

การออกแบบประตูระบายแก๊สสำหรับไซโลในการเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลผง

DESIGNING AND FABRICATION OF EXPLOSION DOOR FOR SILO  
IN PULVERIZED BIOMASS STORAGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การออกแบบประตูระบายแก๊สสำหรับไซโลในการเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลผง

DESIGNING AND FABRICATION OF EXPLOSION DOOR FOR SILO  
IN PULVERIZED BIOMASS STORAGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGNING AND FABRICATION OF EXPLOSION DOOR FOR SILO  
IN PULVERIZED BIOMASS STORAGE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบประตูระบายแก๊สสำหรับไซโลในการเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลผง  
DESIGNING AND FABRICATION OF EXPLOSION DOOR FOR SILO  
IN PULVERIZED BIOMASS STORAGE

ผู้จัดทำ

- |                          |              |          |
|--------------------------|--------------|----------|
| 1. นายภัทรวุฒิ สุตินันท์ | รหัสประจำตัว | 58010951 |
| 2. นายศุภโชค รุ่งขจรวงศ์ | รหัสประจำตัว | 58011240 |
| 3. นายสรารุช โพธิ์กลิ่น  | รหัสประจำตัว | 58011277 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบประตुरะบายแก๊สสำหรับไซโลในการเก็บไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

นายภัทรวุฒิ สุตินันท์	58010951
นายศุภโชค รุ่งขจรวงศ์	58011240
นายสรารุช โพธิ์กลิ่น	58011277
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	
ปีการศึกษา 2561	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบประตुरะบายแก๊สและแผ่นประลัยที่ใช้ในการป้องกันและลดความเสียหายที่เกิดจากการระเบิดของฝุ่นซึ่งเกิดขึ้นกับไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบประตुरะบายแก๊สโดยใช้มาตรฐานด้านความปลอดภัย NFPA68 เพื่อลดความดันที่เกิดขึ้นในไซโลไม่ให้มีค่าสูงกว่าขอบเขตที่ตั้งไว้และป้องกันการเกิดการเผาไหม้หลังระบายความดันที่เกิดจากการที่อากาศไหลเข้าไปในไซโล และการออกแบบแผ่นประลัยโดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แผ่นพลาสติกเอบีเอส แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียมเป็นวัสดุในการผลิต ผลการทดสอบพบว่าที่ความดันเริ่มระบาย 0.77 บาร์ ทำให้เวลาในการเปิดและปิดของประตुरะบายแก๊สเท่ากับ 0.18 วินาทีและ 0.44 วินาทีตามลำดับ ซึ่งพบว่าเวลาที่ใช้ในการเปิด-ปิดประตुरะบายแก๊สอยู่ในช่วงที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม และในการใช้แผ่นประลัยที่ผลิตจากแผ่นพลาสติกเอบีเอส จะทำให้สามารถควบคุมความดันที่เริ่มระบายได้ดีกว่ากรณีที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGNING AND FABRICATION OF EXPLOSION DOOR FOR SILO IN PULVERIZED  
BIOMASS STORAGE

Pattaravoot	Sutiphan	58010951
Supachoke	Rungkajonwong	58011240
Sarawoot	Poklin	58011277

Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk  
Year 2018

ABSTRACT

This project concerns to study and design the explosion door and rupture disc used to prevent and reduce the damage caused by dust explosions that occur with pulverized biomass storage silo. The design is divided into 2 parts: explosion door design using NFPA68 safety standard in order to reduce the pressure generated in the silo so that it is not higher than the set limit and prevents burning due to air intake after venting. And the design of the rupture disc using numerical simulation with finite element method using ABS plastic sheet, galvanized sheet and aluminum sheet as the material for manufacturing. The test results showed that at the pressure began to vent of 0.77 bar, the time for opening the gas gate was 0.18 seconds and 0.44 seconds respectively. It was found that the time spent opening-closing the explosion door was in the range of actual use in industry. In the use of the rupture disc made from ABS plastic sheet, it can control the pressure that starts to vent better than in the case of using aluminum sheet as material for manufacturing

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

การทำวิจัยครั้งนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติ กระทรวงพลังงานภายใต้โครงการพัฒนาละประเมิณสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเพื่อการใช้งานในระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรม ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ผู้จัดทำขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ภัทรวุฒิ สุตพันธ์  
ศุภโชค รุ่งขจรวงศ์  
สรารุช โพธิ์กลิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยของภัทราภรณ์ แซ่เตี้ยว และคณะ.....	4
2.2 การทดลองของ W.Z. Wan Slaiman และ R.M. Kasmani.....	5
2.3 เค้ตตาล็อกทางเทคนิคของ Marston.....	6
2.4 การทดลองของ CAO Weiguo และคณะ.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 การระเบิดของฝุ่น (Dust Explosion).....	8
3.2 แผ่นประลัย (Rupture Disc).....	10
3.3 ประตูระบายแก๊ส (Explosion Door).....	10
3.4 Venting of Deflagrations of Dusts and Hybrid Mixtures.....	11
3.5 กฎข้อที่สองของนิวตัน.....	14
3.6 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia).....	15
3.7 ความเค้นและความเครียด.....	17
3.8 วงกลมโมห์สำหรับความเค้นในระนาบ 2 มิติ (Mohr's Circle for Plane Stress).....	19
3.9 วงกลมโมห์สำหรับวิเคราะห์ความเค้นในระนาบ 3 มิติ.....	20
3.10 ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Theories).....	21
3.11 พลังงานความเครียด (Strain Energy).....	22
3.12 สปริงแรงบิด (Torsion Spring).....	23
3.13 กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy).....	25
3.14 สมการของบาร์โล (Barlow's Formula).....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

3.15 ทฤษฎีที่ใช้ในการจำลองความเค้น.....	26
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ.....	31
4.1 ประตุนบายแก๊ส.....	31
4.2 แผ่นประลัย (Rupture Disk).....	37
4.3 ท่อและหน้าแปลน.....	44
4.4 ต้นทุนการผลิต.....	45
4.5 อุปกรณ์จริงเมื่อได้ทำการผลิต.....	46
บทที่ 5 การทดสอบ.....	48
5.1 ชุดทดสอบที่ใช้.....	48
5.2 การเตรียมการทดสอบ.....	48
5.3 วิธีการทดสอบ.....	48
5.4 ผลการทดสอบ.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	51
6.1 สรุปผลการทดสอบ.....	51
6.2 ปัญหาที่พบ.....	51
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพฤติกรรมของการระเบิดโดย Marston.....	5
3.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบสปริงชด.....	23
3.2 แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบสปริงชด (ต่อ).....	24
4.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา Minimum Venting Area.....	31
4.2 ขนาดพื้นที่ระบายที่จะทำให้ได้ค่าความดันที่ต้องการ.....	32
4.3 แสดงค่าความดัน $P_{red}$ ที่คำนวณร่วมกับการเลือกขนาดท่อ.....	33
4.4 การคำนวณหาความเร่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมเมื่อใช้สปริงที่มีค่านิจสปริง 2,500 Nm/rad.....	34
4.5 การคำนวณหาเวลาที่ใช้เปิด .....	35
4.6 การคำนวณหาเวลาที่ใช้ปิด .....	35
4.7 ผลการทดลองเมื่อใช้รอยบากหรือวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกัน 4 กรณี.....	40
4.8 แสดงข้อมูลต่าง ๆ ในแคตตาล็อกท่อที่เลือกใช้.....	44
4.9 แสดงข้อมูลต่าง ๆ ในแคตตาล็อกหน้าแปลนที่เลือกใช้.....	45
5.1 แสดงผลการทดสอบการทำงานของประตुरะบายแก๊ส.....	50

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 TG-DTA ของแคลบและถ่านหินลิกไนต์ .....	3
2.2 TG-DTA ของกากอ้อยและถ่านหินลิกไนต์.....	4
2.3 TG-DTA ของโยอ้อยและถ่านหินลิกไนต์.....	4
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นถ่านหินฟิลิปปินส์และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	4
2.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นต่าง ๆ และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น .....	5
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น.....	5
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและโอกาสของการติดไฟเมื่อใช้อุณหภูมิ ในช่วง 48-75 ไมครอน.....	6
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและโอกาสของการติดไฟเมื่อใช้อุณหภูมิ ในช่วง 75-150 ไมครอน.....	6
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและความดันที่เกิดขึ้นในช่วง ความเข้มข้นของฝุ่น 10-60 g·m <sup>-3</sup> .....	7
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและความดันที่เกิดขึ้นในช่วง ความเข้มข้นของฝุ่น 10-1000 g·m <sup>-3</sup> .....	7
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น.....	7
3.1 ห้าเหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น.....	9
3.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความดันกับเวลาเมื่อมีการระบายอากาศ และเมื่อไม่มีการระบายอากาศออก.....	9
3.3 แผ่นประลัย.....	10
3.4 ประตुरะบายแก๊สทั่วไป.....	11
3.5 ภาชนะทรงกระบอกที่มีถังกรวย (Cylindrical Vessel with a Hopper).....	12
3.6 แสดงแกนของการหมุนในหัวข้อ 3.6.1.....	16
3.7 แสดงการใช้ทฤษฎีบทแกนขนาน.....	17
3.8 แสดงถึงค่าตัวแปรในสมการ bending stress.....	18
3.9 ประกอบการพิจารณาความเค้นผสมในหัวข้อ 3.8.....	19
3.10 การวาดวงกลมโมห์ด้วยสมการ 3.29 - 3.35.....	20
3.11 การวาดวงกลมโมห์สำหรับระนาบ 3 มิติ.....	21
3.12 แสดงนิยามของค่าตัวแปรต่าง ๆ ของสปริง.....	25
3.13 สปริงแรงบิดชนิดที่ใช้กับอุปกรณ์.....	25
3.14 สปริงแรงบิดชนิดต่าง ๆ.....	25

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์ displacement ของแต่ละ node.....	26
รูปที่ 3.16 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์ force ที่กระทำแต่ละ node.....	29
4.1 แสดงโมเดลของประตู่ระบายแก๊สที่เขียนจากโปรแกรม SolidWorks.....	31
4.2 Free Body Diagram และ Kinematic Diagram.....	33
4.3 แสดงการออกแบบคานรับแรงหมุน.....	36
4.4 แสดงโมเดลของแผ่นประลัษที่เขียนจากโปรแกรม SolidWorks.....	37
4.5 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษกรณี 1.....	38
4.6 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษกรณี 2.....	38
4.7 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษกรณี 3.....	39
4.8 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษกรณี 4.....	39
4.9 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นพลาสติก ABS ในชั้นแรก.....	41
4.10 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมในชั้นแรก.....	41
4.11 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นสังกะสีในชั้นแรก.....	42
4.12 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นพลาสติก ABS ในชั้นสอง.....	42
4.13 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมในชั้นสอง.....	43
4.14 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นสังกะสีในชั้นสอง.....	43
4.15 ส่วนประตู่เมื่อได้ทำการผลิตจริง 1.....	46
4.16 ส่วนประตู่เมื่อได้ทำการผลิตจริง 2.....	46
4.17 แผ่นประลัษที่ทำด้วยแผ่นพลาสติก ABS เมื่อได้ทำการผลิตจริง.....	47
4.18 แผ่นประลัษที่ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียม เมื่อได้ทำการผลิตจริง.....	47
4.13 แผ่นประลัษที่ทำด้วยแผ่นสังกะสี เมื่อได้ทำการผลิตจริง.....	47
5.1 ชุดทดสอบที่ใช้.....	48
5.2 การทดสอบการทำงานของประตู่.....	49
5.3 การทดสอบการทำงานของแผ่นประลัษ.....	49
5.4 การทดสอบการทำงานของประตู่ระบายแก๊ส.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถิติการเกิดระเบิดของฝุ่น (Dust explosion) ในอุตสาหกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงปี ค.ศ. 1996 – 2005 (พ.ศ.2539 - 2548) พบว่าการเกิดการระเบิดส่วนใหญ่จะเกิดกับ อุตสาหกรรมจำพวกอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแป้ง การผลิตและจัดเก็บโลหะ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมการแปรรูปถ่านหิน หรืออุตสาหกรรมที่มีการ จัดเก็บเชื้อเพลิงที่เป็นฝุ่นที่สามารถติดไฟได้ โดยฝุ่นที่จัดเก็บนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 420 ไมครอน ซึ่งส่วนที่พบการระเบิดบ่อยนั้นคือ ไชโล ระบบการเก็บฝุ่น ส่วนที่มีการไม่และบด ระบบ ลำเลียง ส่วนที่มีการอบแห้ง ในส่วนความรุนแรงที่เกิดจากการระเบิดของฝุ่นในประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าการระเบิดทั้งหมด 106 ครั้ง หรือเฉลี่ยปีละ 10 ครั้ง มีผู้เสียชีวิต 16 คน บาดเจ็บ 126 คน ทรัพย์สินเสียหายมูลค่ากว่า 162.8 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [15]

ในปัจจุบันเครื่องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพแบบผง (Pulverized biomass combustion) มีการใช้เชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายจำพวก ยางพารา แกลบ ไม้ ถ่านหิน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 75 ไมครอน ในทางปฏิบัติจะต้องมีการลำเลียงผงเชื้อเพลิงจากไซโคลนไปที่ไซโล ซึ่งเป็นการ ที่ทำให้ผงเชื้อเพลิงตกจากไซโคลนไปสู่ไซโลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อผงเชื้อเพลิงมีการสะสมได้ ปริมาณหนึ่ง ผงเชื้อเพลิงที่ตกลงไปตลอดเวลานี้ทำให้มีการฟุ้งกระจายของผงเชื้อเพลิง ซึ่งการฟุ้ง กระจายนี้ทำให้เกิดการเสียดสีกันของผงเชื้อเพลิง การเสียดสีกันระหว่างผงเชื้อเพลิงกับผนังของไซโล ทำให้การเกิดไฟฟ้าสถิต ความร้อนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กำลังทำงานและส่งผลให้ผนังไซโลร้อนขึ้น ปัจจัยทั้งหมดนี้สามารถทำให้ผงเชื้อเพลิงเกิดการติดไฟได้ และเมื่อผงเชื้อเพลิงที่ฟุ้งกระจายมีความ เข้มข้นที่สามารถจะเกิดการลุกไหม้ได้จะทำให้ผงเชื้อเพลิงในไซโลทั้งหมดเกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว ซึ่งถูกเรียกว่า “การระเบิดของฝุ่น (Dust explosion)” แรงระเบิดที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้ โครงสร้างของไซโลได้รับความเสียหาย หรือก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินบริเวณใกล้เคียง ซึ่ง สามารถทำให้บุคลากรได้รับบาดเจ็บจนถึงกับชีวิต

เนื่องด้วยงานวิจัยที่ว่าด้วยการระเบิดของเชื้อเพลิงแข็งส่วนมากจะศึกษาเชื้อเพลิงจำพวกถ่าน หิน ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงผงชนิดถ่านหินมีหลักการและพฤติกรรมการจุดติดไฟเช่นเดียวกับเชื้อเพลิงผง ชนิดชีวมวล เชื้อเพลิงแข็งชนิดถ่านหินมีความรุนแรงการระเบิดที่มากกว่าเชื้อเพลิงแข็งชนิดชีวมวล หลายๆชนิด เราจึงเลือกใช้ถ่านหินเป็นเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยที่ครอบคลุมชีวมวล ในหลายๆกรณี

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ป้องกันความเสียหายของไซโลและอุปกรณ์ของเครื่องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพแบบผง เมื่อเกิดการระเบิดของเชื้อเพลิงในไซโลโดยใช้ประตูระบายแก๊ส (Explosion Door) และแผ่นประลัย (Rupture Disc)

1.2.2 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ สร้างประตูระบายแก๊สที่ใช้กับไซโลโดยใช้หลักการออกแบบตามมาตรฐานทางด้านความปลอดภัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงผลของลักษณะรอยบากและการติดตั้งที่มีต่อพฤติกรรมของความดันที่แผ่นประลัยแตก

1.2.3 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและผลิตแผ่นประลัยด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการผลิต

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สมมุติให้ไซโลสามารถทนความดันได้สูงสุด 10 barg เพื่อความปลอดภัย

1.3.2 ในการออกแบบประตูระบายแก๊ส และแผ่นประลัย จะออกแบบตามผงเชื้อเพลิงที่ทำให้ความดันในการระเบิดสูงสุด (maximum pressure of a deflagration) เพื่อให้ครอบคลุมทุกกรณีของผงเชื้อเพลิงที่ใช้

1.3.3 การออกแบบจะพิจารณาผงเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านหิน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผงเชื้อเพลิงประมาณ 75 ไมครอน มีความชื้น (moisture) ประมาณ 11.32 เปอร์เซ็นต์ มีสารระเหย (volatility) ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และมีเถ้าประมาณ 6.7 เปอร์เซ็นต์

1.3.4 การออกแบบจะทำตามมาตรฐาน NFPA68 ของสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการทำโครงการ

1.4.2 ศึกษามาตรฐาน องค์ประกอบของประตูระบายแก๊ส ขนาดของพื้นที่ที่จำเป็นต่อระบายความดันและหาข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของถ่านหิน

1.4.3 ศึกษาถึงผลของลักษณะการบากและการติดตั้งที่มีต่อพฤติกรรมของความดันที่แตก และลักษณะการแตกของแผ่นประลัยโดยการวิธีการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) และการทดลองเพื่อประกอบการพิจารณา

1.4.4 ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและผลิต แผ่นประลัย ด้วยวัสดุที่แตกต่างกันด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

1.4.5 ออกแบบส่วนประกอบของประตูระบายแก๊สและแผ่นประลัย ตามมาตรฐาน NFPA68

1.4.6 สร้างประตูระบายแก๊สและแผ่นประลัยตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.7 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และสรุปผล

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ความรู้ในเกี่ยวกับหลักการในการออกแบบอุปกรณ์นิรภัย

1.5.2 ลดผลกระทบที่มาจากกระเบิดของผงเชื้อเพลิง

1.5.3 ได้รับประสบการณ์การทำงานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

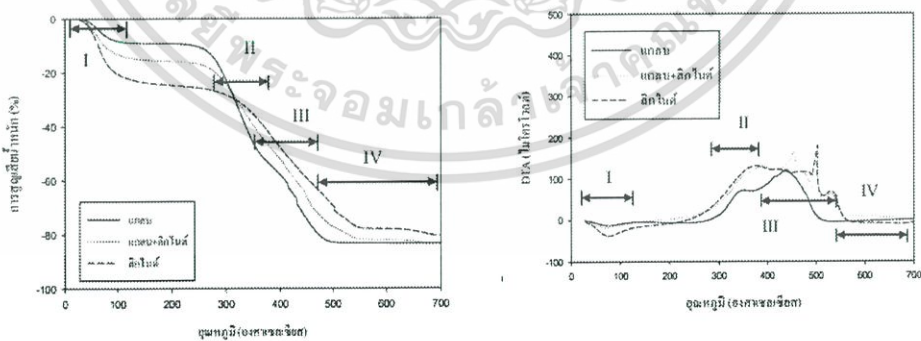
## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ซึ่งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในการระเบิดของฝุ่นเช่น ค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น (Deflagration Index for Dusts หรือ  $K_{st}$ ) และ ค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ โดยการทดลองหรืองานวิจัยดัง แสดงดังต่อไปนี้

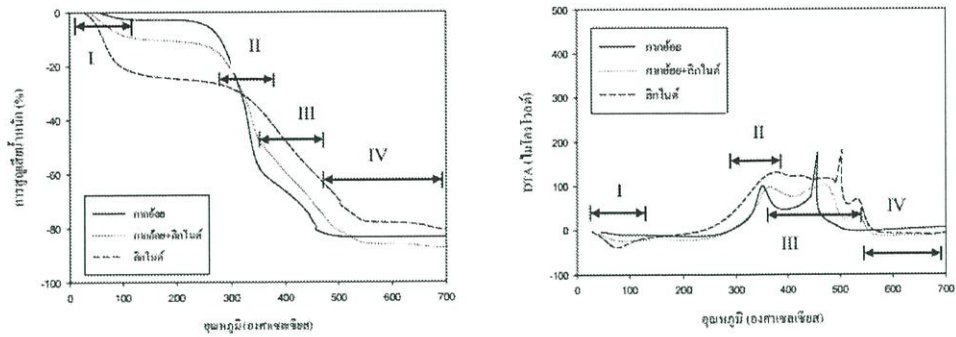
#### 2.1 งานวิจัยของภัทรภรณ์ แซ่เตี้ยว และคณะ

ในชื่อเรื่อง การศึกษามลพิษในรูปอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ [10] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ TG-DTA เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งผลการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดมีปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้น (I) ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิง และมีปฏิกิริยาคายความร้อน 2 ช่วง (II, III) โดยช่วงที่ II นั้นเป็นการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย และช่วงที่ III เป็นการเผาไหม้ซาร์ ส่วนช่วงที่ IV เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสิ้นแล้ว การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์พบว่าการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายและการเผาไหม้ซาร์อย่างชัดเจน โดยเกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส และการเผาไหม้ซาร์ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส สำหรับชีวมวล และเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ 300-500 องศาเซลเซียส และเผาไหม้ซาร์ที่อุณหภูมิ 500-570 องศาเซลเซียสสำหรับถ่านหินลิกไนต์ โดยอุณหภูมิดังกล่าวสัมพันธ์กับน้ำหนักที่ลดลงของเชื้อเพลิง ซึ่งในช่วงที่ II นั้นน้ำหนักของเชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดมาจากการเผาไหม้สารระเหย และช่วงที่สามน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเผาไหม้ซาร์

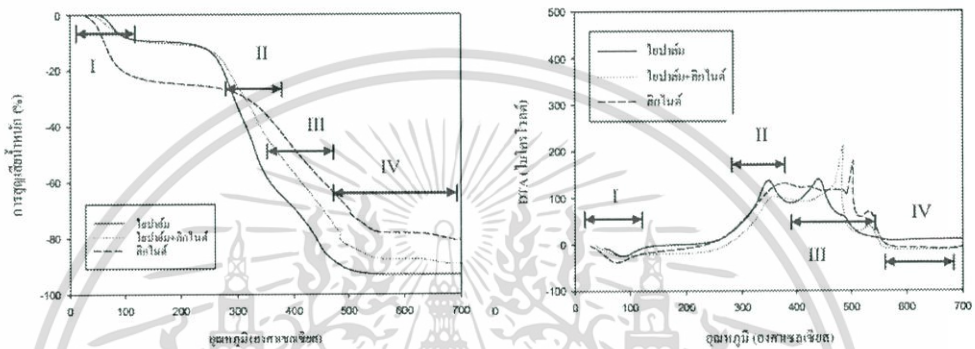


รูปที่ 2.1 TG-DTA ของแกลบและถ่านหินลิกไนต์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



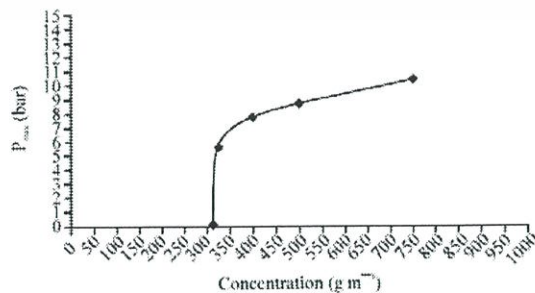
รูปที่ 2.2 TG-DTA ของกากอ้อยและถ่านหินลิกไนต์ [10]



รูปที่ 2.3 TG-DTA ของใย้อ้อยและถ่านหินลิกไนต์ [10]

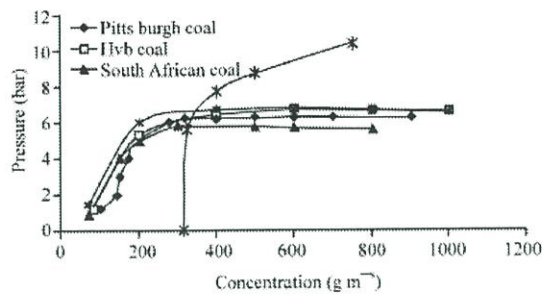
## 2.2 งานวิจัยของ W.Z. Wan Slaiman และ R.M. Kasmani

ในชื่อเรื่อง Explosibility Characteristic of Philippine Coal Dust ได้ศึกษาพฤติกรรมการระเบิดของผงถ่าน โดยใช้ภาชนะทรงกลมขนาด 20 ลิตรตามมาตรฐานของสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National Fire Protection Association) จุดระเบิดโดยใช้พลังงานเคมี 5 kJ เพื่อหาความดันสูงสุดของการระเบิดของผงถ่าน ซึ่งพบว่าความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่ความเข้มข้น 750  $\text{g/m}^3$  มีค่าเท่ากับ 10.4 bar และมีการทดลองเพิ่มเติมเมื่อเทียบกับระหว่างถ่านหิน Pitts burgh , ถ่านหิน Hvb และ ถ่านหิน South African เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของฝุ่นกับค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในภาชนะ และค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น [18]



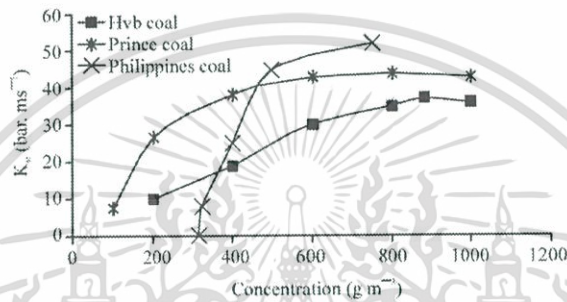
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นถ่านหินฟิลิปปินส์และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นต่าง ๆ และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น

[18]



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น [18]

### 2.3 เค็ดตาลีอกทางเทคนิคของ Marston

ได้มีการบรรยายเกี่ยวกับแผงช่องระบายอากาศ (Explosion Vent Panel) และแสดงค่าพฤติกรรมการระเบิดของฝุ่นหลายชนิดให้ดูดังภาพ 2.2 [6]

ตารางที่ 2.1 ค่าพฤติกรรมการระเบิดโดย Marston [6]

ชนิดของฝุ่น	ความดันสูงสุดในการระเบิด (bar)	ดัชนีการปะทุของฝุ่น (bar m/s)
กรดอะติฟีก	8.0	97
ถ่านหินบิทูมินัส	9.2	129
ข้าวโพด	9.4	75
ไซขาว	8.3	38
ผงนม	5.8	28
เบคิลไลต์	9.3	129
น้ำตาลปีท	8.2	59
แป้งมันสำปะหลัง	9.4	62
เหล็กคาร์บอนิล	6.1	111

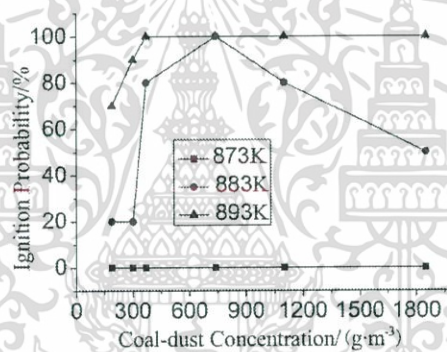
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของฝุ่น	ความดันสูงสุดในการระเบิด (bar)	ดัชนีการปะทุของฝุ่น (bar m/s)
สตาร์ชข้าวสาลี	9.9	115
แป้งมันสำปะหลัง	9.4	62

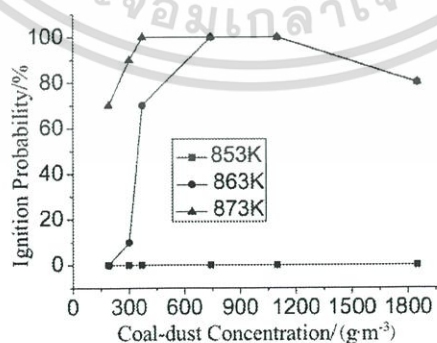
ซึ่งกรณีของเรา เราเลือกใช้ค่าของถ่านหินปีทูนีส ซึ่งมีค่าดัชนีการปะทุของฝุ่นเท่ากับ 129 bar-m/s

## 2.4 การทดลองของ CAO Weiguo และคณะ

ในชื่อเรื่อง Research on characteristic parameters of coal-dust explosion ได้ศึกษาพฤติกรรมการระเบิดของผงถ่านโดยใช้ภาชนะทรงกลมขนาด 20 ลิตรตามมาตรฐานของสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National Fire Protection Association) จุดระเบิดโดยใช้พลังงานเคมี 10 kJ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและโอกาสของการติดไฟ, ความดันที่เกิดขึ้นและดัชนีการปะทุ โดยการใช้ขนาดอนุภาคในช่วงต่าง ๆ ได้แก่ 48-75 ไมครอน, 75-150 ไมครอน, 150-250 ไมครอน และ 250-500 ไมครอน [4]

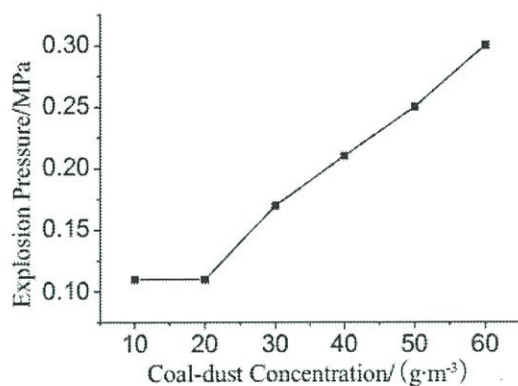


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและโอกาสของการติดไฟเมื่อใช้อนุภาคในช่วง 48-75 ไมครอน [4]

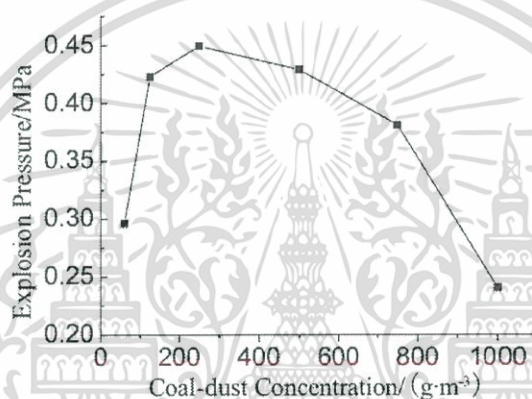


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและโอกาสของการติดไฟเมื่อใช้อนุภาคในช่วง 75-150 ไมครอน [4]

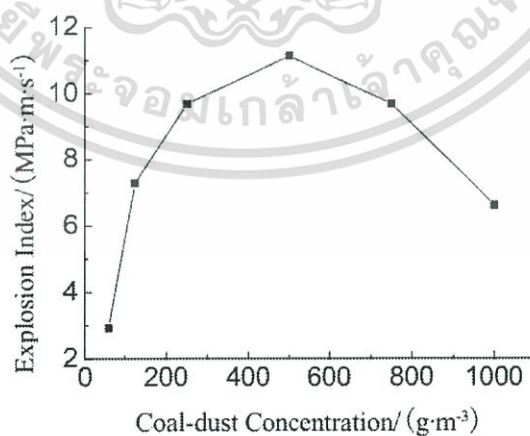
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและความดันที่เกิดขึ้น  
ในช่วงความเข้มข้นของฝุ่น 10-60 g·m<sup>-3</sup> [4]



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและความดันที่เกิดขึ้น  
ในช่วงความเข้มข้นของฝุ่น 10-1000 g·m<sup>-3</sup> [4]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นและค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อที่จะสามารถคำนวณและออกแบบประตูระบายแก๊ส (Explosion Door) และแผ่นประลัย (Rupture Disc) ได้อย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐานทางด้านความปลอดภัยต่าง ๆ เรามีความจำเป็นต้องศึกษาถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ เช่น การระเบิดของฝุ่น, ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแผ่นประลัย , เนื้อหาจากวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล (Machine Design) และมาตรฐานด้านความปลอดภัยจากสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (The National Fire Protection Association : NFPA) เป็นต้น

### 3.1 การระเบิดของฝุ่น (Dust Explosion)

การระเบิดของฝุ่น คือการที่วัสดุใด ๆ ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก,สามารถติดไฟได้และมีความเข้มข้นมากเพียงพอ เมื่อเกิดการฟุ้งกระจายตัวในอากาศและได้รับความร้อนหรือมีแหล่งประกายไฟที่เหมาะสม จะทำให้สามารถติดไฟและเกิดการระเบิดได้ ซึ่งทำให้เกิดผลตามมาคือความดันที่เพิ่มสูงขึ้นในบริเวณนั้น และอาจทำให้เกิดเป็นความเสียหายแก่สิ่งแวดลอม,สิ่งก่อสร้าง หรือชีวิตมนุษย์ที่อยู่ในบริเวณนั้น

3.1.1 องค์ประกอบของการระเบิดของฝุ่น การเกิดไฟนั้นจะสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการสามเหลี่ยมของการเกิดไฟ (fire triangle) ซึ่งประกอบไปด้วยสามองค์ประกอบ แต่สำหรับการระเบิดของฝุ่นนั้นจะมีองค์ประกอบเพิ่มขึ้นอีก 2 องค์ประกอบเรียกว่าห้าเหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น (Dust Fire and Explosion Pentagon) ตามรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1.1 ปริมาณออกซิเจน (oxygen) ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการเผาไหม้ หากมีปริมาณมากกว่า 20.9 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถทำให้ฝุ่นลุกติดไฟได้รวดเร็วมากขึ้น ถ้าหากออกซิเจนมีปริมาณลดลง ความเร็วในการเผาไหม้จะลดลงตาม โดยทั่วไปการควบคุมออกซิเจนในบรรยากาศทั่วไปนั้นทำได้ยาก แต่หากเป็นภาชนะปิดเช่น ท่อ ถัง หรือไซโลเก็บเชื้อเพลิง จะสามารถควบคุมปริมาณออกซิเจนได้

3.1.1.2 แหล่งจุดติดไฟ (ignition source) จำเป็นต้องมีพลังงานที่เพียงพอในการกระตุ้นการแพร่ขยายของเปลวไฟ เพื่อให้สัมผัสกับฝุ่นที่แขวนลอยในบรรยากาศ โดยพลังงานต่ำสุดที่ใช้ในการจุดระเบิด (minimum ignition energy : MIE) จะลดลงตามขนาดของอนุภาค และจะแตกต่างกันในแต่ละชนิดของอนุภาค ตัวอย่างของแหล่งจุดติดไฟเช่น บุหรี่ เปลวไฟจากเตา ไฟฟ้าสถิต เป็นต้น

3.1.1.3 เชื้อเพลิง (fuel) ฝุ่นที่สามารถเกิดการระเบิดได้จะต้องติดไฟได้ และมีขนาดเล็กกว่า 420 ไมโครเมตร [8] และมีความเข้มข้นในช่วงที่เหมาะสม เราอาจแบ่งชนิดของฝุ่นที่ติดไฟได้ออกเป็น 4 ประเภทคือ ฝุ่นอินทรีย์สาร , ฝุ่นอินทรีย์สารสังเคราะห์ , ฝุ่นถ่านและถ่านหิน และฝุ่นโลหะ

3.1.1.4 การฟุ้งกระจายของฝุ่น (Dispersion of Dust Particles) ความเข้มข้นของฝุ่นที่ฟุ้งกระจายในอากาศในช่วงที่ลุกไหม้ได้ ต้องอยู่ในช่วงประมาณ  $50-100 \text{ g/m}^3$  จนถึง  $2-3 \text{ kg/m}^3$  [1] โดยความรุนแรงของการระเบิดจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของฝุ่นจนถึงค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Concentration) จะให้ค่าความรุนแรงของการระเบิดของฝุ่นสูงสุด

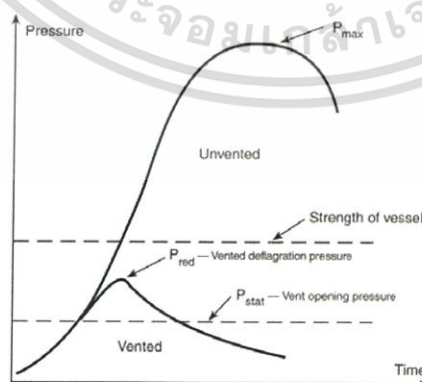
3.1.1.5 ขอบเขตของหมอกฝุ่น (Confinement of the Dust Cloud) คือขอบเขตที่เกิดหมอกฝุ่นปกคลุม ซึ่งอาจจะเกิดอยู่ในอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต



รูปที่ 3.1 ห้าเหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น [4]

3.1.3 พฤติกรรมของความดันที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการระบายแก๊ส

หลักการระบายการระเบิดคือการลดความดันสูงสุดที่จะเกิดขึ้นภายในปริมาตรที่ปิด โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของความดันที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่เปลี่ยนไปได้ออกมาเป็นกราฟดังภาพ



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความดันกับเวลาเมื่อมีการระบายอากาศ และเมื่อไม่มีการระบายอากาศออก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $P_{max}$  คือความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในภาชนะที่ไม่มีการระบาย  
 $P_{red}$  คือความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในภาชนะที่มีการระบาย  
 $P_{stat}$  คือความดันที่ระบายออก

### 3.2 แผ่นประลัย (Rupture Disc)

แผ่นประลัยคือแผ่นไดอะแฟรมหรือกะบังลม เป็นอุปกรณ์ระบายความดันแบบไม่ปิดกลับ (non-reclosing) โดยทั่วไปจะเป็นแผ่นเหล็กที่ถูกรอกแบบมาเพื่อให้เกิดการแตกหักหรือระเบิดที่ความดันที่ออกแบบที่ความดันหนึ่ง (Specified Burst Pressure) มักถูกรอกแบบให้มีจุดอ่อนทางโครงสร้าง โดยแผ่นประลัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการแตกหักหรือความเสียหายที่อาจเกิดกับภาชนะต่าง ๆ , ระบบท่อ , บุคคล หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในบริเวณใกล้เคียง โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีเมื่อเทียบกับต้นทุนในการบรรเทาผลกระทบต่าง ๆ ที่อาจเกิดจากการระเบิดของฝุ่น โดยในที่นี้เราจะให้ความสนใจแผ่นประลัยแบบแบน (Flat) เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับแผ่นประลัยแบบนูน (Prebulge)



รูปที่ 3.3 แผ่นประลัย [13]

### 3.3 ประตูระบายแก๊ส (Explosion Door)

ประตูระบายแก๊สคืออุปกรณ์ระบายความดันแบบสามารถปิดกลับได้ (reclosing) โดยตัวประตูจะเปิดที่ความดันหนึ่งที่ตั้งไว้และจะทำการปิดโดยอัตโนมัติ เพื่อที่จะสามารถใช้ระบายความดันหรือการระเบิด (deflagration) ได้อีกครั้ง รวมไปถึงการป้องกันการเกิดการระเบิดแบบทุติยภูมิที่อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งแวดลอม, บุคคลในบริเวณใกล้เคียงได้รุนแรงมากขึ้น และยังสามารถทดแทนความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงเพื่อลดโอกาสการเกิดการเผาไหม้ (explosion) หากติดตั้งในกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการเผาไหม้ (combustion process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ประตูละบายแก๊สทั่วไป [17]

### 3.4 Venting of Deflagrations of Dusts and Hybrid Mixtures

ทฤษฎีนี้เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน NFPA68 [9] ซึ่งว่าด้วยการระเบิดของฝุ่น โดยฝุ่นแต่ละชนิดจะมีความรุนแรงของการระเบิดที่สามารถแบ่งได้ตามค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น ( $K_{St}$ ) ซึ่งสามารถหาได้สมการที่ 3.1

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} \cdot \sqrt[3]{V} \quad (3.1)$$

3.4.1 ขนาดของพื้นที่ระบายที่เล็กที่สุดที่จำเป็น สามารถคำนวณได้ตามมาตรฐาน NFPA68 ดังสมการที่ 3.2

$$A_{v0} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 1.54 \cdot P_{stat}^4) \cdot K_{St} \cdot V^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{red}} - 1} \quad (3.2)$$

โดย  $A_{v0}$  = ขนาดของพื้นที่ระบายจากหัวข้อ 3.4.1 ( $m^2$ )  
 $P_{stat}$  = ความดันที่แผ่นประลัยฉีก (bar)  
 $K_{St}$  = ค่าดัชนีการปะทุของฝุ่น (bar-m/s)  
 $V$  = ปริมาตรที่ปิด (enclosure) ( $m^3$ )  
 $P_{max}$  = ความดันสูงสุดของการปะทุ (bar)  
 $P_{red}$  = ความดันสูงสุดที่เกิดหลังการระบายการปะทุ (bar)

ซึ่งการคำนวณในหัวข้อ 3.4.1 นี้ จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

ความดันเริ่มต้นมีค่า 1 bar absolute  $\pm$  0.2 bar

$5 \text{ bar} \leq P_{max} \leq 12 \text{ bar}$

$10 \text{ bar-m/s} \leq K_{St} \leq 800 \text{ bar-m/s}$

$0.1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10,000 \text{ m}^3$

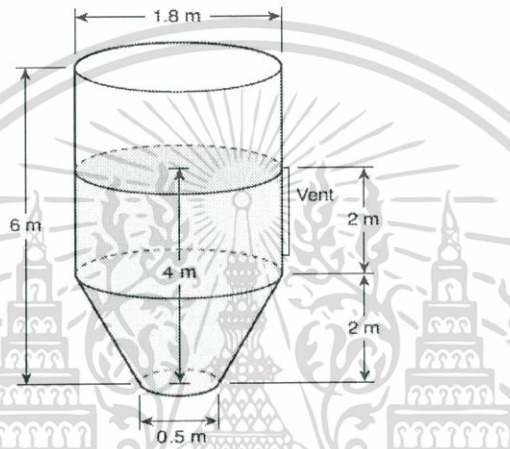
$P_{stat} \leq 0.75 \text{ barg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การปรับค่าพื้นที่ สำหรับไซโลที่มีค่า  $L/D$  มากกว่า 2 และไม่เกิน 6 ต้องคำนวณตามต่อไปนี้

$$A_{v1} = A_{v0} \cdot \left[ 1 + 0.6 \left( \frac{L}{D} - 2 \right)^{0.75} \cdot \exp(-0.95 \cdot P_{red}^2) \right] \quad (3.3)$$

โดยค่า  $L/D$  สามารถหาได้จากลักษณะของไซโลและตำแหน่งช่องระบาย ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณโดยทั่วไปดังนี้



รูปที่ 3.5 ภาพระนาบของถังระบอบอกที่มีถังกรวย (Cylindrical Vessel with a Hopper) [9]

$H$  มีค่าเท่ากับระยะที่วัดจากตำแหน่งต่ำสุดของถังกรวยจนถึงตำแหน่งสูงสุดของช่องระบาย จากภาพ

$$2.5 H = 4 \text{ m}$$

$V_{eff}$  มีค่าเท่ากับปริมาตรรวมจากความสูงตำแหน่งต่ำสุดของถังกรวยจนถึงตำแหน่งสูงสุดของช่องระบาย แบ่งออกเป็น

$$(1) \text{ ปริมาตรส่วนทรงกระบอก} = \left( \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot h = \left( \pi \cdot \frac{1.8^2}{4} \right) \cdot 2 = 5.09 \text{ m}^3$$

$$(2) \text{ ปริมาตรส่วนถังกรวยซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง } D_1, D_2$$

$$= \pi \cdot h \cdot \frac{[(D_1^2) + (D_1 \cdot D_2) + (D_2^2)]}{12}$$

$$= \pi \cdot 2 \cdot \frac{[(2^2) + (2 \cdot 0.5) + (0.5^2)]}{12} = 2.75 \text{ m}^3$$

$$(2.3) V_{eff} = 5.09 + 2.75 = 7.84 \text{ m}^3$$

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{H} = \frac{7.84}{4} = 1.96 \text{ m}^2$$

$$D_{he} = (4 \cdot A_{eff} / \pi)^{0.5} = (4 \cdot 1.96 / \pi)^{0.5} = 1.58 \text{ m}$$

$$L/D = \frac{H}{D_{he}} = 4/1.58 = 2.53$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การแก้ไขความปั่นป่วนสูง (Turbulence) สำหรับอุปกรณ์ความเร็วสูงหรืออาคาร หากความเร็วตามแนวแกน ( $v_{axial}$ ) มีค่ามากกว่า 20 m/s จะต้องคำนวณตามสมการ 3.5 หากความเร็วตามแนวแกน ( $v_{axial}$ ) มีค่าไม่เกิน 20 m/s ค่าของ  $A_{v2}$  จะมีค่าเท่ากับ  $A_{v1}$

$$A_{v2} = \left[ 1 + \frac{\max(v_{axial}, v_{tan}) - 20}{36} \cdot 0.7 \right] \cdot A_{v1} \quad (3.4)$$

โดยความเร็วตามแนวแกน ( $v_{axial}$ ) สามารถหาได้จาก สมการ 3.5

$$v_{axial} = \frac{Q_{air} \cdot L}{V} \quad (3.5)$$

โดย  $Q_{air}$  = อัตราการไหลอากาศผ่านอุปกรณ์ ( $m^3/s$ )

$L$  = ความยาวทั้งหมดของอุปกรณ์ในทิศทางที่อากาศไหล (m)

$V$  = ปริมาตรอุปกรณ์ ( $m^3$ )

ส่วนพื้นที่ระบายอากาศสำหรับอาคารที่มีความเสี่ยงต่อภัยอันตรายจากการระเบิดของฝุ่นจะคำนวณจากสมการดังนี้

$$A_{v2} = 1.7 \cdot A_{v1} \quad (3.6)$$

3.4.4 การคำนวณเกณฑ์มวล ในกรณีที่มีมวลของแผงระบายมีค่าไม่เกิน 40 kg/m<sup>2</sup> และค่า  $K_{St}$  ไม่เกิน 250 bar-m/s จะต้องคำนวณเกณฑ์มวล (Threshold Mass) หรือ  $M_T$  จากสมการ 3.7

$$M_T = \left[ 6.67 \cdot (P_{red}^{0.2}) \cdot (n^{0.3}) \cdot \left( \frac{V}{K_{St}^{0.5}} \right) \right]^{1.67} \quad (3.7)$$

โดย  $M_T$  = threshold mass (kg/m<sup>2</sup>)

$n$  = จำนวนของแผงระบาย (Vent Panel)

หากมวลของแผงระบาย ( $M$ ) มีค่ามากกว่าเกณฑ์มวล จะต้องคำนวณตามสมการที่ 3.8

$$A_{v3} = \left[ 1 + (0.0075) \cdot M^{0.6} \cdot \left( \frac{K_{St}^{0.5}}{n^{0.3}} \right) \cdot V \cdot P_{red}^{0.2} \right] \cdot A_{v2} \quad (3.8)$$

หากมวลของแผงระบาย ( $M$ ) มีค่าไม่เกินเกณฑ์มวล ค่าของ  $A_{v3}$  จะเท่ากับ  $A_{v2}$

3.4.5 ผลของท่อระบายอากาศ (vent duct) หากการระบายไม่มีท่อระบาย ค่าของ  $A_{vf}$  จะเท่ากับ  $A_{v3}$  โดยผลจากการมีท่อระบายจะสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.9

$$A_{vf} = A_{v4} \cdot (1 + 1.18 \cdot E_1^{0.8} \cdot E_2^{0.4}) \cdot \sqrt{\frac{K}{K_0}} \quad (3.9)$$

โดย  $A_{vf}$  = ช่องระบายอากาศที่จำเป็นเมื่อมีการต่อท่อเข้ากับช่องระบายอากาศ (m<sup>2</sup>)

$$E_1 = \frac{A_{vf} \cdot L_{duct}}{V} \quad (3.10)$$

$$E_2 = \frac{10^4 \cdot A_{vf}}{\left(1 + 1.54 \cdot P_{stat}^{\frac{4}{3}}\right) \cdot K_{St} \cdot V^{3/4}} \quad (3.11)$$

$L_{duct}$  = ความยาวรวมของท่อระบาย (m)

$K_0$  = 1.5, ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานสมมติสำหรับการกำหนดค่าทดสอบ

$$K \equiv \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} = K_{inlet} + \frac{f_D \cdot L}{D_h} + K_{elbows} + K_{outlet} + \dots \quad (3.12)$$

$K$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานโดยรวมของท่อระบายอากาศ

$U$  = ความเร็วของไหล

$D_h$  = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$f_D$  = สัมประสิทธิ์การเสียดทานสำหรับการไหลแบบ fully turbulence

แต่ในกรณีที่ความยาวของ Duct มีระยะน้อยกว่า 3 เมตร ค่าความดันที่ตก (Pressure Drop)

จะน้อยมาก จึงสามารถละในการคำนวณได้

### 3.5 กฎข้อที่สองของนิวตัน

กฎของนิวตันข้อที่สองกล่าวว่า “ในกรอบอ้างอิงเฉื่อยผลรวมของเวกเตอร์ของแรง  $F$  บนวัตถุ มีค่าเท่ากับมวล  $m$  ของวัตถุนั้นคูณด้วยความเร่ง  $a$  ของวัตถุ” เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum F = ma \quad (3.13)$$

กฎข้อที่สองของนิวตันในรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบการหมุนนั้น ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กภายนอกกับความเร่งเชิงมุมของวัตถุรอบแกนหมุนไว้ โดยสามารถแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$\sum \tau = I\alpha \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\tau$	=	ทอร์กที่เกิดขึ้นกับวัตถุ
	$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ
	$\alpha$	=	ความเร่งเชิงมุมของวัตถุ

### 3.6 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

โมเมนต์ความเฉื่อย เป็นสมบัติหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุหมุน เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความเฉื่อยในการหมุน (Rotational Inertia) ของวัตถุ ในการที่จะรักษาสภาพเดิมของการหมุนไว้ ถ้าหากว่าวัตถุมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมากก็จะทำให้วัตถุนั้นเปลี่ยนสู่สภาพหมุนใหม่ได้ยาก และเช่นเดียวกัน ถ้าวัตถุนั้นมีโมเมนต์ความเฉื่อยน้อยก็จะทำให้วัตถุนั้นสามารถเปลี่ยนสู่สภาพการหมุนใหม่ได้ง่าย โดยโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุจะมีค่าขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ แกนหมุน และลักษณะการเรียงตัวของวัตถุรอบแกนหมุน โดยการคำนวณหาว่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะสามารถแยกการพิจารณาได้ออกเป็น 2 กรณีดังนี้

3.6.1 เมื่อพิจารณาให้วัตถุเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ที่ประกอบด้วยมวลก้อนเล็ก ๆ โมเมนต์ความเฉื่อยจะสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.15

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (3.15)$$

เมื่อ	$m_i$	=	มวลของอนุภาค (kg)
	$r_i$	=	ระยะตั้งฉากจากมวลไปยังแกนหมุน (m)

3.6.2 เมื่อพิจารณาให้วัตถุเป็นวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิต หรือมวลที่มีความกระจายต่อเนื่องกันเสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน โมเมนต์ความเฉื่อยจะสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.16

$$I = \int r^2 dm \quad (3.16)$$

เมื่อ	$r$	=	ระยะห่างจากมวลที่กระจาย (dm) ไปยังแกนหมุน
-------	-----	---	---

$$\text{และ } dm = \rho dV$$

(3.17)  $\rho$  = ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

$dV$  = ปริมาตรเล็ก ๆ ที่กระจาย โดยปริมาตรส่วนนี้อยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะ  $r$

3.6.3 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของประตูของประตูระบาย เราจะสามารถหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยได้ด้วยวิธีการเริ่มจากสมการ 3.18 และ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ประตู่ของเรามีลักษณะเป็นแผ่นบางตามรูปที่ 3.7 จะได้สมการ  $dV$  เป็น

$$dV = (2\pi r dr)t \quad (3.18)$$

จากนั้นเมื่อแทนค่า  $dV$  ในสมการ 3.17 จะได้ว่า

$$I_{zz} = 2\pi\rho t \int_{r=0}^{r=r} r^3 dr$$

$$I_{zz} = 2\pi\rho t \left[ \frac{r^4}{4} - 0 \right]$$

$$I_{zz} = \pi\rho t \frac{r^4}{2}$$

และจาก  $M = \rho V, V = \pi r^2 t$

ได้ว่า  $M = \rho\pi r^2 t$

และ  $I_{zz} = \frac{1}{2}Mr^2$

(3.19)



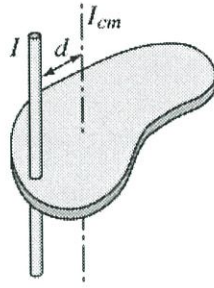
รูปที่ 3.6 แสดงแกนของการหมุนในหัวข้อ 3.6.1

3.6.4 ทฤษฎีบทแกนขนาน (Parallel Axis Theorem) หลังจากที่เราหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้แล้ว เราสามารถใช้ทฤษฎีนี้ได้หากเราต้องการย้ายแกนหมุนไปยังตำแหน่งอื่น โดยมีข้อแม้ว่าแกนหมุนแกนใหม่นั้นจะต้องขนานกับแกนเดิม ตามรูปที่ 3.8 โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.20

$$I_{parallel} = I_{cm} + Md^2 \quad (3.20)$$

- เมื่อ  $I_{parallel}$  = โมเมนต์ความเฉื่อยเมื่อย้ายแนวแกนแล้ว  
 $I_{cm}$  = โมเมนต์ความเฉื่อยก่อนที่จะย้ายแนวแกน  
 $M$  = มวลของวัตถุ  
 $d$  = ระยะจากแกนหมุนเดิมมายังแกนหมุนใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการใช้ทฤษฎีบทแกนขนาน [14]

### 3.7 ความเค้นและความเครียด

ความเค้นนั้นเป็นการแสดงถึงภาระจากแรงที่ส่งผลถึงพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ หรืออาจจะพิจารณาว่าความเค้นคือแรงที่กระทำกับวัตถุเพื่อพยายามจะทำให้วัตถุเสียรูปก็สามารถพิจารณาได้ โดยความเค้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ตามสมการที่ 3.21

$$\sigma = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงกระทำ}} = \frac{F}{A_0} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้นที่เกิดขึ้น (Pa)

ความเครียดนั้นคือผลสะท้อนของระบบต่อความเค้นที่กระทำ เมื่อวัสดุต้องรับภาระจากแรง จะทำให้เกิดความเค้นและส่งผลให้วัสดุจำเป็นต้องเกิดการเสียรูป (deform) สำหรับความเครียดทางวิศวกรรมนั้นจะให้ความหมายเป็นผลรวมของการเสียรูปในทิศทางเดียวกันกับแรงที่กระทำหารด้วยความยาวแรกเริ่มของวัสดุนั้น ทำให้เกิดเป็นจำนวนที่ไม่มีหน่วย

$$\epsilon = \frac{\text{ระยะที่ยืดออกหรือหดของวัสดุ}}{\text{ระยะแรกเริ่มของวัสดุ}} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ความเครียดที่เกิดขึ้น

#### 3.7.1 ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

เมื่อคานได้รับภาระในแนวขนานกับผิว จะทำให้เกิดเป็นความเค้นเฉือนกับตัววัสดุ ซึ่งมีค่ามากที่สุดขึ้นกับภาระที่กระทำ ดังสมการ

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $V$  = แรงเฉือน  
 $Q$  = First Moment of Area  
 $I$  = Moment of Inertia  
 $t$  = ความหนาของ cross section ที่ตำแหน่งที่รับ shear stress

โดยหากหน้าตัดที่รับความเค้นเป็นรูปร่างทั่วไป เช่น สี่เหลี่ยม หรือ วงกลม จะสามารถคำนวณโดยตรงได้จากสมการที่ 3.24 เมื่อหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และ ตามสมการที่ 3.25 เมื่อหน้าตัดเป็นรูปวงกลม

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A} \quad (3.24)$$

$$\tau_{max} = \frac{4V}{3A} \quad (3.25)$$

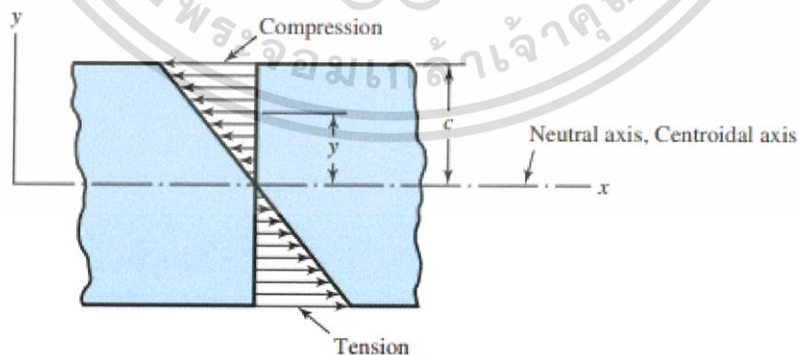
- เมื่อ  $A$  = พื้นที่หน้าตัด

### 3.7.2 ความเค้นดัด (Bending Stress)

เมื่อวัสดุได้รับแรงที่พยายามจะบิดหรือดัดวัสดุดังแสดงตามรูปที่ 3.9 จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ขึ้นในวัสดุ เป็นผลให้เกิดเป็นความเค้นดัดขึ้น

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (3.26)$$

- เมื่อ  $M$  = Bending Moment  
 $c$  = ระยะจาก Neutral Axis ที่มากที่สุด  
 $I$  = Second-Area Moment รอบแกน  $z$  จากรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงถึงค่าตัวแปรในสมการ bending stress [12]

3.7.3 โมดูลัสของยัง (Young's modulus หรือ E) เป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงแรงของวัสดุ โดยสามารถหาได้จากอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดโดยแสดงได้ตามสมการที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{FL_0}{A\Delta L} \quad (3.27)$$

3.7.4 ความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration หรือ  $K_t$ ) ในบางกรณีเช่นเมื่อมีรอยขีดข่วนหรือโพรงเกิดขึ้นบนผิววัสดุ จะทำให้ตำแหน่งนั้นๆ รับความเค้นเพิ่มเติมมากกว่าในกรณีปกติที่ไม่มีรอยขีดข่วนหรือโพรง เรียกว่าเกิดความเข้มข้นของความเค้นเพิ่มขึ้น โดยสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.28

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ref}} \quad (3.28)$$

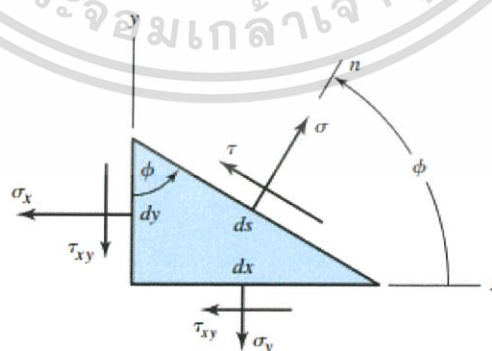
เมื่อ  $K$  = อัตราส่วนความเข้มข้นของความเค้น

$\sigma_{max}$  = ความเค้นที่ได้รับจริง

$\sigma_{ref}$  = ความเค้นที่ได้รับในกรณีปกติ

### 3.8 วงกลมโมห์สำหรับความเค้นในระนาบ 2 มิติ (Mohr's Circle for Plane Stress)

เมื่อองค์ประกอบของโครงสร้าง (structural element) นั้นต้องตกอยู่ในภายใต้ภาระหลายชนิดเช่นการดัด (bending) หรือ การบิดเป็นเกลียว (torsion) ในขณะเดียวกัน เราจะให้นิยามว่าความเค้นเหล่านี้จะทำให้เกิดความเค้นหลัก (Principal Stress หรือ  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) ขึ้น และนิยามว่าความเค้นเหล่านี้กระทำบนระนาบหลัก (Principal Planes) เมื่อความเค้นเฉือนเป็นศูนย์ ในปัญหาทางวิศวกรรมต่าง ๆ อาทิเช่นคานดัดหรือส่วนประกอบที่เป็นทรงกลมที่ได้รับการบิด นั้นเป็นตัวอย่างของความเค้นผสมที่เรียกว่าความเค้นบนแนวระนาบ (Plane Stress) ( $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ ) หากพิจารณาความเค้นผสมตามรูปที่ 3.10 จะสามารถทำได้ตามสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 ประกอบการพิจารณาความเค้นผสมในหัวข้อ 3.8 [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.29)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.30)$$

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = R \quad (3.31)$$

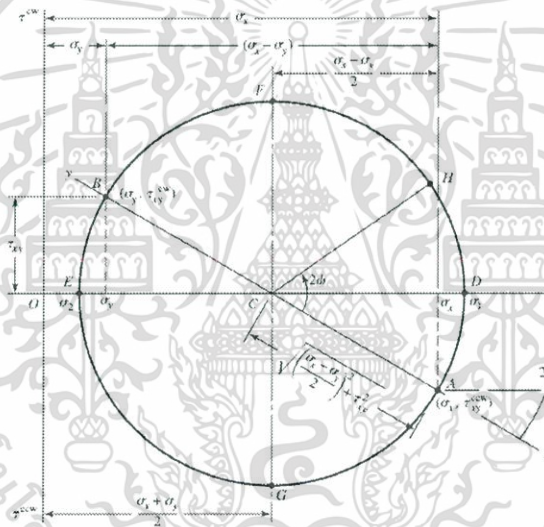
$$\tau_2 = -\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.32)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (3.33)$$

$$2\theta_p = \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (3.34)$$

$$2\theta_s = \tan^{-1} -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (3.35)$$

โดยสมการ 3.29 ถึง 3.30 ที่ได้นั้นสามารถนำไปเขียนวงกลมที่เรียกว่าวงกลมโมห์ได้เพื่อช่วยในการพิจารณาความเค้นผสมที่เกิดขึ้นกับวัสดุ

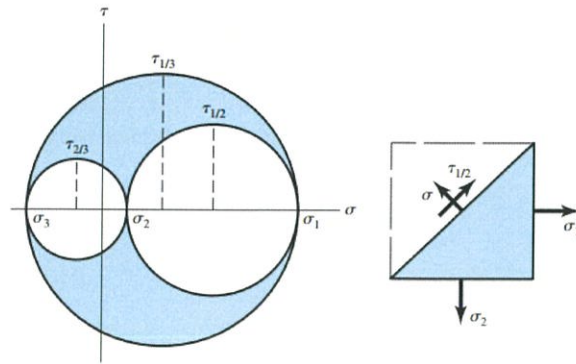


รูปที่ 3.10 การวาดวงกลมโมห์ด้วยสมการ 3.29 - 3.35 [12]

### 3.9 วงกลมโมห์สำหรับวิเคราะห์ความเค้นในระนาบ 3 มิติ

เมื่อต้องการวิเคราะห์ความเค้นในระนาบ 3 มิติเราสามารถใช่วงกลมโมห์ช่วยวิเคราะห์ที่ได้โดยพิจารณาแยกความเค้นแต่ละมิติจากเดิมที่เราวาดวงกลมโมห์เพียงวงเดียวในการวิเคราะห์ความเค้นในระนาบ 2 มิติ แต่ในกรณีนี้เราจะทำการวาดวงกลมโมห์ทั้งหมด 3 รูปสำหรับแต่ละระนาบ 3 ระนาบ และหลังจากนั้นเราจะนำเอาความเค้นหลักที่มีค่ามากที่สุดและความเค้นหลักที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อนำมาหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในสามมิติ ดังนั้นเราก็จะสามารถหาค่าความปลอดภัยของวัสดุได้จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดในสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การวาดวงกลมโมห์สำหรับระนาบ 3 มิติ [12]

### 3.10 ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Theories)

ทฤษฎีนั้นว่าด้วยการทำนายเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะสามารถทำให้วัสดุเสียหายภายใต้การมีภาระภายนอก โดยทั่วไปแล้วความเสียหายของวัสดุนั้นจะสามารถจัดประเภทได้เป็น 2 ประเภทคือการเสียหายแบบเปราะ (brittle) หรือร้าว (fracture) และความเสียหายแบบเหนียว (ductile) หรือโค้งงอ (yield) วัสดุส่วนมากนั้นสามารถเสียหายได้ในทั้งแบบเปราะและแบบเหนียวภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่นอุณหภูมิ, ความเค้นที่เกิดขึ้น, อัตราของภาระที่ส่งผ่าน (loading rate) โดยในการที่เราจะพิจารณาว่าวัสดุใดจะเกิดความเสียหาย (fail) นั้นเราจะพิจารณาโดยใช้ค่ากำลังคราก (Yield Strength) และความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Strength) ของแต่ละวัสดุประกอบกับทฤษฎีความเสียหายต่าง ๆ ที่เป็นที่ยอมรับในทั่วไป เช่นทฤษฎี Maximum Shearing Stress (MSS) หรือทฤษฎี Distortion Energy (DE) เป็นต้น โดยในที่นี้เราจะใช้ทฤษฎี Distortion Energy (DE) ในการออกแบบอุปกรณ์ เนื่องจากจะสามารถอำนวยความสะดวกในการทำการจำลองเชิงตัวเลขในโปรแกรม ANSYS

3.10.1 ทฤษฎี Distortion Energy (DE) หรือ von Mises นั้นกล่าวไว้ว่าวัสดุจะถึงเกณฑ์ที่เรียกว่า “เสีयरูป (Yield)” ก็ต่อเมื่อมีค่า von Mises stress หรือ  $\hat{\sigma}$  นั้นมีค่ามากกว่าค่า Yield Strength ( $S_y$ ) เมื่อค่า von Mises stress สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3.36 และ 3.37

$$\hat{\sigma} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3.36)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (3.37)$$

การที่วัสดุจำเป็นต้องรับภาระหรือแรงในแนวขนานกับผิวอาจจะทำให้วัสดุเสีयरูปได้หากแรงนั้น ๆ มีค่ามากกว่าค่า shear yield strength หรือ  $S_{sy}$  ซึ่งมีค่าดังสมการ 3.38

$$S_{sy} = 0.577 S_y \quad (3.38)$$

เมื่อ  $S_y$  = Yield Strength หรือ Ultimate Strength

### 3.11 ทฤษฎีพลังงานความเครียด (Strain Energy)

พลังงานความเครียด คือ พลังงานที่ถูกเก็บกักไว้ในวัสดุ เมื่อวัสดุถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ภายใต้การกระทำของแรงภายนอกโดยมีหลักการว่า “งานภายใน (internal work) ที่สะสมในวัสดุ มีค่าเท่ากับ งานภายนอกเนื่องจากแรงภายนอก” ถ้าวัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง linear elastic แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta U = \frac{1}{2} \Delta P(\delta) \quad (3.39)$$

$$\Delta P = \sigma \Delta A = \sigma(\Delta x \Delta y) \quad (3.40)$$

$$\delta = \epsilon \Delta z \quad (3.41)$$

เมื่อ  $\Delta U$  = พลังงานความเครียดที่เปลี่ยนไป

$\Delta P$  = ภาระแรงที่กระทำ

$\Delta A$  = พื้นที่ที่รับภาระ

$\delta$  = ระยะแนวแกน z ที่เปลี่ยนไป

$\Delta z$  = ระยะแนวแกน z เดิม

$\sigma$  = ความเค้นที่เกิดขึ้น

แทนค่า  $\Delta P$  และ  $\delta$  ลงในสมการ 3.39 จะได้ว่า

$$\Delta U = \frac{1}{2} \sigma(\Delta x \Delta y) \epsilon \Delta z = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \Delta V \quad (3.42)$$

และนิยามของ Strain Energy Density (U) สามารถแสดงได้ตามสมการ 3.43

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{1}{2} \sigma \epsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (3.43)$$

เมื่อ  $\Delta V$  = ปริมาตรที่เปลี่ยนไป

E = ค่าโมดูลัสของยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12 สปริงแรงบิด (Torsion Spring)

เราสามารถใช่แรงบิดเป็นกลไกในการทำงานได้ โดยการใช้สปริงแรงบิดประกอบในอุปกรณ์ แต่การที่จะออกแบบสปริงให้สามารถใช้งานได้ในกลไกของอุปกรณ์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความแข็งแรงและค่านิจของสปริง โดยการเลือกวัสดุสำหรับทำสปริงสามารถแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (3.44)$$

เมื่อ  $S_{ut}$  = Ultimate Tensile Strength

A = ค่าคงที่ที่สามารถอ่านได้จากตาราง 3.1

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดแสดงตามรูปที่ 3.11 อ่านได้จากตาราง 3.1,3.2

m = ค่าความชันที่สามารถอ่านได้จากตาราง 3.1



รูปที่ 3.12 แสดงนิยามของค่าตัวแปรต่าง ๆ ของสปริง [12]

ตาราง 3.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบสปริงขด [12]

Material	Elastic Limit, Percent of $S_{ut}$ , Tension Torsion		Diameter $d$ , in	$E$			
				Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Music wire A228	65-75	45-60	<0.032	29.5	203.4	12.0	82.7
			0.033-0.063	29.0	200	11.85	81.7
			0.064-0.125	28.5	196.5	11.75	81.0
			>0.125	28.0	193	11.6	80.0
HD spring A227	60-70	45-55	<0.032	28.8	198.6	11.7	80.7
			0.033-0.063	28.7	197.9	11.6	80.0
			0.064-0.125	28.6	197.2	11.5	79.3
			>0.125	28.5	196.5	11.4	78.6
Oil tempered A239	85-90	45-50		28.5	196.5	11.2	77.2
Valve spring A230	85-90	50-60		29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-vanadium A231	88-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
			A232	29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-silicon A401	85-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
Stainless steel							
A313*	65-75	45-55		28	193	10	69.0
17-7PH	75-80	55-60		29.5	208.4	11	75.8
414	65-70	42-55		29	200	11.2	77.2
420	65-75	45-55		29	200	11.2	77.2
431	72-76	50-55		30	206	11.5	79.3
Phosphor-bronze B159	75-80	45-50		15	103.4	6	41.4
Beryllium-copper B197	70	50		17	117.2	6.5	44.8
	75	50-55		19	131	7.3	50.3
Inconel alloy X-750	65-70	40-45		31	213.7	11.2	77.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.2 แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบสปริงชุด (ต่อ) [12]

Material	ASTM No.	Exponent $m$	Diameter, in	$A$ , kpsi · in <sup><math>m</math></sup>	Diameter, mm	$A$ , MPa · mm <sup><math>m</math></sup>	Relative Cost of Wire
Music wire*	A228	0.145	0.004–0.256	201	0.10–6.5	2211	2.6
OQ&T wire <sup>†</sup>	A229	0.187	0.020–0.500	147	0.5–12.7	1855	1.3
Hard-drawn wire <sup>‡</sup>	A227	0.190	0.028–0.500	140	0.7–12.7	1783	1.0
Chrome-vanadium wire <sup>§</sup>	A232	0.168	0.032–0.437	169	0.8–11.1	2005	3.1
Chrome-silicon wire <sup>  </sup>	A401	0.108	0.063–0.375	202	1.6–9.5	1974	4.0
302 Stainless wire <sup>¶</sup>	A313	0.146	0.013–0.10	169	0.3–2.5	1867	7.6–11
		0.263	0.10–0.20	128	2.5–5	2065	
		0.478	0.20–0.40	90	5–10	2911	
Phosphor-bronze wire**	B159	0	0.004–0.022	145	0.1–0.6	1000	8.0
		0.028	0.022–0.075	121	0.6–2	913	
		0.064	0.075–0.30	110	2–7.5	932	

หลังจากที่ทำการเลือกวัสดุแล้วทำการชดเพื่อทำสปริง ค่า Tensile Yield Strength ของสปริงจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 60 ถึง 90 ของค่า Tensile Strength เดิมและถ้าใช้ทฤษฎี Distortion Energy ในการคำนวณจะได้ Torsional Yield Strength ของวัสดุเป็นไปตามสมการ 3.45

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (3.45)$$

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ Torsional Yield Strength ของสปริงเมื่อเทียบกับ Tensile Strength ของวัสดุเดิมเป็นดังสมการ 3.46

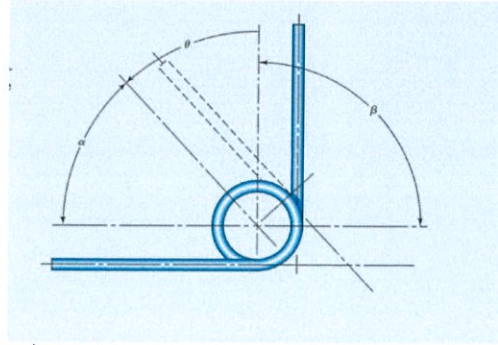
$$0.35S_{ut} \leq S_{sy} \leq 0.52S_{ut} \quad (3.46)$$

ถัดไป เพื่อที่จะสามารถคำนวณค่านิจของสปริง ( $k$ ) สามารถใช้สมการที่ 3.47 ได้ดังนี้

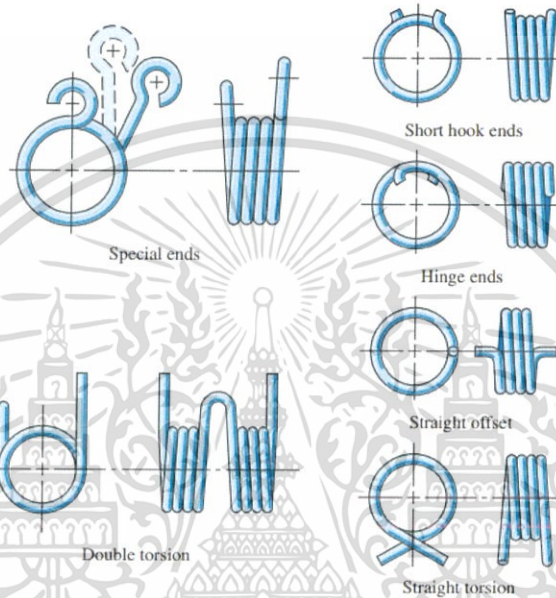
$$k = \frac{d^4 E}{10.8DN_a} \quad (3.47)$$

โดยสปริงแรงบิดนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ตามรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 สปริงแรงบิดชนิดที่ใช้กับอุปกรณ์ [12]



รูปที่ 3.14 สปริงแรงบิดชนิดต่าง ๆ [12]

### 3.13 กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy)

เป็นกฎในทางฟิสิกส์ที่กล่าวว่า พลังงานโดยรวมในระบบแยกส่วนหนึ่งๆ จะมีค่าเท่าเดิม หรือพูดได้ว่าพลังงานจะถูกอนุรักษ์ตลอดช่วงเวลา พลังงานที่ป้อนเข้าไปในระบบใดระบบหนึ่ง จะเท่ากับพลังงานที่ส่งออกมา พลังงานไม่สามารถถูกสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลาย เพียงแค่เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นเท่านั้น โดยพลังงานที่เราพิจารณาเมื่อทำการนั้นจะอยู่ในรูปแบบพลังงานจลน์ การหมุน และทำการพิจารณาการดูดซับพลังงานของแผ่นยางเพิ่มเติม

### 3.14 สมการของบาร์โล (Barlow's Formula)

ใช้สูตรของบาร์โลเพื่อคำนวณหาความหนาของท่อที่จำเป็นโดยใช้ความแข็งแรงของวัสดุเป็นเกณฑ์ เป็นไปตามสมการที่ 3.48

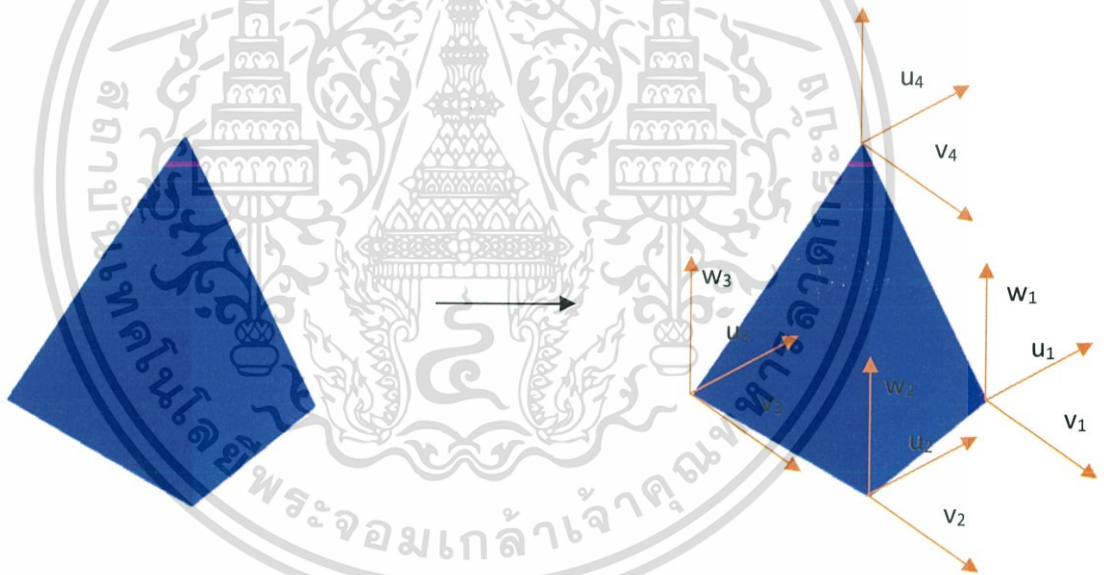
$$P = \frac{2(S)(t)}{(OD)(SF)} \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ P = ความดันของของไหล (psi)  
 t = ความหนาของท่อ (inch)  
 OD = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (inch)  
 SF = ค่าความปลอดภัย  
 S = ค่าความแข็งแรงของวัสดุโดยเลือกใช้ตามเกณฑ์ที่ต้องการดังนี้
- ใช้ Ultimate Tensile Strength เมื่อต้องการคำนวณหาความดันวิกฤต
  - ใช้ Yield Strength สำหรับหาความดันที่เริ่มมีการเสียรูป

### 3.15 ทฤษฎีที่ใช้ในการจำลองความเค้น

หลังจากการสร้าง model เพื่อทำการจำลองความเค้นแล้วทำการแบ่ง element ออกเป็นรูป Tetrahedron ตามรูป และทำการพิจารณา displacement ที่เกิดขึ้นของแต่ละ node ดังแสดงด้านล่าง



รูปที่ 3.15 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์ displacement ของแต่ละ node

ซึ่ง displacement ที่เกิดขึ้นแต่ละ element สามารถเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$u(x,y,z) = \sum_{i=1}^M N_i(x,y,z)u_i = N_1(x,y,z)u_1 + N_2(x,y,z)u_2 + N_3(x,y,z)u_3 + N_4(x,y,z)u_4$$

$$v(x,y,z) = \sum_{i=1}^M N_i(x,y,z)v_i = N_1(x,y,z)v_1 + N_2(x,y,z)v_2 + N_3(x,y,z)v_3 + N_4(x,y,z)v_4$$

$$w(x,y,z) = \sum_{i=1}^M N_i(x,y,z)w_i = N_1(x,y,z)w_1 + N_2(x,y,z)w_2 + N_3(x,y,z)w_3 + N_4(x,y,z)w_4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $N_i$  = interpolation function associated with node  $i$

$u_i, v_i$  and  $w_i$  = cartesian nodal displacement

ซึ่งสามารถคิดเป็น strain ได้ตามด้านล่างนี้

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x} u_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} u_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} u_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} u_4$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial N_1}{\partial y} v_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} v_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} v_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} v_4$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial N_1}{\partial z} w_1 + \frac{\partial N_2}{\partial z} w_2 + \frac{\partial N_3}{\partial z} w_3 + \frac{\partial N_4}{\partial z} w_4$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial y} u_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} u_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} u_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} u_4 + \frac{\partial N_1}{\partial x} v_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} v_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} v_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} v_4$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial z} u_1 + \frac{\partial N_2}{\partial z} u_2 + \frac{\partial N_3}{\partial z} u_3 + \frac{\partial N_4}{\partial z} u_4 + \frac{\partial N_1}{\partial x} w_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} w_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} w_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} w_4$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial N_1}{\partial z} v_1 + \frac{\partial N_2}{\partial z} v_2 + \frac{\partial N_3}{\partial z} v_3 + \frac{\partial N_4}{\partial z} v_4 + \frac{\partial N_1}{\partial y} w_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} w_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} w_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} w_4$$

ทำการนิยามให้ element displacement column matrix  $\{\delta^{(e)}\}$  เป็น matrix นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{\delta^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{Bmatrix}$$

จากนั้นจะได้ว่า element strain matrix  $\{\mathbf{E}\}$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\{\mathbf{E}\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{Bmatrix}$$

$$= [B]\{\delta^{(e)}\}$$

โดยที่  $[B]$  คือ partial derivative of the interpolation function

และจากสูตรการคำนวณ Strain Energy นั้นคือ

$$\begin{aligned} U_e^{(e)} &= \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \{\mathbf{E}\}^T [D] \{\mathbf{E}\} dV^{(e)} \\ &= \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \{\delta^{(e)}\}^T [B]^T [D] [B] \{\delta^{(e)}\} dV^{(e)} \end{aligned}$$

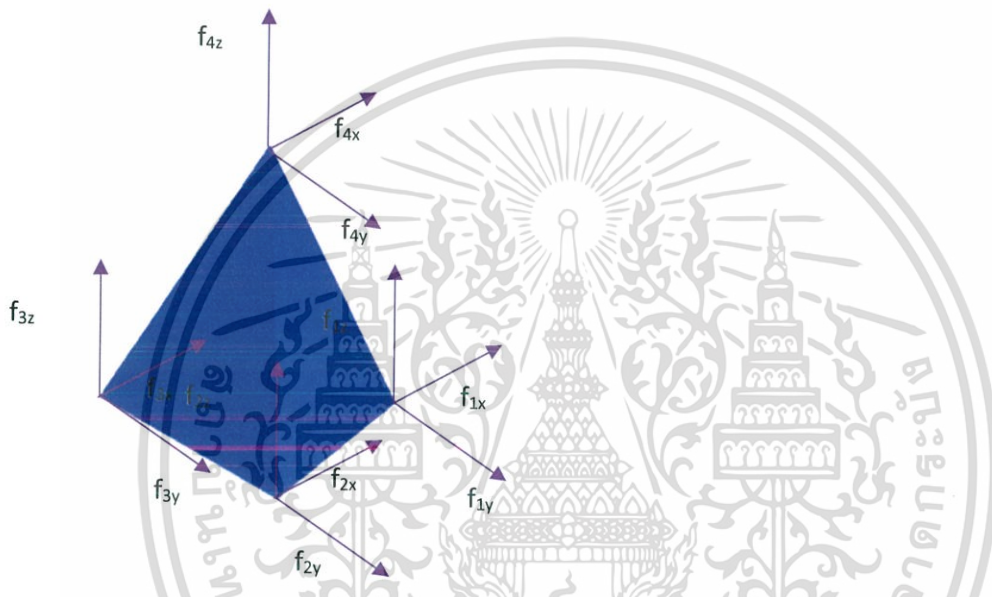
เมื่อ  $V^{(e)}$  คือ total volume of element

เนื่องจากสมมติใช้วัสดุเป็น isotropic material จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการพิจารณาแรงที่กระทำกับ element ซึ่งแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.16 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์ force ที่กระทำแต่ละ node

ในการพิจารณาแรงจะพิจารณาที่ node ซึ่งสามารถหางานแต่ละ element ได้จาก

$$W = f_{1x}u_1 + f_{1y}v_1 + f_{1z}w_1 + f_{2x}u_2 + f_{2y}v_2 + f_{2z}w_2 + f_{3x}u_3 + f_{3y}v_3 + f_{3z}w_3 + f_{4x}u_4 + f_{4y}v_4 + f_{4z}w_4$$

เขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$W = \{\delta^{(e)}\}^T \{f\}$$

จากสูตร พลังงานศักย์ทั้งหมด ( $\Pi$ )

$$\Pi = U_e^{(e)} - W = \frac{1}{2} \{\delta^{(e)}\}^T \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV^{(e)} \{\delta^{(e)}\} - \{\delta^{(e)}\}^T \{f\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามทฤษฎีแล้วพลังงานทั้งหมดของ element จะต้องเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ (minimum) เราจึงต้องทำการคำนวณโดยใช้

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \delta} = 0$$

$$\text{จะได้ } \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV^{(e)} \{\delta^{(e)}\} = \{f\}$$

$$\text{เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น } [K] \{\delta^{(e)}\} = \{f\} \text{ โดยที่ } [K] = \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV^{(e)}$$

เรียก  $[K]$  เป็น the element stiffness matrix

และ  $\{f\}$  เป็น initial condition (load)

ซึ่งสามารถหา  $\{\delta^{(e)}\}$  ได้โดยวิธี Gauss Elimination

เมื่อได้  $\{\delta^{(e)}\}$  จะสามารถหา  $\{\mathcal{E}\}$  ได้ตามความสัมพันธ์  $\{\mathcal{E}\} = [B] \{\delta^{(e)}\}$  ที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้นแล้ว

ซึ่งจะทำให้หา  $\{\sigma\}$  ได้ เนื่องจาก  $\{\mathcal{E}\}$  มีความสัมพันธ์กับ  $\{\sigma\}$  ในรูป  $\{\sigma\} = [D] \{\mathcal{E}\}$

## บทที่ 4

### การออกแบบและการคำนวณ

การออกแบบจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ส่วน นั่นคือส่วนประตुरะบายแก๊ส , แผ่นประลัษ, ท่อ และ หน้าแปลน โดยหลักการทั่วไปของอุปกรณ์คือต้องการออกแบบให้ตัวประตुरะบายแก๊สสามารถเปิดได้เมื่อความดันในอุปกรณ์ถึงค่า  $P_{stat}$  โดยมีแผ่นประลัษเป็นจุดควบคุมความดันที่เปิดและไม่ให้ประตुरะบายแก๊สสามารถเปิดได้ก่อนถึงความดัน  $P_{stat}$  ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดมีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้

#### 4.1 ประตुरะบายแก๊ส



รูปที่ 4.1 แสดงโมเดลของประตुरะบายแก๊สที่เขียนจากโปรแกรม SolidWorks

##### 4.1.1 ขนาดพื้นที่ระบายที่น้อยที่สุดที่ควรจะมี

ในส่วนของขนาดพื้นที่ระบายที่น้อยที่สุดที่ควรจะมี สามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้ เริ่มที่การหา  $A_{v0}$  ตามสมการ 3.2

$$A_{v0} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 1.54 \cdot (0.75)^{4/3}) \cdot 129 \cdot 1.868^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{10.4}{P_{red}} - 1}$$

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา Minimum Venting Area

$K_{st}$	129 bar m/s	Volume	1.868 m <sup>3</sup>
$P_{max}$	10.2 bar g	$L/D = H/D_h$	4.00
$P_{stat}$	0.75 bar g	$V_{axial}$	< 10 m/s

จากนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการพิจารณาถึงผลของลักษณะรูปร่างของไซโล สำหรับไซโลที่มีค่า  $L/D$  มากกว่า 2 และไม่เกิน 6 ต้องคำนวณตามต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{v1} = A_{v0} \cdot \left[ 1 + 0.6 \left( \frac{L}{D} - 2 \right)^{0.75} \cdot \exp(-0.95 \cdot P_{red}^2) \right]$$

จากนั้นพิจารณาถึง ความเร็วตามแนวแกน ( $v_{axial}$ ) หากมีค่าไม่เกิน 20 m/s ค่าของ  $A_{v2}$  จะมีค่าเท่ากับ  $A_{v1}$

$$A_{v2} = A_{v1}$$

ในกรณีที่มวลของแผงระบายมีค่าไม่เกิน 40 kg/m<sup>2</sup> และค่า  $K_{St}$  ไม่เกิน 250 bar-m/s จะต้องคำนวณเกณฑ์มวล (Threshold Mass) หรือ  $M_T$  (มวลของแผงระบาย,  $M = 0.862$  kg/m<sup>2</sup>) , โดยในที่นี้ จำนวนแผงระบาย  $n = 1$

$$M_T = \left[ 6.67 \cdot (P_{red}^{0.2}) \cdot (n^{0.3}) \cdot \left( \frac{V}{K_{St}^{0.5}} \right) \right]^{1.67}$$

มวลของแผงระบาย ( $M$ ) มีค่าไม่เกินเกณฑ์มวล( $M_T$ ) ค่าของ  $A_{v3}$  จะเท่ากับ  $A_{v2}$

$$A_{v3} = A_{v2}$$

จะเห็นว่าสูตรการคำนวณพื้นที่ระบายนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ  $P_{red}$  ที่ต้องการให้เป็น ฉะนั้นจึงลองทำการคำนวณพื้นที่ระบายคร่าว ๆ ที่จะทำให้ได้  $P_{red}$  ตามที่ต้องการ ทำให้ได้ผลตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดพื้นที่ระบายที่จะทำให้ได้ค่าความดันที่ต้องการ

$P_{red}$ (barg)	Vent Area (m <sup>2</sup> )
1	0.1781
2	0.0875
3	0.0655
4	0.0526
5	0.0431
6	0.0353
7	0.0286

เนื่องจากการออกแบบจริง ขนาดของช่องระบายจะถูกกำหนดโดยขนาดของท่อตามแคตตาล็อกและพื้นที่ที่จำกัดของโรงงานจริง จะสามารถคำนวณใหม่เพื่อหา  $P_{red}$  ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

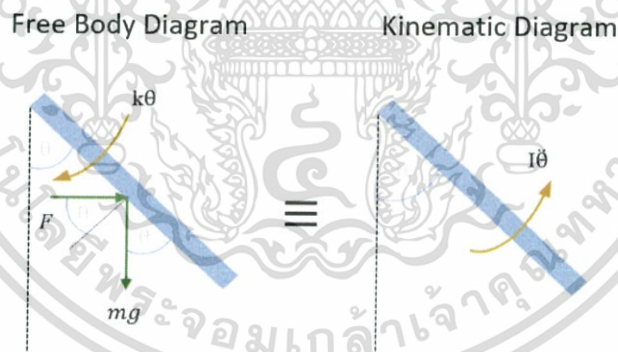
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความดัน  $P_{red}$  ที่คำนวณร่วมกับการเลือกขนาดท่อ

Nominal Pipe Size	Vent Area (m <sup>2</sup> )	$P_{red}$ (barg)
6	0.018	8.6
8	0.031	6.5
10	0.049	4.3
15	0.110	1.54
20	0.196	0.92

จากมาตรฐาน NFPA68 ระบุไว้ว่าความดันสูงสุดหลังจากการระบาย จะต้องไม่มีเกินสองในสามของความแข็งแรงของไซโล (ในกรณีของเรามีค่าประมาณ 10 barg) เราจึงเลือกขนาดที่เล็กที่สุดที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือท่อขนาด 8 นิ้ว

#### 4.1.2 การเคลื่อนที่ของประตู่

ทำการเขียน Free Body Diagram และ Kinematic Diagram ของประตู่ขณะกำลังเปิด



รูปที่ 4.2 Free Body Diagram และ Kinematic Diagram

จากนั้นใช้สมการกลศาสตร์ทั่วไปในการคำนวณ

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F - R_x = 0 \quad R_y - mg = 0$$

โดยกำหนดให้แรงมีขนาดและทิศทางคงที่ในเวลาสั้นๆ กระทำที่จุดศูนย์กลางของประตู่

$$F = \frac{P_{red}}{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Sigma M_o = I\alpha$$

$$(F\cos\theta - mg\sin\theta)\frac{l}{2} - k\theta = I\alpha$$

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{I}[(F\cos\theta - mg\sin\theta)\frac{l}{2} - k\theta]$$

หาความเร็วเชิงมุม ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้จากปริพันธ์ของความเร่งเชิงมุมซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง หรือ  $\omega_2^2 = \omega_1^2 - (\alpha_2 - \alpha_1)(\theta_2 - \theta_1)$  เพื่อหาค่านิจของสปริงที่ทำให้ความเร็วเชิงมุมมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่ตำแหน่ง  $90^\circ$  โดยเมื่อใช้  $P = P_{red} = 6.5 \text{ barg}$  ในการคำนวณ และ ใส่สปริงที่มีค่านิจของสปริง =  $2,500 \text{ Nm/rad}$  จะทำให้ได้ผลการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.4 การคำนวณหาความเร่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมเมื่อใช้สปริงที่มีค่านิจสปริง  $2,500 \text{ Nm/rad}$

ตำแหน่ง ( $^\circ$ )	ความเร่งเชิงมุม ( $\text{rad/s}^2$ )	ความเร็วเชิงมุม ( $\text{rad/s}$ )
0	158,103	0
1	155,854	74,02
90	-200,084	42,81

ในการคำนวณเวลาเปิดและปิดของประตูระบายแก๊ส จะใช้สมการ

$$w_2 = w_1 + \frac{(\alpha_2 + \alpha_1)}{2} * t$$

เมื่อ	$W_1$	=	ความเร็วเชิงมุมของตำแหน่งเดิม
	$W_2$	=	ความเร็วเชิงมุมของตำแหน่งปัจจุบัน
	$\alpha_1$	=	ความเร่งเชิงมุมของตำแหน่งเดิม
	$\alpha_2$	=	ความเร่งเชิงมุมของตำแหน่งปัจจุบัน
	$t$	=	เวลาทั้งหมดที่ใช้จนถึงตำแหน่งปัจจุบัน

เมื่อทำการแทนค่าจากกรณีด้านบน พบว่าได้ค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การคำนวณหาเวลาที่ใช้เปิด

ตำแหน่งองศาจากเดิม (°)	เวลาที่ใช้งานถึงตำแหน่งปัจจุบัน (ms)
0	0
1	0.47
.	.
.	.
90	6.34

ตารางที่ 4.6 การคำนวณหาเวลาที่ใช้ปิด

ตำแหน่งองศาจากเดิม (°)	เวลาที่ใช้งานถึงตำแหน่งปัจจุบัน (ms)
0	0
1	0.42
.	.
.	.
90	6.17

เลือกใช้สปริงดีดที่มีค่านิจ 1,250 นิวตันเมตรต่อเรเดียน จำนวน 2 ตัว โดยใช้สมการ 3.47 ในการออกแบบสปริง

$$k = \frac{d^4 E}{10.8 D N_a}$$

โดย E = ค่ามอดูลัสของวัสดุสปริง

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง (Wire diameter)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean diameter)

$N_a$  = จำนวนขดรอบทำงาน (Active coils)

#### 4.1.3 แผ่นยางขับแรงกระแทก

คำนวณความหนาของยางขับแรงกระแทก โดยใช้ทฤษฎีพลังงานความเครียดและกฎอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}kx^2 = \Delta U + mgh$$

$$\frac{1}{2}m(\omega r)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{k\theta}{r}\right)h = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E}Ah + mgh$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \frac{m(\omega r)^2}{\frac{k\theta}{r} + \frac{\sigma^2 A}{E} + 2mg}$$

โดย  $h$  คือ ระยะที่เปลี่ยนไปของยางข้อรับแรง (m)

$m$  คือ มวลของประตู (kg)

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมที่ตำแหน่ง  $90^\circ$

$k$  คือ ค่าสปริงของสปริง (N·m/rad)

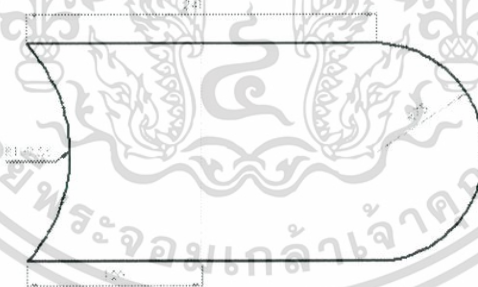
$E$  คือ ค่ามอดูลัสของยางข้อรับแรง (N/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น (N/m<sup>2</sup>)

$A$  คือ พื้นที่ของยางข้อรับแรง (m<sup>2</sup>)

จากการคำนวณจะได้ค่าระยะที่เปลี่ยนไปของยาง มีค่า 7.1 mm หากความหนาแน่นที่สุดของยางข้อรับแรงจากสมการความเครียด  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$  และ  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$  จะได้ความหนาแน่นที่จำเป็น มีค่า 10.9 mm

#### 4.1.4 คานรับแรงจากการหมุน



รูปที่ 4.3 แสดงการออกแบบคานรับแรงหมุน

ในส่วนของคานที่ต้องรับแรงจากการหมุน หากทำการเลือกใช้ความหนาของคานที่ 5 mm จำเป็นต้องทำการคำนวณความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโหมดของความเค้น Normal Stress และ Shear Stress

ในโหมด Normal Stress ใช้สมการ 3.21 คำนวณดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{27,000}{\frac{\pi D^2}{8} + bh} = \frac{27,000}{\frac{\pi * 0.14^2}{8} + 0.14 * 0.12} = \frac{27,000}{0.024496902} = 1.1 \text{ MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับ Yield Strength ที่ 220 MPa จะเห็นว่าสามารถรับภาระได้ในโหมด Shearing Stress จะใช้สมการที่ 3.25 ในการคำนวณ ดังนี้

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A} = \frac{3 * 27,000}{2 * 0.005 * 0.14} = 58 \text{ MPa}$$

ซึ่งเมื่อใช้ทฤษฎี Distortion Energy เมื่อนำไปเทียบกับ 0.577 เท่าของ Yield Strength ซึ่งมีค่าเป็น 127 MPa จะเห็นว่าสามารถรับภาระได้

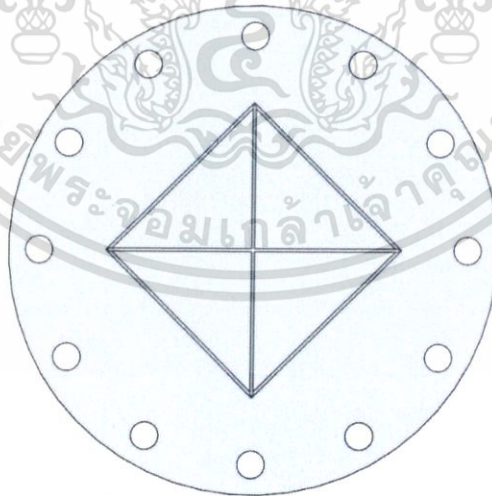
#### 4.1.3 เพลารับแรง

ตัวเพล่าที่จุดหมุนมีความจำเป็นต้องรับความเค้นในโหมด shear stress ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.21 โดยทำการเลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ 20 mm หรือ 0.02 m

$$\tau_{max} = \frac{4V}{3A} = \frac{4 * 27,000}{3 * 3.14 * 10^{-4}} = 115 \text{ MPa}$$

ซึ่งเมื่อใช้ทฤษฎี Distortion Energy เมื่อนำไปเทียบกับ 0.577 เท่าของ Yield Strength ซึ่งมีค่าเป็น 127 MPa จะเห็นว่าสามารถรับภาระได้

## 4.2 แผ่นประลัย (Rupture Disk)



รูปที่ 4.4 แสดงโมเดลของแผ่นประลัยที่เขียนจากโปรแกรม SolidWorks

ในการออกแบบแผ่นประลัยนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำ เนื่องจากต้องการให้แผ่นประลัยแตกได้รับความดันถึง  $P_{stat}$  ซึ่งจะใช้การบากแผ่นประลัยเพื่อช่วยให้สามารถระบายความดันได้ในช่วงที่ต้องการ และช่วยให้การแตกมีรูปแบบที่ควบคุมได้

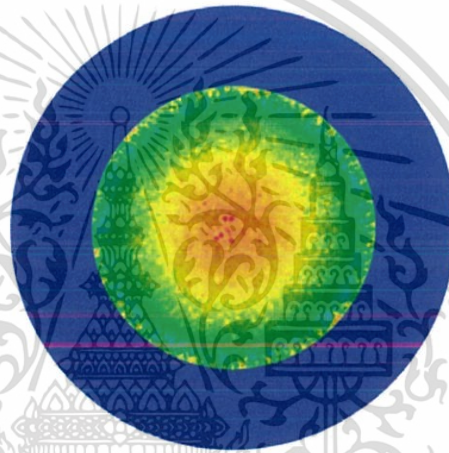
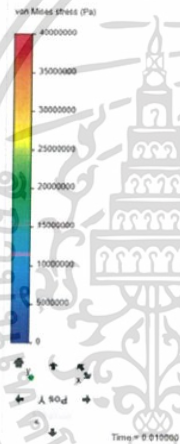
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การศึกษาถึงผลของลักษณะการบากและการติดตั้งที่มีต่อพฤติกรรมของความดันที่แตกและลักษณะการแตกของแผ่นประลัย

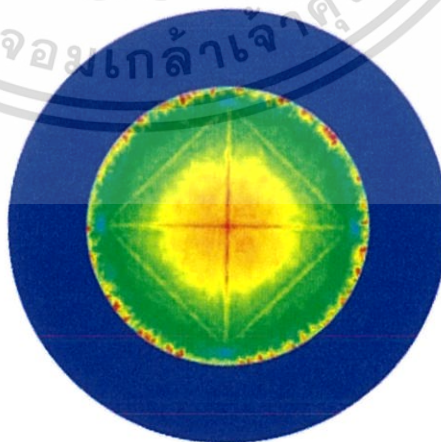
การศึกษาจะใช้การวิธีการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) และการทดลองเพื่อประกอบการพิจารณาในแต่ละกรณีที่มีดังนี้

- 1) ไม่ทำรอยบาก
- 2) ทำรอยบากทั้ง 2 ข้าง
- 3) ทำรอยบากข้างเดียว และให้รับความดันในด้านที่บาก
- 4) ทำรอยบากข้างเดียว และให้รับความดันในด้านเรียบ

โดยในการศึกษาด้วยการจำลองความเค้น โดยใช้แผ่นประลัยที่มีความหนา 1 mm และรับความเค้นที่ 0.75 บาร์เท่ากัน ได้ผลเป็นดังนี้

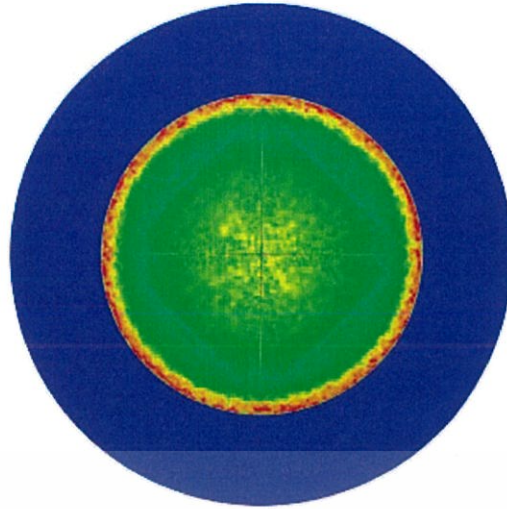


รูปที่ 4.5 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยกรณี 1

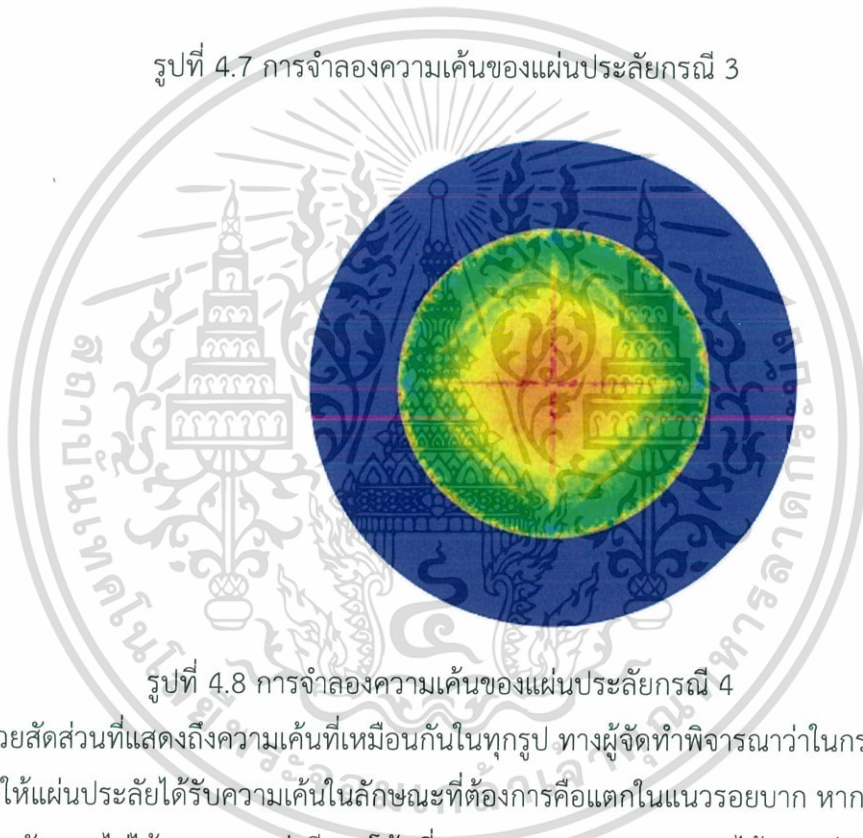


รูปที่ 4.6 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยกรณี 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยกรณี 3



รูปที่ 4.8 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยกรณี 4

ด้วยสัดส่วนที่แสดงถึงความเค้นที่เหมือนกันในทุกรูป ทางผู้จัดทำพิจารณาว่าในกรณีที่ 2 และ 4 น่าจะทำให้แผ่นประลัยได้รับความเค้นในลักษณะที่ต้องการคือแตกในแนวรอยบาก หากเปรียบเทียบกับตอนไม่ได้บากจะพบว่ามีความเค้นที่แตกที่ขอบมากกว่า และหากเทียบกับกรณีที่ 3 จะพบว่ากรณีนี้มีแนวโน้มน้ำที่แตกที่ขอบมากกว่าที่รอยบาก

และในการศึกษาด้วยการทดลอง โดยใช้แผ่นประลัยที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับในการจำลองความเค้น ได้ผลดังนี้ในแต่ละกรณี

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเมื่อใช้รอยบากหรือวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกัน 4 กรณี

กรณีที่ 1 ไม่ทำรอยบาก				
ครั้งที่	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ความดัน	1.11	1.06	0.95	1.04
กรณีที่ 2 ทำรอยบากทั้ง 2 ข้าง				
ครั้งที่	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ความดัน	0.66	0.61	0.65	0.64
กรณีที่ 3 ทำรอยบากข้างเดียว และให้ความดันในด้านที่บาก				
ครั้งที่	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ความดัน	0.74	0.79	0.75	0.76
กรณีที่ 4 ทำรอยบากข้างเดียว และให้ความดันในด้านเรียบ				
ครั้งที่	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ความดัน	0.76	0.77	0.81	0.78

เมื่อทำการพิจารณาแล้วพบว่าการทำรอยบากทั้งสองข้างตามกรณีที่ 2 นั้นจะทำให้วัสดุมีแนวโน้มที่จะแตกที่ความดันน้อยกว่า หรือพิจารณาอีกประการได้ว่าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ แต่ไว้ในกรณีที่ 3 และ 4 นั้นมีค่าเฉลี่ยของความดันที่ใกล้เคียงกัน ผู้จัดทำจึงพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติการแตก ซึ่งในกรณีที่ 4 นั้นจะแตกในลักษณะที่ต้องการคือแตกในเส้นรอยบากทั้ง 2 เส้น

จากการศึกษาทั้ง 2 แบบ ผู้จัดทำพิจารณาว่าถ้าหากจะทำการผลิตแผ่นประลัย ควรจะเลือกใช้แบบกรณี 2 หรือ 4 เพื่อให้การแตกของแผ่นประลัยมีลักษณะเป็นไปตามที่ต้องการ

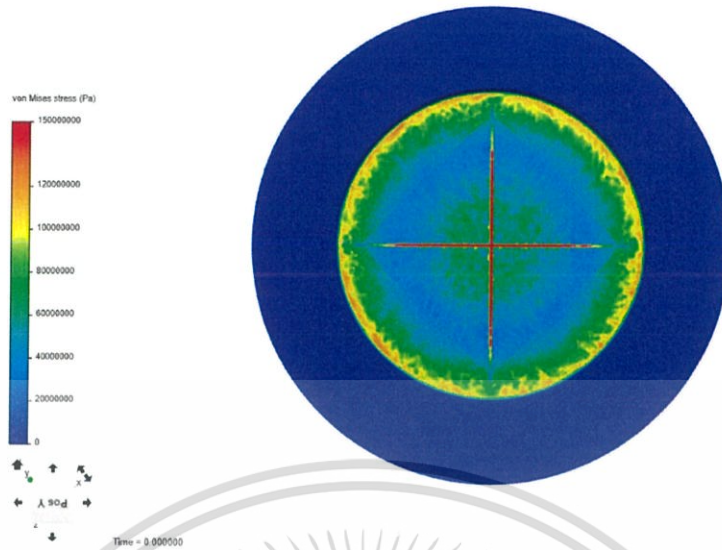
#### 4.6.2 การเลือกความหนาของแผ่นวัสดุ

หลังจากนั้นเพื่อทำการเลือกความหนาวัสดุ ทางผู้จัดทำพิจารณาแล้วว่าจะเลือกใช้พลาสติก ABS, แผ่นอลูมิเนียมและ แผ่นสังกะสีในการสร้างแผ่นประลัย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการใช้งานแพร่หลายในงานก่อสร้างทั่วไป และสามารถหาซื้อได้ง่ายในแถบสถาบัน

ในการเลือกความหนาของแผ่นประลัยจะทำการจำลองความเค้นด้วยการใช้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่มีในอินเทอร์เน็ตก่อนโดยใช้ความกว้างของรอยบากเป็น 2 mm ตามขนาดหัวกวดที่มีในตลาด [11] เมื่อได้ทำการออกแบบจนได้ความหนาและความลึกที่เหมาะสมคร่าว ๆ สำหรับการผลิต แล้ว จึงทำการซื้อวัสดุมาทำการทดสอบคุณสมบัติโดยการทดสอบด้วยการดึง (Tension Test) แล้วนำผลทดสอบที่ได้ไปใช้ในการออกแบบใหม่ด้วยการจำลองความเค้นในโปรแกรมอีกครั้ง เพื่อให้การจำลองความเค้นและการออกแบบเป็นไปอย่างแม่นยำและตรงกับสภาพจริงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นแรกที่ใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุตามค่าในอินเทอร์เน็ทมีผลเป็นดังรูปต่อไปนี้



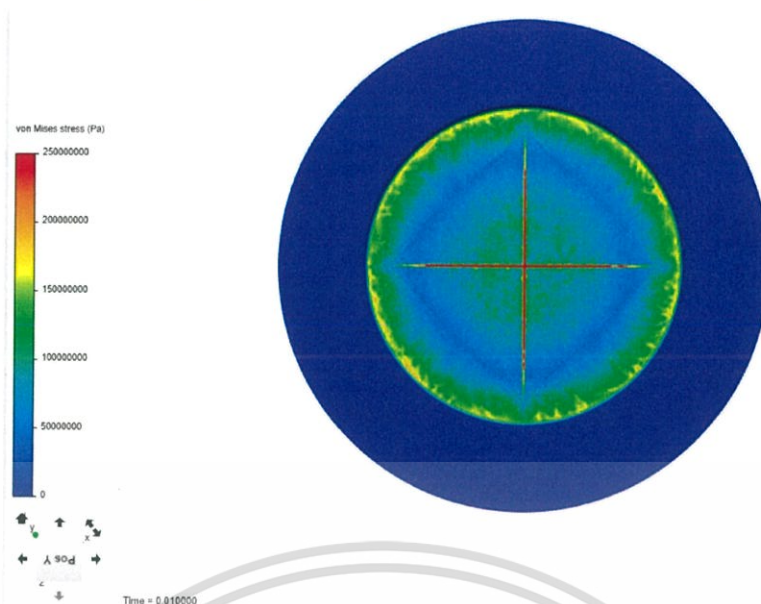
รูปที่ 4.9 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นพลาสติก ABS ในชั้นแรก



รูปที่ 4.10 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัษที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมในชั้นแรก

ในกรณีของแผ่นพลาสติก ABS ด้วยค่าคุณสมบัติ Ultimate Tensile Strength (UTS) = 39 MPa และ Young 's Modulus = 2.9 GPa [16] เมื่อได้ออกแบบและจำลองความเค้นแล้ว พบว่าค่าที่เหมาะสมคือความหนา 3 mm และความลึกของรอยบาก 2.5 mm จะทำให้ได้ความเค้นที่เกิน UTS ในบริเวณรอยบากตามรูปที่แสดงข้างต้น ซึ่งน่าจะเป็นลักษณะการแตกที่ทางผู้จัดทำต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยที่ทำจากแผ่นสังกะสีในชั้นแรก

ในลักษณะเดียวกันกับตอนออกแบบในกรณีแผ่นสังกะสี ที่มีค่า UTS = 246 MPa ,Young's Modulus = 108 GPa [3] จะทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือความหนา 1.2 mm และ รอยบากลึก 0.8 mm

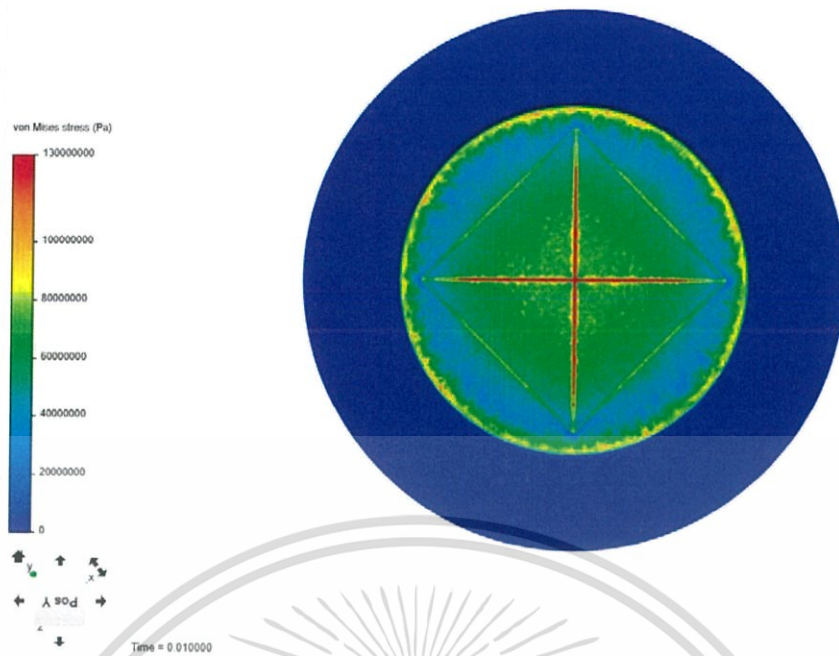
และในกรณีของแผ่นอลูมิเนียมที่มีค่า UTS = 160 MPa และ Young's Modulus = 68.9 MPa [2] ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือความหนา 1 mm และความลึกรอยบาก 0.7 mm

จากนั้นเมื่อได้ทำการซื้อวัสดุจริงและทำการทดสอบด้วยการดึงแล้ว ทำให้สามารถนำไปใช้ในการจำลองความเค้นและออกแบบความลึกของรอยบากใหม่ได้ดังนี้



รูปที่ 4.12 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยที่ทำจากแผ่นพลาสติก ABS ในชั้นสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ในชั้นสอง



รูปที่ 4.14 การจำลองความเค้นของแผ่นประลัยที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ในชั้นสอง

ในกรณีของแผ่นพลาสติก ABS เมื่อทดสอบแล้วได้ค่า UTS = 33 MPa และ Young's Modulus = 1.01 GPa ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือความหนา 3 mm และความลึกรอยบากที่ 2 mm

และในกรณีของแผ่นสังกะสี เมื่อทดสอบแล้วได้ค่า UTS = 314 MPa และ Young's Modulus = 36.7 GPa ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือความหนา 1.2 mm และความลึกรอยบากที่ 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในกรณีของแผ่นอลูมิเนียม เมื่อทดสอบแล้วได้ค่า UTS = 119 MPa และ Young's Modulus = 25.83 GPa ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือความหนา 1 mm และความลึกรอยบากที่ 0.7 mm

โดยปกติแล้วในอุตสาหกรรมที่สร้างแผ่นประลัยนั้นมักจะทำการสร้างขึ้นมาหลายแผ่นใน 1 ชุด และทำการทดสอบส่วนหนึ่ง แล้วส่วนที่เหลือจึงนำไปขายได้ แต่เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงทรัพยากรที่มีของกลุ่มแล้ว จึงมีความจำเป็นต้องผลิตแผ่นประลัยในแต่ละชนิดวัสดุเพียงแค่ 1 แผ่น

### 4.3 ท่อและหน้าแปลน

ขนาด Internal Diameter ของท่อและหน้าแปลนนั้นได้มีการเลือกมาจากการคำนวณ Minimum Venting Area แต่ที่ต้องเลือกเพิ่มเติมขึ้นคือความหนาของท่อที่จำเป็นต้องมี ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.44

$$P = \frac{2(S)(t)}{(OD)(SF)}$$

$$87 = \frac{2(36,000)(t)}{(5)(8 + 2t)}$$

ได้ว่า  $t = 0.04892 \text{ in}$

นั่นคือท่อที่ใช้จำเป็นต้องมีความหนาน้อย 0.04892 in ซึ่งเท่ากับ 1.3 mm จากนั้นจึงทำการเปิดแคตตาล็อกท่อ และเลือกใช้ท่อที่มีความหนา 4.5 mm

ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลต่าง ๆ ในแคตตาล็อกท่อที่เลือกใช้

Outside Diameter		wall thickness (t) mm	Unit Mass kg/m	Cross sectional area cm <sup>2</sup>	Informative reference		
in	mm.				Geometrical moment of inertia cm <sup>4</sup>	Modulus of section cm <sup>3</sup>	Radius of gyration of area cm
6"	168.3	3.2	13.03	16.60	ix, iy 565.74	Zx, Zy 67.23	ix, iy 5.84
		3.5	14.22	18.12	615.45	73.14	5.83
		4.0	16.21	20.65	697.09	82.84	5.81
		4.5	18.18	23.86	777.22	92.36	5.79
		5.0	20.14	25.65	855.85	101.70	5.78
		6.0	24.02	30.59	1008.69	119.87	5.74
		7.0	27.85	35.47	1155.79	137.35	5.71
		9.0	35.36	45.04	1433.29	170.33	5.64
		8"	219.1	4.5	23.82	30.34	1747.24
5.0	26.40			33.63	1928.04	176.00	7.57
6.0	31.53			40.17	2281.95	208.30	7.54
7.0	36.61			46.64	2625.75	239.68	7.50
9.0	46.63			59.40	3283.80	299.75	7.43
12.0	61.29			78.07	4199.88	383.38	7.33
10"	273.0	4.5	29.80	37.96	3421.58	250.67	9.49
		5.0	33.05	42.10	3780.81	276.96	9.48
		6.0	39.51	50.33	4487.08	328.72	9.44
		7.0	45.92	58.50	5177.30	379.29	9.41
		9.0	58.60	74.64	6510.56	476.96	9.34
		12.0	77.24	98.39	8396.14	613.10	9.24

จากนั้นเลือกหน้าแปลนให้เข้ากับท่อ โดยในที่นี้เลือกใช้หน้าแปลน EN1092-1 PN10 Type 01 ขนาด DN200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลต่าง ๆ ในแคตตาล็อกหน้าแปลนที่เลือกใช้

### EN 1092-1 PN10 Flanges

Nominal diameter DN	Mating dimensions					Outside diameter of neck	Bore diameters			Flange thickness				Chamfer	Cellar thickness	Diameter of shoulders	Length			Neck diameters			Corner radius	Neck thickness (preferred value)		
	Outside diameter	Diameter of bolt circle	Diameter of bolt hole	Bolting			B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	E	F		G max	H1	H2	H3	N1	N2	N3		R	S
	D	K	L	No	Size		A																			
	Flange Type																									
	01, 02, 05, 11, 12, 21					11 21* 34	01 12 32	02	04	01 02 04	11 12	21	05	02 04	32 34	05	12	11 34	11 34	11 34	12	21	11 12 21	11 34		
10 15 20 25 32 40	Use PN40 dimensions																									
50 65 80 100 125 150	Use PN 16 dimensions																									
200	340	295	22	8	M20	219,1	221,5	226	240	24	24	24	24	6	20	100	44	62	16	234	246	246	10	5,9		
250	395	350	22	12	M20	273,0	276,5	218	294	26	26	26	26	8	22	235	46	68	16	292	298	298	12	6,3		
300	445	400	22	12	M20	323,9	327,5	333	348	26	26	26	26	8	22	265	46	68	16	342	350	348	12	7,1		
350	505	460	22	16	M20	335,6	359,5	365	400	26	26	26	26	8	22	330	53	68	16	385	400	408	12	7,1		

จากนั้นเลือกหน้าแปลนให้เข้ากับท่อ โดยในที่นี้เลือกใช้หน้าแปลน EN1092-1 PN10 Type 01 ขนาด DN200

#### 4.4 ต้นทุนการผลิต

สามารถแบ่งต้นทุนการผลิตเป็นหมวดตามส่วนของอุปกรณ์ได้ดังนี้

1. ส่วนประตुरะบายแก๊ส ซึ่งรวมไปถึงประตูลู เพลา รับแรง ก้านรับแรง ท่อเหล็กและหน้าแปลนหน้า

แปลน ใช้ต้นทุนที่รวมทั้งค่าวัสดุและค่าแรงแล้วทั้งหมด 6,200 บาท

2. ส่วนแผ่นประลัษ ซึ่งแยกได้ตามวัสดุที่ใช้ทำ จะสามารถแบ่งได้ดังนี้

- แผ่นประลัษที่ใช้แผ่นพลาสติก ABS ผลิต ใช้ต้นทุนจากวัสดุแผ่นละ 125 บาท ค่าตัด 100 บาท ค่า CNC 350 บาท รวมเป็นทั้งหมด 575 บาท

- แผ่นประลัษที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมผลิต ใช้ต้นทุนจากวัสดุแผ่นละ 75 บาท ค่าตัด 100 บาท ค่า CNC 200 บาท รวมเป็นทั้งหมด 375 บาท

- แผ่นประลัษที่ใช้แผ่นสังกะสีผลิต ใช้ต้นทุนจากวัสดุแผ่นละ 75 บาท ค่าตัด 100 บาท ค่า CNC 200 บาท รวมเป็นทั้งหมด 375 บาท

3. ชุดทดสอบที่ใช้ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ใช้ค่าใช้จ่ายทั้งหมด ประมาณ 2,700 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 อุปกรณ์จริงเมื่อได้ทำการผลิต

จากการที่ได้ออกแบบและคำนวณแล้ว อุปกรณ์จริงที่ได้ผลิตมีลักษณะดังนี้

##### 1. ส่วนประตู



รูปที่ 4.15 ส่วนประตูเมื่อได้ทำการผลิตจริง 1



รูปที่ 4.16 ส่วนประตูเมื่อได้ทำการผลิตจริง 2

##### 2. ส่วนแผ่นประลัย

เมื่อได้ทำการผลิตจริงแล้วพบว่าในกรณีแผ่นสังกะสีนั้นผลิตออกมาแล้วมีรอยร้าว ซึ่งผู้จัดทำคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่มีระยะที่เหมาะสมของรอยบากที่ทำให้ความหนาที่เหลือของแผ่นสังกะสีนั้นเหลือน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แผ่นประลักษ์ที่ทำด้วยแผ่นพลาสติก ABS เมื่อได้ทำการผลิตจริง



รูปที่ 4.18 แผ่นประลักษ์ที่ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียม เมื่อได้ทำการผลิตจริง



รูปที่ 4.19 แผ่นประลักษ์ที่ทำด้วยแผ่นสังกะสี เมื่อได้ทำการผลิตจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดสอบ

#### 5.1 ชุดทดสอบที่ใช้

ใช้ชุดทดสอบความดันโดยใช้อากาศจากบ่อบลมที่อัดได้มากที่สุดถึง 7 bar แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ชุดทดสอบที่ใช้

#### 5.2 การเตรียมการทดสอบ

1. ทดสอบการรั่วของอุปกรณ์โดยการติดตั้งแผ่นเหล็กทดสอบรั่วที่ฝั่งหน้าแปลนของชุดทดลอง
2. เปิดบ่อบลม
3. พรมด้วยน้ำสบู่ในจุดที่อาจมีการรั่ว
4. สังเกตว่ามีการรั่วหรือไม่ หากมีการรั่ว ให้ทำการอุดรอยรั่วด้วยกาวอีพอกซี

#### 5.3 วิธีกาทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือการทดสอบการทำงานของประตู่ และการทำงานของแผ่นประลัย โดยลำดับวิธีการทดสอบเป็นดังนี้

1. ติดตั้งแผ่นประลัยที่ต้องการทดสอบเข้ากับหน้าแปลน
2. ปรับเครื่องควบคุมลม (Regulator) ของบ่อบลมให้ความดันเป็น 0

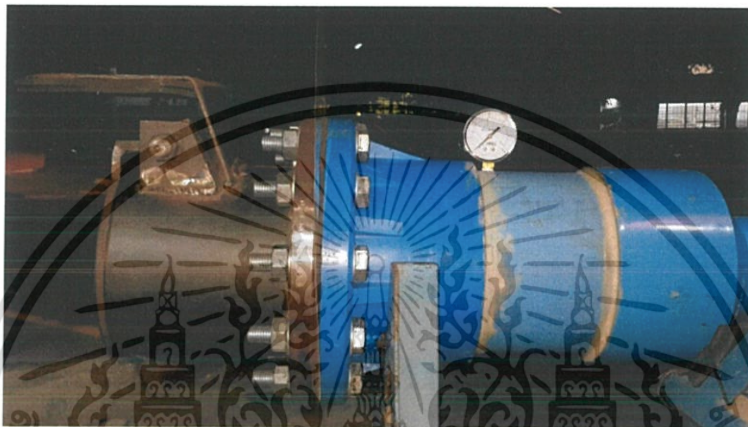
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ทำการบันทึกวีดีโอเพื่อบันทึกความดันในมาตรวัดความดัน และองศาที่ประตูปิดเมื่อต้องการทดสอบการทำงานของประตูปิด

4.เปิดวาล์วปั๊มลมเต็ม 100 %

5.ค่อย ๆ ปรับ regulator ของปั๊มลม พร้อมทั้งสังเกตมาตรวัดความดันของชุดทดลอง จนกระทั่งแผ่นประลัยแตก และทำการบันทึกผล

โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบถึงเพียงแค่ความดัน 1.3 บาร์ เพื่อให้การทดสอบมีความปลอดภัย



รูปที่ 5.2 การทดสอบการทำงานของประตูปิด



รูปที่ 5.3 การทดสอบการทำงานของแผ่นประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลการทดสอบ

5.4.1 แผ่นประลัษที่ทำจากพลาสติก ABS ความหนา 3 mm แตกที่ความดัน 0.9 bar

5.4.2 แผ่นประลัษที่ทำจากอลูมิเนียม ความหนา 1 mm ไม่แตกที่ความดัน 1.3 bar

5.4.3 การทำงานของประตูละบายแก๊ส

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบการทำงานของประตูละบายแก๊ส

ครั้งที่	ความดันที่แตก (bar)	เวลาที่ใช้เปิด (s)	เวลาที่ใช้ปิด (s)	องศาที่เปิด (°)
1	0.8	0.20	0.50	90
2	0.77	0.133	0.433	90
3	0.73	0.20	0.40	82
ค่าเฉลี่ย	0.77	0.18	0.44	87.3

จากผลการทดสอบการทำงานของแผ่นประลัษที่ทำจากพลาสติก ABS เมื่อนำไปเทียบกับมาตรฐาน ASME SECTION VIII 2017 Div.1 ในส่วน UG-133 ที่บอกว่าการออกแบบแผ่นประลัษที่เสียหายไม่เกิน 40 psi (2.7579 bar) จะต้องมีความคลาดเคลื่อนของความดันไม่เกิน  $\pm 2$  psi (0.1379 bar) ซึ่งแผ่นประลัษที่ทำจากพลาสติกเอบีเอส เมื่อทดลองพบว่าเสียหายที่ 0.9 บาร์ แต่ความดันที่ออกแบบให้แผ่นประลัษเสียหายคือ 0.75 บาร์ ดังนั้นแผ่นประลัษที่ออกแบบไม่สามารถทำงานตามมาตรฐานได้เนื่องจากไม่ได้อยู่ในช่วงของความดัน 0.61-0.88 บาร์ (0.75+0.1379 บาร์)

จากผลการทดสอบการทำงานของประตูละบายแก๊ส เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรอกแบบของประตูละบายแก๊สที่ใช้งานในอุตสาหกรรม [19] ซึ่งมีการแนะนำให้ใช้เวลาที่ใช้ปิดให้อยู่ในช่วง 5-30 s และหากเป็นไปได้ควรให้น้อยกว่า 5 s ทางผู้จัดทำจึงพิจารณาว่าการทำงานของประตูละบายแก๊สที่ได้ประดิษฐ์นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานกันทั่วไป ดังที่แสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การทดสอบการทำงานของประตูละบายแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาตามการสมมติฐานการเกิดขึ้นของการระเบิดในโซลจะพบว่าเราสามารถใช้ประตुरะบายแก๊สและแผ่นประลัยเพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากการระเบิดของฝุ่นได้

ในส่วนของการออกแบบและสร้างแผ่นประลัย จะพบว่ารูปแบบและการติดตั้งที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นประลัยคือรูปแบบในกรณีที่มี บากเพียงฝั่งเดียว และให้รับความดันในด้านเรียบเนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการผลิตมากกว่ากรณีอื่น และควรเลือกใช้แผ่นพลาสติก ABS เพื่อใช้ทำแผ่นประลัย เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการผลิตเมื่อเทียบกับแผ่นสังกะสี และจะทำให้เราสามารถกำหนดความดันที่จะระบายความดันออกได้แม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีอื่น

#### 6.2 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่พบสามารถแบ่งเป็นประเด็น ๆ ตามแต่ละส่วนของอุปกรณ์ได้ดังนี้

- ส่วนแผ่นประลัย

1. เนื่องจากในเบื้องต้นนั้น ทางผู้จัดทำต้องการผลิตแผ่นประลัยแต่ละชนิดวัสดุเพียงแค่ 4 แผ่น ทำให้ในการหาซื้อวัสดุนั้นทำได้ยาก เนื่องจากราคาแผ่นวัสดุเต็มั้นมีราคาสูงมาก และหากนำมาใช้ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเพราะจะเหลือเศษจำนวนมาก

2. แผ่นประลัยที่ใช้นั้นมีความซับซ้อนในการผลิตมาก ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงตามขึ้นไปด้วย และเมื่อบริษัทที่ทางผู้จัดทำได้ผลิตไปแล้วส่วนหนึ่ง มักจะขอไม่ผลิตต่อเนื่องจากการผลิตนั้นทำให้ดอกกัดเสียหายได้ อาจจะทำให้บริษัทที่รับไปผลิตขาดทุนหากยังคิดค่าใช้จ่ายตามเรทการบริการปกติ

3. พื้นผิวของแผ่นประลัยที่ได้จากการผลิตไม่เรียบตามที่ได้ออกแบบไว้ และความหนาของแผ่นที่ได้ยังไม่เสมอกันทั่วทั้งแผ่น

4. ค่าความดันที่ทำให้แผ่นประลัยบางชนิดไม่แตกเมื่อถึงความดันที่ได้ทำการ Numerical Simulation ไว้ และความดันที่แตกนั้นมีค่าไม่อยู่ในช่วงที่มาตรฐานได้กล่าวไว้

5. การใช้ Numerical Simulation นั้นมีข้อจำกัดในการตี mesh ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ อาจทำให้การจำลองความเค้นนั้นมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนชุดทดสอบ

1. เมื่อได้ใช้เครื่องทดสอบไปแล้วประมาณสัปดาห์หนึ่ง กาวอีพ็อกซี (epoxy) ที่เคยอุดรูรั่วได้ มีการเสื่อมสภาพทำให้มีการร่วเกิดขึ้นอีก

2. ความดันที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบนั้นอ่านได้ยาก เนื่องจากใช้เกจวัดความดันที่ไม่ได้เป็นเกจดิจิตอล อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าความดันนั้น ๆ ได้

3. การทดสอบการทำงานของแผ่นประลัยนั้นทำให้เกิดเสียงดัง อาจจะทำให้ผู้คนในบริเวณตกใจได้

4. การทดสอบความดันที่ทางคณะผู้จัดทำได้ดำเนินการนั้นมีลักษณะเป็นการอัดความดันด้วยลมซึ่งเมื่อแผ่นประลัยเสียรูป, ประตुरะบายเปิดออกและมีการระบายความดันออกไปแล้ว จะทำให้ความดันในท่อกลับไปเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งแตกต่างไปจากความดันที่เกิดจากการระเบิดจริงที่เมื่อมีการระบายความดันเกิดขึ้นแล้ว ความดันภายในอุปกรณ์จะยังเพิ่มขึ้นอยู่จนถึง  $P_{red}$  อาจจะทำให้ผลการทดสอบแตกต่างไปจากสภาพความดันจริง

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

ในแต่ละประเด็นปัญหาตามส่วนของอุปกรณ์นั้น ทางคณะผู้จัดทำมีความคิดเห็นที่จะเสนอแนะดังนี้ในการปรับปรุงหรือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

ส่วนแผ่นประลัย

1. เพื่อไม่ให้เหลือเศษวัสดุมากเกินไป ขณะที่ไปซื้อแผ่นวัสดุ เราควรจะถามบริษัทหรือร้านก่อนว่ามีเศษที่เหลือจากการตัดหรือไม่

2. เพื่อให้การผลิตดำเนินไปอย่างราบรื่นและให้แผ่นประลัยมีผิวเรียบ มีความจำเป็นต้องการวิธีการผลิตใหม่นอกจากวิธี CNC เช่น วิธีไส เป็นต้น

3. เพื่อให้การจำลองความเค้นโดยการทำ Numerical Simulation มีข้อผิดพลาดน้อยลง อาจใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้การตี mesh สามารถทำได้ละเอียดขึ้น

ส่วนชุดทดสอบ

1. เพื่อที่จะไม่ต้องเสียเวลากับการรอกาวอีพ็อกซีแห้งบ่อยครั้ง อาจใช้การเชื่อมพีวีซีเพื่ออุดรูรั่วที่อาจเกิดขึ้นแทน

2. เพื่อให้การอ่านค่าความดันสามารถอ่านได้แม่นยำมากขึ้น ทางคณะผู้จัดทำจะทำการบันทึกวิดีโอแล้วทำการอ่านค่าจากภาพแทน

3. เพื่อให้การเกิดเสียงดังไม่ไปรบกวนผู้คนในบริเวณนั้น อาจจะใช้การปิดหรือบริเวณที่ไม่มีผู้คนอยู่แทน

4. หากมีงบประมาณมากพอ เพื่อให้การทดสอบใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากที่สุด อาจใช้การทดสอบที่มีการระเบิดของฝุ่นจริง โดยการจ้างบริษัทให้ทดสอบอุปกรณ์ให้ เพื่อที่จะได้สามารถวัดค่าต่าง ๆ ได้เหมือนกรณีการทำงานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการจัดการความปลอดภัย โรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ธวิพัฒน์ จำกัด.
- [2] aalco. **Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 1050A H14 Sheet**. Retrieved December 4, 2018, from [http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet\\_57.ashx](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet_57.ashx).
- [3] American Galvanizers Association. **Zinc Metal Properties**. Retrieved December 3, 2018, from <https://galvanizeit.org/design-and-fabrication/design-considerations/zinc-metal-properties>.
- [4] CAO Weiguo, HUANG Liyuan, Editors. **Research on characteristic paramerters of Parameters of coal-dust explosion**. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China. 2012.
- [5] FLAMEIFSM. (2018, September 11). **Combustible Dust Explosions – A Risk in Your Workplace**. Retrieved November 7, 2018, from <http://www.flameifsm.com/combustible-dust-explosions-risk-workplace-by-flameifsm/>.
- [6] Marston. **Marston Explosion Vent Panels Technical Catalogue**. Wolverhampton, UK. 2012.
- [7] MatWeb. **Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded**. Retrieved December 4, 2018, from <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646&ckck=1>.
- [8] National Fire Protection Association. **NFPA654 Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids**. 1997 ed. Quincy, Massachusetts, USA. 1997.
- [9] National Fire Protection Association. **NFPA68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting**. 2007 ed. Quincy, Massachusetts, USA. 2007.
- [10] Pattaraporn Saetiew, Mitsuhiko Hata, Editors. **Characteristics of particles generated during combustion of biomass, lignite coal and cocombustion of lignite coal and biomass**. Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand. 2012.
- [11] PCAM. (2561). **ดอกกัดงานอลูมิเนียมและเหล็ก**. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2561. จาก <https://www.pcamcnc.com/product/ดอกกัดงานอลูมิเนียมและ-4/>.

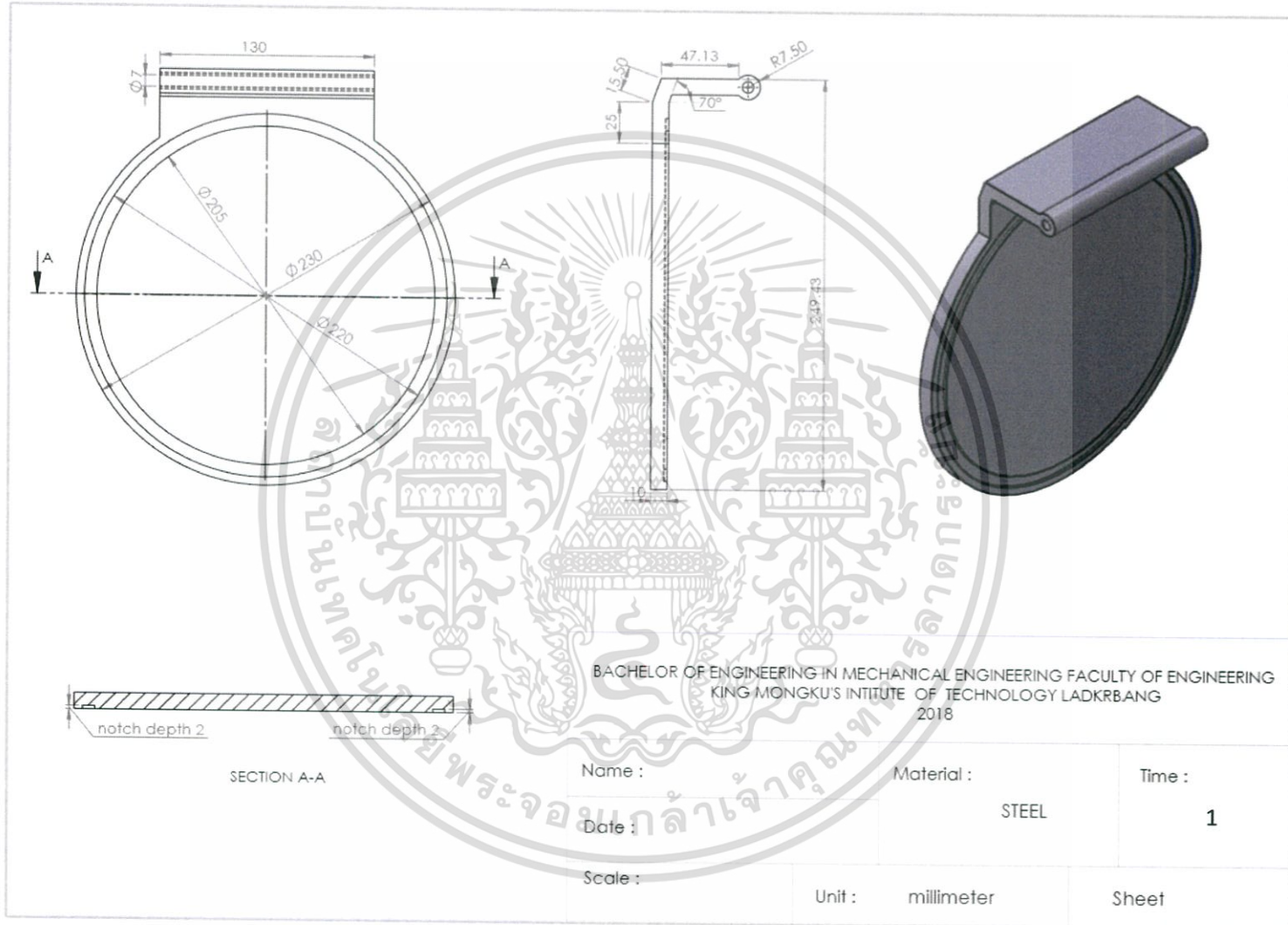
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

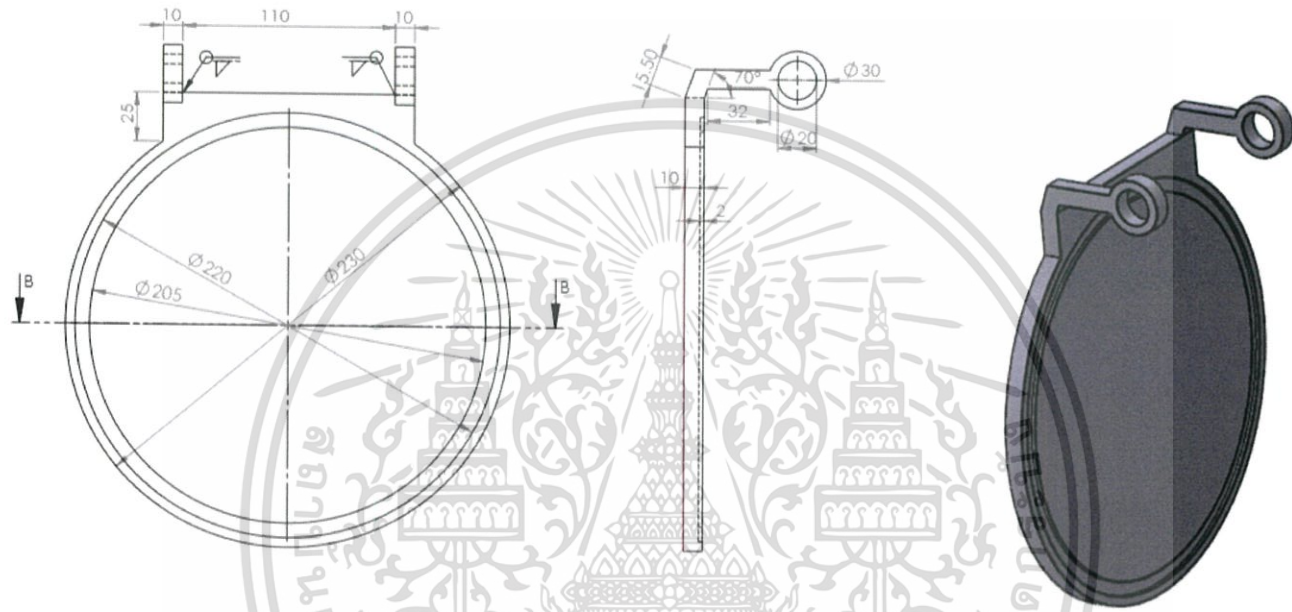
- [12] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. 2015. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10th ed. New York, USA. : McGraw-Hill Education.
- [13] R.M. HEADLEE. **Continental Disc**. Retrieved November 11,2018, from <http://www.rmheadlee.com/manufacturers/continental-disc/>.
- [14] R Nave. **Parallel Axis Theorem**. Retrieved November 17,2018 from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/parax.html>
- [15] Rolf K. Eckhoff. **Dust Explosions in the Process Industries**. 3rd ed. Houston,USA : Gulf Professional Publishing. 2003.
- [16] S. Bhattacharjee, M.H. Sazzad, Editors. **Effects of fire retardants on jute fiber reinforced polyvinylchloride/polypropylene hybrid composites**. Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Noakhali Science and Technology University, Noakhali, Bangladesh. 2013.
- [17] TESSA. **TT-Uni-K Circular Air Cushion Explosion Door**. Retrieved November 12,2018, from <https://www.tessa.eu/en/product/tt-uni-k-circular-air-cushion-explosion-door/>.
- [18] W.Z. Wan Sulaiman, R.M. Kasmani. **Explosibility Characteristics of Philippine Coal Dust**. Faculty of Petroleum and Renewable Energy Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia. 2014.
- [19] トム エイケレンベルフ, ハイド ドム. **Fully open type reclosable explosion vent apparatus**. Retrieved May 30,2019, from <https://patents.google.com/patent/JP4787332B2/en>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบบานประตู





SECTION B-B  
SCALE 1 : 2

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
2018

Name :

Material :

Time :

Date :

STEEL

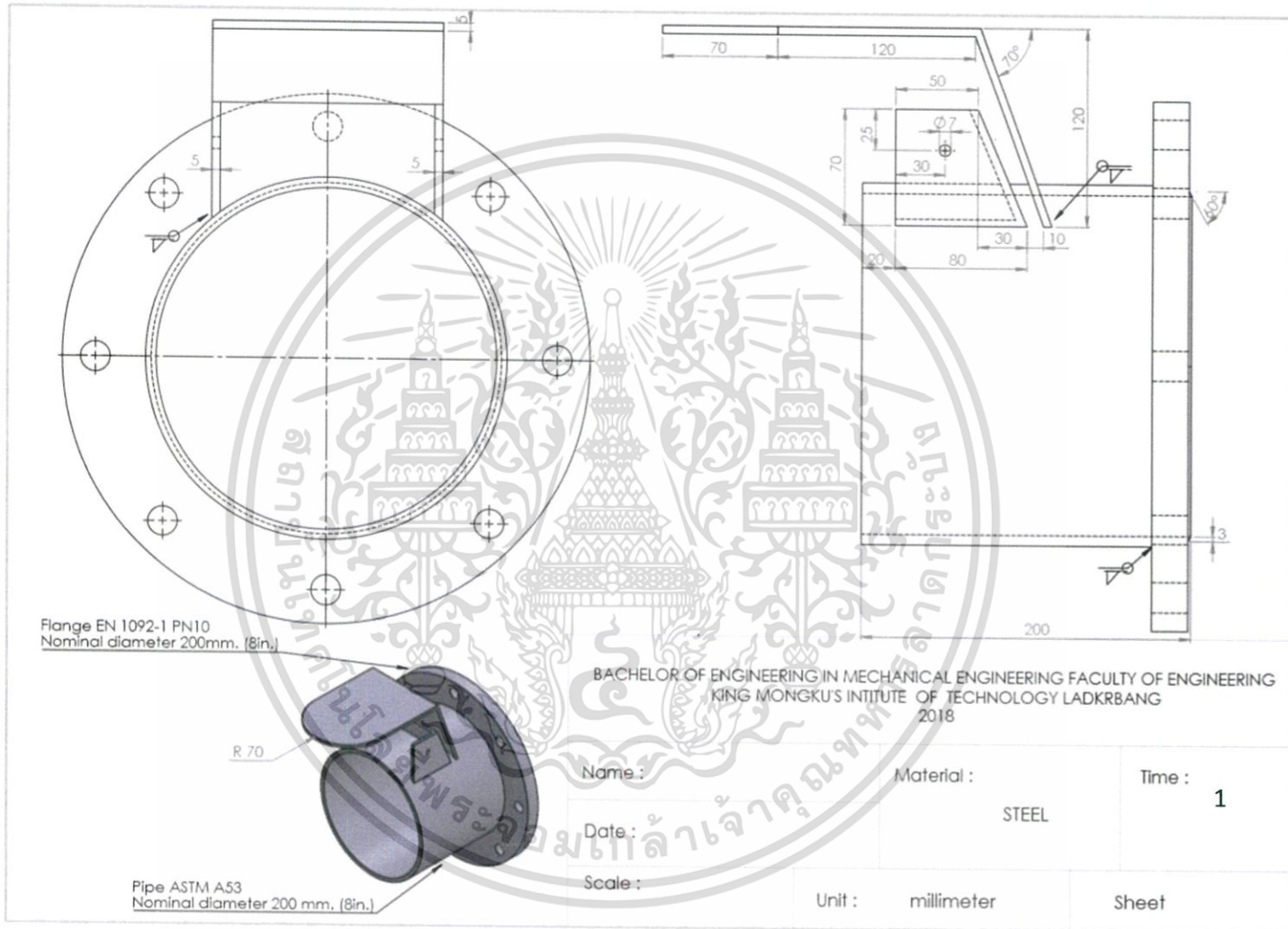
Scale :

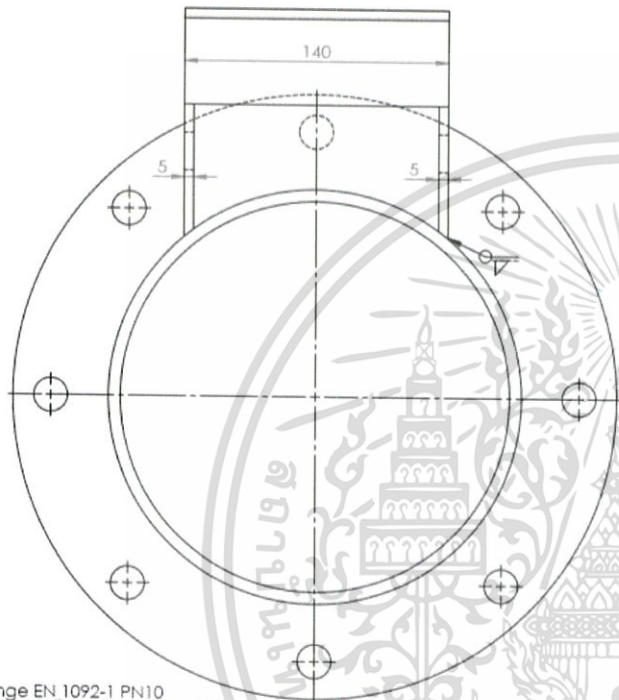
Unit : millimeter

Sheet

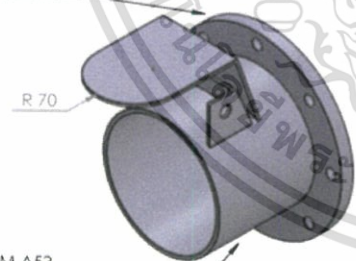
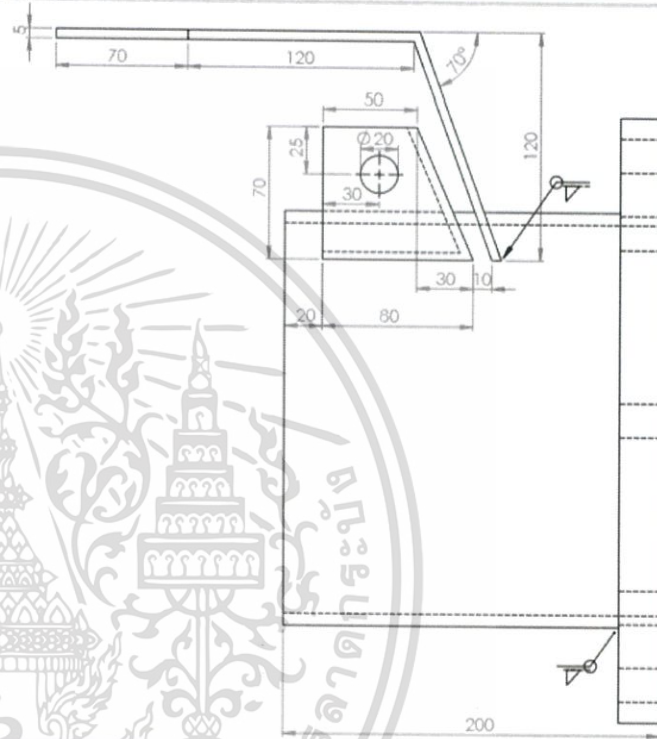
2

รูปแบบประตู





Flange EN 1092-1 PN10  
Nominal diameter 200mm.(8in.)



Pipe ASTM A53  
Nominal diameter 200mm.(8in.)

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
2018

Name :	Material :	Time :
Date :	STEEL	2
Scale :	Unit : millimeter	Sheet

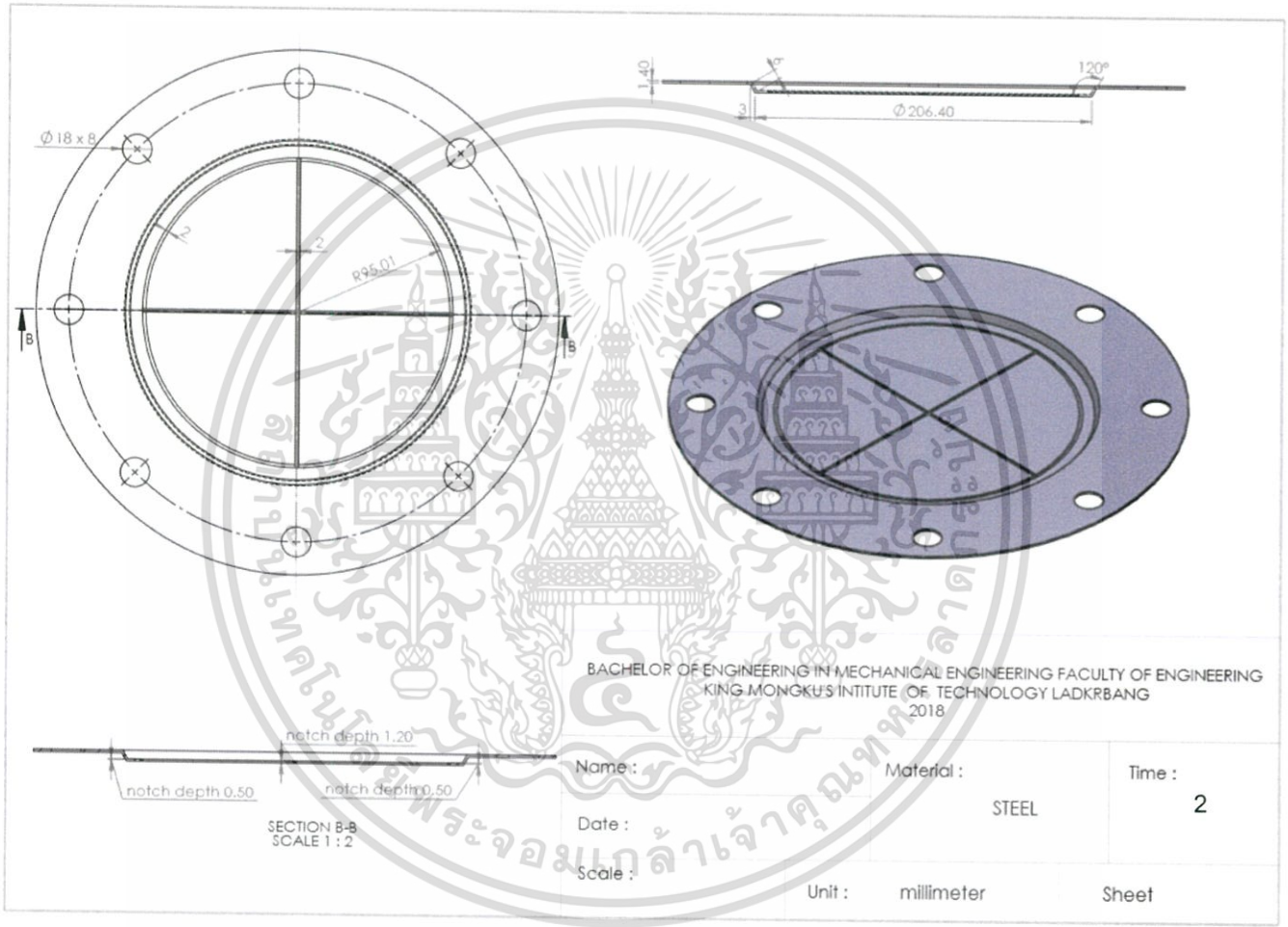
รูปแบบแผ่นประลัย

Technical drawing of a gasket plate. The top view shows an outer diameter of  $\Phi 280$ , an inner diameter of  $\Phi 180$ , and a thickness of 2. There are eight holes arranged in a circle, each with a diameter of  $\Phi 16 \times 8$ . A section line C-C is shown. The 3D view shows the plate with a central hole and eight outer holes.

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
2018

Name :	Material :	Time :
Date :	STEEL	1
Scale :	Unit : millimeter	Sheet

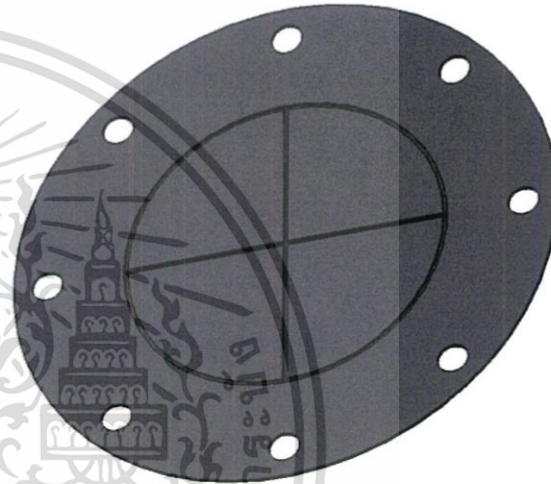
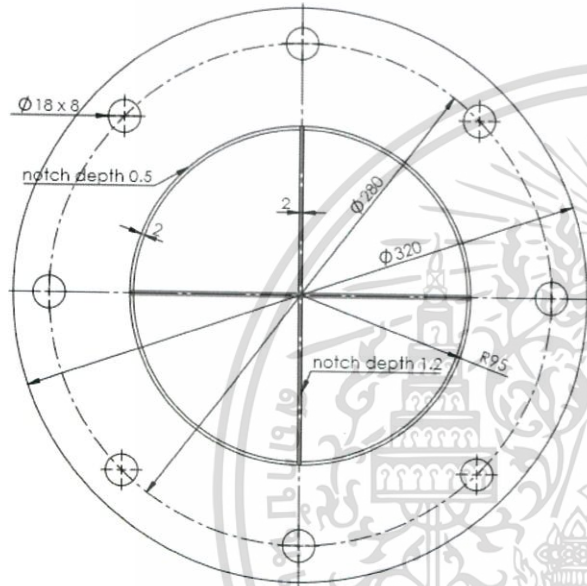
SECTION C-C  
SCALE 1 : 2



BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
 2018

Name :	Material :	Time :
Date :	STEEL	2
Scale :	Unit : millimeter	Sheet

notch depth 1.20  
 notch depth 0.50 notch depth 0.50  
 SECTION B-B  
 SCALE 1 : 2



STEEL AISI 1020



BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
 2018

Name :

Material :

Time :

Date :

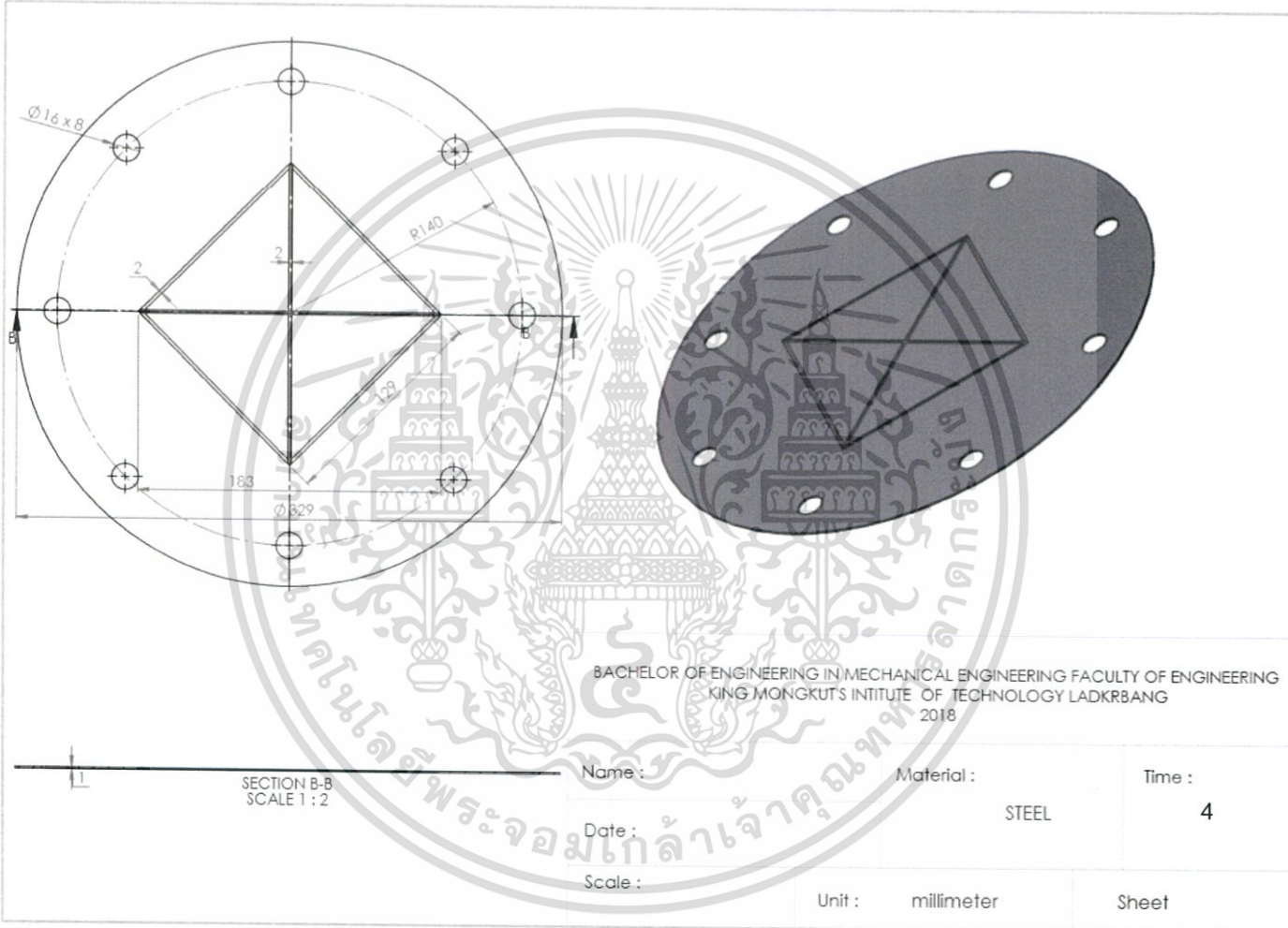
STEEL

3

Scale :

Unit : millimeter

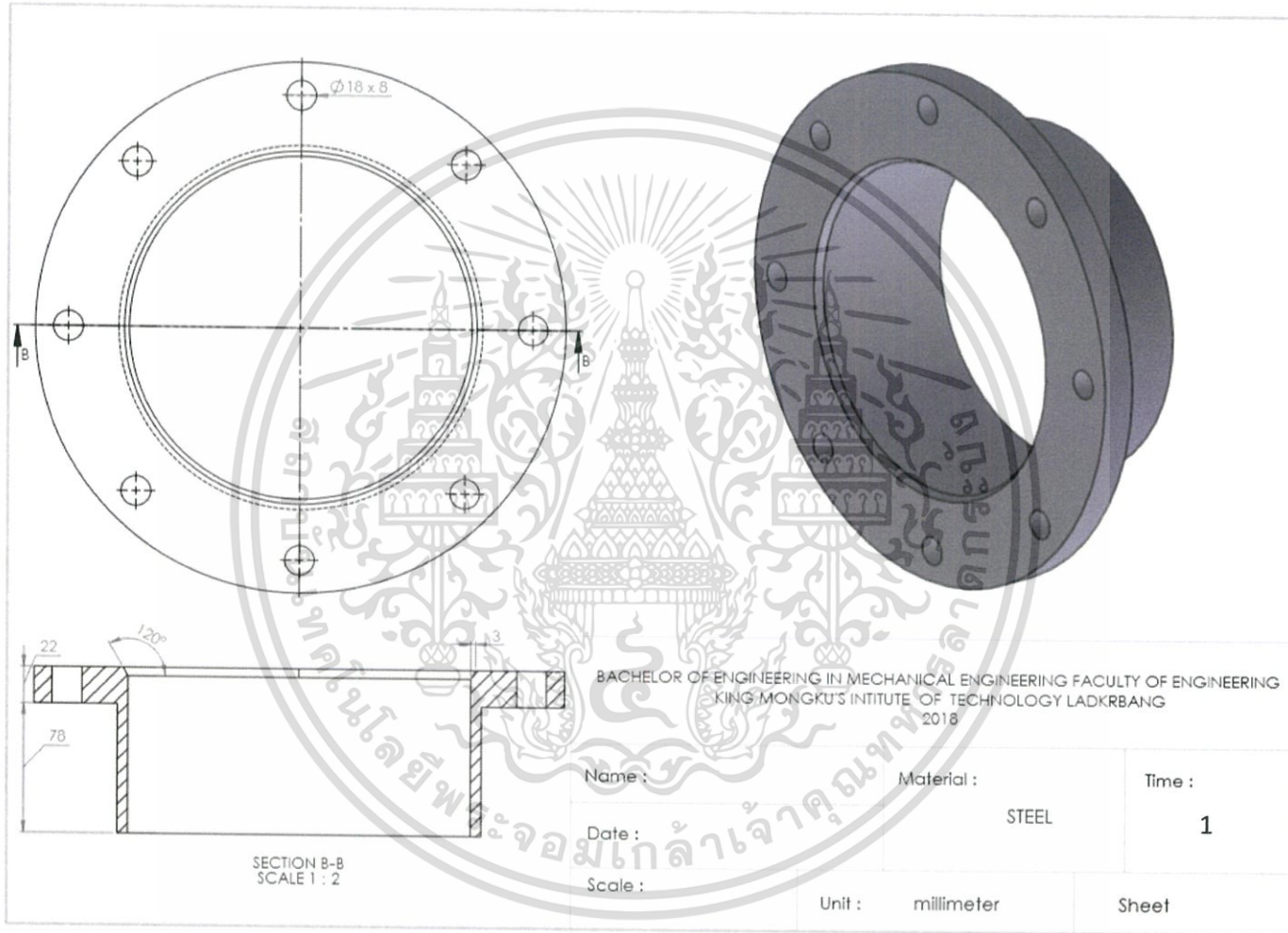
Sheet

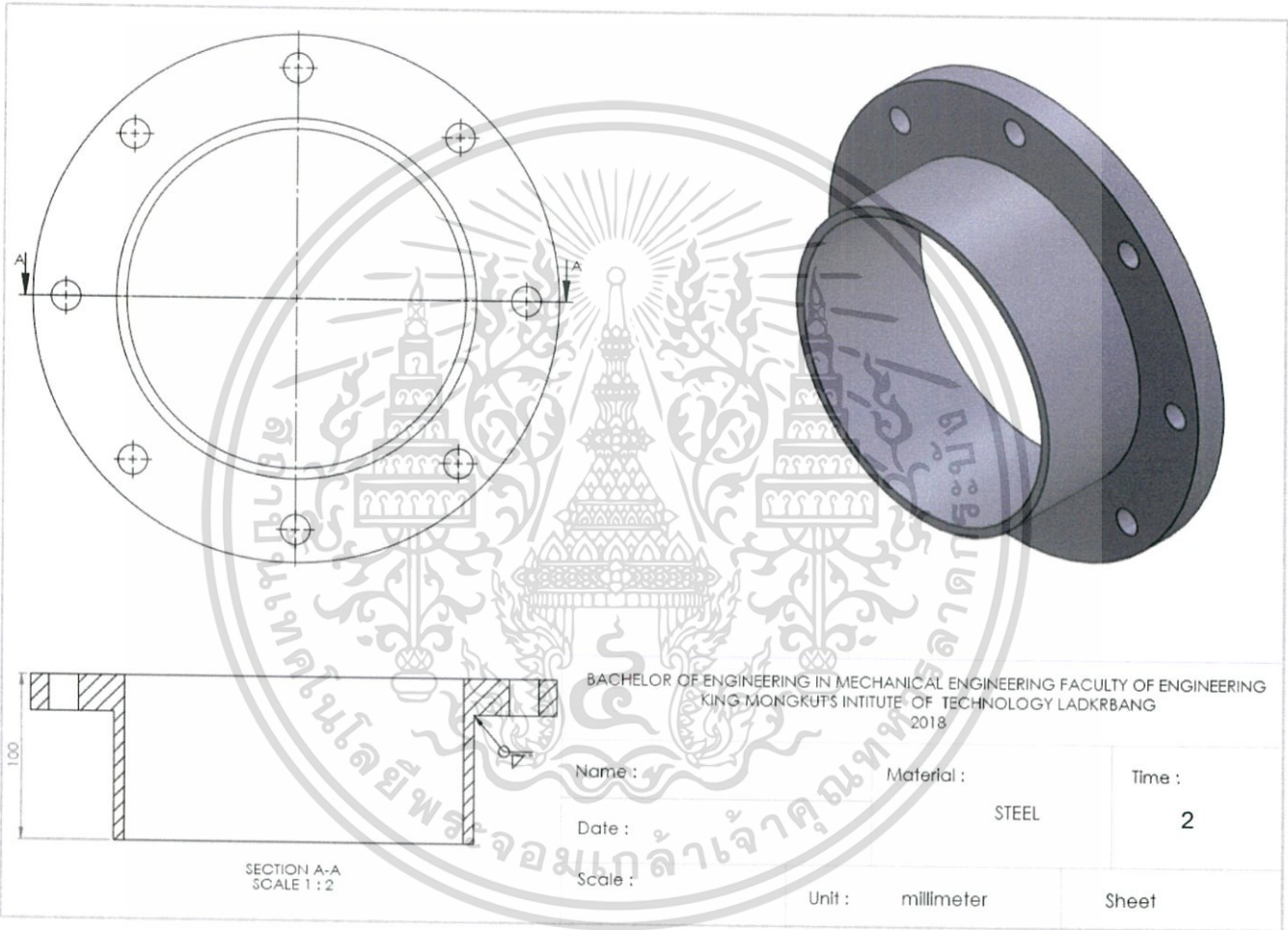


BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
 2018

SECTION B-B SCALE 1 : 2	Name :	Material :	Time :
	Date :	STEEL	4
Scale :	Unit : millimeter	Sheet	

รูปแบบของหน้าแปลน และท่อ





BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
 KING MONKGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
 2018

Name :

Material :

Time :

Date :

STEEL

2

Scale :

Unit : millimeter

Sheet

SECTION A-A  
 SCALE 1 : 2