=1, 2, \dots, n$

เมื่อ $M_{g_j}^i (j=1, 2, \dots, m)$ เป็นตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม

จากพื้นฐานวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัซซีเมตริกการเปรียบเทียบความสำคัญแบบคู่ ตามเกณฑ์ฟัซซี สามารถสร้างได้ดังสมการ 2.12

$$(M_{gi}^j)_{nm \times m} = \begin{bmatrix} M_{g1}^1 & M_{g1}^2 & \dots & M_{g1}^m \\ M_{g2}^1 & M_{g2}^2 & \dots & M_{g2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{gn}^1 & M_{gn}^2 & \dots & M_{gn}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1m}, m_{1m}, u_{1m}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1,1,1) & \dots & (l_{2m}, m_{2m}, u_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

โดยที่ $(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = (1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij})$ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $j = 1, 2, \dots, n$ และ $i \neq j$
 และ $(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = (1, 1, 1)$ สำหรับ $i = j$

การวิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี ดังสมการ 2.13 สำหรับวัตถุที่ i โดยกำหนดให้

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \times [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1}$$

S_i คือ คำนวณน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจ

$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ คือ ผลบวกของ Triangular Fuzzy Number

$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1}$ คือ ค่าต่างตอบแทนผลรวมของ l, m, u ทุกเกณฑ์การตัดสินใจ

โดย $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = [\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j]$ สมการที่ 2.13

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = [\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i]$$
 สมการที่ 2.14

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1} = (1/\sum_{i=1}^n l_i, 1/\sum_{i=1}^n m_i, 1/\sum_{i=1}^n u_i)$$
 สมการที่ 2.15

คำนวณระดับความเป็นไปได้ ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $j = 1, 2, \dots, m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ 2.16

$$v(S_i \geq S_j) = \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}$$

ถ้า $m_i > m_j$

ถ้า $l_j > u_i$

อื่นๆ

สมการที่ 2.16

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ ตามสมการที่ 2.17

$$V(S_i \geq S_j) \mid j = 1, 2, \dots, m ; i \neq j = \min V(S_i \geq S_j) \mid j = 1, 2, \dots, m ; i \neq j$$
 สมการที่ 2.17

สร้างเวกเตอร์ความสำคัญ W' ของเมตริก เปรียบเทียบความสำคัญแบบฟิชชี ดังสมการที่ 2.18

เมื่อประมาณการให้ $W' = |\min V(S_i \geq S_j) | j=1,2,...,m ; i \neq j)$ สมการที่ 2.18

และเมื่อทำการ Normalization เวกเตอร์ความสำคัญ W' ด้วยสมการ 2.19

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{สมการที่ 2.19}$$

จะได้เวกเตอร์ความสำคัญใหม่เป็น ด้วยสมการ 2.20

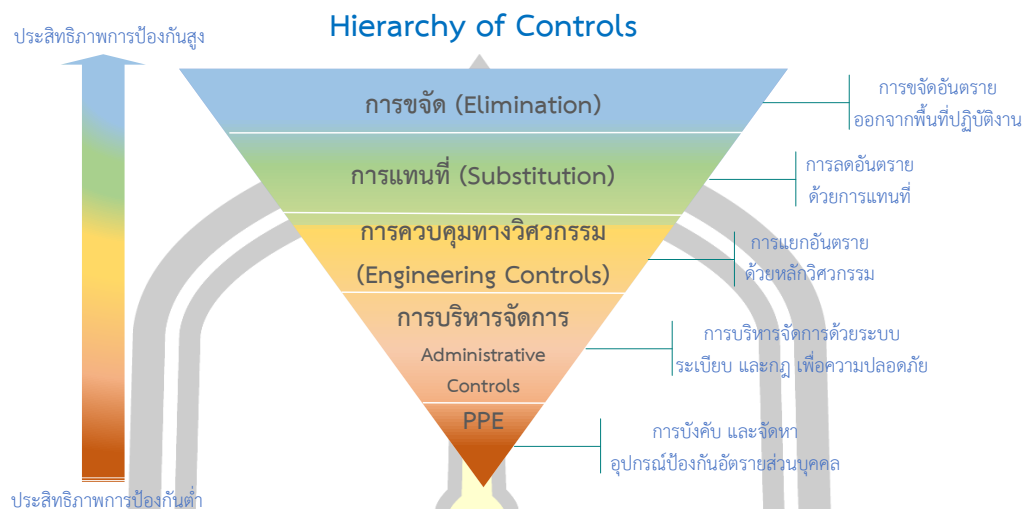
$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad \text{สมการที่ 2.20}$$

2.5 หลักการบริหารจัดการความปลอดภัยในสถานประกอบการ

หลักการบริหารจัดการความปลอดภัยในสถานประกอบการ สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการป้องกันการระเบิดฝุ่น มีหลายวิธี การเลือกใช้วิธีการป้องกันจึงต้องให้ครอบคลุมกับความเสี่ยงในพื้นที่ปฏิบัติงานทั้งหมด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ สามารถป้องกันการระเบิดฝุ่น ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น รวมทั้งการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุซ้ำ การศึกษาในครั้งนี้ขอตัวอย่าง การป้องกันด้วยหลักองค์ประกอบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) การป้องกันด้วยหลัก 3E และหลักการป้องกันที่ตำแหน่งของความเสี่ยง (Hazard prevention: HP) (Ajslev et al., 2022)

2.5.1 องค์ประกอบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls)

องค์ประกอบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) เป็นลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย เป็นแนวทางในการควบคุมเพื่อลด หรือกำจัดความเสี่ยงในพื้นที่ปฏิบัติงานที่ละชั้น โดยมีการจัดลำดับการป้องกันที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดไปจนถึงระดับการป้องกันที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในรูปแบบของปิระมิดคว่ำ ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) ซึ่งจะเห็นว่าลำดับชั้นของการควบคุมอันตรายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ การขจัด (Elimination) และลำดับชั้นของการควบคุมอันตรายที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) (Cao et al., 2015; Morris & Cannady, 2019; Wróbel et al., 2018) ดังแสดงในภาพที่ 39 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 39 ลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls)

ที่มา: ดัดแปลงจาก NIOSH (2021)

2.5.1.1 การขจัด (Elimination) เป็นการควบคุมอันตรายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการกำจัดอันตรายทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ การยศาสตร์ และจิตวิทยาสังคม เช่น กรณีพนักงานต้องทำงานบนที่สูง อันตรายสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการย้ายงานมาทำในระดับพื้นดิน เพื่อขจัดความเสี่ยงจากการทำงานบนที่สูง

2.5.1.2 การแทนที่ (Substitution) เป็นการแทนด้วยวัสดุ กระบวนการ ปฏิบัติการ หรืออุปกรณ์ที่มีอันตรายน้อยกว่า เช่น การเปลี่ยนไปใช้สารเคมีที่มีอันตรายน้อยกว่าแทน

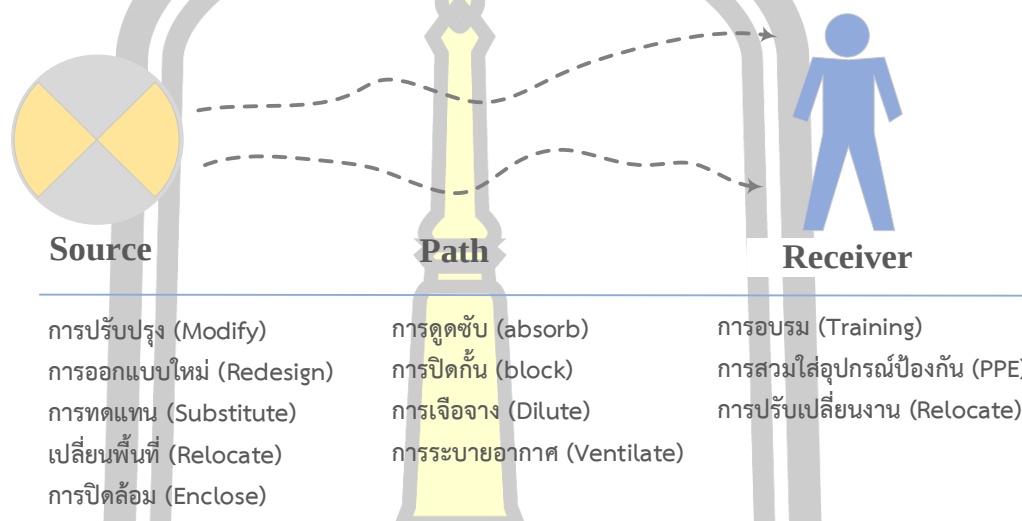
2.5.1.3 การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) ถือเป็นอีกวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอันดับสามในการควบคุมอันตราย การควบคุมทางวิศวกรรม ใช้หลักการแยกผู้ปฏิบัติงานออกจากอันตราย ต้นทุนของการดำเนินงานควบคุมทางวิศวกรรมอาจสูงกว่าวิธีอื่นในลำดับชั้น เช่น การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระเบิด (Explosion proof) การติดตั้งระบบเตือนและระงับเหตุกรณีเกิดการระเบิด (Explosion suppression system) เป็นต้น

2.5.1.4 การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) เช่น การฝึกอบรม การวางแผนงาน การสับเปลี่ยนตารางเวลาทำงาน เปลี่ยนแปลงขั้นตอนการทำงาน หรือดำเนินการป้องกันอันตรายในเขตพื้นที่งาน

2.5.1.5 การสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการควบคุมอันตราย เนื่องจากมีโอกาสเกิดการชำรุด การเสื่อมสภาพ รวมทั้งทัศนคติ และพฤติกรรมส่วนบุคคลที่จะเพิกเฉยไม่สวมใส่ PPE

2.5.2 หลักการป้องกันที่ตำแหน่งของความเสียหาย (Hazard prevention: HP)

การป้องกันความเสี่ยงจากสภาพแวดล้อมในการทำงาน จะพิจารณาที่ตำแหน่งที่เกิดของความเสียหายนั้น ได้แก่ การป้องกันที่แหล่งกำเนิด (Source) ทางผ่าน (Path) และตัวบุคคล (Receiver) เป็นอีกแนวที่สามารถป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cao et al., 2015; Morris & Cannady, 2019; Wróbel et al., 2018) ดังแสดงในภาพที่ 40 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 40 หลักการป้องกันที่ตำแหน่งของความเสียหาย (Hazard prevention: HP)

2.5.2.1 การป้องกันที่แหล่งกำเนิด (Source) คือ การป้องกันที่แหล่งกำเนิดของความเสียหาย หรือการป้องกันที่อันตรายนั้นๆ ซึ่งถือเป็นการป้องกันและการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น การออกแบบระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ การลดแรงสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเพื่อป้องกันการเกิดเสียงดัง การแก้ไขปรับปรุงจุดเสี่ยง หรือจุดอันตรายที่จะทำให้เกิดความร้อน ทั้งจากไฟฟ้าสถิต ความร้อนของเครื่องจักร ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการระเบิดของฝุ่น รวมทั้งการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระเบิด (Explosion proof) การติดตั้งระบบเตือน และระบบเหตุการณ์เกิดการระเบิด (Explosion suppression system) เป็นต้น

2.5.2.2 การป้องกันที่ทางผ่าน (Path) คือ การป้องกันความเสี่ยงจากสภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยการพิจารณาการป้องกันที่เส้นทาง หรือทางผ่านของความเสียหาย เช่น การปิดกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดอันตรายกับตัวผู้ปฏิบัติงาน การเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดอันตรายและผู้ปฏิบัติงาน การป้องกันด้วยวิธีอื่นี่ถือว่ามีประสิทธิภาพ รองจากการป้องกันที่แหล่งกำเนิด แนวทางการดำเนินงาน เช่น การติดตั้งอุปกรณ์เตือนอันตราย การติดตั้งระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust Collector System) เป็นต้น

2.5.2.3 การป้องกันที่ตัวบุคคล (Receiver) เป็นวิธีสุดท้ายในการพิจารณาเลือกใช้ เพราะเป็นการป้องกันที่ควบคุมได้ยากที่สุด ได้ผลน้อยมากหากไม่ได้รับความร่วมมืออย่างจริงจังจาก ผู้ปฏิบัติงาน การควบคุมอันตรายแบบนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านพฤติกรรม เช่น การจัดหา อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลให้พนักงานสวมใส่ การอบรมและให้ความรู้เกี่ยวกับความปลอดภัย ในการทำงาน การบังคับให้ผู้ปฏิบัติงานปฏิบัติตามกฎระเบียบ มาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน เป็นต้น

2.5.3 การป้องกันด้วยหลัก 3E

การป้องกันด้วยหลัก 3E ถูกพัฒนามาจากการควบคุมความปลอดภัยงานขนส่ง และถูก นำมาใช้ในการป้องกันอุบัติเหตุ การบาดเจ็บ ความสูญเสียทั้งชีวิต และในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการ ดำเนินการป้องกันด้วยหลัก 3E ประกอบด้วย การควบคุมด้านวิศวกรรม (Engineering) การอบรมให้ ความรู้ (Education) และการปฏิบัติตามกฎ (Enforcement) (Dai & Wang, 2022; Kim et al., 2013; Sherin et al., 2021) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.3.1 การควบคุมด้านวิศวกรรม (Engineering) คือ การใช้ความรู้ด้าน วิศวกรรมศาสตร์มาจัดการงานด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย เช่น การออกแบบเครื่องจักรให้มี ความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน การติดตั้งเครื่องป้องกันอันตราย การวางผังโรงงาน ออกแบบ โครงสร้างป้องกันการระเบิด และอุปกรณ์ลดการระเบิด รวมทั้งการออกแบบระบบป้องกันการระเบิด เป็นต้น

2.5.3.2 Education คือ การอบรมให้ความรู้กับผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่เกี่ยวข้องใน การทำงานให้มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือ ขั้นตอนการทำงาน การบำรุงรักษา การตรวจสอบ เครื่องจักร การป้องกันอุบัติเหตุ เป็นต้น

2.5.3.3 Enforcement คือ การออกมาตรการควบคุม กฎระเบียบ ข้อบังคับต่างๆ เพื่อ ใช้บังคับให้คนงานปฏิบัติตาม เพื่อลดความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน และให้เกิดความปลอดภัยในการ ทำงาน เช่น การกำหนดระยะเวลาในการทำงาน การกำหนดขั้นตอนการทำงานที่ปลอดภัย (Work instruction) การออกกฎระเบียบความปลอดภัยในการทำงาน (Safety rules) การปฏิบัติตามงานที่ ต้องขออนุญาต (Work Permit)

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการประเมินความเสี่ยงการเกิดระเบิดของฝุ่นจาก กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังได้มีการบูรณาการข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเข้ากับ กระบวนการตัดสินใจ เพื่อลดความคลุมเครือของการประเมินความเสี่ยง ทำให้เกิดความแม่นยำ เกิด ความครอบคลุมในการหาสาเหตุการความผิดพลาดจากกระบวนการผลิตยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถระบุค่า ความเสี่ยงสูงสุดที่อาจเกิดจากเครื่องจักร และอุปกรณ์ควบคุมการผลิตได้ (ศราวดี ไชยรัตน์, 2564) การศึกษาครั้งนี้ได้มีการเลือกใช้วิธี Fault Tree Analysis (Abuswer et al., 2007) การนำกระบวนการที่

ช่วยเลือกสำหรับการตัดสินใจความเสี่ยงจากกระบวนการผลิตด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process : AHP) และการลดความคลุมเครือจากการวิเคราะห์ด้วยการเลือกใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (Fuzzy Analytic Hierarchy Process : FAHP) นอกจากนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมสำหรับเพิ่มความแม่นยำในประเมินความเสี่ยง การลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ และลำดับชั้นวิเคราะห์ความคลุมเครือ ได้แก่ โปรแกรม Ramcomander โปรแกรม Expert Choice 11 และโปรแกรม MATLABซึ่งมีรายละเอียดในกระบวนการประเมินความเสี่ยงดังต่อไปนี้

2.6 การวิจัยและพัฒนา (Research & Development)

การวิจัยและพัฒนา (Research & Development) เป็นกระบวนการศึกษาค้นคว้า คิดค้น อย่างเป็นระบบ นำเชื่อถือ มีเป้าหมายในการพัฒนาผลผลิต เทคโนโลยี สิ่งประดิษฐ์ สื่อ อุปกรณ์ เทคนิควิธีหรือรูปแบบการทำงาน ระบบบริหารจัดการ หรือ “นวัตกรรม” และทดลองใช้จนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แล้วจึงนำไปเผยแพร่เพื่อพัฒนางานให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (วาโร เฟื่องสวัสดิ์, 2552)

2.6.1 กระบวนการวิจัยและพัฒนา

1) การสำรวจ สังเคราะห์สภาพปัญหาและความต้องการ เป็นการดำเนินการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) หรือการสังเคราะห์เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาคำตอบเกี่ยวกับสภาพปัญหาความต้องการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ รวมทั้งลักษณะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้พัฒนา ผลการดำเนินการในขั้นตอนนี้จะทำให้ผู้วิจัยสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้สอดคล้องเหมาะสมกับความต้องการของกลุ่มเป้าหมายที่จะใช้ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้น

2) การออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ เป็นการดำเนินการโดยการนำความรู้และผลการวิจัยที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะเริ่มจากการวางแผนพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยการกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การกำหนดวิธีที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ และทรัพยากรที่ต้องการเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งในด้านกำลังคน งบประมาณ วัสดุ ครุภัณฑ์ และระยะเวลา หลังจากนั้นจึงดำเนินการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะหรือรูปแบบตาม ความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย ส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะพัฒนามีลักษณะอย่างไรหรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์มีอะไรบ้างจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ในขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์นี้จะต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางในการสร้างผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

3) การทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ เมื่อสร้างผลิตภัณฑ์เสร็จแล้วจะต้องนำไปตรวจสอบความเหมาะสมและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ถ้าหากผลการตรวจสอบความเหมาะสมและประสิทธิภาพยังไม่เป็นที่พึงพอใจหรือมีบางส่วนที่ไม่สมบูรณ์จะต้องดำเนินการปรับปรุงแก้ไขจนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่กำหนด

4) การเผยแพร่ผลิตภัณฑ์ เป็นการนำผลการวิจัยและผลิตภัณฑ์ไปเผยแพร่ เช่น การนำเสนอในที่ประชุมสัมมนาทางวิชาการหรือวิชาชีพ การตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการ ขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนาสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กรอบแนวคิดการวิจัย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยในประเทศ

ศึกษาปัญหาสาเหตุและแนวทางการป้องกันการระเบิดฝุ่น โดยได้มีการรวบรวมข้อสถิติสาเหตุ การเกิดฝุ่นระเบิดทั่วโลก กำหนดเป็นแนวทางการป้องกันที่เหมาะสมในประเทศไทย ได้แก่

- 1) การประเมินความเสี่ยง หรือโอกาสการเกิดฝุ่นระเบิด เช่น การเลือกใช้กะพ้อที่ทำจากพลาสติก แทนกะพ้อที่ทำจากเหล็กเพื่อลดความเสี่ยงจากความร้อน บริเวณที่มีการกระแทกบ่อยๆ ควรใช้ยาง หรือวัสดุที่ทนความร้อนได้ดี และควรมีระบบตรวจจับความเร็ว และอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัย
- 2) ระบบลำเลียงต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อป้องกันฝุ่นระเบิดได้ เช่น มีการติดตั้งระบบระบายอากาศเป็นระยะๆ การตรวจจับความร้อนของระบบลูกป็น การกำจัดสิ่งแปลกปลอมจากธาตุพืชที่ลำเลียง
- 3) ใช้อุปกรณ์ดักจับฝุ่นที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีการติดตั้งเครื่องวัดความดันที่ถูกต้อง ฝุ่น มีมาตรการในการดูแลพื้นที่ต่างๆ ลดการสะสมของฝุ่น
- 5) จัดให้มีการบริหารจัดการด้านความปลอดภัย และ
- 6) อบรมพนักงานให้เข้าใจถึงวิธีการปฏิบัติงานที่ปลอดภัย (พจน์ ภาคภูมิ, 2562)

การวิเคราะห์ต้นไม้มุ่งหาความเสี่ยง และการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับประเมินความเสี่ยงการเกิดฝุ่น ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นพบว่า เครื่องจักรและอุปกรณ์ควบคุมการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีความเสี่ยงสูง 6 ประเด็น คือ 1) สลิงเกอร์ใบตีแตก 2) แป้งค้ำงท่อน้ำสลิงเกอร์ 3) มอเตอร์ไหม้บริเวณสลิงเกอร์ 4) มอเตอร์ไหม้บริเวณสกรูปลัก 5) น้ำมันเตารั่วบริเวณหม้อต้มความร้อน และ 6) แก๊สเชื้อเพลิงรั่วบริเวณหม้อต้มความร้อน และมี 6 เหตุการณ์ความเสี่ยงปานกลางคือ 1) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งล้มเหลว 2) แป้งไม่ลงถังฮอปเปอร์ 3) มอเตอร์ไหม้บริเวณพัดลมดูดอากาศ 4) แป้งอุดตันบริเวณสกรูปลัก 5) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิหม้อต้มความร้อนล้มเหลว และ 6) มอเตอร์ไหม้บริเวณหม้อต้มความร้อน (ศราวุฒิ ไชยรัตน์ และอารุญ เกตุสาคร, 2564)

การศึกษาเกี่ยวกับฝุ่นระเบิดในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก ความเสี่ยงที่มีโอกาสทำให้เกิดการระเบิดฝุ่นส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนจากอุปกรณ์เครื่องจักร การป้องกันควรมีการออกแบบและติดตั้งโครงสร้างที่แข็งแรง เลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถลดแรงเสียดทาน หรือทำให้เกิดความร้อนได้ยาก มีการบำรุงรักษาเครื่องจักรและอุปกรณ์ตามช่วงระยะเวลา มีการติดตั้งระบบระบายอากาศที่เหมาะสม รวมทั้งการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมในการทำงาน และพนักงานให้มีความปลอดภัย

2.7.2 งานวิจัยต่างประเทศ

การศึกษาเกี่ยวกับช่องระบายการระเบิด (Explosion venting) ของกะพ้อ (Bucket elevators) โดยมีทดลองการออกแบบช่องระบายสำหรับกะพ้อประเภท 1 และ 2 ขา โดยช่องระบายสำหรับกะพ้อประเภท 1 ขา ควรมีพื้นที่ช่องระบายเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของกะพ้อ ติดตั้งสูงจากพื้นระยะ 6 เมตร ระยะห่างของช่องระบายให้เป็นไปตามค่าความรุนแรงของการระเบิด (K_{st}) ตามชนิดของฝุ่น เช่น ฝุ่นที่มีค่า K_{st} 150 bar s-1 หรือน้อยกว่า ระยะห่างของช่องระบาย 6 เมตร จะสามารถลดแรงดันได้มากถึง 300 mbar เมื่อมีการระบายแรงดันคงที่ 0.5 bar สำหรับฝุ่นที่มีค่า K_{st} 150 bar s-1 หรือน้อยกว่า ให้มีการติดตั้งช่องระบายที่ส่วนหัว และส่วนท้ายของกะพ้อ แรงดันระเบิดจะลดลง 0.1 bar และฝุ่นที่มีค่า K_{st} น้อยกว่า 80 bar s-1 ควรติดตั้งระยะห่างของช่องระบาย 14 เมตร จะสามารถลดแรงดันได้มากถึง 0.1 bar สำหรับการออกแบบช่องระบายสำหรับกะพ้อชนิด 2 ขา ขนาดของช่องระบายควรมีระยะห่าง 6 เมตร โดยทั่วไปจะสามารถรองรับแรงดัน ค่า K_{st} น้อยกว่า 100 bar s-1 หากฝุ่นที่มีค่า K_{st} 100 bar s-1 ควรมีการติดตั้งช่องระบายเพิ่มบริเวณส่วนหัวและส่วนท้ายกะพ้อ หาก K_{st} เท่ากับ 150 bar s-1 จะเพิ่มการกระจายตัวของแรงดันระเบิด ควรมีการติดตั้งช่องระบายการระเบิดที่แข็งแรงเพิ่มขึ้น และออกแบบให้สามารถรองรับค่าความรุนแรงของการระเบิดตามประเภทของฝุ่นแต่ละชนิด (Holbrow et al., 2002)

การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการระเบิดฝุ่น (Simulating dust explosions) ได้มีการทดสอบกับแป้งข้าวโพดในภาชนะบรรจุนาน 20 ลิตร การระเบิดมีความสัมพันธ์กับการเผาไหม้ของหมอกฝุ่น การระเบิดแต่ละครั้งจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ความเร็วการเผาไหม้ ความหนาของเปลวไฟ ภาชนะบรรจุในการทดลอง (เตาเผา ท่อ) ซึ่งการทดสอบยังไม่มีกรอบมาตรฐาน (Skjold et al., 2005)

การศึกษาด้านการระเบิดฝุ่น (Dust Explosion) การระเบิดของกลุ่มก๊าซ (Vapour Cloud Explosion) และการระเบิดของเหลวเดือดเป็นไอ (Boiling liquid expanding vapour explosions) ถือเป็นอันตรายร้ายแรงที่สุดในภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิต ทรัพย์สิน เป็นจำนวนมาก แนวทางการป้องกันการระเบิดฝุ่น มุ่งเน้นไปที่การเกิดจุดวาบไฟ (Flash point) และการป้องกันเชิงลำดับชั้น (layers of protection) ได้แก่ 1) การระบุปัจจัยที่ทำให้เกิดการระเบิด 2) วิเคราะห์แหล่งจุดประกายไฟ (ignition sources) ได้แก่ เปลวไฟและความร้อนโดยตรง (Flames and direct heat) วัสดุที่ลุกติดไฟได้เอง (Self-heating) งานที่ทำให้เกิดประกายไฟ (Hot work) หลอดอินแคนเดสเซนต์ (Incandescent material) พื้นผิวร้อน (Hot surfaces) ประกายไฟจากไฟฟ้าสถิต (Electrostatic sparks) ประกายไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical sparks) ประกายไฟจากแรงเสียดทานและจุดที่มีความร้อน (Friction sparks and hot spots) การตกกระทบของประกายไฟ (Impact sparks) ไฟฟ้าสถิต (Static electricity) การกระทบด้วยของมีน้ำหนัก (Lightening) คลื่นกระแทก (Shock waves) ถือเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณา เพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบอุปกรณ์ที่จะช่วยป้องกัน และบรรเทาผลกระทบจากการระเบิด (Abbasi & Abbasi, 2007)

การประยุกต์ใช้หลักความปลอดภัยพื้นฐานในการป้องกันและบรรเทาการระเบิดฝุ่น ได้แก่ การลดขนาด (Minimization) การทดแทน (Substitution) การกรอง (Moderation) ถือเป็นกลยุทธ์ที่ง่ายสำหรับการป้องกัน และผลกระทบจากการระเบิดฝุ่น โดยมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์การระเบิดฝุ่นชนิดต่างๆ การเลือกกระบวนการอื่นๆ ที่มีความปลอดภัยกว่า การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีความปลอดภัย และการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้เกิดความปลอดภัย (Amyotte et al., 2009)

การศึกษาเกี่ยวกับการบริหารความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk assessment: QA) กรณีการระเบิดฝุ่น และส่วนผสมไฮบริด (Hybrid Mixture) ซึ่งเป็นการระเบิดของผสมของก๊าซไวไฟกับฝุ่นที่สันดาปได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้น การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (QA) เป็นกระบวนการชี้บ่งอันตราย และประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค FTA ร่วมกับ Reliability Excellence – software และ Dust Explosion Simulation Code – software กระบวนการดังกล่าว สามารถระบุชั้นของความเสียหาย ทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจ ในการกำหนด

มาตรการการลด และป้องกันการระเบิดฝุ่นเป็นลำดับขั้น ทั้งการป้องกันเชิงรับ (Passive) และการป้องกันเชิงรุก (Active) (Abuswer et al., 2013)

การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดฝุ่นระเบิดในอดีต องค์ประกอบของการเกิดฝุ่นระเบิด เรียกว่า ห้าเหลี่ยมการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ประกอบด้วย เชื้อเพลิง (Fuel) ออกซิแดนต์ (Oxidant) แหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) เชื้อเพลิงผสมและสารออกซิแดนต์ (mixing of the fuel and oxidant) และ ขอบเขตของเชื้อเพลิงผสม (Confinement of the resulting mixture) หลักการป้องกัน หรือบรรเทาการระเบิดฝุ่นนั้นสามารถดำเนินการได้โดยการลด องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งในห้าเหลี่ยมการระเบิดฝุ่น ซึ่งเมื่อองค์ประกอบไม่ครบก็ไม่สามารถเกิดการระเบิดได้ (Amyotte, 2014)

การศึกษาการระเบิดฝุ่นทั่วโลก มีมากกว่า 2,000 ครั้ง ในช่วงปี พ.ศ. 2328 - พ.ศ. 2555 การระเบิดแต่ละครั้งทำให้เกิดความสูญเสียจำนวนมาก และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ในประเทศจีนมีรายงานการระเบิดฝุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว มีการบริหารจัดการด้านความปลอดภัย (safety management) ที่ล่าช้า ไม่มีการปรับปรุงงานด้านความปลอดภัย (safety improvement) การระเบิดที่เกิดขึ้นจึงทำให้เกิดการเสียชีวิตของพนักงานจำนวนมาก ประเภทของฝุ่นระเบิด (Combustible dust) เป็นไปตามลักษณะโครงสร้างอุตสาหกรรมที่มีความแตกต่างแต่ละประเทศ สาเหตุหลักของการระเบิดส่วนใหญ่เกิดจากแหล่งจุดติดไฟ (ignition source) ระบบการจัดเก็บฝุ่น (dust collecting systems) รวมถึงระบบการลำเลียง (conveying systems) ดังนั้น การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ จะช่วยลดความเสี่ยง หรือความสูญเสียที่เกิดจากการระเบิดฝุ่นได้ (Yuan et al., 2015)

การศึกษาเกี่ยวกับการระเบิดของอุปกรณ์ดักจับฝุ่น (Dust collector explosion) เพื่อประเมินอันตรายจากการระเบิดของถุงดักฝุ่นแบบทั่วไป และแบบดัดแปลง โดยมีการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของฝุ่นแขวนลอยในอุปกรณ์ และเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosible Concentration: MEC) พบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในอุปกรณ์ดักจับฝุ่นจะมีค่าสูงกว่า MEC แรงดันการระเบิดประมาณ 0.2-1 bar ซึ่งการระเบิดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินได้ (Zalosh, 2015)

การศึกษาการออกแบบไซโล เพื่อป้องกันการระเบิดฝุ่น โดยมีการออกแบบขนาดช่องระบาย (Explosion venting) และแรงดันการระเบิด (Explosion pressure) ของไซโล ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างของไซโล เพื่อสามารถลดแรงดันภายใน จะช่วยลดผลกระทบจากการระเบิดได้ มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบครั้งนี้ ได้แก่ DIN-Report 140, EN 14491 และ NFPA 68 จากการศึกษไซโลที่มีการใช้งานแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ (ข้าวบาร์เลย์ และแป้งสาลี) การศึกษาในการออกแบบอุปกรณ์มีความแตกต่างกันตามประเภทของมาตรฐานที่เลือกใช้ โดย

การศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาแรงดันและช่องระบายอากาศ จึงนำมาสู่การออกแบบแผงระบายการระเบิด (Bursting panels) ประตูระบายการระเบิด (Explosion doors) และแผ่นพื้นคอนกรีตมวลเบา (Light-weight concrete) ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างของไซโลควรพิจารณาวัสดุที่จัดเก็บ และการเลือกใช้มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (Tascon, 2017)

การระเบิดฝุ่นถ่านหินและก๊าซถือเป็นภัยพิบัติที่ร้ายแรงที่สุดในประเทศจีน ทำให้เกิดความสูญเสียชีวิต และทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก การศึกษาครั้งนี้ได้ประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค Fuzzy fault tree (FFTA) ผลการศึกษาพบว่า โอกาสการเกิดระเบิดฝุ่นถ่านหิน (Coal dust explosion) ร้อยละ 16.16 และโอกาสการเกิดระเบิดของก๊าซ (Gas explosion) ร้อยละ 0.03 จากการวิเคราะห์ปัจจัยพื้นฐานของเหมืองถ่านหิน พบปัจจัยที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นถ่านหิน ได้แก่ เกิดการสะสมฝุ่นถ่านหิน (Coal dust accumulation) เกิดการฟุ้งกระจายของถ่านหินในอากาศ การระเบิดของอุปกรณ์ไฟฟ้า ความเสื่อมของฉนวน และปัจจัยที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของก๊าซ (gas explosion) ได้แก่ ความล้มเหลว หรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ (leak detection not found) ความล้มเหลวของการประมวลผล (Untimely processing) การเชื่อมด้วยแก๊ส (Electrical gas welding) และระบบระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม (Unreasonable ventilation system) จากการศึกษาด้วย FFTA ทำให้สามารถนำมากำหนดมาตรการป้องกันการระเบิดในเหมืองถ่านหิน เพื่อลดความความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นอีกได้ (Shi et al., 2018)

การศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดระเบิดฝุ่น โดยอาศัยข้อมูลลักษณะจำเพาะของฝุ่น เช่น Kst และ MIE ซึ่งพบจากการระเบิดฝุ่นอินทรีย์ (Organic dust explosions) ที่พบมากในภาคอุตสาหกรรมอาหาร เกษษกรรม และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ โดยเฉพาะฝุ่นที่มาจากแป้ง ข้าวโพด น้ำตาล การศึกษาได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิค Fault trees ร่วมกับ Recursive operability analysis (ROA) สำหรับการค้นหาสาเหตุการเกิดระเบิดฝุ่น โดยอาศัยข้อมูลลักษณะจำเพาะของฝุ่น เช่น Kst และ MIE พบการระเบิดจัดอยู่ในกลุ่ม Kst น้อยกว่า 100 bar s-1 (Barozzi et al., 2020)

ศึกษาเกี่ยวกับการระเบิดฝุ่นผงวัสดุ (Powdered materials) ที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรม (Industrial processes) กระบวนการทางเคมี (Chemical processing) และนาโนศาสตร์ (Nanoscience) ทั้งนี้ฝุ่นผง และสารเคมีที่ติดไฟได้ส่วนใหญ่ไม่สามารถระบุลักษณะจำเพาะของสารในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี (Safety Data Sheet) ในภาคอุตสาหกรรมเริ่มให้ความสำคัญในกระบวนการผลิตที่มีฝุ่นที่สามารถติดไฟได้ (Flammable powders) และมีการเพิ่มมาตรการความปลอดภัยมากในระบบยิ่งขึ้น จากการนำฝุ่นผงบางชนิดไปอบแห้ง และตรวจสอบค่าพลังงานน้อยที่สุดที่สามารถจุดติดไฟได้ (Minimum ignition energie : MIE) ก่อนและหลัง พบมีค่าที่แตกต่างกัน ฝุ่นผงบางชนิดที่ปล่อยออกมาจากก๊าซไวไฟ (Flammable gases) จะมีอันตรายค่อนข้างสูง NFPA-654 ได้กำหนดลักษณะที่เป็นอันตราย

ของฝุ่น (Hazard characteristics) ได้แก่ ค่าพลังงานน้อยที่สุดที่ฝุ่นสามารถจุดติดไฟได้ (MIE) ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟของหมอกฝุ่น (Minimum ignition temperature of the dust cloud) ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟการฟุ้งกระจายของฝุ่น (Minimum ignition temperature of the dust layer) ขีดจำกัดความเข้มข้นของออกซิเจน (Limiting Oxygen Concentration: LOC) ดังนั้น การป้องกันการระเบิดฝุ่นจำเป็นต้องทราบค่าความเสี่ยงจากกระบวนการผลิต และลักษณะที่เป็นอันตรายเฉพาะของฝุ่น เพื่อนำไปสู่การป้องกันที่มีประสิทธิภาพได้ (Wei et al., 2020)

การศึกษาชนิดของฝุ่นที่สามารถทำให้เกิดการระเบิด (Dust explosions) การเผาไหม้หมอกฝุ่นในอากาศ (Dust clouds) แหล่งจุดประกายไฟ (Ignition sources) การระเบิดครั้งแรกและการระเบิดครั้งที่สองของฝุ่น (Primary and secondary dust explosion) จะมีความรุนแรงแตกต่างกัน การลุกติดไฟของฝุ่น (Dust flash fires) การระเบิดส่วนผสมไฮบริด (Hybrid mixtures explosions) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการจุดติดไฟ การระเบิดของหมอกฝุ่น (Detonation of dust clouds) รวมทั้งการกำหนดมาตรการป้องกันการระเบิดฝุ่น ได้แก่ การป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนในตัวเอง ป้องกันการเกิดการระอุ และการเผาไหม้สะสมของฝุ่นขนาดใหญ่ ป้องกันแหล่งจุดติดไฟ พื้นผิวที่มีความร้อน ป้องกันการลุกไหม้ของฝุ่นควันจากการเผา การป้องกันการจุดไฟทางกล การป้องกันการจุดระเบิดและการเกิดประกายไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้า และการคายประจุของไฟฟ้าสถิต และป้องกันและบรรเทาจากการระเบิดฝุ่นในระยะแรก ได้แก่ การกำหนดมาตรการป้องกันเพื่อลดขนาดของหมอกฝุ่นจากกระบวนการผลิต การออกแบบกระบวนการเพื่อลดปริมาณออกซิเจนด้วยการเพิ่มก๊าซเฉื่อย (Partial Inerting by Inert Gas) การแยกพื้นที่การเกิดการระเบิด (Explosion Isolation) การออกแบบช่องระบายการระเบิด (Dust Explosion Venting) การออกแบบป้องกันแรงดันจากการระเบิด (Explosion-Pressure-Resistant Design) ติดตั้งระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นแบบอัตโนมัติ (Automatic Explosion Suppression) รวมทั้งการกำกับดูแลทำความสะอาดพื้นที่ (Good Housekeeping) (Eckhoff & Li, 2021)

การศึกษาเกี่ยวกับความเสี่ยงและการป้องกันผลกระทบจากการระเบิดฝุ่นที่ติดไฟได้ทุกประเภทต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายประการ เพื่อออกแบบกระบวนการผลิต และการออกแบบระบบป้องกันการระเบิด โดยเฉพาะขอบเขตของหมอกฝุ่น อัตราการเผาไหม้ แรงดันการระเบิดสูงสุด อัตราแรงดันระเบิดที่เพิ่มขึ้น พารามิเตอร์เหล่านี้แตกต่างกันตามชนิดของฝุ่น ซึ่งจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจกับชนิดของฝุ่น เพื่อดำเนินการประเมินความเสี่ยง และการออกแบบระบบป้องกันที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ (Jurca et al., 2022)

การศึกษาเกี่ยวกับฝุ่นระเบิดในต่างประเทศ อุบัติเหตุส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในประเทศที่มีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม การเกิดอุบัติเหตุในแต่ละครั้งทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ทำให้สถานประกอบการในหลายประเทศเริ่มให้ความสำคัญในการศึกษาเพื่อประเมิน

ความเสี่ยง และการออกแบบระบบป้องกันการเกิดระเบิดฝุ่น โดยมีการประยุกต์ใช้เครื่องมือหลายชนิดมาทำการประเมินความเสี่ยงเพื่อให้เกิดความแม่นยำ ลดความคลุมเครือ เช่น การใช้เทคนิค FFTA-AHP รวมทั้งการกำหนดมาตรการเพื่อป้องกันการระเบิดฝุ่นให้มีประสิทธิภาพโดยพิจารณาที่องค์ประกอบของการเกิดระเบิด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.8 กรอบแนวคิดการวิจัย

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ เพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีการศึกษาอยู่ 4 ระยะ ได้แก่

ระยะที่ 1 การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีการดำเนินการในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น โดยพิจารณาองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่น (ขนาดของฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น ขอบเขตของหมอกฝุ่น) การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การศึกษากฎหมาย และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยวิธี FFTA-AHP การศึกษาระยะนี้จะทำให้ทราบขนาดของฝุ่นมันเส้น ปัจจัยพื้นฐานที่มีความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ทำให้ได้ FFTA-AHP model และแสดงผลเป็นความน่าจะเป็น (Probability) และระดับความเสี่ยงเป็นตัวเลข ที่มาจากความน่าจะเป็น (Probability) และผลกระทบต่อการระเบิด (Impact)

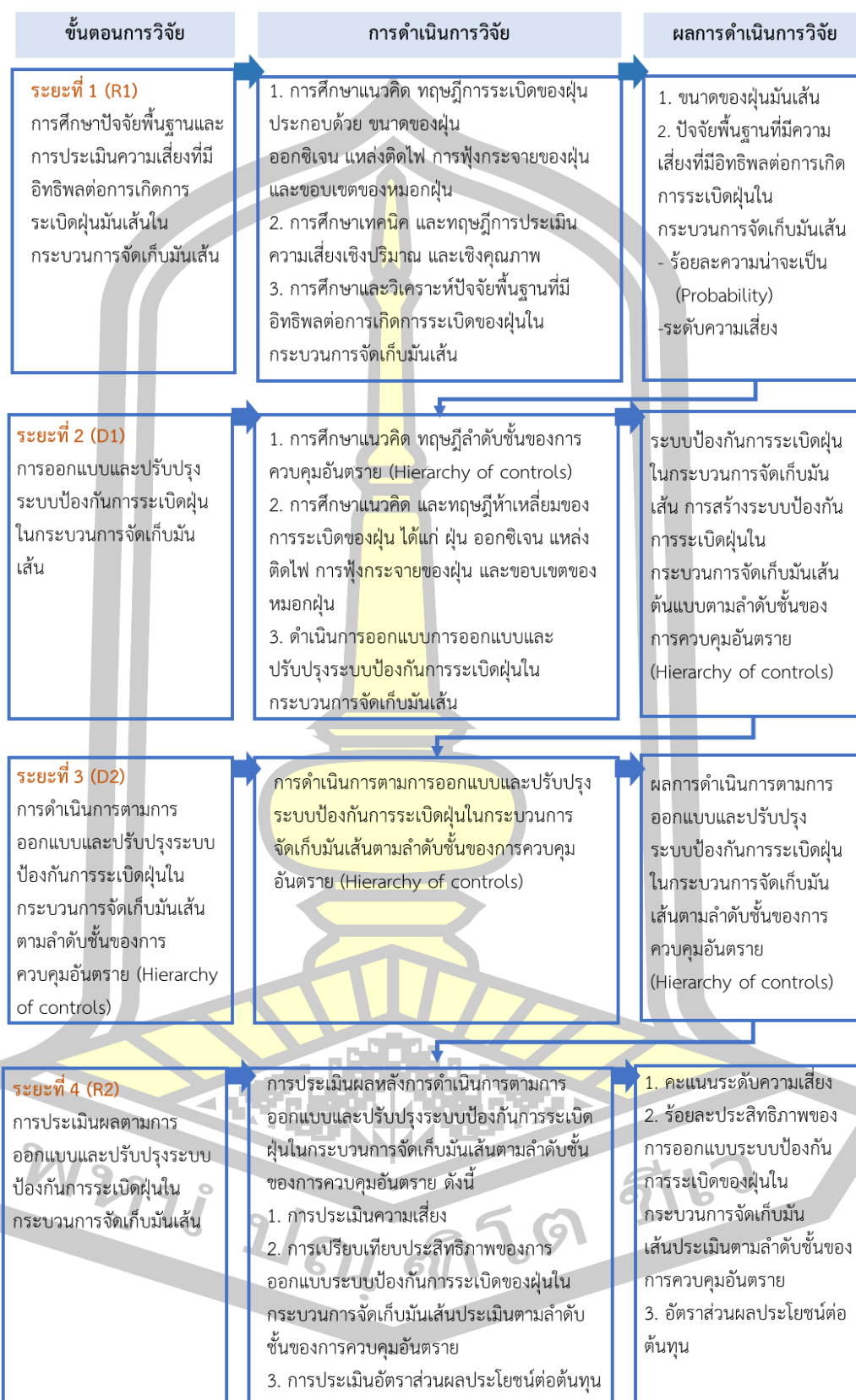
ระยะที่ 2 การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น เป็นการกำหนดส่วนประกอบของระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ที่ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) เพื่อลดความเสี่ยงจากห่าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น การศึกษาระยะนี้จะทำให้ได้ระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

ระยะที่ 3 การดำเนินการตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) โดยสถานประกอบการได้มีการดำเนินการตามระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) และการใช้อุปกรณ์ ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยม ของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) การศึกษาระยะนี้มีการดำเนินการตามระบบ ป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ในระยะเวลา 1 ปี

ระยะที่ 4 การประเมินผลตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นใน กระบวนการจัดเก็บมันเส้น การศึกษาครั้งนี้ได้มีการประเมินค่าคะแนนความน่าจะเป็น (Probability) ของปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดระเบิดของฝุ่น แสดงผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการ ดำเนินการ แสดงผลด้วยคะแนนระดับความเสี่ยง (Risk level) คะแนนผลการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ประเมิน ตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) และผลการประเมินจากอัตราส่วน ผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR) ดังแสดงในภาพที่ 42





ภาพที่ 42 กรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and development) มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ศึกษาปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีวิธีดำเนินการวิจัย 4 ระยะ ได้แก่ 1) การศึกษาปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น 2) การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น 3) การดำเนินการตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ไปใช้จริง และ 4) การประเมินผลตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ในการศึกษา การศึกษาครั้งนี้มีการคัดเลือกโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดอุบลราชธานี และคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงในวิจัยครั้งนี้ จำนวน 16 คน จากกระบวนการสุ่มแบบ multi-stage sampling มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเลือกพื้นที่ด้วยการสุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified sampling) โดยมีการแบ่งพื้นที่ของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในระดับประเทศออกเป็น 3 พื้นที่ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีสัดส่วนจำนวนโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 1:1:3 ดังนั้น การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบง่ายจะได้ ภาคเหนือ จำนวน 1 โรงงาน ภาคกลาง จำนวน 1 โรงงาน และภาคอีสาน จำนวน 3 โรงงาน (การสุ่มในกระบวนการนี้ต้องได้รับความสมัครใจของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง) ผลการสุ่มตัวได้จำนวน 1 โรงงาน คือโรงงานในจังหวัดอุบลราชธานี

ขั้นตอนที่ 2 การสุ่มกลุ่มตัวอย่าง เพื่อมาร่วมเป็นคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น จำนวน 16 คน จากการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) ได้กลุ่มตัวอย่าง 4 กลุ่ม กลุ่มละ 4 คน ได้แก่ กลุ่มผู้บริหาร กลุ่มพนักงานฝ่ายผลิต กลุ่มวิศวกร และกลุ่มเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย

1) เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง (Inclusion Criteria)

(1) ต้องมีประสบการณ์ทำงานอย่างน้อย 1 ปี เกี่ยวกับการบริหารและจัดการงานด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย หรือ ปฏิบัติงานในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น หรือเป็นผู้มีหน้าที่ซ่อมบำรุง รักษา หรือดูแลระบบเครื่องจักรในพื้นที่เสี่ยง โดยผู้บริหารต้องผ่านการอบรมหลักสูตร เจ้าหน้าที่ความปลอดภัยระดับบริหาร วิศวกรต้องผ่านการอบรม หลักสูตร เจ้าหน้าที่ความปลอดภัยระดับหัวหน้างาน พนักงานต้องผ่านการอบรม หลักสูตร การวิเคราะห์งาน เพื่อความปลอดภัย และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยระดับวิชาชีพต้องขึ้นทะเบียน จป.วิชาชีพ

(2) สามารถสื่อสารและเข้าใจภาษาไทยได้

(3) ยินดีเข้าร่วมวิจัยด้วยความสมัครใจ

2) เกณฑ์การคัดออกกลุ่มตัวอย่าง (Exclusion criteria)

(1) เป็นผู้ที่ไม่สามารถเข้าร่วมงานโครงการได้ตลอดการศึกษาวิจัย

3.2 สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ในการประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยวิธี FFTA-AHP โดยใช้สถิติความถี่ (Frequency) สัดส่วน (Proportion) ร้อยละ (Percentage) เพื่อแสดงผลด้วยคะแนนระดับความเสี่ยง (Risk level) คะแนนผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นประเมินตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) และผลการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR)

3.3 การดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and development) มีวิธีดำเนินการ 4 ระยะ ได้แก่ 1) การศึกษาปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น 2) การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น 3) การดำเนินการตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) และ 4) การประเมินผลตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ระยะที่ 1 การศึกษาปัจจัยพื้นฐานและการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ประกอบด้วย การศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN และการศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยเทคนิค FFTA-AHP โดยมีการใช้แบบประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) แบบประเมินการวิเคราะห์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ Analytic Hierarchy Process (AHP) และ แบบประเมินกระบวนการลดความคลุมเครือด้วยเทคนิค Fuzzy ดำเนินการช่วงวันที่ 1 เดือนมิถุนายน 2565 ถึงวันที่ 31 เดือนธันวาคม 2565 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดฝุ่นมันเส้น คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถึง 1,000,000 เท่า สามารถใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดเล็กได้ถึงระดับนาโนเมตรทำให้สามารถศึกษาวัตถุที่มีขนาดเล็กมากเช่น ไวรัส หรืออนุภาคของสารประกอบ รวมถึงสามารถตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ขนาดเล็กๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยมีวิธีการใช้งานดังต่อไปนี้

- การเตรียมความพร้อมสำหรับการวิเคราะห์ฝุ่นมันเส้น เป็นการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ จานใส่ตัวอย่าง และอุปกรณ์วางจานใส่ตัวอย่าง แผ่นคาร์บอนสำหรับติดตัวอย่างเข้ากับจานใส่ตัวอย่าง ถังมือสำหรับใส่เพื่อเตรียมตัวอย่าง คีมคีบตัวอย่าง ที่ใส่ตัวอย่าง หรือ สตับ (Sample holder) น้ำยาล้างจานใส่ตัวอย่าง เครื่องเคลือบตัวอย่าง และเครื่อง Phenom Pharos Desktop SEM

- การวิเคราะห์และการนำตัวอย่างเข้าเครื่องวิเคราะห์ การใส่ตัวอย่าง (Loading samples) การนำตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ติดเข้ากับจานใส่ตัวอย่าง นำตัวอย่างเข้าเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 50 วินาที นำตัวอย่างใส่ในสตับ เพื่อนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ ตรวจสอบให้แน่ชัดว่าตัวอย่างถูกวางบนแท่นวางตัวอย่างสตับ อย่างถูกต้องและไม่สามารถขยับได้

- การใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดตั้งโต๊ะ มีขั้นตอนดังนี้

(1) เข้าสู่โปรแกรม MIRA3 เลือกผู้ใช้งาน และใส่รหัสเข้าระบบ

(2) กด “VENT” เพื่อเปิดห้องควบคุม สังเกตที่แถบแสดงผลเมื่อขึ้น “Venting Finished” แล้วให้เปิดห้องตัวอย่างออกและนำตัวอย่างใส่ในห้องตัวอย่าง

(3) เมื่อใส่ตัวอย่างเสร็จแล้วกด “PUMP” เพื่อให้ห้องตัวอย่างอยู่ในสภาวะสุญญากาศ รอจนกว่าที่หน้าจอแสดงผลจะเป็นแถบสีเขียวและแสดงข้อความ “Vacuum ready”

(4) ไปที่แถบเมนู เลือก “SEM” และ ไปที่ Stage config. เพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมบนหน้าจอแสดงผล เลือก “Standard Tescan Carousel” สำหรับโหมด FE-SEM กด “USE” และกด OK

(5) ปรับตั้งค่าตัวแปร HV, Beam Intensity (BI) ตามที่ต้องการที่แถบควบคุมด้านขวามือของจอแสดงผล

(6) กด “BEAM ON” ที่แถบแสดงผลด้านขวามือ

(7) เลือกประเภทของตัวรับสัญญาณ ที่แถบแสดงผลด้านขวามือในโหมด SEM Detectors & Mixer เบื้องต้นเลือกตัวรับสัญญาณเป็น SE Detector

(8) กดโหมด Auto Brightness/ Contrast เพื่อปรับความสว่างของรูปภาพ

(9) ปรับความคมชัดของภาพ เบื้องต้นใช้การถ่ายภาพในโหมด “Resolution”

(10) เมื่อปรับภาพชัด เพื่อทำการเลื่อน Stage ขึ้น

(11) เมื่อปรับ Stage แล้วทำการปรับความชัดของภาพอีกครั้ง และเลือกกำลังขยายที่ต้องการ ถ่ายภาพ

(12) ปรับความเร็วในการสแกนเพื่อถ่ายภาพโดยกดเลือกไอคอน (ระดับความเร็ว 1-10) หากต้องการภาพที่ความละเอียดสูงให้เลือกความเร็วในการถ่ายภาพที่สูงขึ้น เพื่อให้การสแกนภาพช้าลงและได้ภาพที่คมชัดขึ้น

(13) เมื่อได้ภาพที่ต้องการบันทึก กดเลือกไอคอน หรือกด “Acquire” ที่แถบแสดงผลด้าน ขวามือ

(14) หากต้องการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างให้คลิกที่ Standard Tescan Carousel ที่หน้าจอ แสดงผลตามตำแหน่งตัวอย่างที่ต้องการซึ่งระบุเป็นตัวเลข และสัมพันธ์กับ Holder ของชิ้นงานที่อยู่ภายใน ห้องตัวอย่าง

(15) เมื่อถ่ายภาพเสร็จแล้วต้องการนำตัวอย่างออก ให้กด “Home” เพื่อให้ Stage กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น

(16) กด “VENT” เพื่อเปิดห้องควบคุม สังเกตที่แถบแสดงผลเมื่อขึ้น “Venting Finished” แล้วให้เปิดห้องตัวอย่างออกและนำตัวอย่างออกจากห้องตัวอย่าง

(17) เมื่อเอาตัวอย่างออกเรียบร้อยแล้ว “ PUMP” เพื่อให้ห้องตัวอย่างอยู่ในสภาวะสุญญากาศ รอจนกว่าที่หน้าจอแสดงผลจะเป็นแถบสีเขียวและแสดงข้อความ “Vacuum ready”

3.3.1.2 ศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาระยะนี้ศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยเทคนิค FFTA-AHP โดยมีการใช้แบบประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) แบบประเมินการวิเคราะห์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ Analytic Hierarchy Process (AHP) และ แบบประเมินกระบวนการลดความคลุมเครือด้วยเทคนิค Fuzzy มีรายละเอียดดังนี้

การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) จะใช้แบบประเมินความเสี่ยง FTA มีการออกแบบประเมินด้วยการกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้นเป็นเหตุการณ์แรก (Top event) คือ การระเบิดของฝุ่นมันเส้น จากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The Dust Explosion Pentagon) ซึ่งเป็นสาเหตุย่อย (Fault tree event) ของการเกิดระเบิดของฝุ่น ประกอบด้วยหัวข้อในการวิเคราะห์ ร่วมกับคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Abuswer et al., 2013; Spasenic et al., 2022)

- 1) การกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้น เป็นเหตุการณ์แรก (Top event) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีผลกระทบร้ายแรงตามมา
- 2) พิจารณาโอกาสของปัญหา ซึ่งสาเหตุการเกิดการระเบิดฝุ่นอาจเกิดจากหลายสาเหตุร่วมกันกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ “And gate” หรือสาเหตุของ เหตุการณ์ย่อยเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งเท่านั้น กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ “OR gate”
- 3) วิเคราะห์หาสาเหตุย่อย (Fault tree event or Intermediate event) ที่ทำให้เกิดการระเบิดฝุ่น โดยพิจารณาห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The Dust Explosion Pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น
- 4) วิเคราะห์หาสาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ จากห้าเหลี่ยมของการระเบิดในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นประกอบด้วย เครื่องจักร อุปกรณ์ ระบบความปลอดภัย ความผิดพลาดจากพนักงาน และการบริหารจัดการ เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นปกติ (Basic event) วิเคราะห์จนพบเหตุการณ์สิ้นสุดของการเกิดการระเบิด

5) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปภาพแผนภูมิต้นไม้

การวิเคราะห์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ Analytic Hierarchy Process (AHP) ใช้แบบประเมิน AHP การศึกษาในขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ลำดับความน่าจะเป็น (Probability) ของ

ปัจจัยพื้นฐาน และระดับความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น จากเหตุการณ์แรก (Top event) คือ การระเบิดของฝุ่นมันเส้น จากท่าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น และสาเหตุน้อยจากกระบวนการ FTA ซึ่งสามารถเรียกการวิเคราะห์ในกระบวนการนี้ว่า FTA-AHP มีแนวทางการศึกษาประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1) การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) ของเหตุการณ์โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ละคู่ โดยใช้ตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ของ AHP ดังตารางที่ 3.1

2) การเปรียบเทียบในแต่ละเหตุการณ์ (Pairwise Comparison) ตัวอย่างในตารางที่ 3.2

3) การหาดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index : CI) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

n = จำนวนหลักเกณฑ์

4) การหาอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$CR = \frac{CI}{RI}, CR < 0.1 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

การแปลผลค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) โดยผลการคำนวณหาอัตราส่วนความสอดคล้องที่ได้หาก CR มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่าภายในชุดของดุลยพินิจนั้นจะมีความสอดคล้องอย่างสมบูรณ์ แต่หาก CR มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าความไม่สอดคล้องจะเทียบเท่ากับดุลยพินิจที่ได้จากการสุ่ม ถ้า CR มีค่ามาก (โดยทั่วไปค่าวิกฤตจะอยู่ที่ 0.1) แสดงว่าดุลยพินิจนั้นไม่น่าเชื่อถือ โดยช่วงที่จะยอมรับได้ของค่า CR ขึ้นอยู่กับขนาดของเมตริก (Saaty, 1990)

กระบวนการลดความคลุมเครือด้วยเทคนิค Fuzzy การศึกษาในขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ลำดับความน่าจะเป็น (Probability) ของปัจจัยพื้นฐาน และระดับความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นจากการหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) ของเหตุการณ์โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ละคู่ โดยใช้ตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ของ FTA-AHP มีแนวทางการศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

1) การวิเคราะห์ข้อมูลของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี การประยุกต์ใช้ขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ของวิธีการ AHP และ Fuzzy เข้าด้วยกันโดยการคงรูปแบบการเปรียบเทียบระดับความสำคัญเชิงคู่ของปัจจัยแต่ในการแปลงภาษาระดับความสำคัญในการเปรียบเทียบซึ่งเป็นภาษาพูดให้เป็นตัวเลขจะใช้ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy numbers : TFNs) มาแทนการใช้ตัวเลขเดี่ยว 1-9 โดยที่รูปแบบตัวเลขฟัซซีจะเป็น (l, m, u) มี m เป็น

ค่ากลางของ $\mu_M(x)$ และ l, u เป็นค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามลำดับของเลขสมาชิกแทนได้ด้วยสมการที่ 3.3

$$\mu(x/M) = \begin{cases} 0, & x < l \\ (x-l)/(m-l), & l \leq x < m \\ (u-x)/(u-m), & m \leq x < u \\ 0, & x \geq u \end{cases} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

กำหนดให้ l และ u เป็นค่าขอบเขตล่างและบนของสมาชิกตามลำดับ และ m เป็นค่ากลาง โดย Triangular Fuzzy Number ถูกแสดงในรูป (l, m, u) ที่มีกฎการบวกและการคูณกันดังแสดงในสมการที่ 3.4-3.7

การบวกกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) + (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

การลบกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) - (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

การคูณกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1) \times (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

การหารกันของ Triangular Fuzzy Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

ตารางที่ 33 ความหมายตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ใน Fuzzy

ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy scale)	ระดับการให้ความสำคัญ (Linguistic scale)
(1,1,3)	มีความสำคัญเท่ากัน
(1,3,5)	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย
(3,5,7)	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง
(5,7,9)	มีความสำคัญมากกว่ามาก
(7,9,9)	มีความสำคัญมากกว่ามากที่สุด

2) กำหนดขอบเขตการพิจารณา

กำหนดให้ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ เป็นเซตวัตถุ (Objective set)

หรือทางเลือกให้ $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ เป็นเซตหลักเกณฑ์ หรือ เป้าหมาย (Gold set) และในการวิเคราะห์แต่ละทางเลือกจะถูกนำมาวิเคราะห์สำหรับแต่ละหลักเกณฑ์ ดังนั้น การวิเคราะห์ขอบเขต (ความคลุมเครือ) สำหรับแต่ละวัตถุสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m \text{ สำหรับ } i=1, 2, \dots, n$$

เมื่อ $M_{g_j}^j (j=1, 2, \dots, m)$ เป็นตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม

จากพื้นฐานวิธีการหาลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ฟัซซีเมตริกการเปรียบเทียบ ความสำคัญแบบคู่ ตามเกณฑ์ฟัซซี สามารถสร้างได้ดังสมการ 3.8

$$(M_{gi}^j)_{nm \times m} = \begin{bmatrix} M_{g1}^1 & M_{g1}^2 & \dots & M_{g1}^m \\ M_{g2}^1 & M_{g2}^2 & \dots & M_{g2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{gn}^1 & M_{gn}^2 & \dots & M_{gn}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1,1,1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1m}, m_{1m}, u_{1m}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1,1,1) & \dots & (l_{2m}, m_{2m}, u_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

สมการที่ 3.8

โดยที่ $(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = (1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij})$ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $j = 1, 2, \dots, n$ และ $i \neq j$
และ $(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = (1, 1, 1)$ สำหรับ $i = j$

3) การวิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี ดังสมการ 3.9-3.11 สำหรับวัตถุที่ i โดยกำหนดให้

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \times [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1}$$

S_i คือ คำนวณน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจ

$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ คือ ผลบวกของ Triangular Fuzzy Number

$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j]^{-1}$ คือ ค่าต่างตอบแทนผลรวมของ l, m, u ทุกเกณฑ์การตัดสินใจ

$$\text{โดย } \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = [\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j] \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = [\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i] \quad \text{สมการที่ 3.10}$$

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij}^j]^{-1} = (1/\sum_{i=1}^n l_i, 1/\sum_{i=1}^n m_i, 1/\sum_{i=1}^n u_i)$$

สมการที่ 3.11

4) คำนวณระดับความเป็นไปได้ ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i=(l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j=(l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ 3.12

$$v(si \geq sj) = \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}$$

ถ้า $m_i > m_j$ ถ้า $l_j > u_i$

อื่นๆ

สมการที่ 3.12

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ ตามสมการที่ 3.13

$$V(S_i \geq S_j) | j=1,2,...,m ; i \neq j) = \min V(S_i \geq S_j) | j=1,2,...,m ; i \neq j)$$

สมการที่ 3.13

5) สร้างเวกเตอร์ความสำคัญ W ของเมตริก เปรียบเทียบความสำคัญแบบฟuzzy

เมื่อประมาณการให้ $W' = |\min V(S_i \geq S_j) | j=1,2,...,m ; i \neq j)$

สมการที่ 3.14

และเมื่อทำการ Normalization เวกเตอร์ความสำคัญ W'

ด้วยสมการ 3.15

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

สมการที่ 3.15

จะได้เวกเตอร์ความสำคัญใหม่เป็น ด้วยสมการ 3.16

$$W = (w_1, w_2, ..., w_n)^T$$

สมการที่ 3.16

3.3.1.5 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือ

1) เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดฝุ่นมันเส้น คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3; TESCAN ก่อนการใช้งานควรตรวจสอบสถานะแรงดันแก๊สไนโตรเจน (N2) ทุกครั้งก่อนการใช้งานต้องอยู่ระหว่าง 6-8 บาร์ ตรวจสอบชั่วโมงการใช้งาน filament ตามอายุการใช้งาน (ปกติอายุการใช้งาน 2 ปี) ทำการบำรุงรักษาโดยช่างผู้เชี่ยวชาญทุกๆ ครึ่งปี และ 1 ปี

2) การตรวจแบบคำถามการสนทนากลุ่ม (Focus group discussion) ของการประเมินความเสี่ยงด้วย FTA ด้วยการตรวจสอบความตรงด้านเนื้อหา (Content Validity) นำแนวคำถามการสนทนาเพื่อตรวจ สอบความถูกต้อง ความตรงตามเนื้อหา และความเหมาะสมด้านภาษา จากนั้นเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญทางกระบวนการจัดเก็บ

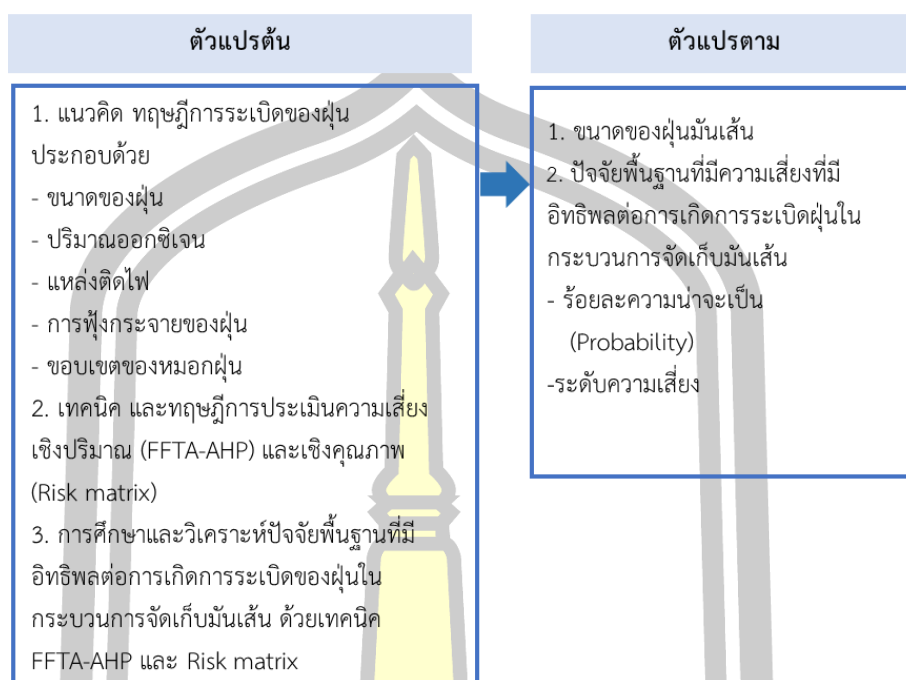
มันเส้นผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางการประเมินความเสี่ยง และผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางวิชาการออกแบบระบบ ป้องกันการระเบิดฝุ่น ค่าดัชนีความสอดคล้องรายข้ออยู่ช่วงที่ยอมรับได้ คือ 0.87-1

3) การตรวจแบบสัมภาษณ์การประเมินความเสี่ยงด้วย AHP ด้วยการตรวจสอบ ความตรงด้านเนื้อหา (Content validity) นำแนวคำถามการสนทนาเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ความตรงตามเนื้อหา และความเหมาะสมด้านภาษาคำถาม มีทั้งหมด 5 คำถาม จำนวน 15 ข้อ ประกอบด้วย คำถามที่ 1 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ มี 2 ข้อ คำถามที่ 2 ความผิดพลาดของ พนักงาน มี 3 ข้อ คำถามที่ 3 ความร้อนจากกะพ้อลำเลียง มี 4 ข้อ คำถามที่ 4 ความร้อนจาก มอเตอร์ มี 2 ข้อ และคำถามที่ ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ มี 4 ข้อ จากนั้น เสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วยผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางการประเมินความเสี่ยง และผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางการออกแบบระบบป้องกันการ ระเบิดฝุ่น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเหมาะสม ค่าดัชนีความสอดคล้องรายข้ออยู่ช่วงที่ยอมรับได้ คือ 0.84 ถึง 1

4) การตรวจแบบสัมภาษณ์การประเมินความเสี่ยงด้วย Fuzzy ด้วยการตรวจสอบ ความตรงด้านเนื้อหา (Content validity) นำแนวคำถามการสนทนาเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ความตรงตามเนื้อหา และความเหมาะสมด้านภาษา คำถาม มีทั้งหมด 5 คำถาม จำนวน 15 ข้อ ประกอบด้วย คำถามที่ 1 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ มี 2 ข้อ คำถามที่ 2 ความผิดพลาดของ พนักงาน มี 3 ข้อ คำถามที่ 3 ความร้อนจากกะพ้อลำเลียง มี 4 ข้อ คำถามที่ 4 ความร้อนจาก มอเตอร์ มี 2 ข้อ และคำถามที่ ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ มี 4 ข้อ จากนั้น เสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วยผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางการประเมินความเสี่ยง และผู้ที่มีเชี่ยวชาญทางการออกแบบระบบป้องกันการ ระเบิดฝุ่น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเหมาะสม ค่าดัชนีความสอดคล้องรายข้ออยู่ช่วงที่ยอมรับได้ คือ 0.84 ถึง 1



3.3.1.6 กรอบแนวคิดระยะที่ 1



ภาพที่ 43 กรอบแนวคิดระยะที่ 1

3.3.2 ระยะที่ 2 การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และการสร้างระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ที่ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (Dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น การศึกษาระยะนี้จะทำให้ได้ระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การสร้างระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นต้นแบบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ดำเนินการช่วงวันที่ 1 เดือนมกราคม 2566 ถึงวันที่ 31 เดือนมีนาคม 2566

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ แบบการประเมินตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ที่ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative

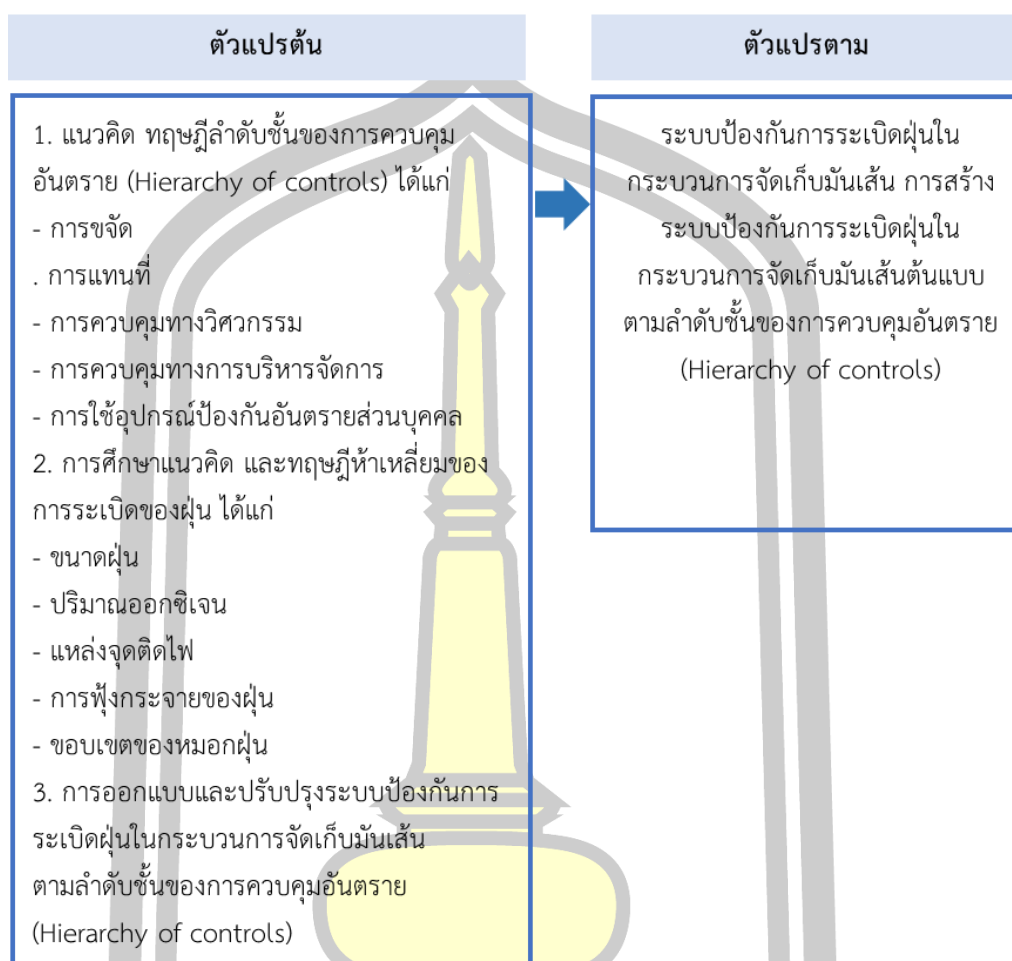
Controls) และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น โดยพิจารณาห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น โดยดำเนินการตามรายละเอียดในข้อ 3.3.1.3 แบบประเมินการวิเคราะห์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP)

การศึกษาระยะนี้จะทำให้ได้ระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การสร้างระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นต้นแบบตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

การเก็บรวบรวมข้อมูล ด้วยการดำเนินการสนทนากลุ่มเพื่อกออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น คณะผู้วิจัยศึกษาและคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น จำนวน 16 คน ได้ดำเนินการสนทนากลุ่ม เพื่อกออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น โดยพิจารณาห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (Dust explosion pentagon) ได้แก่ ขนาดของฝุ่นมันเส้น ปริมาณออกซิเจนในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นในระบบปิด แหล่งจุดติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่นมันเส้น ขอบเขตของหมอกฝุ่นมันเส้น และใช้หลักการใช้หลักการประเมินตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controlling) เพื่อกออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นไปทดลองใช้ในระยะที่ 3



3.2.6 กรอบแนวคิดระยะที่ 2

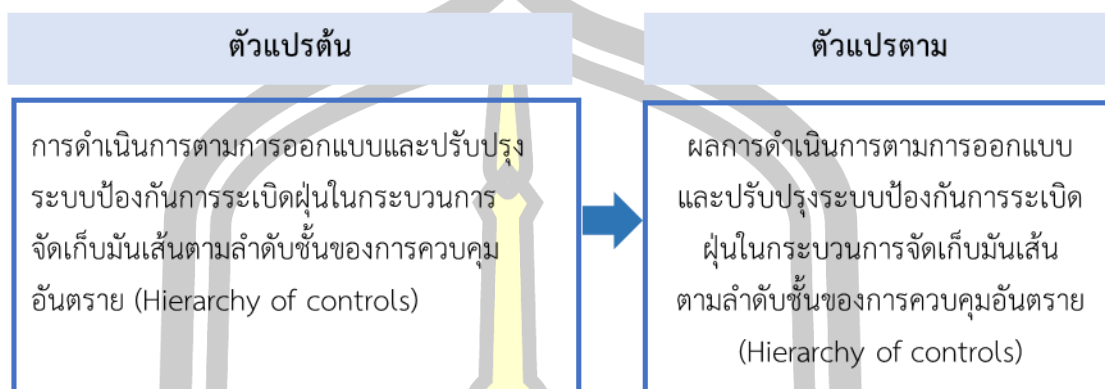


ภาพที่ 44 กรอบแนวคิดระยะที่ 2

3.3.3 ระยะที่ 3 การดำเนินการตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

การดำเนินการตามระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) การควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) และการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) เพื่อลดความเสี่ยงจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (Dust explosion

pentagon) การศึกษาระยะนี้มีการดำเนินการช่วงวันที่ 1 เดือนเมษายน 2566 ถึงวันที่ 31 เดือนธันวาคม 2566 ดังแสดงในกรอบแนวคิดที่ 3



ภาพที่ 45 กรอบแนวคิดระยะที่ 3

3.3.4 ระยะที่ 4 การประเมินผลตามการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การประเมินผลการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การศึกษาครั้งนี้ได้มีการประเมินค่าคะแนนความน่าจะเป็น (Probability) ของปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดระเบิดของฝุ่น แสดงผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการดำเนินการ แสดงผลด้วยคะแนนระดับความเสี่ยง (Risk level) คะแนนผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นประเมินตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) และผลการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR) มีรายละเอียดดังนี้

3.3.4.1 การประเมิน ค่าคะแนนความน่าจะเป็น (Probability) ของปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดระเบิดของฝุ่นมันเส้นในอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการจัดเก็บมันเส้น (Kannan & Naveen, 2024; Popov et al., 2016)

3.3.4.2 การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) ของการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น โดย การความเสี่ยงของการเกิดการระเบิดเชิงปริมาณ (ANSIZ 10) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

- 1) การชี้บ่งสิ่งคุกคาม (Identify Threats)
- 2) การระบุระดับของโอกาสในการเกิดของเหตุการณ์ (Likelihood) มี 5 ระดับ

ได้แก่

- | | |
|------------------|---|
| ระดับ 5 (สูงมาก) | หมายถึง เหตุการณ์ที่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นมากที่สุด |
| ระดับ 4 (สูง) | หมายถึง เหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ เกิดขึ้นเป็นปกติ |

ระดับ 3 (ปานกลาง) หมายถึง เหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

ระดับ 2 (น้อย) หมายถึง ไม่เคยเกิดขึ้นในรอบหลายปี

ระดับ 1 (น้อยมาก) หมายถึง เหตุการณ์ที่ไม่เคยเกิดขึ้น

3) การระบุระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ (Severity) มี 5 ระดับ ได้แก่

ระดับ 5 (ความรุนแรงระดับภัยพิบัติ) หมายถึง ทำให้เกิดการสูญเสีย เสียชีวิต บาดเจ็บ เจ็บป่วยรุนแรง ต่อผู้ปฏิบัติงาน ชุมชน และสิ่งแวดล้อม

ระดับ 4 (ความรุนแรงสูง) หมายถึง ทำให้เกิดการบาดเจ็บทางร่างกายร้ายแรง ทุพพลภาพ

ระดับ 3 (ความรุนแรงปานกลาง) หมายถึง ทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือการ เจ็บป่วยที่ต้องรับการรักษาพยาบาล

ระดับ 2 (ความรุนแรงน้อย) หมายถึง ทำให้เกิดการบาดเจ็บที่ต้องปฐมพยาบาล เบื้องต้นเท่านั้น

ระดับ 1 (ความรุนแรงน้อยมาก) หมายถึง บาดเจ็บเล็กน้อย ไม่ต้องต้องปฐม พยาบาลเบื้องต้น การหาความน่าจะเป็นของการเกิด

4) การจัดระดับของคะแนนโอกาสการเกิด และระดับของโอกาสในการเกิดและ ระดับผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ระดับของคะแนนโอกาสการเกิด และระดับของโอกาสในการเกิดและระดับผลกระทบ

คะแนน	ระดับโอกาสการเกิด	ระดับผลกระทบ	คะแนนโอกาสการเกิด
5	สูงมาก	ความรุนแรงระดับภัยพิบัติ	> 0.80
4	สูง	ความรุนแรงสูง	0.51-0.80
3	ปานกลาง	ความรุนแรงปานกลาง	0.31-0.50
2	น้อย	ความรุนแรงน้อย	0.11-0.30
1	น้อยมาก	ความรุนแรงน้อยมาก	<0.10

5) การประเมินความเสี่ยงด้วย Risk Matrix สามารถดำเนินการได้จากการนำโอกาส ในการเกิดของเหตุการณ์ (Likelihood) คูณ การระบุระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ (Severity)

6) การจัดลำดับความเสี่ยง (Prioritize Risk) มี 4 ระดับ ได้แก่

ระดับความเสี่ยงต่ำ	ระดับคะแนน	1-5	คะแนน
ระดับความเสี่ยงปานกลาง	ระดับคะแนน	6-9	คะแนน
ระดับความเสี่ยงสูง	ระดับคะแนน	10-16	คะแนน
ระดับความเสี่ยงสูงมาก	ระดับคะแนน	17-25	คะแนน

3.3.4.3 การประเมินจากความสามารถในการควบคุมปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่น โดยการประยุกต์การการให้คะแนนตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) มีเกณฑ์การให้คะแนน 5 ระดับ คะแนน ดังนี้

ระดับ 1 การขจัด (Elimination)	คะแนน 8 คะแนน
ระดับ 2 การแทนทดแทน (Substitution)	คะแนน 7 คะแนน
ระดับ 3 การควบคุมทางวิศวกรรมหลายรูปแบบ (Engineering Multiple)	คะแนน 6 คะแนน
ระดับ 4 การควบคุมทางวิศวกรรมรูปแบบเดียว (Engineering Single)	คะแนน 4 คะแนน
ระดับ 5 การเตือน (Warning)	คะแนน 1 คะแนน

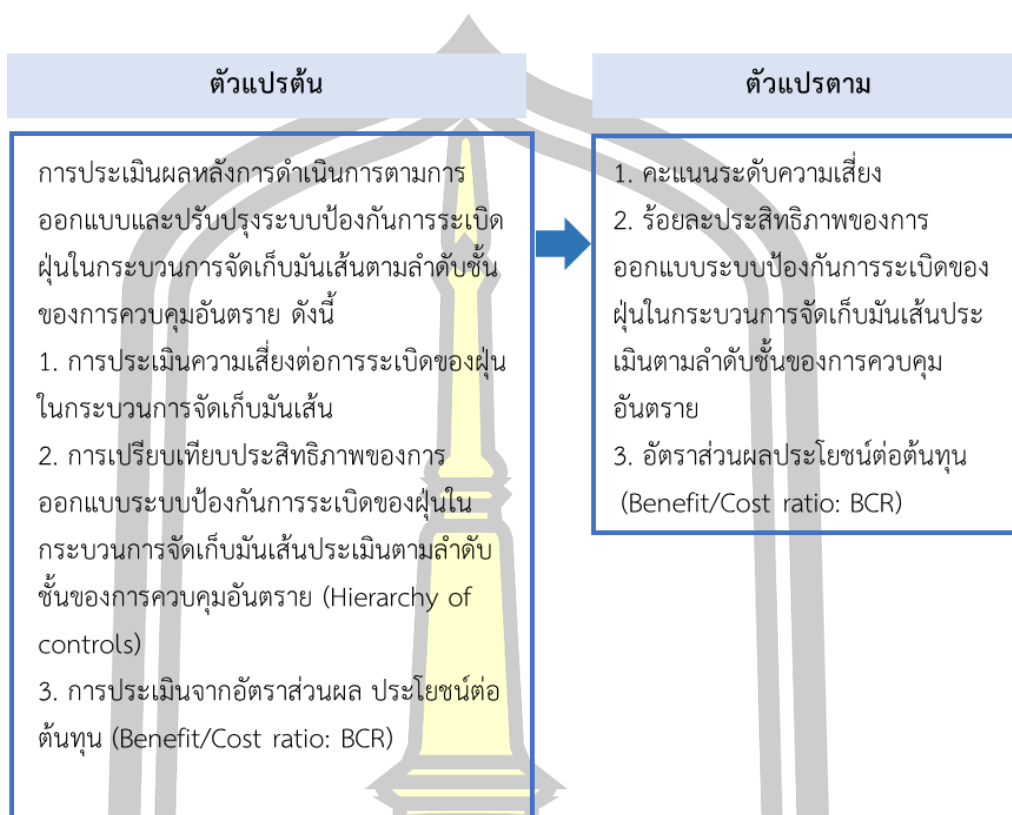
3.3.4.4 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR)

เป็นการหาอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนว่าเป็นกี่เท่าของมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน ในการตัดสินใจ การแปรผล ในกรณีค่า BCR > 1 แสดงว่าผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนมีความคุ้มค่าในการลงทุน สามารถหาค่า BCR ได้จากดังสมการดังต่อไปนี้ (Biatas, 2016; Farrow, 2004)

$$\frac{B}{C} \text{ Ratio} = \sum_{n=0}^t \left(\frac{\frac{R_t}{(1+r)^t}}{\frac{C_t}{(1+r)^t}} \right)$$

กำหนดให้	R_t หมายถึง	รายได้ที่คาดไว้ในปีที่ t
	C_t หมายถึง	รายจ่ายที่คาดไว้ในปีที่ t
	r หมายถึง	อัตราคิดลดคิดเป็นร้อยละ t ปีที่ 0 ถึง n

3.3.5 กรอบแนวคิดระยะที่ 4



ภาพที่ 46 กรอบแนวคิดระยะที่ 4

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะเริ่มดำเนินการเก็บข้อมูลหลังจากการอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์และผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามเลขที่ 121-031/2023 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงคุณธรรมและจริยธรรมในการวิจัยอย่างเคร่งครัด การเก็บรวบรวมข้อมูลใดไม่ว่าจะเป็นเอกสารและหลักฐานในการศึกษาวิจัยรูปแบบใดจะต้องได้รับอนุญาตและเต็มใจจากผู้ร่วมวิจัยทุกครั้ง ตลอดจนมีการพิทักษ์สิทธิของผู้ร่วมวิจัยทุกท่านอย่างเคร่งครัดและเท่าเทียมกัน เพื่อให้ให้งานวิจัยเป็นงานที่มีความหนักแน่นและน่าเชื่อถือ ด้วยความมีคุณธรรมและจริยธรรม

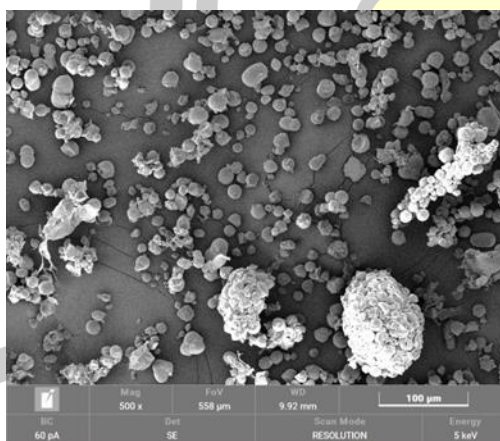
บทที่ 4

ผลการศึกษา

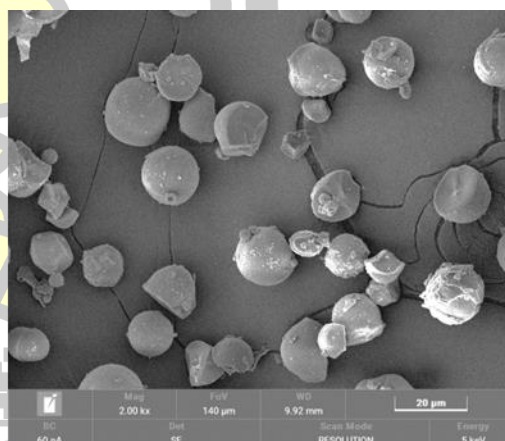
การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and development) มีวัตถุประสงค์ศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น และศึกษาประสิทธิภาพการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีรายละเอียดในการศึกษาดังนี้

4.1 การศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดฝุ่นมันเส้น คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 12.66 μm -25.79 μm ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฝุ่นมันเส้น เฉลี่ยเท่ากับ 16.71 μm แสดงผลการศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นดังภาพที่ 47



(ก) ลักษณะทั่วไปของฝุ่นมันเส้น



(ข) ลักษณะของฝุ่นมันเส้นที่มีการใช้กำลังขยายสูง

ภาพที่ 47 แสดงลักษณะของฝุ่นมันเส้น จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น FE-SEM รุ่น MIRA3: TESCAN

4.2 ศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นพิจารณาจากปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเกิดการระเบิดฝุ่น จาก 5 องค์ประกอบของการเกิดการระเบิดฝุ่น (Five elements of dust explosion) ได้แก่ 1) ปริมาณออกซิเจน (O_2) (ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นมีปริมาณ O_2 เพียงพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้ คิดเป็นร้อยละ 100) 2) ขนาดของฝุ่นมันเส้นที่เท่ากับ $16.71 \mu m$ สามารถเกิดการระเบิดได้ (NFPA ระบุว่าฝุ่นที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $420 \mu m$) 3) ขอบเขตของหมอกฝุ่น หรือ พื้นที่จำกัด (Confined space) ในจากกระบวนการจัดเก็บมันเส้นเป็นกระบวนการที่เกิดในกะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) อุปกรณ์ชุดมอเตอร์ (Motor) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) ซึ่งเป็นพื้นที่ปิดและเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นตลอดระยะเวลา สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ คิดเป็นร้อยละ 100 4) แหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) และ 5) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ดังนั้น การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นในครั้งนี้จึงให้ความสำคัญกับปัจจัยที่เป็นแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน และ 5) และการฟุ้งกระจาย ทั้งนี้เนื่องจากหากเกิดแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน และการฟุ้งกระจาย เกิดขึ้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นก็จะสามารถทำให้เกิดการระเบิดฝุ่นขึ้น ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

ผลการศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยการประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่น ด้วยวิธี FFTA-AHP พบว่าโอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น (Probability) ร้อยละ 98.50 ประกอบด้วยโอกาสการเกิดความล้มเหลวของเหตุการณ์การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ร้อยละ 99.80 เกิดความร้อน ร้อยละ 98.00 ชนิดของฝุ่น ออกซิเจน และขอบเขตของหมอกฝุ่น ร้อยละ 100 และการประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk Assessment and Ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยการกำหนดสัดส่วนที่อ้างอิงจากแผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk Matrix : ANSIZ 10) มีทั้งหมด 5 ระดับนำมาเทียบแผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment Matrix) เพื่อพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์ และโอกาสการเกิดเหตุการณ์จากกระบวนการจัดเก็บมันเส้นจากการศึกษาพบว่าค่าคะแนนส่วนใหญ่จัดอยู่ในความเสี่ยงระดับที่ 4 (คะแนน 15-25 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงสูงมาก จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

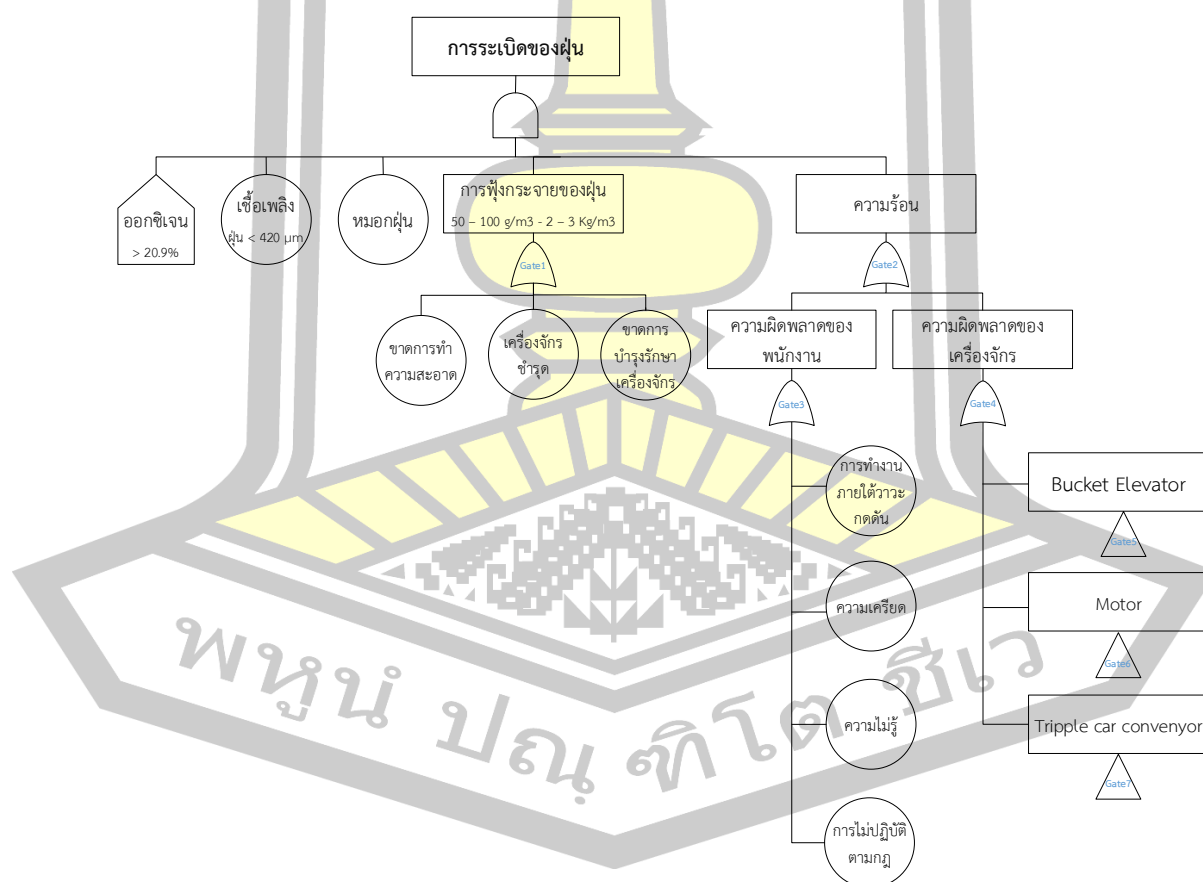
4.2.1 การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) ได้มีการกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้น เป็นเหตุการณ์แรก (Top event) โดยพิจารณาโอกาสของปัญหาจากคณะกรรมการพบสาเหตุการระเบิดฝุ่นจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งจุดติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น

ซึ่งได้มีการพิจารณาความเป็นไปได้ที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์พื้นฐาน (Gate) โอกาสในการเกิดเหตุการณ์พื้นฐานแต่ละเหตุการณ์ จะแตกต่างกันไปตามปัจจัยต่างๆ สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นถูกกำหนดระดับการประเมินสำหรับแต่ละเหตุการณ์พื้นฐาน (Event) ที่ได้รับการให้ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการจัดเก็บมันเส้นเครื่องจักร ตลอดจนความรู้เกี่ยวกับอันตรายและการป้องกันอันตรายจากการเกิดฝุ่นระเบิด ที่มีประสบการณ์ในการทำงาน โดยการประเมินความเสี่ยงและให้คะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสี่ยงขึ้นอยู่กับประตูดตรรกะใดสามารถคำนวณได้ โดยประตู AND gate เป็นประตูทางตรรกะที่สร้างความเสี่ยงเมื่อมีปัจจัยเสี่ยงเกิดขึ้นพร้อมกัน และ OR gate เป็นประตูทางตรรกะเพื่อสร้างความเสี่ยงหากมีปัจจัยเสี่ยงใด ๆ ปัจจัยหนึ่งเกิดขึ้นและสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\text{AND gate} = F1 * F2 *** Fn$$

$$\text{OR gate} = 1 - (1-F1) * (1-F2) *** (1-Fn)$$

AND gate และ OR gate มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสี่ยงต่อตรรกะและตรรกศาสตร์ ตามลำดับ F1, F2 และ Fn เป็นความน่าจะเป็นของปัจจัยเสี่ยง ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA)

จากภาพที่ 4.2 แสดงการเกิดระเบิดฝุ่น (Five elements of dust explosion) ได้แก่ 1) ปริมาณ O_2 ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีเพียงพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้ คิดเป็นร้อยละ 100 2) ขนาดของฝุ่นมันเส้นที่เท่ากับ $16.71 \mu m$ สามารถเกิดระเบิดได้ 3) ขอบเขตของหมอกฝุ่น หรือ พื้นที่จำกัด (Confined space) ในจากกระบวนการจัดเก็บมันเส้น สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ คิดเป็นร้อยละ 100 4) แหล่งจุดติดไฟหรือความร้อน (Ignition source) และ 5) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)

แหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ประกอบด้วย 2 สาเหตุ เป็นเหตุการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) ได้แก่ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) และ ความผิดพลาดของเครื่องจักร ควบคุมการผลิต (Machine error) ซึ่งความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) ได้แก่ การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน ความเครียด ความไม่รู้ และการไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบความปลอดภัยของ อีกสาเหตุคือ ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) ในกระบวนการนี้มี 3 ชนิดที่มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการลุกติดไฟ หรือเกิดความร้อนขึ้น ได้แก่ 1) กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ลูกกะพ้อ (Bucket) สายพาน (Rubber Belt) และน็อต (Nut) 2) มอเตอร์ (Motor) มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ มอเตอร์ อุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear) ตลับลูกปืน หรือ แบริ่ง (Bearing) และ สกรูตัวหนอน (Set Screw) และ 3) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ชุดขับ (Motor drive) ลูกกลิ้ง (Roller) สายพาน (Belt) ล้อสายพาน (Pulleys) และมอเตอร์เกียร์ (Gear motor)

สาเหตุของการฟุ้งกระจายของฝุ่น หรือ ความเข้มข้นของฝุ่น ประกอบด้วย สาเหตุย่อย ที่เป็นปัจจัยพื้นฐาน (Basic Event) อย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) คือ การทำความสะอาดพื้นที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น หรือ เครื่องจักรชำรุด หรือการซ่อมบำรุงจนทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของแป้งมันสำปะหลัง เป็นสาเหตุพื้นฐานของการฟุ้งกระจายและทำให้เกิดระเบิดฝุ่นมันเส้นได้

4.2.2 การประเมินความเสี่ยงด้วยกระบวนการด้วยวิธี FTA-AHP เป็นการประเมินความเสี่ยงโดยนำโครงสร้าง FTA ในแต่ละสาเหตุ แล้วนำมาเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) ในแต่ละสาเหตุ การวิเคราะห์หาน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การวิเคราะห์หาค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) การวิเคราะห์อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) และนำมาจัดลำดับความสำคัญของเหตุการณ์ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิด มีรายละเอียดดังนี้ การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FTA-AHP มีรายละเอียดในตารางที่ 35-37

ตารางที่ 35 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุการฟุ้งกระจายของฝุ่น

Top Event	Gate	Event
Gate 1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น	Gate 1 การฟุ้งกระจาย ของฝุ่น (Dispersion)	การทำความสะอาดพื้นที่ (Cleaning) ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นมันเส้น
		เครื่องจักรชำรุด (Machine trouble) ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของแป้งมันสำปะหลัง
		การซ่อมบำรุง (Maintenance) ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของแป้งมันสำปะหลัง

ตารางที่ 36 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุการฟุ้งกระจายของฝุ่น

Event	Cleaning	Machine trouble	Maintenance
Cleaning	1.000	0.333	5.000
Machine trouble	3.000	1.000	7.000
Maintenance	0.200	0.143	1.000
รวม	4.200	1.476	13.000

ตารางที่ 37 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุการฟุ้งกระจายของฝุ่น

Event	Cleaning	Machine trouble	Maintenance	$\left(\frac{\sigma_{row}}{3}\right) \times 100$	(λ_{max})
Cleaning	0.238	0.226	0.385	28.284	1.188
Machine trouble	0.714	0.677	0.538	64.339	0.950
Maintenance	0.048	0.097	0.077	7.377	0.959
รวม	1.000	1.000	1.000	100.000	3.097

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n(n-1)}$

$$CI = \frac{(3.097-3)}{(3-1)} = 0.048$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) $CR = CI/RI$

$$CR = \frac{0.048}{0.580} = 0.083$$



ภาพที่ 49 นำหนักความสำคัญที่คำนวณ สาเหตุการฟุ้งกระจายของฝุ่น จาก Expert Choice 11

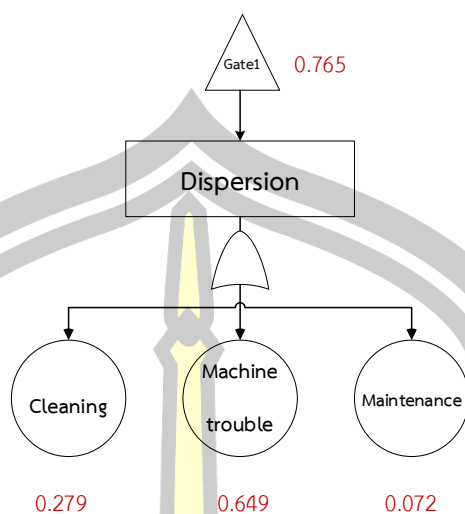
ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุของการฟุ้งกระจายของฝุ่น พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ เครื่องจักรชำรุด ร้อยละ 64.90 รองลงมา คือ การทำความสะอาด ร้อยละ 27.90 และ มีการซ่อมบำรุง ร้อยละ 7.20 ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องเท่ากับ 0.083 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.06 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 3x3 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจที่น่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 38-40 และภาพที่ 50

OR gate1 การเกิดฝุ่นระเบิดจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)

$$= 1 - (1 - 0.279) \times (1 - 0.649) \times (1 - 0.072)$$

$$= 0.765$$

พูน ิพนุ จิตโต ชีเว



ภาพที่ 50 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP การฝังกระจายของฝุ่น (Dispersion)

ตารางที่ 38 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน

Top Event	Gate	Event
Gate 2 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error)	การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน (Time pressure)
		ความเครียด (Stress)
		ความรู้ (Lack of knowledge)
		การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ (Violation)

ตารางที่ 39 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุ ความผิดพลาดของพนักงาน

Event	Time pressure	Stress	Lack of knowledge	Violation
Time pressure	1.000	3.000	3.000	0.333
Stress	0.333	1.000	3.000	0.200
Lack of knowledge	0.333	0.333	1.000	0.143
Violation	3.000	5.000	7.000	1.000
รวม	4.667	9.333	14.000	1.676

ตารางที่ 40 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุ ความผิดพลาดของพนักงาน

Event	Time pressure	Stress	Lack of knowledge	Violation	$(\frac{\sum \text{row}}{3}) \times 100$	$(\lambda_{\max})$
Time pressure	0.214	0.321	0.214	0.199	23.722	1.107
Stress	0.071	0.107	0.214	0.119	12.804	1.195
Lack of knowledge	0.071	0.036	0.071	0.085	6.595	0.923
Violation	0.643	0.536	0.500	0.597	56.879	0.953
รวม	1.000	1.000	1.000	1.000	100.000	4.179

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI)

$$CI = (4.179 - 4) / (4 - 1)$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR)

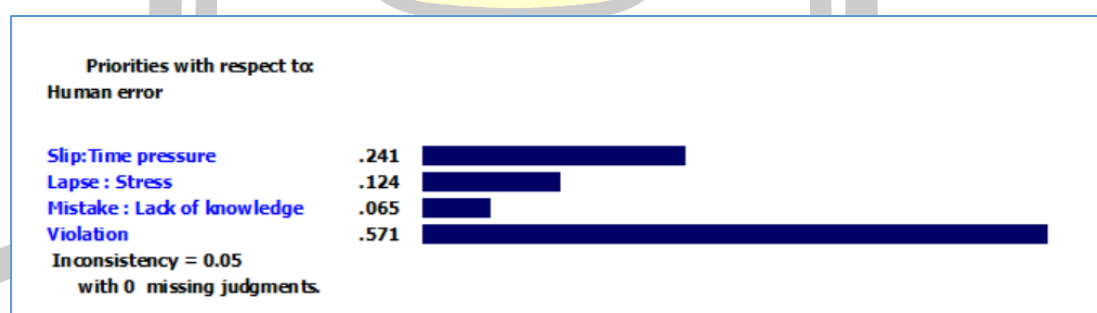
$$CR = 0.060 / 0.900$$

$$CI = \lambda_{\max} - n / n - 1$$

$$= 0.060$$

$$CR = CI / RI$$

$$= 0.066$$



ภาพที่ 51 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) จาก Expert Choice 11

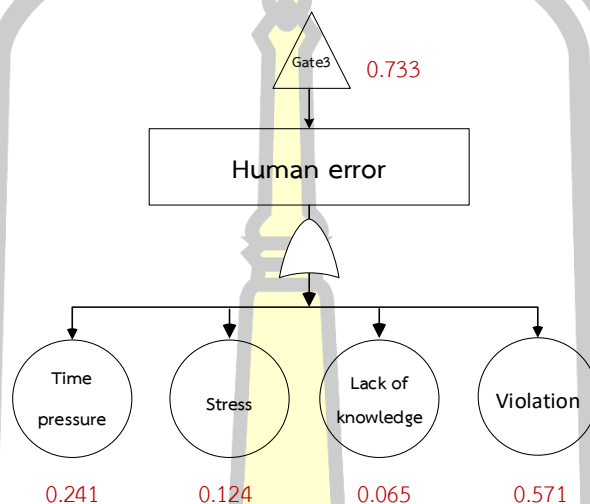
ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุของความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ ร้อยละ 57.10 รองลงมาคือ การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน ร้อยละ 24.10 ความเครียด ร้อยละ 12.40 และความไม่รู้ ร้อยละ 6.50 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ

0.05 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 4x4 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.10 แสดงว่า
 ดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 41-43 และภาพที่ 52

OR gateการเกิดฝุ่นระเบิดจากความผิดพลาดของพนักงาน (Human error)

$$=1-(1-0.241) \times (1-0.124) \times (1-0.065) \times (1-0.571)$$

$$=0.733$$



ภาพที่ 52 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA ความผิดพลาดของพนักงาน

ตารางที่ 41 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน

Top Event	Gate	Event
Gate 4 ความผิดพลาด ของเครื่องจักร	Gate 5 กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator)	น็อต (Nut)
		สายพาน (Rubber Belt)
		ลูกกะพ้อ (Bucket)
		ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)
		เศษขยะในกะพ้อ (Waste)

ตารางที่ 42 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุความร้อนจากกะป้อลำเลียง

Event	Nut	Rubber Belt	Bucket	Electrostatic	Waste
Nut	1.000	3.000	3.000	7.000	5.000
Rubber Belt	0.333	1.000	0.333	3.000	3.000
Bucket	0.250	3.000	1.000	7.000	3.000
Electrostatic	0.143	0.333	0.143	1.000	0.333
Waste	0.200	0.333	0.333	3.000	1.000
รวม	1.926	7.667	4.810	21.000	12.333

ตารางที่ 43 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุความร้อนจากกะป้อลำเลียง

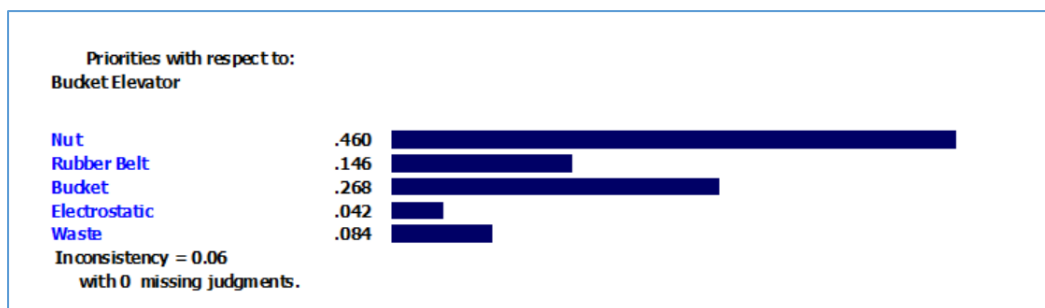
Event	Nut	Rubber Belt	Bucket	Electrostatic	Waste	$(\frac{\sum \text{row}}{3}) \times 100$	$(\lambda_{\max})$
Nut	0.519	0.391	0.624	0.333	0.405	45.459	0.876
Rubber Belt	0.173	0.130	0.069	0.143	0.243	15.178	1.164
Bucket	0.130	0.391	0.208	0.333	0.243	26.112	1.256
Electrostatic	0.074	0.043	0.030	0.048	0.027	4.440	0.932
Waste	0.104	0.043	0.069	0.143	0.081	8.811	1.087
รวม	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	100.000	5.314

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) $CI = \lambda_{\max} - n/n-1$

$$CI = (5.314-5)/(5-1) = 0.079$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) $CR = CI/RI$

$$CR = 0.079 / 1.120 = 0.070$$



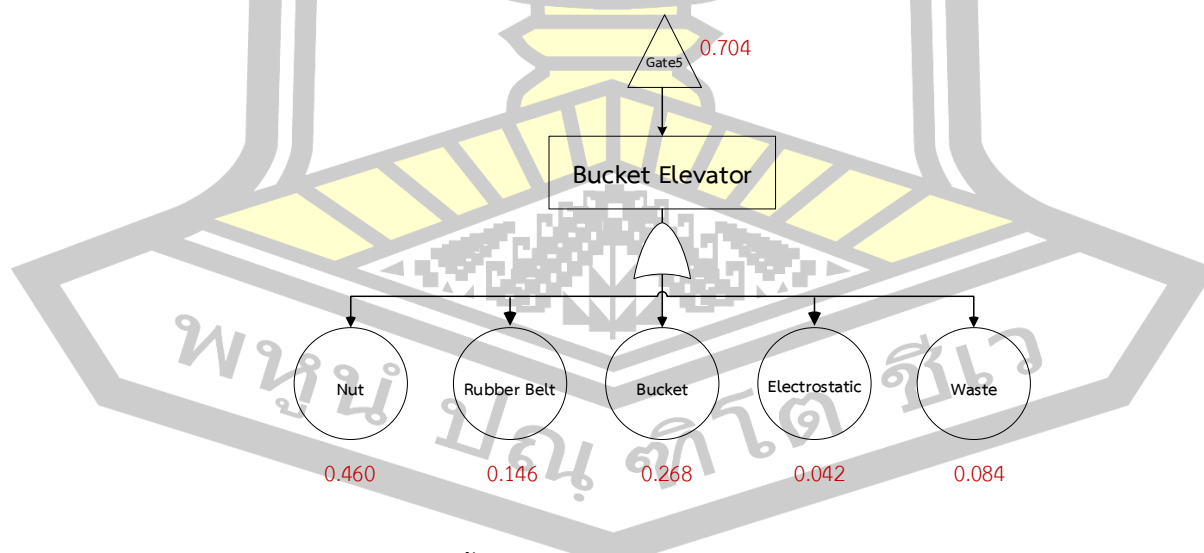
ภาพที่ 53 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ กระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) จาก Expert Choice 11

ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุของความร้อนจากกระพ้อลำเลียง พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ น็อต (Nut) ร้อยละ 46.00 รองลงมาคือ ลูกกระพ้อ (Bucket) ร้อยละ 26.80 สายพาน (Rubber Belt) ร้อยละ 14.60 เศษขยะในกระพ้อ (waste) ร้อยละ 8.40 และไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) ร้อยละ 4.20 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.06 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 5x5 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังตารางที่ 45-47 และภาพที่ 54

OR gate5 การเกิดฝุ่นระเบิดจากความล้มเหลวของกระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator)

$$= 1 - (1 - 0.460) \times (1 - 0.146) \times (1 - 0.268) \times (1 - 0.042) \times (1 - 0.084)$$

$$= 0.704$$



ภาพที่ 54 แผนภาพการการชี้ป่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP กระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator)

ตารางที่ 44 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของความร้อนจากมอเตอร์

Top Event	Gate	Event
Gate 4 ความผิดปกติ ของเครื่องจักร	Gate 6 มอเตอร์ (Motor)	อุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear)
		ตลับลูกปืน (Bearing)
		สกรูตัวหนอน (Set Screw)

ตารางที่ 45 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) สาเหตุความร้อนจากมอเตอร์

Event	Motor gear	Bearing	Set Screw
Motor gear	1.000	0.200	0.500
Bearing	5.000	1.000	5.000
Set Screw	2.000	0.200	1.000
รวม	8.000	1.400	6.500

ตารางที่ 46 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุความร้อนจากมอเตอร์

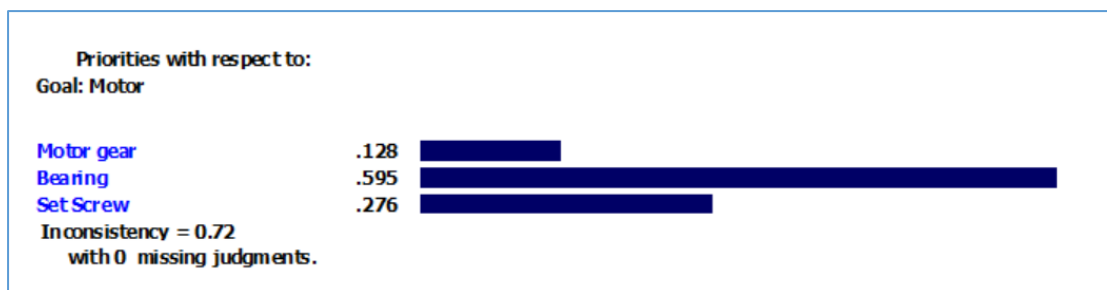
Event	Motor gear	Bearing	Set Screw	$(\sum \frac{row}{3}) \times 100$	(λ_{max})
Motor gear	0.125	0.143	0.077	11.493	0.919
Bearing	0.625	0.714	0.769	70.284	0.984
Set Screw	0.250	0.143	0.154	18.223	1.185
รวม	1.000	1.000	1.000	100.000	3.088

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$

$$CI = (3.088-3)/(3-1) = 0.044$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) $CR = CI/RI$

$$CR = 0.044 / 0.580 = 0.076$$



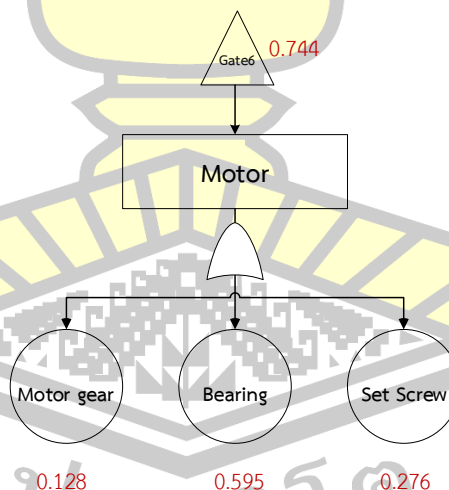
ภาพที่ 55 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ มอเตอร์ (Motor) จาก Expert Choice 11

ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุความร้อนจากมอเตอร์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ ตลับลูกปืน (Bearing) ร้อยละ 59.50 สกรูตัวหนอน (Set Screw) ร้อยละ 27.60 และอุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear) ร้อยละ 12.80 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.72 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 3x3 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 48-49 และภาพที่ 56

OR gate6 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก มอเตอร์ (Motor)

$$= 1 - (1 - 0.128) \times (1 - 0.595) \times (1 - 0.276)$$

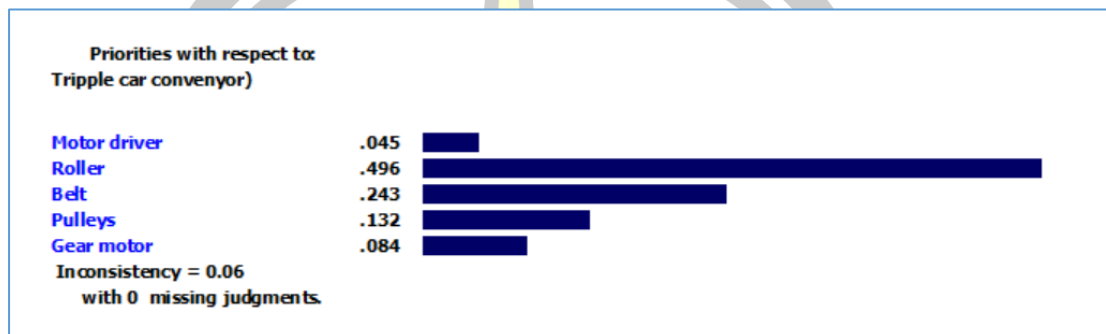
$$= 0.744$$



ภาพที่ 56 แผนภาพการการขึ้นอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP มอเตอร์ (Motor)

ตารางที่ 47 โครงสร้าง Fault tree สาเหตุของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI)} \quad CI &= \lambda_{\max} - n/n-1 \\
 CI &= (5.383-5)/(5-1) = 0.096 \\
 \text{อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR)} \quad CR &= CI/RI \\
 CR &= 0.096 / 1.120 = 0.090
 \end{aligned}$$

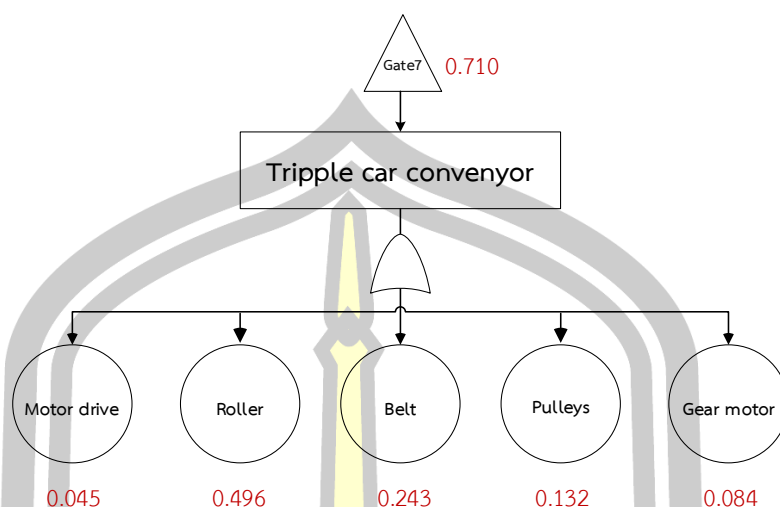


ภาพที่ 57 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้จากความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) จาก Expert Choice 11

ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของสาเหตุของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) พบว่า ลูกกลิ้ง (Roller) ร้อยละ 49.60 สายพาน (Belt) ร้อยละ 24.30 ล้อสายพาน (Pulleys) ร้อยละ 13.20 มอเตอร์เกียร์ (Gear motor) ร้อยละ 8.40 และชุดขับ (Motor drive) ร้อยละ 4.50 ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.06 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 5x5 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในภาพที่ 58

$$\begin{aligned}
 \text{OR gate7 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์} \\
 &= 1 - (1 - 0.045) \times (1 - 0.496) \times (1 - 0.243) \times (1 - 0.132) \times (1 - 0.084) \\
 &= 0.710
 \end{aligned}$$

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพที่ 58 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyyor)

ความร้อน หรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ประกอบด้วยสาเหตุ 2 สาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) คือ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) และ ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) ซึ่งความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) ได้แก่ การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน ความเครียด ความไม่รู้ และการไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบความปลอดภัยของ และความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) มี 3 ปัจจัยที่มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการลุกติดไฟ หรือเกิดความร้อนขึ้น ได้แก่ 1) กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) 2) มอเตอร์ (Motor) และ 3) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyors) แสดงแผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA สามารถคำนวณค่าการเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) ได้ดังนี้

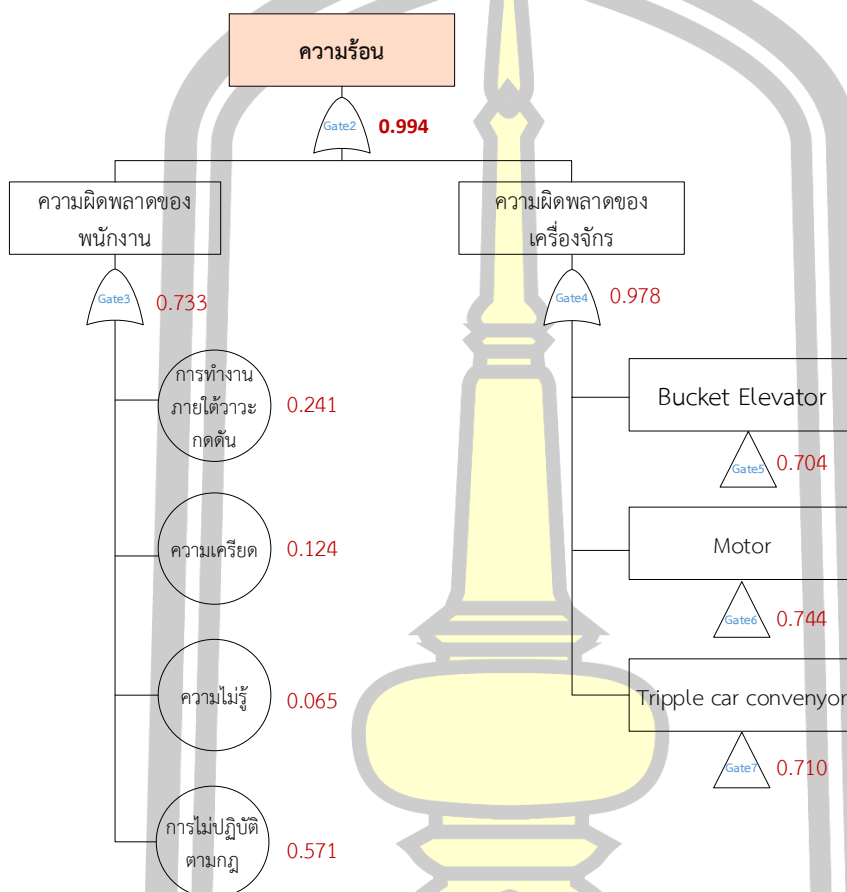
$$\begin{aligned} \text{OR gate4 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต} \\ &= 1 - (1 - 0.704) \times (1 - 0.744) \times (1 - 0.710) \\ &= 0.978 \end{aligned}$$

ความร้อน หรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ประกอบด้วยสาเหตุ 2 สาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) คือ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) และ ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) แสดงแผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA สามารถคำนวณค่าการเกิดฝุ่นระเบิดจากแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ได้ดังนี้

OR gate2 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความร้อนหรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source)

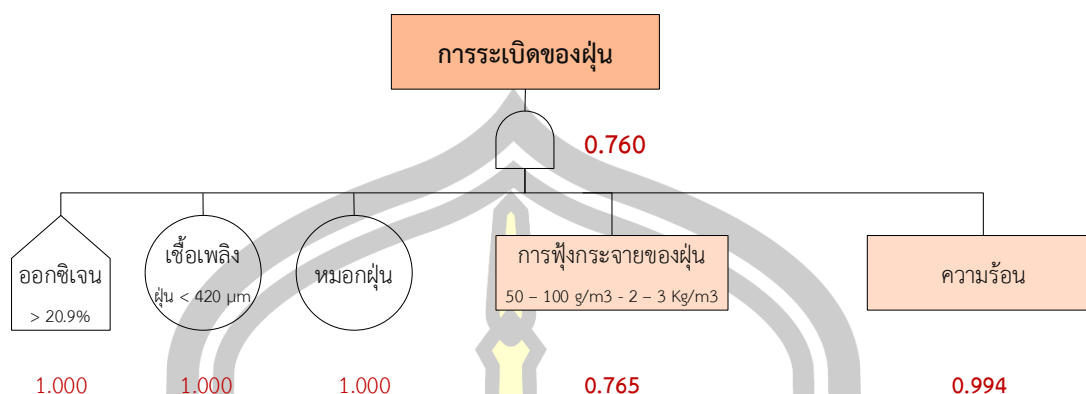
$$=1-(1-0.733) \times (1-0.978)$$

$$=0.994$$



ภาพที่ 59 แผนภาพการการชั่งอันตรายเป็นวิธี FTA-AHP แหล่งจุดติดไฟ (Ignition source)

การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FTA-AHP มีเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้น เป็น เหตุการณ์แรก (Top event) โดยพิจารณาจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งจุดติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังแสดงในภาพที่ 60



ภาพที่ 60 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP การระเบิดฝุ่นมันเส้น

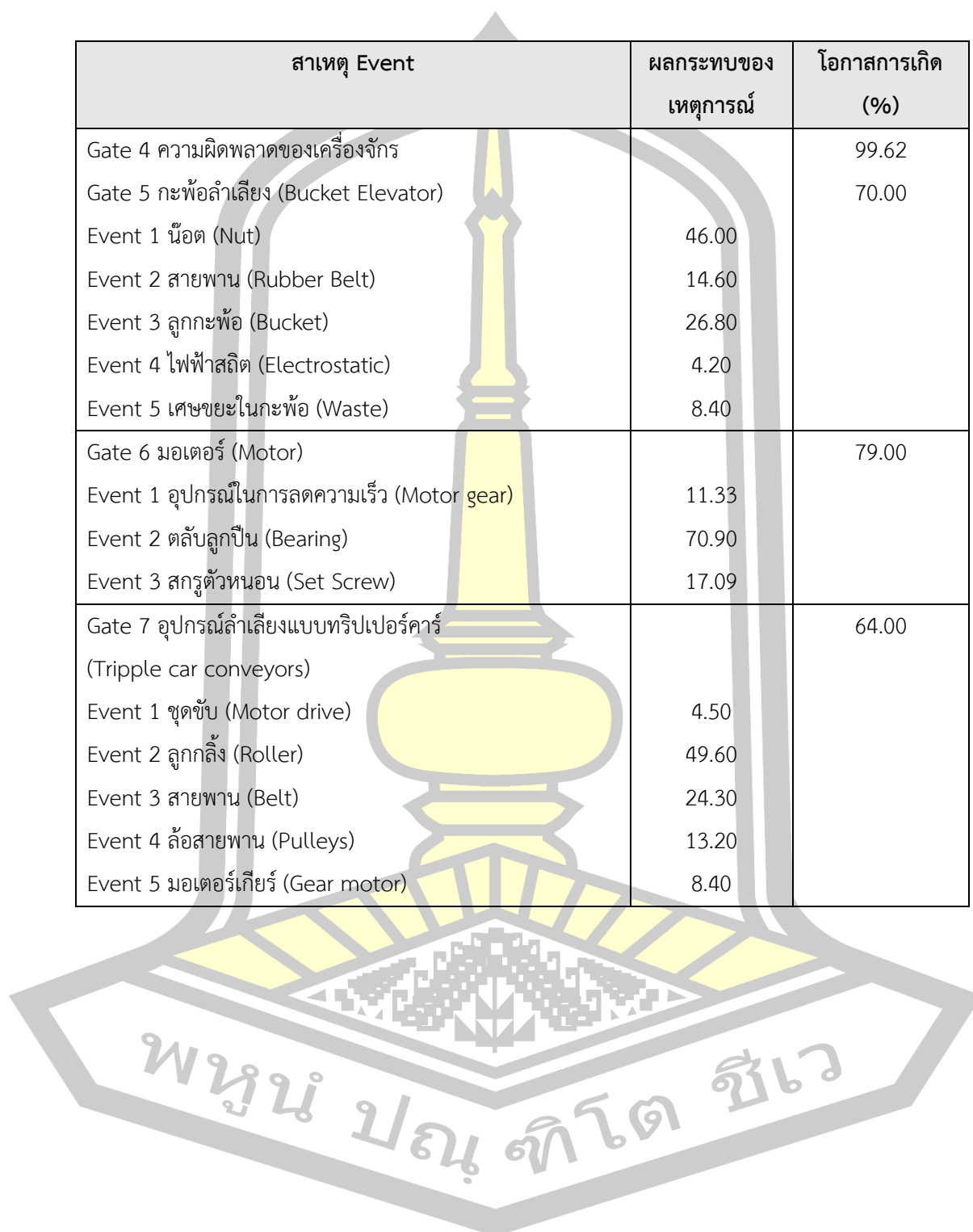
จากการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FTA-AHP พบว่า โอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น (Probability) ร้อยละ 76.00 จากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ร้อยละ 76.50 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน ร้อยละ 99.40 ชนิดของฝุ่น ออกซิเจน และขอบเขตของหมอกฝุ่น ร้อยละ 100 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 50 และภาพที่ 61

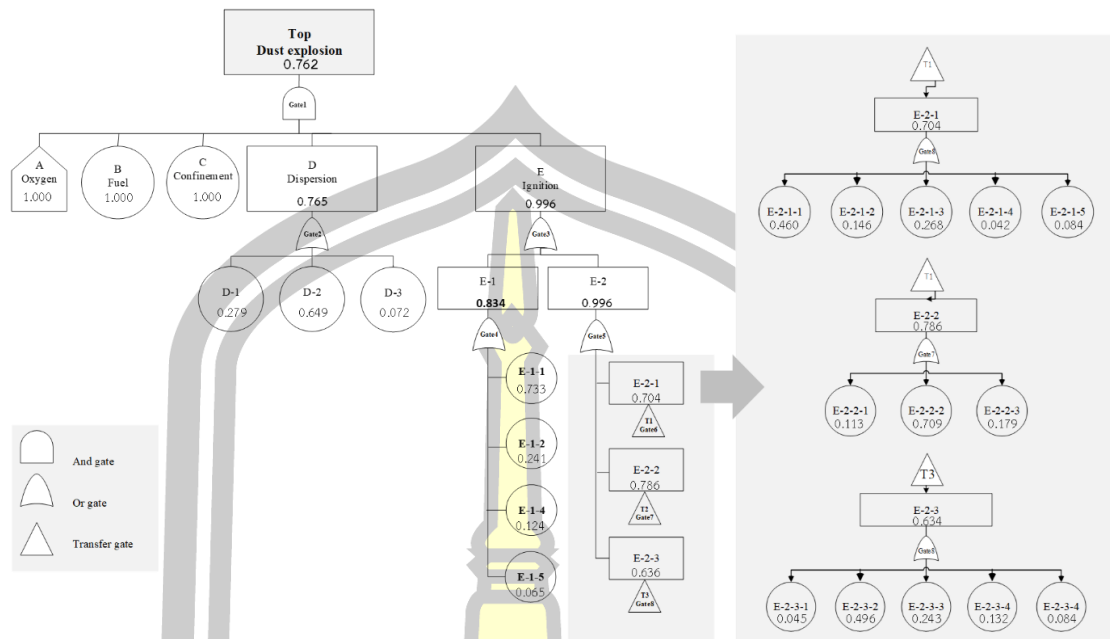
ตารางที่ 50 ค่าผลกระทบในการเกิดเหตุการณ์ และค่าโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ FTA-AHP

สาเหตุ Event	ผลกระทบของเหตุการณ์	โอกาสการเกิด (%)
Gate 1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)		76.50
Event 1 การทำความสะอาดพื้นที่ (Cleaning)	27.90	
Event 2 เครื่องจักรชำรุด (Machine trouble)	64.90	
Event 3 การซ่อมบำรุง (Maintenance)	7.20	
Gate 2 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน (Ignition)		96.60
Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error)		83.40
Event 1 การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน (Time pressure)	73.30	
Event 2 ความเครียด (Stress)	24.10	
Event 3 ความไม่รู้ (Lack of knowledge)	12.40	
Event 4 การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ (Violation)	6.50	

ตารางที่ 50 ค่าผลกระทบในการเกิดเหตุการณ์ และค่าโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ FTA-AHP (ต่อ)

สาเหตุ Event	ผลกระทบของ เหตุการณ์	โอกาสการเกิด (%)
Gate 4 ความผิดพลาดของเครื่องจักร		99.62
Gate 5 กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator)		70.00
Event 1 น็อต (Nut)	46.00	
Event 2 สายพาน (Rubber Belt)	14.60	
Event 3 ลูกกะพ้อ (Bucket)	26.80	
Event 4 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)	4.20	
Event 5 เศษขยะในกะพ้อ (Waste)	8.40	
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)		79.00
Event 1 อุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear)	11.33	
Event 2 ตลับลูกปืน (Bearing)	70.90	
Event 3 สกรูตัวหนอน (Set Screw)	17.09	
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyors)		64.00
Event 1 ชุดขับเคลื่อน (Motor drive)	4.50	
Event 2 ลูกกลิ้ง (Roller)	49.60	
Event 3 สายพาน (Belt)	24.30	
Event 4 ล้อสายพาน (Pulleys)	13.20	
Event 5 มอเตอร์เกียร์ (Gear motor)	8.40	





ภาพที่ 61 แผนภาพการการชั่งอันตรายเป็นวิธี FTA-AHP

จากการศึกษาข้างต้นสามารถนำมาประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk assessment and ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยการกำหนดสัดส่วนที่อ้างอิงจากแผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk matrix : ANSIZ 10) มีทั้งหมด 5 ระดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

พูน ปณ ภิโต ชเว

ตารางที่ 51 คะแนนความเสี่ยง (Risk matrix)

สาเหตุ	โอกาสการเกิด Probability (%)	ผลกระทบ	โอกาส การเกิด	คะแนน ความเสี่ยง	ระดับ ความเสี่ยง
การระเบิดฝุ่น	76.62	3	5	15	5 (สูงมาก)
ออกซิเจน	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
เชื้อเพลิง	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
หมอกฝุ่น	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
การฟุ้งกระจายของฝุ่น	76.50	3	5	15	5 (สูงมาก)
แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	96.60	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 1 การฟุ้งกระจายฝุ่น	76.50	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 2 ความร้อน	96.60	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 3 ความผิดพลาดของ พนักงาน	83.40	3	3	9	4 (สูง)
Gate 4 ความผิดพลาดของ เครื่องจักร	99.62	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 5 กะป้อลำเลียง	70.00	3	4	12	4 (สูง)
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)	79.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียง แบบทริปเปอร์คาร์	64.00	3	4	12	4 (สูง)

ดังนั้น การศึกษานี้สามารถหาระดับความเสี่ยงที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง และการวิเคราะห์หาค่าผลกระทบของการเกิดฝุ่นระเบิดจากกระบวนการจัดเก็บมันเส้นโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis) และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) และนำมาเทียบแผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment Matrix) เพื่อพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์ และโอกาสการเกิดเหตุการณ์จากกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

วิธีการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลคะแนนผลลัพธ์จากการประเมินความเสี่ยงด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) ซึ่งมีความเสี่ยงระดับที่ 5 (คะแนน 15-25 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงสูงมาก จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที) มี 5 เหตุการณ์ ได้แก่ ออกซิเจน เชื้อเพลิง หมอกฝุ่น การฟุ้งกระจายของฝุ่น และแหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน และความเสี่ยงระดับที่ 4 (คะแนน 15-25 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงสูง ต้องจัดการให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้) มี 3 เหตุการณ์ ได้แก่ ความผิดพลาดของพนักงาน กะป้อลำเลียง และอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์

4.1.3 การประเมินความเสี่ยงด้วยกระบวนการด้วยวิธี FFTA-AHP จากการประเมินความเสี่ยงด้วย FTA-AHP ข้างต้น ได้นำเหตุการณ์ทั้ง 20 เหตุการณ์มาวิเคราะห์เพื่อหาผลการประเมินค่าน้ำหนักโดยวิธี FFTA-AHP เพื่อลดความคลุมเครือของข้อมูล และให้ได้ผลการวิเคราะห์ใกล้ความเป็นจริงยิ่งขึ้น มีแนวทางในการดำเนินการดังแสดงในตารางที่ 52-54

ตารางที่ 52 การประเมิน Fuzzy AHP เพื่อหาความผิดพลาดของการฟังก์กระจายของฝุ่น

[illegible]

ตารางที่ 53 เมตริกซ์ฟัซซี การฟุ้งกระจายของฝุ่น

สาเหตุ	การทำความสะอาดพื้นที่	เครื่องจักรชำรุด	การซ่อมบำรุง
การทำความสะอาดพื้นที่	(1,1,1)	(3,5,7)	(1,3,5)
เครื่องจักรชำรุด	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,1)	(1/7,1/5,1/3)
การซ่อมบำรุง	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(1,1,1)

ตารางที่ 54 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น

สาเหตุ	การทำความสะอาดพื้นที่	เครื่องจักรชำรุด	การซ่อมบำรุง
การทำความสะอาดพื้นที่	(1.000, 1.000, 1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)
เครื่องจักรชำรุด	(0.143,0.200,0.333)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.143,0.200,0.333)
การซ่อมบำรุง	(0.200,0.333,1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000, 1.000, 1.000)

วิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี ตามสมการที่ 3.13

$$S_1 = (1.654, 2.009, 3.533) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_2 = (3.400, 7.666, 13.000) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_3 = (2.510, 4.806, 8.200) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_4 = (9, 17, 23) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_5 = (8.200, 14.333, 21) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ (3.14)

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 0$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.022$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

การคำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ โดยสมการ (3.15)

$$W_A = \min (S_1 \geq S_2, S_3) = \min = 1.000$$

$$W_B = \min (S_2 \geq S_1, S_3) = \min = 0.000$$

$$W_C = \min (S_3 \geq S_1, S_2) = \min = 0.022$$

การหาความสำคัญของเวกเตอร์

$$W=(W_1,W_2,W_3)^T$$

$$W=(1.000,0.000, 0.022)^T$$

ดังนั้น จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น

$$\text{การทำความสะอาดพื้นที่} = 0.979$$

$$\text{เครื่องจักรชำรุด} = 0.000$$

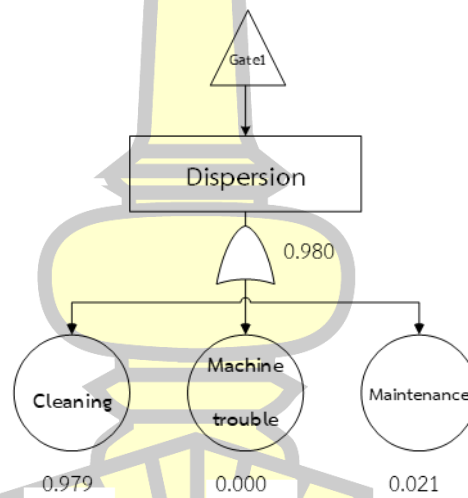
$$\text{การซ่อมบำรุง} = 0.021$$

ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด คือ การทำความสะอาดพื้นที่ ร้อยละ 97.90 รองลงมาคือ การซ่อมบำรุง ร้อยละ 0.021 และ เครื่องจักรชำรุด ร้อยละ 0.00 ดังแสดงในภาพที่ 62

OR gate1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น

$$=1-(1-0.979)\times(1-0.000)\times(1-0.021)$$

$$=0.980$$



ภาพที่ 62 แผนภาพการการขึ้นอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP การฟุ้งกระจายของฝุ่น

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 55 การประเมิน Fuzzy AHP ความผิดพลาดของพนักงาน

สาเหตุ	มีความสำคัญมากที่สุด	มีความสำคัญมากกว่า	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญน้อยกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญน้อยกว่าปานกลาง	มีความสำคัญน้อยกว่า	มีความสำคัญมากที่สุด	สาเหตุ
การทำงานภายใต้ ภาวะกดดัน			✓							ความเครียด
การทำงานภายใต้ ภาวะกดดัน		✓								ความไม่รู้
การทำงานภายใต้ ภาวะกดดัน		✓								การไม่ปฏิบัติตาม กฎระเบียบ
ความเครียด			✓							ความไม่รู้
ความเครียด			✓							การไม่ปฏิบัติตาม กฎระเบียบ
ความไม่รู้			✓							การไม่ปฏิบัติตาม กฎระเบียบ

ตารางที่ 56 เมตริกซ์ฟัซซี เพื่อหาความผิดพลาดของพนักงาน

สาเหตุ	การทำงานภายใต้ ภาวะกดดัน	ความเครียด	ความไม่รู้	การไม่ปฏิบัติ ตามกฎระเบียบ
การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน	(1,1,1)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)
ความเครียด	(1/9,1/7,1/5)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)
ความไม่รู้	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(1,1,1)	
การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,1)

ตารางที่ 57 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของพนักงาน

สาเหตุ	การทำงานภายใต้ ภาวะกดดัน	ความเครียด	ความไม่รู้	การไม่ปฏิบัติตาม กฎระเบียบ
การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน	(1.000,1.000, 1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(5.000,7.000,9.000)	(5.000,7.000,9.000)
ความเครียด	(0.111,0.142,0.200)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.200, 0.333, 1.000)	(0.143, 0.200, 0.333)
ความไม่รู้	(0.200, 0.333, 1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.143, 0.200, 0.333)
การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ	(0.111,0.142,0.200)	(0.200, 0.333, 1.000)	(0.143, 0.200, 0.333)	(1.000,1.000, 1.000)

วิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี ตามสมการที่ 3.13

$$S1 = (14.00, 20.00, 26.00) * (26.794, 39.086, 51.733)^{-1}$$

$$S2 = (7.143, 11.200, 15.333) * (26.794, 39.086, 51.733)^{-1}$$

$$S3 = (4.252, 6.343, 8.533) * (26.794, 39.086, 51.733)^{-1}$$

$$S4 = (1.397, 1.543, 1.867) * (26.794, 39.086, 51.733)^{-1}$$

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ (3.14)

$$V(S1 \geq S2) = 1.000$$

$$V(S2 \geq S4) = 1.000$$

$$V(S3 \geq S1) = 0.352$$

$$V(S3 \geq S2) = 1.000$$

$$V(S3 \geq S4) = 1.000$$

$$V(S4 \geq S1) = 1.000$$

$$V(S4 \geq S2) = 0.000$$

$$V(S4 \geq S3) = 0.000$$

การคำนวณระดับความเป็นไปได้ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ โดยสมการ (3.15)

$$W_A = \min (S1 \geq S2, S3, S4) = \min = 0.000$$

$$W_B = \min (S2 \geq S1, S3, S4) = \min = 0.352$$

$$W_C = \min (S3 \geq S1, S2, S4) = \min = 0.000$$

$$W_D = \min (S4 \geq S1, S2, S3) = \min = 0.000$$

การหาความสำคัญของเวกเตอร์

$$W = (W1, W2, W3, W4)^T$$

$$W = (0.000, 0.352, 0.000, 0.000)^T$$

ดังนั้น จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของพนักงาน

การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน = 0.000

ความเครียด = 0.352

ความไม่รู้ = 0.000

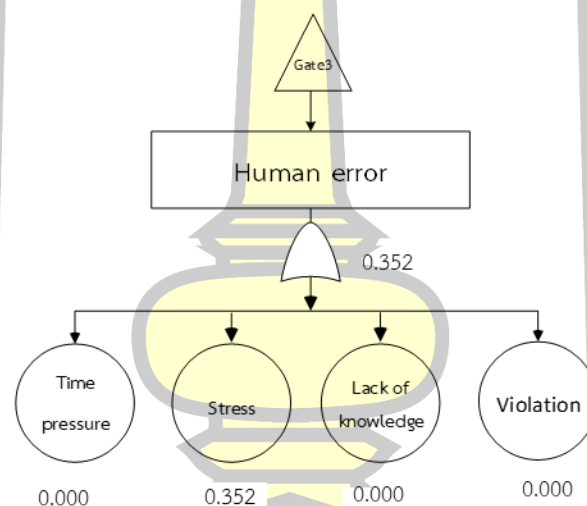
การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ = 0.000

ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดจากความผิดพลาดของพนักงาน พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ ความเครียด ร้อยละ 6.50 ดังแสดงในภาพที่ 63

OR gate1 ความผิดพลาดของพนักงาน

$$= 1 - (1 - 0.000) \times (1 - 0.352) \times (1 - 0.000) \times (1 - 0.000)$$

$$= 0.352$$



ภาพที่ 63 แผนภาพการการชี้แจงอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความผิดพลาดของพนักงาน

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางที่ 58 การประเมิน Fuzzy AHP การเกิดฝุ่นระเบิดจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง

สาเหตุ	มีความสำคัญมากที่สุด	มีความสำคัญมากกว่า	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญน้อยกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญน้อยกว่าปานกลาง	มีความสำคัญน้อยกว่า	มีความสำคัญมากที่สุด	สาเหตุ
น๊อต				✓						สายพาน
น๊อต				✓						ลูกกะป้อ
น๊อต		✓								ไฟฟ้าสถิต
น๊อต		✓								เศษขยะในกะป้อ
สายพาน						✓				ลูกกะป้อ
สายพาน				✓						ไฟฟ้าสถิต
สายพาน			✓							เศษขยะในกะป้อ
ลูกกะป้อ		✓								ไฟฟ้าสถิต
ลูกกะป้อ				✓						เศษขยะในกะป้อ
ไฟฟ้าสถิต						✓				เศษขยะในกะป้อ

ตารางที่ 59 เมตริกซ์ฟัซซี่ ความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง

เหตุการณ์	น๊อต	สายพาน	ลูกกะป้อ	ไฟฟ้าสถิต	เศษขยะในกะป้อ
น๊อต	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/7,1/5)
สายพาน	(1,3,5)	(1,1,1)	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)
ลูกกะป้อ	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)
ไฟฟ้าสถิต	(5,7,9)	(1,3,5)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1,3,5)
เศษขยะในกะป้อ	(5,7,9)	(3,5,7)	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)

ตารางที่ 60 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง

เหตุการณ์	น็อต	สายพาน	ลูกกะป้อ	ไฟฟ้าสถิต	ขยะในกะป้อ
น็อต	(1,1,1)	(0.200,0.333,1.000)	(0.200,0.333,1.000)	(0.111,0.143,0.200)	(0.111,0.143,0.200)
สายพาน	(1,3,5)	(1,1,1)	(0.200,0.333,1.000)	(0.200,0.333,1.000)	(0.143,0.200,0.333)
ลูกกะป้อ	(1,3,5)	(0.200,0.333,1.000)	(1,1,1)	(0.111,0.143,0.200)	(0.200,0.333,1.000)
ไฟฟ้าสถิต	(5,7,9)	(1,3,5)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1,3,5)
เศษขยะในกะป้อ	(5,7,9)	(3,5,7)	(0.200,0.333,1.000)	(0.200,0.333,1.000)	(1,1,1)

วิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟิชซี ตามสมการที่ 3.13

$$S_1 = (1.654, 2.009, 3.533) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_2 = (3.400, 7.666, 13.000) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_3 = (2.510, 4.806, 8.200) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_4 = (9, 17, 23) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

$$S_5 = (8.200, 14.333, 21) \times (24.763, 45.811, 68.733)^{-1}$$

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ (3.14)

$$V(S_1 \geq S_2) = 0.000$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1.003$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 0.088$$

$$V(S_1 \geq S_5) = 0.073$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 1.000$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1.000$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 0.868$$

$$V(S_2 \geq S_5) = 0.946$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 1.000$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 0.047$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 0.169$$

$$V(S_3 \geq S_5) = 0.189$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 1.000$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1.000$$

$$V(S4 \geq S3) = 1.000$$

$$V(S4 \geq S5) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S1) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S2) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S3) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S4) = 1.103$$

การคำนวณระดับความเป็นไปได้ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ โดยสมการ (3.15)

$$W_A = \min (S1 \geq S2, S3, S4, S5) = \min (0.000, 1.003, -0.122, 0.043) = 0.000$$

$$W_B = \min (S2 \geq S1, S3, S4, S5) = \min (1, 1, 0.861, 0.940) = 0.861$$

$$W_C = \min (S3 \geq S1, S2, S4, S5) = \min (1, 0.053, 0.165, 0.186) = 0.053$$

$$W_D = \min (S4 \geq S1, S2, S3, S5) = \min (1, 1, 1, 1) = 1.000$$

$$W_E = \min (S5 \geq S1, S2, S3, S4) = \min (1, 1, 1, 1) = 1.000$$

การหาความสำคัญของเวกเตอร์

$$W = (W1, W2, W3, W4, W5)^T$$

$$W = (0, 0.861, 0.053, 1, 1)^T$$

ดังนั้น จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง

$$\text{Nut} = 0.000$$

$$\text{Rubber belt} = 0.295$$

$$\text{Bucket Elevator} = 0.018$$

$$\text{Electrostatic} = 0.343$$

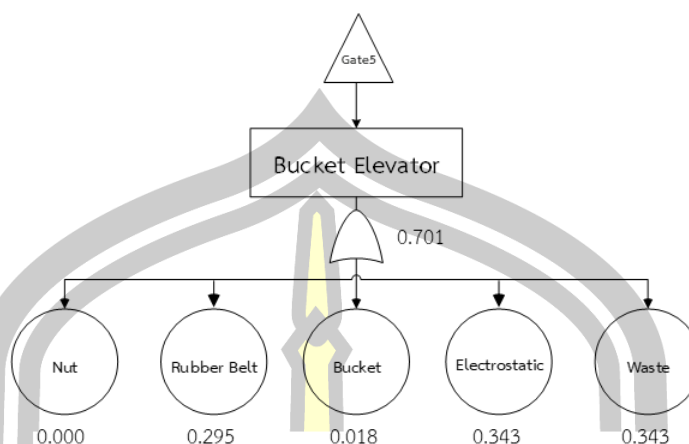
$$\text{Waste} = 0.343$$

ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ เศษขยะในกะป้อ และไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) (waste) ร้อยละ 34.30 รองลงมาคือ สายพาน (Rubber Belt) ร้อยละ 29.50 ลูกกะป้อ (Bucket) ร้อยละ 1.80 และน็อต (Nut) ร้อยละ 0.00 ดังแสดงในภาพที่ 64

OR gate5 การเกิดฝุ่นระเบิดจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง (Bucket Elevator)

$$= 1 - (1 - 0.000) \times (1 - 0.295) \times (1 - 0.018) \times (1 - 0.343) \times (1 - 0.343)$$

$$= 0.701$$



ภาพที่ 64 แผนภาพการการซึ่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP กะพ้อลำเลียง

ตารางที่ 61 การประเมิน Fuzzy AHP ความร้อนจากมอเตอร์

สาเหตุ	มีความสำคัญมากกว่าที่สุด	มีความสำคัญมากกว่า	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญน้อยกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญน้อยกว่าปานกลาง	มีความสำคัญน้อยกว่า	มีความสำคัญมากที่สุด	สาเหตุ
Motor gear			✓							Bearing
Motor gear				✓						Screw set
Bearing							✓			Screw set

ตารางที่ 62 เมตริกซ์ฟัซซี่ เพื่อหาความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์

สาเหตุ	Motor gear	Bearing	Set Screw
Motor gear	(1,1,1)	(3,5,7)	(1,3,5)
Bearing	(1/9,1/7,1/5)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)
Set Screw	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(1,1,1)

ตารางที่ 63 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์

สาเหตุ	Motor gear	Bearing	Set Screw
Motor gear	(1.000,1.000, 1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)
Bearing	(0.143,0.200,0.333)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.143,0.200,0.333)
Set Screw	(0.200, 0.333, 1.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,1.000, 1.000)

วิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟิชซี ตามสมการที่ 3.13

$$S1 = (0.211, 0.538, 1.240) * (10.486, 16.733, 23.667)^{-1}$$

$$S2 = (0.054, 0.084, 0.159) * (10.486, 16.733, 23.667)^{-1}$$

$$S3 = (0.177, 0.378, 0.853) * (10.486, 16.733, 23.667)^{-1}$$

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ (3.14)

$$V(S1 \geq S2) = 1.000$$

$$V(S1 \geq S3) = 1.000$$

$$V(S2 \geq S1) = 0.000$$

$$V(S2 \geq S3) = 0.000$$

$$V(S3 \geq S1) = 0.022$$

$$V(S3 \geq S2) = 1.000$$

การคำนวณระดับความเป็นไปได้ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ โดยสมการ (3.15)

$$W_A = \min (S1 \geq S2, S3) = \min = 1.000$$

$$W_B = \min (S2 \geq S1, S3) = \min = 0.000$$

$$W_C = \min (S3 \geq S1, S2) = \min = 0.022$$

การหาความสำคัญของเวกเตอร์

$$W = (W1, W2, W3)^T$$

$$W = (0.342, 0.342, 0.316)^T$$

ดังนั้น จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์

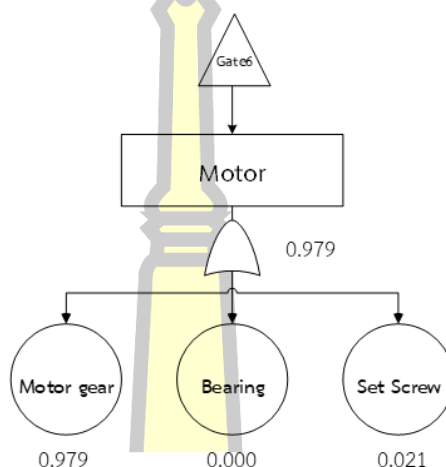
$$\text{Motor gear} = 0.979$$

$$\text{Bearing} = 0.000$$

$$\text{Set Screw} = 0.021$$

ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดจากความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ Motor gear ร้อยละ 97.90 ดังแสดงในภาพที่ 65

$$\begin{aligned} \text{OR gate1 ความผิดพลาดของความร้อนจากมอเตอร์} \\ &= 1 - (1 - 0.979) \times (1 - 0.000) \times (1 - 0.000) \times (1 - 0.021) \\ &= 0.979 \end{aligned}$$



ภาพที่ 65 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP มอเตอร์

ตารางที่ 64 การประเมิน Fuzzy AHP ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์

สาเหตุ	มีความสำคัญมากที่สุด	มีความสำคัญมากกว่า	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญน้อยกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญน้อยกว่าปานกลาง	มีความสำคัญน้อยกว่า	มีความสำคัญมากที่สุด	สาเหตุ
Motor driver		✓								Roller
Motor driver			✓							Roller
Motor driver				✓						Belt
Motor driver							✓			Pulley
Roller								✓		Motor gear
Roller							✓			Belt

ตารางที่ 64 การประเมิน Fuzzy AHP ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (ต่อ)

สาเหตุ	มีความสำคัญมากที่สุด	มีความสำคัญมากกว่า	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญน้อยกว่าเล็กน้อย	มีความสำคัญน้อยกว่าปานกลาง	มีความสำคัญน้อยกว่า	มีความสำคัญมากที่สุด	สาเหตุ
Roller							✓			Pulley
Belt						✓				Motor gear
Belt						✓				Pulley
Pulley						✓				Motor gear

ตารางที่ 65 เมตริกซ์ฟัซซี เพื่อหาความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

สาเหตุ	Motor drive	Roller	Belt	Pulleys	Gear motor
Motor drive	(1.000,1.000, 1.000)	(5.000,7.000,9.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,3.000,5.000)
Roller	(1/9,1/7,1/5)	(1.000,1.000, 1.000)	(1/9,1/7,1/5)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)
Belt	(1/7,1/5,1/3)	(5.000,7.000,9.000)	(1.000,1.000, 1.000)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)
Pulleys	(1/5,1/3,1)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,1.000, 1.000)	(1/5,1/3,1)
Gear motor	(1/5,1/3,1)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,1.000, 1.000)

ตารางที่ 66 การหาค่าเฉลี่ยกลุ่มประเมินจากความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

สาเหตุ	Motor drive	Roller	Belt	Pulleys	Gear motor
Motor drive	(1.000,1.000, 1.000)	(5.000,7.000,9.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,3.000,5.000)
Roller	(0.143,0.200,0.333)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.143,0.200,0.333)	(0.111,0.143,0.200)	(0.111,0.143,0.200)
Belt	(0.111,0.143,0.200)	(0.143,0.200,0.333)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.200, 0.333, 1.000)	(0.200, 0.333, 1.000)
Pulleys	(1.000,3.000,5.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,1.000, 1.000)	(0.200, 0.333, 1.000)
Gear motor	(1.000,3.000,5.000)	(3.000,5.000,7.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,3.000,5.000)	(1.000,1.000, 1.000)

วิเคราะห์โดยคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟuzzy ตามสมการที่ 3.13

$$S1 = (0.146, 0.369, 0.881) * (0.020, 0., 75.400)^{-1}$$

$$S2 = (0.020, 0.033, 0.067) * (36.651, 51.552, 75.400)^{-1}$$

$$S3 = (0.087, 0.172, 0.402) * (36.651, 51.552, 75.400)^{-1}$$

$$S4 = (0.072, 0.188, 0.489) * (36.651, 51.552, 75.400)^{-1}$$

$$S5 = (0.082, 0.239, 0.620) * (36.651, 51.552, 75.400)^{-1}$$

คำนวณระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ และ $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ $j=1,2,...,m$ และ $i \neq j$ ดังสมการที่ (3.14)

$$V(S4 \geq S2) = 0.915$$

$$V(S4 \geq S3) = 1.000$$

$$V(S4 \geq S5) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S1) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S2) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S3) = 1.000$$

$$V(S5 \geq S4) = 1.000$$

การคำนวณระดับความเป็นไปได้ของ S_i ที่มากกว่า S_j อื่นๆ โดยสมการ (3.15)

$$W_A = \min (S1 \geq S2, S3, S4, S5) = \min = 1.000$$

$$W_B = \min (S2 \geq S1, S3, S4, S5) = \min = 0.000$$

$$W_C = \min (S3 \geq S1, S2, S4, S5) = \min = 0.891$$

$$W_D = \min (S4 \geq S1, S2, S3, S5) = \min = 0.915$$

$$W_E = \min (S5 \geq S1, S2, S3, S4) = \min = 1.000$$

การหาความสำคัญของเวกเตอร์ $W = (W1, W2, W3, W4, W5)^T$

$$W = (1.000, 0.000, 0.897, 0.915, 1.000)^T$$

ดังนั้น จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์
ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

$$\text{Motor drive} = 0.000$$

$$\text{Roller} = 0.000$$

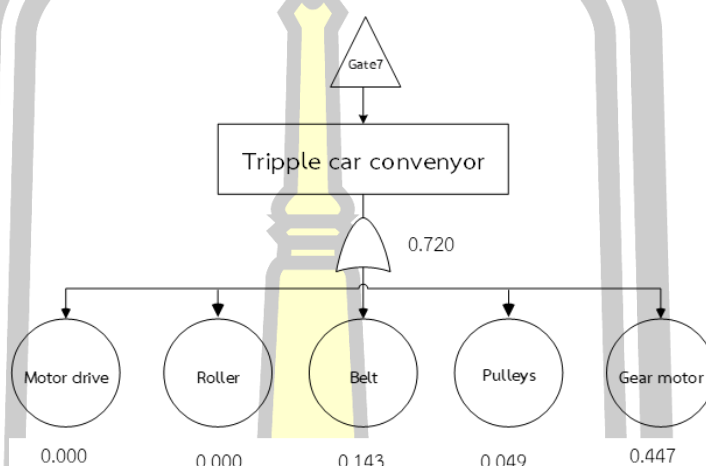
$$\text{Belt} = 0.143$$

$$\text{Pulleys} = 0.409$$

$$\text{Gear motor} = 0.447$$

ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ทำให้เกิดจากความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyer) พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ Gear motor ร้อยละ 47.70 ดังแสดงในภาพที่ 66

$$\begin{aligned} \text{OR gate1 ความผิดพลาดของความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์} \\ &= 1 - (1 - 0.000) \times (1 - 0.000) \times (1 - 0.143) \times (1 - 0.049) \times (1 - 0.447) \\ &= 0.720 \end{aligned}$$



ภาพที่ 66 แผนภาพการการขึ้นอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์

ความร้อน หรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ประกอบด้วยสาเหตุ 2 สาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) คือ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) และ ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) ซึ่งความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) ได้แก่ การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน ความเครียด ความไม่รู้ และการไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบความปลอดภัยของ และความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) มี 3 ปัจจัยที่มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการลุกติดไฟ หรือเกิดความร้อนขึ้น ได้แก่ 1) กะพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) 2) มอเตอร์ (Motor) และ 3) อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyors) แสดงแผนภาพการการขึ้นอันตรายด้วยวิธี FFTA ดังแสดงในภาพที่ 67-68

สามารถคำนวณค่าการเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) ได้ดังนี้

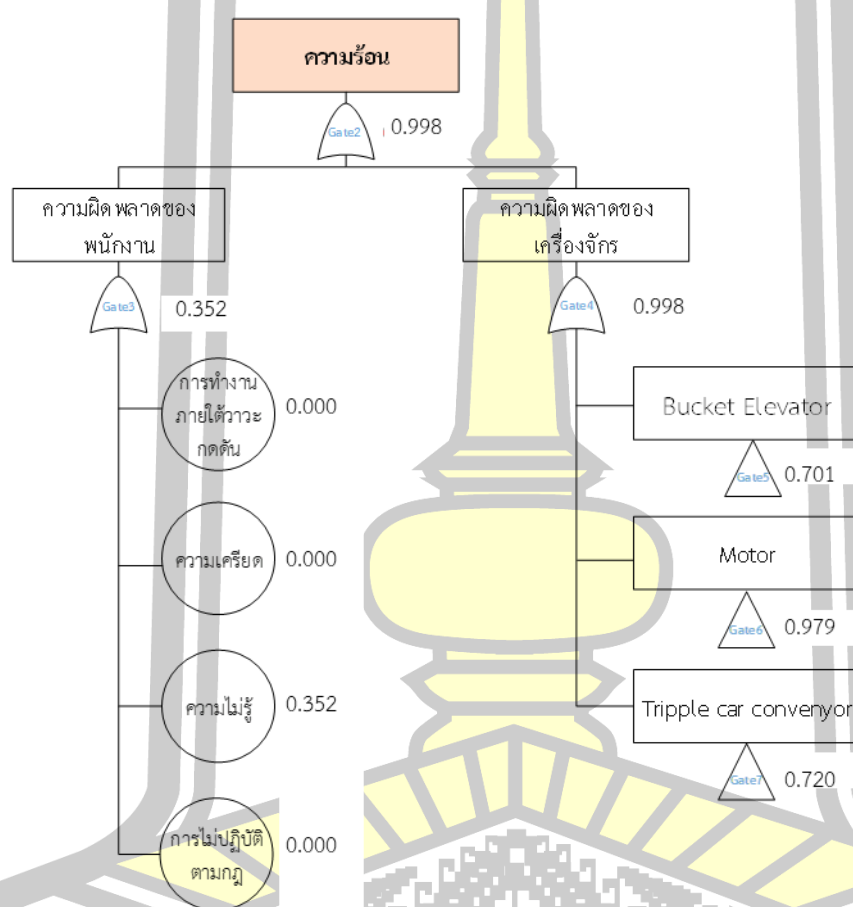
$$\begin{aligned} \text{OR gate4 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต} \\ &= 1 - (1 - 0.701) \times (1 - 0.979) \times (1 - 0.72) \\ &= 0.998 \end{aligned}$$

ความร้อน หรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ประกอบด้วยสาเหตุ 2 สาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง (OR gate) คือ ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error) และ ความผิดพลาดของเครื่องจักรควบคุมการผลิต (Machine error) แสดงแผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FFTA สามารถคำนวณค่าการเกิดฝุ่นระเบิดจากแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source) ได้ดังนี้

OR gate2 การเกิดฝุ่นระเบิดจาก ความร้อนหรือแหล่งจุดติดไฟ (Ignition source)

$$= 1 - (1 - 0.998) \times (1 - 0.352)$$

$$= 0.998$$



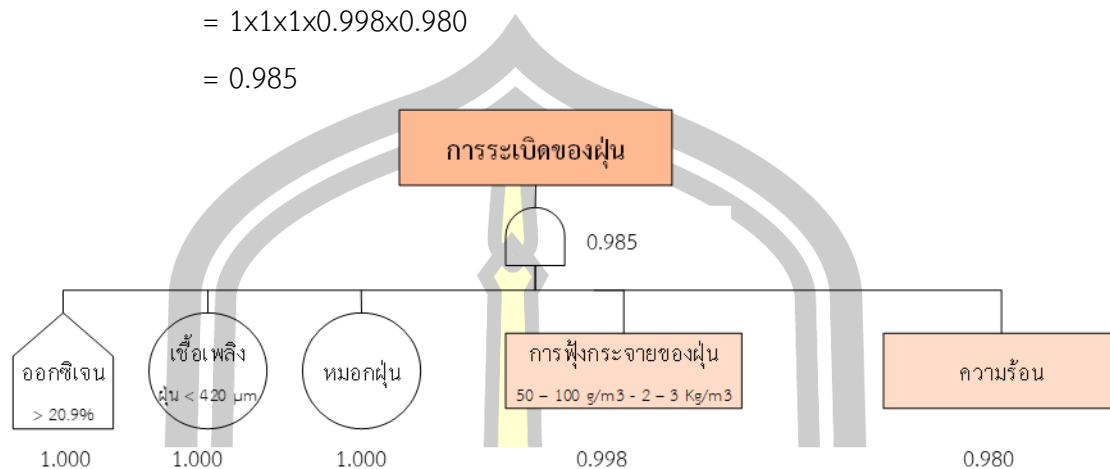
ภาพที่ 67 แผนภาพการการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP ความร้อน (Ignition source)

การคำนวณหาโอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น (Probability) ด้วยวิธี FFTA-AHP มีเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นมันเส้น เป็นเหตุการณ์แรก (Top event) โดยพิจารณาจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งจุดติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

And Gate การเกิดฝุ่นระเบิดของฝุ่น (Dust explosion)

$$= 1 \times 1 \times 0.998 \times 0.980$$

$$= 0.985$$



ภาพที่ 68 แผนภาพการการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP การระเบิดฝุ่นมันเส้น

จากการชั่งอันตรายด้วยวิธี FFTA-AHP พบว่า โอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น (Probability) ร้อยละ 98.50 ประกอบด้วยโอกาสการเกิดความล้มเหลวของเหตุการณ์การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ร้อยละ 99.80 เกิดความร้อน ร้อยละ 98.00 ชนิดของฝุ่น ออกซิเจน และขอบเขตของหมอกฝุ่น ร้อยละ 100 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 67



ตารางที่ 67 ค่าผลกระทบ และค่าโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ จาก FFTA-AHP

สาเหตุ Event	ผลกระทบของ เหตุการณ์ (Impact)	โอกาสการเกิด Probability (%)
Gate 1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)		98.80
Event 1 การทำความสะอาดพื้นที่ (Cleaning)	97.90	
Event 2 เครื่องจักรชำรุด (Machine trouble)	0.000	
Event 3 การซ่อมบำรุง (Maintenance)	0.021	
Gate 2 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน (Ignition)		98.00
Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน (Human error)		35.20
Event 1 การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน (Time pressure)	0.000	
Event 2 ความเครียด (Stress)	0.000	
Event 3 ความไม่รู้ (Lack of knowledge)	35.20	
Event 4 การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ (Violation)	0.000	
Gate 4 ความผิดพลาดของเครื่องจักร		98.00
Gate 5 กะป้อลำเลียง (Bucket Elevator)		70.10
Event 1 น็อต (Nut)	0.000	
Event 2 สายพาน (Rubber Belt)	29.50	
Event 3 ลูกกะป้อ (Bucket)	1.80	
Event 4 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)	34.30	
Event 5 เศษขยะในกะป้อ (Waste)	34.30	
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)		99.80
Event 1 อุปกรณ์ในการลดความเร็ว (Motor gear)	97.90	
Event 2 ตลับลูกปืน (Bearing)	0.000	
Event 3 สกรูตัวหนอน (Set Screw)	0.021	
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyors)		72.00
Event 1 ชุดขับ (Motor drive)	0.000	
Event 2 ลูกกลิ้ง (Roller)	0.000	
Event 3 สายพาน (Belt)	14.30	
Event 4 ล้อสายพาน (Pulleys)	4.90	
Event 5 มอเตอร์เกียร์ (Gear motor)	44.70	

จากการศึกษาข้างต้นสามารถนำมาประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk Assessment and Ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละเหตุการณ์ ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยการกำหนดสัดส่วนที่อ้างอิงจากแผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk Matrix : ANSIZ 10) มีทั้งหมด 5 ระดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 68

ตารางที่ 68 คะแนนความเสี่ยง (Risk Assessment Matrix)

สาเหตุ	โอกาสการเกิด Probability (%)	ผลกระทบ	โอกาส การเกิด	คะแนน ความเสี่ยง	ระดับ ความเสี่ยง
การระเบิดฝุ่น	98.50	3	5	15	5(สูงมาก)
ออกซิเจน	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
เชื้อเพลิง	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
หมอกฝุ่น	100.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
การฟุ้งกระจายของฝุ่น	98.80	3	5	15	5 (สูงมาก)
แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	99.80	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น	98.80	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 2 ความร้อน	98.00	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน	35.20	3	3	9	4(สูง)
Gate 4 ความผิดพลาดของ เครื่องจักร	99.80	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 5 กะป้อลำเลียง	70.10	3	4	12	4 (สูง)
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)	99.80	3	5	15	5 (สูงมาก)
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริป เปอร์คาร์	72.00	3	4	15	5 (สูงมาก)

ดังนั้น การศึกษานี้สามารถหาระดับความเสี่ยงที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง และการวิเคราะห์หาค่าผลกระทบของการเกิดฝุ่นระเบิดจากกระบวนการจัดเก็บมันเส้นกระบวนการจัดเก็บมันเส้น โดยใช้กระบวนการ FFTA-AHP และนำมาเทียบแผนผังการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment Matrix) เพื่อพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์ และโอกาสการเกิดเหตุการณ์จากกระบวนการจัดเก็บมันเส้นจากการศึกษาพบว่าค่าคะแนนส่วนใหญ่จัดอยู่ในความเสี่ยงระดับที่ 5 (คะแนน 15-25 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงสูงมาก จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที) ดังแสดงในตารางที่ 69

ตารางที่ 69 การเปรียบเทียบผลกระทบ และโอกาสการเกิด ระหว่าง FTA-AHP กับ FFTA-AHP

สาเหตุ Event	FTA-AHP		FFTA-AHP	
	ผลกระทบ	โอกาสการเกิด (%)	ผลกระทบ	โอกาสการเกิด (%)
Gate 1 การพังกระจายของฝุ่น		76.50		98.80
Event 1 การทำความสะอาดพื้นที่	27.90		97.90	
Event 2 เครื่องจักรชำรุด	64.90		0.000	
Event 3 การซ่อมบำรุง (Maintenance)	7.20		0.021	
Gate 2 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน		96.60		98.00
Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน		83.40		35.20
Event 1 การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน	73.30		0.000	
Event 2 ความเครียด	24.10		0.000	
Event 3 ความไม่รู้	12.40		35.20	
Event 4 การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ	6.50		0.000	
Gate 4 ความผิดพลาดของเครื่องจักร		99.62		98.00
Gate 5 กะพ้อลำเลียง		70.00		70.10
Event 1 นื้อด	46.00		0.000	
Event 2 สายพาน	14.60		29.50	
Event 3 ลูกกะพ้อ	26.80		1.80	
Event 4 ไฟฟ้าสถิต	4.20		34.30	
Event 5 เศษขยะในกะพ้อ	8.40		34.30	
Gate 6 มอเตอร์		79.00		99.80
Event 1 อุปกรณ์ในการลดความเร็ว	11.33		97.90	
Event 2 ตลับลูกปืน	70.90		0.000	
Event 3 สกรูตัวหนอน	17.09		0.021	
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์		64.00		72.00
Event 1 ชูตขับ	4.50		0.000	
Event 2 ลูกกลิ้ง	49.60		0.000	
Event 3 สายพาน	24.30		14.30	
Event 4 ล้อสายพาน	13.20		4.90	
Event 5 มอเตอร์เกียร์	8.40		44.70	
โอกาสการเกิดการระเบิด	0.760		0.985	

4.3 การออกแบบ และปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

จากการศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น สามารถนำมากำหนดแนวทางการออกแบบระบบการป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการผลิต ด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controlling) การวิเคราะห์หาน้ำหนักความสำคัญของแนวทางการป้องกันการระเบิดด้วยกระบวนการ AHP มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.3.1 การออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

จากกระบวนการสนทนากลุ่มของคณะกรรมการประเมินความเสี่ยง ได้จัดลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมเพื่อลด หรือกำจัดความเสี่ยงต่อการประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination) เชื้อเพลิง (Fuel) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) พบว่า ปัจจัยที่มีคณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน (Cleaning) การติดตั้งระบบระบายอากาศ (Venting) และการติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collector) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการป้องกันการระเบิดฝุ่นด้านการควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) ในการควบคุมและป้องกันอันตรายจากการเกิดความร้อน (Ignition) ปัจจัยที่มีคณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ (Fire suppression system: FS) การติดตั้งอุปกรณ์ (Explosion-proof equipment: EP) และการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด (Explosion-wall: EW) และการบริหารจัดการ (Administrative Controls) ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการบริหารจัดการ (Administrative Controls) ในการควบคุมและป้องกันอันตรายจากการเกิดความร้อน (Ignition) ปัจจัยที่มีคณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) การออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ได้นำมาเป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นทั้งหมด 3 ระยะ คือ การป้องกัน

ก่อนการระเบิดฝุ่น ในระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ซึ่งเป็นการป้องกันทั้งสภาวะปกติ เมื่อเกิดความร้อนหรืออุณหภูมิสูงกว่าภาวะปกติ และการป้องกันผลกระทบจากการระเบิดฝุ่นในระยะที่ 3

จากการออกแบบระบบการป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการผลิต ด้วยลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controlling) การวิเคราะห์หาน้ำหนักความสำคัญของแนวทางการป้องกันการระเบิดด้วยกระบวนการ AHP มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้ ดังแสดงในตารางที่ 70

ตารางที่ 70 แนวทางการป้องกันด้วยลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) จากการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

Hierarchy of control	Five elements of dust explosion	Dust explosion prevention
การขจัด (Elimination)	เชื้อเพลิง (Fuel) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	1. การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน (Cleaning) 2. ติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collector) 3. ติดตั้งระบบระบายอากาศ (Venting)
การแทนที่ (Substitution)	ออกซิเจน (Oxygen)	การแทนที่ออกซิเจน (O_2) 1. การแทนที่ด้วยไนโตรเจน (N) 2. การแทนที่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)	- ความร้อน (Ignition)	1. ติดตั้งอุปกรณ์ (explosion-proof equipment) 2. การออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด 3. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)	ความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	1. การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) 2. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) 3. มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP)
PPE	ความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล ตาม มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP)

4.3.2 การหาน้ำหนักความสำคัญของแนวทางการป้องกันการระเบิดด้วยกระบวนการ

AHP

จากกระบวนการสนทนากลุ่มของคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงได้ร่วมกันวิเคราะห์หาน้ำหนักความสำคัญของแนวทางการป้องกันการระเบิดด้วยกระบวนการ AHP เพื่อเรียงลำดับทางเลือกในการตัดสินใจ ซึ่งได้พิจารณาลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) และการควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การขจัด (Elimination) ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination) เชื้อเพลิง (Fuel) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) พบว่า ปัจจัยที่มีคณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุดคือ การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน (Cleaning) ร้อยละ 64.9 การติดตั้งระบบระบายอากาศ (Venting) ร้อยละ 27.90 และการติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collector) ร้อยละ 7.20 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.06 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 3x3 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 71-72 และภาพที่ 69

ตารางที่ 71 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) การขจัด (Elimination)

Event	Cleaning	Dust collector	Venting
Cleaning	1.000	7.000	3.000
Dust collector	0.143	1.000	0.200
Venting	0.333	5.000	1.000
รวม	1.476	13.000	4.200

ตารางที่ 72 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด

Event	Cleaning	Dust collector	Venting	$\left(\frac{\sum \text{row}}{3}\right) \times 100$	$\lambda_{\max}$
Cleaning	0.677	0.538	0.714	64.34	0.950
Dust collector	0.097	0.077	0.048	7.38	0.959
Venting	0.226	0.385	0.238	28.28	1.188
รวม	1.000	1.000	1.000	100.000	3.097

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) $CI = \lambda_{max} - n/n-1$

$$CI = (3.097-3)/(3-1) = 0.048$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) $CR = CI/RI$

$$CR = 0.048/0.58 = 0.083$$



ภาพที่ 69 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด

2) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) ปังจัยผลกระทบโดยการคำนวณ น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการป้องกันการระเบิดฝุ่นด้านการควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) ในการควบคุมและป้องกันตรายจากการเกิดความร้อน (Ignition) ปังจัยที่มี คณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ (Fire suppression system: FS) ร้อยละ 63.70 การติดตั้งอุปกรณ์ (Explosion-proof equipment: EP) ร้อยละ 25.80 และการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด (Explosion-wall: EW) ร้อยละ 10.50 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.04 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 3x3 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้น น่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 73-74 และภาพที่ 70



ตารางที่ 73 การเปรียบเทียบคู่ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)

Event	Explosion-proof equipment	Explosion-wall	Fire suppression
Explosion-proof equipment	1.000	7.000	3.000
Explosion-wall	0.143	1.000	0.200
Fire suppression	0.333	5.000	1.000
รวม	1.476	13.000	4.200

ตารางที่ 74 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)

Event	Explosion-proof equipment	Explosion wall	Fire suppression	$\left(\frac{\sum^{row}}{3}\right) \times 100$	λ_{max}
Explosion-proof equipment	1.000	3.000	0.333	26.05	1.129
Explosion-wall	0.333	1.000	0.200	10.62	0.955
Fire suppression	3.000	5.000	1.000	63.33	0.971
รวม	1.000	1.000	1.000	100.000	3.055

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) $CI = \lambda_{max} - n/n-1$

$$CI = (3.035-3)/(3-1) = 0.028$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) $CR = CI/RI$

$$CR = 0.028/0.58 = 0.048$$



ภาพที่ 70 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)

3) การบริหารจัดการ (Administrative Controls) ปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกของการบริหารจัดการ (Administrative Controls) ในการควบคุมและป้องกันตรายจากการเกิดความร้อน (Ignition) ปัจจัยที่มีคณะกรรมการความปลอดภัยให้ความสำคัญมากที่สุด คือ การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) ร้อยละ 40.00 การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) ร้อยละ 22.70 มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) ร้อยละ 26.50 และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) ร้อยละ 10.80 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) เท่ากับ 0.07 จากการประเมินข้างต้นทุกเหตุการณ์ในเมตริกขนาด 4x4 ค่า CR มีค่าไม่เกิน 0.100 แสดงว่าดุลยพินิจนั้นน่าเชื่อถือ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 75-76 และภาพที่ 71

ตารางที่ 75 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparision) การบริหารจัดการ

Event	PHA	JSA	SOP	PM
PHA	0.375	0.563	0.286	3.000
JSA	0.125	0.188	0.286	3.000
SOP	0.375	0.188	0.286	2.000
PM	0.125	0.063	0.143	1.000
รวม	1.00	1.00	1.00	9.000

ตารางที่ 76 น้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริก การบริหารจัดการ

Event	PHA	JSA	SOP	PM	$(\sum \frac{row}{3}) \times 100$	λ_{max}
PHA	1.000	3.000	1.000	3.000	38.914	1.038
JSA	0.333	1.000	1.000	3.000	23.289	1.242
SOP	1.000	1.000	1.000	2.000	26.761	0.937
PM	0.333	0.333	0.500	1.000	11.037	0.993
รวม	2.667	5.333	3.500	9.000	100.000	4.210

ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI)

$$CI = \lambda_{\max} - n/n-1$$

$$CI = (4.210-4)/(4-1)$$

$$= 0.070$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR)

$$CR = CI/RI$$

$$CR = 0.070/0.9$$

$$= 0.078$$

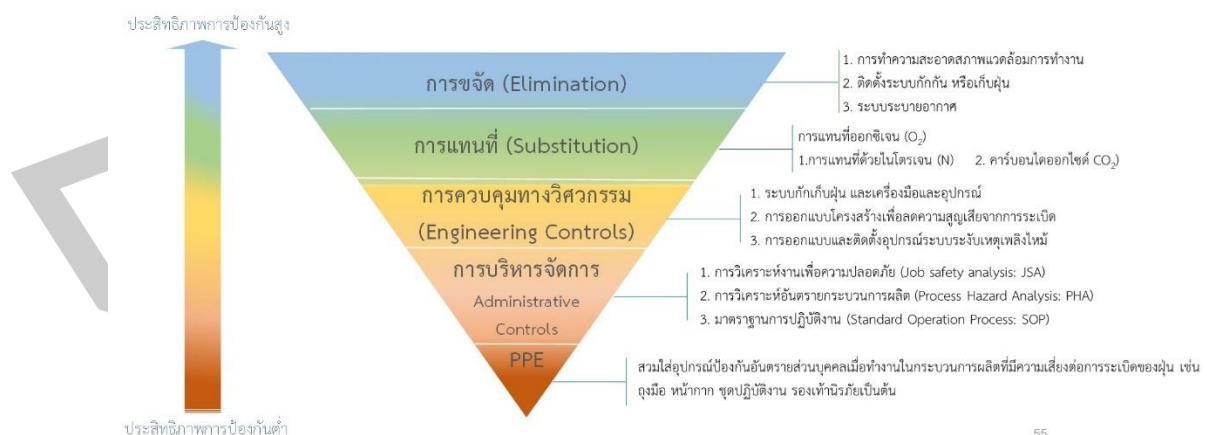
Model Name: Administrative

Priorities with respect to:
Ignition source Form Human error



ภาพที่ 71 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณ การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)

จากกระบวนการสนทนากลุ่มของคณะกรรมการประเมินความเสี่ยงได้กำหนดแนวทางตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ได้แก่ การควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) และการควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) แสดงการคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น เพื่อเรียงลำดับทางเลือกแนวทางในการตัดสินใจ ดังแสดงในตารางที่ 77 และภาพที่ 72



55

ภาพที่ 72 แนวทางการป้องกันด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) จากการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

ตารางที่ 77 การคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น

Hierarchy of control	Dust explosion pentagon	Dust explosion prevention and mitigation	Priorities (%)
การขจัด (Elimination)	Fuel Dispersion	1. Cleaning 2. Venting 3. Dust collector	64.90 27.90 7.20
การแทนที่ (Substitution)	Limiting Oxygen	1. Increased N 2. Increased CO ₂	ไม่ได้ดำเนินการ เพราะต้องใช้ งบประมาณสูง
การควบคุมทาง วิศวกรรม (Engineering Controls)	Ignition source Limiting Oxygen	1. Fire suppression 2. Explosion-wall 3. Explosion-proof equipment	63.70 10.50 25.80
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)	Ignition source Dispersion	1. Process Hazard Analysis: PHA 2. Job safety analysis: JSA 3. Standard Operation Process: SOP 4. Preventive Maintenance (PM)	40.00 22.70 26.50 10.10
PPE	Ignition source Dispersion	Standard Operation Process: SOP	100

พูน ปณ ทิโต ชีเว

4.3.3 การดำเนินการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

จากการคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น ด้วยการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls Model: HCM) ได้นำมาเป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น มีรายละเอียดดังนี้

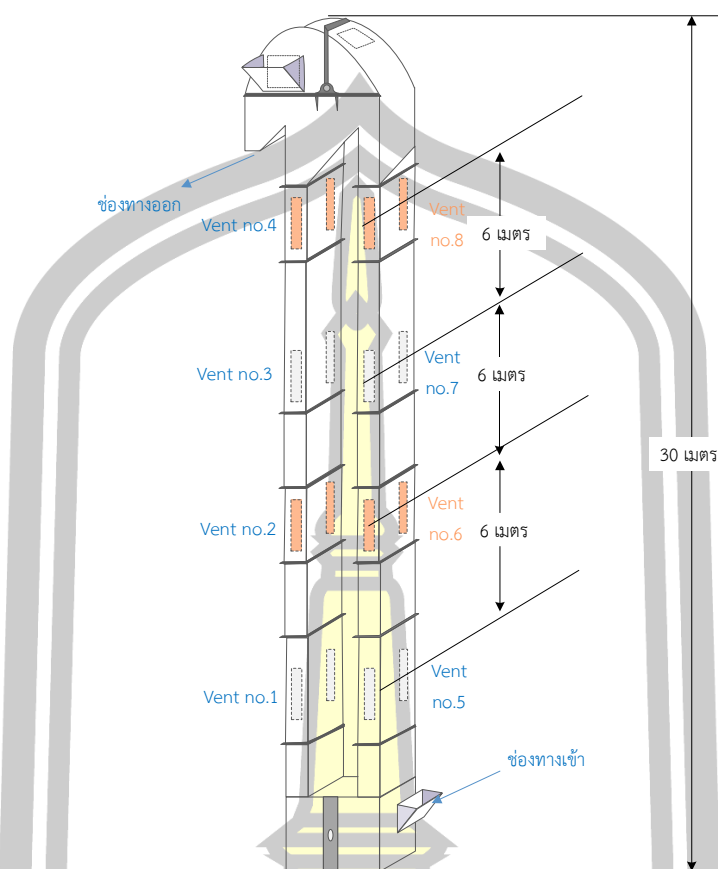
4.2.3.1 การขจัด (Elimination) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยการจัดเชื้อเพลิง (Fuel) และการฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) สถานประกอบการได้มีวิธีการดังต่อไปนี้

1) การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน มีการจัดทำ SOP กำหนดให้มีการทำความสะอาดในพื้นที่ปฏิบัติงานทุก 4 ชั่วโมง โดยเฉพาะพื้นที่มีอุปกรณ์เครื่องจักรทำงานต่อเนื่องตลอดระยะเวลา เพื่อป้องกันการลุกติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้

2) การออกแบบและติดตั้งช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) ในกะพ้อลำเลียงมันเส้น ด้วยการพิจารณาข้อมูลจำเพาะของมันเส้นที่มีค่า K_{st} เท่ากับ 200 Bar m/sec ค่า P_{max} เท่ากับ 7.0 Bar ค่า P_{red} เท่ากับ 0.500 Bar ขนาดช่องระบายและจุดติดตั้งของแผงระบายการระเบิดที่กะพ้อลำเลียงของกะพ้อที่มีความสูง 30 เมตร สามารถหาขนาดของช่องระบาย (Venting Design) จาก L/D กะพ้อที่มีความสูง 12.5 m. ต้องมีการติดตั้งกะพ้อทั้งหมด 8 ตัว ขนาดพื้นที่เท่ากับ 1.333 m² ระยะห่างสูงสุดแต่ละตัวไม่เกิน 6 m. ดังแสดงในตารางที่ 78 และภาพที่ 73

ตารางที่ 78 การคำนวณช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) ในกะพ้อ

ข้อมูลของอุปกรณ์	ระยะห่างสูงสุดของแต่ละ vents	จำนวนการติดตั้ง vents	ขนาดพื้นที่ Vents ขาเดียว	ขนาดพื้นที่ ชั้นต่ำ Vents ส่วนขาขึ้น	ขนาดพื้นที่ ชั้นต่ำ Vents ขาลง
Bucket Elevator 1 m. x 0.5 m. x 12.5 m.	6 m.	8 ตัว	0.333 m ²	1.333 m ²	1.333 m ²



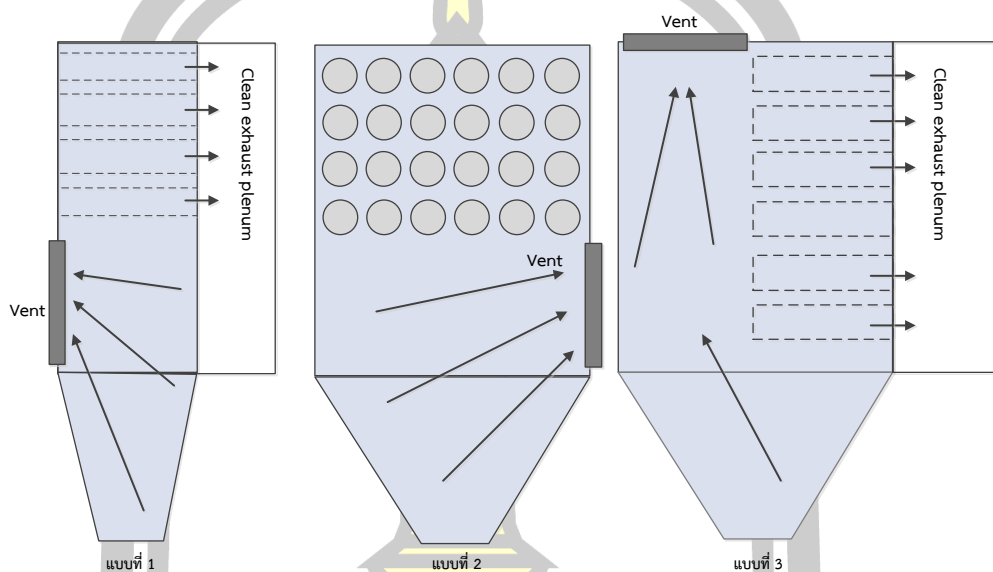
ภาพที่ 73 การออกแบบช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting)

3) การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector) ใช้สำหรับกำจัดฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย สามารถคำนวณตาม NFPA 68 (Standard on explosion protection by deflagration venting) โดยพิจารณาจากชนิดของฝุ่นธัญพืช เพื่อจะได้ทราบค่าดัชนีการระเบิด (K_{st}) ความดันสูงสุด (P_{max}) ความดันกระตุ้นคงที่ (P_{stat}) ความดันลดหลังทำการระเบิด (P_{red}) นอกจากนั้นต้องทราบปริมาตรและสัดส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกรองฝุ่นด้วย สามารถติดตั้งแผงระบายการระเบิดของเครื่องดักฝุ่น ได้ 3 แบบ ได้แก่

แบบที่ 1 ติดตั้งให้ช่องระบายให้พื้นที่ทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าด้านล่างของถุงกรอง ระยะห่างระหว่างถุงกรอง (s) น้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีถุงกรองหรือแผ่นกรอง โดยระยะห่างระหว่างถุงกรอง (s) มากกว่ารัศมีถุงกรอง (r) หรือแผ่นกรอง ให้คำนวณพื้นที่ช่องระบายโดยใช้ด้านที่สกปรกเท่านั้น

แบบที่ 2 ติดตั้งช่องระบายความดันให้สั้นลงไม่ให้ยื่นลงไปต่ำกว่าด้านบนของช่องระบายความดันในระยะอย่างน้อยเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ห่างจากช่องระบายและต้องควบคุมอุปกรณ์ที่เหลือไม่ให้ผ่านช่องระบาย

แบบที่ 3 ติดตั้งช่องระบายความดัน ให้ด้านล่างของช่องระบายอยู่สูงกว่าด้านล่างของอุปกรณ์ และต้องควบคุมอุปกรณ์ที่เหลือไม่ให้ผ่านช่องระบาย ดังแสดงในภาพที่ 74

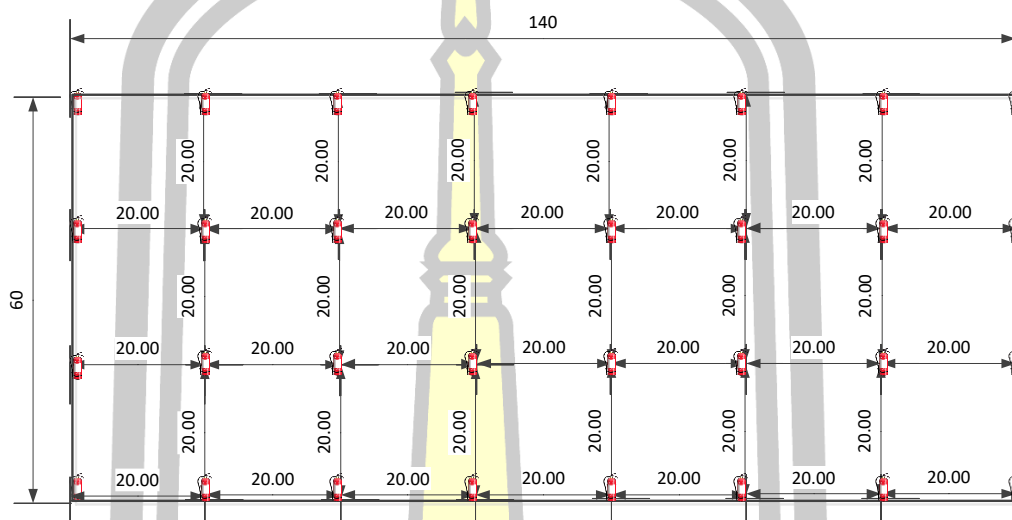


ภาพที่ 74 การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector)

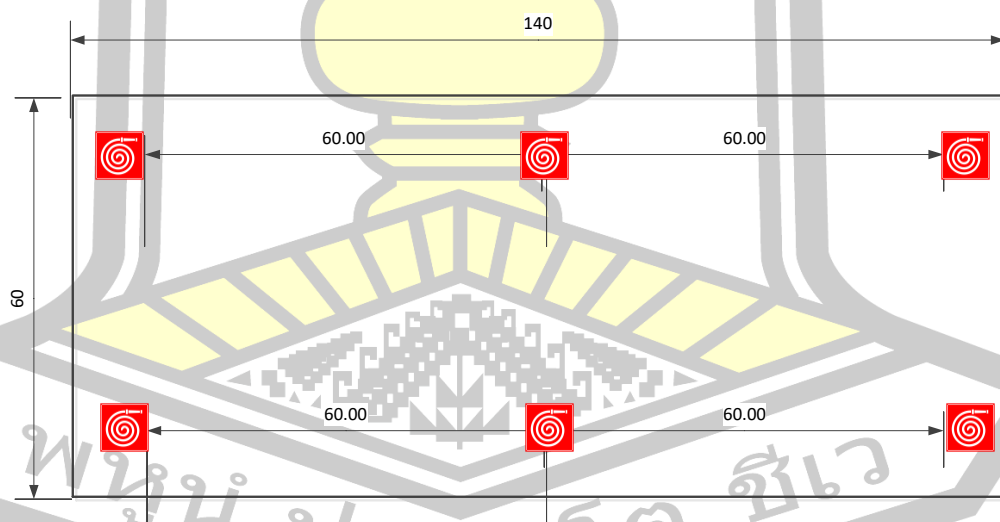
4.2.3.2 การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยการขจัดความร้อน (Ignition) ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) การติดตั้งอุปกรณ์ (explosion-proof equipment) ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิด โดยได้มีการติดตั้งคอมไฟกันระเบิด สวิตช์กันระเบิด และปลั๊กไฟกันระเบิด
- 2) การออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด เป็นการออกแบบโครงสร้างการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด (Blast Resistant Wall) บริเวณพื้นที่จัดเก็บมันเส้น เพื่อให้สามารถทนไฟได้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง
- 3) การออกแบบและติดตั้งระบบรับเหตุเพลิงไหม้ โดยได้มีการพิจารณาพื้นที่เก็บมันเส้นขนาดมากกว่า 1,000 m² ต้องมีระบบดับเพลิงอัตโนมัติ มีการติดตั้ง มีอุปกรณ์ตรวจจับและแจ้งเหตุเพลิงไหม้บริเวณเก็บวัตถุดิบ หรือวัตถุดิบได้และไม่มีคนทำงานประจำ เครื่องดับเพลิงแบบมือถือ ติดตั้งห่างไม่เกิน 20 m. ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร มีการจัดเตรียมน้ำสำรองเพียงพอให้อุปกรณ์ดับเพลิง

ไม่น้อยกว่า 30 นาที การศึกษาครั้งนี้ได้มีการทบทวน และปรับปรุง จำนวนและระยะในการติดตั้งถังดับเพลิงในพื้นที่จัดเก็บมันเส้น การกำหนดระยะในการติดตั้ง ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร และการคำนวณการติดตั้ง และปริมาณน้ำสำรองตามมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 75-77

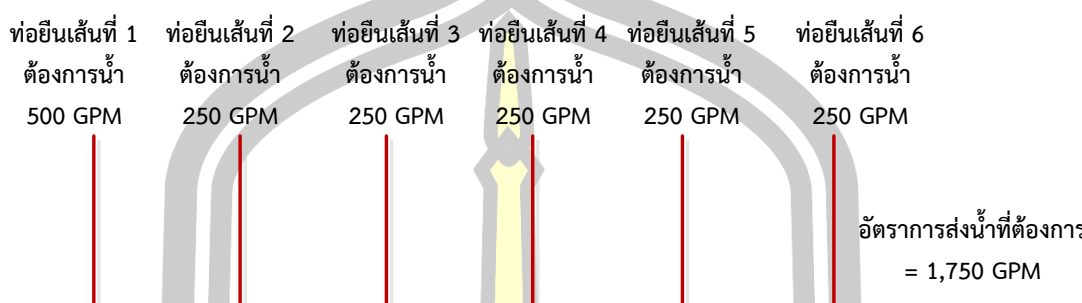


ภาพที่ 75 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้งถังดับเพลิงในพื้นที่จัดเก็บมันเส้น



ภาพที่ 76 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้ง ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร

การคำนวณอัตราการส่งน้ำของโรงงานมันเส้นที่ต้องการเท่ากับ 1,750 GPM ระยะในการสำรองน้ำอย่างน้อย 30 นาที ปริมาณน้ำสำรองอย่างน้อย เท่ากับ 198,712 ลิตร



อัตราการส่งน้ำที่ต้องการเท่ากับ $500+250+250+250+250+250= 1,750$ GPM

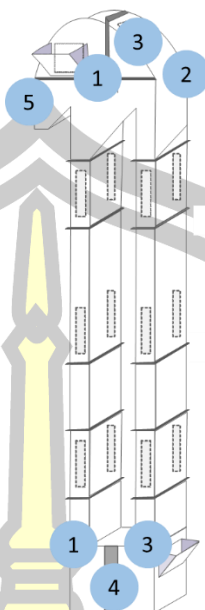
- ระยะในการสำรองน้ำอย่างน้อย 30 นาที

- ปริมาณน้ำสำรองอย่างน้อย $1,750 \times 30 = 52,500$ แกลลอน (198,712 ลิตร)

ภาพที่ 77 การคำนวณการติดตั้ง และปริมาณน้ำสำรองตามมาตรฐาน

4) การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) ในกะพ้อลำเลียงในจุดที่ความเสี่ยงดังนี้ ได้แก่ การติดตั้ง Bearing temperature sensor โดย Sensor จะสอดเข้าไปที่จารบีในตลับ ลูกปืน เพื่อตรวจจับอุณหภูมิของตลับลูกปืนทั้งด้านบนและด้านล่าง การติดตั้ง Surface temperature sensor ติดตั้งหัววัดที่เปลือกของตลับลูกปืน เปลือกมอเตอร์ เปลือก gear box หรือเปลือกเครื่องจักรอื่นๆ เพื่อตรวจจับอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง การติดตั้ง Belt misalignment sensor ติดไว้ที่กะพ้อลำเลียง หรือสายพานลำเลียง เพื่อตรวจจับแนวการเคลื่อนที่และแนวตรงของกะพ้อลำเลียง หรือสายพาน การติดตั้ง Speed switch sensor เพื่อตรวจจับความเร็วของเพลลา ที่ต่ำกว่าความเร็วปกติ และการติดตั้ง Plug/Choke sensor เพื่อใช้วัดระดับหรือการอุดตันของมันเส้น บริเวณทางออกของกะพ้อลำเลียง ดังแสดงในภาพที่ 78

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพที่ 78 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) ในกะพ้อ

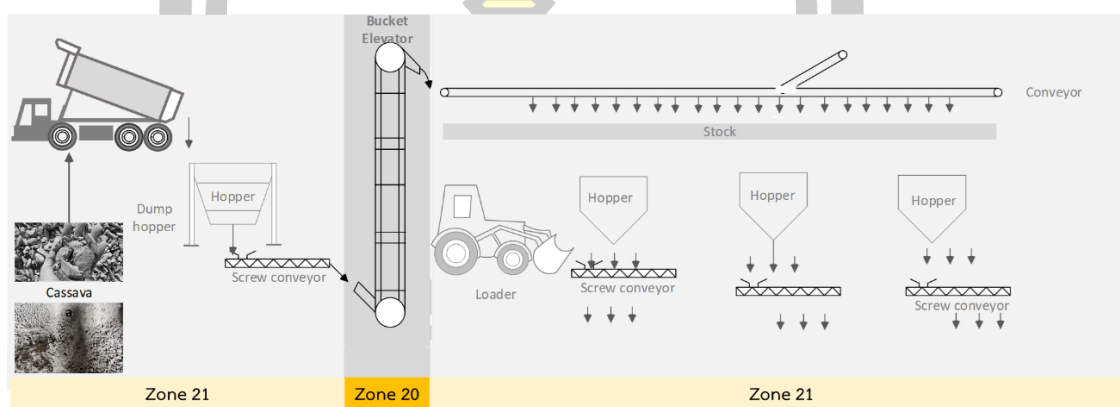
4.2.3.3 การบริหารจัดการ (Administrative Controls) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) โดยได้มีการจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ออกเป็น 3 โซน ตามมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (International Electrotechnical Commission: IEC) ได้แก่ โซน 20 โซน 21 และ โซน 22 ซึ่งได้มีการชี้บ่งอันตรายในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น 2 โซน คือ โซน 20 พบในกะพ้อ พื้นที่ที่มีสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแป้งฝุ่น ปรากฏตลอดเวลา และ โซน 21 ดังแสดงในตารางที่ 79 และภาพที่ 79

พูน ปณ จิตโต ชีเว

ตารางที่ 79 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification)

โซน	ความหมาย
20	พื้นที่ที่มีสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่น ปรากฏตลอดเวลา
21	พื้นที่ที่สามารถพบเจอสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่น ได้เป็นครั้งคราวภายในการทำงานทั่วไป
22	พื้นที่ที่มีโอกาสน้อยหรือไม่เจอสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่นเลยภายใต้การทำงานทั่วไป หรือหากพบเจอก็จะเป็นเพียงช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น



ภาพที่ 79 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ในกระบวนการผลิต

2) การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) เป็นการทบทวนมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) ทั้งนี้ต้องครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor) ได้แก่ การประเมิน การจัดทำแผนการตรวจสอบการดูแลรักษาความสะอาด วัสดุ อุปกรณ์ ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น การจัดทำทะเบียนความเสี่ยงของพื้นที่ ที่มีการสะสมของฝุ่น และมีแผนในการดูแลรักษาความสะอาดในพื้นที่ การดูแลรักษาความสะอาดเป็นไปตามมาตรฐาน Housekeeping ลดการสะสมของฝุ่นบริเวณชั้น ผนัง คาน ท่อและพื้นผิวเพดานในระบบไม่เกิน 0.32 ซม. มีการอบรมอันตรายในพื้นที่ปฏิบัติงาน และการระเบิดฝุ่น การบันทึกผลการตรวจสอบพื้นที่ปฏิบัติงาน และการฝึกอบรม

3) การจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) เพื่อป้องกันการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยการจัดทำมาตรฐานการสื่อสารให้พนักงานและผู้รับเหมาทราบ (เช่น บ้าย แผนที่ หรือข้อมูลอ้างอิงอื่น ๆ) เกี่ยวกับพื้นที่อันตรายจากฝุ่นที่ติดไฟ การจัดทำมาตรฐาน และแผนการบำรุงรักษา ระบบสายดิน (Grounding) ของอุปกรณ์ เครื่องจักร การอบรมความปลอดภัยให้กับผู้รับเหมาเกี่ยวกับอันตรายจากฝุ่นในโรงงาน งานที่เกิดประกายไฟ รวมถึงกฎระเบียบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง การจัดทำมาตรฐานเพื่อจัดอบรมให้ผู้ปฏิบัติงาน ช่างซ่อมบำรุง และผู้รับเหมา เกี่ยวกับการซ่อมบำรุง และการทำงานในพื้นที่อับอากาศ รวมทั้งระเบียบความปลอดภัยอื่นๆ ได้แก่ การป้องกันการระเบิด การปฏิบัติงานที่เกี่ยวกับความร้อน (Hot work) แผนฉุกเฉินต่างๆ ข้อกำหนดในการต่อสายดิน การทำความสะอาดวัสดุที่ติดไฟ และห้ามสูบบุหรี่ในพื้นที่อันตราย การป้องกันและระงับอัคคีภัย เป็นต้น การจัดทำมาตรฐานสำหรับรถยก หรือรถยนต์ หรือเครื่องยนต์ที่ใช้งานบริเวณที่มีการฟุ้งกระจายของฝุ่นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นไฟที่ท่อไอเสีย

สามารถสรุปผลการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมัน ด้วยการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls Model: HCM) สามารถแสดงผลก่อน และหลังการดำเนินงานได้ดังแสดงในตารางที่ 80



ตารางที่ 80 การคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดฝุ่น

มาตรการป้องกัน		ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ
การขจัด (Elimination)	1. การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน 2. การออกแบบและติดตั้งช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) 3. การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น	1. กำหนดการทำความสะอาดวันละครั้ง 2. ไม่มีการติดตั้งระบบระบายอากาศ 3. การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น แต่ไม่ได้ตามมาตรฐาน	1. กำหนดการทำความสะอาดทุก 4 ชั่วโมง 2. มีการติดตั้งระบบระบายอากาศ แต่จำนวนยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานจำนวน 4 ชุด 3. การปรับปรุงระบบกำจัดฝุ่น ให้เป็นไปตามมาตรฐาน
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)	1. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ 2. การติดตั้งอุปกรณ์ 3. โครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด	1. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ 2. การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความร้อน 3. โครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด	1. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ 2. การติดตั้งอุปกรณ์ 3. โครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด
การบริหารจัดการ (Administrative)	1. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย 2. มาตรฐานการปฏิบัติงาน 3. การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต 4. การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน	1. มีการวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) 2. มีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) 3. มีการทบทวนมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP)	1. มีทบทวน ปรับปรุง และอบรมการวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) มีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) และมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP)

4.4 การศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่น ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การศึกษาผลการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls Model: HCM) มีการประเมินผลการปรับปรุง 3 ประเด็น ได้แก่ การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) การประเมินการปรับปรุงตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) และการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) หลังดำเนินระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) หลังดำเนินระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นก่อนดำเนินการความเสี่ยงจัดอยู่ในระดับที่ 5 (ความเสี่ยงสูงมาก) ลดลงเหลือระดับที่ 4 (ความเสี่ยงสูง) ดังแสดงในตารางที่ 81

ตารางที่ 81 การประเมินระดับความเสี่ยง (Risk level) หลังดำเนินระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

สาเหตุ	ก่อนดำเนินการ			หลังดำเนินการ		
	โอกาสการเกิด	ความรุนแรง	ระดับความเสี่ยง	โอกาสการเกิด	คะแนนความเสี่ยง	ระดับความเสี่ยง
การระเบิดฝุ่น	5	3	5	3	3	4
ออกซิเจน	5	3	5	5	3	4
เชื้อเพลิง	5	3	5	3	3	4
หมอกฝุ่น	5	3	5	3	3	4
การฟุ้งกระจายของฝุ่น	5	3	5	3	3	4
แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	5	3	5	3	3	4
Gate 1 การฟุ้งกระจายของฝุ่น	5	3	5	3	3	4
Gate 2 ความร้อน	5	3	5	3	3	4
Gate 3 ความผิดพลาดของพนักงาน	3	3	4	3	3	4
Gate 4 ความผิดพลาดของเครื่องจักร	5	3	5	3	3	4
Gate 5 กะป้อลำเลียง	5	3	5	3	3	4
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)	5	3	5	3	3	4
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์	4	3	5	3	3	4

มาตรการป้องกัน		ก่อนดำเนินการ				หลังดำเนินการ			
		Risk score	Severity Level	Risk score	Severity level	Risk score	Severity level	Risk score	Severity level
การจัด (Elimination)	1. การทำความสะอาด	4	5	0.9	18.0	4	5	0.1	2.0
	สภาพแวดล้อมการ	4	5	1.0	20.0	4	5	0.1	2.0
	ทำงาน	4	5	1.0	20.0	4	5	0.1	2.0
	2. การติดตั้งระบบ								
	ระบายอากาศ								
	3. การติดตั้งระบบ								
	กำจัดฝุ่น								

ตารางที่ 82 การเปรียบเทียบการให้คะแนนตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ก่อนและหลังการปรับปรุง (ต่อ)

มาตรการป้องกัน		ก่อนดำเนินการ				หลังดำเนินการ			
		Risk score	Severity level	Risk score	Severity level	Risk score	Severity level	Risk score	Severity level
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)	1.การออกแบบและติดตั้งระบบรับเหตุเพลิงไหม้	4	4	0.9	14.4	4	4	0.6	9.60
		4	5	1.0	20.0	4	5	0.6	12.0
		4	5	1.0	20.0	4	5	0.5	10.0
	2. การติดตั้งอุปกรณ์ 3. โครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด								
การบริหารจัดการ (Administrative)	1. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย	4	5	0.9	18.0	4	5	0.8	16.0
		4	5	0.9	18.0	4	5	0.8	16.0
	2. มาตรฐานการปฏิบัติงาน	4	5	0.9	18.0	4	3	0.8	9.60
		4	5	0.9	18.0	4	5	0.8	6.0
	3. การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต								
	4. การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน								
คะแนนความเสี่ยงเฉลี่ย		12.29				5.95			
ร้อยละประสิทธิภาพการป้องกัน		ร้อยละ 48.41							

4.3.3 การประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR)

การประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) สามารถหาค่า BCR ได้จากตั้งสมการ

$$BCR = PVB/PVC$$

$$BCR = \sum_{n=0}^t \left(\frac{\frac{R_t}{(1+r)^t}}{\frac{C_t}{(1+r)^t}} \right)$$

กำหนดให้	BCR หมายถึง	อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน
	PVB หมายถึง	มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม
	PVC หมายถึง	มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม
	R_t หมายถึง	รายได้ที่คาดว่าจะได้ในปีที่ t
	C_t หมายถึง	รายจ่ายที่คาดว่าจะได้ในปีที่ t
	r หมายถึง	อัตราคิดลดคิดเป็นร้อยละ t ปี ที่ 0 ถึง n

ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2565-2566 จากการดำเนินกิจกรรมการป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) และการบริหารจัดการ (Administrative Controls) รวม ต้นทุนรวมปัจจุบัน (Total Present Cost) ก่อนกำหนดค่าอัตราคิดลดร้อยละ 5 เท่ากับ 2,600,000 บาท ดังแสดงในตารางที่ 83

ตารางที่ 83 ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2565-2566

การกำหนดมาตรการป้องกัน	งบประมาณ (บาท)
การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination)	
1. การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน (Cleaning)	-
2. การปรับปรุงติดตั้งระบบระบายอากาศ (Venting)	750,000
3. การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collector)	200,000
4. บำรุงรักษาระบบ	200,000
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)	
1. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ เพิ่ม (Fire suppression system)	500,000
2. การติดตั้งอุปกรณ์ (Explosion-proof equipment)	200,000
3. การออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด (Explosion-wall)	500,000
4. บำรุงรักษาระบบ	200,000

ตารางที่ 83 ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2565-2566 (ต่อ)

การกำหนดมาตรการป้องกัน	งบประมาณ (บาท)
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)	
1. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (JSA)	-
2. มาตรฐานการปฏิบัติงาน (SOP)	-
3. การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (PHA)	-
4. กิจกรรมอบรม ความปลอดภัยจากการทำงาน เพื่อส่งเสริมสำนึกความปลอดภัย	50,000
รวม	2,600,000

ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2565-2566 จากการดำเนินกิจกรรมการป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) และการบริหารจัดการ (Administrative Controls) รวม ต้นทุนรวมปัจจุบัน (Total Present Cost) เท่ากับ 2,420,340.14 บาท (กำหนดค่าอัตราคิดลดร้อยละ 5) ดังแสดงในตารางที่ 84

ตารางที่ 84 ต้นทุนโครงการ (Cost) ระหว่างปี 2564-2566

ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit)	2564	2565	2566
การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination)	150,000.00	1,000,000.00	
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls)	-	-	1,400,000.00
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)	20,000.00	20,000.00	10,000.00
รวม (Cost)	170,000.00	1,020,000.00	1,410,000.00
ต้นทุนปัจจุบันสุทธิ (Present Cost)	70,000.00	971,428.57	1,278,911.56
ต้นทุนรวมปัจจุบัน (Total Present Cost)	2,420,340.14		

ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit) ระหว่างปี 2564-2566 สามารถลดต้นทุนอุบัติเหตุจากฝุ่นระเบิดทางตรง ได้แก่ ค่ารักษาพยาบาล และค่าชดเชยจากการบาดเจ็บ และความเสียหายของทรัพย์สินจากการเกิดอุบัติเหตุ และต้นทุนอุบัติเหตุทางตรงทางอ้อม ได้แก่ การบริหารและกฎหมาย การสูญเสียเวลาในการผลิต การจ้างแรงงานทดแทน รวมเป็นเงิน 5,764,172.34 บาท (กำหนดค่าอัตราคิดลดร้อยละ 5) ดังแสดงในตารางที่ 85

ตารางที่ 85 ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit) ระหว่างปี 2564-2566

ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit)	2564	2565	2566
ค่ารักษาพยาบาล และค่าชดเชยจากการบาดเจ็บ	-	600,000.0	600,000.0
ความเสียหายของทรัพย์สินจากการเกิดอุบัติเหตุ	-	1,200,000.00	1,200,000.00
การบริหารและกฎหมาย	-	50,000.00	50,000.00
การสูญเสียเวลาในการผลิต	-	1,200,000.00	1,200,000.00
การจ้างแรงงานทดแทน	-	50,000.00	50,000.00
รวม (Total)	-	3,100,000.00	3,100,000.00
ผลประโยชน์ปัจจุบันสุทธิ (Present Benefit)	-	2,952,380.95	2,811,791.38
รวมผลประโยชน์ปัจจุบันสุทธิ (Total Present Benefit)	5,764,172.34		

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาผลจากปัจจัยอื่นๆ (Attribution) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) ได้แก่ ความพร้อมของพนักงาน ร้อยละ 50 ความพร้อมของระบบเครื่องจักร ร้อยละ 50 และ ความพร้อมของระบบป้องกันการระเบิด ร้อยละ 10 ดังแสดงในตารางต่อไปนี้ ดังแสดงในตารางที่ 86

ตารางที่ 86 ปัจจัยอื่นๆ (Attribution)

ผลกระทบกรณีพื้นฐาน (Base Case Impact)	2564	2565
ความพร้อมของพนักงาน ร้อยละ 50	300,000.00	300,000.00
ความพร้อมของระบบเครื่องจักร ร้อยละ 50	600,000.00	600,000.00
ความพร้อมของระบบป้องกันและระงับอัคคีภัย ร้อยละ 30	600,000.00	600,000.00
ความพร้อมของระบบป้องกันการระเบิด ร้อยละ 10	120,000.00	120,000.00
รวม (Base Case Impact)	1,620,000.00	1,620,000.00
ผลกระทบกรณีฐานปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Present Base Case Impact)	1,620,000.00	1,542,857.14
ผลกระทบกรณีฐานมูลค่ารวมปัจจุบัน (Total Present Base Case Impact)	3,162,857.14	

ดังนั้น สามารถประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{BCR} &= \text{PVB/PVC} \\ &= 2,601,315.19 / 2,420,340.14 \\ &= 1.07 \end{aligned}$$

BCR > 1 แสดงว่าผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนมีความคุ้มค่าในการลงทุน อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) เท่ากับ ร้อยละ 10.86 โครงการนี้คำนวณมูลค่าผลประโยชน์ปัจจุบันสุทธิ (NPV) โดยใช้อัตราคิดลดร้อยละ 5



บทที่ 5

สรุป และอภิปรายผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. ศึกษาขนาดของฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น พบค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นมันเส้นเท่ากับ $16.71\ \mu\text{m}$ ซึ่งสามารถเกิดระเบิดได้ (NFPA ระบุว่าฝุ่นที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $420\ \mu\text{m}$)
2. การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น พบว่า โอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น ร้อยละ 98.50 มาจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น ร้อยละ 99.80 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน ร้อยละ 98.00 ระดับการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นอยู่ในระดับที่ 5 (ความเสี่ยงสูงมาก จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที)
3. ออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นตามลำดับขั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) ที่มีทั้งหมด 5 ลำดับขั้น ซึ่งสถานประกอบการสามารถดำเนินการได้ 4 ลำดับขั้น ได้แก่ การป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม Engineering controls) การบริหารจัดการ (Administrative Controls) และอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal protective equipment)
4. ผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นหลังดำเนินระบบป้องกันการปรับปรุงระบบ พบว่า ความเสี่ยงลดลงจากระดับสูงมากเป็นระดับความเสี่ยงสูง ประสิทธิภาพการป้องกันเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.74 และการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) มากกว่า 1 ซึ่งหมายถึงการลงทุนในการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นมีความคุ้มค่า

5.2 อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นมันเส้นมีประมาณ $16.71\ \mu\text{m}$ ซึ่งสอดคล้องกับสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National Fire Protection Association: NFPA) ที่ระบุว่าขนาดฝุ่นที่สามารถเกิดการระเบิดต้องมีขนาดเล็กกว่า $420\ \mu\text{m}$ (NFPA 654, 2020) เช่นเดียวกับการศึกษาขนาดของฝุ่นจากเส้นใยฟางข้าวโพดที่มีขนาด $120\ \mu\text{m}$ ฝุ่นไม้เนื้ออ่อนที่ผ่าน

การปรับสภาพมีขนาด 109 μm และเซลลูโลสไมโครคริสตัลลีน (matrices: microcrystalline cellulose) ที่มีขนาด 60 μm (Zhang et al., 2023) สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้เช่นกัน

การศึกษาปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น เป็นการประเมินความเสี่ยงการระเบิดฝุ่นด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค FFTA-AHP มาใช้วิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริงอย่างครอบคลุม กำหนดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงได้อย่างชัดเจน ตลอดจนสามารถนำไปตัดสินใจในการเลือกแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุ ลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม (ศราวุฒิ ไชยรัตน์, 2564) (Li et al., 2017; Liu et al., 2020; Pang et al., 2023) จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า โอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้น ร้อยละ 98.50 มาจากการฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ร้อยละ 99.80 แหล่งกำเนิดประกายไฟ ร้อยละ 98.00 สอดคล้องกับการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นในโรงงานอุตสาหกรรม และการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของมีเทนในเหมืองถ่านหินใต้ดิน พบความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นร้อยละ 90.77 และปัจจัยสำคัญที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิด คือ แหล่งกำเนิดประกายไฟ ร้อยละ 99.85 (Shi et al., 2018; Yuan et al., 2015) อย่างไรก็ตามแหล่งกำเนิดประกายไฟยังถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการระเบิดเกิดขึ้น การศึกษาครั้งนี้พบความเสี่ยงจากเหตุการณ์ความผิดพลาดจากผู้ปฏิบัติงาน ร้อยละ 91.53 % (การทำงานที่เร่งรีบ ร้อยละ 24.10 ความเครียด ร้อยละ 12.40 การขาดความรู้ ร้อยละ 6.50 การละเมิดกฎ ร้อยละ 57.10 และ ความล้มเหลวของเครื่องจักร ร้อยละ 98.18 โอกาสในการเกิดในแต่ละเหตุการณ์นั้นอาจมีความแตกต่างกันจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ดังกรณีการศึกษาของ (Abuswer et al., 2013; Wei et al., 2020b; Yuan et al., 2015a) แหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของการระเบิดฝุ่น แบ่งออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่ เปลวไฟและความร้อนโดยตรง ร้อยละ 22.00 งานที่ทำให้เกิดประกายร้อน ร้อยละ 20.00 ไฟฟ้าสถิต ร้อยละ 10.00 ประกายไฟ ร้อยละ 9.00 การลุกจุดติดไฟเอง ร้อยละ 8.00 ประกายไฟจากแรงเสียดทาน ร้อยละ 7.00 พื้นผิวร้อน ร้อยละ 6.00 นอกจากนี้ การระเบิดฝุ่นอินทรีย์และการระเบิดทางเคมียังส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตบาดเจ็บ และทรัพย์สินเสียหายจำนวนมาก (Reason, 2014; Zhang et al., 2017) ดังนั้นวิธีการประเมินความเสี่ยงที่มีผลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการระบุปัจจัยเสี่ยงและการวางแผนสำหรับมาตรการป้องกันและควบคุมความเสี่ยง (Hyun et al., 2015; Kanuganti et al., 2017)

ออกแบบ และปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่น (Dust explosion pentagon) ที่สอดคล้องการการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นในหลายงานที่พิจารณาประเด็นดังกล่าว (Barozzi et al., 2020; Eckhoff, 2003) โดยได้มีการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นด้วยการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls Model: HCM) มาใช้ในการควบคุมและลดผลกระทบ

จากการระเบิดฝุ่น (Abuswer et al., 2013; Amyotte & Eckhoff, 2010) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการนำ HCM มาใช้นั้นต้องมีการพิจารณาและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับความเสี่ยง และข้อจำกัดขององค์กร (Ajslev et al., 2022) จากการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยใช้พื้นฐานของ HCL ในประเด็นการจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) และการบริหารจัดการ (Administrative controls) ซึ่งไม่ได้เน้นดำเนินการในประเด็น การแทนที่ (Substitution) และสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPE) จะมีความเหมือนกับการศึกษาของการนำหลักการ HCM ไปประยุกต์ใช้ในสถานบริการด้านสุขภาพในอังกฤษและสกอตแลนด์ ที่การเลือกหัวข้อในการควบคุมความเสี่ยงเพื่อที่จะให้สอดคล้องกับบริบทและข้อจำกัดในองค์กรในประเด็นการแทนที่ (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) และการบริหารจัดการ (Administrative controls) (Liberati et al., 2017) การศึกษาผลของ HCM ครั้งนี้เป็นไปตามหลักการของ Hierarchy of Controls (Atkinson & Westall, 2010; Reason, 2014) ที่แสดงให้เห็นถึงการป้องกันการระเบิดฝุ่นจากการจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering controls) มีประสิทธิภาพสูงกว่าการบริหารจัดการ (Administrative controls)

ศึกษาผลการออกแบบและปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น แสดงให้เห็นถึงระดับความเสี่ยงที่ลดลง ประสิทธิภาพความปลอดภัยเพิ่มขึ้นคล้ายหลายๆ การศึกษาที่แสดงให้เห็นถึงหลักการ HCM สามารถลดความเสี่ยง เพิ่มประสิทธิภาพความปลอดภัย (Atkinson & Westall, 2010; Reason, 2014) ผลการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost ratio: BCR) ในช่วงระยะเวลาในการดำเนินการ ปี 2564-2566 BCR แสดงถึงผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนมีความคุ้มค่าในการลงทุน อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) ร้อยละ 10.86 จากการศึกษาในหลายๆ งานยังไม่พบผลการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนสำหรับโครงการเกี่ยวกับการป้องกันการระเบิดฝุ่น แต่พบในการประเมินจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนสำหรับโครงการจัดทำแผนงานควบคุมและลดความเสี่ยงในอนาคต (Biatas, 2016) การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการป้องกันอุบัติเหตุสำหรับผู้รับเหมาในงานก่อสร้าง (Ikpe et al., 2012; Ikpe, 2009) การประเมินอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนสำหรับโครงการกำหนดงบประมาณเพื่อบรรเทาผลกระทบจากภัยพิบัติ (Shreve & Kelman, 2014) และในประเทศไทยพบการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการการลดอุบัติเหตุในวงเวียนของนักศึกษามหาวิทยาลัยขอนแก่น (วัลลภ นุกิจ และคณะ, 2022) จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดระเบิดของฝุ่นมันเส้นด้วยเครื่องมือประเมินความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้เห็นถึงปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่แท้จริงที่จะนำไปสู่การระเบิดฝุ่น สามารถนำไปออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นโดยการประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องกับบริบทขององค์กร จะทำให้เกิดผลการ

ปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นทั้งด้านระดับความเสี่ยงลดลง ประสิทธิภาพความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนมีความคุ้มค่าในการลงทุน และมีอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ

5.3 ข้อเสนอแนะการศึกษา

5.3.1 จากการศึกษาครั้งนี้ ทำให้ได้องค์ความรู้ใหม่ในด้านขนาดของฝุ่นมันสำปะหลังที่ได้จากการหาขนาดของฝุ่นมันเส้นด้วยเครื่อง FE-SEM รุ่น MiRA3: TESCAN ทำให้ทราบขนาดของฝุ่นที่วัดได้ มีขนาดค่าเฉลี่ยเท่ากับ $16.71 \mu\text{m}$. ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้

5.3.2 ปัจจัยพื้นฐาน และการประเมินความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นครั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) คิดเป็นร้อยละ 99.80 แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน คิดเป็นร้อยละ 98.00 ซึ่งในการควบคุมการฟุ้งกระจายของฝุ่นอาจดำเนินการได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดของกระบวนการผลิต และขนาดของฝุ่นที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่ในประเด็นที่สำคัญที่จะสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดการระเบิดฝุ่นได้คือ ปัจจัยจากความร้อน ที่เกิดจากความล้มเหลวจากคน (Human failure) โดยเฉพาะในประเด็นของความไม่รู้ การทำงานภายใต้ภาวะกดดัน ความเครียด การไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบ ที่ต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติม และความล้มเหลวจากเครื่องจักร (Machine failure)

5.3.3 การประยุกต์ใช้ตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ในการควบคุม 5 องค์ประกอบของการระเบิด (Five elements of dust explosion) และมีการประเมินผลจาก Protection factor สามารถลดความเสี่ยงได้ร้อยละ 48.41 การควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ การขจัด (Elimination) การแทนทดแทน (Substitution) การควบคุมทางวิศวกรรมหลายรูปแบบ (Engineering multiple) การควบคุมทางวิศวกรรมรูปแบบเดียว (Engineering single) การเตือน (Warning)

5.3.4 จุดแข็งของการศึกษาครั้งนี้ คือ การประยุกต์ใช้กระบวนการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FFTA-AHP ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของปัจจัยที่ทำให้เกิดการระเบิดฝุ่นมันเส้นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นจากหลักการทางตรรกวิทยาในการพิจารณาสาเหตุจากผล และแจกแจงเหตุการณ์พื้นฐานที่เป็นสาเหตุย่อยของการทำให้เกิดการระเบิด แสดงค่าโอกาสการเกิดการระเบิดฝุ่นออกมาเป็นค่าร้อยละ เพื่อความชัดเจนในการนำมาประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง และกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน นำข้อมูลที่ได้ไปพิจารณาในการดำเนินการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น เพื่อผลการปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดฝุ่น

5.3.5 จุดอ่อนของการศึกษาครั้งนี้ คือ กระบวนการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FFTA ที่มาจากกระบวนการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงจากคณะกรรมการด้านความปลอดภัยขององค์กร และนักวิจัย ที่มีกระบวนการที่ชัดเจน แต่เป็นเพียงการประเมินจากสถานประกอบการเพียง 1 แห่งเท่านั้น ซึ่งอาจมีความแตกต่างด้านจากกระบวนการผลิต และทักษะ องค์ความรู้ของผู้ประเมิน ผลการประเมินความเสี่ยงอาจมีความเหมือน หรือต่างจากองค์กรอื่นได้ อย่างไรก็ตาม องค์กรอื่นที่ความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่นในกระบวนการผลิตอื่นๆ สามารถนำองค์ความรู้ และเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ของตนเองได้

5.3.6 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งถัดไป ควรมีการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ ในกระบวนการอื่นๆ ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น เช่น กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง และการประยุกต์ใช้เทคนิค Fuzzy ควรนำโปรแกรมสำเร็จรูปมาช่วยวิเคราะห์เพื่อให้ผลการประเมินมีความแม่นยำ ตรงกับค่าความเป็นจริงให้มากที่สุด



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2553). คู่มือการจัดการความปลอดภัยโรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้. บริษัท ธรวิพัฒน์ จำกัด.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2562). สารสนเทศ เศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2563.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2563). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2563.
- วัลลภ นุกิจ, ญัฐณี ขา ศรีแสง, พีระพัฒน์ สร้อยวิทยา, สุภัทรา สิมะลี, & กนกพร มาลาเพชร. (2022). การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการการลดอุบัติเหตุในวงเวียนของ นักศึกษามหาวิทยาลัยขอนแก่น.วารสารวิจัยวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, 6(1), 126-137.
- ศราวุฒิ ไชยรัตน์, อ Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007). Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1), 7-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>
- อารุณ เกตุสาคร (2564). การวิเคราะห์ต้นทุนแห่งความล้มเหลวและการวิเคราะห์ เชิงลำดับขั้นสำหรับ ประเมินความเสี่ยงการเกิดฝุ่นระเบิดในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ, 14(1), 138-153.
- Abuswer, M., Amyotte, P., Khan, F., & Morrison, L. (2013). An optimal level of dust explosion risk management: Framework and application. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1530-1541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.018>
- Ajslev, J. Z. N., Møller, J. L., Andersen, M. F., Pirzadeh, P., & Lingard, H. (2022). The Hierarchy of Controls as an Approach to Visualize the Impact of Occupational Safety and Health Coordination. *International Journal of Environmental research and public health*, 19(5), 2731. <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/5/2731>
- Alhassan, H., Peleato, N., & Sadiq, R. (2023). Mercury risk reduction in artisanal and small-scale gold mining: A Fuzzy AHP-Fuzzy TOPSIS hybrid analysis. *Resources Policy*, 83, 103744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103744>

- Amyotte, P. R. (2014). Some myths and realities about dust explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), 292-299.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.013>
- Amyotte, P. R., & Eckhoff, R. K. (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17(1), 15-28.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jchas.2009.05.002>
- Amyotte, P. R., Pegg, M. J., & Khan, F. I. (2009). Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 87(1), 35-39.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2008.06.007>
- Atkinson, A. R., & Westall, R. (2010). The relationship between integrated design and construction and safety on construction projects. *Construction Management and Economics*, 28(9), 1007-1017.
<https://doi.org/10.1080/01446193.2010.504214>
- Barozzi, M., Copelli, S., Scotton, M. S., & Torretta, V. (2020). Application of an Enhanced Version of Recursive Operability Analysis for Combustible Dusts Risk Assessment. *International Journal of Environmental research and public health*, 17.
- Białas, A. (2016). Cost-benefits aspects in risk management. *Polish Journal of Management Studies*, 14.
- Cao, A., Dou, L., Cai, W., Gong, S., Liu, S., & Jing, G. (2015). Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 1-9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.05.001>
- Dai, Z., & Wang, X. (2022). Bivariate macro-level safety analysis of non-motorized vehicle crashes and crash-involved road users. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(6), 978-990.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.11.002>
- Ebadat, V. (2010). Dust explosion hazard assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(6), 907-912.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.05.006>

- Eckhoff, R. K. (2003). Chapter 1 - Dust Explosions—Origin, Propagation, Prevention, and Mitigation: An Overview. In R. K. Eckhoff (Ed.), *Dust Explosions in the Process Industries (Third Edition)* (pp. 1-156). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075067602-1/50002-0>
- Eckhoff, R. K., & Li, G. (2021). Industrial Dust Explosions. A Brief Review. *Applied Sciences*, 11(4).
- Farrow, S. (2004). Using risk assessment, benefit-cost analysis, and real options to implement a precautionary principle. *Risk Analysis: An International Journal*, 24(3), 727-735.
- Guan, W., Jin, M., Dong, C., & Gong, H. (2023). Analysis on research trends with dust explosions by bibliometric approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104958>
- Holbrow, P., Lunn, G. A., & Tyldesley, A. (2002). Explosion venting of bucket elevators. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(5), 373-383. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00021-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00021-9)
- Hyun, K.-C., Min, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I.-M. (2015). Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 121-129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.007>
- Ikpe, E., Hammon, F., & Oloke, D. (2012). Cost-Benefit Analysis for Accident Prevention in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(8), 991-998. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000496](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000496)
- Ikpe, E. O. (2009). Development of cost benefit analysis model of accident prevention on construction projects.
- Ikwan, F., Sanders, D., & Hassan, M. (2021). Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 73, 104597. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104597>

- Jurca, A. M., Paraian, M., & Vatavu, N. (2022). Explosion prevention and mitigation in plants which process, generate and store combustible dusts. *MATEC Web Conf.*, 354, 00041. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202235400041>
- Kannan, R., & Naveen, R. (2024). Assessment of self-perceived risk and risk rating among chemical sprayers in selected tea plantations in South India. *International Journal of Occupational Safety and Health*, 14(1), 1-6.
- Kanuganti, S., Agarwala, R., Dutta, B., Bhanegaonkar, P. N., Singh, A. P., & Sarkar, A. K. (2017). Road safety analysis using multi criteria approach: A case study in India. *Transportation Research Procedia*, 25, 4649-4661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.299>
- Kim, T.-H., Ahn, S., Lee, T.-O., Kim, S. B., & Park, Y. J. (2013). Improvement of Educational Contents to Enhance the Efficiency of Construction Worksite Safety Training. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 13(1), 75-83.
- Liberati, E. G., Peerally, M. F., & Dixon-Woods, M. (2017). Learning from high risk industries may not be straightforward: a qualitative study of the hierarchy of risk controls approach in healthcare. *International Journal for Quality in Health Care*, 30(1), 39-43. <https://doi.org/10.1093/intqhc/mzx163>
- Li, X., Fan, Y., Shaw, J. W., & Qi, Y. (2017). A Fuzzy AHP Approach to Compare Transit System Performance in US Urbanized Areas. *Journal of Public Transportation*, 20(2), 66-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.5038/2375-0901.20.2.4>
- Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of Fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161, 113738. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>
- Marhavidas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K., & Koulouriotis, D. E. (2022). Safety-assessment by hybridizing the MCDM/AHP & HAZOP-DMRA techniques through safety's level colored maps: Implementation in a petrochemical industry. *Alexandria Engineering Journal*, 61(9), 6959-6977. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.040>
- Morris, G. A., & Cannady, R. (2019). Proper use of the hierarchy of controls. *Professional Safety*, 64(08), 37-40.

- Najafi, A., & Afrazez, A. (2011). Analysis of the environmental projects risk management success using analytical network process approach.
- NFPA654. (2020). *Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*.
- NFPA664. (2018). *Standard for the Prevention of Fires and Explosions in Wood Processing and Woodworking Facilities*.
- Pang, L., Zhang, M., Yang, K., & Sun, S. (2023). Scenario derivation and consequence evaluation of dust explosion accident based on dynamic Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83, 105055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105055>
- Popov, G., Lyon, B. K., & Holcroft, B. D. (2016). *Risk assessment: A practical guide to assessing operational risks*. John Wiley & Sons.
- Prasad, S., Schweizer, C., Bagaria, P., Kulatilaka, W. D., & Mashuga, C. V. (2021). Effect of particle morphology on dust cloud dynamics. *Powder Technology*, 379, 89-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.058>
- Reason, J. (2014). An OSHA Perspective on Combustible Dust Safety and Compliance. ASSE Professional Development Conference and Exposition,
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sherin, S., Hussain, S., Mohammad, N., & Raza, S. (2021). Hazards identification and risk analysis in surface mines of Pakistan using fault tree analysis technique. *Mining of Mineral Deposits*.
- Shi, S., Jiang, B., & Meng, X. (2018). Assessment of gas and dust explosion in coal mines by means of Fuzzy fault tree analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(6), 991-998. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.07.007>
- Skjold, T., Arntzen, B. J., Hansen, O. R., Taraldset, O. J., Storvik, I. E., & Eckhoff, R. K. (2005). Simulating Dust Explosions with the First Version of DESC. *Process Safety and Environmental Protection*, 83(2), 151-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1205/psep.04237>

- Shreve, C. M., & Kelman, I. (2014). Does mitigation save? Reviewing cost-benefit analyses of disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 213-235.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.08.004>
- Spasenic, Z., Makajic-Nikolic, D., & Benkovic, S. (2022). Integrated FTA-risk matrix model for risk analysis of a mini hydropower plant's project finance. *Energy for Sustainable Development*, 70, 511-523.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.024>
- Tascón, A. (2017). Design of silos for dust explosions: Determination of vent area sizes and explosion pressures. *Engineering Structures*, 134, 1-10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.016>
- Tennakoon, S., Apan, A., Maraseni, T., & Altarez, R. D. D. (2023). Decoding the impacts of space and time on honey bees: GIS based Fuzzy AHP and Fuzzy overlay to assess land suitability for apiary sites in Queensland, Australia. *Applied Geography*, 155, 102951.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102951>
- Wei, M.-C., Cheng, Y.-C., Lin, Y.-Y., Kuo, W.-K., & Shu, C.-M. (2020). Applications of dust explosion hazard and disaster prevention technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, 104304.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104304>
- Wróbel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2018). Towards the development of a system-theoretic model for safety assessment of autonomous merchant vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, 178, 209-224.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.019>
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015a). 6 Risk Analysis of Dust Explosion Scenarios using Bayesian Network. *Dynamic Risk Analysis of Dust Explosions*, 108.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015b). Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 57-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.008>

Zalosh, R. (2015). Dust collector explosions: A quantitative hazard evaluation method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 258-265.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.03.011>

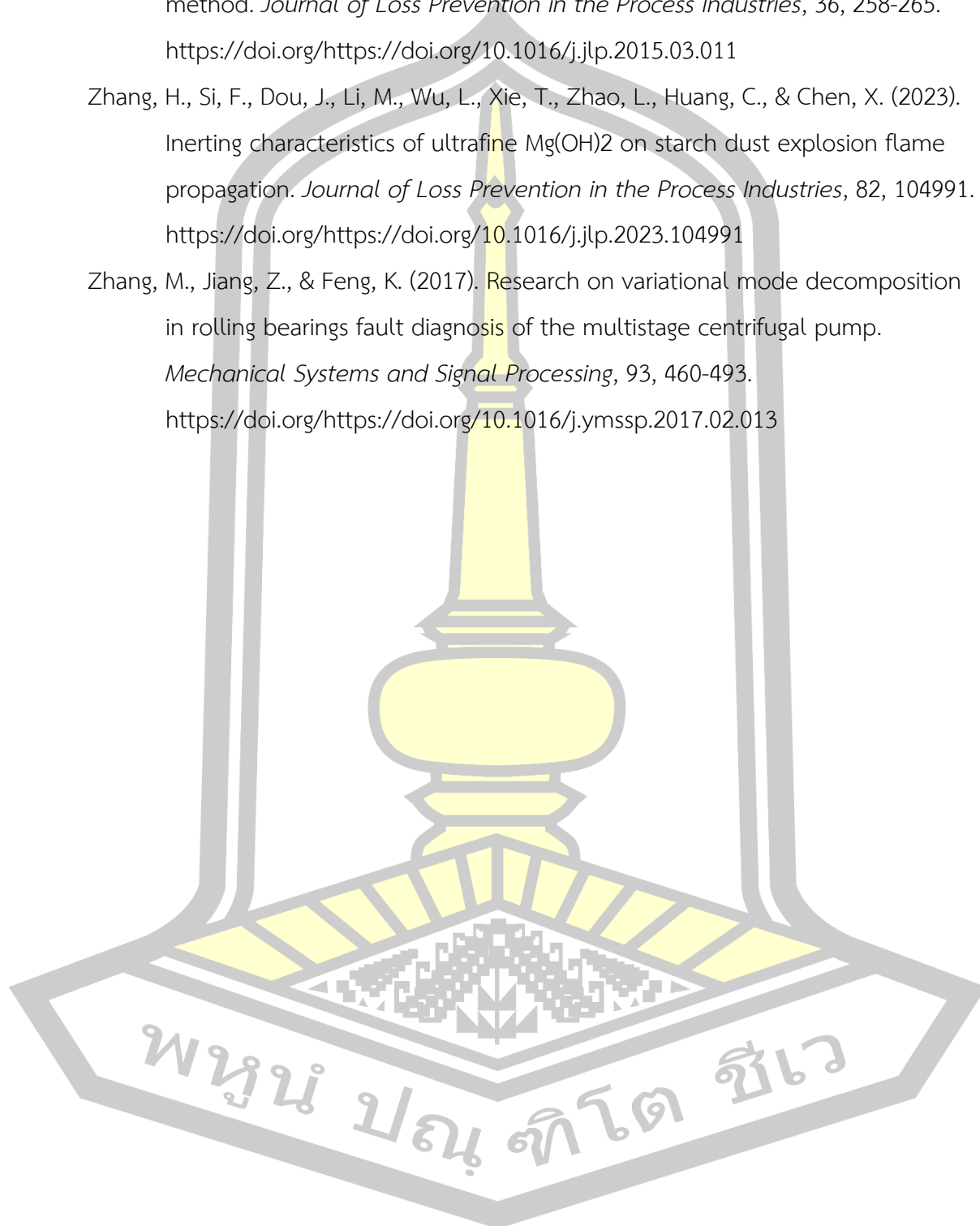
Zhang, H., Si, F., Dou, J., Li, M., Wu, L., Xie, T., Zhao, L., Huang, C., & Chen, X. (2023). Inerting characteristics of ultrafine $Mg(OH)_2$ on starch dust explosion flame propagation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 82, 104991.

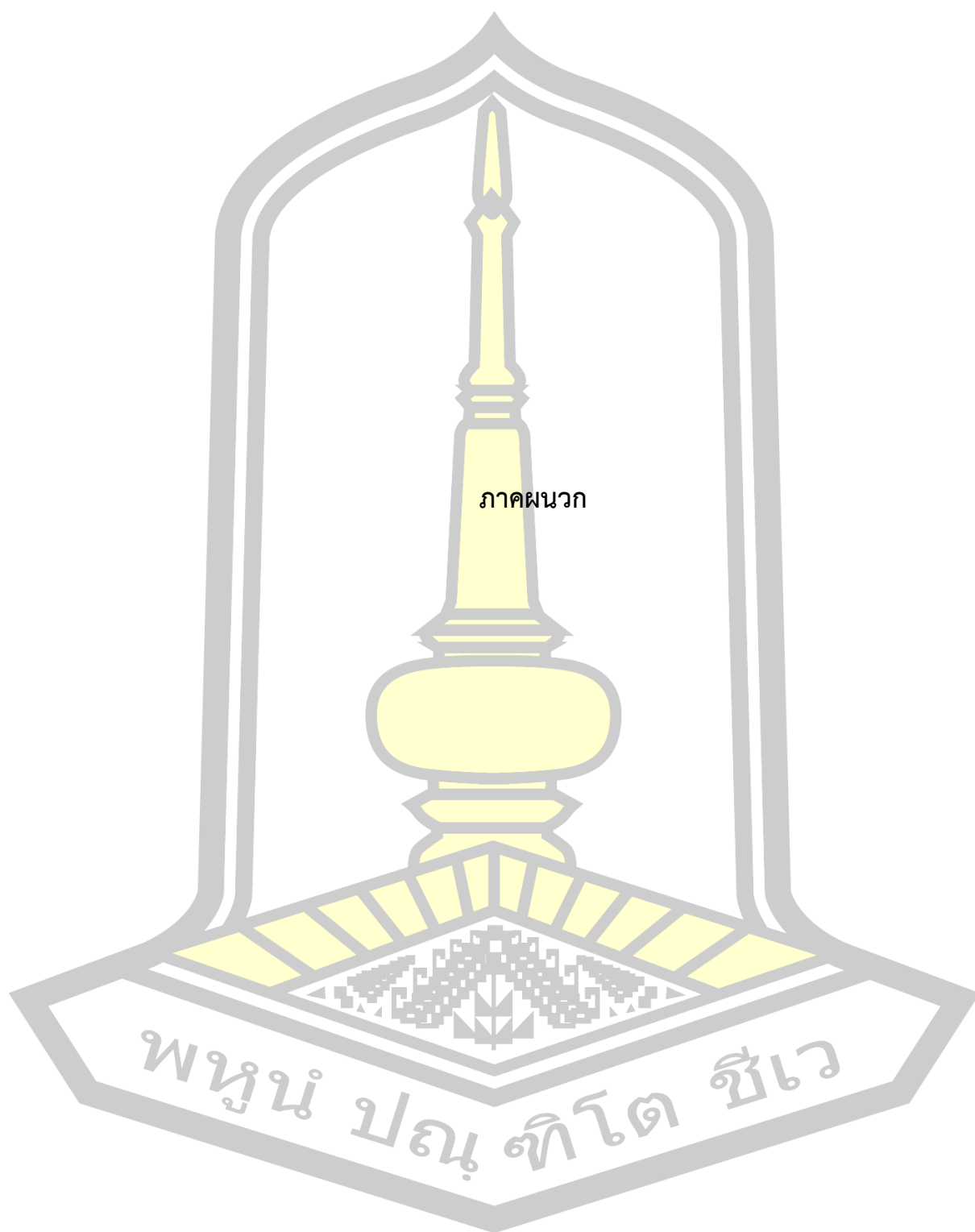
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.104991>

Zhang, M., Jiang, Z., & Feng, K. (2017). Research on variational mode decomposition in rolling bearings fault diagnosis of the multistage centrifugal pump.

Mechanical Systems and Signal Processing, 93, 460-493.

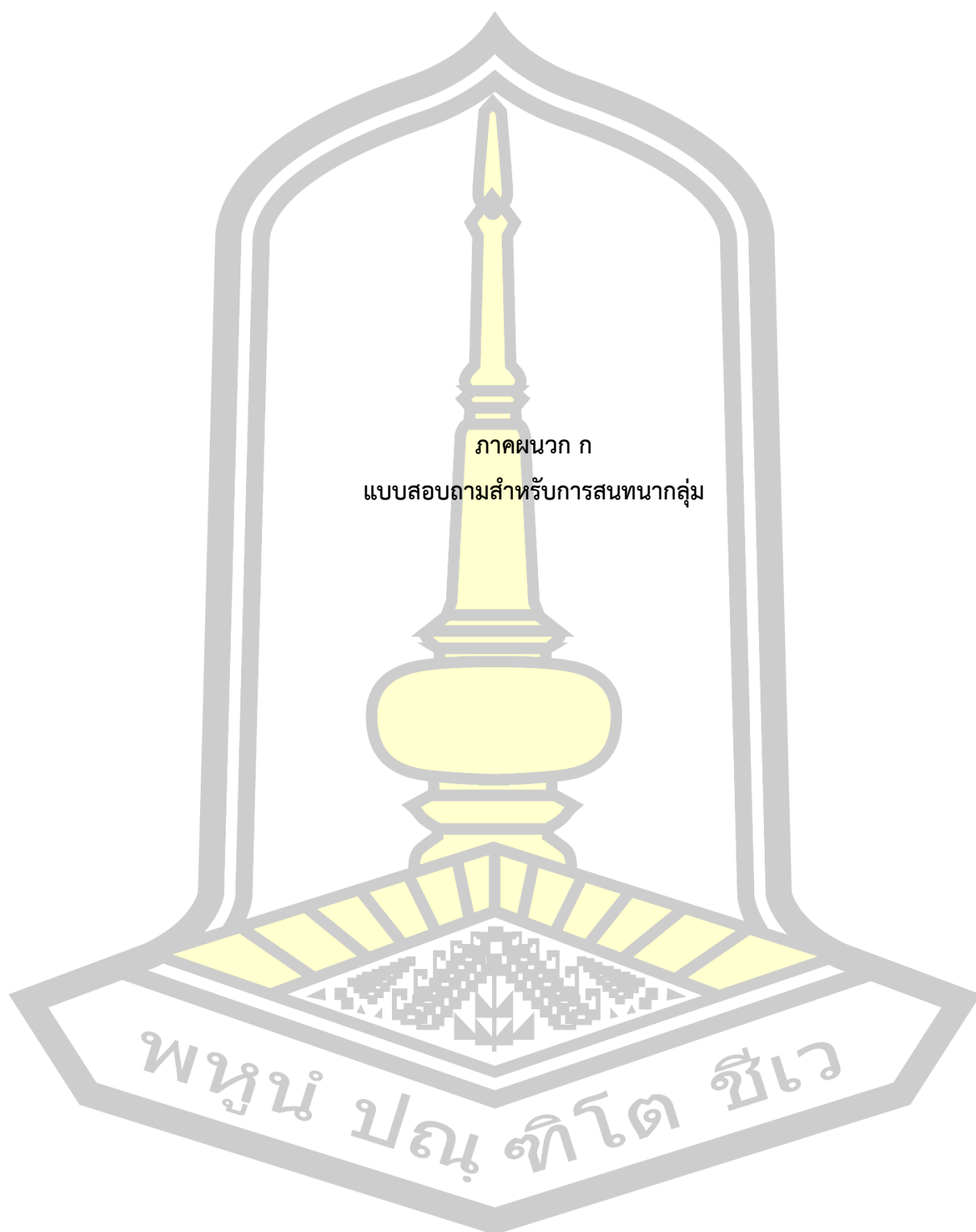
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.02.013>





ภาคผนวก

พูน ปณ จิต ชีเว



คำถามเกี่ยวกับการอภิปรายกลุ่ม แบบการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA)

แบบการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) เริ่มจากการกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นแป้ง เป็นเหตุการณ์แรก (Top event) คือ การระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีผลกระทบร้ายแรง และพิจารณาจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น (Dust explosion pentagon) เพื่อหาวิเคราะห์หาสาเหตุย่อย (Fault tree event) และวิเคราะห์หาสาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ (Basic event) จนพบสาเหตุของการเกิดการระเบิดที่แท้จริง ดังแสดงตามขั้นตอน และรายละเอียดดังต่อไปนี้

คำชี้แจงในการอภิปรายกลุ่ม

1. ผู้ดำเนินการอภิปรายกลุ่ม (Moderator) แนะนำตนเองและทีมงาน
2. ผู้ดำเนินการสนทนาชี้แจงจุดมุ่งหมายในการอภิปรายกลุ่ม และวัตถุประสงค์ของการวิจัย
3. ผู้เข้าร่วมสนทนาแนะนำตนเอง
4. เริ่มคำถามในแนวการอภิปรายกลุ่มที่จัดเตรียมไว้ตามประเด็นต่างๆ มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในกลุ่ม ทุกคนมีโอกาสแสดงความคิดเห็นเท่าเทียมกัน
5. สรุปประเด็นจากการอภิปรายกลุ่ม

แนวคำถามในการจัดการอภิปรายกลุ่ม

1. สาเหตุย่อย (Fault tree event) ของการระเบิดของฝุ่นในแต่ละองค์ประกอบ มีอะไรบ้าง
2. สาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ (Basic event) ของการระเบิดของฝุ่น มีอะไรบ้าง

ตารางแสดง แนวคำถามในการจัดการอภิปรายกลุ่ม

ประเด็นคำถาม	สาเหตุย่อย (Fault tree event)	สาเหตุย่อยของแต่ละเหตุการณ์ (Basic event)
1. เชื้อเพลิง (Fuel)		
2. การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of dust particles)		
3. ขอบเขตหมอกฝุ่น (Confinement of the dust cloud)		
4. ออกซิเจนในอากาศ (Oxygen)		
5. แหล่งจุดติดไฟ (Ignition sources)		

คำถามเกี่ยวกับการอภิปรายกลุ่ม แบบประเมินการวิเคราะห์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ Analytic Hierarchy Process

การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) ใช้ในการตัดสินใจเลือก หรือเรียงลำดับทางเลือกของปัญหาที่ต้องใช้การตัดสินใจที่ซับซ้อน โดยสร้างรูปแบบการตัดสินใจให้เป็นโครงสร้างลำดับชั้น และนำข้อมูลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์สรุปแนวทางเลือกที่เหมาะสม

คำชี้แจงในการอภิปรายกลุ่ม

1. ผู้ดำเนินการอภิปรายกลุ่ม (Moderator) แนะนำตนเองและทีมงาน
2. ผู้ดำเนินการสนทนาชี้แจงจุดมุ่งหมายในการอภิปรายกลุ่ม และวัตถุประสงค์ของการวิจัย
3. ผู้เข้าร่วมสนทนาแนะนำตนเอง
4. เริ่มคำถามในแนวการอภิปรายกลุ่มที่จัดเตรียมไว้ตามประเด็นต่างๆ มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในกลุ่ม ทุกคนมีโอกาสแสดงความคิดเห็นเท่าเทียมกัน
5. สรุปประเด็นจากการอภิปรายกลุ่ม

แนวคำถามในการจัดการอภิปรายกลุ่ม

จงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ที่ละคู่ (Pairwise comparisons) ท่านคิดว่าประเด็นใดที่มีความสำคัญมากกว่ากัน และมีความสำคัญกว่ากันเท่าใด โดยกำหนดให้ตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ใน AHP

ระดับ ความสำคัญ	ความหมาย	หมายเหตุ
1	มีความสำคัญเท่ากัน (Equal Importance)	
3	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย (Moderate Importance)	
5	มีความสำคัญกว่ามากในระดับปานกลาง (Strong Importance)	
7	มีความสำคัญมากกว่าในระดับค่อนข้างมาก (Very Strong Importance)	
9	มีความสำคัญมากกว่าในระดับมากที่สุด (Extreme Importance)	
2,4,6,8	ค่ากลางระหว่างสองค่าตัดสินที่อยู่ติดกัน เมื่อประณิประนอมเป็น สิ่งจำเป็น	

คำถามที่ 2 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความผิดพลาดของพนักงาน

ข้อ	เหตุการณ์
1	การทำงานภายใต้ระยะเวลาที่จำกัด (Time pressure)
2	การทำงานภายใต้แรงกดดัน (Stress)
3	ขาดความรู้ (Lack of knowledge)
4	การละเมิดกฎระเบียบข้อบังคับ (Violation)

คำถามที่ 2 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดของพนักงาน ว่าสาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากความผิดพลาดของพนักงาน																สาเหตุ คู่ เทียบ		
	มากกว่า								เท่ากัน		มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
ข้อ 1																		ข้อ 2	
ข้อ 1																		ข้อ 3	
ข้อ 1																		ข้อ 4	
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากความผิดพลาดของพนักงาน																			
1. การทำงานภายใต้ระยะเวลาที่จำกัด (Time pressure)																			
2. การทำงานภายใต้แรงกดดัน (Stress)																			
3. ขาดความรู้ (Lack of knowledge)																			
4. การละเมิดกฎระเบียบข้อบังคับ (Violation)																			

พูน ปณ จิต ชีเว

คำถามที่ 3 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความร้อนจากกะป้อลำเลียง

ข้อ	เหตุการณ์
1	ความร้อนจากความล้มเหลวของนอต (Nut)
2	ความร้อนจากความล้มเหลวของสายพานลำเลียง (Rubber belt)
3	ความร้อนจากความล้มเหลวของกระป๋องลำเลียง (Bucket)
4	ความร้อนจากไฟฟ้าสถิตในระบบลำเลียง (Electrostatic)
5	ความร้อนจากวัสดุติดในระบบลำเลียง (Waste)

คำถามที่ 3 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดจากกะพ้อลำเลียงสาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากกะป้อลำเลียง																	สาเหตุคู่เทียบ
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3
ข้อ 1																		ข้อ 4
ข้อ 1																		ข้อ 5

สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากกะป้อลำเลียง

1. ความร้อนจากความล้มเหลวของน็อต (Nut)
2. ความร้อนจากความล้มเหลวของสายพานลำเลียง (Rubber belt)
3. ความร้อนจากความล้มเหลวของกะป้อลำเลียง (Bucket)
4. ความร้อนจากไฟฟ้าสถิตในระบบลำเลียง (Electrostatic)
5. ความร้อนจากวัสดุติดในระบบลำเลียง (Waste)

คำถามที่ 4 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความร้อนจากมอเตอร์

ข้อ	เหตุการณ์
1	ความร้อนจากความลื่นไหลของมอเตอร์ (Motor gear)
2	ความร้อนจากความลื่นไหลของตลับลูกปืน (Bearing)
3	ความร้อนจากความลื่นไหลของสกรูลำเลียง (Set Screw)

คำถามที่ 4 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความลื่นไหลจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดของสาเหตุความร้อนจากมอเตอร์ ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากมอเตอร์																สาเหตุ คู่ เทียบ	
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากมอเตอร์																		
1. ความร้อนจากความล้มเหลวของมอเตอร์ (Motor gear)																		
2. ความร้อนจากความล้มเหลวของตลับลูกปืน (Bearing)																		
3. ความร้อนจากความล้มเหลวของสกรูลำเลียง (Set Screw)																		

คำถามที่ 5 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

ข้อ	เหตุการณ์
1	ความร้อนจากความลื่นไหลของมอเตอร์ drive (Motor drive)
2	ความร้อนจากความลื่นไหลของลูกกลิ้ง (Roller)
3	ความร้อนจากความลื่นไหลของสายพาน (Belt)
4	ความร้อนจากความลื่นไหลของพู่เล่ (Pulleys)
5	ความร้อนจากความลื่นไหลของเกียร์มอเตอร์ (Gear motor)

คำถามที่ 5 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) สาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลว จากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)																สาเหตุ คู่ เทียบ	
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3
ข้อ 1																		ข้อ 4
ข้อ 1																		ข้อ 5
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)																		
1. ความร้อนจากความล้มเหลวของมอเตอร์ drive (Motor drive)																		
2. ความร้อนจากความล้มเหลวของลูกกลิ้ง (Roller)																		
3. ความร้อนจากความล้มเหลวของสายพาน (Belt)																		
4. ความร้อนจากความล้มเหลวของพูลเลย์ (Pulleys)																		
5. ความร้อนจากความล้มเหลวของเกียร์มอเตอร์ (Gear motor)																		

พูน ปณ จิต ชีเว

คำถามเกี่ยวกับการอภิปรายกลุ่ม

แบบประเมินกระบวนการลดความคลุมเครือด้วยเทคนิค Fuzzy

แบบประเมินกระบวนการลดความคลุมเครือด้วยเทคนิค Fuzzy สำหรับการประมวลผลตรรกะแบบคลุมเครือ เพื่อจัดการกับข้อมูลที่มีความคลุมเครือ แสดงผลในรูปแบบตัวเลขจากการแปลงภาษาเป็นตัวเลข ใช้หลักเหตุผลเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ เป็นเทคนิคที่นำผลการจากเปรียบเทียบคู่จากกระบวนการ AHP เข้าสมการของ Fuzzy โดยใช้ตัวเลขที่แสดงระดับความสำคัญของการเปรียบเทียบคู่ ดังต่อไปนี้

คำชี้แจงในการอภิปรายกลุ่ม

1. ผู้ดำเนินการอภิปรายกลุ่ม (Moderator) แนะนำตนเองและทีมงาน
2. ผู้ดำเนินการสนทนาชี้แจงจุดมุ่งหมายในการอภิปรายกลุ่ม และวัตถุประสงค์ของการวิจัย
3. ผู้เข้าร่วมสนทนาแนะนำตนเอง
4. เริ่มคำถามในแนวการอภิปรายกลุ่มที่จัดเตรียมไว้ตามประเด็นต่างๆ มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในกลุ่ม ทุกคนมีโอกาสแสดงความคิดเห็นเท่าเทียมกัน
5. สรุปประเด็นจากการอภิปรายกลุ่ม

แนวคำถามในการจัดการอภิปรายกลุ่ม

จงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ที่ละคู่ (Pairwise comparisons) ท่านคิดว่าประเด็นใดที่มีความสำคัญมากกว่ากัน และมีความสำคัญกว่ากันเท่าใด โดยกำหนดให้ตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบรายคู่ใน Fuzzy

ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular fuzzy scale)	ระดับการให้ความสำคัญ (Linguistic scale)
(1,1,3)	มีความสำคัญเท่ากัน
(1,3,5)	มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย
(3,5,7)	มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง
(5,7,9)	มีความสำคัญมากกว่ามาก
(7,9,9)	มีความสำคัญมากกว่ามากที่สุด

ตัวอย่างการให้ระดับความสำคัญ

5

แถวที่ 2 พิจารณาระดับความสำคัญสาเหตุหลักข้อ 2 เทียบกับข้อ 3 และพิจารณาว่าข้อ 3 มีความสำคัญกว่ามาก(จากตารางตัวอย่างระดับความสำคัญเท่ากับ 7) ให้ทำเครื่องหมาย ○ ช่อง 7

คำถามที่ 1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทีละคู่ (Pairwise comparisons) สาเหตุการพุ่ง
กระจายของฝน

ข้อ	เหตุการณ์
1	การทำความสะอาดพื้นที่ (Cleaning)
2	เครื่องจักรชำรุด (Machine trouble)
3	การซ่อมบำรุงเครื่องจักร (Maintenance)

คำถามที่ 1 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิด ความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากเหตุการณ์พังกระจายของฝุ่น ว่าสาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากเหตุการณ์ฟุ้งกระจายของฝุ่น																	สาเหตุคู่เทียบ
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3

สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากเหตุการณ์ฟุ้งกระจายของฝุ่น

1. การทำความสะอาดพื้นที่ (Cleaning)
2. เครื่องจักรชำรุด (Machine trouble)
3. การซ่อมบำรุงเครื่องจักร (Maintenance)

คำถามที่ 2 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความผิดพลาดของพนักงาน

ข้อ	เหตุการณ์
1	การทำงานภายใต้ระยะเวลาที่จำกัด (Time pressure)
2	การทำงานภายใต้แรงกดดัน (Stress)
3	ขาดความรู้ (Lack of knowledge)
4	การละเมิดกฎระเบียบข้อบังคับ (Violation)

คำถามที่ 2 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดของพนักงาน ว่าสาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากความผิดพลาดของพนักงาน																สาเหตุ คู่ เทียบ		
	มากกว่า								เท่ากัน		มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
ข้อ 1																		ข้อ 2	
ข้อ 1																		ข้อ 3	
ข้อ 1																		ข้อ 4	
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากความผิดพลาดของพนักงาน																			
1. การทำงานภายใต้ระยะเวลาที่จำกัด (Time pressure)																			
2. การทำงานภายใต้แรงกดดัน (Stress)																			
3. ขาดความรู้ (Lack of knowledge)																			
4. การละเมิดกฎระเบียบข้อบังคับ (Violation)																			

พูน ปณ จิต ชีเว

คำถามที่ 4 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความร้อนจากมอเตอร์

ข้อ	เหตุการณ์
1	ความร้อนจากความลื่นไหลของมอเตอร์ (Motor gear)
2	ความร้อนจากความลื่นไหลของตลับลูกปืน (Bearing)
3	ความร้อนจากความลื่นไหลของสกรูลำเลียง (Set Screw)

คำถามที่ 4 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความลื่นไหลจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดของสาเหตุความร้อนจากมอเตอร์ ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากมอเตอร์																สาเหตุ คู่ เทียบ	
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากมอเตอร์																		
1. ความร้อนจากความล้มเหลวของมอเตอร์ (Motor gear)																		
2. ความร้อนจากความล้มเหลวของตลับลูกปืน (Bearing)																		
3. ความร้อนจากความล้มเหลวของสกรูลำเลียง (Set Screw)																		

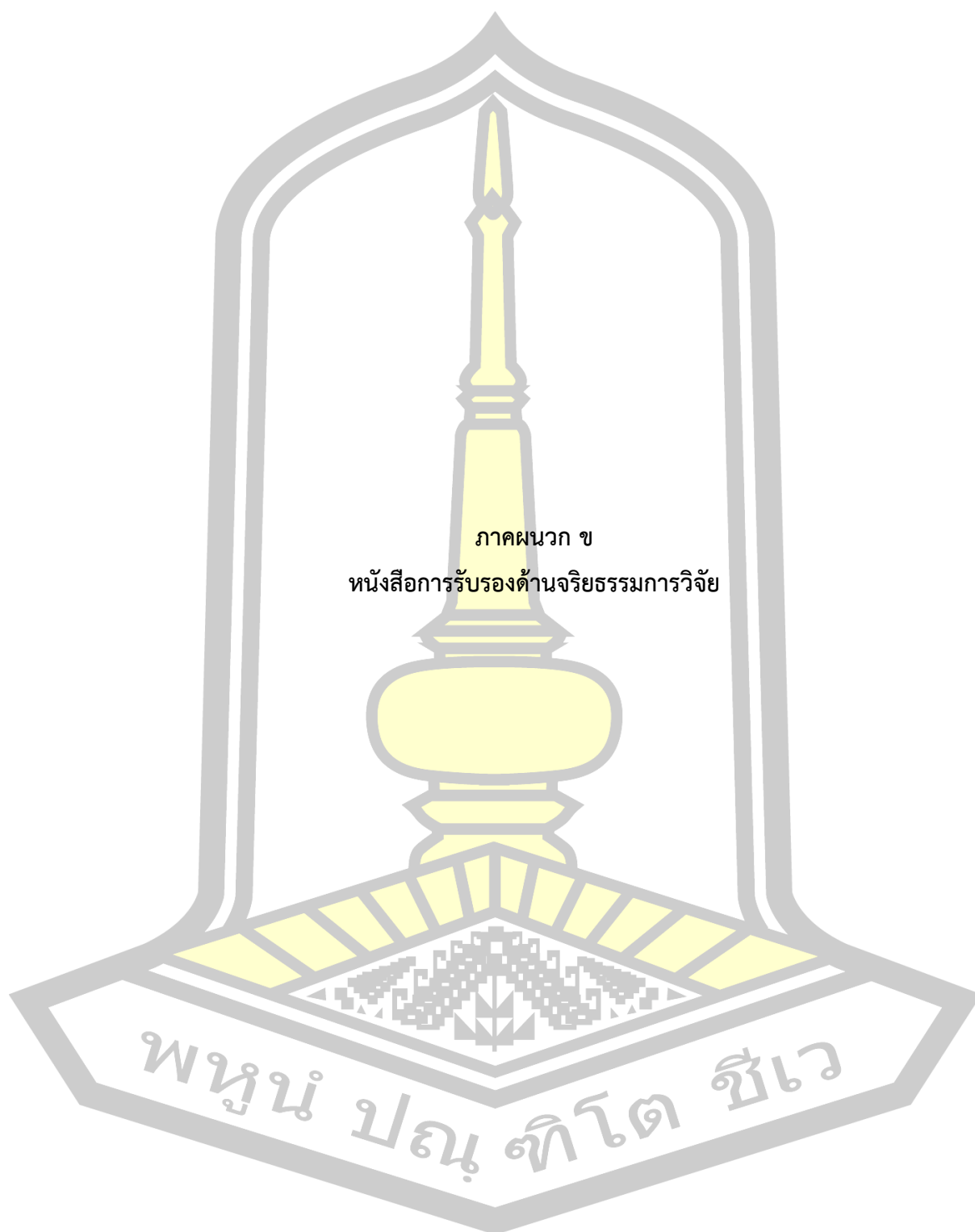
คำถามที่ 5 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) สาเหตุความร้อนจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)

ข้อ	เหตุการณ์
1	ความร้อนจากความลื่นไหลของมอเตอร์ drive (Motor drive)
2	ความร้อนจากความลื่นไหลของลูกกลิ้ง (Roller)
3	ความร้อนจากความลื่นไหลของสายพาน (Belt)
4	ความร้อนจากความลื่นไหลของพูลเลย์ (Pulleys)
5	ความร้อนจากความลื่นไหลของเกียร์มอเตอร์ (Gear motor)

คำถามที่ 5 จงเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อ 1 กับข้อ 2-3 ตามสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจน เกิดการระเบิด) จากความผิดพลาดจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor) สาเหตุใดมี ความสำคัญมากกว่ากัน

สาเหตุ	จับคู่เทียบระหว่างความสำคัญสาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลว จากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)																สาเหตุ คู่ เทียบ	
	มากกว่า								เท่ากัน	มากกว่า								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ข้อ 1																		ข้อ 2
ข้อ 1																		ข้อ 3
ข้อ 1																		ข้อ 4
ข้อ 1																		ข้อ 5
สาเหตุที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวจากอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)																		
1. ความร้อนจากความล้มเหลวของมอเตอร์ drive (Motor drive)																		
2. ความร้อนจากความล้มเหลวของลูกกลิ้ง (Roller)																		
3. ความร้อนจากความล้มเหลวของสายพาน (Belt)																		
4. ความร้อนจากความล้มเหลวของพูลเลย์ (Pulleys)																		
5. ความร้อนจากความล้มเหลวของเกียร์มอเตอร์ (Gear motor)																		

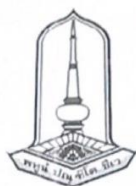
พูน ปณ จิต ชีเว



ภาคผนวก ข

หนังสือการรับรองด้านจริยธรรมการวิจัย

พหุมน ปณ จิโต ชีเว



**MAHASARAKHAM UNIVERSITY ETHICS COMMITTEE FOR
RESEARCH INVOLVING HUMAN SUBJECTS**

Certificate of Approval

Approval number: 121-031/2023

Title : Quantitative risk assessment to improve dust explosion protection systems in the Tapioca starch process.

Principal Investigator : Miss. Ratchanee Joomjee

Responsible Department : Faculty of Public Health

Research site : cassava starch factory Ubon Ratchathani Province

Review Method : Expedited Review

Date of Manufacture : 10 April 2023

expire : 9 April 2024

This research application has been reviewed and approved by the Ethics Committee for Research Involving Human Subjects, Mahasarakham University, Thailand. Approval is dependent on local ethical approval having been received. Any subsequent changes to the consent form must be re-submitted to the Committee.

Ratree S.

(Asst. Prof. Ratree Sawangjit)

Chairman

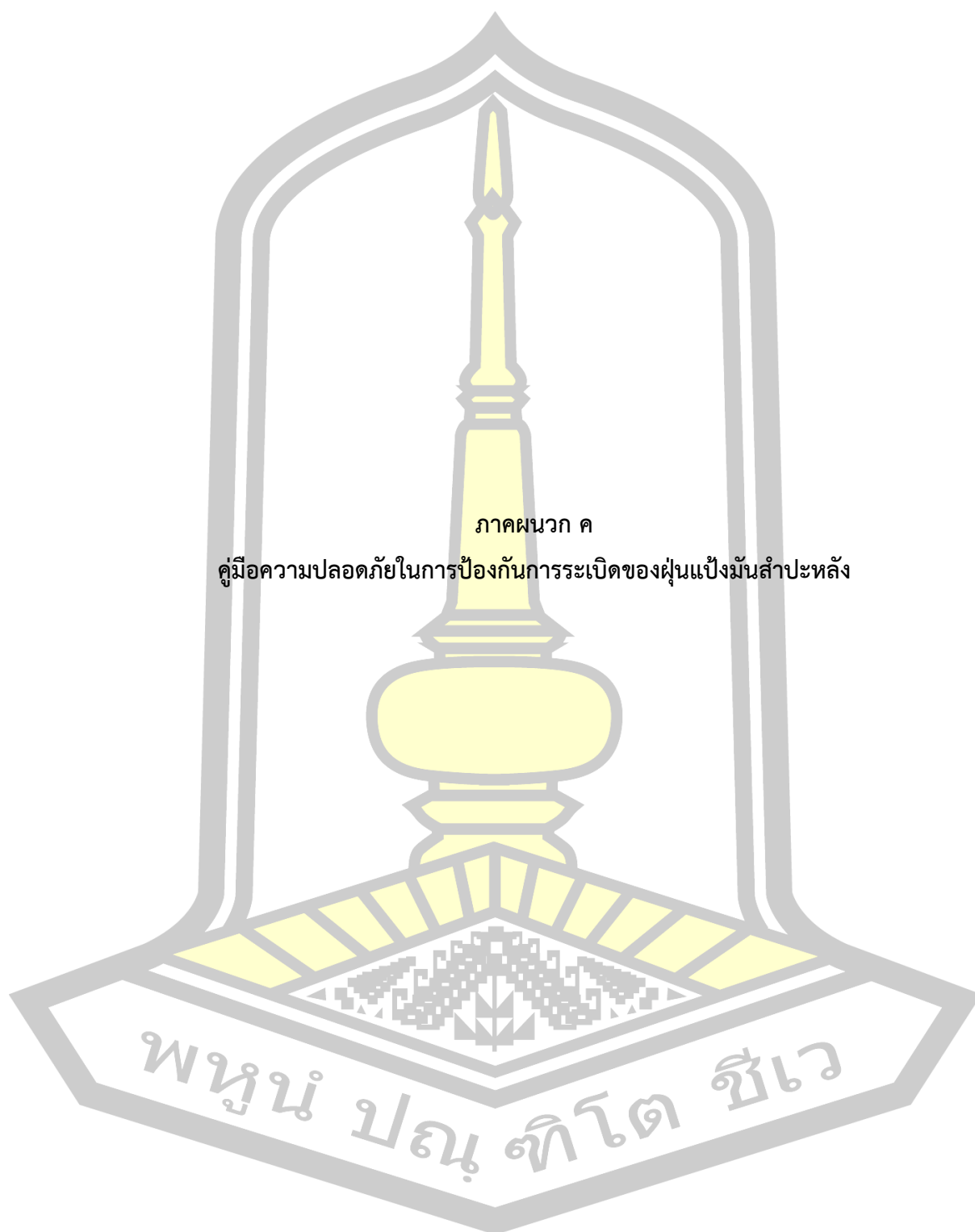
Approval is granted subject to the following conditions: (see back of this Certificate)

All approved investigators must comply with the following conditions:

1. Strictly conduct the research as required by the protocol;
2. Use only the information sheet, consent form (and recruitment materials, if any), interview outlines and/or questionnaires bearing the Institutional Review Board's seal of approval ; and return one copy of such documents of the first subject recruited to the Institutional Review Board (IRB) for the record (if applicable);
3. Report to the Institutional Review Board any serious adverse event or any changes in the research activity within five working days;
4. Provide reports to the Institutional Review Board concerning the progress of the research upon the specified period of time or when requested;
5. If the study cannot be finished within the expire date of the approval certificate, the investigator is obliged to reapply for approval at least two month before the date of expiration.
6. All the above approved documents are expired on the same date of the previously approved protocol (Protocol Number.....)

* A list of the Institutional Review Board members (names and positions) present at the meeting of Institutional Review Board on the date of approval of this study has been attached (per requested). All approved documents will be forwarded to the principal investigator.





ภาคผนวก ค

คู่มือความปลอดภัยในการป้องกันการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง

คู่มือ

ความปลอดภัยในการป้องกันการระเบิด ของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง



รัชณี จูมจี

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย
คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คำนำ

คู่มือความปลอดภัยในการป้องกันการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลังเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์เรื่อง การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ เพื่อปรับปรุงระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย สังกัดคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บแป้งมันสำปะหลัง เนื้อหาประกอบด้วย สถิติการระเบิดของฝุ่น การระเบิดของฝุ่น การประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง การป้องกันการระเบิดของฝุ่น และกฎหมาย มาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของฝุ่น

รัชนี้ จุมจี

กันยายน 2567

สารบัญ

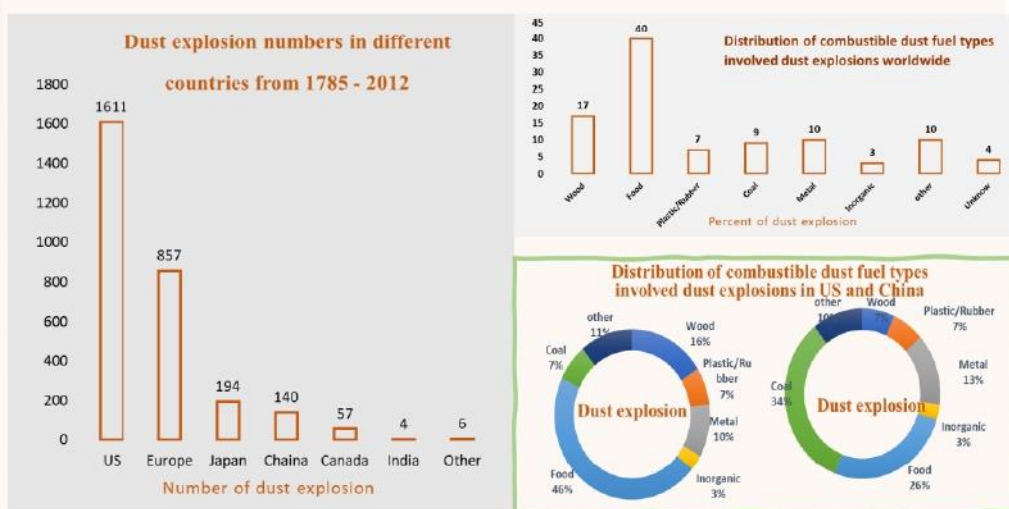
	หน้า
1. สถิติการระเบิดของฝุ่น	1
- สถิติการระเบิดของฝุ่นในต่างประเทศ	2
- สถิติการระเบิดของฝุ่นในประเทศไทย 3	
2. การระเบิดของฝุ่น	4
- องค์ประกอบของการระเบิดของฝุ่น 6	
- กการจัดกลุ่มความรุนแรงของการระเบิด	7
- การประเมินอันตรายการระเบิดของฝุ่นแต่ละองค์ประกอบ 8	
3. การประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง	
- การประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น	10
- กรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยง	12
- ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง	16
4. การป้องกันการระเบิดของฝุ่น	34
5. กฎหมาย มาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของฝุ่น	48

สถิติการระเบิดของฝุ่น



สถิติการระเบิดของฝุ่น

สถิติการระเบิดของฝุ่นพบในประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ ในช่วงปี พ.ศ. 2328 – พ.ศ. 2555 พบการระเบิดของฝุ่นมากกว่า 2,000 ครั้ง พบมากที่สุดในสหรัฐอเมริกาจำนวน 1,611 ครั้ง ยุโรปจำนวน 857 ครั้ง ญี่ปุ่น จำนวน 194 ครั้ง จีน จำนวน 140 ครั้ง แคนาดา จำนวน 57 ครั้ง อินเดีย จำนวน 4 ครั้ง และพื้นที่อื่น ๆ จำนวน 6 ครั้ง (Yuan et al., 2015)



ภาพที่ 1 สถิติการระเบิดของฝุ่นในช่วงปี พ.ศ. 2528 – พ.ศ. 2555

การระเบิดของฝุ่น



การระเบิดของฝุ่น

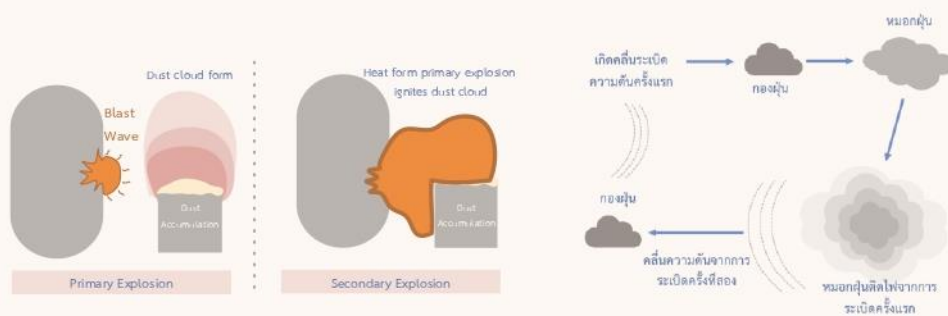
การระเบิดของฝุ่นในประเทศไทย ได้มีการรวบรวมจากจากหนังสือพิมพ์ และอินเทอร์เน็ต พบเกิดอุบัติเหตุฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งมีอุบัติเหตุที่ร้ายแรงที่สุดเกิดขึ้น ณ บริษัท ชัยภูมิสตาร์ช จังหวัดชัยภูมิ ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 2 คน บาดเจ็บจำนวน 31 คน ดังแสดงในตาราง

สถิติการระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย

ลำดับ	วันที่เกิดเหตุ	สถานประกอบการ	พื้นที่	เสียชีวิต	บาดเจ็บ	ทรัพย์สินเสียหาย	สาเหตุการระเบิด
				(คน)	(คน)	(ล้านบาท)	
1	25-มี.ค.-61	บริษัทไทยน้ำมันสำปะหลัง จำกัด	จ.อุดรธานี	-	7	ไม่ได้ระบุ	เครื่องร่อน เนื่องจากการเร่งการผลิต
2	28 ธ.ค. 61	โรงงานแป้งมันสำปะหลัง อ.สีคิ้ว	จ.นครราชสีมา	-	6	ไม่ได้ระบุ	เครื่องจักรที่ใช้อบแป้งมันใช้งานตลอดทั้งวัน เพื่อเร่งผลิต
3	19-ม.ค.-60	บริษัทบลูเวฟ สตาร์ช จำกัด	จ.ลพบุรี	1	4	10	เกิดเพลิงไหม้ขึ้นที่เครื่องจักร
4	29-ส.ค.-57	บริษัทเนเชอรัลซ์ฟลาย	จ.อุดรธานี		4	ไม่ได้ระบุ	ท่อแรงดันโรงงานแป้งมันสำปะหลัง อุดรธานีระเบิด พนักงานปิดรูระบายอากาศไม่รอให้เครื่องเย็น
5	25 ก.พ. 54	บริษัทชัยภูมิสตาร์ช	จ.ชัยภูมิ	2	31	ไม่ได้ระบุ	การระเบิดส่งผลให้ผ้าพลาสติกที่คลุมบ่ออบแป้งแตก
6	6-ส.ค.-54	บริษัท แป้งมันอีสาน จำกัด	จ.นครราชสีมา	-	10	ไม่ได้ระบุ	เกิดจากการที่มีแป้งมันเข้าไปอุดตันท่ออบแป้งมันทำให้ท่ออบแป้งระเบิด

การระเบิดของฝุ่น

การระเบิดของฝุ่นสามารถเกิดได้ในพื้นที่จำกัด และพื้นที่โล่ง เมื่อเกิดการระเบิดแล้ว อาจมีการเกิดการระเบิดครั้งที่สอง หรือมีการระเบิดอย่างต่อเนื่อง และการระเบิดในพื้นที่จำกัด จะมีความรุนแรงกว่าการระเบิดในพื้นที่โล่ง เพราะมีแรงดันที่สูงกว่า ลักษณะการระเบิดของฝุ่น จะมี 2 ลักษณะ คือ การระเบิดแบบปฐมภูมิ (Primary explosion) เป็นการระเบิดครั้งแรก และหากไม่มีการติดตั้งช่องระบายที่เพียงพอ อาจทำให้เกิดความเสียหายของภาชนะบรรจุได้ และเกิดกลุ่มหมอกฝุ่นขึ้น และเมื่อกลุ่มหมอกได้รับความร้อนที่เกิดจากการระเบิดครั้งแรก มักทำให้เกิดการระเบิดครั้งที่ 2 เรียกว่า การระเบิดแบบทุติยภูมิ (Secondary explosion) จะมีความรุนแรงมากกว่าการระเบิดแบบปฐมภูมิ และอาจทำให้เกิดการระเบิดแบบต่อเนื่อง ผลกระทบเป็นแบบโดมิโน (Domino effect)



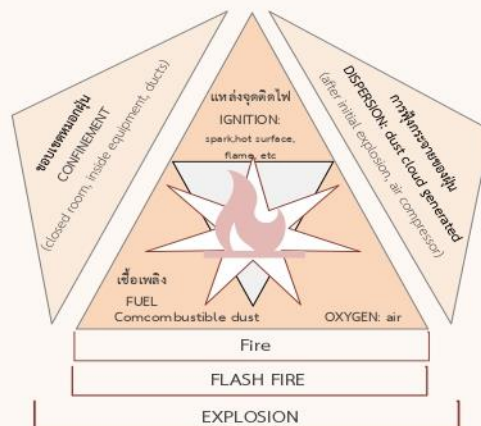
แสดงการเกิดระเบิดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2
ภาพที่ 2 ลักษณะการระเบิดของฝุ่น

แสดงการระเบิดของฝุ่นที่กองอยู่ที่พื้น

องค์ประกอบของการระเบิดของฝุ่น

การระเบิดของฝุ่น มีองค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ (NFPA654, 2020)

1. ฝุ่น (Dust) ขนาด $< 420 \mu\text{m}$ สามารถอยู่ในบรรยากาศนานจนกลายเป็นหมอกฝุ่น (Dust cloud) ความเร็วในการลุกไหม้ขึ้นกับความชื้น (% Moisture) รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น
2. การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of dust particles) ช่วงความเข้มข้นที่ฝุ่นลุกไหม้ หรือระเบิดได้ ประมาณ $50\text{--}100 \text{ g/m}^3$ ถึง $2 - 3 \text{ Kg/m}^3$
3. ขอบเขตหมอกฝุ่น (Confinement of the dust cloud) การเกิดหมอกฝุ่นในพื้นที่ปิด หรือพื้นที่จำกัด เช่น ในกระพ้อ ไซโล เครื่องบด เครื่องผสม ไซโคลน สายพานลำเลียง และท่อลมลำเลียง เมื่อเกิดจุดวาบไฟ (Flash fire) ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น ความรุนแรงการระเบิดขึ้นกับขนาดของการระเบิด และโครงสร้างพื้นที่ปิด
4. ออกซิเจนในอากาศ (Oxygen) $> 20.9 \%$ (Lower explosive limit: LEL) จะทำให้เกิดฝุ่นลุกติดไฟได้อย่างรวดเร็ว
5. แหล่งจุดติดไฟ (Ignition sources) แหล่งพลังงานที่สามารถกระตุ้น การแพร่ขยายของเปลวไฟ ทำให้เกิดการขยายเป็นวงกว้างเมื่อมีการสัมผัสกับฝุ่นในบรรยากาศ พลังงานที่ทำให้เกิดการระเบิดนั้นจะมีค่าแตกต่างกันตามขนาดและชนิดของฝุ่น



ภาพที่ 3 แสดงองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่น

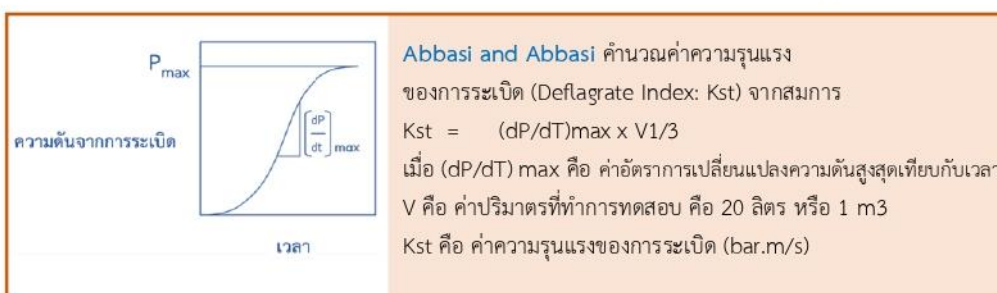
การจัดกลุ่มความรุนแรงของการระเบิด (Deflagrat Index: Kst)

Dust explosion class*	Kst (bar.m/s)*	Characteristic*	Characteristic*
St 0	0	No explosion	Silica
St 1	>0 and ≤ 200	Weak explosion	Powdered milk, charcoal, sulfur, sugar and zinc
St 2	>200 and ≤ 300	Strong explosion	Cellulose, wood flour, and poly methyl acrylate
St 3	>300	Very strong explosion	Anthraquinone, aluminum, and magnesium

The actual class is sample specific and will depend on varying characteristics of the material such as particle size or moisture.

* OSHA CPL 03-00-008 - Combustible Dust National Emphasis Program. ** NFPA 68, Standard on Explosion Prevention by Deflagration Venting.

ค่าความดันอากาศเมื่อเกิดการระเบิดภายในพื้นที่ปิดที่ความเข้มข้นของฝุ่น



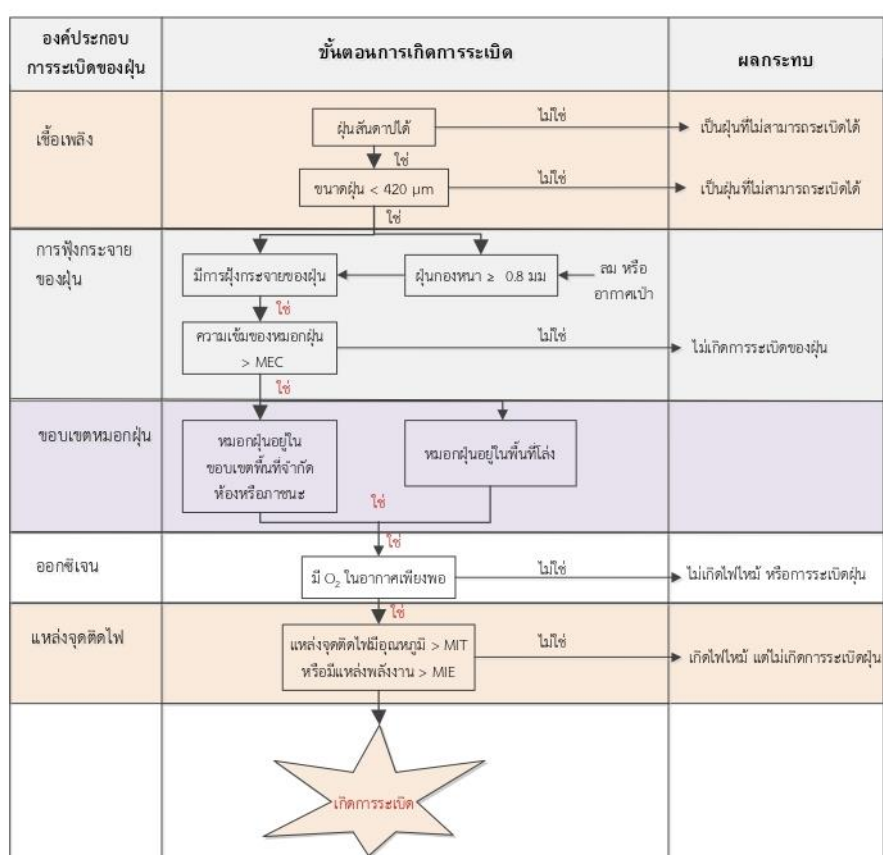
การจัดกลุ่มฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ (Dust hazard class)

ค่า K _{st} (bar.m/s)	กลุ่มของฝุ่นที่เกิดการระเบิด	ระดับอันตราย
0	ST 0	ไม่เกิดการระเบิด
0 - 200	ST 1	เกิดการระเบิดไม่รุนแรง
200 - 300	ST 2	เกิดการระเบิดรุนแรง
> 300	ST 3	เกิดการระเบิดรุนแรงมาก

ภาพที่ 6 ลักษณะความรุนแรงของการระเบิด

การประเมินอันตรายการระเบิดของฝุ่นแต่ละองค์ประกอบ

การประเมินอันตรายการระเบิดของฝุ่นทั้ง 5 องค์ประกอบ (NFPA654, 2020) ฝุ่น (Dust) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of dust particles) ขอบเขตหมอกฝุ่น (Confinement of the dust cloud) ออกซิเจนในอากาศ (Oxygen) และแหล่งจุดติดไฟ (Ignition sources) มีขั้นตอนในการประเมินดังนี้



ภาพที่ 5 การประเมินอันตรายการระเบิดของฝุ่นแต่ละองค์ประกอบ

การประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น

การประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นในที่นี้จะเป็นการประเมินความเสี่ยงกึ่งปริมาณ (Semiquantitative risk models) โดยใช้มาตรฐานของ ANSI Z 10 มีแนวทางในการดำเนินการดังนี้

ตารางที่ 1 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง (ANSI Z 10)

โอกาสในการเกิด (Likelihood)	ความหมาย (Description)	ระดับ (Rating)
สูงมาก (Most likely)	เป็นเหตุการณ์ที่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นมากที่สุด	5
สูง (Possible)	เป็นเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ เกิดขึ้นเป็นปกติ	4
ปานกลาง (Conceivable)	เป็นเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต	3
น้อย (Remote)	ไม่เคยเกิดขึ้นในรอบหลายปี	2
น้อยมาก (Inconceivable)	เป็นไปได้จริงและไม่เคยเกิดขึ้น	1

ตารางที่ 2 การจัดระดับผลกระทบของเหตุการณ์ ANSI Z 10

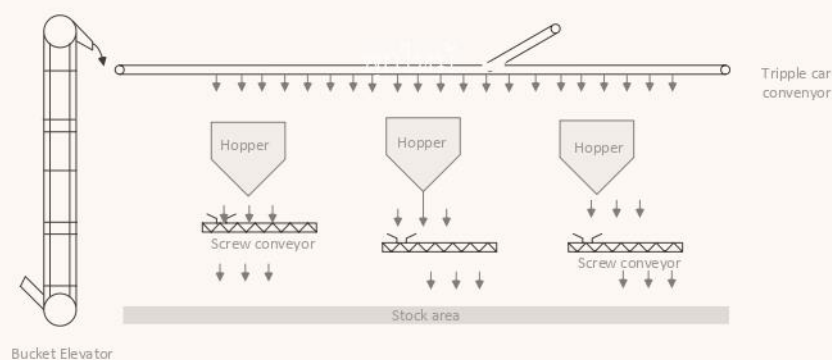
ความรุนแรง (Severity)	ความหมาย (Description)	ระดับ (Rating)
ภัยพิบัติ	ทำให้เกิดการสูญเสีย เสียชีวิต บาดเจ็บ เจ็บป่วยรุนแรง ต่อผู้ปฏิบัติงาน ชุมชน และสิ่งแวดล้อม	5
สูง	ทำให้เกิดการบาดเจ็บทางร่างกายร้ายแรง ทุพพลภาพถาวร	4
ปานกลาง	ทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือการเจ็บป่วยที่ต้องรับการรักษาพยาบาล	3
น้อย	ทำให้เกิดการบาดเจ็บที่ต้องปฐมพยาบาลเบื้องต้นเท่านั้น	2
น้อยมาก	บาดเจ็บเล็กน้อย ไม่ต้องต้องปฐมพยาบาลเบื้องต้น	1

การประเมินความเสี่ยง
การระเบิดของฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง



กรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยง

กระบวนการจัดเก็บมันเส้น (Warehouse) เริ่มจากการรับหัวมันสำปะหลัง (Tapioca receival) จากเกษตรกรมาลงที่ลานรับมัน และลำเลียงไปเก็บในโกดัง เพื่อเตรียมหัวมันสำปะหลังไปทำความสะอาด (Washing) และเข้าสู่กระบวนการต่อไป แสดงกระบวนการจัดเก็บมันเส้น อุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ประกอบด้วย กระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) มอเตอร์ (Motor) และอุปกรณ์ลำเลียงแบบทริปปเปอร์คาร์ (Tripple car conveyor)



ภาพที่ 7 กระบวนการจัดเก็บมันเส้น (Warehouse)

การประเมินความเสี่ยง

การประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk Assessment and Ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบ ความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยใช้แผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk Matrix)

ตารางที่ 3 Risk Matrix (ANSIZ 10)

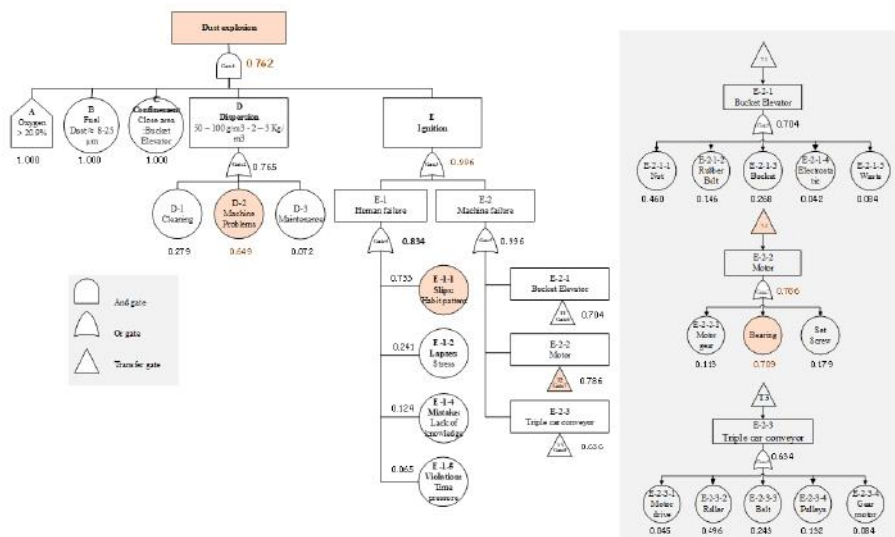
Risk Matrix			S = Severity (ความรุนแรง)				
			น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
			1	2	3	4	5
L = Likelihood (โอกาส)	สูงมาก	5	5	10	15	20	25
	สูง	4	4	8	12	16	20
	ปานกลาง	3	3	6	9	12	15
	น้อย	2	2	4	6	8	10
	น้อยมาก	1	1	2	3	4	5
	เกณฑ์ความเสี่ยง (Criteria)						

ตารางที่ 4 เกณฑ์คะแนนความเสี่ยง (ANSIZ 10)

ระดับความเสี่ยง (Risk level)	ระดับคะแนน (Risk scores)	มาตรการดำเนินการ (Action)
ต่ำ	1-4	สามารถดำเนินการได้ตามดุลพินิจ
ปานกลาง	5-8	ต้องดำเนินการแก้ไขในเวลาที่เหมาะสม
สูง	9-14	ต้องจัดการให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ต่อไป
สูงมาก	15-25	จำเป็นต้องเร่งจัดการความเสี่ยงทันที

กรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA) ได้มีการกำหนดเหตุการณ์การระเบิดฝุ่นเป็นเหตุการณ์แรก (Top event) โดยพิจารณาโอกาสของปัญหาจากคณะกรรมการ พบ สาเหตุการระเบิดของฝุ่นจากห้าเหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น (The dust explosion pentagon) ได้แก่ ฝุ่น ออกซิเจน แหล่งจุดติดไฟ การฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น ซึ่งได้มีการพิจารณาความเป็นไปได้ที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์พื้นฐาน (Gate) โอกาสในการเกิดเหตุการณ์พื้นฐานแต่ละเหตุการณ์ จะแตกต่างกันไปตามปัจจัยต่างๆ สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นถูกกำหนดระดับการประเมินสำหรับแต่ละเหตุการณ์พื้นฐาน (Event) ที่ได้รับการให้ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เครื่องจักร ตลอดจนความรู้เกี่ยวกับอันตรายและการป้องกันอันตรายจากการเกิดฝุ่นระเบิด ที่มีประสบการณ์ในการทำงาน โดยการประเมินความเสี่ยงและให้คะแนนจากผู้เชี่ยวชาญความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสี่ยงขึ้นอยู่กับประตูดรกระใดสามารถคำนวณได้ โดยประตู AND เป็นประตูดรกระที่สร้างความเสี่ยงเมื่อมีปัจจัยเสี่ยงเกิดขึ้นพร้อมกัน และ OR gate เป็นประตูดรกระเพื่อสร้างความเสี่ยงหากมีปัจจัยเสี่ยงใด ๆ ปัจจัยหนึ่งเกิดขึ้น ดังแสดงตัวอย่างดังภาพ



ภาพที่ 7 การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี Fault Tree Analysis (FTA)

กรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยง

จากโครงสร้าง FTA ของเหตุการณ์ที่จะทำให้เกิดการระเบิดของฝุ่น สามารถนำมาประเมินและการจัดลำดับความเสี่ยง (Risk Assessment and Ranking) เป็นการดำเนินการเพื่อกำหนดระดับของความเสี่ยงแต่ละความเสี่ยง ให้สามารถทราบผลกระทบความรุนแรง และโอกาสที่จะเกิดขึ้น โดยใช้แผนผังประเมินความเสี่ยง (Risk Matrix)

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

สาเหตุ	ผลกระทบ	โอกาส การเกิด	คะแนน ความเสี่ยง	ระดับ ความเสี่ยง
การระเบิดของฝุ่น	3	5	15	4 (สูงมาก)
ออกซิเจน	3	5	15	4 (สูงมาก)
เชื้อเพลิง	3	5	15	4 (สูงมาก)
หมอกฝุ่น	3	5	15	4 (สูงมาก)
การฟุ้งกระจายของฝุ่น	3	5	15	4 (สูงมาก)
แหล่งจุดติดไฟ หรือความร้อน	3	5	15	4 (สูงมาก)
Gate 1 การฟุ้งกระจายฝุ่น	3	5	15	4 (สูงมาก)
Gate 2 ความร้อน	3	5	15	4 (สูงมาก)
Gate 3 ความผิดพลาดของ พนักงาน	3	3	9	3 (สูง)
Gate 4 ความผิดพลาดของ เครื่องจักร	3	5	15	4 (สูงมาก)
Gate 5 กะป๋อลำเลียง	3	4	12	3 (สูง)
Gate 6 มอเตอร์ (Motor)	3	5	15	4 (สูงมาก)
Gate 7 อุปกรณ์ลำเลียง แบบทริปเปอร์คาร์	3	4	12	3 (สูง)

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตัวอย่างการชี้บ่งอันตราย และการประเมินความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น (NFPA 61) สามารถแบ่งหัวข้อการประเมินออกเป็น 7 ตอน ได้แก่

- ☐ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป
- ☐ ตอนที่ 2 การประเมินลักษณะของฝุ่น
- ☐ ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต
- ☐ ตอนที่ 4 ระบบกำจัดฝุ่น (Dust collection system)
- ☐ ตอนที่ 5 การถ่ายเทความร้อน การระบายอากาศ และแรงดัน
- ☐ ตอนที่ 6 มาตรการลดผลกระทบ
- ☐ ตอนที่ 7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor)

แนวทางการดำเนินการ สามารถนำแบบประเมิน (Checklist) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสถานประกอบการไปใช้ และผู้ประเมินสามารถนำหัวข้อที่ไม่สอดคล้องหรือไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานไปประเมินความเสี่ยงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative risk models) โดยใช้มาตรฐานของ ANSIZ 10

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

หน่วยงานชนิดของฝุ่นที่ทำให้เกิดการระเบิด.....

ขนาดของฝุ่น..... μm การฟุ้งกระจายของฝุ่น..... g/m^3 ความเข้มข้นของฝุ่น..... g/m^3

ประเภทความรุนแรงของการระเบิด ☐ St0 ☐ St1 ☐ St2 ☐ St3

ตอนที่ 2 การประเมินลักษณะของฝุ่น

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1) ฝุ่นในกระบวนการผลิตสามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟได้			
2) ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $500 \mu\text{m}$			
3) ฝุ่นมี MIE น้อยกว่า 30 mJ			
4) มีการระบุตำแหน่ง กระบวนการ หรืออุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น			
5) มีการระบุตำแหน่ง พื้นที่ หรือบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากการระเบิดของฝุ่น			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1. ความปลอดภัยของอาคาร			
1) มีการก่อสร้าง ดัดแปลง ปรับปรุง เปลี่ยนแปลงการใช้อาคาร			
2) มีระเบียบปฏิบัติ การทำความสะอาดฝุ่นที่ติดไฟได้ในอาคาร			
3) มีแผนผังพื้นที่ที่มีฝุ่นที่ติดไฟได้ รวมทั้งมีการบ่งชี้อันตราย และประเมินความเสี่ยง สำหรับงานทำความสะอาดฝุ่น			
4) มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
5) มีผนัง กำแพงทนแรงดันระเบิด เพื่อแยกพื้นที่อันตรายจากการระเบิดออกจากพื้นที่อื่นๆ และสามารถระบายไปยังภายนอกที่ปลอดภัยได้			
6) อาคาร สำนักงานอยู่ห่างจาก ไซโล กระพ้อ หรือพื้นที่จัดเก็บฝุ่นที่อาจทำให้เกิดการระเบิด (ยกเว้นห้องควบคุมขนาดเล็ก)			
7) อาคารที่มี ไซโล กระพ้อ ก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แยกจากอาคาร สำนักงาน อย่างน้อย 30 เมตร			
8) อาคารที่มีการติดตั้งกระพ้อ มีโครงสร้างป้องกันแรงดันการระเบิด หรือระบายอากาศ (Venting) ในกระพ้อ			
9) มีระบบป้องกันฟ้าผ่า และเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
10) ภายในอาคารมีพื้นที่แยก เพื่อจำกัดอันตรายจากการระเบิดของฝุ่น หรือป้องกันการยุบตัวภายในอาคารหรือไม่			
11) พื้นที่ ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดฝุ่น มีระยะห่างจากอาคารโดยรอบ อย่างน้อย 11 เมตร			
12) ภายในอาคารมีการแยกพื้นที่ฝุ่น หรือการใช้สีของพื้นผิว ผนัง โครงสร้างอาคารที่สามารถมองเห็นการสะสมของฝุ่นในอาคารได้ชัดเจน			
13) มีการออกแบบอาคารที่มีภาชนะจัดเก็บ (Bins, Tanks, Silos) แนวนอนน้อยกว่าในแนวตั้ง เพื่อป้องกันการสะสมของฝุ่นในอาคาร			
14) ภาชนะจัดเก็บขนาด $> 465 \text{ m}^2$ ที่มีอุปกรณ์ และการจัดเก็บฝุ่น แยกออกจากพื้นที่อื่น มีผนังทนไฟ อย่างน้อย 2 ชั่วโมง			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
3.1 ความปลอดภัยของอาคาร (ต่อ)			
15) อาคารมีการออกแบบ และติดตั้งระบบป้องกันรังสีอวกาศภัย โครงสร้างอาคารมีความแข็งแรง เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
16) อาคารมีช่องเปิด กำแพงทนไฟ และผนังกันไฟ และมีประตูหนีไฟ แบบปิดเอง บานประตูหน้าต่างเป็นประเภทกันไฟ และมี Fire damper ทำหน้าที่ปิดระบบท่อลม ไม่ให้ลม หรือเปลวไฟผ่านได้หากเกิดเพลิงไหม้			
17) มีการใช้ประตูแบบ Hold-open devices และมีการออกแบบให้ ประตูปิดเอง เมื่อตรวจพบสิ่งผิดปกติ ดังต่อไปนี้ (1) ความร้อน (2) ควัน (3) เปลวไฟ หรือ (4) มีการเผาไหม้วัตถุติด			
18) อาคารมีทางออก ทางหนีไฟเพียงพอตาม มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
19) คาดฟ้ามีทางเข้าออกสองทาง หรือในกรณีที่มีทางออกเดียวพื้นที่มี ระยะการเข้าถึงทางออกต้องไม่เกิน 15 เมตร			
20) กรณีที่มีการติดตั้ง Merchant Category Codes ที่มีการใช้ระบบ แรงดัน มีการติดตั้งสัญญาณเตือน			
21) มีการตรวจสอบอาคาร โดยหน่วยงานภายนอกตามกฎหมายกำหนด			
22) มีการปรับปรุงแก้ไข หรือมีแผนในการดำเนินการแก้ไขรายการที่ เป็นข้อบกพร่องจากการตรวจสอบอาคาร			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
3. ความปลอดภัยจากภาชนะจัดเก็บ (Bins, Tanks, Silos)			
1) การก่อสร้าง ภาชนะจัดเก็บ เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
2) ในกรณีที่ภาชนะจัดเก็บมี Explosion relief vents สถานประกอบการมีการตรวจสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน			
3) ประตู (Access doors) หรือช่องเปิดของภาชนะจัดเก็บ -สามารถเข้าตรวจสอบ ทำความสะอาด การบำรุงรักษา และสามารถใช้อุปกรณ์ดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ - มีการออกแบบเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่น			
4) กรณีที่ถัง แท็งก์ หรือไซโล จำเป็นต้องมีคนเข้าไปทำงาน มีขนาดของช่องเปิดอย่างน้อย 610 mm.			
5) มีการตรวจสอบภาชนะจัดเก็บ และปรับปรุงแก้ไข ตามมาตรฐานที่กำหนด			
3.4 สายพาน รังลำเลียง และการไหลของวัสดุ (Conveyors, Spouts, Throws of Material)			
3.4.1 สายพานลำเลียงออกแบบมาเพื่อชะลอการไหล และปล่อยวัสดุ (Discharge) เมื่อถึงปลายทาง			
3.4.2 อุปกรณ์ลำเลียงแบบแนวตั้ง หรือกระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) เป็นประเภทที่สามารถตรวจจับความร้อนของตลับลูกปืน (hot bearing sensors) บริเวณหัวและท้ายของตัวเครื่องได้			
3.4.3 อุปกรณ์ลำเลียงมีสกรู หรือถูกปิดครอบด้วยโลหะ และออกแบบมาเพื่อชะลอการไหล และปล่อยวัสดุ เมื่อถึงปลายทาง			
3.4.4 รังลำเลียงสามารถป้องกันการสะสมของฝุ่นได้			
2.4.5 วัสดุที่ใช้ทำรังลำเลียง หรืออุปกรณ์ สามารถติดไฟได้			
3.4.6 ท่อ (Ducts) หรือสายพานลำเลียง (conveyors) ประเภทที่เจาะผ่านผนัง มีมาตรการป้องกันการลุกลามของไฟ			
3.4.7 มีการตรวจสอบระบบลำเลียง และปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
2. การควบคุมแหล่งลุกติดไฟในอาคาร			
1) มีการต่อสายดิน (grounding) และการต่อฝาก (bonding) กับอุปกรณ์ทุกตัว (ความต้านทานพื้น ≤ 5 โอห์ม)			
2) การติดตั้งมอเตอร์ และตรวจสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
3) เครื่องจักรมีการใช้ตั้ลูกปืน (Bearings) เพื่อป้องกันการเสียดสีของเครื่องจักรทั้งหมด สายพานลำเลียง ขาอุปกรณ์ลำเลียง และอุปกรณ์แปรรูปชนิดอื่น			
4) Bearings เป็นชนิดที่กันฝุ่น และไม่มีน้ำมันหล่อลื่นมากเกินไป			
5) Bearings เป็นชนิดที่สัมผัสกับฝุ่นโดยตรง			
6) มีการตรวจสอบ บำรุงรักษา Bearings และบันทึกจัดเก็บข้อมูล			
7) Bearings ที่อยู่บนสายพานลำเลียง ติดตั้งนอกเครื่องจักรเป็นชนิดที่สามารถป้องกันฝุ่นได้			
8) Bearings อยู่ในตำแหน่งที่สามารถเข้าตรวจสอบได้อย่างสะดวก			
9) เครื่องจักรมี Support bearings บน Screw conveyors หรืออุปกรณ์อื่นที่คล้ายกัน			
10) มีการติดตั้งระบบลำเลียงด้วยลม (Pneumatic conveying) เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			
11) ระบบลำเลียงด้วยลมมีส่วนประกอบระบบที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า			
12) อาคารมีการกำหนดระบบการขออนุญาตทำงาน (hot work permit) เพื่อป้องกันความร้อนจากงานที่อาจทำให้เกิดประกายไฟ			
13) มีการตรวจสอบระบบลำเลียงด้วยลม ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
4. สายพาน รางลำเลียง และการไหลของวัสดุ (Conveyors, Spouts, Throws of Material)			
1) สายพานลำเลียงออกแบบมาเพื่อชะลอการไหล และปล่อยวัสดุ (Discharge) เมื่อถึงปลายทาง			
2) อุปกรณ์ลำเลียงแบบแนวตั้ง หรือกระพ้อลำเลียง (Bucket Elevator) เป็นประเภทที่สามารถตรวจจับความร้อนของตลับลูกปืน (hot bearing sensors) บริเวณหัวและท้ายของตัวเครื่องได้			
3) อุปกรณ์ลำเลียงมีสกรู หรือสายพานลำเลียง ถูกปิดครอบด้วยโลหะ และออกแบบมาเพื่อชะลอการไหล และปล่อยวัสดุ (Discharge) เมื่อถึงปลายทาง			
4) รางลำเลียงสามารถป้องกันการสะสมของฝุ่นได้			
5) วัสดุที่ใช้ทำรางลำเลียง หรืออุปกรณ์ สามารถติดไฟได้			
6) ท่อ (Ducts) หรือสายพานลำเลียง (conveyors) ประเภทที่เจาะผ่านผนัง มีมาตรการป้องกันการลุกลามของไฟ			
7) มีการตรวจสอบระบบลำเลียง และปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
5. การออกแบบอุปกรณ์ทั่วไป			
1) ในกระบวนการผลิตมีระบบขนส่งประเภทใด - ระบบลำเลียงด้วยลม (Pneumatic conveying system) - ระบบลำเลียงมีการแยกแหล่งพลังงานจากระบบอื่น ๆ - ระบบกำจัดฝุ่น (Dust collection system)			
2) แม่เหล็ก (Magnets) และ Screens located upstream ของอุปกรณ์ สามารถตรวจสอบและทำความสะอาดได้สะดวก			
3) มีการติดตั้ง Emergency Stop และอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน			
4) ระบบการระบายอากาศทำงานได้ตามปกติ สามารถไล่ฝุ่นหมด ในกรณีที่เกิดฝุ่นจากกระบวนการ Shutdown			
5) กรณีที่สายพานลำเลียงอยู่ติดกับอาคาร หรือโครงสร้าง มีการออกแบบผนังที่มีช่องระบายอากาศ หน้าต่าง รางลำเลียง หรือช่องเปิด ที่สามารถระบายแรงดัน เมื่ออุปกรณ์ถูกเปิด			
6) ขนาดพัดลมที่ติดตั้งมีความเหมาะสมกับปริมาณการขนถ่ายวัสดุ			
6. ท่อ (Piping) วาล์ว (Valves) และพัดลมระบาย (Blowers)			
1) ระบบท่อทั้งหมดเป็นสุญญากาศ สามารถป้องกันฝุ่น และมีการต่อสายดิน (ความต้านทานบนพื้นดิน ≤ 5 โอห์ม)			
2) ระบบท่อทั้งหมดทำจากวัสดุที่เหมาะสม สามารถถอด ประกอบเพื่อทำความสะอาดได้อย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ			
3) วาล์วระบายแรงดัน Pressure and vacuum relief valves ถูกออกแบบ และตั้งค่าให้สามารถลดแรงดัน เพื่อป้องกันระบบ และส่วนประกอบอื่นๆ ได้			
4) Multiple-direction valves มีโครงสร้างกันฝุ่น และไม่ส่งผลกระทบต่อวัตถุดิบ หรือทิศทางการไหลของวัตถุดิบ			
5) มีการตรวจสอบระบบท่อ และปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
8. อุปกรณ์ เครื่องจักรในกระบวนการผลิต			
1) ระบบส่งกำลังในขาคะพ้อ มีการติดตั้งด้วย Wire mesh screens แม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องแยกด้วยลม หรือเครื่องแยกด้วยแรงโน้มถ่วงเฉพาะ			
2) ระบบราง หรือระบบท่อลำเลียงในพื้นที่ ที่มีขนาดเล็ก มีการติดตั้ง แม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า ตัวคั่นด้วยลม เครื่องแยกด้วยความถ่วงจำเพาะ หรือเครื่องกรอง			
3) อุปกรณ์มีการต่อฝาก และติดตั้งสายดิน			
4) อุปกรณ์เครื่องจักร และส่วนประกอบต่างๆ ความสะดวกต่อการ ทำความสะอาด			
5) ในกระบวนการผลิตแป้ง ได้หลีกเลี่ยงการใช้เหล็กกล้าคาร์บอน กับ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหว			
6) รอก ตะแกรงร่อน หรืออุปกรณ์ที่คล้ายกันมีระบบกันฝุ่น			
7) ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในเครื่องจักร โลหะ หรือตัวนำไฟฟ้า อโลหะ มีความต้านทานไฟฟ้าไม่เกิน 5 โอห์ม			
8) กรณีที่มีการโม้ หรือบดแบ่งในอาคาร มีระบบป้องกันการระเบิด หรือ มีผนังกันพื้นที่ เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
7. ครอบ			
1) มีการติดตั้งครอบภายในอาคาร			
2) ครอบทำหน้าที่เคลื่อนย้ายวัสดุที่มีความเสี่ยงต่อการลัดวงจร บริเวณท่อ ส่วนหัวและส่วนท้ายของช่องเปิด และส่วนต่อเชื่อม			
3) มีการติดตั้ง Explosion venting บริเวณขาครอบ ตามมาตรฐานที่กำหนด			
4) มีการติดตั้ง Motor และ Drive train แยกจากกัน เพื่อป้องกันการ Overloading ในครอบ			
5) การทำงานของชุดอุปกรณ์ของครอบไม่เกินภาระบรรทุก (Overloading)			
6) ในกรณีที่มีการติดตั้งมอเตอร์หลายตัว หากมีตัวใดตัวหนึ่งที่ไม่ทำงาน ครอบสามารถทำงานได้ปกติ			
7) กรณีครอบมี Load 100% สามารถทำงานได้ปกติ			
8) ครอบแต่ละขามีอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟที่ส่งไปยังมอเตอร์ และมีการแจ้งเตือน			
9) ในกรณีที่สายพานลำเลียงทำงานช้า 80% ของความเร็วการทำงาน ปกติ ระบบมีการหยุด หรือเปลี่ยนเส้นทางใหม่ หรือไม่			
10) มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนระบบรอก และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง			
11) มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในถังลบลูกปืน การเยื้องศูนย์ และความผิดปกติอื่นๆ หรือไม่			
12) มีการระบายการที่บกพร่อง หรือไม่สอดคล้องตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง			

ตัวอย่าง การซึ่บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 3 การออกแบบอาคาร และอุปกรณ์ในอาคารการผลิต (ต่อ)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
9. การขนส่งวัตถุดิบด้วยอุปกรณ์ลำเลียง (Receiving and Shipping Conveyances)			
1) ระบบการขนส่งทั้งหมด (Railcars hopper cars, boxcars, tank cars) มีการเชื่อมต่อบนสายดิน (ความต้านทานพื้น ≤ 5 โอห์ม)			
2) ชุดอุปกรณ์ลำเลียงมีการป้องกันด้วยตัวกรองอากาศ สำหรับการขนส่งวัสดุที่ติดไฟได้ด้วยระบบลม			
3) ระบบการขนส่งทั้งหมด มีตัวกรองป้องกันฝุ่นเข้าในอาคาร หรือโครงสร้าง			
4) ระบบขนถ่ายแบบ Unloading System มีการป้องกันด้วยเครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector)			
5) มีระบบรับวัตถุดิบ (Receiving systems) ที่มีตะแกรง ตะแกรงสวด แม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า หรือการคัดแยกด้วยความถ่วงจำเพาะ			
6) มีการตรวจสอบระบบขนถ่าย และปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด			

ตัวอย่าง การซึ่บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 4 ระบบกำจัดฝุ่น (Dust collection system)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1) การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collection system)			
2) ระบบกำจัดฝุ่น มีการติดตั้งระบบ Interlocked เพื่อป้องกันการ ทำงานของเครื่องจักร กรณีที่หยุดทำงาน			
3) ระบบกำจัดฝุ่น มีสัญญาณเตือน ในกรณีดังต่อไปนี้ - เมื่อระบบตรวจพบฝุ่นที่ติดไฟ - เมื่อเครื่องหยุดทำงาน - ช่องระบายอากาศฉุกเฉิน ถูกเปิดใช้งานเมื่อเกิดการระเบิด (กรณีระบบ เชื่อมต่อกับช่องระบายอากาศฉุกเฉิน)			
4) Hoppers มีระบบควบคุมฝุ่นอย่างมีประสิทธิภาพ			
5) ระบบควบคุม Hoppers มีสัญญาณแจ้งเตือน เมื่อเครื่องจักร Tripped หรือ Shut down			
6) กรณีที่มีแรงดันเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นใน Hoppers มีสัญญาณแจ้งเตือน			
7) ภาชนะบรรจุฝุ่นเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ มีการติดตั้ง Rotary valves หรือ อุปกรณ์ชนิดที่คล้ายกัน เพื่อแยกออกจากส่วนอื่นๆ ของระบบ			
8) มีการติดตั้งอุปกรณ์กำจัดฝุ่น และการตรวจสอบ ปรับปรุงให้เป็นไป ตามมาตรฐานที่กำหนด			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 6 มาตรการลดผลกระทบ

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1) การควบคุมฝุ่น (Dust Control) - มีการออกแบบอุปกรณ์หลักเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง - มีการระบุรายการที่บกพร่อง			
2) การป้องกันการระเบิด - มีการออกแบบอุปกรณ์หลักเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง - มีการระบุรายการที่บกพร่อง			
3) การป้องกันอัคคีภัย (Fire Protection) - มีการออกแบบอุปกรณ์หลักเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง - มีการระบุรายการที่บกพร่องหรือไม่สอดคล้องกันหรือไม่			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 5 การถ่ายเทความร้อน การระบายอากาศ และแรงดัน

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1) อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ใช้อากาศ ให้น้ำ หรือไอระเหย มีการระบายแรงดันด้วย Pressure-relief valves			
2) ระบบใช้อุปกรณ์ Relief valves ไม่ติดไฟ และมีความปลอดภัย			
3) มีเครื่องทำความร้อน และปั๊ม ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อน หรือ อาคาร มีโครงสร้างที่ไม่ติดไฟ และมีการติดตั้งระบบดับเพลิงอัตโนมัติ (Automatic sprinklers)			
4) มีการเผาไหม้อากาศจากการ ทำความสะอาด			
5) Enclosures สำหรับ Heat exchangers constructed สร้างจาก วัสดุที่ไม่ติดไฟ และมีทางเข้าออก สำหรับทำความสะอาดและบำรุงรักษา			
6) ตำแหน่ง Heat exchangers อยู่ในจุดที่ไม่มีฝุ่นสะสม			
7) Heat exchangers มีการติดตั้งระบบปิด Heat exchangers และปั๊ม เมื่อเปิดใช้งานระบบป้องกันอัคคีภัย หรือป้องกันการลุกลามของไฟ			
8) Heating units มีท่อเผาอากาศจากภายนอกอาคาร หรือจากที่อื่น			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
1) มีการประเมิน การจัดทำแผนการตรวจสอบการดูแลรักษาความสะอาด วัสดุ อุปกรณ์ ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น			
2) มีทะเบียนความเสี่ยงของพื้นที่ ที่มีการสะสมของฝุ่น และมีแผนในการดูแลรักษาความสะอาดในพื้นที่			
3) การดูแลรักษาความสะอาดเป็นไปตามมาตรฐาน Housekeeping			
4) Housekeeping program มีการระบุในประเด็นต่อไปนี้ - ระบบปิดมีอุปกรณ์สามารถทำให้เกิดการเสียด สี ได้ - ขนาดพื้นที่อุปกรณ์ มีขนาด ≤ 10.7 m - ระบบปิด มีเครื่องอบความร้อนอยู่ภายใน			
5) มีการสะสมของฝุ่นบริเวณชั้น ผง คาน ท่อและพื้นผิวเพดานในระบบไม่เกิน 0.32 ซม.			
6) มีการอบรมอันตรายในพื้นที่ปฏิบัติงาน และการระเบิดของฝุ่น			
7) มีการบันทึกผลการตรวจสอบพื้นที่ปฏิบัติงาน และการฝึกอบรม			
8) มีการอนุญาตให้สูบบุหรี่ในพื้นที่ปฏิบัติงาน			
9) มีการสื่อสารให้พนักงานและผู้รับเหมาทราบ (เช่น ป้าย แผนที่ หรือ ข้อมูลอ้างอิงอื่น ๆ) เกี่ยวกับพื้นที่อันตรายจากฝุ่นที่ติดไฟได้			
10) ก่อนทำกิจกรรมใด ๆ ที่อาจก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น เช่น การใช้ลมทำความสะอาด ผง คาน ท่อ และพื้นผิว มีการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า และแหล่งจุดติดไฟอื่นๆ เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟ			
11) มีแผนการบำรุงรักษาเชิงรุกสำหรับอุปกรณ์เครื่องเป่า เครื่องดักฝุ่น มาตรฐานแรงดันต่างๆ ของอุปกรณ์ลำเลียง ระบบสายดิน (Grounding)			
12) มีการอบรมความปลอดภัยให้กับผู้รับเหมาเกี่ยวกับอันตรายจากฝุ่น ในโรงงาน งานที่เกิดประกายไฟ รวมถึงกฎระเบียบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
13) ผู้ปฏิบัติงาน ช่างซ่อมบำรุง และผู้รับเหมา ได้รับการอบรมเกี่ยวกับการซ่อมบำรุง และการทำงานในพื้นที่อับอากาศ			
14) ผู้รับเหมาได้รับการอบรมเกี่ยวกับอันตราย ระเบียบความปลอดภัย ได้แก่ การป้องกันการกระเปิด การทำงาน hot work แผนฉุกเฉินต่างๆ ข้อกำหนดในการต่อสายดิน การ ทำความสะอาดวัสดุที่ติดไฟ และห้ามสูบบุหรี่ในพื้นที่อันตราย การป้องกันและระงับอัคคีภัย เป็นต้น			
15) พื้นที่ปฏิบัติงานมี Hot work procedure			
16) การทำงานเกี่ยวกับ Hot work permits มีการตรวจสอบความสะอาดของระบบท่อ มั่นใจว่าไม่มีฝุ่นที่ติดไฟได้ ก่อนและหลังปฏิบัติงาน			
17) พนักงานซ่อมบำรุง ได้รับการอบรมเกี่ยวกับ Hot work permits เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟ การระเบิดของฝุ่น			
18) Hot work permits มีการขออนุญาตทุกกะ			
19) หลังจากปฏิบัติงาน Hot work permits มีการตรวจสอบพื้นที่อุปกรณ์ เครื่องจักร ให้มั่นใจว่าไม่ร้อน มีการเย็นตัวลง			
20) มีการกำจัดความเสี่ยงทั้งหมด ก่อนเริ่มงาน Hot work permits			
21) ไม่มีวัสดุที่ติดไฟในรัศมีระยะ 11 m. ขณะปฏิบัติงาน Hot work permits			
22) มีการตรวจสอบพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟ จากไอระเหยและก๊าซที่ติดไฟได้			
23) อาคารมีพื้น โครงสร้าง และอุปกรณ์ เป็นประเภท fire-proofed material			
24) มีการกั้นพื้นที่ เพื่อป้องกันผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าพื้นที่ก่อนได้รับอนุญาต			
25) มีมาตรการป้องกัน กรณีที่เกิดประกาย การป้องกันแรงดันจากการระเบิด			
26) ระบบป้องกัน และระงับอัคคีภัยพร้อมใช้งาน			

ตัวอย่าง การชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง

ตอนที่ 7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
27) มีมาตรการการเฝ้าระวังการเกิดประกายไฟ ภายหลังจาก Hot work permits เสร็จสิ้น อย่างน้อย 60 นาที			
28) มีการตรวจสอบพื้นที่ทำงานเป็นประจำ ก่อนเลิกงาน หรือช่วงวันหยุดยาว			

แบบฟอร์มการตรวจ ช่องระบายอากาศ (Vent) ประจำปี

หมายเลข ช่องระบายอากาศชื่อบริษัท.....ตำแหน่งช่องระบาย
อากาศ.....ผู้ตรวจ.....วันที่
ตรวจ.....

- | | | |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| 1. ติดตั้งทิศทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 2. มีสภาพสึกกร่อน | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 3. มีสภาพเสียหายทางกลไกหรือทางกายภาพ | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 4. มีป้ายกำกับคำเตือน อุปกรณ์ระบายแรงดันระเบิด | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 5. มีป้ายแสดงข้อมูลของผู้ผลิตอย่างชัดเจน | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 6. ทาสี หรือเคลือบ (นอกเหนือจากโดยผู้ผลิต) | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 7. มีสภาพโป่ง ชำรุด หรือผิดรูป | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 8. มีการเปลี่ยนแปลง หรือดัดแปลง | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 9. มีสภาพเก่า | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 10. มีอุปกรณ์ยึด สำหรับการติดตั้ง | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 11. กรอบประตูเสียหายหรือผิดรูป | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 12. กรอบประตูหลุด | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 13. อุปกรณ์ตรวจจับ (sensor) สามารถทำงานได้ปกติ | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 14. บานพับทำงานได้ปกติ | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |
| 15. สะอาด ปราศจากสิ่งปนเปื้อน | ☐ ใช่ | ☐ ไม่ใช่ |



การป้องกันการระเบิดของฝุ่น



การป้องกันการระเบิดของฝุ่น

แนวทางทางตามลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ได้แก่ การควบคุมอันตราย (Hierarchy of Controls) ประกอบด้วย การขจัด (Elimination) การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) และการควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative Controls) แสดงการคำนวณน้ำหนักของเหตุการณ์ในการป้องกันการระเบิดของฝุ่น เพื่อเรียงลำดับทางเลือกแนวทางในการตัดสินใจ



ภาพที่ 8 แนวทางการป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls)

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น

ตารางที่ 6 การป้องกันด้วยลำดับชั้นของการควบคุมอันตราย (Hierarchy of controls) เพื่อป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

Hierarchy of control	Five elements of dust explosion	Dust explosion prevention
การขจัด (Elimination)	เชื้อเพลิง (Fuel) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	1. การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน (Cleaning) 2. ติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น (Dust collector) 3. ติดตั้งระบบระบายอากาศ (Venting)
การแทนที่ (Substitution)	ออกซิเจน (Oxygen)	การแทนที่ออกซิเจน (O ₂) 1. การแทนที่ด้วยไนโตรเจน (N) 2. การแทนที่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)	-ความร้อน (Ignition)	1. ติดตั้งอุปกรณ์ (explosion-proof equipment) 2. การออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด 3. การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ระบบรับเหตุเพลิงไหม้
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)	ความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	1. การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) 2. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) 3. มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP)
PPE	ความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion)	สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลเมื่อทำงานในกระบวนการผลิตที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น เช่น ถุงมือ หน้ากาก ชุดปฏิบัติงาน รองเท้านิรภัย เป็นต้น

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การขจัด (Elimination)

การขจัด (Elimination) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยการขจัดเชื้อเพลิง (Fuel) และการฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. การทำความสะอาดสภาพแวดล้อมการทำงาน มีการจัดทำ SOP กำหนดให้มีการทำความสะอาดในพื้นที่ปฏิบัติงานทุก 4 ชั่วโมง โดยเฉพาะบริเวณที่มีอุปกรณ์เครื่องจักรทำงานต่อเนื่องตลอดระยะเวลา เพื่อป้องกันการลุกติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้
2. การออกแบบและติดตั้งช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) ในกะพ้อลำเลียงมันเส้น ด้วยการพิจารณาข้อมูลจำเพาะของมันเส้นที่มีค่า K_{st} เท่ากับ 200 Bar m/sec ค่า P_{max} เท่ากับ 7.0 Bar ค่า P_{red} เท่ากับ 0.500 Bar.

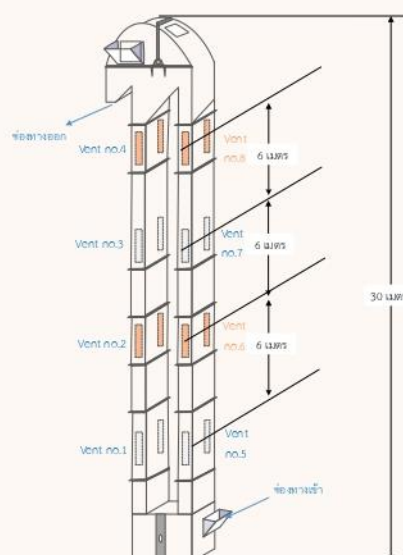
การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การขจัด (Elimination)

ตัวอย่าง การออกแบบและติดตั้งช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting) ในกะพ้อลำเลียงมันเส้น ของกะพ้อที่มีความสูง 30 เมตร

การออกแบบแผนระบายการระเบิดที่กะพ้อลำเลียงของกะพ้อที่มีความสูง 30 เมตร สามารถหาขนาดของช่องระบาย (Venting Design) จาก L/D กะพ้อที่มีความสูง 12.5 m. ต้องมีการติดตั้งกะพ้อทั้งหมด 8 ตัว ขนาดพื้นที่ เท่ากับ 1.333 m² ระยะห่างสูงสุดแต่ละตัวไม่เกิน 6 m. ดังแสดงตามตัวอย่าง

ข้อมูลของอุปกรณ์	Bucket Elevator 1 m. x 0.5 m. x 12.5 m
ระยะห่างสูงสุดของแต่ละ vents	6 m.
จำนวนการติดตั้ง vents	8 ตัว
ขนาดพื้นที่ Vents ขาดเดียว	0.333 m ²
ขนาดพื้นที่ ชั้นต่ำ Vents ส่วนขาขึ้น	1.333 m ²
ขนาดพื้นที่ ชั้นต่ำ Vents ขาลง	1.333 m ²



ภาพที่ 9 ตัวอย่าง การออกแบบและติดตั้งช่องการระบายความร้อน (Deflagration venting)

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การขจัด (Elimination)

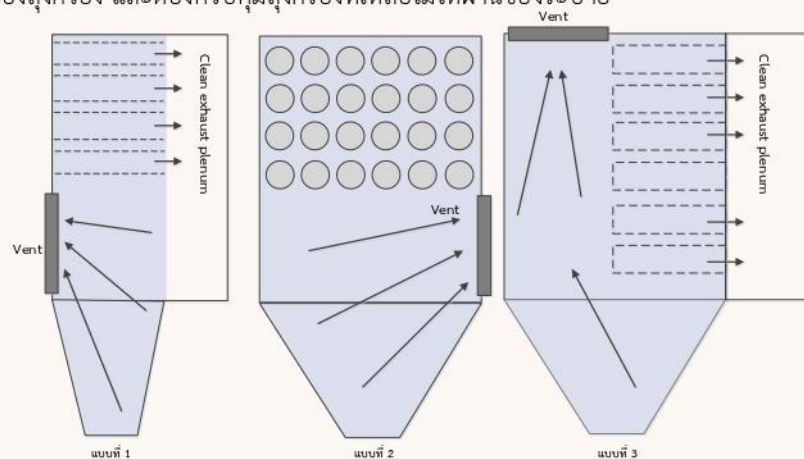
ตัวอย่าง การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector)

การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector) ใช้สำหรับกำจัดฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย สามารถคำนวณตาม NFPA 68 (Standard on explosion protection by deflagration venting) โดยพิจารณาจากชนิดของฝุ่นอัญพิช เพื่อจะได้ทราบค่าดัชนีการระเบิด (K_{st}) ความดันสูงสุด (P_{max}) ความดันกระตุ่นคงที่ (P_{stat}) ความดันลดหลังทำการระบาย (P_{red}) นอกจากนั้นต้องทราบปริมาตรและสัดส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกรองฝุ่นด้วย สามารถติดตั้งแผงระบายการระเบิดของเครื่องดักฝุ่น ได้ 3 แบบ ได้แก่

แบบที่ 1 ติดตั้งให้ช่องระบายให้พื้นที่ทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าด้านล่างของถุงกรอง ระยะห่างระหว่างถุงกรอง (s) น้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีถุงกรองหรือแผ่นกรอง โดยระยะห่างระหว่างถุงกรอง (s) มากกว่ารัศมีถุงกรอง (r) หรือแผ่นกรอง ให้คำนวณพื้นที่ช่องระบายโดยใช้ด้านที่สกรปรกเท่านั้น

แบบที่ 2 ติดตั้งช่องระบายความดันให้สั้นลงไม่ให้ยื่นลงไปต่ำกว่าด้านบนของช่องระบายความดันในระยะอย่างน้อยเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ห่างจากช่องระบายและต้องควบคุมถุงกรองที่เหลือไม่ให้ผ่านช่องระบาย

แบบที่ 3 ติดตั้งช่องระบายความดัน ให้ด้านล่างของช่องระบายอยู่สูงกว่าด้านล่างของถุงกรอง และต้องควบคุมถุงกรองที่เหลือไม่ให้ผ่านช่องระบาย



ภาพที่ 10 การติดตั้งระบบดักฝุ่น (Dust collector)

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การแทนที่ (Substitution)

การแทนที่ (Substitution) เป็นการออกแบบระบบปิดให้มีการแทนที่ออกซิเจน (Oxygen) ในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ หรือการระเบิดเกิดขึ้น ด้วยการออกแบบและติดตั้งระบบ ระบายเหตุเพลิงไหม้ด้วยการแทนที่ออกซิเจน (Oxygen) ด้วยไนโตรเจน (N) หรือการแทนที่ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ตัวอย่าง การตรวจจับและระงับการระเบิด (Deflagration suppression) คือ กระบวนการทำงานของระบบดับเพลิงที่สูงสามารถตรวจจับและดับไฟก่อนที่แรงดันจะเกิดตัว ขึ้น หลักการของทำงาน Deflagration suppression คือ เมื่อมีการก่อตัวของลูกไฟ (Fire ball) จะขยายตัวด้วยความเร็ว 9 m/sec คลื่นแรงดันเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 335 m/sec อุปกรณ์จะสามารถตรวจจับ (Deflagration detector) แรงดัน หรือเปลวไฟ และสัญญาณ ส่งผ่านไปยังชุดควบคุม เพื่อกระตุ้นอุปกรณ์ดับเพลิงให้สามารถทำงานได้อย่างทันท่วงที กระบวนการทั้งหมดใช้เวลาเป็นมิลลิวินาที (Milliseconds)



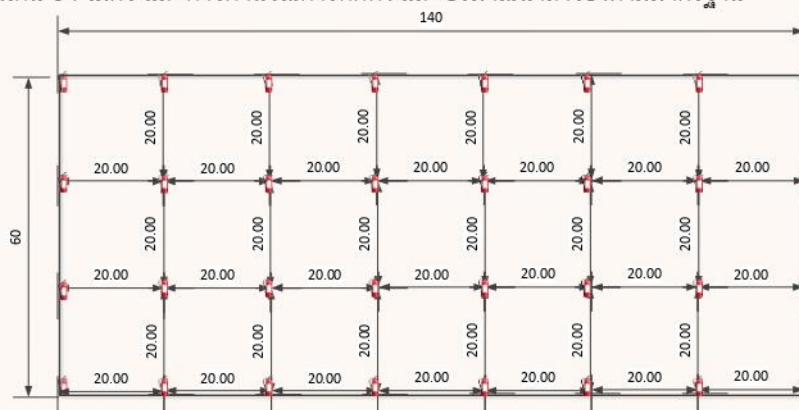
ภาพที่ 11 ตัวอย่าง การตรวจจับและระงับการระเบิดด้วยการแทนที่ด้วย CO₂ ในถังเก็บขนาด 1 m³

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยการจัดความร้อน (Ignition) ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

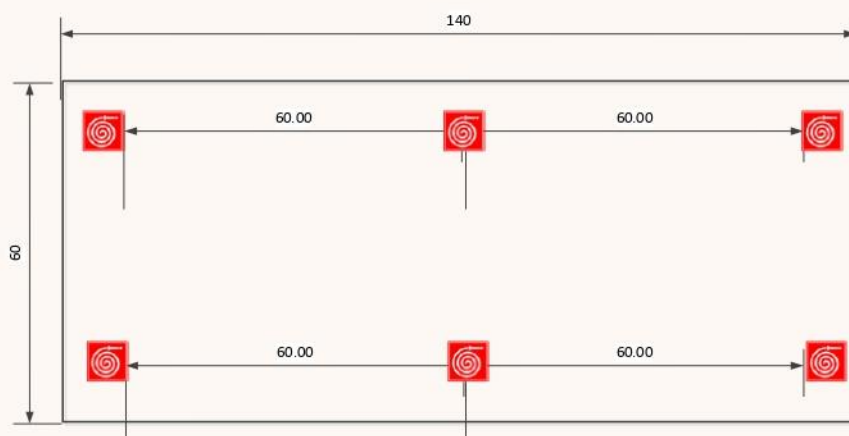
1. การติดตั้งอุปกรณ์ (explosion-proof equipment) ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการระเบิด โดยได้มีการติดตั้งคอมไพกันระเบิด สวิตช์กันระเบิด และปลั๊กไฟกันระเบิด
2. การออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด เป็นการออกแบบโครงสร้างการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความสูญเสียจากการระเบิด (Blast Resistant Wall) บริเวณพื้นที่จัดเก็บมันเส้น เพื่อให้สามารถทนไฟได้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง
3. การออกแบบและติดตั้งระบบระงับเหตุเพลิงไหม้ โดยได้มีการพิจารณาพื้นที่เก็บมันเส้นขนาดมากกว่า 1,000 m² ต้องมีระบบดับเพลิงอัตโนมัติ มีการติดตั้ง มีอุปกรณ์ตรวจจับและแจ้งเหตุเพลิงไหม้บริเวณเก็บวัตถุดิบ หรือวัตถุติดไฟได้และไม่มีคนทำงานประจำ เครื่องดับเพลิงแบบมือถือ ติดตั้งห่างไม่เกิน 20 m. ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร มีการจัดเตรียมน้ำสำรองเพียงพอให้อุปกรณ์ดับเพลิงไม่น้อยกว่า 30 นาที การศึกษาครั้งนี้ได้มีการทบทวน และปรับปรุงจำนวนและระยะในการติดตั้งถังดับเพลิงในพื้นที่จัดเก็บมันเส้น การกำหนดระยะในการติดตั้งตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร และการคำนวณการติดตั้ง และปริมาณน้ำสำรองตามมาตรฐาน



ภาพที่ 12 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้งถังดับเพลิงในพื้นที่จัดเก็บมันเส้น

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)



ภาพที่ 13 แผนผังแสดงระยะในการติดตั้ง ตู้สายฉีดน้ำดับเพลิง (Fire Hose Cabinet) ระยะห่างระหว่างตู้สายฉีดน้ำดับเพลิงต้องห่างกันไม่เกิน 64 เมตร

การคำนวณอัตราการส่งน้ำของโรงงานมันเส้นที่ต้องการเท่ากับ 1,750 GPM
ระยะในการสำรองน้ำอย่างน้อย 30 นาที ปริมาณน้ำสำรองอย่างน้อย เท่ากับ 198,712 ลิตร

ท่อยืนเส้นที่ 1	ท่อยืนเส้นที่ 2	ท่อยืนเส้นที่ 3	ท่อยืนเส้นที่ 4	ท่อยืนเส้นที่ 5	ท่อยืนเส้นที่ 6
ต้องการน้ำ	ต้องการน้ำ	ต้องการน้ำ	ต้องการน้ำ	ต้องการน้ำ	ต้องการน้ำ
500 GPM	250 GPM	250 GPM	250 GPM	250 GPM	250 GPM
					อัตราการส่งน้ำที่ต้องการ = 1,750 GPM

อัตราการส่งน้ำที่ต้องการเท่ากับ $500+250+250+250+250+250= 1,750$ GPM

- ระยะในการสำรองน้ำอย่างน้อย 30 นาที

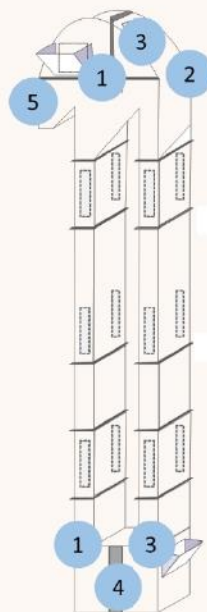
- ปริมาณน้ำสำรองอย่างน้อย $1,750 \times 30 = 52,500$ แกลลอน (198,712 ลิตร)

ภาพที่ 14 การคำนวณการติดตั้ง และปริมาณน้ำสำรองตามมาตรฐาน

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)

4. การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) ในกะพ้อลำเลียงในจุดที่ความเสี่ยงดังนี้ ได้แก่ การติดตั้ง Bearing temperature sensor โดย Sensor จะสอดเข้าไปที่จารบีในตลับ ลูกปืน เพื่อตรวจจับอุณหภูมิของตลับลูกปืนทั้งด้านบนและด้านล่าง การติดตั้ง Surface temperature sensor ติดตั้งหัววัดที่เปลือกของตลับลูกปืน เปลือกมอเตอร์ เปลือก gear box หรือเปลือกเครื่องจักรอื่นๆ เพื่อตรวจจับอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง การติดตั้ง Belt misalignment sensor ติดไว้ที่กะพ้อลำเลียง หรือสายพานลำเลียง เพื่อตรวจจับแนวการเคลื่อนที่และแนวตรงของกะพ้อลำเลียง หรือสายพาน การติดตั้ง Speed switch sensor เพื่อตรวจจับความเร็วของเพลลา ที่ต่ำกว่าความเร็วปกติ และการติดตั้ง Plug/Choke sensor เพื่อใช้วัดระดับหรือการอุดตันของมันเส้น บริเวณทางออกของกะพ้อลำเลียง

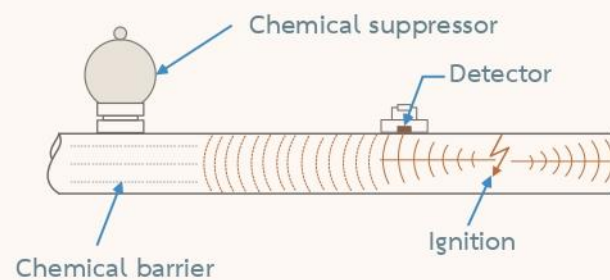


ภาพที่ 15 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Hotspot Temperature Detection) ในกะพ้อ

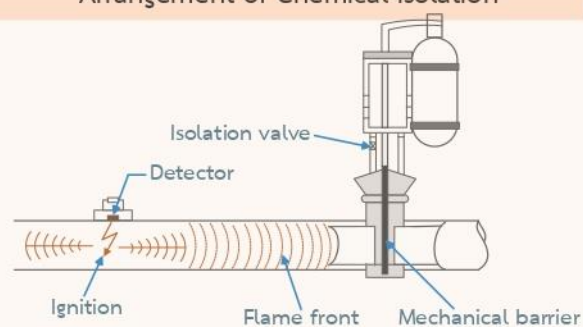
การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls)

5. การแยกพื้นที่ออกจากการระเบิด (Deflagration isolation) การแยกพื้นที่ของอุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดการระเบิดเพื่อตรวจจับและระงับการระเบิด การแยกพื้นที่ทางกล (Mechanical isolation) สามารถทำได้โดยการติดตั้งวาล์วล้อยอดอากาศแบบโรตารี (Rotary airlock valve) ในถังเก็บแป้ง หรือในวาล์วล้อยอดอากาศแบบโรตารี (Rotary Airlock Valve) เพื่อป้องกันเปลวไฟ ความร้อน หรือแรงดันไหลย้อนกลับไปในถังเก็บ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งวาล์วใบมีดแบบเร็ว (High-speed knife gate valve) ซึ่งเป็นวาล์วชนิดที่ตรวจจับแรงดันด้วยแสง (Optical detector) หรือ ตรวจจับด้วยแรงดัน และเปลวไฟ (deflagration pressure or flame) โดยทั่วไปวาล์วชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรง สามารถทนรับแรงดันได้ 150 psi (1035 kPa)



Arrangement of Chemical isolation



Mechanical Isolation Using a High-Speed Gate Valve

ภาพที่ 16 การแยกพื้นที่ออกจากการระเบิด (Deflagration isolation)

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

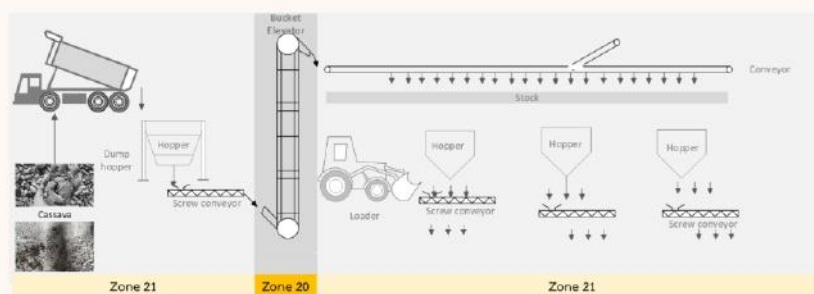
การบริหารจัดการ (Administrative Controls)

การบริหารจัดการ (Administrative Controls) เป็นการออกแบบระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่นในกระบวนการจัดเก็บมันเส้นด้วยความร้อน (Ignition) การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion) ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์อันตรายกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis: PHA) โดยได้มีการจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ออกเป็น 3 โซน ตามมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (International Electrotechnical Commission: IEC) ได้แก่ โซน 20 โซน 21 และ โซน 22 ตัวอย่าง การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ในกระบวนการผลิต

ตารางที่ 7 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น

โซน	ความหมาย
20	พื้นที่ที่มีสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่น ปรากฏตลอดเวลา
21	พื้นที่ที่สามารถพบเจอสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่น ได้เป็นครั้งคราวภายในการทำงานทั่วไป
22	พื้นที่ที่มีโอกาสน้อยหรือไม่เจอสภาพบรรยากาศที่จุดติดไฟได้ในรูปแบบของหมอกแบ่งฝุ่นเลยภายใต้การทำงานทั่วไป หรือหากพบเจอก็จะเป็นเพียงช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น



ภาพที่ 17 การจำแนกบริเวณอันตราย (Area Classification) ในกระบวนการผลิต

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การบริหารจัดการ (Administrative Controls)

2. การวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job safety analysis: JSA) เป็นการทบทวนมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) ทั้งนี้ต้องครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Human factor) ได้แก่ การประเมิน การจัดทำแผนการตรวจสอบ การดูแลรักษาความสะอาด วัสดุ อุปกรณ์ ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่น การจัดทำทะเบียนความเสี่ยงของพื้นที่ ที่มีการสะสมของฝุ่น และมีแผนในการดูแลรักษาความสะอาดในพื้นที่ การดูแลรักษาความสะอาดเป็นไปตามมาตรฐาน Housekeeping ลดการสะสมของฝุ่นบริเวณชั้น ผงัง คาน ท่อและพื้นผิวเพดานในระบบไม่เกิน 0.32 ซม. มีการอบรมอันตรายในพื้นที่ปฏิบัติงาน และการระเบิดของฝุ่น การบันทึกผลการตรวจสอบพื้นที่ปฏิบัติงาน และการฝึกอบรม

3. การจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) เพื่อป้องกันการเกิดการระเบิดของฝุ่นแบ่งในกระบวนการจัดเก็บมันเส้น ด้วยการจัดทำมาตรฐานการสื่อสารให้พนักงานและผู้รับเหมาทราบ (เช่น ป้าย แผนที่ หรือข้อมูลอ้างอิงอื่น ๆ) เกี่ยวกับพื้นที่อันตรายจากฝุ่นที่ติดไฟได้ การจัดทำมาตรฐาน และแผนการบำรุงรักษา ระบบสายดิน (Grounding) ของอุปกรณ์ เครื่องจักร การอบรมความปลอดภัยให้กับผู้รับเหมาเกี่ยวกับอันตรายจากฝุ่นในโรงงาน งานที่เกิดประกายไฟ รวมถึงกฎระเบียบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง การจัดทำมาตรฐานเพื่อจัดอบรมให้ผู้ปฏิบัติงาน ช่างซ่อมบำรุง และผู้รับเหมา เกี่ยวกับการซ่อมบำรุง และการทำงานในพื้นที่อับอากาศ รวมทั้งระเบียบความปลอดภัยอื่นๆ ได้แก่ การป้องกันการระเบิด การปฏิบัติงานที่เกี่ยวกับความร้อน (Hot work) แผนฉุกเฉินต่างๆ ข้อกำหนดในการต่อสายดิน การทำความสะอาดวัสดุที่ติดไฟ และห้ามสูบบุหรี่ในพื้นที่อันตราย การป้องกันและระงับอัคคีภัย เป็นต้น การจัดทำมาตรฐานสำหรับรถยก หรือรถยนต์ หรือเครื่องยนต์ที่ใช้งาน บริเวณที่มีการฟุ้งกระจายของฝุ่นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นที่ท่อไอเสีย

การป้องกันการระเบิดของฝุ่น :

การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment)

การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment) ให้เป็นตามมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operation Process: SOP) ที่จำแนกตามปัจจัยเสี่ยงในสภาพแวดล้อมการทำงาน เช่น อุปกรณ์ป้องกันการสูญเสียการได้ยิน (Hearing protection) อุปกรณ์ป้องกันใบหน้าและดวงตา (Eye and face protection) อุปกรณ์ป้องกันมือและแขน (Hand and arm protection) อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่ลำตัว (Body protection) อุปกรณ์ป้องกันการตกจากที่สูง (Falling protection) อุปกรณ์ป้องกันขาและเท้า (Foot and leg protection) อุปกรณ์ป้องกันศีรษะ (Head protection) อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากการหายใจ

กฎหมาย มาตรฐาน
ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของฝุ่น



กฎหมาย มาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของฝุ่น

American Standard

NFPA 654	Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids
NFPA 652	Standard on the Fundamentals of Combustible Dust
NFPA 61	Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities
NFPA 68	Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting
NFPA 69	Standard on Explosion Prevention Systems



National

Germany	VDI 3673 Pressure venting of dust explosions VDI 2263 Dust fires and dust explosions
South Africa	SANS (Several)
Brazil	ABNT
Australia & New Zealand	ANZ 4745
China	GB/T 15605
Singapore	SS 667

กฎหมาย มาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดของฝุ่น

กระทรวงอุตสาหกรรม

คู่มือจัดการความปลอดภัยโรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้

ข้อปฏิบัติเกี่ยวกับความปลอดภัยสำหรับโรงงานที่มีฝุ่นจากการเกษตรที่ระเบิดได้

ข้อปฏิบัติเกี่ยวกับความปลอดภัยโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง



เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2553). คู่มือการจัดการความปลอดภัยโรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้. บริษัท ธวิพัฒน์ จำกัด.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2562). สารสนเทศ เศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2563.
- ศราวุฒิ ไชยรัตน์, อารุณ เกตุสาคร (2564). การวิเคราะห์ต้นทุนแฝงความล้มเหลวและการวิเคราะห์ เชิงลำดับชั้นสำหรับประเมินความเสี่ยงการเกิดฝุ่นระเบิดในกระบวนการผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ, 14(1), 138-153.

เอกสารอ้างอิง

- NFPA654. (2020). Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids.
- NFPA664. (2018). Standard for the Prevention of Fires and Explosions in Wood Processing and Woodworking Facilities.
- Pang, L., Zhang, M., Yang, K., & Sun, S. (2023). Scenario derivation and consequence evaluation of dust explosion accident based on dynamic Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83, 105055.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105055>
- Popov, G., Lyon, B. K., & Hollcroft, B. D. (2016). Risk assessment: A practical guide to assessing operational risks. John Wiley & Sons.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015a). 6 Risk Analysis of Dust Explosion Scenarios using Bayesian Network. *Dynamic Risk Analysis of Dust Explosions*, 108.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015b). Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 57-71.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.008>



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวรัชณี จุ่มจี
วันเกิด	วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 705 หมู่ 2 ตำบลไธ้อย อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	พนักงานในสถาบันอุดมศึกษาตำแหน่งวิชาการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี เลขที่ 2 ถนนราชธานี ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2567 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาเทคโนโลยีทางสุขภาพและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนวิจัยประเภทนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2566

พูน ปณ ภัโต ชีเว