รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

ความปลอดภัยในด้านการระเบิดของวัสดุอนุภาค

Safety Aspects Due to Explosion of Particulate Material

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน
ประจำปีงบประมาณ 2547

ร่าง

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

ความปลอดภัยในด้านการระเบิดของวัสดุอนุภาค

Safety Aspects Due to Explosion of Particulate Material

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน
ประจำปีงบประมาณ 2547

ใบรายระเอียดโครงงานวิจัย

1. หัวข้อเรื่องการวิจัย

   หัวข้อย่อย ภาษาไทย ความปลอดภัยในด้านการระเบิดของวัสดุอนุภาค

   ภาษาอังกฤษ Safety aspects due to explosion of particulate material

2. ชื่อผู้วิจัย

   2.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล

   ที่ทำงาน ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีอนุภาค ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
   โทร. 02-218-6894 โทรสาร 022-218-6877
   e-mail : ctawat@pioneer.chula.ac.th

   2.2 รองหัวหน้าโครงการ : รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์

   ที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
   โทร. 02-942-8839
   e-mail : fengsks@ku.ac.th

   2.3 ที่ปรึกษาโครงการ :

   2.3.1 Assoc. Prof. Dr. Ritsu Dobashi
   Dept. of Chemical System Engineering, Faculty of Engineering
   The University of TOKYO

   2.3.2 ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล
   ที่ทำงานศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีอนุภาค ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

   2.4 ผู้ช่วยวิจัย นางสาวฉันทมณี วังสะจันทานนท์

   ที่ทำงาน ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีอนุภาค ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

   2.5 องค์กรและบริษัทที่จะให้ความร่วมมือ บริษัท อุตสาหกรรมแป้งไทย จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ประเด็นความปลอดภัยในภาคอุตสาหกรรมเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจ นับตั้งแต่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุอนุภาคนั้นเป็นที่ยอมรับว่าเป็นจุดกำเนิดของหายนะภัยเนื่องจากการระเบิด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังคงมีข้อมูลของการศึกษาการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่ถูกเปิดเผยต่อสาธารณะแต่เพียงจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนารวมทั้งประเทศไทย เนื่องจากการขาดแคลนอุปกรณ์ทดสอบการระเบิดมาตรฐานซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การวัดค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{MAX}) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{MAX}$ ของวัสดุอนุภาคมาตรฐาน และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่มีต่อค่า P_{MAX} และ $(dP/dt)_{MAX}$ โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาและปรับปรุงในศูนย์ฯ

จากผลการวิจัยโดยอาศัยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าเวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิดที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิวินาที จากการทดสอบซึ่งอ้างอิงโดยใช้อนุภาคมาตรฐาน 2 ชนิด (lycopodium และ nicotinic acid) พบว่าค่า P_{MAX} และ $(dP/dt)_{MAX}$ ที่ได้จากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับที่มีตีพิมพ์ในต่างประเทศ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์แบบที่พัฒนาสำหรับทดสอบสมบัติการระเบิดวัสดุอนุภาคที่สร้างขึ้นนี้ให้ค่าน่าเชื่อถือเพียงพอในการวัดต่อไป ภายหลังการปรับแต่งและสอบเทียบด้วยอนุภาคมาตรฐาน นอกจากนี้การทดลองหลังจากปรับค่าที่เหมาะสมชี้ให้เห็นว่าค่า P_{MAX} และ $(dP/dt)_{MAX}$ จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของหมอกฝุ่นที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นค่าหนึ่งจากนั้นมีค่าลดลง สำหรับอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่าค่า P_{MAX} และ $(dP/dt)_{MAX}$ มีค่ามากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่
เลขทะเบียน 013595
วัน, เดือน, ปี 16 N.A. 51

Abstract

Safety aspects in industrial sections has become an interesting issue since the era of industrial revolution. Especially, particulate matter has been recognized as a potential source of explosive disaster. However, these have been very limited investigation results which are thoroughly revealed to the public because many developing countries including Thailand have suffered with shortage of standard explosibility testing equipment which very expensive. Therefore objectives of this research are set to develop a prototype of a dust explosibility tester, to measure the maximum pressure (P_{MAX}) and the maximum rate of pressure rise $(dP/dt)_{MAX}$ of standard particle and to look into effect of the average particle size of dust sample on the P_{MAX} and $(dP/dt)_{MAX}$ values using a prototype equipment which is developed and improved in center of excellence in Particle Technology.

Experimental results of this research showed the optimum delay times in ignition should be 20 millisecond. Then experimental investigations using two types of standard particle (lycopodium and nicotinic acid) revealed that the obtained P_{MAX} and $(dP/dt)_{MAX}$ values were consistent with the published data. Therefore it could be concluded that the prototype dust explosibility tester developed by the research work is reliable enough to use for other measurement after undergoing adjustment and calibration. Other results of experiments conducted after verification revealed that the P_{MAX} and the $(dP/dt)_{MAX}$ values increased with an increase in the concentration of particulate material until it reached a maximum then decreased with further increasing concentration. For the effect of nominal particle size, it was found that the P_{MAX} and the $(dP/dt)_{MAX}$ values increased with a decrease in the nominal average particle size.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยความร่วมมือระหว่างภาครัฐ-เอกชน (งบประมาณแผ่นดิน) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้ดำเนินการในศูนย์เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีอนุภาค ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการพัฒนาเครื่องวัดคุณสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค โครงงานนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ หากปราศจากความร่วมมือของบริษัทอุตสาหกรรมแป้งไทย จำกัด ดังนั้นในนามของคณะวิจัยจึงขอแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

พร้อมกันนี้ คณะวิจัยยังขอขอบคุณการสนับสนุนบางส่วนจากโครงการเมธีวิจัยอาวุโส (ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล) ของสำนักงานส่งเสริมการวิจัย (สกว.) และ Assoc. Prof. Dr. Ristu Dobashi ซึ่งเป็นรองศาสตราจารย์ของ Department of System Engineering, Faculty of Engineering The University of TOKYO ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ มา ณ ที่นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญภาพ		ญ
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
	1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
	1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย	3
	1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	4
2	การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
	2.1 หลักการของการระเบิดวัสดุอนุภาค	6
	2.1.1 ปรากฏการณ์การระเบิดวัสดุอนุภาค	6
	2.1.2 วัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาคได้	7
	2.1.3 ขอบเขตการระเบิดได้ของวัสดุอนุภาค	10
	2.1.4 แหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาค	14
	2.2 การทดสอบความไวต่อการจุดชนวนของอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ	22
	2.2.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้	22
	2.2.2 อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวน	25
	2.2.3 พลังงานต่ำสุดในการจุดชนวน	27
	2.2.4 ขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจน	29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	2.3 การทดสอบความรุนแรงของการระเบิดอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ	30
	2.3.1 ความดันสูงสุดของการระเบิด (Maximum Explosion Pressure, P_{max})	30
	2.3.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure rise, $(dP/dt)_{max}$	31
	2.3.3 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร	32
	2.3.4 นิยามค่าความดันและการปรับแก้ค่าความดันจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร	35
	2.3.5 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร	37
	2.4 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความดันการระเบิดของวัสดุอนุภาค	41
	2.4.1 ผลของขนาดอนุภาค	41
	2.4.2 ผลของความชื้น	41
	2.4.3 ผลของอุณหภูมิ	42
	2.4.4 ผลของความดันเริ่มต้น	43
	2.4.5 ผลของความปั่นป่วน	46
	2.4.6 พลังงานของการจุดระเบิด	48
	2.5 การกำหนดขนาดช่องระบายแรงดันจากการระเบิดในกระบวนการอุตสาหกรรม	50
	2.5.1 ช่องระบายแรงดันจากการระเบิด	51
	2.5.2 ท่อดับเปลวไฟจากการระเบิด	54
	2.5.3 วิธีกำหนดขนาดช่องระบายแรงดัน	55
	2.5.4 ทฤษฎีการระบายแรงดันจากการระบิดอนุภาค	60
	2.6 ข้อมูลในอดีตเกี่ยวกับอุบัติเหตุจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค	67
	2.6.1 อุบัติเหตุการระเบิดวัสดุอนุภาคในอุตสาหกรรมเกษตร	67
	2.6.2 อุบัติเหตุการระเบิดวัสดุอนุภาคในเหมืองถ่านหิน	71
	2.7 งานวิจัยและพัฒนาที่มีการรายงานในอดีต	72
3	การพัฒนาสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	75
	3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	75
	3.1.1 ส่วนห้องจุดระเบิด	76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.1.2 ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค	82
	3.2 ชุดควบคุมและวัดแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	88
	3.2.1 ชุดควบคุมในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง	88
	3.2.2 ชุดวัดแรงดันจากการระเบิด	92
	3.2.3 ชุดรีเลย์ควบคุมปั๊ม หม้อแปลง และโซลินอยวาล์ว	93
	3.2.4 สวิทช์ควบคุมการจ่ายไฟสู่ชุดทดลอง	95
	3.3 โปรแกรมควบคุมและประมวลค่าแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	96
	3.3.1 การเริ่มต้นตั้งค่าสภาวะการทดลอง	96
	3.3.2 การตั้งช่วงเวลาในการทดลอง	98
	3.3.3 การบันทึกข้อมูลหลักของการทดลอง	99
	3.3.4 การตั้งค่าช่องรับสัญญาณควบคุม	100
	3.3.5 การทดสอบ	100
	3.3.6 การแสดงผลการทดสอบ	102
	3.3.7 การออกจากโปรแกรม	102
4	วิธีทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ	105
	4.1 สภาวะในการทดสอบ	105
	4.1.1 บรรยากาศขณะทำการทดลอง	105
	4.1.2 การตรวจสอบอุปกรณ์	105
	4.2 การเตรียมก่อนการทดสอบ	105
	4.3 การทดสอบขั้นต้น	108
	4.3.1 การทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสม	108
	4.3.2 การทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียว	110
	4.4 การวัดค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, P_{max}) และอัตราการสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$)	111
	4.4.1 การทดลองหาแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum explosion overpressure, P_{ex})	111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	4.4.2 การทดลองหาอัตราของการเพิ่มความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Rate of Pressure Rise with Time, dP/dt)	114
	4.4.3 การทดลองหาแรงดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, P_{max})	115
	4.4.4 การทดลองหาอัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$) และ K_{St}max	116
	4.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{max}) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$	117
	4.5.1 อิทธิพลของเวลาหน่วงของการจุดชนวนระเบิด (Ignition delay time; tv)	117
	4.5.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาค	118
	4.5.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากการทดลองกับค่ามาตรฐาน	118
	4.6 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของข้อมูลการทดลอง	
	4.6.1 ความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (P_{max})	118
	4.6.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิดวัสดุอนุภาค ($(dP/dt)_{max}$) และ K_{St}	119
	4.7 การตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง	119
5	ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	120
	5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ	120
	5.1.1 ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด	120
	5.1.2 ความดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนระเบิด	122
	5.1.3 เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิด (tv)	123
	5.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$	125
	5.2.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max}	125
	5.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $(dP/dt)_{max}$	126
	5.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน	126
	5.3.1 อนุภาคมาตรฐานไลโคโพเดียม	127
	5.3.2 อนุภาคมาตรฐานนิโคตินิกแอซิก	127

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	5.4 ผลของความเข้มข้นต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$	129
	5.4.1 ผลของความเข้มข้นต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด	129
	5.4.2 ผลของความเข้มข้นต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน	129
	5.5 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง	130
6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	131
	6.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ	131
	6.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$	131
	6.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน	132
	6.4 ผลของความเข้มข้นต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$	132
	6.5 แนวทางพื้นฐานในการป้องกันอันตรายของการระเบิดของอนุภาคของวัสดุประเภทฝุ่นผง	132
	6.6 ข้อเสนอแนะ	132
เอกสารอ้างอิง		133
ภาคผนวก		135

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 Hazard Class of Dust Deflagration ค่าในตารางเป็นค่าโดยประมาณ เมื่อทดสอบในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ตามมาตรฐาน ATM E1226	5
ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (ออกซิเดชัน) สารชนิดต่างๆ ต่อ 1 โมล ออกซิเจนที่ถูกใช้ไป	8
ตารางที่ 2.2 ค่าพลังงานการสปาร์คมากสุดทางทฤษฎีและค่าความจุไฟฟ้าโดยประมาณของวัสดุนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ	19
ตารางที่ 2.3 ภาพรวมของการป้องกันและบรรเทาการระเบิดของวัสดุอนุภาค	50
ตารางที่ 2.4 พื้นที่ช่องระบายที่ต้องการเมื่อใช้วิธีกำหนดสัดส่วนช่องระบาย	55
ตารางที่ 2.5 แหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)	69
ตารางที่ 2.6 บริเวณที่เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)	69
ตารางที่ 4.1 ค่าความเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้ของ dP/dt และ K_{St}	119
ตารางที่ 5.1 การวัดค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดก่อนการสปาร์คของขั้วอิเล็กโทรด	121
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ของไลโคโพเดียมจากการทดลองกับค่ามาตรฐาน	127
ตารางที่ 5.3 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	130

ตารางภาคผนวก	หน้า
ตารางภาคผนวกที่ 1 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ เปลือกข้าวจากการสีข้าว (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	136
ตารางภาคผนวกที่ 2 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ ครีมเทียม C (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	137
ตารางภาคผนวกที่ 3 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของแป้งมันสำปะหลัง (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	138

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะอัตราการเผาไหม้ของของแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อของแข็งนั้นมีขนาดเล็กลง 7

รูปที่ 2.2 ช่วงความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดในอากาศที่สามารถเกิดการระเบิดได้ 10

รูปที่ 2.3 อนุภาคทรงลูกบาศก์ขนาด x เรียงในอากาศให้ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางอนุภาคเท่ากัน 11

รูปที่ 2.4 หมอกฝุ่นถ่านหินเข้มข้น 40 กรัม/ลบ.เมตร มีความหนาแน่นจนยากที่จะมองเห็นแสงจากหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ ในระยะห่าง 2 เมตร 12

รูปที่ 2.5 การเกิดคลื่นแรงดันของการระเบิดขั้นปฐมภูมิทำให้เกิดการฟุ้งของชั้นอนุภาคนำมาซึ่งการระเบิดขั้นทุติยภูมิ 13

รูปที่ 2.6 smouldering nest ของอนุภาคในไซโลอาจทำให้เกิดการระเบิดได้เมื่อถูกพาไปในหมอกฝุ่นที่สามารถระเบิดได้ 14

รูปที่ 2.7 อนุภาคที่กองอยู่ภายในท่อสามารถลุกไหม้ได้จากความร้อนของผนังท่อจากภายนอก 15

รูปที่ 2.8 ลักษณะการสปาร์คเมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหลกะทันหันและ ณ จุดนั้นเกิดการแยกตัวด้วยความเร็วสูง 17

รูปที่ 2.9 สภาวะที่อาจเกิดการระเบิดอนุภาคจากการปลดปล่อยพลังงานสปาร์คของไฟฟ้าสถิต 18

รูปที่ 2.10 ลักษณะที่อาจเกิดการระเบิดในการขนส่งอนุภาคด้วย propagation brush discharges 20

รูปที่ 2.11 กราฟแท่งเปรียบเทียบช่วงของการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ กับช่วงพลังงานที่ทำให้เกิดการระเบิดในก๊าซ/ไอผสม และอนุภาคในอากาศ 21

รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 1.2 ลิตร แบบ Hartmann tube 23

รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 20 ลิตร ของ US Bureau of Mines 24

รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 20 ลิตร ของ US Bureau of Mines 24

รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 15 ลิตร พัฒนาโดย Nordtest 25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.16 Godbert-Greenwald furnace 26

รูปที่ 2.17 BAM furnace 27

รูปที่ 2.18 วงจรของการจุดชนวน 3 แบบเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวน 28

รูปที่ 2.19 ผลการทดลองค่าความดันจากการระเบิดอนุภาคที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง 30

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเข้มข้นค่าต่างๆ ของวัสดุอนุภาค 40

รูปที่ 2.21 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตรพัฒนาโดย Siwek 32

รูปที่ 2.22 หัวฉีดแบบใหม่ rebound nozzle สำหรับกระจายอนุภาคภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร 33

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบ1 m^3 ISO vessel และ 20 litre Siwek sphere 34

รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการระเบิด (P_{ex}) และ เวลาของการระเบิดวัสดุอนุภาคภายในเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร 36

รูปที่ 2.25 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐาน ISO 38

รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ประกอบด้วยฝาครึ่งวงกลมประกบติดกันและสามารถถอดออกจากกันได้ 39

รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) 41

รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) 42

รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของหมอกฝุ่นกับความดันสูงสุดจากการระเบิด 43

รูปที่ 2.30 ข้อมูลการทดลองของ Wiemann (1987) ค่าความดันจากการระเบิดถ่านหินสีน้ำตาลที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ทดสอบในเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ที่ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ 44

รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะปริมาตรคงที่กับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Bartknecht 1978, Walther and Schacker 1986 45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของอัตราสูงสุดของการเพิ่มดันจากการระเบิดอนุภาคโพลิเมอร์และถ่านหินสีน้ำตาลในภาชนะทดสอบปริมาตรคงที่ 1 ลบ.ม. และ 20 ลิตร กับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987 45
รูปที่ 2.33 อิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่ออัตราการระเบิดของหมอกฝุ่นไลโคโพเดียมเข้มข้น 420 กรัม/ลบ.ม.ในเครื่องสอบปริมาตร 1.2 ลิตร (Hartmann bomb) 47
รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน 48
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน 49
รูปที่ 2.36 หลักพื้นฐานของการระบายแรงดันจากการระเบิด จะได้ความดันสูงสุดที่ภาชนะทนแรงดันจากการระเบิดนั้นได้ (P_{red}) 51
รูปที่ 2.37 แผ่นระบายแรงดันจากการระเบิดก่อนและหลังการใช้งาน 52
รูปที่ 2.38 แผ่นระบายแรงดันจากการระเบิดแบบต่างๆ 53
รูปที่ 2.39 ประตูบานพับระบายแรงดันจากการระเบิดติดตั้งที่ไซโลเก็บอนุภาคหลังเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาคประตูจะเปิดออก 53
รูปที่ 2.40 ประตูบานพับป้องกันการระเบิดจะปิดลงตามแรงโน้มถ่วงหลังเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาค 54
รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องระบายแรงดันและปริมาตรภาชนะ คำนวณด้วยวิธีสัดส่วนช่องระบาย 56
รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ระบายและความดันสูงสุดจากการระเบิดของแป้งและเมล็ดพืชในถังลูกบาศก์ขนาด 2.8 ลบ.ม.ที่มีช่องระบายเป็นแบบประตูบานพับโลหะทดลองโดย Brown และ Hanson เปรียบเทียบผลของ Lunn 57
รูปที่ 2.43 ตัวอย่างโมโนกราฟในการหาพื้นที่ของช่องระบายอากาศ 58
รูปที่ 2.44 แบบจำลองของการระบายแรงดันจากการระเบิดของโนมูระและทานากะ 63
รูปที่ 2.45 การประมาณทางคณิตศาสตร์ของรูปกราฟอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดที่ไม่มีช่องระบายแรงดันตามทฤษฎีของอูรอล 66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.46 อุบัติเหตุการระเบิดในไซโลที่เมือง Blaye ปี 1997 68

รูปที่ 2.47 การสะสมของอนุภาคด้านล่างของลิฟท์ลำเลียง 70

รูปที่ 2.48 อุบัติเหตุการระเบิดของเมล็ดพืชในลิฟท์ลำเลียง 70

รูปที่ 2.49 กระบวนการบดและการจัดเก็บถ่านหินอย่างง่าย 71

รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร 76

รูปที่ 3.2 ห้องจุดระเบิดทรงกลมปริมาตร 20 ลิตร ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา) 77

รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าพร้อมฝาปิดของห้องจุดระเบิด 78

รูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด 78

รูปที่ 3.5 ปลายขั้วอิเล็กโทรดลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลม 79

รูปที่ 3.6 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด 80

รูปที่ 3.7 หน้าแปลนติดตั้งชุดหัววัดแรงดันจากการจุดระเบิดที่ผนังของห้องจุดระเบิด 81

รูปที่ 3.8 ฐานและแท่นรองรับเครื่องทดสอบ 82

รูปที่ 3.9 โซลินอยวาล์วจ่ายลมอัดให้วาล์วทรงกระบอก 83

รูปที่ 3.10 วาล์วทรงกระบอกสำหรับถ่ายเทอนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ห้องจุดระเบิด 85

รูปที่ 3.11 แผ่นกระจายอนุภาค 86

รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายห้องจุดระเบิดขนาด 20 ลิตร พร้อมฐานและอุปกรณ์ต่อพ่วง 86

รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายชุดเครื่องมือทดสอบวัดแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ 87

รูปที่ 3.14 แผนภาพลำดับการรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องทดสอบและคอมพิวเตอร์ 88

รูปที่ 3.15 แผนภาพการต่อเชื่อมอุปกรณ์ควบคุมและวัดแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิด 90

รูปที่ 3.16 A/D Converter card รุ่น PCI 1711 พร้อมสายสัญญาณ 91

รูปที่ 3.17 ตำแหน่งของการรับส่งสัญญาณที่หัวสายสัญญาณ (ซ้าย) และแผงเชื่อมสายสัญญาณจากหัวส่งสัญญาณ (ขวา) 91

รูปที่ 3.18 ตู้ควบคุมประกอบด้วยรีเลย์รุ่น G5v-1 แรงดันคอยล์ 5 VDC 30 mA แรงดันหน้าสัมผัส 0.5 A 125 VAC หม้อแปลงไฟฟ้า และสวิทช์ไฟฟ้าที่จ่ายไฟเข้าสู่ชุดทดลอง 94

รูปที่ 3.19 หน้าแรกของโปรแกรมควบคุมเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค 96

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.20 หน้าโปรแกรมเริ่มต้นบันทึกข้อมูลสำหรับการทดลองใหม่ 97

รูปที่ 3.21 หน้าโปรแกรมแสดงข้อมูลเก่าเพื่อเลือกมาทดลองใหม่อีกครั้ง 97

รูปที่ 3.22 หน้าโปรแกรมสำหรับตั้งเวลาในการทดลอง 98

รูปที่ 3.23 หน้าโปรแกรมสำหรับบันทึกฐานข้อมูลของการทดลอง 99

รูปที่ 3.24 หน้าโปรแกรมสำหรับกำหนดตำแหน่งการต่อช่องสัญญาณวัดและควบคุม 100

รูปที่ 3.25 หน้าโปรแกรมสำหรับการทดสอบขณะดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิด 101

รูปที่ 3.26 หน้าโปรแกรมสำหรับการทดสอบขณะจุดชนวนแล้วการระเบิดของวัสดุ 101

รูปที่ 3.27 หน้าโปรแกรมแสดงค่าความดันแตกต่างกับเวลาจากการทดสอบ 102

รูปที่ 3.28 กราฟการทดลองเมื่อแปลงเป็นไฟล์เอ็กเซล 103

รูปที่ 3.29 รายงานการทดลองความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค 103

รูปที่ 3.30 หน้าโปรแกรมเรียกกราฟของการทดลองเก่าตามลำดับโค้ดของการทดลอง 104

รูปที่ 4.1 การใส่สารจุดชนวนระเบิดที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด 107

รูปที่ 4.2 เครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ 108

รูปที่ 4.3 หน้าโปรแกรมออกจากเมนู "Test" เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง 113

รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดลองแสดงความดันจากการระเบิด (P_{ex}) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อแสดงค่าตัวแปรของการทดลองและตัวแปรของผลการทดลอง 114

รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาของสารชนวนจุดระเบิดและวัสดุอนุภาค 115

รูปที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าความดันจากการระเบิดของไลโคโพเดียม เทียบกับกราฟมาตรฐาน 122

รูปที่ 5.2 ผลของ tv ต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด 123

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อ tv เท่ากับ 20 มิลลิวินาที 124

รูปที่ 5.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด 125

รูปที่ 5.5 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน 126

รูปที่ 5.6 ค่า P_{max} ของนิโคตินิกแอซิดจากการทดลอง 128

รูปที่ 5.7 ค่า $(dP/dt)_{max}$ ของนิโคตินิกแอซิดจากการทดลอง 128

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อพิจารณาข้อมูลอุบัติภัยที่มีการรายงานในสื่อต่างๆ จะพบเห็นว่าวัสดุอนุภาคระเบิดเป็นอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเกิดขึ้นเป็นระยะๆ โดยเฉพาะในโรงงานที่ปฏิบัติงานกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาคหรือผงซึ่งได้แก่อุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ต่อไปนี้ คือ ผลิตสารเคมี สีผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงเลื่อยและผลิตภัณฑ์ไม้ เภสัช โลหะ ยางพารา พลาสติก รวมทั้งเหมืองถ่านหิน เสรี นันทิวัชรินทร์ (2530) รายงานว่ามีสถิติของประเทศอุตสาหกรรมในต่างประเทศ เช่น อังกฤษ ปรากฏว่าทุกปีจะมีอุบัติเหตุวัสดุอนุภาคระเบิดเกิดขึ้น 30-50 ราย และนับวันอุบัติเหตุนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมนุษย์กำลังคิดค้นประดิษฐ์สังเคราะห์สารต่างๆ ในรูปของวัสดุอนุภาคหรือผงนานาชนิดให้มากขึ้นตามความเจริญทางเทคโนโลยี และวัตถุประสงค์การนำมาใช้ประโยชน์ แม้ว่าในประเทศไทย จะยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับสถิติการระเบิดของวัสดุอนุภาคอย่างเป็นระบบ แต่ก็ได้ทราบจากข่าวต่างๆ และจากบุคคลที่ทำงานในวงการอุตสาหกรรม ว่ามีอุบัติเหตุประเภทนี้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2545 บริษัท แป้งมันราชสีมา จำกัด มีอุบัติเหตุ การระเบิดของแป้งมันที่ขนถ่ายในท่อ มีผู้เสียชีวิต 1 ราย และบาดเจ็บ 6 ราย ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง คือ ผู้ปฏิบัติงานจำนวนไม่น้อยในโรงงานอุตสาหกรรมของไทยไม่ทราบว่าวัสดุอนุภาคที่มีอยู่ในโรงงานของตนเองสามารถระเบิดได้ในเงื่อนไขที่เหมาะสม

สาเหตุของการระเบิดของวัสดุอนุภาคเริ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วของวัสดุอนุภาคซึ่งมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงได้อยู่ในตัว ในสถานที่มีออกซิเจน และแหล่งจุดระเบิด (ignition source) ที่มีพลังงานสูงเพียงพอ วัสดุอนุภาคที่จะเกิดปฏิกิริยาและไหม้ลุกลามต่อไป โดยปกติอนุภาคเหล่านั้นต้องมีน้ำหนักเบาลอยตัวอยู่ได้ในอากาศเป็นระยะเวลานานพอสมควร มีขนาดพอดี และมีปริมาณมากพอ การเกิดสันดาปให้ก๊าซร้อนความกดดันภายในบริเวณตัวอาคาร พร้อมกับปริมาณอนุภาคที่ทวีจากการลุกไหม้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและฟุ้งกระจายขึ้นเรื่อยๆ ณ เกิดการระเบิด ส่วนการระเบิดจะรุนแรงเท่าใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น โครงสร้าง ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุอนุภาค วัสดุอนุภาคที่เกิดจากเนื้อโลหะสันดาปได้ง่าย รวมทั้งให้ลักษณะการระเบิดไม่เหมือนวัสดุอนุภาคจากสารเคมี อีกปัจจัย เช่นขนาดของวัสดุอนุภาครวมไปถึงรูปร่าง วัสดุอนุภาคยิ่งขนาดเล็กละเอียดเมื่อเกิดการระเบิดจะยิ่งอันตรายมาก เพราะมีพื้นที่ผิวที่จะเกิดการสันดาปได้มากกว่าวัสดุอนุภาคเนื้อ

หยาบในปริมาณเท่ากัน ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.0004 มม. ลงมา เป็นขนาดที่จะให้การสันดาปและระเบิดได้ดี ถ้าขนาดโตกว่านี้ แม้จะไม่สันดาปและระเบิดด้วยตัวเอง แต่ถ้ามีร่วมอยู่ในบริเวณที่เกิดสันดาปด้วยก็จะช่วยซ้ำเติมให้ลักษณะการระเบิดรุนแรงขึ้น

มาตรการป้องกันภัยอันตรายจากการระเบิดและจากอัคคีภัยของวัสดุอนุภาควิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ การติดตั้งช่องระบายความดันระเบิด (explosion venting) NFPA 68 (1988) ระบุมีวิธีการคำนวณหาพื้นที่ของช่องระบายความดันอยู่หลายวิธี ซึ่งต่างก็ต้องการทราบค่าสมบัติของวัสดุอนุภาคในกระบวนการเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการหาค่าสมบัติเหล่านี้จึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory-scale apparatus) ซึ่งค่าที่ต้องการทดสอบ คือ ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดและอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันสูงสุด

อุปกรณ์ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการที่มีใช้ ได้แก่ Hartmann apparatus ขนาด 1.2 ลิตร ทรงกระบอก ซึ่งมีที่ศูนย์เทคโนโลยีอนุภาคไทย เรียกว่า "ชุดเครื่องมือทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของผงอนุภาค จุฬาฯ 2" ซึ่งพัฒนาโดยนายทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ นอกจากนั้นยังมีเครื่องทดสอบขนาด 1 ลูกบาศก์เมตรซึ่งพัฒนาโดย Bartknecht (1989) แต่เนื่องจากมีขนาดใหญ่จึงมีเครื่องทดสอบขนาดเล็กลงเพื่อใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ คือ Bartknecht-Siwek 20 litre sphere ซึ่งได้นำไปเป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบหาแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง Hartmann apparatus และ Bartknecht-Siwek sphere เมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุอนุภากหลายชนิดพบว่าเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรทรงกลม มีแหล่งพลังงานที่เพียงพอเนื่องจากใช้แหล่งพลังงานในการจุดระเบิดที่สูงกว่าทำให้ใช้กับวัสดุอนุภาคที่เกิดการสันดาปได้ยาก เช่น ถ่านหินซึ่งไม่ระเบิดใน Hartmann นอกจากนี้ John E.Going (2000) กล่าวว่ารายงานการวิจัยเกี่ยวกับถ่านหินหรือวัสดุอนุภาคที่เกิดการสันดาปยากมักใช้ Bartknecht-Siwek 20 litre sphere เป็นเครื่องทดสอบในงานวิจัยเหล่านั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัย คือ พัฒนาและสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาดมาตรฐาน ซึ่งเท่ากับ 20 ลิตร เพื่อทดสอบหาความดันสูงสุดจากการระเบิด และอัตราการเพิ่มของความดันจากการระเบิด โดยมุ่งเน้นการสร้างเครื่องมือที่มีสมรรถนะตามมาตรฐานสากล แต่มีต้นทุนถูกกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) พัฒนาและสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร โดยอาศัยหลักการตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM E1226

2) ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องทดสอบจนได้ประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับโดยตัวแปรปรับค่าเพื่อให้เครื่องทดสอบได้มาตรฐาน คือ เวลาหน่วงในการจุดชนวนระเบิดมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 60 มิลลิวินาที

3) ทดสอบหาความดันสูงสุดจากการระเบิด และอัตราการเพิ่มของความดันจากการระเบิดวัสดุอนุภาคมาตรฐาน 2 ชนิด ได้แก่ ไลโคโพเดียม และ นิโดดินิกแอสิก แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่ามาตรฐานสากล

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากในห้องปฏิบัติการของศูนย์เทคโนโลยีอนุภาคไทยมีชุดเครื่องมือทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของผงอนุภาค จุฬาฯ 2 ซึ่งเน้นในการทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของวัสดุอนุภาคที่สามารถเกิดการระเบิดได้ (Minimum Explosibility Concentration, MEC) ดังนั้นการหาค่าดังกล่าวของวัสดุอนุภาคมาตรฐานที่นำมาใช้ทดสอบ เช่น ไลโคโพเดียม จึงใช้เครื่องทดสอบที่มีอยู่แล้วดังกล่าวซึ่งมีข้อดีคือ ใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นค่า MEC ที่ได้จะมีเลขนัยสำคัญทศนิยม 1 ตำแหน่ง ในขณะที่เครื่องทดสอบที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใหม่ในการวิจัยนี้ขนาด 20 ลิตร ก็สามารถหาค่า MEC ได้เช่นกันแต่หากต้องการค่าที่มีเลขนัยสำคัญทศนิยมถึง 1 ตำแหน่งจะต้องเสียเวลาในการทดลองมากเนื่องจากเครื่องทดสอบมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องเดิมเกือบ 17 เท่า ดังนั้นเครื่องทดสอบที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้จะมุ่งเน้นในการหาค่าความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

1) เครื่องทดสอบเป็นถังทรงกลมขนาดมาตรฐาน 20 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L ซึ่งออกแบบให้ทนแรงดัน 20 บาร์ (2,000 กิโลปาสคาล) เนื่องจากย่านความดันจากการระเบิดของหมอกฝุ่น (ของผสมระหว่างวัสดุอนุภาคกับอากาศ) มีค่ามากสุดไม่เกิน 12-15 บาร์ (1,200-1,500 กิโลปาสคาล) ดังนั้นเครื่องทดสอบนี้ไม่ควรนำไปใช้กับของผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิง (เช่น มีเทน) และไอของตัวทำละลาย หรือของผสมระหว่างหมอกฝุ่นและก๊าซเชื้อเพลิงหรือไอของตัวทำละลาย (hybrid mixture) เนื่องจากหากใช้ของผสมดังกล่าวในปริมาณมากอาจทำให้ความดันที่เกิดจากการระเบิดสูงกว่า 20 บาร์ (2,000 กิโลปาสคาล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) เนื่องจากเครื่องทดสอบไม่มีผนังหล่อเย็น (cooling water jacket) หุ้มถังทรงกลมหรือห้องจุดระเบิดเพื่อระบายความร้อนจากการระเบิดอีกชั้น ดังนั้นเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นจึงไม่สามารถทำการทดลองต่อเนื่องในทันทีได้ เนื่องจากห้องจุดระเบิดยังมีอุณหภูมิที่สูง ควรควบคุมอุณหภูมิในการทดลองให้อยู่ในช่วง 20-25 °C แล้วจึงทำการทดลองต่อไป

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

เมื่อทำการทดสอบวัสดุอนุภาคชนิดหนึ่งๆ และพบว่าระเบิดได้ ควรมีการวัดค่าสมบัติของการระเบิดซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ความไวต่อการจุดชนวน (ignition sensitivity) เพื่อบอกถึงความยากง่ายในการจุดระเบิด และ ความรุนแรงของการระเบิด (explosion severity) ซึ่งในการวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ และคำจำกัดความ ดังนี้

1) ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosion Concentration, MEC) คือค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นซึ่งถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ ฝุ่นจะไม่ระเบิด มีหน่วยเป็น กรัม/ลบ.ม. ค่านี้ใช้บอกความยากง่ายในการจุดระเบิด

2) ความดันสูงสุดจากการระเบิด (Maximum Explosion Pressure, P_{max}) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิด (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$) โดยปกติค่าสูงสุดทั้งสองนี้ จะเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ค่าทั้งสองนี้ หาได้จากการทดลองตลอดช่วงกว้างของความเข้มข้น

3) ค่า K_{St} (Explosion Violence, St class) เป็นค่าคงที่ของกฎรากกำลังสาม (cube-root-law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ กับปริมาตรของภาชนะที่ใช้ทดสอบ

$$(dP/dt)_{max}(V)^{1/3} = K_{St} \qquad (1.1)$$

สำหรับภาชนะที่รูปร่างคล้ายกันและสำหรับตำแหน่งจุดระเบิดที่คล้ายกัน ค่า K_{St} ของสารชนิดหนึ่งจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาตรภาชนะ ค่า K_{St} จะขึ้นกับวิธีและขั้นตอนการทดสอบ (หน่วยที่นิยมใช้กัน คือ bar.m/sec) แต่จะไม่ขึ้นกับปริมาตรของชุดทดสอบ ค่า K_{St} มีประโยชน์ในการทำนายพื้นที่ระบายออก (vent size opening) ของภาชนะขนาดใหญ่โดยอาศัยการทดสอบในสเกลเล็ก

ทั้งนี้ผู้อ่านควรเข้าใจว่า Explosion Class เป็นเพียงตัวบ่งบอกลักษณะสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาคแต่ไม่บอกว่าวัสดุอนุภาคนั้นจะจุดระเบิดยากง่ายเพียงใด วัสดุอนุภาคที่เกิดปฏิกิริยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รุนแรงอาจจะจุดระเบิดได้ยาก นั่นคือ การจำแนกฝุ่นผงโดย Dust Explosion Class ไม่ได้บอกความน่าจะเป็นของการเกิดระเบิด ซึ่ง Explosion St Class แบ่งได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 Hazard Class of Dust Deflagration ค่าในตารางเป็นค่าโดยประมาณเมื่อทดสอบในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ตามมาตรฐาน ATM E1226

Hazard Class	K_{St} (bar.m/sec)	P_{max} (bar)
St-1	≤200	≤10
St-2	201−300	≤10
St-3	>300	12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 หลักการของการระเบิดวัสดุอนุภาค

2.1.1 ปรากฏการณ์การระเบิดวัสดุอนุภาค

หลักการของการระเบิดยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดนัก มีเอกสารอ้างอิงหลายฉบับได้ให้นิยามไว้หลากหลายแตกต่างกันไป แต่โดยหลักๆ สามารถแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ คือนิยามแรกเน้นที่การเกิดเสียงดังหรือเสียงดังปัง เนื่องมาจากความแรงของคลื่นความดันหรือคลื่นการระเบิดที่เกิดขึ้นมาทันทีทันใด และจากคลื่นความดันที่เกิดจากพลังงานเคมีหรือพลังงานกล ซึ่งนิยามของการระเบิดนี้เป็นไปตามความหมายของคำโดยพื้นฐานทั่วๆ ไป นิยามที่สอง จะจำกัดขอบเขตของการระเบิดในการเกิดพลังงานทางเคมีขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งรวมไปถึงการระเบิดของก๊าซ ฝุ่น และวัตถุระเบิดที่เป็นของแข็ง ซึ่งความสำคัญจะอยู่ที่พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมา และอีกนิยามที่สามารถสรุปได้คือ การระเบิดคือ กระบวนการคายความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาตรคงที่ และเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันอย่างทันทีทันใด อย่างเห็นได้ชัด

ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "การระเบิดของวัสดุอนุภาค" เป็นข้อเท็จจริงพื้นฐานและง่ายที่จะเห็นภาพพจน์จากชีวิตประจำวัน วัตถุของแข็งทุกชนิดที่สามารถลุกไหม้ในอากาศได้จะเกิดการระเบิดที่รุนแรงได้เมื่อวัสดุอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กลง (มีพื้นที่ผิวมากขึ้น) ดังรูปที่ 2.1(a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของชิ้นไม้ที่ลุกไหม้อย่างช้าๆ ด้วยความร้อนของตัวมันเองในระยะเวลาหนึ่ง และเมื่อตัดให้เป็นชิ้นเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 2.1(b) อัตราการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไม้กับอากาศเพิ่มขึ้นดังนั้นการลุกไหม้ของไม้ก็จะง่ายขึ้น และถ้าย่อยขนาดให้มีขนาดเล็กลงไปอย่างต่อเนื่องให้กลายเป็นวัสดุอนุภาคขนาดเล็กๆ จนถึงขนาด 0.1 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่า อนุภาคนี้จะแขวนลอยอยู่ในอากาศและมีที่ว่างหรือปริมาตรอากาศที่สัมผัสกับพื้นที่ผิวของเม็ดวัสดุอนุภาคอย่างเพียงพอเพื่อให้แต่ละอนุภาคเกิดการเผาไหม้ที่ไม่มีขีดจำกัด ทำให้อัตราการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก แต่พลังงานที่ต้องการเพื่อการลุกไหม้น้อยมาก อาทิเช่นการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นซึ่งเป็นการระเบิดของฝุ่นละอ ดังรูป 2.1(c)

(a) Slow combustion (b) Fast combustion (c) Explosion

รูปที่ 2.1 ลักษณะอัตราการเผาไหม้ของของแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อของแข็งนั้นมีขนาดเล็กลง

โดยทั่วไปหมอกฝุ่นง่ายต่อการลุกไหม้และการเผาไหม้จะรุนแรงขึ้นถ้าขนาดเม็ดวัสดุเล็กลงจนถึงระดับขนาดอนุภาคและยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอนุภาคซึ่งเกิดขึ้นในอุปกรณ์ของกระบวนการหรือภายในห้องปฏิบัติการ ความดันรอบๆ ในบริเวณที่เกิดการระเบิดบางส่วนหรือทั้งหมดอาจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องจักรในกระบวนการหรือสิ่งก่อสร้างอาจระเบิด ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียชีวิต พิการ และสูญเสียทรัพย์สิน สรุปเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการระเบิดของวัสดุอนุภาค คือ

1) มีวัสดุอนุภาคซึ่งสามารถติดไฟได้
2) เกิดการฟุ้งกระจายเป็นหมอกของวัสดุอนุภาค (ในความเข้มข้นที่พอเหมาะ)
3) มีออกซิเจน (อากาศ)
4) มีแหล่งจุดระเบิด (ที่มีปริมาณและความเข้มของพลังงานเพียงพอ)

2.1.2 วัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาคได้

การระเบิดของวัสดุอนุภาคโดยทั่วไปจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจากปฏิกิริยาการเผาไหม้

เชื้อเพลิง + ออกซิเจน $\rightarrow$ สารประกอบออกไซด์ + ความร้อน (2.1)

ในบางกรณีวัสดุอนุภาคโลหะยังเกิดปฏิกิริยาข้างต้นกับก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ส่วนมากมักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจน และเกิดความร้อนขึ้นในการระเบิดวัสดุอนุภาค นั่นหมายความว่าวัสดุที่ยังไม่เป็นสารประกอบออกไซด์ที่เสถียรเท่านั้นจึงจะสามารถเกิดการระเบิดของวัสดุอนุภาคได้ แต่สารประกอบที่ไม่เป็นสารประกอบออกไซด์บางตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เช่น สารประกอบซิลิเกต ซัลเฟต ไนเตรต คาร์บอเนต และฟอสเฟต รวมถึงหมอกฝุ่นของปอร์ดแลนด์ซีเมนต์ ทราย หินปูน ฯลฯ ก็ไม่สามารถเกิดการระเบิดได้ ดังนั้นวัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดของวัสดุอนุภาค ได้แก่

1) วัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ เช่น เมล็ดพืช ลินิน น้ำตาล ฯลฯ
2) วัสดุอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก สีย้อมอินทรย์ ยาฆ่าแมลง ฯลฯ
3) ถ่านหิน และถ่านหินร่วน
4) โลหะ เช่น อลูมิเนียม แม่กนีเซียม สังกะสี เหล็ก ฯลฯ

ความร้อนจากการเผาไหม้วัสดุจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เนื่องจากสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยจากการระเบิด และเมื่อต้องการเปรียบเทียบระดับความอันตรายของวัสดุหลายๆ ชนิด ค่าความร้อนจากการเผาไหม้จึงเป็นประโยชน์ในการหาความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปเนื่องจากถ้าทราบปริมาณก๊าซที่แน่นอนของหมอกฝุ่นก็จะทราบปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ไปทำให้หาปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยในการระเบิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของหมอกฝุ่น ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สาร

ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (ออกซิเดชัน) สารชนิดต่างๆ ต่อ 1 โมลออกซิเจนที่ถูกใช้ไป (Eckhoff, 1991:6)

Substance	Oxidation product (s)	KJ/mole O_2
Ca	CaO	1270
Mg	MgO	1240
Al	Al_2O_3	1100
Si	SiO_2	830
Cr	Cr_2O_3	750
Zn	ZnO	700
Fe	Fe_2O_3	530
Cu	CuO	300
Sucrose	CO_2 and H_2O	470
Starch	CO_2 and H_2O	470
Polyethylene	CO_2 and H_2O	390
Carbon	CO_2	400
Coal	CO_2 and H_2O	400
Sulphur	SO_2	300

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตาราง 2.1 พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้อนุภาคโลหะ เช่น อลูมิเนียม ซิลิกอน มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟของอนุภาคสารอินทรีย์ และถ่านหิน

ส่วนความสัมพันธ์ของสารชนิดต่างๆ กับค่าความดันของการระเบิดสามารถใช้สมการสภาวะของก๊าซอุดมคติ ดังนี้

$$P = \frac{TnR}{V} \qquad (2.2)$$

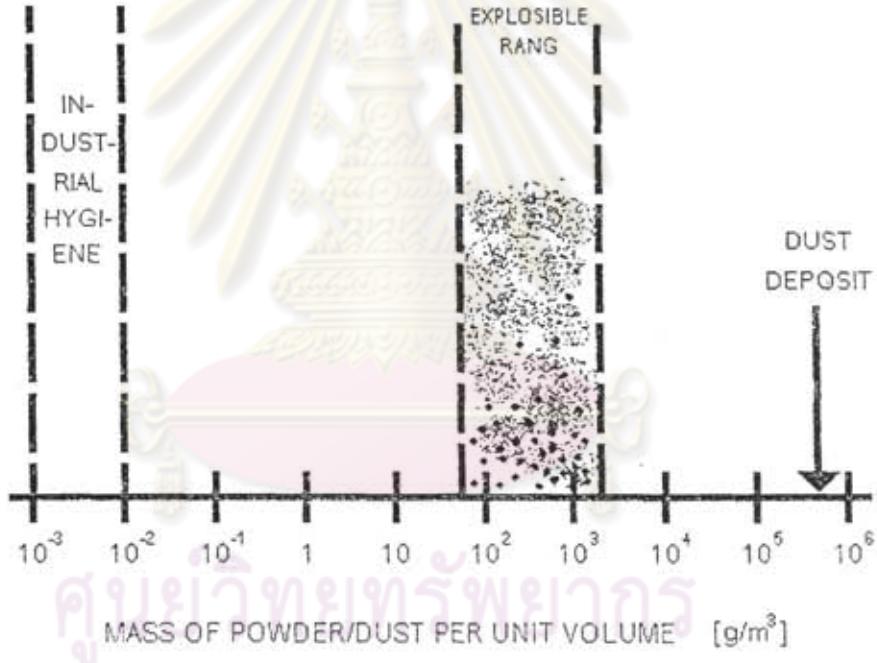
เมื่อ P คือความดันของก๊าซ T คืออุณหภูมิของก๊าซ n คือจำนวนโมเลกุลของก๊าซในปริมาตรดังกล่าวV คือปริมาตรของก๊าซในหมอกฝุ่น และ R คือค่าคงที่ของก๊าซ ในกรณีที่ปริมาตรคงที่ ค่าความดันจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิและจำนวนโมเลกุลของก๊าซ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยทั่วไปเกิดจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้หมอกฝุ่น ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความดันของก๊าซในหมอกฝุ่น ดังนั้นในส่วนการเปลี่ยนแปลงของจำนวนโมเลกุลจึงมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความดัน .

การเปลี่ยนแปลงของจำนวนโมเลกุลของอนุภาคโลหะในการเผาไหม้ภายใต้สมมุติฐานว่าออกซิเจนทำปฏิกิริยากลายเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ทั้งหมด ถ้าระบบใช้อากาศและออกซิเจนในอากาศถูกใช้จนหมดเหลือเพียงไนโตรเจน พบว่า n จะมีค่าลดลงประมาณ 20% ส่วนอนุภาคอินทรีย์และถ่านหิน ภายใต้สมมุติฐานว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) คือผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแล้วจำนวนโมเลกุลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยมวลของหมอกฝุ่นจะเพิ่มขึ้นตลอดการเผาไหม้ เนื่องจากจะเกิด H_2O จำนวน 2 โมเลกุล จาก 1 โมเลกุลของออกซิเจน และในกรณีที่สารอินทรีย์นั้นมีอะตอมของออกซิเจนอยู่ การเกิดของ CO_2 และ H_2O บางส่วนเกิดจากการสลายตัวของอนุภาคอินทรีย์เองโดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนจากอากาศอีกด้วย พิจารณาแป้งตัวอย่าง $(C_6H_{10}O_5)_x$ แขวนลอยในอากาศที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าออกซิเจนทั้งหมดในอากาศเกิดปฏิกิริยากลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ อากาศปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรที่สภาวะบรรยากาศ มีออกซิเจน 8.7 โมล และไนโตรเจน 32.9 โมล เมื่อแป้งถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน อะตอมคาร์บอนของแป้งรวมกับออกซิเจนทั้งหมดกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนอะตอมไฮโดรเจนและออกซิเจนในแป้งมีสัดส่วนพอเหมาะในการเกิดเป็นน้ำ (H_2O) ด้วยตัวเอง ดังนั้นต้องใช้ออกซิเจน 8.7 โมลทำปฏิกิริยากับ $C_6H_{10}O_5$ จำนวน 8.7/6 = 1.45 โมล (ดังนั้นจำนวนแป้งในหมอกฝุ่น(มวลโมเลกุลคูณจำนวนโมล) เท่ากับ 235 กรัม) เพื่อเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ 8.7 โมล และเมื่อทำสมดุลมวลจะได้ว่าเกิดน้ำ 131.4 กรัม เท่ากับ 7.3 โมล สรุปจากอากาศ 1 ลูกบาศก์เมตรเป็นสารตั้งต้น($O_2 + N_2$) มี 41.6 โมล เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วมีโมลรวมของก๊าซ($H_2O + CO_2 + N_2$) 48.9 โมล (เพิ่มขึ้น 17.5%) ดังนั้นในการระเบิดมีผลทำให้เกิด

การเพิ่มขึ้นทั้งปริมาณและแรงดันของก๊าซ แต่ต้องเน้นว่าข้อสรุปดังกล่าวไม่เป็นจริงถ้าอนุภาคอินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และเศษถ่าน

2.1.3 ขอบเขตการระเบิดได้ของวัสดุอนุภาค

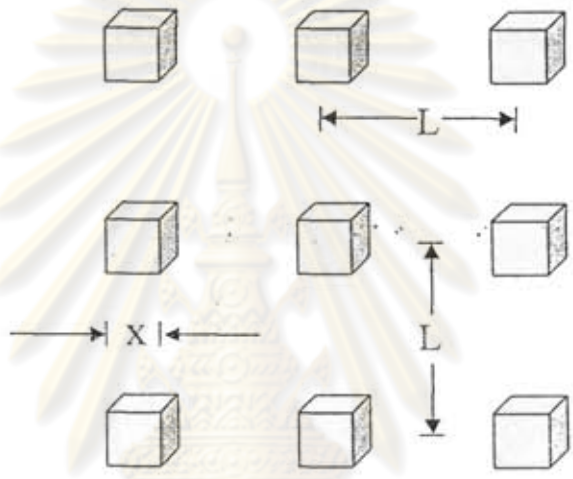
การระเบิดของหมอกฝุ่นดังรูป 2.1 (c) จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้จนกว่าความเข้มข้นของอนุภาค (คือมวลของอนุภาคต่อปริมาตรของหมอกฝุ่น) จะมีค่าหรือขอบเขตที่เหมาะสมเปรียบเหมือนการเผาไหม้ของไอเชื้อเพลิงในอากาศ ซึ่งต้องมีขอบเขตของความสามารถในการลุกไหม้ทั้งเขตด้านต่ำ และด้านสูง รูปที่ 2.2 แสดงขอบเขตความสามารถในการระเบิดได้ของอนุภาคอินทรีย์ทางธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพดในอากาศที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ



รูปที่ 2.2 ช่วงความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดในอากาศ
ที่สามารถเกิดการรระเบิดได้ (Eckhoff, 1991:8)

ขอบเขตความสามารถในการระเบิดได้ของอนุภาคต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน เช่น จากรูป 2.2 แป้งข้าวโพดมีความเข้มข้นต่ำสุดของการระเบิดเท่ากับ 80 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่อนุภาคสังกะสีมีค่า 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ความเข้มข้นต่ำสุดของการระเบิดหมอกฝุ่นมักมีความหนาแน่นสูงในการผ่านแสง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศภายใน

โรงงานที่ถูกสุขลักษณะจะมีความหนาแน่นหรือความเข้มข้นน้อยกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถระเบิดได้อยู่มาก ซึ่งมักเข้าใจกันผิดว่าการระเบิดของอนุภาคในโรงงานเกิดจากอนุภาคทั่วไปในโรงงานซึ่งจริงๆ มีความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้นของอนุภาคที่สามารถเกิดการระเบิดได้อยู่มาก ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้สัมพันธ์กับความหนาแน่นในการผ่านแสง ในรูปที่ 2.3 แสดงการเรียงอนุภาคทรงลูกบาศก์ให้มีระยะห่างเท่าๆ กัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นในการผ่านแสงของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้



รูปที่ 2.3 อนุภาคทรงลูกบาศก์ขนาด x เรียงในอากาศให้ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางอนุภาคเท่ากัน

โดยเฉลี่ยอนุภาคหนึ่งอันที่มีปริมาตร X^3 จะแขวนลอยในอากาศที่มีปริมาตร L^3 และเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่น ρ_p ความเข้มข้นของอนุภาคเท่ากับ

$$c = \rho_p (x/L)^3$$

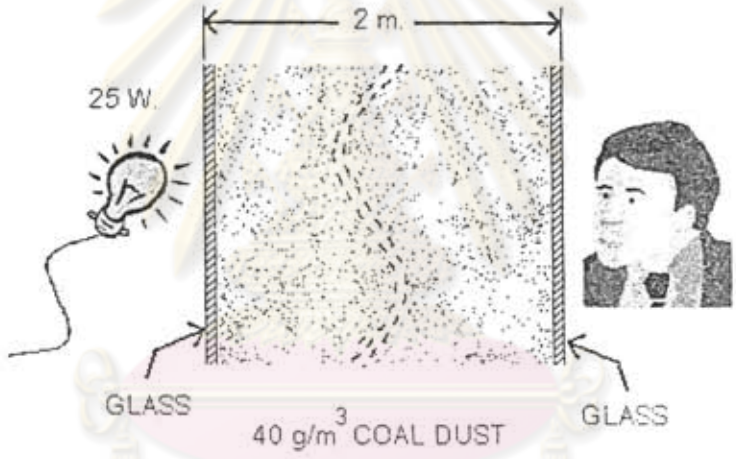
จัดรูปใหม่จะได้

$$L/x = (\rho_p / c)^{1/3} \qquad (2.3)$$

สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 1กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (คือ 10^6 กรัม/ลูกบาศก์เมตร) มีความเข้มข้นในหมอกฝุ่น 50 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จะได้ค่า L/x เท่ากับ 27 และเมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เกิดการระเบิดได้ จะได้ค่า L/x เท่ากับ 13 แต่ถ้าอนุภาคอยู่ชิดกันมากคือ L/x เท่ากับ 4 ค่าความเข้มข้นจะสูงถึง 16 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นที่อนุภาคสามารถระเบิดได้ (2-3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ข้อสำคัญที่ต้องทราบจากสมการ 2.3 คือระยะห่างระหว่างอนุภาคสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุภาคที่กำหนดมา

แต่ไม่เป็นสัดส่วนกับขนาดอนุภาค เช่นที่ความเข้มข้นอนุภาค 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร และอนุภาคมีความหนาแน่น 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้ว L เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร เมื่ออนุภาคขนาด 100 μm แต่ความจริงอนุภาคมีขนาดเพียง 13 ถึง 1 μm เท่านั้น

จากรูปที่ 2.2 การพิจารณาความเข้มข้นของหมอกฝุ่นอาจสังเกตความสว่างของหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ผ่านหมอกฝุ่นเป็นระยะ 2 เมตรแล้ว จะไม่เห็นแสงของหลอดไฟเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคมากกว่า 40 กรัม/ลูกบาศก์เมตร แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งความเข้มข้นระดับพบว่าอนุภาคมักจะเริ่มเกิดการระเบิดได้ภายในอุปกรณ์ของกระบวนการ เช่น เครื่องบด เครื่องผสม ตะแกรงคัดขนาด เครื่องอบแห้ง ไซโคลน สายพานลำเลียง ไซโลเก็บอนุภาค และท่อลำเลียงอนุภาคด้วยลม เหล่านี้มักเกิดการระเบิดจากแหล่งพลังงาน (ดูหัวข้อ 2.1.4) เรียกว่า *การระเบิดขั้นปฐมภูมิ*



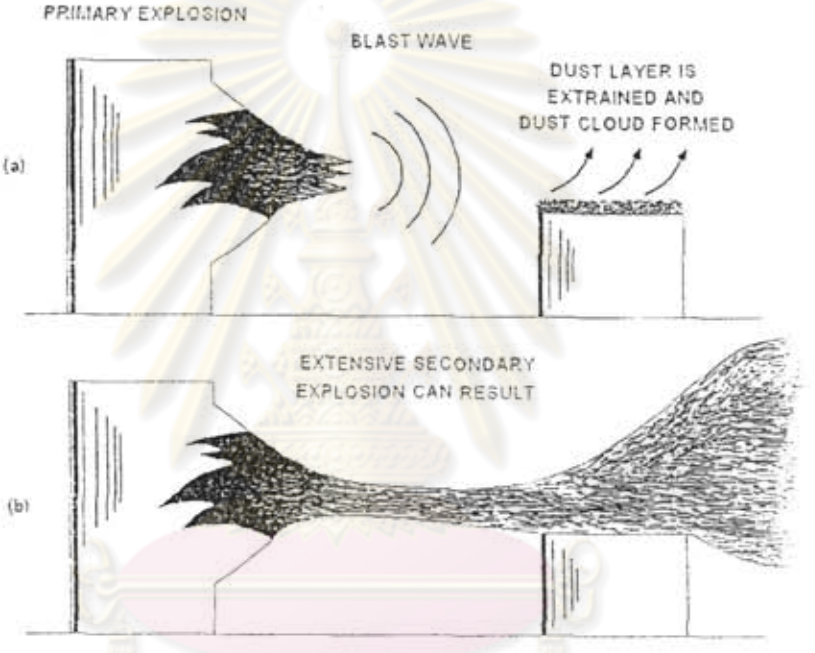
รูปที่ 2.4 หมอกฝุ่นถ่านหินเข้มข้น 40 กรัม/ลบ.เมตร มีความหนาแน่นจนยากที่จะมองเห็นแสงจากหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ ในระยะห่าง 2 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การระเบิดของอนุภาคขั้นปฐมภูมิ และการระเบิดของก๊าซขั้นปฐมภูมิมีข้อแตกต่างที่สำคัญข้อหนึ่ง คือในกรณีของก๊าซ พบว่าการระเบิดของก๊าซในอุปกรณ์เป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้ เนื่องจากภายในอุปกรณ์จะมีเพียงเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวไม่มีอากาศ ดังนั้นการระเบิดของก๊าซขั้นปฐมภูมิจะเกิดภายนอกอุปกรณ์ของกระบวนการเมื่อเกิดการรั่วของก๊าซสู่อากาศในบรรยากาศและเกิดการระเบิด ในขณะที่การระเบิดของอนุภาคขั้นปฐมภูมิจะเกิดภายในอุปกรณ์ ดังนั้นการจำกัดการระเบิดขั้นปฐมภูมิที่เริ่มเกิดขึ้นจึงเป็นข้อสำคัญข้อหนึ่งของการควบคุมการระเบิดของวัสดุอนุภาค หรือกล่าวว่าเป็นการหลีกเลี่ยง *การระเบิดขั้นทุติยภูมิ* อันเกิดจากแนวของอนุภาคที่เกิดจาก

คลื่นแรงดันของการระเบิดปฐมภูมิ รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเกิดการระเบิดขั้นทุติยภูมิจากคลื่นความดันการระเบิด จะเห็นว่าอนุภาคที่กองอยู่สามารถฟุ้งกระจายเป็นหมอกฝุ่นได้ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ง่ายๆ ของความหนาแน่นรวมของชั้นอนุภาค (ρ_{bulk}) ความหนาของชั้นอนุภาค (h) ความสูงของหมอกฝุ่นที่เกิดจากชั้นอนุภาคนั้น (H) และความเข้มข้นของอนุภาค (c) แสดงดังสมการ

$$c = \rho_{bulk} \frac{h}{H} \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.5 การเกิดคลื่นแรงดันของการระเบิดขั้นปฐมภูมิทำให้เกิดการฟุ้งของชั้นอนุภาคนำมาซึ่งการระเบิดขั้นทุติยภูมิ

เมื่อชั้นของอนุภาคที่หนา h ติดอยู่ที่ผนังท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D แล้วเกิดการฟุ้งกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อจากสมการ 2.4 จะได้ว่า

$$c = \rho_{bulk} \frac{4h}{D} \qquad (2.5)$$

ในกรณีที่ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้ขนส่งอนุภาคในอุตสาหกรรม หากมีชั้นอนุภาคหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตรก็สามารถทำให้เกิดหมอกฝุ่นที่มี

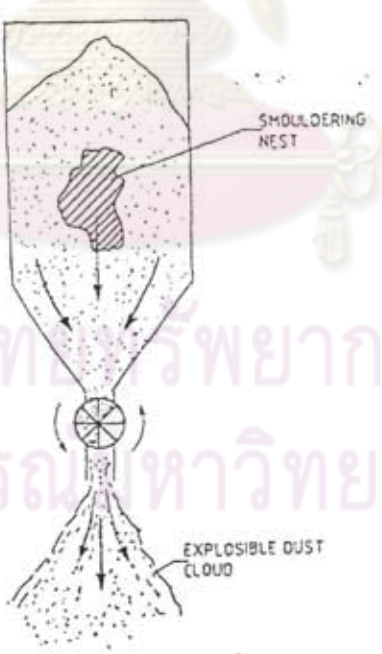
ความเข้มข้น 1000 กรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่ออนุภาคมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

2.1.4 แหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาค

การลุกไหม้ของหมอกฝุ่นจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะมีการลุกติดไฟจากแหล่งพลังงานความร้อนที่สูงพอ ส่วนมากแหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาคมีดังนี้

2.1.4.1 อนุภาคที่ระอุด้วยความร้อน

อนุภาคที่ถูกเผาไหม้แล้วเมื่อมากองรวมกันก็อาจเกิดการเผาไหม้ภายในอีกครั้ง เนื่องจากโครงสร้างของช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ทับถมกันอยู่ยังมีออกซิเจนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิปานกลางภายในกองอนุภาค ปฏิกิริยาจะเกิดไปนานเท่าที่ยังมีออกซิเจนอยู่ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็ยิ่งสูงขึ้น และเมื่อเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างก๊าซร้อนจากการเผาไหม้และอากาศบริสุทธิ์อาจทำให้เกิดแรงในการพาออกซิเจนบริสุทธิ์เข้ามาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย กองอนุภาคที่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังกล่าวมักถูกเรียกว่า "smouldering nest" ซึ่งสามารถทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาคได้ง่ายมากถ้าถูกพาไปสัมผัสกับหมอกฝุ่นที่สามารถเกิดการระเบิดได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 smouldering nest ของอนุภาคในไซโลอาจทำให้เกิดการระเบิดได้เมื่อถูกพาไปในหมอกฝุ่นที่สามารถระเบิดได้

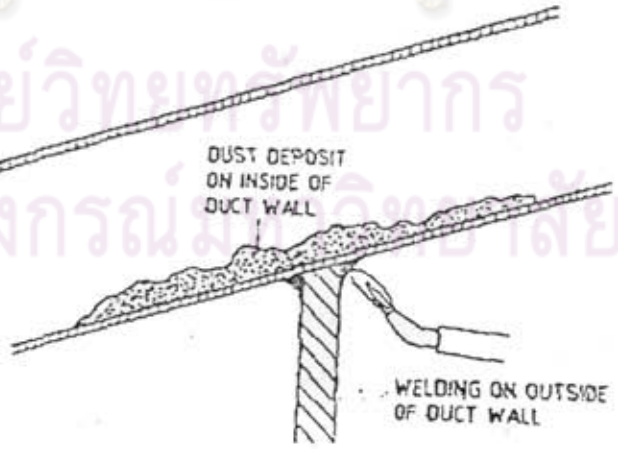
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4.2 เปลวไฟ

เปลวไฟหรือประกายไฟจากการเชื่อมหรือจากหัวก๊าซตัดเหล็กเป็นแหล่งความร้อนที่ทำให้เริ่มเกิดการระเบิดของหมอกฝุ่นได้อย่างมากเพราะเมื่อหมอกฝุ่นติดไฟแล้วสามารถลุกไหม้ต่อได้ด้วยตัวเอง โดยเฉพาะหัวก๊าซตัดเหล็กจะมีอันตรายมากเนื่องจากนอกจากมีเปลวไฟแล้วยังมีก๊าซออกซิเจนที่มากเกินพอออกมาในบริเวณที่ทำงานอีกด้วย และหากในบริเวณดังกล่าวมีอนุภาคที่ลุกไหม้ได้กระจายอยู่ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินพอ (เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น) ทำให้ทั้งสมบัติความว่องไวและความรุนแรงของการระเบิดเพิ่มสูงขึ้นกว่าในกรณีที่มีอากาศเพียงอย่างเดียว ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังอย่างมากในการทำงานที่มีเปลวไฟในบริเวณที่มีอนุภาค รวมทั้งควรห้ามสูบบุหรี่ในบริเวณที่มีอนุภาคที่ลุกไหม้ได้เนื่องจากการจุดไม้ขีดไฟหนึ่งก้านทำให้เกิดพลังงานความร้อน 100 จูลต่อวินาที ซึ่งมากพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาคหลายๆ ชนิด

2.1.4.3 พื้นผิวร้อน

ในบางกรณีหากกองหรือชั้นของอนุภาคอยู่บนพื้นผิวที่ร้อนพออาจทำให้เกิดการลุกไหม้ของอนุภาคเองได้ เช่นที่ผนังของเครื่องอบแห้ง ฮีทเตอร์ หลอดไฟ ฯลฯ หรือตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 วิธีการป้องกันคือหุ้มฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าหากชั้นของอนุภาคมีความหนามากขึ้น อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นผิวที่ทำให้อนุภาคเกิดการลุกไหม้ยิ่งต่ำลง(ลุกไหม้ได้ง่ายขึ้น) แต่หากเป็นหมอกฝุ่นอุณหภูมิต่ำสุดของพื้นผิวที่ทำให้อนุภาคเกิดการลุกไหม้จะสูงกว่ามาก (เช่นหมอกฝุ่นของสารอินทรีย์ เท่ากับ 400-500 ^{o}C) เมื่อเทียบกับกรณีที่อนุภาคกองรวมกัน



รูปที่ 2.7 อนุภาคที่กองอยู่ภายในท่อสามารถลุกไหม้ได้จากความร้อนของผนังท่อจากภายนอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4.4 ความร้อนจากการกระทบกันของเครื่องจักร

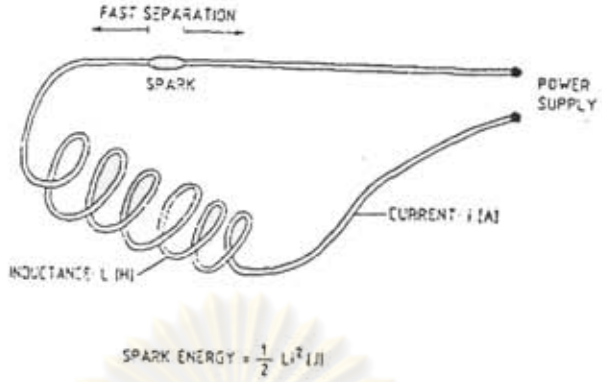
บทความต่างๆ ที่เกี่ยวกับการระเบิดของอนุภาคมักสับสนเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของการลุกไหม้หมอกฝุ่นจากการกระทบกันของเครื่องจักรว่ามีความหมายเดียวกับ การขัดสีกันระหว่างวัสดุ ซึ่งในความเป็นจริงความหมายของทั้งสองคำมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ การขัดสีจะต้องใช้เวลานานในการเกิดความร้อน เมื่อวัตถุขัดสีกันความร้อนจะค่อยๆ สะสมทีละน้อยจนทำให้เกิดผิวร้อนหรือลุกไหม้ เช่นสายพานลำเลียงถูกขัดสีจนขาด ส่วนการกระทบ เกิดในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นการกระทำกันของของแข็งสองอันซึ่งอาจเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ภายใต้เงื่อนว่าต้องเกิดแรงทางกลที่สูงทันทีทันใด โลหะที่เมื่อกระทบกันและเกิดความร้อนขึ้นได้ง่าย คือ ไททาเนียม และ เซอโคเนียม รวมถึงปฏิกิริยาเธอไมท คือ อลูมิเนียมผสมกับออกไซด์ของเหล็กใช้เพื่อก่อความร้อนอย่างแรงเช่น ในการเชื่อมโลหะ และการทำลูกระเบิดเพลิง ดังสมการ

$$2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe + heat \qquad (2.6)$$

ในกรณีที่อลูมิเนียมกระทบกับสนิมเหล็กมีความแข็งพอจะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ แต่หากอลูมิเนียมนั้นอ่อน หรือเหล็กมีการทาสีกันสนิมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

2.1.4.5 การสปาร์คของไฟฟ้า และการอาร์ค

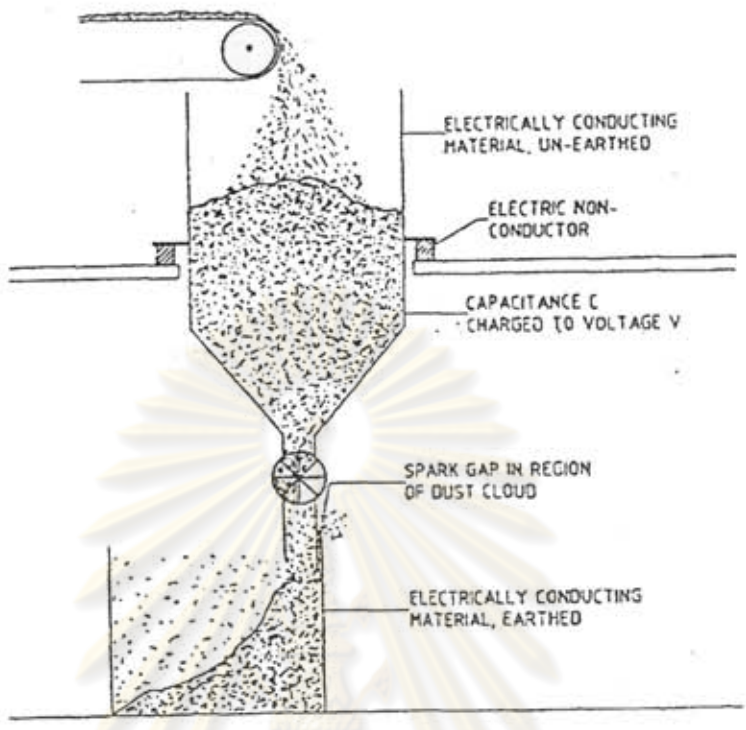
เป็นที่ทราบกันดีว่าการสปาร์คของไฟฟ้า และการอาร์คทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาค ค่าพลังงานน้อยสุดของการสปาร์คที่ทำให้เกิดการลุกไหม้แปรผันตามชนิดของอนุภาคผลของการกระจายขนาดอนุภาคในหมอกฝุ่น ความเข้มข้นของหมอกฝุ่น และความปั่นป่วนของหมอกฝุ่น นอกจากนี้ยังพบว่าพลังงานน้อยสุดจากการสปาร์คไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการลุกไหม้ของหมอกฝุ่นโดยทั่วไปจะมากกว่าพลังงานน้อยสุดในการลุกไหม้ของก๊าซและไอ อย่างไรก็ตามในขณะนี้เป็นที่ยอมรับว่าค่าพลังงานที่สามารถทำให้อนุภาคหลายๆ ชนิดเกิดการลุกไหม้มีค่าอยู่ในช่วง 1-10 มิลลิจูล การสปาร์คเกิดจากกระแสไฟฟ้าในวงจรหยุดไหลทั้งจากอุบัติเหตุและเจตนาทำให้ ณ จุดที่กระแสหยุดแยกจากกันอย่างรวดเร็วเกิดเป็นช่องว่างทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการสปาร์ค คล่อมช่องว่างดังกล่าวดังรูปที่ 2.8 เมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรก่อนหยุดเท่ากับ i (แอมแปร์) และค่าการเหนี่ยวนำในวงจรเท่ากับ L (เฮนรี่) ตามทฤษฎีถ้าไม่คิดพลังงานสูญเสียจากวงจรภายนอกจะได้ค่าพลังงานของการสปาร์คเท่ากับ $1/2\ \ Li^{\ 2}$ (จูล) ดังนั้นระบบที่มีกระแสไฟฟ้าสูงและ/หรือค่าการเหนี่ยวนำสูงก็สามารถทำให้เกิดการสปาร์คได้ง่าย และบางครั้งช่องว่างที่เกิดขึ้นเพียงเล็กๆ ในวงจรก็เป็นจุดอันตรายที่ทำให้เกิดการอาร์คหากยังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



รูปที่ 2.8 ลักษณะการสปาร์คเมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหลกระทันหัน และ ณ จุดนั้นเกิดการแยกด้วยความเร็วสูง

นอกจากนี้การสะสมของไฟฟ้าสถิตก็อาจก่อให้เกิดการระเบิดของอนุภาคได้ ด้วยกลไกพื้นฐานจากการขัดสีกันระหว่างวัตถุเช่นในกระบวนการขนย้ายอนุภาคและฝุ่น เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ากันระหว่างอนุภาค/ฝุ่น กับอุปกรณ์ในกระบวนการแล้วเกิดการสะสมของประจุในอุปกรณ์หรือในกองอนุภาคและสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้หลายรูปแบบขึ้นกับสภาพแวดล้อม Glor (1988) ได้แบ่งชนิดการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าสถิตที่ก่อให้เกิดอันตรายในอุตสาหกรรมออกเป็น 6 แบบ ดังนี้

2.1.4.5.1 Spark discharges :เป็นการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นมากที่สุดของทั้ง 6 แบบ เกิดเมื่อมีประจุสะสมอยู่ที่วัตถุนำไฟฟ้า(ที่ไม่ต่อสายดิน) เกิดความต่างศักย์ระหว่างวัตถุนั้นกับวัตถุที่ติดพื้นดินทำให้ประจุถูกถ่ายเท แต่หากมีช่องว่างแคบๆ ของอากาศระหว่างวัตถุที่มีประจุกับวัตถุที่ติดพื้นดินทำให้เกิดการหยุดชะงักของประจุ แต่ด้วยความต่างศักย์ของวัตถุทำให้ประจุสปาร์คคล่อมช่องว่างดังกล่าวเกิดเป็นแหล่งพลังงานของการสปาร์คจากไฟฟ้าสถิต ตามทฤษฎีถ้าไม่คิดพลังงานสูญเสียจากวงจรภายนอกแล้วพลังงานของการสปาร์คเท่ากับ $1/2\ CV^2$ เมื่อ C คือค่าความจุของประจุ (หน่วย ฟารัด) ในวัตถุที่ไม่ต่อสายดิน และ V คือค่าความต่างศักย์ (หน่วย โวลต์) รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะที่อาจเกิดขึ้นได้ของการระเบิดอนุภาคจากการปลดปล่อยพลังงานสปาร์คของไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 2.9 สภาวะที่อาจเกิดการระเบิดอนุภาคจากการปลดปล่อยพลังงานสปาร์คของไฟฟ้าสถิต

Glor (1988) ได้ประมาณค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุที่นำไฟฟ้าในกระบวนการอุตสาหกรรมดังตารางที่ 2.2 และใช้สมการ $1/2\ CV^2$ คำนวณค่าพลังงานการสปาร์คมากที่สุดที่ความต่างศักย์กับพื้นดิน

นอกจากนี้ Glor (1988) ยังเน้นว่าในโรงงานสมัยใหม่ๆ ส่วนประกอบของโครงสร้างที่ไม่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะมองข้ามวัตถุนำไฟฟ้าที่ไม่ต่อสายดินเป็นอย่างสูง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ดังกล่าวได้ต่อสายดินแล้ว เพื่อลดการสะสมของไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 2.2 ค่าพลังงานการสปาร์คมากสุดทางทฤษฎีและค่าความจุไฟฟ้าโดยประมาณของวัตถุนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ (Glor, 1988)

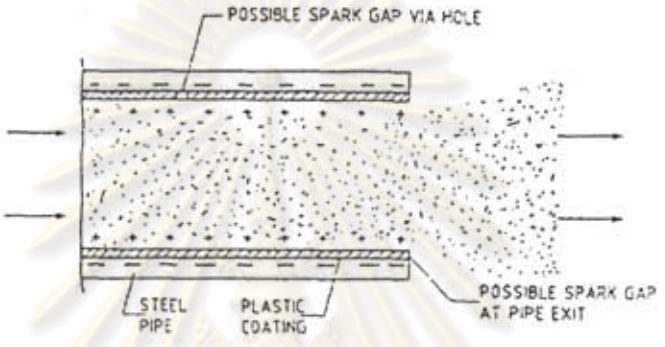
Object	Capacitance (pF)	1/2 CV^2 (mJ) at various voltages		
		10 kV	20 kV	30 kV
Single screw	1	0.05	0.2	0.45
Flange (100 mm nominal size)	10	0.5	2	4.5
Shovel	20	1	4	9
Small container (bucket, 50-l drum)	10-100	0.5-5	2-20	4.5-45
Funnel	10-100	0.5-5	2-20	4.5-45
Drum (~200 litres)	100-300	5-15	20-60	45-135
Person	100-300	5-15	20-60	45-135
Major plant item (large containers, reactor)	100-1000	5-50	20-200	45-450
Road tanker	1000	50	200	450

2.1.4.5.2 Brush discharges เกิดจากการขัดสีของวัตถุที่มีความโค้งมนขั้วโลหะ (รัศมีความโค้ง 5-50 มิลลิเมตร) และพื้นผิวที่ไม่นำประจุไฟฟ้า (พลาสติก ยาง) ประจุที่เกิดนี้ทำให้เกิดการระเบิดของก๊าซผสมได้แต่ไม่พบว่าทำให้เกิดระเบิดกับอนุภาคในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (กับอนุภาคที่มีความว่องไวในการลุกไหม้สูง)

2.1.4.5.3 Corona discharges เกิดขึ้นลักษณะเดียวกับ brush discharges เพียงแต่ขั้วโลหะมีรัศมีความโค้งน้อยกว่ามากๆ ดูเหมือนปลายแหลมของเข็มหมุด มีผลให้ประจุที่ปลายแหลมมีความเข้มของสนามประจุ และพลังงานน้อยกว่า brush discharges ดังนั้น corona discharges ไม่ทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาค

2.1.4.5.4 Propagation brush discharges ทำให้เกิดการระเบิดอนุภาคได้เพราะมีพลังงานมากกว่า brush discharges เกิดได้ถ้ามีวัตถุไม่นำไฟฟ้าเป็นแผ่นบางๆ (น้อยกว่า 8 มม.) ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกันที่สองด้านของแผ่น และวางขนานกันสองแผ่นด้วยเหตุที่มีความต่างของประจุบนวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้าทำให้เกิดการสะสมประจุเป็นอย่างหนาแน่นมากเกิดพลังงานมากกว่ากรณีที่มีประจุที่ผิวหน้าเพียงด้านเดียว (กรณีที่มีทั่วไป) ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.10 อนุภาคถูกขนส่งด้วยลมภายในท่อโลหะที่มีการเคลือบฉนวนกันไฟฟ้าทำจากพลาสติกไว้ภายในท่อ แต่เนื่องจากเกิด

การขัดสีของอนุภาคกับผนังบางๆ ของพลาสติกทำให้เกิดประจุสะสมที่ผิวด้านนอกของพลาสติก ส่วนด้านในติดกับท่อโลหะ เนื้อโลหะเองก็มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตลอดเวลาทำให้เกิดประจุที่ตรงข้ามกันระหว่างผิวของพลาสติก และหากเกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วผ่านจุดที่มีช่องว่างของผนังพลาสติกที่มีประจุต่างกันสองด้าน หรือทางออกของท่อ ทำให้เกิด propagation brush discharges



รูปที่ 2.10 ลักษณะที่อาจเกิดการระเบิดในการขนส่งอนุภาคด้วย propagation brush discharges

ต่อมา Glor (1988) ได้ระบุสภาวะ 5 อย่างที่อาจทำให้เกิด propagation brush discharges ในกระบวนการขนส่งและจัดการกับอนุภาค ดังนี้

- การขนส่งอนุภาคด้วยลมที่ความเร็วสูง ในท่อที่เป็นฉนวนไฟฟ้า หรือท่อที่นำไฟฟ้าแต่เคลือบด้วยฉนวนกันไฟฟ้าภายในท่อ
- การติดช่องมองที่ทำจากกระจกหรือวัตถุใสคล้ายกระจกที่ท่อขนส่งอนุภาคด้วยลม
- การกระแทกของอนุภาคกับพื้นผิวที่เป็นฉนวนอย่างต่อเนื่อง เช่น การชนของอนุภาคที่เคลือบแล้วกับแผ่นเพลตที่โค้งตรงทางเข้าของไซโคลนในกระบวนการแยก
- การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของสายพานลำเลียงที่เป็นฉนวนกันไฟฟ้า หรือเคลือบด้วยชั้นฉนวนบางๆ ที่กันไฟฟ้าได้สูง
- การบรรจุอนุภาคใส่ลงในถังบรรจุ หรือไซโลที่เป็นฉนวนไฟฟ้า หรือเคลือบด้วยชั้นฉนวนบางๆ ที่กันไฟฟ้าได้สูง

2.1.4.5.5 ประจุไฟฟ้าที่เกิดอยู่บนผิวของอนุภาคที่กองรวมกัน สามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าถูกเป่าหรือเทเข้าสู่ถังหรือไซโลขนาดใหญ่ซึ่งเกิดการขัดสีกันและสะสมอยู่ภายในกองของอนุภาคอย่างหนาแน่นและอาจถ่ายเทจากด้านล่างไปผิวหน้าของกองอนุภาค และจากการคำนวณทางทฤษฎีภายใต้สภาวะจริงในอุตสาหกรรม Glor (1988) พบว่าจะเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-10 มม.) และต้องมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 10^{10} โอห์ม.เมตร แต่ความหมายของอนุภาคที่เกิดประจุไฟฟ้า กับอนุภาคที่เกิดการระเบิดต่างกันตรงที่อนุภาคที่จะระเบิดต้องมีลักษณะเป็นหมอกฝุ่น และพลังงานจากการ สปาร์คสูงสุดเท่ากับ 10 มิลลิจูล นอกจากนั้น Glor (1988) ได้เสนอว่าโอกาสของการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจะมากขึ้นถ้าอัตราการของประจุต่อมวลของอนุภาคมากขึ้น และอัตราการถ่ายเทโดยมวลมากขึ้น

2.1.4.5.6 Lightning type discharges โดยหลักพื้นฐานสามารถเกิดได้เมื่อมีการถ่ายเทอนุภคเข้าถังขนาดใหญ่ในจังหวะที่เกิดหมอกฝุ่นจะเกิดประจุขึ้นโดยฉับพลัน แต่ไม่พบว่าเกิดขึ้นในอุตสาหกรรม และพบว่าพลังงานจากประจุไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิจูล ซึ่งไม่สามารถทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาคได้

รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบช่วงของการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ ดังที่กล่าวมา กับช่วงพลังงานที่ทำให้เกิดการระเบิดในก๊าซ/ไอผสม และอนุภาคในอากาศ

รูปที่ 2.11 กราฟแท่งเปรียบเทียบช่วงของการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ กับช่วงพลังงานที่ทำให้เกิดการระเบิดในก๊าซ/ไอผสม และอนุภาคในอากาศ (Glor,1988)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การทดสอบความไวต่อการจุดชนวนของอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

ขั้นเริ่มต้นของทดสอบถึงการระเบิดได้ของอนุภาค ควรตรวจสอบว่าอนุภาคที่สนใจสามารถเกิดการระเบิดได้หรือไม่ ก็คือสามารถลุกติดไฟได้หรือไม่โดยพิจารณาที่องค์ประกอบทางเคมีของสารดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.2 จากนั้นจึงทดสอบหาสมบัติของการระเบิดอนุภาคซึ่งมักทดสอบในสภาวะที่อนุภาคฟุ้งกระจายในอากาศหรือที่เรียกว่าหมอกฝุ่นเพราะเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่จะเกิดการระเบิดของอนุภาคได้ในอุตสาหกรรม การทดสอบหาสมบัติของการระเบิดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ทดสอบความไวต่อการจุดชนวน (Ignition sensitivity) ประกอบด้วยค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวน พลังงานต่ำสุดในการจุดชนวน และขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจนตามลำดับ
- ทดสอบความรุนแรงของการระเบิด (Explosion severity) ได้แก่ ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน

การทดสอบเหล่านี้เกี่ยวเนื่องกับมาตรการป้องกันการระเบิด อนึ่งผลการทดสอบอาจใช้ในการตัดสินใจว่าวัสดุอนุภาคจะใช้ในกระบวนการในอุตสาหกรรมได้อย่างปลอดภัยหรือไม่

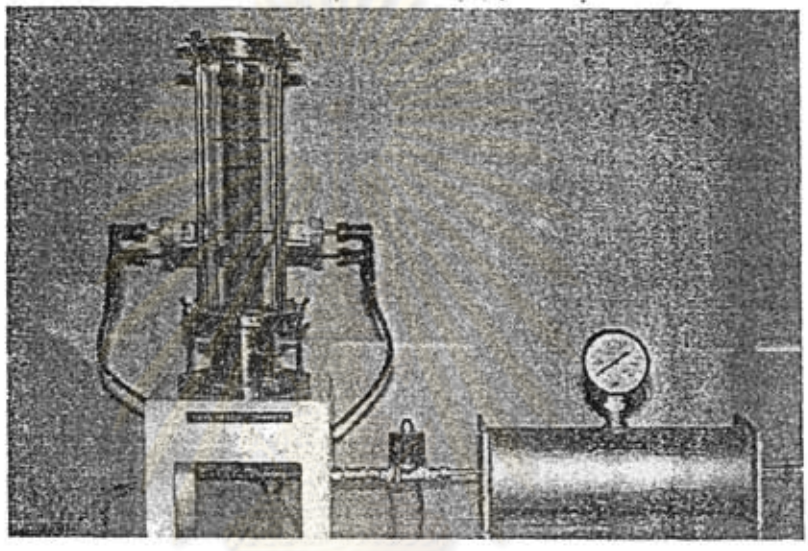
2.2.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosible Dust Concentration, MEC)

ขอบเขตด้านต่ำของการระเบิดคือค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นซึ่งถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ ฝุ่นจะไม่ระเบิด (ดูหัวข้อ 2.1.3) แม้ว่าการทดสอบจะดูเหมือนธรรมดาแต่เป็นการยากที่จะได้ค่าที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากหมอกฝุ่นไม่สม่ำเสมอหรือเป็นหมอกฝุ่นปั่นป่วน การทดสอบมักกระทำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ผลของอุณหภูมิมีผลไม่มากนักจนถึง 100 องศาเซลเซียส ในทางทฤษฎีการระเบิดจะไม่เกิดขึ้นหากควบคุมให้ความเข้มข้นของหมอกฝุ่นไม่มากกว่าขอบเขตด้านต่ำแต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมอนุภาคในทุกๆ กระบวนการได้มีบางอุปกรณ์เท่านั้นที่ควบคุมให้ความเข้มข้นของหมอกฝุ่นต่ำได้ เช่นการพ่นสีด้วยระบบไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคเม็ดสีในอากาศที่ถูกฉีดออกสม่ำเสมอและควบคุมได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ มีดังนี้

2.2.1.1 Hartmann tube

เครื่องทดสอบแบบ Hartmann ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นท่อทรงกระบอกปริมาตร 1.2 ลิตรฝาด้านบนปิดด้วยกระดาษกรอง ตรงกลางเป็นชนวนให้เกิดการลุกไหม้ อนุภาคเข้าจากทางด้านล่างของท่อและกระจายตัวด้วยอุปกรณ์รูปร่างคล้ายร่ม ความเข้มข้นที่ทดสอบได้จากมวลของอนุภาคที่ใส่ไว้ด้านล่างของท่อต่อปริมาตรอากาศในท่อ 1.2 ลิตร เกณฑ์การตัดสินการระเบิดคือ ต้อง

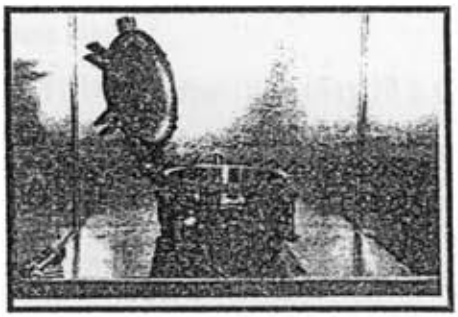
สังเกตเห็นเปลวไฟยาวกว่า 10 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อยพุ่งขึ้นจากแหล่งจุดชนวนHartmann tube สามารถวัดค่าความดันสูงสุดของการระเบิดได้ด้วยแต่อุปกรณ์มีขนาดเล็กและมีทรงเรียวจึงอาจทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผนังท่ออันเนื่องจากการระเบิดได้ ทำให้ค่าความดันสูงสุดที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าความดันสูงสุดที่เป็นจริง (ประมาณ 25-30%) จึงเป็นเหตุผลที่ว่าค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดที่วัดได้จาก Hartmann bomb จึงไม่ค่อยถูกต้องนัก



รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 1.2 ลิตร แบบ Hartmann tube (ดัณฑะพานิชกุล และคณะ, 1996)

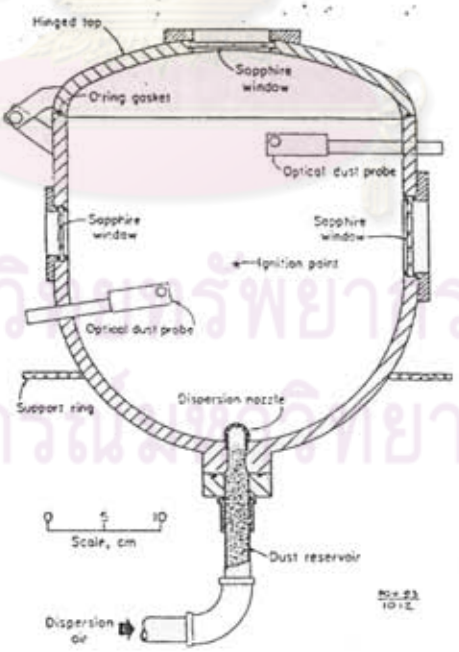
2.2.1.2 US Bureau of Mines' 20 litre explosion vessel

พัฒนาขึ้นโดย Hertzberg, Cashdollar และ Opferman (1979) ที่ US Bureau of Mines ในครั้งแรกเป็นถังขนาด 8 ลิตรแต่พบว่าการกระจายตัวของหมอกฝุ่นไม่สม่ำเสมอและพลังงานในการจุดชนวนไม่เพียงพอ ดังนั้น Cashdollar และ Hertzberg พัฒนาให้ใหญ่ขึ้นเป็นถังขนาด 20 ลิตรดังรูปที่ 2.13 ให้ผลการทดลองถูกต้องมากขึ้นและมีพลังงานในการจุดชนวนที่มากเพียงพอ ภาพตัดขวางภายในของเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นหัววัด (probe) ความเข้มของหมอกฝุ่นด้วยระบบแสง



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 20 ลิตร
ของ US Bureau of Mines (Cashdollar and Hertzberg, 1985)

เครื่องทดสอบนี้มักใช้ทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของถ่านหินและพบว่าค่าพลังงานที่ใช้จุดชนวนมีค่าประมาณ 2500 จูล (Cashdollar et al., 1985) เกณฑ์การตัดสินการระเบิดคือความดันที่วัดได้จากการระเบิดต้องมีค่ามากกว่าเป็น 2 เท่าของความดันสัมบูรณ์เริ่มต้น ดังนั้นความดันเริ่มต้นต้องไม่น้อยกว่า 1 บาร์เกจ มีผลให้อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันมีค่าสูงเกินความจริง 5 บาร์ต่อวินาที

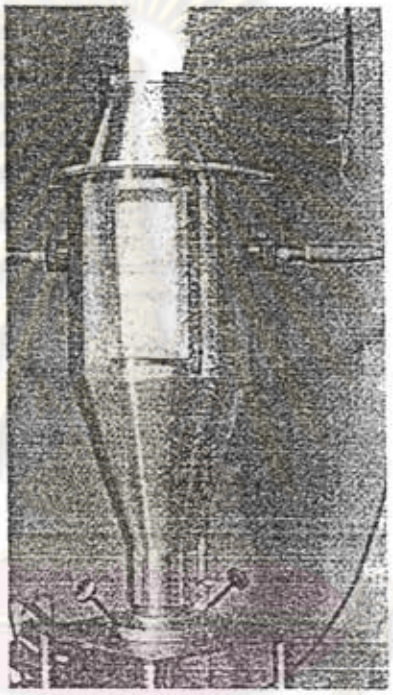


รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 20 ลิตร
ของ US Bureau of Mines (Cashdollar and Hertzberg, 1985)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1.3 Nordtest Fire 011

พัฒนาขึ้นโดย Nordtest แสดงดังรูปที่ 2.15 เป็นถังทรงสูงลักษณะคล้ายไซโคลนมีปริมาตร 15 ลิตร ในการทดลองได้เสนอระบบจุดชนวนไว้ว่าเป็นการอาร์คของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ห่างกัน 3 มิลลิเมตร มีพลังงาน 200 วัตต์ เวลาหน่วงในการจุดชนวน 0.1 วินาที ส่วนอนุภาคใส่ไว้ด้านล่างของถังหลักการเดียวกับ Hartmann tube



รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบการระเบิดของอนุภาคขนาด 15 ลิตร
พัฒนาโดย Nordtest (Eckhoff, 1991:531)

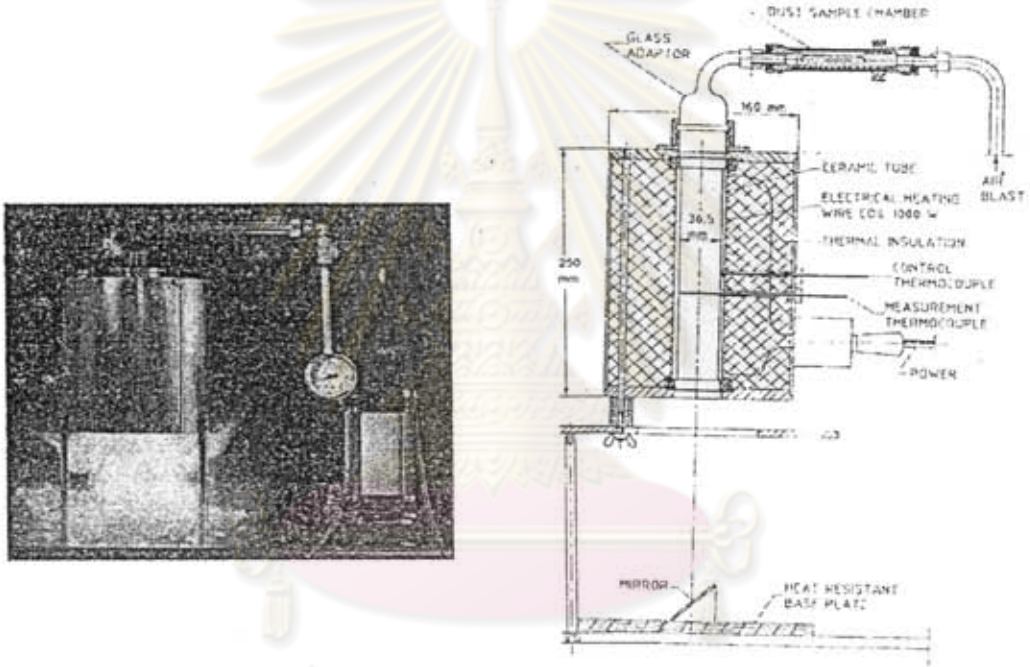
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Temperature, MIT)

อุณหภูมิต่ำสุดของการจุดชนวนวัดได้โดยใช้เครื่องมือทดสอบการระเบิด เมื่อใดก็ตามที่สังเกตเห็นเปลวไฟ อุณหภูมิของอากาศจะถูกปรับให้ลดลง จนกระทั่งอนุภาคไม่สามารถติดไฟเป็นเปลวได้ที่ความเข้มข้นใดๆ ค่านี้เหมาะกับการป้องกันการระเบิดของหมอกฝุ่นในพื้นผิวที่ร้อนของเตาอบ เตาเผา และเครื่องอบแห้ง อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

2.2.2.1 Godbert-Greenwald furnace

เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในการหาค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวนของหมอฝุ่นที่สัมผัสกับพื้นผิวที่ร้อน ภายในเครื่องประกอบด้วยท่อเซรามิกทรงกระบอกวางแนวตั้งด้านล่างเปิดเพื่อให้อนุภาคออกถูกพันด้วยขดลวดความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และมีฉนวนหุ้มท่ออยู่ อนุภาคจะถูกเป่าด้วยลมกลายเป็นหมอกฝุ่นเข้าทางด้านบนของท่อการทดลองจะปรับอุณหภูมิท่อไปเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิที่หมอฝุ่นลุกติดไฟดังรูปที่ 2.16 ค่าอุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวนของถ่านหินเมื่อทดสอบด้วยเครื่องนี้จะมีค่าเท่ากับ 310 องศาฟาเรนไฮต์

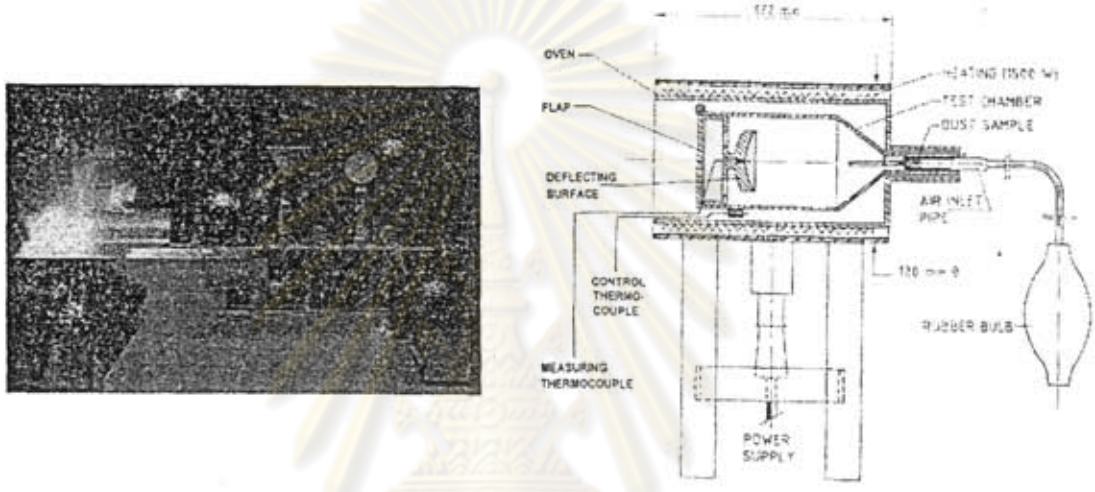


รูปที่ 2.16 Godbert-Greenwald furnace

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2.2 BAM furnace

หลักการเหมือน Godbert-Greenwald furnace แต่ท่อจะวางตามแนวนอน ในท่อจะมีแผ่นโลหะพื้นที่หน้าตัด 20 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทราบอุณหภูมิที่แน่นอนหมอกฝุ่นที่ถูกพ่นเข้ามาจะชนกับแผ่นโลหะดังกล่าว การทดลองจะทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนเกิดสังเกตเห็นเปลวไฟขึ้นนาน 10 วินาที ถือว่าเป็นอุณหภูมิต่ำสุดของการจุดชนวน ลักษณะของ BAM furnace แสดงดังรูปที่ 2.17

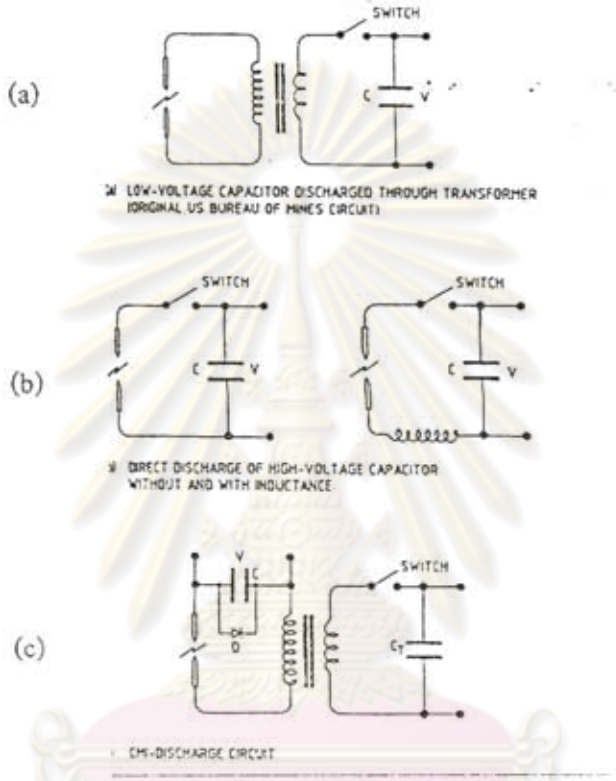


รูปที่ 2.17 BAM furnace

2.2.3 พลังงานต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Energy, MIE)

ค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวนวัดได้จากค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ผลิตสปาร์คที่ขั้วอิเลคโทรด ค่าพลังงานนี้หาได้จาก $E = 1/2\ CV^2$ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.4.4.1 การวัดค่าพลังงานอาจใช้การอินทิเกรตผลคูณระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเลคโทรดในระยะเวลาที่มีการสปาร์ค อย่างไรก็ตามยังเป็นที่ถกเถียงกันว่า การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเป็นการวัดพลังงานในการจุดชนวนอนุภาคบางชนิดมีค่า MIE ต่ำเท่าก๊าซ [ไฮโดรเจน 0.02 มิลลิจูล, มีเธน 0.3 มิลลิจูล, ไลโคโพเดียม (31 ไมครอน) 5-15 มิลลิจูล, แอนทราควิโนน (18 ไมครอน) 2-6 มิลลิจูล] อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือ Hartmannn tube เมื่อขั้วอิเล็กโทรดสามารถปรับค่าประจุและความต่างศักย์ได้ โดยวงจรที่ใช้ในการจุดชนวนที่ได้พัฒนามี 3 แบบ ดังรูปที่ 2.18 แบบแรกดังรูปที่ 2.18 (a) พลังงานจากตัวเก็บประจุ C และความต่างศักย์กระแสตรง V ภายในหม้อแปลง โดยสมมุติว่าค่าพลังงานเท่ากับ $1/2\ CV^2$ เมื่อไม่คิดพลังงานสูญเสียในหม้อแปลง แบบที่สองจึงใช้การต่อวงจรโดยตรงของตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์สูง ดังรูปที่ 2.18 (b) มีทั้งแบบที่มีและไม่มีอินดักเทนที่มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเฮนรีวงจรที่ใส่ขดลวดอินดักเทนจะเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานระหว่างการสปาร์คซึ่งก็มีอยู่

ทั้งในแบบแรก (หม้อแปลง) และแบบสุดท้าย CMI ดังรูปที่ 2.18 (c) เป็นการรวมทั้งสองแบบเข้าด้วยกันโดยจะวัดค่าพลังงานได้โดยตรงจากการอินทิเกรตพื้นที่ได้กราฟระหว่างความต่างศักย์และระยะเวลาในการสปาร์ค



รูปที่ 2.18 วงจรของการจุดชนวน 3 แบบเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวน

การใช้วงจรทั้งสามแบบนี้ไม่ระบุชัดว่าให้ใช้กับเครื่องทดสอบใดเพียงให้เลือกใช้วงจรอย่างใดอย่างหนึ่ง โดย International Electrotechincal Commission (IEC) ได้ระบุสมบัติของระบบจุดชนวนไว้ดังนี้

- ค่าอินดักเทนของวงจรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 มิลลิเฮนรี
- ค่าความต้านทานของวงจรมีค่าน้อยกว่า 5 โอห์ม
- ขั้วอิเล็กโทรดทำจากแสตนเลส ทองแดง ทองเหลือง หรือทังสเตน
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วอิเลคโทรดเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร
- ช่องว่างระหว่างขั้วอิเลคโทรดเท่ากับ 6 มิลลิเมตร
- ตัวเก็บประจุเป็นแบบมีค่าอินดักเทนต่ำและต้านทานต่อกระแสที่มาเป็นช่วงๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การเก็บประจุของขั้วอิเลคโทรดต่ำเท่าที่จะเป็นได้
- การป้องกันไม่ให้ไฟฟ้ารั่วระหว่างขั้วต้องมีการป้องกันอย่างสูง

2.2.4 ขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจน (Limiting Oxygen Concentration, LOC)

อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่ยอมให้มีได้เพื่อป้องกันการระเบิด ทดลองโดยลดความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศลงเรื่อยๆ โดยการเพิ่มก๊าซเฉื่อย จะถึงจุดที่อนุภาคไม่สามารถจุดระเบิดได้อีกต่อไป ค่าความเข้มข้นนี้คือขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจน ตามปกติจะใช้ก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาร์กอน แทนที่ออกซิเจน อนึ่งการใช้ก๊าซจากการเผาไหม้หรือไอน้ำก็ใช้ได้ถ้าไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคนั้นๆ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรทรงกลมซึ่งจะกล่าวรายละเอียดของเครื่องในหัวข้อ 2.3

ในการเติมก๊าซเฉื่อยเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการป้องกันการระเบิดของอนุภาคในอุตสาหกรรม แม้ว่าจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายเพิ่มและจะต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนที่ดีพอ ในทางปฏิบัติยอมให้มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดต่ำกว่าค่าขอบเขตอีก 2% เพื่อเหตุผลด้านความปลอดภัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การทดสอบความรุนแรงของการระเบิดอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ

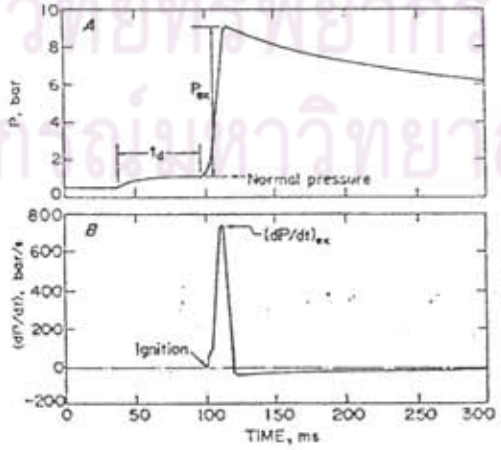
ถ้าเกิดการระเบิดของอนุภาคขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมภัยอันตรายและความสูญเสียจะเกิดขึ้นสูง ถ้าการระเบิดเกิดเริ่มแรกภายในโครงสร้างที่ปิดมิดชิดหรือในอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรงพอที่จะทนความดันสูงเต็มที่จากการระเบิด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจะบอกถึงความรุนแรงของการระเบิด ส่วนความดันสูงสุดจากการระเบิดเป็นตัวบอกให้ทราบว่าโครงสร้างล้อมรอบจะต้องแข็งแรงเท่าไร จึงจะทนแรงระเบิดได้โดยไม่พังเสียหาย ดังนั้นค่าสูงสุดที่สำคัญคือ

- ความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{max})
- อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ โดยที่ P คือความดัน และ t คือเวลา

โดยปกติค่าสูงสุดทั้งสองเป็นค่าเฉพาะตัวของอนุภาคที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ค่าทั้งสองนี้หาได้จากการทดลองตลอดช่วงกว้างของความเข้มข้น

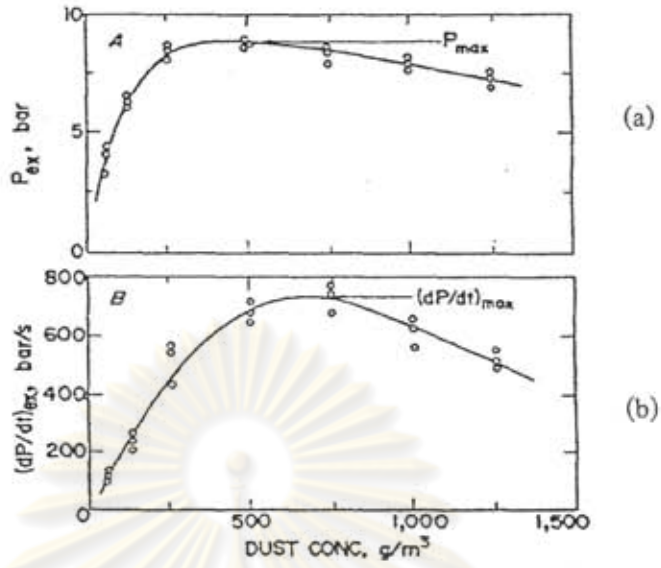
2.3.1 ความดันสูงสุดของการระเบิด (Maximum Explosion Pressure, P_{max})

ในการวัดความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคเริ่มต้นที่กำหนดค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นค่าหนึ่งจากนั้นทำการทดสอบการระเบิดภายในอุปกรณ์ปิดสนิทเพื่อวัดแรงดันจากการระเบิด (P_{ex}) จากกราฟการทดลองระหว่างความดันกับเวลาดังรูปที่ 2.19 (a) และเมื่อทดสอบที่ความเข้มข้นต่างๆ จะได้ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดดังรูปที่ 2.20 (a) ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดแปรผันโดยตรงกับค่าความดันเริ่มต้นของระบบหากความดันเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 1 บรรยากาศ ค่าความดันสูงสุดของการระเบิดจะยิ่งมากขึ้น (ดูหัวข้อ 2.4.5) และเนื่องจากอุปกรณ์



รูปที่ 2.19 ผลการทดลองค่าความดันจากการระเบิดอนุภาคที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง (ASTM E1226, 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเข้มข้นค่าต่างๆ ของวัสดุอนุภาค (ASTM E1226, 2000)

ในกระบวนการจะเชื่อมต่อกันดังนั้นหากเกิดการระเบิด ณ จุดหนึ่งและความดันจากการระเบิดสูงกว่าความดันเริ่มต้นของอุปกรณ์ (ส่วนมากเท่ากับความดันบรรยากาศ) ที่เชื่อมต่อทำให้เกิดการแพร่กว้างของเปลวไฟไปยังหมอกฝุ่นที่ยังไม่ระเบิด ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจึงใช้เป็นค่าที่บอกว่าโครงสร้างของอุปกรณ์เหล่านั้นต้องทนแรงดันได้เท่าใดหรืออุปกรณ์นิรภัยเพื่อลดแรงดันจากการระเบิดต้องทนแรงดันเท่าใด ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดในการทดลองจะใช้ความดันเริ่มต้นเท่ากับความดันบรรยากาศในเครื่องทดสอบมาตรฐานที่ปิดสนิทและมีปริมาตรคงที่ส่วนมากมีปริมาตร 20 ลิตร และ 1 ลูกบาศก์เมตรดังกล่าวในหัวข้อ 2.3.3 และ 2.3.5 แต่โดยหลักความจริงแล้วค่าความดันสูงสุดไม่ขึ้นกับปริมาตรของเครื่องทดสอบ

2.3.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure rise, $(dP/dt)_{max}$

จากรูปที่ 2.19 (a) เมื่อนำมาหาค่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงเวลา คือ$(dP/dt)_{ex}$ มาพล็อตกราฟกับเวลาจะได้ดังรูปที่ 2.19 (b) และเมื่อทดสอบแรงดันที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ก็จะได้ดังรูปที่ 2.20 (b) นั่นคือได้ค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ ค่านี้บางทีก็เรียกว่าค่าความรุนแรงของการระเบิด (Explosion violence) เนื่องจากเป็นค่านี้เป็นค่าที่บอกถึงความรุนแรงของการระเบิดจากอนุภาคคือหากมีค่ามากแสดงว่ามีความรุนแรงมาก โดยทั่วไปค่า $(dP/dt)_{max}$ และค่าความดันสูงสุดจะเกิดที่ความเข้มข้นต่างกัน และค่านี้จะขึ้นกับปริมาตรของเครื่องทดสอบคือจะมีค่าลดลง

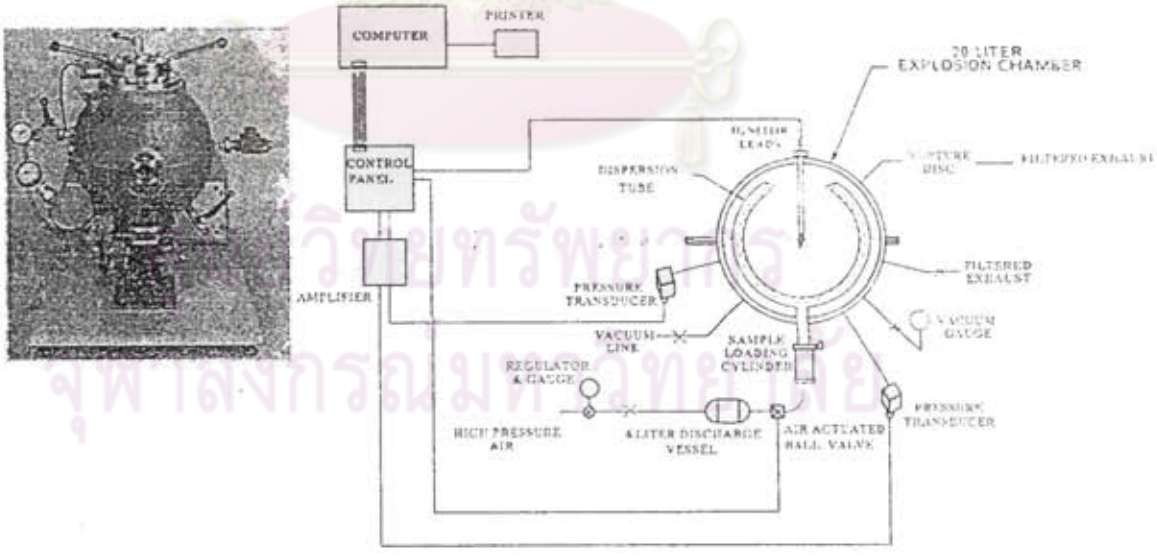
เมื่อเครื่องทดสอบมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่วนค่า $K_{St(max)}$ (ดูหัวข้อ 1.6) ยังคงขึ้นกับชนิดของวัสดุอนุภาค และวิธีการทดสอบเท่านั้น ไม่ขึ้นกับปริมาตรของเครื่องทดสอบ และจากสมการที่ 1.1 สำหรับเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร จะได้ว่า

$$0.02\left[m^3\right]^{1/3} \times \left(dP/dt\right)_{\max}\left[bar/s\right] \;=\; K_{St(\max)}\left[bar \bullet m/s\right] \qquad (2.7)$$

ซึ่งวัสดุอนุภาคที่ใช้อยู่ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ควรที่จะจำแนกชั้นความรุนแรงจากค่า K_{St} ดังตารางที่ 1.1 ประโยชน์ของค่า $(dP/dt)_{max}$ คือเป็นตัวแปรหนึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ระบายความดันจากการระเบิดในอุตสาหกรรม

2.3.3 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร

เครื่องทดสอบนี้ถูกพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Siwek (2001) ด้วยจุดประสงค์เพื่อหาค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันให้เหมือนกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบมาตรฐาน International Standardization Organization, IOS ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร เครื่องทดสอบ Siwek sphere แสดงดังรูปที่ 2.21 พร้อมอุปกรณ์ประกอบในการทดสอบ



รูปที่ 2.21 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตร (Eckhoff, 1991:540)

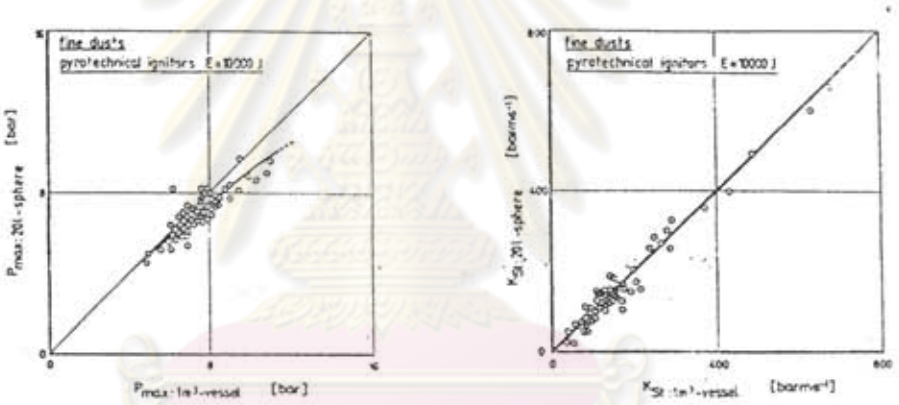
เครื่องทดสอบทรงกลมขนาด 20 ลิตรเป็นเหมือนเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.ที่ลดขนาดลงคือมีระบบการกระจายอนุภาคเหมือนกันประกอบด้วยกระเปาะใส่อนุภาคที่อัดอากาศแรงดันสูงส่งผ่านอุปกรณ์กระจายอนุภาคลักษณะคล้ายท่อเจาะรูดังรูปที่ 2.25 (Perforated dust dispersion tube or Perforated annular nozzle) สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกันซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐานของ American Society for Testing and Material, ASTM (ASTM E1226) ระบุแหล่งพลังงานในการจุดชนวนเท่ากับที่ใช้ในเครื่องขนาด 1 ลบ.ม.คือ 10 กิโลจูลจากชนวนสารเคมี เวลาหน่วงในการจุดชนวน 60 มิลลิวินาทีแต่ในทางปฏิบัติต้องน้อยกว่าเนื่องจากเครื่องมีขนาดเล็กกว่า จุดสำคัญในการทดสอบหาค่าอัตราการเพิ่มความดันจากการระเบิดจุดหนึ่งคือถ้วยเล็กที่ใส่สารในการจุดชนวนระเบิด Zhu *et al* (1988) พบว่าในการทดสอบอนุภาคชนิดเดียวกันโดยใช้ถ้วยที่เป็นโลหะ และถ้วยที่เป็นพลาสติกใส่ชนวนแล้วให้ค่า K_{St} ที่ต่างจาก

ในการทดสอบมักพบว่าอนุภาคที่นำมาทดสอบจะเหนียว หรือมีเส้นใยสูงทำให้เกิดการอุดตันภายใน perforated dispersion tube จึงได้มีการพัฒนาหัวฉีดกระจายอนุภาคแบบใหม่ที่มีลักษณะเปิดเรียกว่า 'rebound' nozzle แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่ง Siwek (2001) กล่าวว่าหัวฉีดแบบใหม่ให้ค่าความดันสูงสุด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน และ ค่า K_{St} ที่ใกล้เคียงกับเมื่อใช้หัวฉีดแบบเดิม

รูปที่ 2.22 หัวฉีดแบบใหม่ rebound nozzle สำหรับกระจายอนุภาคภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร

เนื่องจากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร มีค่าน้อยกว่าเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.ทำให้ค่าความดันสูงสุดของการระเบิดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 2.23 เนื่องจากผลของการหล่อเย็น (cooling effect) และถ้าเปรียบเทียบกราฟระหว่างความดันที่วัดได้กับเวลาที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.24 พบว่าค่าความ

ดันลดลงอย่างรวดเร็วกว่าหลังการระเบิดเมื่อทดสอบในเครื่องขนาด 20 ลิตร ดังนั้นค่าความดันที่ได้จึงมีค่าเดียวที่เด่นชัด แต่ในเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.จะต้องเฉลี่ยค่าความดันเนื่องจากมีช่วงกว้าง ทำให้สามารถชดเชยความต่างกันของค่าความดันสูงสุดที่ได้จากทั้งสองเครื่องส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งอาจชดเชยด้วยพลังงานของชนวนจุดระเบิดในเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.ซึ่งในทางปฏิบัติมีค่ามากกว่าเพราะเครื่องมีขนาดใหญ่กว่า (ซึ่งอาจทำให้ค่าความดันมีค่ามากขึ้น) จึงเป็นเหตุเป็นผลว่าค่าความดันสูงสุดของการระเบิดวัสดุอนุภาคที่ได้จากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรมีค่าเทียบเท่ากับที่ได้จากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. ส่วนค่า $K_{St(max)}$ ที่คำนวณได้จากค่า $(dP/dt)_{max}$ เมื่อทดสอบด้วยเครื่องขนาด 20 ลิตร เทียบกับเครื่องขนาด 1 ลบ.ม.ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากดังรูปที่ 2.23 และถ้าต้องการให้มีความถูกต้องสูงแล้วควรใช้ aluminum dusts ($K_{St(max)} > 700$ bar.m/sec) เป็นวัสดุอนุภาคมาตรฐาน



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบ 1 m^3 ISO vessel และ 20 litre Siwek sphere (Eckhoff, 1991:541)

นอกจากนี้เครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรยังใช้ทดสอบกับก๊าซ/ไอของตัวทำละลายที่ลุกติดไฟได้ผสมอากาศ เนื่องจากปริมาตรน้อยสุดที่สามารถทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของการระเบิดของก๊าซผสมคือ 1 ลิตร ดังนั้นเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรจึงสามารถใช้ทดสอบได้ถ้าออกแบบให้ทดแรงดันสูงๆ และติดตั้งระบบหล่อเย็นนอกจากนี้ "Hybrid mixtures" คือหมอกฝุ่นที่มีก๊าซเชื้อเพลิงหรือไอของสารที่ลุกติดไฟได้ผสมอยู่ด้วย ก็สามารถทดสอบกับเครื่องขนาด 20 ลิตรได้เมื่อเทียบผลการทดสอบกับเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.แล้วให้ค่าใกล้เคียงกัน

2.3.4 นิยามค่าความดันและการปรับแก้ค่าความดันจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร

เพื่อความเข้าใจในทางเดียวกันจึงมีนิยามของเทอมความดันที่ได้จากเครื่องทดสอบระบุไว้ตามมาตรฐาน ASTM E 1226 (2000) โดยเริ่มจากรูปที่ 2.19 (a) เป็นกราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบ ณ การทดสอบแต่ละครั้งที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งนำมาแสดงให้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.24 นิยามเทอมความดันจากเครื่องทดสอบ ได้แก่

P_{ex} **Maximum explosion overpressure** คือ ผลต่างระหว่างความดัน ณ เวลาที่จุดชนวนระเบิด (ความดันปกติ) กับความดัน ณ จุดสูงสุดของกราฟ

P_m **Corrected explosion overpressure** คือ ค่าความดัน P_{ex} ที่ทำการแก้ค่าแล้วเนื่องจากผลของการหล่อเย็น และผลของความดันของชนวนระเบิด

P_{max} **Maximum explosion overpressure** คือ ค่าความดัน P_m สูงสุด เมื่อทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคหลายๆ ค่า

$(dP/dt)_m$ **Rate of pressure rise with time** คือ ค่าความชันสูงสุดของเส้นสัมผัสที่ลากผ่านจุดที่มีความหักเหของมุมที่กระทำต่อแกน y มากที่สุด (เรียกว่า point of inflexion, W_p) ของกราฟในส่วนที่กราฟพุ่งขึ้นจากรูปที่ 2.24

$(dP/dt)_{max}$ **Maximum rate of pressure with time** คือ ค่า $(dP/dt)_m$ สูงสุดเมื่อทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคหลายๆ ค่า

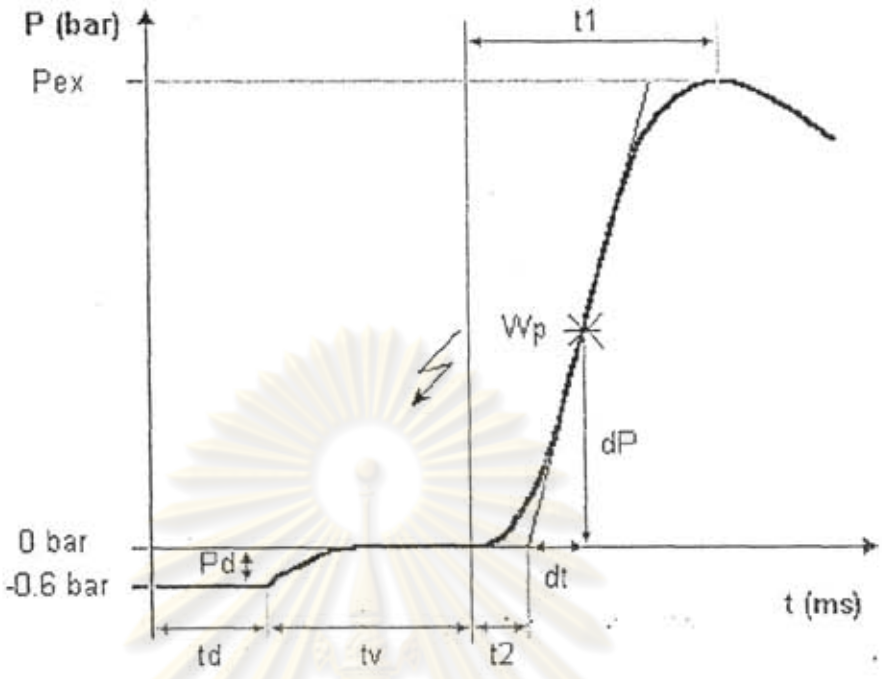
K_{max} **Product specific constant** มีค่าเท่ากับ $0.27144 \times (dP/dt)_{max}$ (จากสมการที่ 2.7)

t1 **Duration of combustion** คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่จุดชนวนระเบิด กับเวลา ณ จุดที่ความดันมีค่าสูงสุด

t2 **Induction time** คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่จุดชนวนระเบิด และเวลา ณ จุดตัดของเส้นสัมผัส inflexion point กับ เส้นตรง (ขนานแกน x) ที่ลากผ่านเส้นความดัน 0 บาร์ (ความดันปกติ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I23322718



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการระเบิด (P_{ex}) และ เวลาของการระเบิดวัสดุอนุภาคภายในเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร

ตัวแปรที่สามารถควบคุมเพื่อใช้ปรับปรุงเครื่องทดสอบเพื่อให้ได้ค่าความดันจริง (P_{ex}), P_m, $(dP/dt)_m$, t1 และ t2 ที่ถูกต้อง มีดังนี้

P_d **Expansion pressure of storage container** คือ ผลต่างของความดันที่ทำให้เป็นสุญญากาศ (pre-vacuum) และความดันปกติ ตามมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.6 บาร์ (0.55 ถึง 0.7 บาร์ ก็เป็นค่าที่ยอมรับได้)

td **Time-delay of the outlet vale** คือผลต่างของเวลา ณ เวลาที่เริ่มเปิด outlet valve กับเวลาที่ความดันเริ่มเพิ่มขึ้นเป็นครั้งแรก โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 มิลลิวินาที อีกประการหนึ่งขึ้นกับความสกปรกของ outlet valve และ/หรืออุปกรณ์กระจายอนุภาค

tv **Ignition delay time** คือ ผลต่างของเวลา ณ เวลาที่ td กับเวลาที่จุดชนวนระเบิด ค่านี้มีผลต่อความปั่นป่วนของหมอกฝุ่นและถือเป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญที่สุด

2.3.4.1 การปรับแก้ค่าความดัน เมื่อ $P_{ex} > 5.5$ บาร์

ดังที่กล่าวถึงเหตุผลที่ทำให้ค่าความดันสูงสุดของการระเบิดจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ดังนั้นการปรับแก้ค่า P_{ex} ให้เป็นค่า P_m ในกรณีที่ P_{ex} มีค่ามากกว่า 5.5 บาร์ ทำได้โดยอาศัยสมการดังนี้

$$Pm = 0.775 \times P_{ex}^{1.15} \quad (2.8)$$

เมื่อทำการปรับแก้ค่าดังสมการจะทำให้ได้ค่า P_m ที่เทียบเท่ากับค่าความดันที่ได้จากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.

2.3.4.2 การปรับแก้ค่าความดัน เมื่อ $Pex < 5.5$ บาร์

เนื่องจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรมีปริมาตรน้อย ดังนั้นความดันที่วัดได้เมื่อมีค่าน้อยกว่า 5.5 บาร์ จะต้องพิจารณาผลของพลังงานจากการจุดชนวนระเบิด จากการทดสอบเมื่อไม่มีหมอกฝุ่น (blind test) มีแต่เพียงชนวนระเบิดอย่างเดียวจะได้ค่าความดัน (P_{ex}) เท่ากับ 1.6 บาร์ และในการทดสอบที่มีหมอกฝุ่นค่าความดัน P_{ex} ที่ค่อยเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเป็นผลมาจากชนวนระเบิด แต่ต่อไปจะเป็นผลมาจากความดันของของหมอกฝุ่นเอง เพราะผลของชนวนระเบิดจะลดลงเมื่อมีค่าพลังงาน (IE) เหลือน้อยกว่า 1000 จูล ซึ่งไม่ต้องนำมาพิจารณา การปรับแก้ค่า P_{ex} ให้เป็นค่า P_m ในกรณีที่ P_{ex} มีค่าน้อยกว่า 5.5 บาร์ ทำได้โดยอาศัยสมการ ดังนี้

$$P_m = 0.55 \times (P_{ex} - P_{ci})/(5.5 - P_{ci}) \quad (2.9)$$

เมื่อ P_{ci} = pressure due to chemical igniters

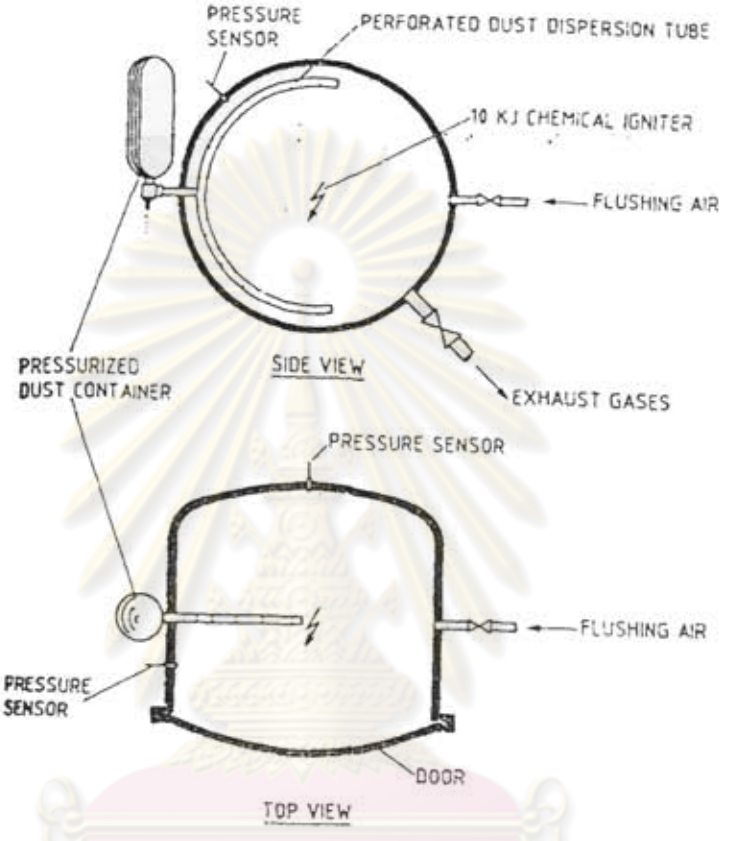
= 1.6 bar × IE/10,000

2.3.5 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร (The 1 m^3 standard ISO vessel)

รูปที่ 2.25 แสดงด้านข้างและด้านบนของเครื่องทดสอบ จากรูปประกอบด้วยกระเปาะขนาด 5 ลิตรเพื่อใส่อนุภาคและอัดอากาศเข้าไป 20 บาร์เพื่อเกิดความดันแตกต่างระหว่างกระเปาะและตัวถังทดสอบ (explosion chamber) ในการพาอนุภาคเข้าสู่เครื่องโดยผ่าน วาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตรซึ่งจะเปิดให้อนุภาคเข้าเป็นเวลา 10 มิลลิวินาที วาล์วก็ต่อกับอุปกรณ์กระจายอนุภาคมีลักษณะเป็นท่อโค้งครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตรเจาะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

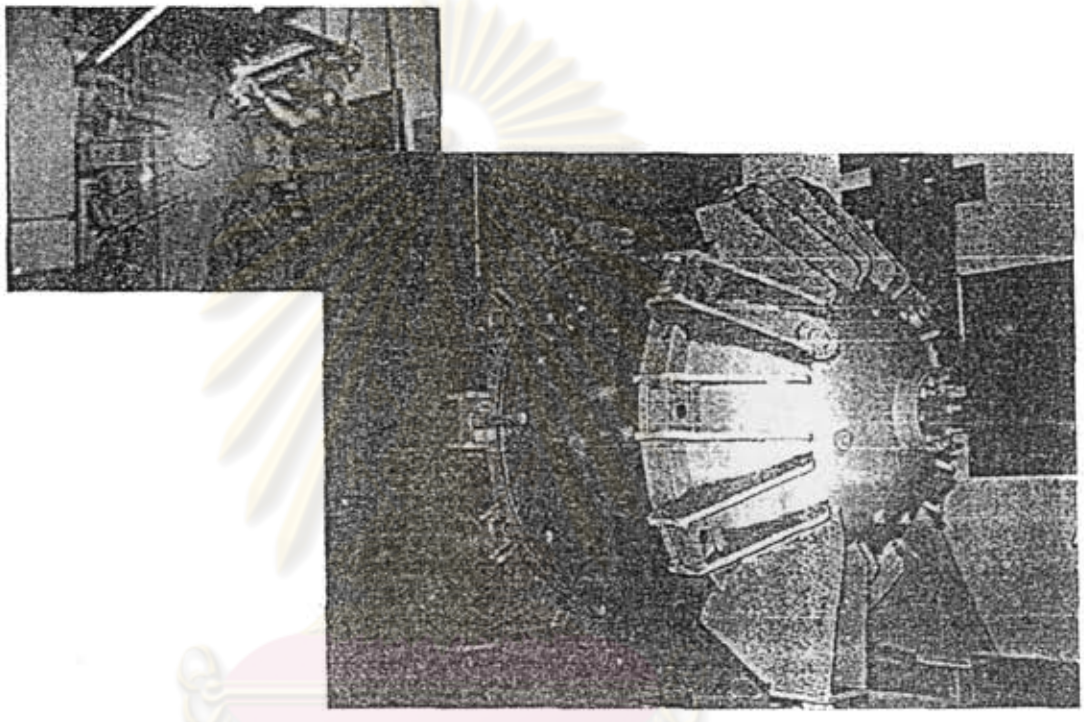
รูตลอดท่อมีขนาดประมาณ 4-6 มิลลิเมตร จำนวนรูที่เจาะต้องทำให้ได้พื้นที่ตัดขวาง (cross-section area) ของรูทั้งหมดมีค่าประมาณ 300 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 2.25 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐาน ISO (Eckhoff, 1991:539)

แหล่งพลังงานในการจุดชนวนใช้สารเคมีในการจุดระเบิด (คล้ายการจุดดอกไม้ไฟ) ซึ่งให้พลังงานทั้งหมด 10 กิโลจูลโดยชนวนจะลุกไหม้เมื่อผ่านเวลาหน่วงไป 0.6 วินาทีเพื่อกระจายอนุภาค น้ำหนักของแหล่งชนวนที่ใช้เท่ากับ 2.4 กรัม ประกอบด้วย 40% zirconium, 30% barium nitrate และ 30% barium peroxide สารชนวนเหล่านี้ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากลวดนำไฟฟ้าซึ่งอยู่กึ่งกลางของถังทดสอบ และขณะเกิดการระเบิดภายในถังทดสอบหัววัดแรงดัน (pressure transducer) สองตัวที่ผนังของถังจะส่งค่าแรงดันที่วัดได้มาประมวลผลเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในถังทดสอบ ส่วนค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดก็ทดลองเช่นเดียวกับการทดสอบในเครื่อง 20 ลิตร ดังนั้นรูปที่ 2.19 และ 2.20 ก็ประยุกต์ใช้กับเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของเครื่องทดสอบดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณของอนุภาคและเวลาในการ

ทดลองแต่ละครั้งมากจึงมีข้อจำกัดของจำนวนครั้งในการทดสอบไม่เท่ากับปกติที่ควรปฏิบัติ ส่วนค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจากเครื่องทดสอบนี้คาดว่าน่าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความดัน adiabatic สูงสุดที่ได้จากทฤษฎี รูปที่ 2.26 แสดงเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO ที่ใช้งานได้จริง



รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ประกอบด้วยฝาครึ่งวงกลมประกบติดกันและสามารถถอดออกจากกันได้ (Eckhoff, 1991:539)

เครื่องทดสอบดังที่กล่าวมาถูกเลือกให้เป็นเครื่องทดสอบมาตรฐานในการวิเคราะห์หาค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันของวัสดุอนุภาค กล่าวคือ เครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรถูกเลือกให้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการทดสอบค่าแรงดันทั้งสองค่าตามมาตรฐาน ASTM (2000) และเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐาน ISO โดยใช้ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดเป็นเกณฑ์ของการระเบิดซึ่งควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5 บาร์เกจซึ่งความดันนี้รวมค่าความดัน 1.1 ± 0.1 บาร์เกจจากการลุกไหม้ชนวนที่ให้พลังงาน 10 กิโลจูลเพียงอย่างเดียวโดยปราศจากอนุภาค ในการทดสอบหากลดปริมาณของอนุภาคทีละ 0.2 กรัมและวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงปริมาณอนุภาคที่ทำให้ได้ความดันสูงสุดมีค่าต่ำกว่า 1.5 บาร์เกจโดยทดสอบซ้ำที่

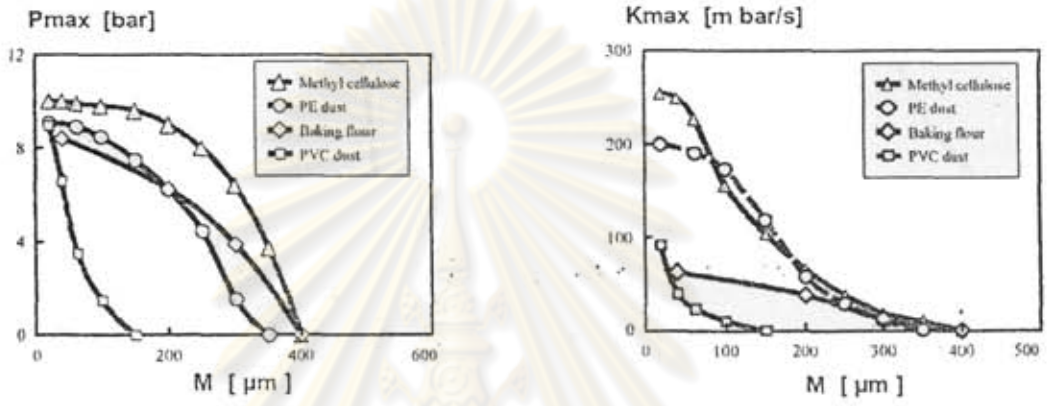
ปริมาณอนุภาคเท่าเดิมสามครั้งแล้วให้สันนิษฐานไว้ก่อนว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ (Minimum Explosible Concentration, MEC) มีค่าอยู่ระหว่างค่าความเข้มข้น (มวลของอนุภาคที่กระจายในถังต่อปริมาตรของถังทดสอบ) สูงสุดที่ทำให้ได้แรงดันต่ำกว่า 1.5 บาร์เกจกับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้ได้แรงดันเท่ากับ 1.5 บาร์เกจหรือมากกว่าเล็กน้อยเมื่อทำการทดลองซ้ำแล้วสามครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความดันการระเบิดของวัสดุอนุภาค

2.4.1 ผลของขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคมีผลต่อความดันจากการระเบิด ในที่นี้จะพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (median size) จากกลุ่มอนุภาคจำนวน 50 เปอร์เซ็นต์ของกราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution curve)



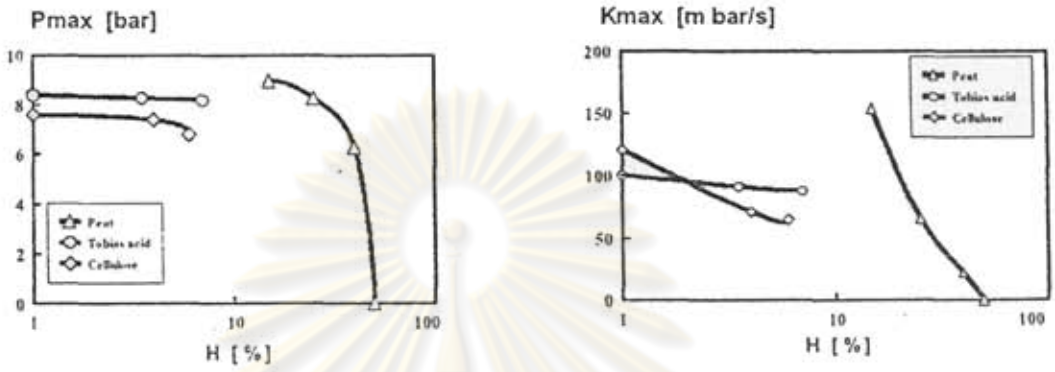
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) (R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

จากรูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างของผลของขนาดที่มีต่อค่าความดันสูงสุดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) จะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงค่าทั้งสองค่ามีค่าสูงขึ้น Siwek (2001: 12) กล่าวว่าขนาดอนุภาคตัวอย่างที่เหมาะสมในการทดสอบด้วยเครื่องมาตรฐานขนาด 20 ลิตรควรมีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 63 ไมครอน และจากประสบการณ์พบว่าอุปกรณ์กระจายอนุภาคและวาล์วเปิดปิดการเข้าของอนุภาคสู่ถังทดสอบ มีผลในการลดขนาดของอนุภาคก่อนเข้าสู่ถังทดสอบนั่นคืออนุภาคมีขนาดเล็กลงโดยกระบวนการกระจายอนุภาค และถ้าอิทธิพลนี้มีผลต่อขนาดอนุภาคอย่างมาก การวัดขนาดอนุภาค (เมื่อไม่มีการจุดระเบิด) หลังจากผ่านอุปกรณ์กระจายอนุภาคก็เป็นสิ่งจำเป็น

2.4.2 ผลของความชื้น

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาค (Relative product humidity; H) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำในอนุภาคต่อปริมาณอนุภาคแห้ง เป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความดันสูงสุดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิด เรามักได้ยินว่าวัสดุอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์ของ

น้ำเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการระเบิดของวัสดุอนุภาค จากรูปที่ 2.28 อาจโต้แย้งสมมติฐานนี้ เนื่องจากกราฟแสดงให้เห็นว่าความชื้นของอนุภาคต้องต่ำกว่า 10% จึงจะหลีกเลี่ยงผลจากความชื้นต่อความดันจากการระเบิด



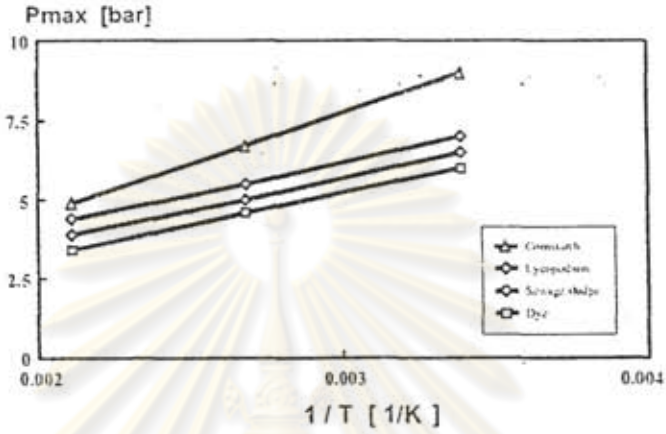
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) (R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

ในรูปที่ 2.28 แกนนอนเป็นแกนแบบล็อกกาลิทึม ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลของความชื้นในช่วงต่ำกว่า 10% ได้ชัดเจน จากกราฟเมื่อความชื้นของอนุภาคมีมากขึ้นค่าความดันสูงสุดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) มีค่าลดลง อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความรุนแรงและแรงดันในการระเบิดของหมอกฝุ่นโดยเฉพาะอนุภาคอินทรีย์มีความซับซ้อน อิทธิพลของความชื้นอันดับแรกคือพลังงานที่ให้อนุภาคถูกนำไประเหยและให้ความร้อนแก่น้ำที่แกะอยู่บนผิวอนุภาค อันดับที่สองคือไอน้ำที่ระเหยออกมารวมตัวกับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ชนวน ณ ช่วง preheating zone ของเปลวการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซผสมที่ลดอัตราปฏิกิริยาการเผาไหม้อนุภาค และอันดับสามคือความชื้นของอนุภาคเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคและลดการกระจายตัวของอนุภาคทำให้ทั้งความว่องไวในการระเบิดและความรุนแรงจากการระเบิดอนุภาคมีค่าลดลง

2.4.3 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในกระบวนการอุตสาหกรรม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ลดลง (ระเบิดได้ง่ายขึ้น) นอกจากนี้อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความดันสูงสุดก็ควรนำมาพิจารณา จากรูปที่ 2.29 พบว่าค่าความดันสูงสุดของการระเบิดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณออกซิเจนภายในหมอกฝุ่นที่ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) กล่าวคือถ้าอนุภาคเกิด

การเผาไหม้รุนแรงขึ้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความรุนแรงลดลง แต่ถ้าอนุภาคเกิดการเผาไหม้อย่างช้าค่าความรุนแรงจะสูงขึ้น สำหรับในเครื่องทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความรุนแรงมีผลน้อยมากจนไม่ต้องพิจารณา

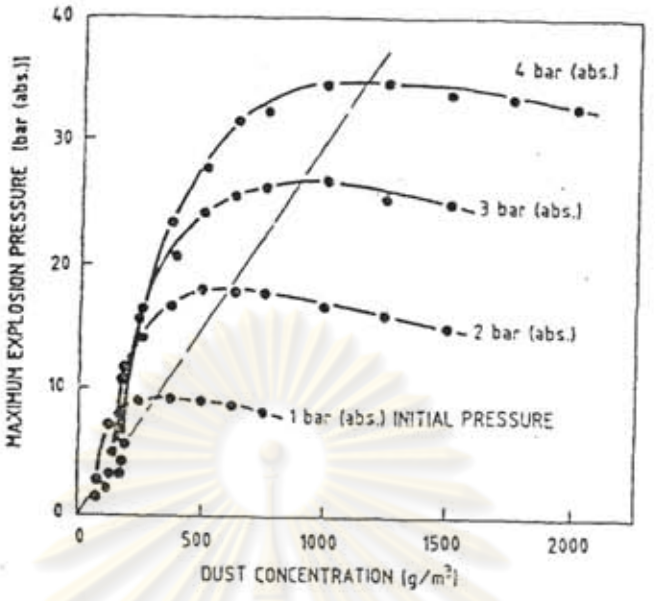


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของหมอกฝุ่นกับความดันสูงสุดจากการระเบิด (R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

2.4.4 ผลของความดันเริ่มต้น

Eckhoff (1991:46) อ้างถึงในข้อมูลของ Wiemann's (1987) ในการทดสอบการระเบิดของอนุภาคถ่านหินสีน้ำตาลภายในภาชนะปิดปริมาตร 1 ลบ.ม. ดังรูปที่ 2.30 แสดงถึงอิทธิพลของความดันเริ่มต้นต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจะเห็นได้ว่าค่าพีคสูงสุดของกราฟความดันแต่ละเส้นค่อนข้างจะแปรผันโดยตรงกับความดันเริ่มต้น (สัมบูรณ์) และความเข้มข้นของอนุภาคที่ให้แรงดัน ณ จุดพีคก็แปรผันโดยตรงด้วยเช่นกัน แสดงความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงที่ลากผ่านในกราฟดังกล่าว

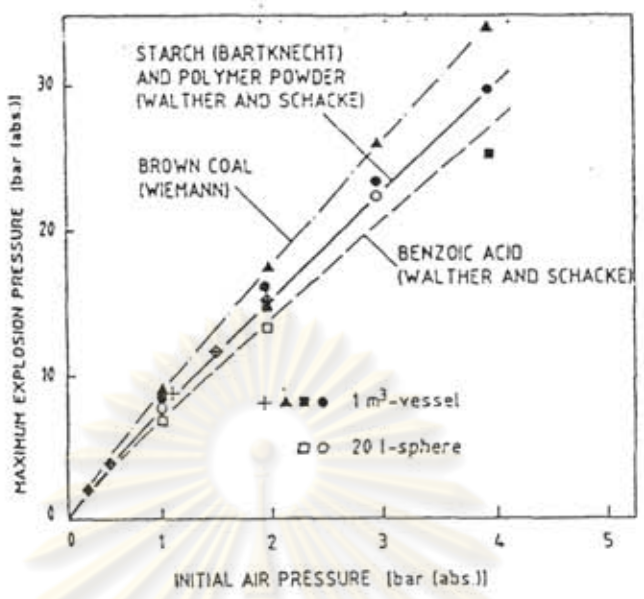
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



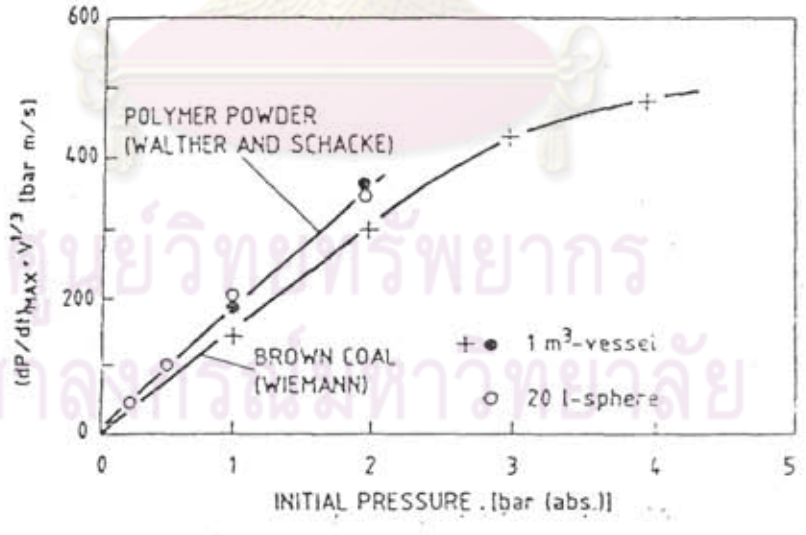
รูปที่ 2.30 ข้อมูลการทดลองของ Wiemann (1987) ค่าความดันจากการระเบิดถ่านหินสีน้ำตาลที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ทดสอบในเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ที่ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ (Eckhoff, 1991:47)

นอกจากนี้ Eckhoff (1991:47) อ้างถึงในข้อมูลของ Walther and Schacke (1986) ซึ่งทำการทดสอบเช่นกันโดยใช้อนุภาคโพลิเมอร์ภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 2.30 เมื่อความดันเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3 บาร์ (สัมบูรณ์) และอ้างถึงข้อมูลของ Bartknecht (1978) ซึ่งทำการทดสอบผงแป้งในช่วงความดันเริ่มต้น 0.2 ถึง 2 บาร์ (สัมบูรณ์) และได้สรุปผลการทดสอบของทั้งสามท่านแสดงดังรูปที่ 2.31 นอกจากนี้ความดันเริ่มต้นยังมีผลต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นเชิงเส้นตรงเมื่อความดันเริ่มต้นไม่เกิน 2 บาร์ (สัมบูรณ์) ดังรูปที่ 2.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะปริมาตรคงที่กับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Bartknecht 1978, Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987 (Eckhoff, 1991:48)



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของอัตราสูงสุดของการเพิ่มดันจากการระเบิดอนุภาคโพลิเมอร์และถ่านหินสีน้ำตาลในภาชนะทดสอบปริมาตรคงที่ 1 ลบ.ม. และ 20 ลิตรกับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987 (Eckhoff, 1991:49)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.5 ผลของความปั่นป่วน

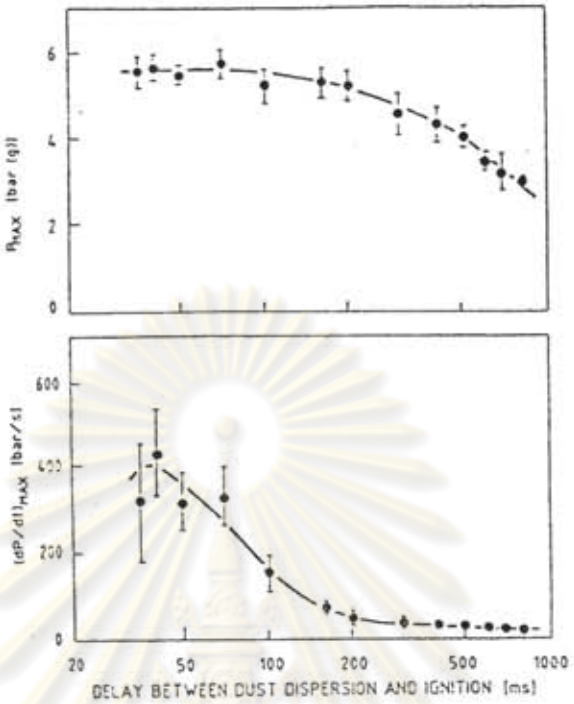
ความปั่นป่วนในทางปฏิบัติคือสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างรวดเร็วในที่นี้ระบบคือหมอกฝุ่นที่ภายในมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (ทั้งมากและน้อย) ของอนุภาคในทิศทางทั้งสามมิติ และหากเป็นหมอกฝุ่นที่กำลังเผาไหม้ ความปั่นป่วนจะมากขึ้นเพราะมีทั้งชั้น (ส่วน) ของอนุภาคร้อนที่ถูกเผาไหม้และอนุภาคเย็นที่ไม่เผาไหม้สลับกันและหมอกฝุ่นที่มีความปั่นป่วนจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าหมอกฝุ่นที่อยู่นิ่งแล้วมีเปลวไฟเคลื่อนที่ผ่าน

ในกรณีของการจุดชนวนให้กับหมอกฝุ่นทั้งการจุดชนวนด้วยการสปาร์คด้วยกระแสไฟฟ้าหรือการใช้พื้นผิวที่ร้อนนั้นความปั่นป่วนจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงานออกสู่บรรยากาศด้วยการพาความร้อนอย่างรวดเร็วดังนั้นการจุดชนวนของหมอกฝุ่นที่ปั่นป่วนจึงต้องใช้พลังงาน/อุณหภูมิสูงกว่าการจุดชนวนของหมอกฝุ่นที่อยู่นิ่ง

ในการระเบิดของหมอกฝุ่นความปั่นป่วนแบ่งได้เป็นสองประเภทตามแหล่งกำเนิด

- ความปั่นป่วนอันเกิดจากกระบวนการในส่วนที่ทำให้เกิดหมอกฝุ่นไม่ว่าจะเป็นเครื่องแอร์ เจ็ท มิลล์ (air jet mill), เครื่องผสม, ไซโคลน, ถุงกรอง, ท่อขนถ่ายอนุภาคด้วยลม หรือสายพานลำเลียงอนุภาค ความปั่นป่วนชนิดนี้เรียกว่า ความปั่นป่วนเริ่มต้น (initial turbulence)
- ความปั่นป่วนอันเกิดจากการระเบิดเองจากการขยายตัวของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้เหนือเปลวไฟจากการระเบิด ระดับของความปั่นป่วนจะมากน้อยขึ้นกับความเร็วในการไหล (เคลื่อนที่) ของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้ และลักษณะของระบบ โดยปกติจะเกิดขึ้นได้ยาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.33 อิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่ออัตราการระเบิดของหมอกฝุ่นไลโคโพเดียม เข้มข้น 420 กรัม/ลบ.ม.ในเครื่องสอบปริมาตร 1.2 ลิตร (Hartmann bomb) (Eckhoff, 1991:38)

รูปที่ 2.33 แสดงอิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่อความดันสูงสุดจากการระเบิดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันในถังทดสอบที่ปิดสนิท หมอกฝุ่นเกิดจากการเป่าอากาศผ่านกองอนุภาคที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในตอนแรกนี้หมอกฝุ่นยังไม่ปั่นป่วนนักแต่จากนั้นเมื่ออนุภาคเริ่มฟุ้งเพราะแรงจากอากาศความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากทดสอบกับอนุภาคชนิดเดิมแต่เปลี่ยนเวลาหน่วงระหว่างการกระจายอนุภาคจนจุดชนวนระเบิดก็เป็นการเปลี่ยนความปั่นป่วนของหมอกฝุ่นด้วย จากรูปที่ 2.33 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเวลาหน่วง (ความปั่นป่วน) ทำให้อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเปลี่ยนแปลงมากในขณะที่ความดันสูงสุดจากการระเบิดจะมีค่าค่อนข้างคงที่จนค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 200 มิลลิวินาที แสดงให้เห็นว่าค่าความดันสูงสุดเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ในขณะที่อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นคุณสมบัติทางจลนศาสตร์

Siwek (2001: 10) กล่าวว่าดีกรีของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับค่าเวลาหน่วงของการจุดชนวน (ignition delay time : t_v) เป็นหลัก ซึ่งก็คือขึ้นอยู่กับช่วงเวลาตั้งแต่อนุภาคเริ่มเข้าสู่ถังทดสอบจนถึงจุดชนวนระเบิด ซึ่งมีผลต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน (ส่งผลต่อค่า K_{max}) ดังนั้นในการทดสอบค่า ignition delay time ควรเป็นค่ามาตรฐาน คือ

เครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร: t_v = 60 มิลลิวินาที

เครื่องทดสอบขนาด1 ลบ.ม.: t_v = 0.6 วินาที

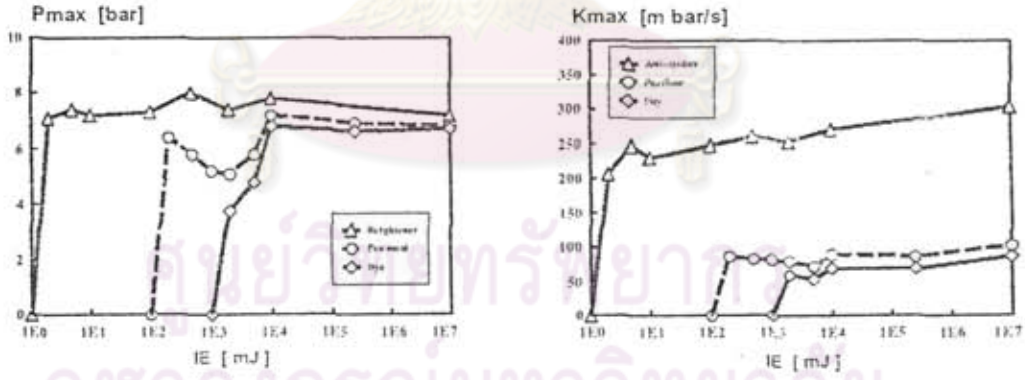
โดยปกติการเพิ่มความปั่นป่วน ($t_v < 0.6$ วินาที หรือ $t_v < 60$ มิลลิวินาที) จะเพิ่มความรุนแรงในการระเบิด

2.4.6 พลังงานของการจุดระเบิด

จากผลการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสำหรับการระเบิด (Minimum Ignition Energy; MIE) จากเครื่องทดสอบขนาด1 ลบ.ม. และขนาด 20 ลิตร พบว่าวัสดุอนุภาคสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของพลังงานของการจุดระเบิดต่อค่าความรุนแรงในการระเบิด ดังนี้

2.4.6.1 วัสดุอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน (Energy independent dusts)

จากรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่าค่าความดันสูงสุดและค่า K_{St} ที่ได้จากการทดลองไม่ขึ้นกับพลังงานของการจุดระเบิด (Ignition Energy; IE) โดยชนวนระเบิดที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM E1226 ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ 40wt% zirconium, 30wt%barium nitrate และ 30wt% barium peroxide ถ้ารวมกัน 1.2 กรัมจะให้พลังงานในการจุดระเบิดเท่ากับ 5,000 จูล



รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน

(R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าสำหรับ "วัสดุอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน" ลักษณะของแหล่งจุดระเบิดไม่มีความสำคัญ ไม่ว่าจะจ่ายกระแสต่ำ หรือชนวนระเบิดมีความรุนแรงก็ให้ผลแรงดันเท่าเดิม โดยทั่วไปวัสดุอนุภาคกลุ่มนี้จะมีค่าพลังงานต่ำสุดสำหรับการระเบิดต่ำกว่า 1 จูล

2.4.6.2 วัสดุอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน (Energy dependent dusts)

สำหรับอนุภาคในกลุ่มนี้ การลดลงของพลังงานในการจุดระเบิดมีผลให้ความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่า K_{max} ลดลงแสดงดังรูปที่ 2.35 โดยทั่วไปวัสดุอนุภาคกลุ่มนี้จะมีค่าพลังงานต่ำสุดสำหรับการระเบิดมากกว่า 1 จูล

รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน

(R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การกำหนดขนาดช่องระบายแรงดันจากการระเบิดในกระบวนการอุตสาหกรรม

ในกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีอนุภาคเกี่ยวข้องการป้องกัน (prevention) ไม่ให้เกิดการระเบิดเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการแต่ส่วนมากการระเบิดของอนุภาคมักเป็นอุบัติเหตุที่คาดไม่ถึงในกระบวนการ ดังนั้นหากเกิดขึ้นแล้วก็ควรมีการบรรเทาการระเบิดนั้นให้ส่งผลน้อยที่สุดต่อกระบวนการ ตารางที่ 2.3 แสดงภาพรวมของการป้องกัน และการบรรเทาการระเบิดของวัสดุอนุภาค

ตารางที่ 2.3 ภาพรวมของการป้องกันและบรรเทาการระเบิดของวัสดุอนุภาค

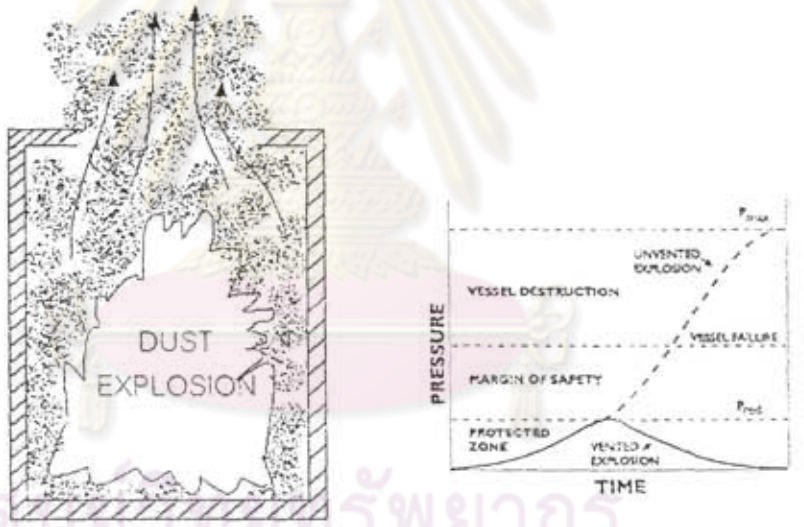
PREVENTION				MITIGATION	
Preventing Ignition sources		Preventing explosible dust cloud			
A	Smouldering combustion in dust, dust flames	f	Inerting by N_2, CO_2 and rare gases	j	Partial inerting by inert gas
B	Other types of open flames (e.g. hot work)	g	Intrinsic inerting	k	Isolation (Sectioning)
C	Hot surface	h	Inerting by adding inert dust	l	Venting
D	Electric sparks and arcs Electrostatic discharges	i	Dust concentration outside explosible range	m	Pressure resistant construction
E	Heat form mechanical impact (metal sparks and hot spots)			n	Automatic suppression
				o	Good housekeeping (dust removal/cleaning)

การป้องกันการระเบิดจากแหล่งชนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.4 ส่วนการป้องกันจากหมอกฝุ่นโดยเติมสารเฉื่อยเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ หรือก๊าซไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับระบบในกระบวนการ แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการบรรเทาแรง (ความดัน) จากการระเบิดด้วยติดช่องระบายแรงดันจากการระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.1 ช่องระบายแรงดันจากการระเบิด

จุดประสงค์ของการระบายแรงดันคือปลดปล่อยแรงดันจากการระเบิดด้วยช่องระบายที่มีพื้นที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วโดยช่องระบายแรงดันนี้จะมีขีดจำกัดการทนแรงดันที่เพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดันที่ยอมรับได้พิจารณาจากภาชนะว่าเป็นแรงดันที่ยังไม่ทำให้ภาชนะแตกฉีกขาดหรือไม่เปลี่ยนรูปร่าง แรงดันสูงสุดจากการระเบิดภายในภาชนะที่มีช่องระบายเรียกว่า" แรงดันลดของการระเบิด" (Reduced explosion pressure; P_{red}) แสดงดังรูปที่ 2.36 แรงดันนี้เกิดจากกระบวนการสองขั้นตอน คือการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นทำให้เกิดความร้อนและการเพิ่มขึ้นของแรงดัน อีกกระบวนการคือการไหลออก(การระบาย)ของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้ หมอกฝุ่นที่กำลังเผาไหม้ และหมอกฝุ่นที่เผาไหม้แล้วเป็นการลดแรงดัน ทั้งสองกระบวนการนี้จะทำให้หมอกฝุ่นปั่นป่วนเป็นการเพิ่มอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นด้วย ค่า P_{red} ส่วนมากจะมีค่าประมาณสองส่วนสามเท่าของความดันที่ทำให้ภาชนะแตกฉีกขาด



รูปที่ 2.36 หลักพื้นฐานของการระบายแรงดันจากการระเบิด จะได้ความดันสูงสุดที่ภาชนะทนแรงดันจากการระเบิดนั้นได้ (P_{red})

การเลือกใช้ช่องระบายแรงดันจะต้องพิจารณาตัวแปรดังต่อไปนี้

(1) ประสิทธิภาพการระบาย (Venting Efficiency) ช่องระบายที่ดีควรมีพื้นที่น้อยและ/หรือความดัน (P_{red}) ที่ทนต่อแรงระเบิดได้ต่ำ

(2) แรงดันที่ทนได้ของช่องระบายแรงดัน (P_{stat}) คือความดันที่ทดสอบและถูกรับรองว่าช่องระบายจะเปิดออกที่ความดันค่าเดิมนี้ทุกครั้ง และ P_{stat} ต้องมีค่าน้อยกว่า P_{red} ของอุปกรณ์เสมอ

(3) รูปแบบการเปิดออกของช่องระบายแรงดัน คือเมื่อช่องระบายเปิดออกต้องมีพื้นที่เท่ากับที่กำหนดไว้ทุกครั้ง ดังรูปที่ 2.37

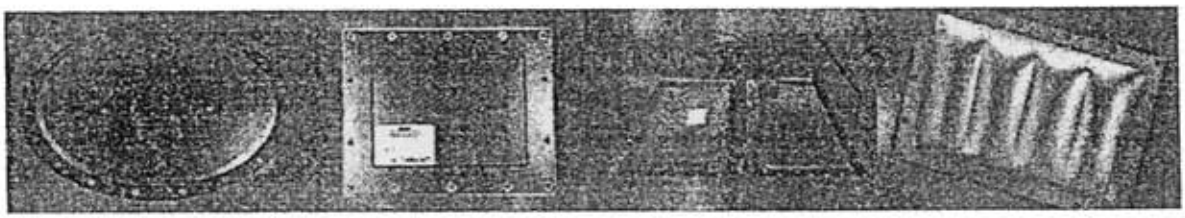
(4) ความน่าเชื่อถือ คือช่องระบายแรงดันต้องใช้งานได้ตลอดเวลาเมื่อเกิดการระเบิด

รูปที่ 2.37 แผ่นระบายแรงดันจากการระเบิดก่อนและหลังการใช้งาน (Eckhoff, 1991:91)

ช่องระบายแรงดันแบ่งได้เป็น 4 แบบดังนี้

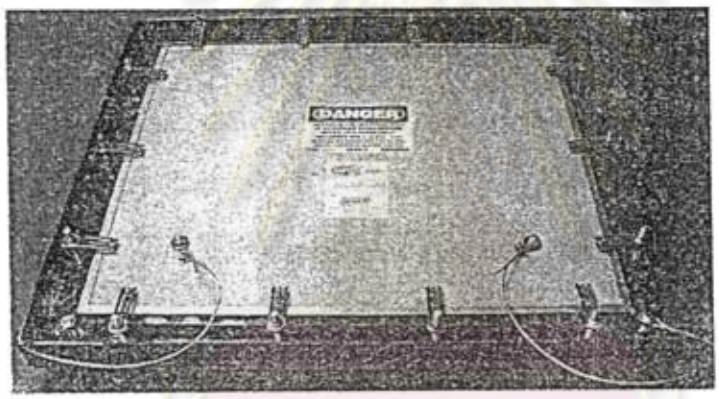
2.5.1.1 แบบที่สามารถทำขึ้นได้เอง (home made panels) มีน้ำหนักเบามีรูปร่างที่แน่นอน เช่นแผ่นอลูมิเนียมและยึดติดกับอุปกรณ์ด้วยยางยืด

2.5.1.2 แผ่นระบายแรงดัน (Bursting panels) ผลิตขึ้นจากโรงงานมีการกำหนด P_{stat} ที่แน่นอนในแต่ละแผ่นซึ่งการเลือกใช้คือ P_{stat} ต้องมีค่าน้อยกว่า P_{red} ของอุปกรณ์ที่จะติดตั้งเสมอ แผ่นระบายแรงดันแบบนี้มีหลายขนาด และรูปร่างให้เลือกใช้ แสดงดังรูปที่ 2.38 และมักเคลือบด้วยเทฟลอนที่ด้านนอกเพื่อให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่เกิดการกัดกร่อน และเทฟลอนทนอุณหภูมิได้ 230 องศาเซลเซียส



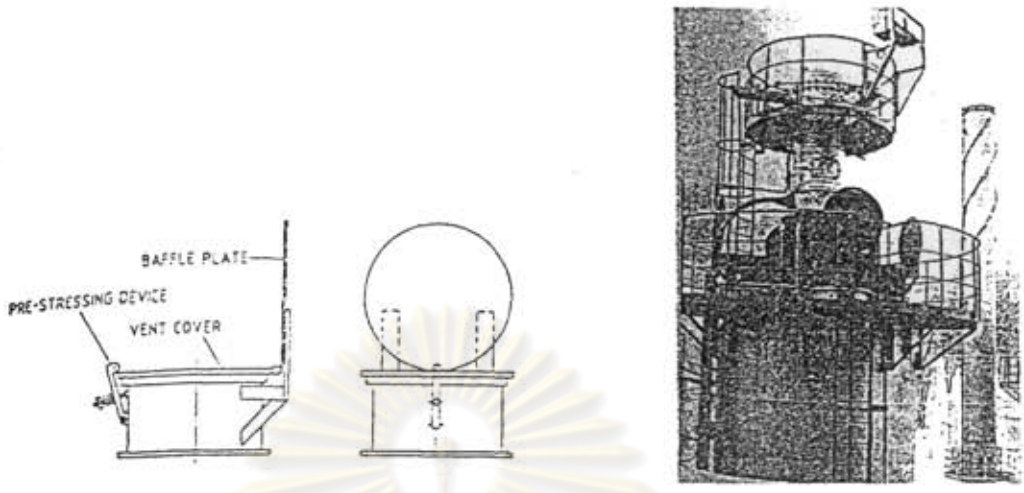
รูปที่ 2.38 แผ่นระบายแรงดันจากการระเบิดแบบต่างๆ

2.5.1.3 มีลักษณะเป็นประตูบานพับ (Hinged explosion doors) แสดงดังรูปที่ 2.39 มีรูปร่างหลายอย่างขึ้นกับอุปกรณ์ที่จะนำไปติดตั้ง ตัวล็อกของประตูระบายแรงดันจะต้องระบุค่า P_{stat} และเปิดเองอัตโนมัติเมื่อความดันจากการระเบิดมีค่าเท่ากับ P_{stat}



รูปที่ 2.39 ประตูบานพับระบายแรงดันจากการระเบิดติดตั้งที่ไซโลเก็บอนุภาค หลังเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาคประตูจะเปิดออก

2.5.1.4 แบบสุดท้ายจะแตกต่างจากสามแบบแรกคือเป็นประตูที่จะปิดทันทีเมื่อมีการระบายแรงดัน (reversible vent cover) จุดประสงค์เพื่อป้องกันการระเบิดขั้นทุติยภูมิหลังจากการระเบิดขั้นปฐมภูมิ ช่องระบายชนิดนี้ประกอบด้วยประตูบานพับพร้อมชุดสปริงและอุปกรณ์ปิดประตูระบายแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.40 ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของช่องระบายแบบนี้



รูปที่ 2.40 ประตูบานพับป้องกันการระเบิดจะปิดลงตามแรงโน้มถ่วง หลังเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาค (Eckhoff, 1991:94)

จากรูปแผ่นเพลตในแนวตั้งจะปิดลงได้เมื่อมีแรงกระทำจากช่องระบายแรงดันในแนวนอน นอกจากแผ่นเพลตจะรับแรงดันของช่องระบายแรงดันแล้วอากาศระหว่างแผ่นทั้งสองยังมีส่วนในการรับแรงดันจากการระเบิดอีกด้วย การใช้งานต้องระบุค่า P_{stat} ของช่องระบายความดันให้เหมาะสมกับระบบ

2.5.2 ท่อดับเปลวไฟจากการระเบิด (Quenching tube) เป็นอุปกรณ์เพิ่มเติมที่ต่อจากแผ่นระบายแรงดัน (bursting panels) ออกมานอกภาชนะที่ใส่วัสดุอนุภาค มีลักษณะเป็นท่อขนาดใหญ่ ภายในผนังท่อมีพื้นที่มากและออกแบบให้มีความดันลดต่ำแต่ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคสูง และประสิทธิภาพการหล่อเย็นก๊าซเผาไหม้สูง ข้อดีของท่อดับเปลวไฟอีกข้อคือถ้าก๊าซเผาไหม้เป็นก๊าซพิษ เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ จะไม่เกิดการรั่วไหลสู่บรรยากาศ แรงดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะจะมากขึ้นปานกลางเมื่อติดท่อดับเปลวไฟแต่สามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มพื้นที่ระบายแรงดัน อุณหภูมิที่สูงของก๊าซเผาไหม้จากหมอกฝุ่นโลหะเบา (เช่น แมกนีเซียม อลูมิเนียม ซิลิกอน เป็นต้น) จะทำให้ผนังด้านในท่อดับเปลวไฟเสียหายได้แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยเปลี่ยนวัสดุของผนังท่อ

2.5.3 วิธีกำหนดขนาดช่องระบายแรงดัน

ในปัจจุบันวิธีกำหนดขนาดดังกล่าวเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่มีใช้กันในแถบยุโรปและอเมริกา โดยข้อมูลของวิธีดังกล่าวมีดังนี้

2.5.3.1 วิธีกำหนดสัดส่วนช่องระบาย (Vent ratio method)

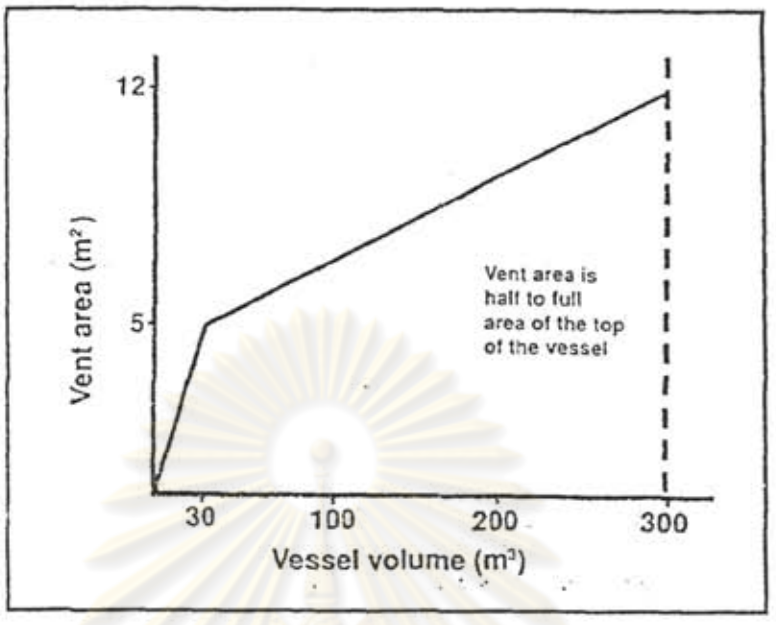
วิธีนี้ใช้เมื่อ $P_{red} \leq 0.14$ บาร์เกจ อนุภาคมีค่า K_{St} อยู่ในชั้น Class St 1 ใช้กับช่องระบายขนาดเล็กและเกิดแรงดันขึ้นน้อย ค่าสัดส่วนของช่องระบาย เท่ากับ (พื้นที่ของช่องระบาย)/(ปริมาตรของภาชนะ) และหากภาชนะมีขนาดใหญ่ขึ้นพื้นที่ของช่องระบายก็ไม่จำเป็นต้องมากขึ้นตามเพื่อให้ค่าสัดส่วนการระบายเท่าเดิมเนื่องจากวิธีกำหนดสัดส่วนช่องระบายมีหลักการคือจะลดสัดส่วนที่ต้องการลงเมื่อปริมาตรของภาชนะเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่สามารถทำการทดลองโดยใช้วิธีกำหนดสัดส่วนของช่องระบายได้

C J Mckenzie (1993: 36) เสนอขนาดของช่องระบายตามขนาดของภาชนะโดยใช้วิธีสัดส่วนช่องระบาย ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พื้นที่ช่องระบายที่ต้องการเมื่อใช้วิธีกำหนดสัดส่วนช่องระบาย

Vessel size	Vent area
Up to 30 m^3	1 m^2 for each 6 m^3
30 m^3 - 300 m^3	Ratio reduces linearly from 1 m^2 for each 6.1 m^3 To 1 m^2 for each 25 m^3
Over 300 m^3 (silos)	Half to full area of the top of the vessel

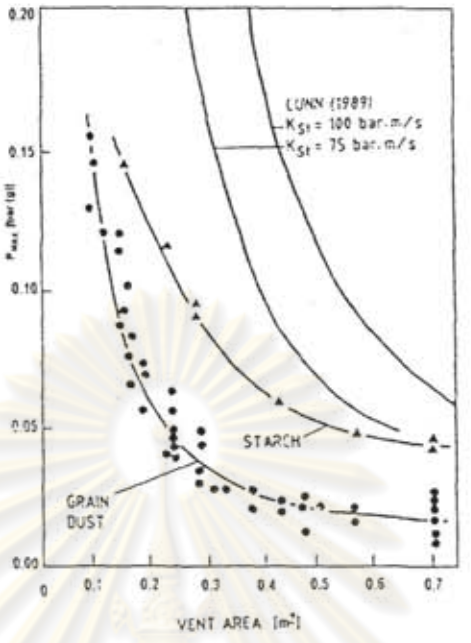
จากตารางที่ 2.4 สามารถแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.41 การใช้วิธีสัดส่วนช่องระบายมีข้อจำกัดอยู่สองข้อ ข้อแรกคือความดันที่ทำให้ช่องระบายเปิดต้องไม่มากกว่า 3 กิโลปาสคาล และช่องระบายต้องมีน้ำหนักไม่มากกว่า 25 กิโลกรัม/ตารางเมตร ข้อสองคือในกรณีที่ภาชนะต่อกับท่อ (vent ducts) ท่อควรมีความยาวไม่เกิน 3 เมตร (ท่อไม่ควรต่อกับภาชนะที่ไม่แข็งแรง)



รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องระบายแรงดันและปริมาตรภาชนะ คำนวณด้วยวิธีสัดส่วนช่องระบาย (C J Mckenzie, 1993:36)

2.5.3.2 วิธีโนโมกราฟ (NOMOGRAP method)

วิธีนี้เริ่มต้นเสนอโดย Verein deutscher Ingenieure ต่อมาถูกพัฒนาโดย National Fire Protection Association วิธีโนโมกราฟนี้ต้องใช้ค่าจากการทดลองเพื่อหาค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน และค่า K_{St} ซึ่งได้จากการทดลองในเครื่องทดสอบการระเบิดขนาดตั้งแต่ 1 ลบ.ม. เนื่องจากเพื่อให้สภาวะหมอกฝุ่นในเครื่องทดสอบมีการปั่นป่วนและมีความเร็วของการแพร่กว้างเปลวไฟสูงเหมือนในอุตสาหกรรม รูปที่ 2.42 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันสูงสุดและพื้นที่ช่องระบายแรงดันโดยอาศัยหลักโนโมกราฟ ทำการทดลองโดย Brown และ Hanson (1933) เมื่อใช้อนุภาคที่มีความชื้นน้อยกว่า 8% ภายใต้สมมุติฐานว่าค่า K_{St} ไม่ต่ำกว่า 75 และ 100 บาร์ เมตร/วินาที การทดลองนี้เป็นที่ยอมรับว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากและถูกนำไปใช้จนถึงปัจจุบัน

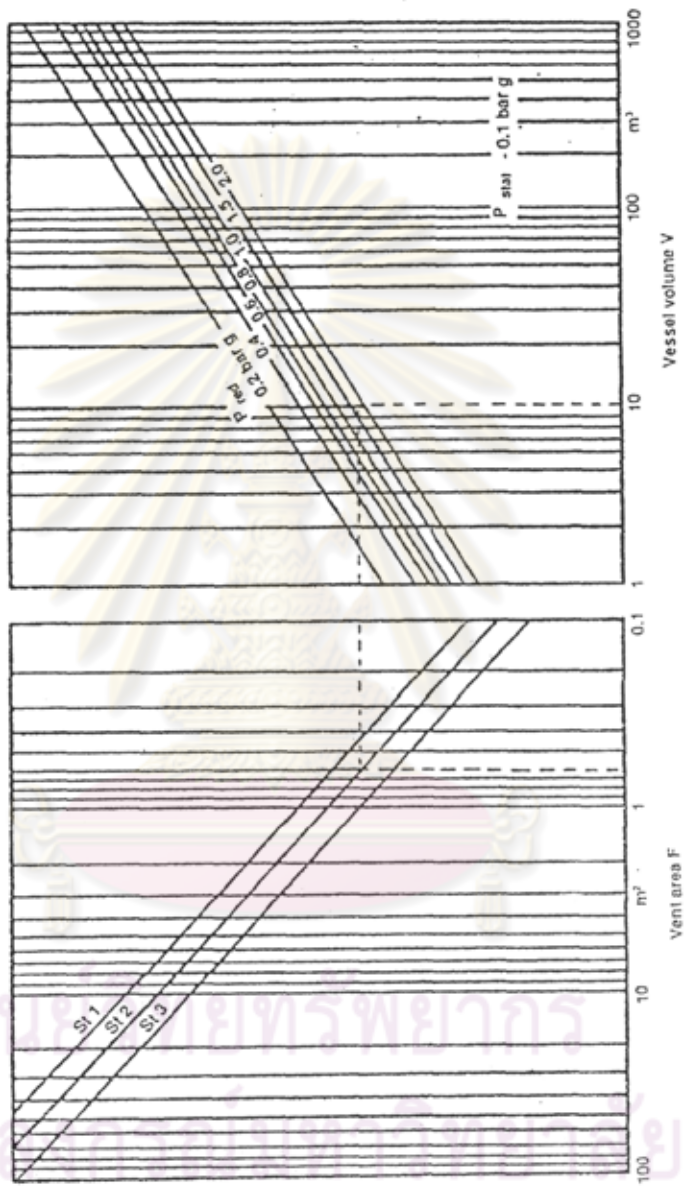


รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ระบายและความดันสูงสุดจากการระเบิดของแป้งและเมล็ดพืชในถังลูกบาศก์ขนาด 2.8 ลบ.ม.ที่มีช่องระบายเป็นแบบประตูบานพับโลหะทดลองโดย Brown และ Hanson เปรียบเทียบผลของ Lunn (Brown and Hanson, 1933)

C J Mckenzie (1993: 37) เสนอการหาพื้นที่ช่องระบายด้วยวิธีโมโนกราฟโดยใช้ค่า P_{red}, P_{sat} และ K_{St} อาศัยโมโนกราฟดังรูปที่ 2.43 โดยมีข้อกำหนด ดังนี้

- ค่า K_{St} ได้จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบทรงกลมขนาด 20 ลิตร และค่า K_{St} ของระดับ class St 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0-20 MPa m/s
- ความปั่นป่วนในภาชนะที่จะติดช่องระบายแรงดันไม่ควรมากกว่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องทดสอบ
- ภาชนะควรมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5:1 (น้อยกว่า 3:1 สำหรับอนุภาคที่มีค่า K_{St} ระดับ class St 2)
- เมื่อใช้วิธีโมโนกราฟในการหาพื้นที่ช่องระบาย ปริมาตรที่ว่างในภาชนะควรมีค่าเท่ากับหนึ่งส่วนสามของปริมาตรภาชนะ (ยกเว้นใน spray dryers)
- การคำนวณขนาดของช่องระบายแรงดันด้วยวิธีโมโนกราฟโดยปกติจะไม่ใช้เมื่อ P_{red} มีค่าน้อยกว่า 20 กิโลปาสคาล
- ความเฉื่อยของช่องระบายควรมีค่าต่ำ น้ำหนักของช่องระบายควรมีค่าต่ำกว่า 10 กิโลกรัมต่อหนึ่งตารางเมตรของช่องระบาย

- วิธีการพื้นฐานนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับการคำนวณ vent ducts ได้ต้องใช้กราฟสำหรับกรณีที่เป็น vent ducts เท่านั้น



รูปที่ 2.43 ตัวอย่างโมโนกราฟในการหาพื้นที่ของช่องระบาย (C J Mckenzie, 1993:38)

2.5.3.3 วิธีของสวีเดน (The Swedish method)

วิธีนี้เสนอโดย Danielson โดยจำแนกอนุภาคด้วยค่าอัตราสูงสุดของเพิ่มแรงดันจากการระเบิด $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ แบ่งเป็นสามกลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 $(dP/dt)_{max} \leq 300$ บาร์/วินาที

กลุ่มที่ 2 300 บาร์/วินาที $< (dP/dt)_{max} <$ 600 บาร์/วินาที

กลุ่มที่ 3 $(dP/dt)_{max} \geq 600$ บาร์/วินาที

การกำหนดพื้นที่ของช่องระบายต่อปริมาตรของภาชนะจะแบ่งตามกลุ่ม แต่ค่าดังกล่าวจะลดลงเมื่อปริมาตรของภาชนะมากขึ้น อนุภาคกลุ่มที่ 1 ใช้กับแผ่นระบายแบบบานพับ (hinged vent panels) ที่มีน้ำหนักมากสุด 20 กิโลกรัม/ตารางเมตร แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของช่องระบาย [A; ตารางเมตร] ปริมาตร [V; ลูกบาศก์เมต] และ P_{red} [บาร์เกจ] ได้ดังสมการ

$$A = \frac{0.019}{P_{red}^{0.5}} \times V^{0.635} \qquad (2.10)$$

อนุภาคกลุ่มที่ 2 ใช้กับแผ่นระบายแรงดันที่มีน้ำหนักได้มากสุด 12 กิโลกรัม/ตารางเมตร วิธีของสวีเดนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$A = \frac{0.044}{P_{red}^{0.5}} \times V^{0.685} \qquad (2.11)$$

สำหรับภาชนะที่มีสัดส่วนความสูงต่อความกว้าง (L/D) มากกว่า 3 วิธีของสวีเดนต้องแบ่งภาชนะเป็นปริมาตรย่อยๆ เพื่อใช้หาพื้นที่โดยปริมาตรย่อยๆ ที่แบ่งต้องมี $L/D \leq 3$ จากนั้นจึงนำพื้นที่ของช่องระบายที่คำนวณได้จากแต่ละส่วนของปริมาตรย่อยๆ มารวมกันจึงเป็นพื้นที่ของช่องระบายที่แท้จริง

2.5.3.4 กฎของราดานท์สำหรับช่องระบายแรงดันจากการระเบิดในไซโล (The RADANDT Scaling law for vented silo explosions)

Eckhoff (1991) อ้างถึงสมการที่เสนอโดย Radandt ดังนี้

$$P_{red} = \left(b \times V^{c}\right) / \left(A - a \times V^{c}\right) \qquad (2.12)$$

สมการดังกล่าวใช้หาพื้นที่ของช่องระบายสำหรับไซโล มีตัวแปรดังต่อไปนี้

A คือ พื้นที่ช่องระบายแรงดัน (หน่วย ตารางเมตร)

P_{red} คือ ความดันสูงสุดจากการระเบิดในไซโลที่ติดช่องระบายแรงดัน (หน่วย บาร์เกจ) กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 2 บาร์เกจ

V คือ ปริมาตรไซโล (หน่วย ลูกบาศก์เมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

a, b และ c คือ ค่าคงที่ขึ้นกับค่า K_{St} ของอนุภาค เช่นเมื่อค่า K_{St} = 200 บาร์ เมตร/วินาที (ค่าสูงสุดของอนุภาคกลุ่ม St-1 hazard class) ค่า a = 0.011, b = 0.069 และ c = 0.776 ค่าคงที่นี้ได้จากการทดลองในไซโลนาด 20 ลบ.ม.กระจายอนุภาคโดยตรงด้วยท่อลมลำเลียงอนุภาค แต่ไม่ระบุว่าค่าคงที่ดังกล่าวหามาได้อย่างไร

P_{stat} คือ ความดันที่ทนได้ของช่องระบายแรงดัน สมมุติให้มีค่าเท่ากับ 0.1 บาร์เกจ (10 กิโลปาสคาล)

Eckhoff (1991) ได้นำสมการ 2.12 ไปเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของ Radandt พบว่าความรุนแรงของการระเบิดในไซโลขนาดใหญ่ขึ้นคือ L/D = 6 จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแหล่งพลังงานในการจุดระเบิดโดยตรง จากเหตุผลดังกล่าวและอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าสมการของ Radandt (2.12) อาจไม่สมบูรณ์พอที่จะเป็นกฎการหาขนาดช่องระบายแรงดันในไซโล

2.5.4 ทฤษฎีการระบายแรงดันจากการระเบิดอนุภาค

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.5.1 ถึงค่าแรงดันสูงสุดจากการระเบิดเมื่อผ่านช่องระบายหรือ P_{red} เกิดจากสองขั้นตอนซึ่งรวมแล้วก็คือเกิดการขยายตัวของระบบทำให้เกิดการไหลหมอกฝุ่นให้สัมผัสกับเปลวไฟ เพิ่มความปั่นป่วนของหมอกฝุ่นที่ยังไม่ได้เผาไหม้และเพิ่มอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นด้วย ดังนั้นทฤษฎีการระบายแรงดันจากการระเบิดจำเป็นต้องอธิบายเชิงหลักคณิตศาสตร์ของปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนทั้งสองนี้ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการระเบิดของก๊าซและการระเบิดของอนุภาคก็ได้มีการพัฒนาขึ้นและสามารถใช้เป็นทฤษฎีและแบบจำลอง (computer simulation) จากการประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบช่องระบายแรงดันของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรม โดยสมการหรือแบบจำลองดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นภายในภาชนะที่มีช่องระบายแรงดันมีลักษณะเช่นเดียวกันและมีค่าในทิศทางเดียวกันกับอัตราการเผาไหม้ภายในเครื่องทดสอบมาตรฐาน และในทฤษฎีที่ใช้ค่า K_{St} หรืออัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ ค่าที่นำมาใช้จะได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีสภาวะใกล้เคียงกับในอุตสาหกรรม

ทฤษฎีทั่วไปของหลักไดนามิกส์ของก๊าซสำหรับช่องระบายแรงดันแบ่งได้เป็นสองแบบคือถ้าสัดส่วนของความดันภายในต่อภายนอกภาชนะมีค่ามากกว่าค่าความดันวิกฤต การไหลของหมอกฝุ่นจะถูกควบคุมโดยหมอกฝุ่นด้านบนที่ระบายออกเท่านั้น (Sonic flow) แต่ถ้าสัดส่วนมีค่าต่ำกว่าการไหลของหมอกฝุ่นจะถูกควบคุมด้วยทฤษฎีการไหลของก๊าซผ่านแผ่นออริฟิด (Sub-

sonic flow) ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะ และไม่พิจารณาความดันสูญเสีย สัดส่วนของค่าความดันวิกฤติเท่ากับ

$$\frac{P_c}{P_0} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \qquad (2.13)$$

เมื่อ γ คือสัดส่วนของความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ความดันคงที่ต่อความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ปริมาตรคงที่ สำหรับอากาศและก๊าซเผาไหม้ส่วนใหญ่จากการระเบิดอนุภาคในอากาศค่าสัดส่วนความดันวิกฤตมีค่าประมาณ 1.8-1.9 ขึ้นกับความดันภายในภาชนะที่ 0.8-0.9 บาร์เกจ ที่ความดันบรรยากาศภายนอก ดังนั้นสำหรับอุปกรณ์ในกระบวนการส่วนใหญ่ ความดันสูงสุดจากการระเบิดภายในภาชนะที่ยอมให้ได้ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.8-0.9 บาร์เกจ ซึ่งจะเข้ากรณี Sub-sonic flow แต่ในอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงมากเช่นเครื่องบดบางชนิดค่าสัดส่วนความดันของ P_c/P_0 จากส่วนแรกของการระบายแรงดันอาจมีค่ามากกว่าความดันวิกฤติ จะเป็นการไหลแบบ Sonic flow

2.5.4.1 ทฤษฎีของมายซีย์ (Theory by MAISEY)

เริ่มต้นมายซีย์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลแบบราบเรียบ (laminar) ของก๊าซเผาไหม้จากการระเบิดภายในภาชนะปิดทรงกลมที่มีจุดกำเนิดอยู่ตรงกลาง ความเร็วของเปลวไฟแพร่กว้างแบบราบเรียบตามแนวรัศมี สมมุติให้มีค่าคงที่ตามชนิดของเชื้อเพลิง สำหรับอนุภาคสามารถประมาณได้จากข้อมูลการทดลองจากเครื่องทดสอบแบบ Hartmann type สมมุติฐานหลักคือความดันสูงสุดจากการระเบิดในเครื่องทดสอบแบบปิดแปรผันโดยตรงกับความเร็วของเปลวไฟแพร่กว้างแบบราบเรียบตามแนวรัศมี อย่างไรก็ตามมายซีย์ให้ความเห็นอย่างเต็มที่ว่าหมอกฝุ่นภายในเครื่องทดสอบแบบ Hartmann type ไหลแบบปั่นป่วนและความปั่นป่วนจะเพิ่มความเร็วของเปลวไฟ มายซีย์แนะนำว่าข้อมูลจากเครื่องทดสอบแบบ Hartmann type สามารถแปลงเป็นค่าความเร็วสมดุลของเปลวไฟที่สภาวะปั่นป่วนได้ขึ้นกับระดับความปั่นป่วนในการทดลอง และเนื่องจากระดับความปั่นป่วนนี้อาจมีค่ามากกว่าความปั่นป่วนของหมอกฝุ่นในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ดังนั้นมายซีย์จึงแนะนำให้ลดความเร็วสมดุลของเปลวไฟจากเครื่องทดสอบ Hartmann type ให้มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะในอุตสาหกรรมจริงๆ อีกส่วนที่มายซีย์ศึกษาแต่ไม่ถือว่าเป็นทฤษฎีคืออัตราการไหลของก๊าซและอนุภาคที่ทางออกของช่องระบายแรงดันโดยเขานำผลการทดลองหลายๆ ครั้งมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันการระเบิดที่ช่องระบายมากสุดกับพื้นที่ช่องระบายของภาชนะปริมาตรต่างๆ และความเร็วเปลวไฟของเครื่องทดสอบระบบปิด

2.5.4.2 ทฤษฎีของเฮนริช และโควอลล์ (Theory by HEIRICH and KOWALL)

ทฤษฎีนี้พิจารณาการไหลแบบ Sub-sonic flow ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{dP_{ex}}{dt}\right)_{P_{red}V} = \alpha\frac{A}{V}\left(\frac{2RT}{M}P_{red}\left(P_{red}-P_0\right)\right)^{1/2} \qquad (2.14)$$

เมื่อพจน์ทางด้านซ้ายคืออัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดภายในภาชนะที่ความดันสูงสุดที่ภาชนะทนได้เท่ากับ P_{red} และช่องระบายแรงดันจะปิดทันทีในช่วงเวลาสั้นๆ และ

A คือ พื้นที่ช่องระบายแรงดัน (ตารางเมตร)

V คือ ปริมาตรของภาชนะที่มีช่องระบาย (ลูกบาศก์เมตร)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.31 จูล/เคลวิน โมล

T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

M คือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของก๊าซที่ถูกระบาย (กิโลกรัม)

P_{red} คือ ความดันจากการระเบิดสูงสุดของภาชนะที่มีช่องระบาย (บาร์สัมบูรณ์)

P_0 คือ ความดันบรรยากาศ (บาร์สัมบูรณ์)

α คือ ประสิทธิภาพการระบาย มีค่าเท่ากับ 0.8 สำหรับช่องระบายเหลี่ยม

ทั้งนี้โดยการจัดสมการ 2.14 ใหม่ให้พื้นที่ช่องระบายแรงดัน (A) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันที่ความดัน P_{red} ได้เมื่อช่องระบายความดันปิดอยู่

เฮนริช และโควอลล์ ได้อธิบายถึงปัญหาที่สำคัญมานานของการระเบิดอนุภาคคือ พวกเขานำผลการทดลองจริงของอุปกรณ์ระบายความดันจากการระเบิดที่ติดอยู่กับภาชนะปริมาตรมากกว่า 5 ลบ.ม. มาสัมพันธ์กับค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากเครื่องทดสอบ Hartmann type ขนาด 1.2 ลิตร ภายใต้สมมุติฐานว่าสามารถใช้กฎรากที่สามได้ (cube root law; สมการที่ 1.1) ดังนี้

$$\left(\frac{dP_{ex}}{dt}\right)_{P_{red}\ V_{encl}} = \left(\frac{dP_{ex}}{dt}\right)_{P_{red}\ V_{Hartm}} \times \left(\frac{V_{Hartm}}{V_{encl}}\right)^{1/3} \qquad (2.15)$$

เฮนริช และโควอลล์สรุปว่าข้อมูลจาก Hartmann type สามารถมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่ได้จริงดังสมการ 2.14 และ 2.15 โดยใช้ค่าแก้ (correction factor) ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 อย่างไร

ก็ตามเฮนริช และโควอลล์ได้พัฒนาเครื่องทดสอบการระเบิดใหม่ๆ เพื่อให้ได้ค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันให้มีค่าใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมจริงๆ

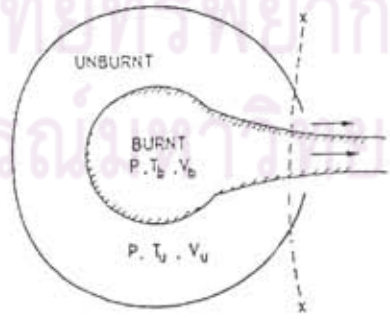
เฮนริชยังได้นำข้อมูลจากการทดลองของนักวิจัยอื่นๆ เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ในการหาพื้นที่ของช่องระบายโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.ที่พัฒนาโดย Bartknecht เพื่อระบุค่าอัตราการเผาไหม้ และอาศัยสมมุติฐานที่ว่า $(dP_{\alpha}/dt)P$ red จากการระเบิดในภาชนะที่มีช่องระบายมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับ $(dP_{\alpha}/dt)max$ จากเครื่องทดสอบนอกจากนี้เฮนริชยังวิเคราะห์ถึงทฤษฎีที่เป็นประโยชน์ในการไหลของก๊าซอัดภายในถังบรรจุไปสู่สภาวะบรรยากาศปกติภายหลังจากเปิดช่องระบายแรงดันอย่างทันทีทันใด โดยพิจารณาทั้งกรณีแบบ adiabatic และแบบ isothermal ด้วย

2.5.4.3 ทฤษฎีของรัสท์ (Theory by RUST)

ทฤษฎีของรัสท์ใช้พื้นฐานจากทฤษฎีของเฮนริช และโควอลล์ โดยใช้อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากเครื่องทดสอบระบบปิดในการประมาณค่าความเร็วการเผาไหม้เฉลี่ยจากการระเบิดในภาชนะที่มีช่องระบายโดยอาศัยกฎรากที่สาม (cube root law) ข้อด้อยที่สุดของทฤษฎีของรัสคือใช้การประมาณอัตราเร็วการเผาไหม้ของหมอกฝุ่น

2.5.4.4 ทฤษฎีของโนมูระ และทานากะ (Theory by NOMURA and TANAKA)

ทฤษฎีของโนมูระ และทานากะอาศัยพื้นฐานมาจากทฤษฎีก๊าซของยาโอ (Yao) แสดงดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แบบจำลองของการระบายแรงดันจากการระเบิดของโนมูระและทานากะ (Eckhoff, 1991:471)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองของเขาทั้งสองสร้างระนาบ x-x (boundary surface) ใกล้ทางออกของช่องระบายในภาชนะเพื่อให้ก๊าซทุกชนิดอยู่ทางด้านซ้ายของพื้นผิวระนาบ ส่วนก๊าซอื่นที่อยู่นอกช่องระบายซึ่งผ่านระนาบ x-x ออกไปไม่นำมาพิจารณา จากนั้นเขาได้สร้างสมการสมดุลพลังงานระดับมหภาพของระบบการไหลของก๊าซเพื่ออธิบายกระบวนการระบายแรงดันภายใต้สมมุติฐานว่าพลังงานความร้อนและความดันทั้งหมดอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ x-x ดังรูป 2.44 และพลังงานจลน์ทั้งหมดอยู่ทางด้านขวา

โนมูระและทานากะหาความสัมพันธ์ระหว่างทฤษฎีของพวกเขาและข้อมูลการทดลองคนอื่นๆ พบว่าการคำนวณหาพื้นที่ช่องระบายในสามครั้งจะมีหนึ่งครั้งที่ตรงกับผลการทดลอง เขาจึงสรุปว่า $A/V^{2/3}$ = ค่าคงที่ ซึ่งนำไปใช้เป็นกฎหาพื้นที่ช่องระบายเมื่อขนาดภาชนะใหญ่ขึ้น (scaling) สำหรับภาชนะที่สัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าไม่เกินหนึ่ง

2.5.4.5 การวิเคราะห์ทฤษฎีของนากี และเวอราคิส (Theoretical analysis by NAGY and VERAKIS)

ในครั้งแรกนากีและเวอราคิสพัฒนาทฤษฎีหนึ่งมิติสำหรับช่องระบายแรงดันจากการระเบิดวัสดุอนุภาคที่มีการไหลแบบแบบ sub-sonic ไม่จำกัดขอบเขตในท่อทรงกระบอกยาวที่มีช่องระบายแรงดันอยู่ปลายด้านหนึ่ง โดยพิจารณาเป็นสามกรณีตามตำแหน่งของชนวนจุดระเบิดคือด้านหนึ่งตรงปลายท่อ อีกด้านตรงช่องระบาย และตรงกลางของท่อ แต่ไม่พิจารณาความปั่นป่วนอันเกิดจากการไหลของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้บริเวณช่องระบาย ดังนั้นทฤษฎีหนึ่งมิติจึงมีลักษณะของหมอกฝุ่นดังรูปที่ 2.44 ซึ่งสัมพันธ์กับทฤษฎีการไหลแบบ sonic

การวิเคราะห์ของนากีและเวอราคิสอาศัยสมการพื้นฐานหลายสมการที่มีพจน์ของความดันสูงสุดและพื้นที่ช่องระบายภายใต้สมมุติฐานว่า dP/dt = 0 ที่ความดันสูงสุด มีพารามิเตอร์คือรูปร่างของภาชนะ ตำแหน่งชนวน และรูปแบบการไหลของหมอกฝุ่น แต่พวกเขาไม่สามารถเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นได้เพียงแต่พวกเขาได้ระบุโซนทั่วไปของการเผาไหม้ออกเป็นสองโซนภายใต้สมมุติฐานว่าเปลวไฟมีความหนาน้อยมาก และความเร็วในการเผาไหม้เท่ากับ $S_u\alpha$ เมื่อ S_u คือความเร็วของการเผาไหม้แบบราบเรียบ และ $\alpha > 1$ คือแฟคเตอร์ระดับความปั่นป่วน ซึ่งค่าทั้งสองได้จากการทดลองในเครื่องทดสอบระบบปิดกับอนุภาคที่ศึกษา นอกจากนี้เขายังนำทฤษฎีของเขาใช้วิเคราะห์ในกรณีที่แรงดันที่ทนได้ของช่องระบายมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ โดยเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีกับผลจากการทดลองการระเบิดอนุภาคภายในภาชนะขนาด 1.8 ลบ.ม. ที่มีช่องระบายแรงดัน

2.5.4.6 ทฤษฎีของกรูเบอร์และคณะ (Theory by GRUBER *ET AL.*)

ประยุกต์มาจากหลักไดนามิกส์พื้นฐานของก๊าซเช่นเดียวกับนักวิจัยอื่นๆ ที่กล่าวมาที่วิเคราะห์การไหลของก๊าซที่ช่องระบายแรงดัน และพิจารณาอิทธิพลของความปั่นป่วนต่ออัตราการเผาไหม้ที่หาได้โดยใช้ค่าความเร็วจากการเผาไหม้แบบราบเรียบกับแฟคเตอร์ความปั่นป่วน (ทฤษฎีของนากีและเวอราคิส) ส่วนกรูเบอร์และคณะได้รวมพิจารณาแฟคเตอร์ความปั่นป่วนตามลักษณะและขนาดของความปั่นป่วนเข้าไปด้วยโดยอ้างอิงจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา โดยเน้นในการหาสมการความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์ความปั่นป่วนกับ Reynolds number ของการไหลของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้

2.5.4.7 ทฤษฎีของสวิฟท์ (Theory by SWIFT)

สวิฟท์กล่าวว่าความดันสูงสุดที่ภาชนะทนได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นยกกำลังสอง ส่วนแฟคเตอร์ความปั่นป่วน (ได้จากผลการทดลอง) ก็สัมพันธ์กับอัตราการเผาไหม้เช่นเดียวกับทฤษฎีของนากีและเวอราคิส

2.5.4.8 ทฤษฎีของอูรอล (Theory by URAL)

ข้อแตกต่างของทฤษฎีนี้เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีอื่นที่กล่าวมาคือเขาใช้สมมุติฐานว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดที่ไม่มีการระบายแรงดันสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ง่ายๆ ดังรูปที่ 2.45 เมื่ออัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันในการระเบิดที่ไม่มีการระบายแรงดันเท่ากับ

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} = \frac{\pi}{2t_{max}}\left(P_{max} - P_0\right) \qquad (2.16)$$

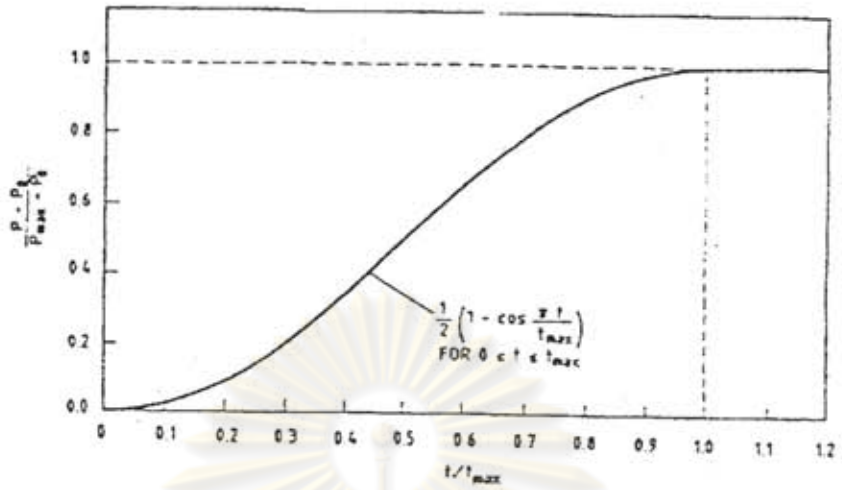
เมื่อ P_0 คือ ความดันเริ่มต้น

P_{max} คือ ความดันสูงสุด

t_{max} คือ เวลาของการจุดชนวนของการทดลองที่ได้ค่าความดันสูงสุด

จากสมการอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันขึ้นกับตัวแปรเดียวคือ t_{max}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.45 การประมาณทางคณิตศาสตร์ของรูปกราฟอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดที่ไม่มีช่องระบายแรงดันตามทฤษฎีของอูรอล (Eckhoff, 1991:473)

จากสมการ 2.15 ค่า $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากการทดลองในเครื่องทดสอบระบบปิดอาจแปลงเป็นค่า $(dP/dt)_{max}$ ของภาชนะจริงๆ ที่ปราศจากช่องระบายแล้วแทนค่าในสมการที่ 2.16 เมื่อทราบค่า t_{max} และใช้ทฤษฎีของการระบายแรงดันเพื่อประมาณค่าความดันสูงสุดที่ภาชนะสามารถทนได้ (P_{red}) ภายใต้สมมุติฐานว่าในการระเบิดทั้งที่มีและไม่มีช่องระบายแรงดัน อัตราการปลดปล่อยความร้อนต่อเวลามีค่าเท่ากัน

สำหรับทฤษฎีอื่นๆ ก็มุ่นเน้นให้การประมาณค่าจากการทดลองเพื่อทำนายค่าจริงๆ ภายในภาชนะที่มีช่องระบาย และทุกทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นใช้แบบจำลองในการหาอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นที่ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งต้องพัฒนาหาค่าอัตราการเผาไหม้และความปั่นป่วนเริ่มต้นจากการทดลอง และในสภาวะจริงต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 ข้อมูลในอดีตเกี่ยวกับอุบัติเหตุจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค

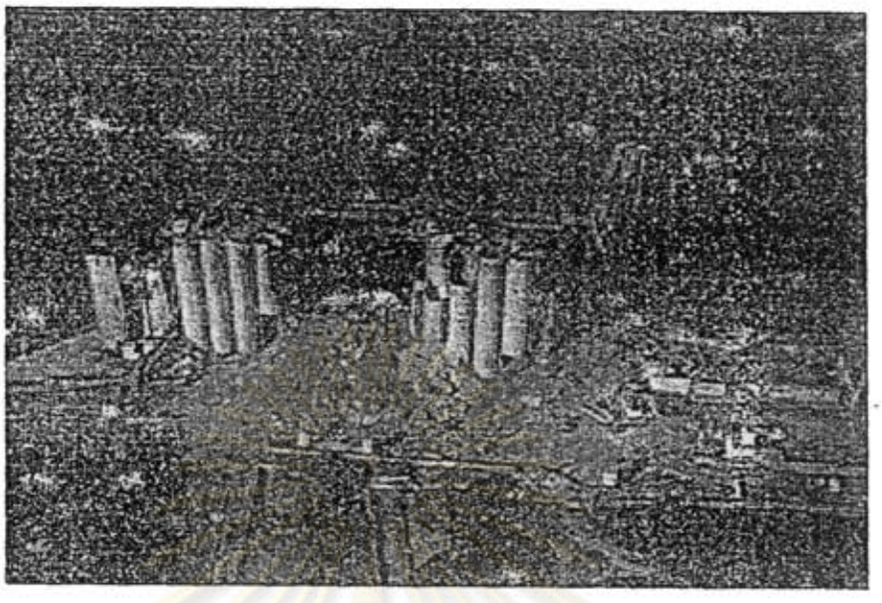
เป็นที่ทราบกันดีว่าอุบัติเหตุจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคในกระบวนการอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้ง ทางหนึ่งที่จะช่วยลดอุบัติเหตุดังกล่าวคือการศึกษาข้อมูลของอุบัติเหตุที่เกิดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค ในหัวข้อนี้ได้รวบรวมอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเท่าที่มีอ้างอิงและกล่าวถึงรวมถึงสถิติที่เป็นประโยชน์ไว้ด้วย

2.6.1 อุบัติเหตุการระเบิดวัสดุอนุภาคในอุตสาหกรรมการเกษตร

อุบัติเหตุจากการระเบิดวัสดุอนุภาคไม่ใช่เรื่องใหม่ที่เกิดขึ้น แต่เป็นปัญหาเดิมที่มักเกิดกับของแข็งขนาดเล็ก Eckhoff (1991: 159) กล่าวว่าได้มีบันทึกข้อความของ Count Morozzo (1795) เกี่ยวกับการระเบิดของโรงเก็บแป้งในวันที่ 14 ธันวาคม ค.ศ.1785 ที่เมือง Turin เป็นครั้งแรก จากความเสียหายของการระเบิดที่เกิดขึ้นทำให้งานวิจัยส่วนมากมิได้มุ่งไปที่ผลหลังจากเกิดการระเบิดเพียงอย่างเดียว แต่ยังหาวิธีขัดขวางไม่ให้เกิดอุบัติเหตุอีก

ถึงแม้ความรู้ของการระเบิดวัสดุอนุภาคจะมีมากว่า 200 ปี แต่ก็ยังมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นอยู่บ่อย ข้อมูลจากรายงานของ Torrent และคณะ อ้างอิงว่าในปี 1979 เกิดการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่โรงงานผลิตอาหารสัตว์ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Lerida ประเทศสเปน มีผู้เสียชีวิต 10 คน อาคารลำเลียงอนุภาคเสียหาย นอกจากนี้ได้เกิดการระเบิดในไซโลเก็บผงจากเมล็ดพืชทางการเกษตรที่เมือง Blaye ประเทศฝรั่งเศส เมื่อเดือนสิงหาคม ปี1997 (ดังรูปที่ 2.46) มีผู้เคราะห์ร้าย 11 ราย และการระเบิดของผงจากเมล็ดพืชในลิฟท์ลำเลียงอนุภาคที่เมือง Haysville รัฐ Kansas สหรัฐอเมริกา เมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 1998 เป็นเหตุให้มีผู้เสียชีวิต 7 ราย บาดเจ็บ 10 ราย ประเมินความเสียหายทั้งในระยะสั้นและระยะยาวเป็นเงิน 850,000 เหรียญสหรัฐ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.46 อุบัติเหตุการระเบิดในไซโลที่เมือง Blaye ปี 1997

จากข้อมูลที่สามารถสืบค้นได้จากแหล่งต่างๆ พบว่าอุตสาหกรรมเกษตรมีประวัติของการเกิดอุบัติเหตุมายาวนาน ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งที่ลิฟท์ลำเลียงอนุภาค (bucket grain elevators) เครื่องโม่วัตถุดิบ (feed mills) เครื่องโม่แป้ง (flour mills) ดังนั้นศาสตราจารย์ SCHOEFF, (1999) ภาควิชาวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมเมล็ดพืชร่วมกับ Ralph Regan ผู้อำนวยการด้านความปลอดภัยของสำนักงานการเกษตร ประเทศสหรัฐอเมริการ ได้ทำการรวบรวมสถิติของการระเบิดผงจากเมล็ดพืชทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา พบว่าในช่วงปี 1980 จำนวนอุบัติเหตุของการระเบิดวัสดุทางการเกษตรที่มีการรายงานมีประมาณ 17 ราย และในช่วงปี 1988-1997 มีประมาณ 13 ราย ต่อปี (รวม 129 ข้อมูล) ประเมินค่าเสียหายประมาณ 7.7 ล้านเหรียญสหรัฐ นอกจากนี้ยังได้สรุปเปอร์เซ็นต์ของแหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิดจาก 70% ของข้อมูลการระเบิดในอุตสาหกรรมการเกษตรทั้งหมด 129 ข้อมูล และบริเวณแรกที่เกิดการระเบิดจาก 91% ของข้อมูลทั้งหมด ในช่วงปี 1988-1997 ไว้ดังตารางที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 แหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)

CAUSE OF IGNITION	%OF THOSE IDENTIFIED
Fires	16
Bearing Failure	15
Sparks	10
Welding/Cutting	9
Hot metal Surface	8
Electrical failure	3
Foreign Material	3

ตารางที่ 2.6 บริเวณแรกที่เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)

LOCATION	%OF ACCIDENTS
Bucket Elevator	43
Bin	16
Dust Filter	8
Dust System	6
Grinder / Hammermill	4
Drag Conveyor	2
Unidentified	9

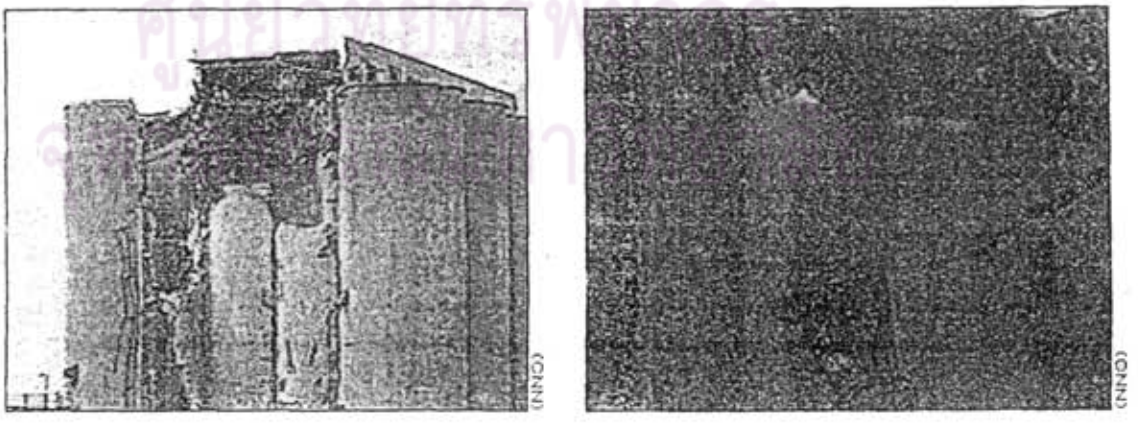
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Eckhoff (1991: 165) กล่าวว่าสาเหตุที่ลิฟท์ลำเลียงอนุภาคมักเกิดการระเบิดของอนุภาคได้มากที่สุดเนื่องจากความร้อนจากการเสียดสีกันของแผ่นโลหะชิ้นเล็กๆ ซึ่งปิดแกนกลางที่ใช้หมุนลิฟท์ลำเลียงอนุภาคกับผ้าสักหลาดกันอนุภาคที่หุ้มแกนกลางของพู่เล่ ความร้อนที่เกิดในระหว่างการทำงานจะทำให้ผ้าสักหลาดลุกไหม้หลุดเป็นชิ้นๆ ตกลงมาที่กองอนุภาคซึ่งอยู่บนพื้นระนาบเอียงใต้เพลาแกนกลางเกิดเป็นกองอนุภาคที่ระอุไปด้วยความร้อนกองแรก หลังจากหยุดการลำเลียงอนุภาค กองอนุภาคที่ระอุด้วยความร้อนสามารถสัมผัสกับอนุภาคอื่นภายในลิฟท์ทำให้เกิด

การลุกไหม้ต่อๆ กันจนเกิดการระเบิดขั้นปฐมภูมิ และอาจเกิดการระเบิดในขั้นทุติยภูมิได้กับกองอนุภาคด้านล่างของลิฟท์ลำเลียง ดังรูปที่ 2.47 แสดงการสะสมของอนุภาคใต้ลิฟท์ลำเลียง

รูปที่ 2.47 การสะสมของอนุภาคด้านล่างของลิฟท์ลำเลียง

ข่าวเหตุการณ์การระเบิดอนุภาคข้อมูลจากสำนักข่าว CNN (www.cnn.com) มีข่าวการระเบิดของเมล็ดพืชในวันที่ 8 มิถุนายน 1998 ที่ลิฟท์ลำเลียงเมล็ดพืชความสูง 0.75 ไมล์ของบริษัท DeBruce ทางตะวันตกเฉียงใต้ของเมือง Sedgwick ซึ่งอยู่ทางตอนใต้ของรัฐ Wichita สหรัฐอเมริกา มีผู้เสียชีวิต 2 คน และติดอยู่ภายในตัวอาคารลำเลียงอีก 4 คน ดังรูปที่ 2.48



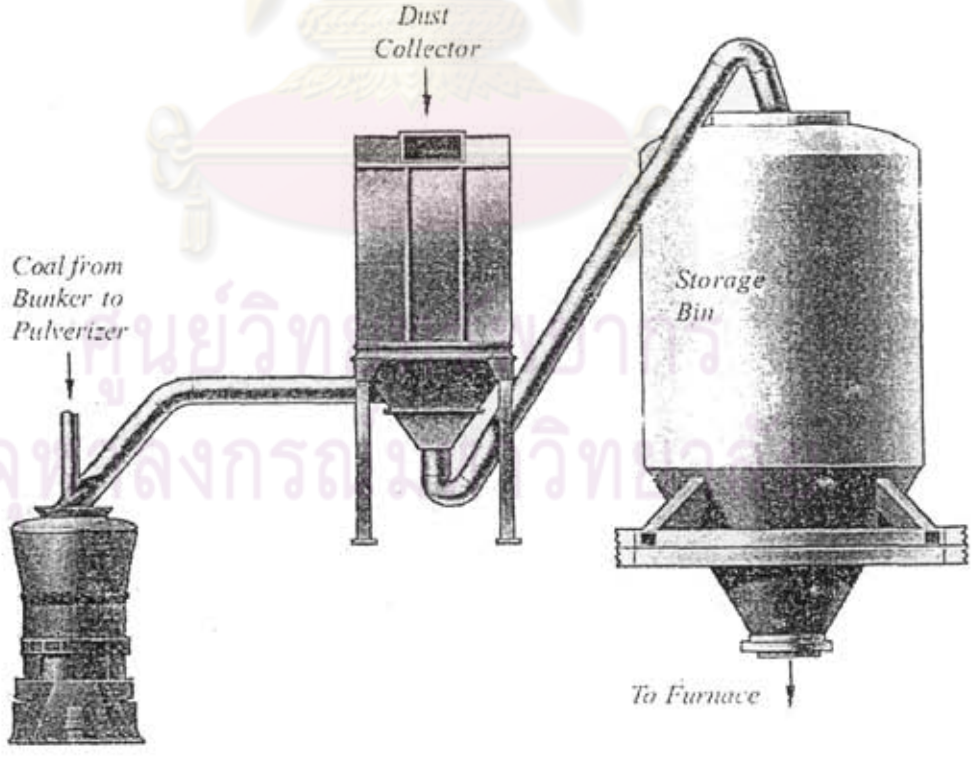
รูปที่ 2.48 อุบัติเหตุการระเบิดของเมล็ดพืชในลิฟท์ลำเลียง (www.cnn.com)

อีกแห่งข้อมูลจากสำนักข่าว BBC (www.bbc.com) เป็นอุบัติเหตุการระเบิดในโรงงานน้ำตาล British ที่เมือง Cantley ใกล้เมือง Norwich ประเทศอังกฤษ ในวันจันทร์ที่ 21 กรกฎาคม 2003 มีผู้ได้รับบาดเจ็บสาหัสหนึ่งรายและผู้ได้รับบาดเจ็บไม่ทราบจำนวนแน่นอน

ส่วนในประเทศไทย ผู้เขียนยังไม่เคยเห็นรายงานเกี่ยวกับสถิติการระเบิดของวัสดุอนุภาคแต่ก็ทราบจากบุคคลที่ทำงานในอุตสาหกรรมต่างๆ บ้างว่ามีอุบัติเหตุประเภทนี้เกิดขึ้นอยู่เนืองๆ ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2545 บริษัท แป้งมันราชสีมา จำกัด ก็มีอุบัติเหตุการระเบิดของแป้งมันที่ขนถ่ายในท่อ มีผู้เสียชีวิต 1 ราย และบาดเจ็บ 6 ราย เป็นต้น

2.6.2 อุบัติเหตุการระเบิดวัสดุอนุภาคในเหมืองถ่านหิน

การระเบิดของวัสดุอนุภาคถ่านหินสามารถเกิดได้ทั้งในขั้นตอนการลำเลียงและการจัดเก็บ รูปที่ 2.49 แสดงกระบวนการอย่างง่ายในการจัดเก็บถ่านหิน การระเบิดในเหมืองถ่านหินค่อนข้างเกิดมากเนื่องจากเกิดการระเบิดได้ทั้งก๊าซมีเทนจากถ่านหินบางชนิดและอนุภาคถ่านหิน จึงทำให้เมื่อเกิดการระเบิดขึ้นจะรุนแรงและส่งผลให้เกิดความยากในการหาสาเหตุที่แท้จริงของการระเบิด



รูปที่ 2.49 กระบวนการบดและการจัดเก็บถ่านหินอย่างง่าย

Eckhoff (1991: 191) กล่าวว่าแหล่งพลังงานในการระเบิดมักระบุได้ยากแต่ Eckhoff ได้เสนอแหล่งพลังงานสามแหล่งที่อาจเป็นได้ คือ

- การลุกไหม้เองของถ่านหินที่เก็บอยู่
- จากแหล่งพลังงานกลและไฟฟ้าสถิตย์
- ถ่านหินร้อนที่ออกจากเตาอบ

ข่าวการระเบิดของเหมืองถ่านหินจากสำนักข่าว BBC มีการระเบิดของก๊าซมีเทนในเหมืองถ่านหินของรัฐทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศจีน เมื่อวันที่ 30 มกราคม 1998 มีผู้เสียชีวิต 78 ราย ณ เหมือง Wangjiying เมือง Liaoning ผู้สื่อข่าว BBC ยังรายงานว่ามีผู้เสียชีวิตกว่า 10,000 คนต่อปีจากอุบัติเหตุในลักษณะนี้ ข้อมูลจากสำนักข่าว CNN มีการระเบิดในเหมืองถ่านหิน Jasmos ที่เมือง Jastrzebie Zdroj ห่างจากเมือง Warsaw ไปทางตะวันตกเฉียงใต้ประมาณ 300 กิโลเมตร (180 ไมล์) ประเทศโปแลนด์ ในวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2002 การระเบิดเกิดลึกลงไปใต้พื้นดินประมาณ 700 เมตร สาเหตุอาจเกิดจากก๊าซมีเทนหรืออนุภาคถ่านหินมีผู้เสียชีวิต 10 ราย การระเบิดในเหมืองถ่านหินในประเทศโปแลนด์มีรายงานมาตั้งแต่ปี คศ.1987 ที่เมือง Myslowice มีผู้เสียชีวิต 18 ราย ข่าวของการระเบิดในเหมืองถ่านหินเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำบางอุบัติเหตุก็มีการรายงานแต่บางส่วนก็ไม่มีการรายงานเช่นกัน

2.7 งานวิจัยและพัฒนาที่มีการรายงานในอดีต

ตัณฑะพานิชกุล และคณะ (1996) จัดสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับทดสอบคุณสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาคชนิด Hartmann bomb ใช้ในการศึกษาวัดค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Lower Explosion Limit, LEL) ของตัวอย่างวัสดุอนุภาคต่างๆ ภายในประเทศ โดยใช้ lycopodium, HDPE, dextrin และ sulfur ในการสอบเทียบเครื่องพบว่าให้ค่า LEL ใกล้เคียงกับค่า LEL ที่มีตีพิมพ์ในต่างประเทศ ผลการทดลองพบว่าค่า LEL จะเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของแต่ละส่วนย่อยของวัสดุอนุภาค และยังได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของวัสดุอนุภาคละเอียดสุดในแต่ละส่วนย่อยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากันด้วย นอกจากนั้นตามที่คาดไว้ความชื้นมีผลให้ค่า LEL สูงขึ้น

Chi-Min Shu และ Po-Jiun Wen (2002) ศึกษาสมบัติด้านการระเบิดของ o-xylene (OX)/air mixture ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต phthalic anhydride (PA) สมบัติที่ศึกษาได้แก่ ขอบเขตของการระเบิด ปริมาณออกซิเจนน้อยสุดที่ใช้ (MOC) ความดันสูงสุดของการระเบิด และบริเวณที่เกิดการแพร่กว้างของเปลวไฟ ซึ่งได้ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ภายใต้ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ คือ 760, 1520 mmHg และ 2280 mmHg ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าถ้าออกซิเจนในอากาศมีปริมาณถึง 40vol% ใน $OX/O_2/N_2$ mixture จะทำให้ระดับ K_{st} class

เปลี่ยนจาก St-0 เป็น St-3 และ MOC มีค่าลดลงเมื่อ O_2 มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณ O_2 เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการประเมินความรุนแรงของการระเบิด การเพิ่มค่าความดันเริ่มต้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณ PA ให้มากขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มช่วงกว้างของบริเวณเปลวไฟซึ่งทำให้เกิดอันตรายมากขึ้น ดังนั้นวิธีแก้ไขคือต้องให้ความเข้มข้นของ OX สูงกว่า upper flammable limit ดังนั้นสภาวะในกระบวนการจึงไม่ลุกติดไฟ.นอกจากนี้ผลการทดลองยังสามารถได้จากเครื่องทดลองขนาด 1 ลิตรอีกด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก็ได้ผลเป็นที่ยอมรับได้เช่นกัน

Mercer และคณะ (2001) จัดสร้าง 20 liters Siwek sphere ที่ประกอบด้วยรูปโดมครึ่งวงกลมทั้งสองด้านของเครื่องทดสอบ เพื่อใช้ในการผ่านแสงจากชุด Laser Doppler Anemometry (LDA) ศึกษาลักษณะความปั่นป่วนของเม็ดอลูมินาในช่วงการจุดระเบิด (pre-ignition period) ของหัวฉีดกระจายวัสดุอนุภาค (nozzle) 3 แบบ คือ rebound nozzle, perforated annular nozzle และ circular "Dahoe" nozzle ซึ่งออกแบบใหม่โดย Dahoe แห่ง Delft University of Technology พบว่าหัวฉีดแบบ rebound และ Dahoe ทำให้อนุภาคถูกฉีดขึ้นถึงด้านบนของเครื่องและตกลงมากลางเครื่อง (ตำแหน่งการจุดระเบิด) ภายใน 10 มิลลิวินาที

ต่อมา A.E. Dahoe, R.S. Cant และ B.Scarlett (2001) ศึกษาลักษณะความปั่นป่วนของอนุภาคภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร โดยใช้หลัก laser doppler anemometry วัดความเร็วของอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร โดยใช้หัวฉีดกระจายวัสดุอนุภาคทั้งสามแบบที่กล่าวข้างต้น และได้สมการความสัมพันธ์ของความปั่นป่วนคือ $v_{ms}/v_{ms}{}^{0} = (t/t_0)^{n}$ ซึ่งสมการดังกล่าวไม่เป็นในรูปแบบกฎรากที่สามที่มีใช้กันอยู่

S. Radandt และคณะ (2001) ทำการทดลองโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาผลของสัดส่วนความสูงต่อความกว้าง (H/D ratio ;ในช่วง 8-15) ของเครื่องทดสอบที่ปริมาตรเท่ากันต่อค่าความดันสูงสุด (P_{max})และอัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน [$(dP/dt)_{max}$] จากการระเบิดแป้งข้าวโพด พบว่าในช่วง H/D < 8 [คือ 1-8] ค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ลดลง เมื่อ H/D เพิ่มขึ้น และในช่วง H/D > 8 [คือ 8-15] ค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ เพิ่มขึ้น เมื่อ H/D เพิ่มขึ้น

Going และคณะ (2000) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร และเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรของห้องปฏิบัติการวิจัยใน Pittsburgh เพื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติของการระเบิดวัสดุอนุภาค (เช่น LEL, ความดัน, K_{st}, Percent O_2 เป็นต้น) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ข้อได้เปรียบของเครื่องทดสอบขนาด 20 liters คือ ใช้เวลาในการทดลองน้อย และใช้ตัวอย่างน้อยกว่าแต่ถ้าตัวอย่างวัสดุอนุภาคระเบิดได้ยาก (มีค่า LEL สูง) แนะนำให้ใช้เครื่องขนาด 1 m^3

E.Conde Lazaro และ J.Garcia Torrent (2000) ศึกษาผลของความดันเริ่มต้นก่อนการระเบิด (ศึกษาในช่วง 1-15 บาร์) ในเครื่องทดสอบขนาด 1 m^3 sphere พบว่าความดันเริ่มต้นถ้ามีค่ามากขึ้น

ทำให้ค่าความดันสูงสุดของการระเบิด (P_{max}) สูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นยังศึกษาผลของความปั่นป่วนว่ามีผลทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน [$(dP/dt)_{max}$] สูงขึ้น

Kenneth L. Cashdollar (2000) กล่าวถึงภาพรวมของค่าสมบัติการระเบิดอนุภาคเพื่อสามารถนำค่าต่างๆ ไปใช้ในการสร้างความปลอดภัยในอุตสาหกรรม กล่าวคืออนุภาคในกระบวนการต้องทราบค่าขอบเขตความเข้มข้นของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ พลังงานที่ทำให้อนุภาคเกิดการระเบิดได้ และเมื่ออนุภาคเกิดการระเบิด (เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้) สมบัติของการเผาไหม้ขึ้นกับสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารเอง โดยเฉพาะการกระจายขนาดอนุภาค ส่วนสมบัติของการระเบิดที่ศึกษาคือความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ ความดันสูงสุดจากการระเบิด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน ความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยสุดที่ทำให้เกิดการระเบิด อุณหภูมิในการลุกไหม้ และปริมาณของสารเฉื่อยที่จำเป็นในการยับยั้งการระเบิดจุดประสงค์สำคัญที่ต้องการคือให้เข้าใจพื้นฐานของการระเบิดอนุภาค

M.W. Whitmore และ G.P. Baker (1999) ใช้เครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิด (mini-autoclave) เพื่อหาค่าสมบัติของการระเบิดได้แก่ อุณหภูมิการเผาไหม้อนุภาค (T_p) ความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{max}) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ ของสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นตัวแปรที่ใช้แบ่งชนิดของสารอินทรีย์ พบว่าค่า $(dP/dt)_{max}$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้แบ่งชนิดของสารอินทรีย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การพัฒนาสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

ในการพัฒนาเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคที่ดำเนินการในโครงการนี้ สามารถแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การพัฒนาและสร้าง Hardware พัฒนาตัวเครื่องทดสอบในส่วนต่างๆ ให้สามารถใช้งานง่าย สะดวกในการทดสอบ

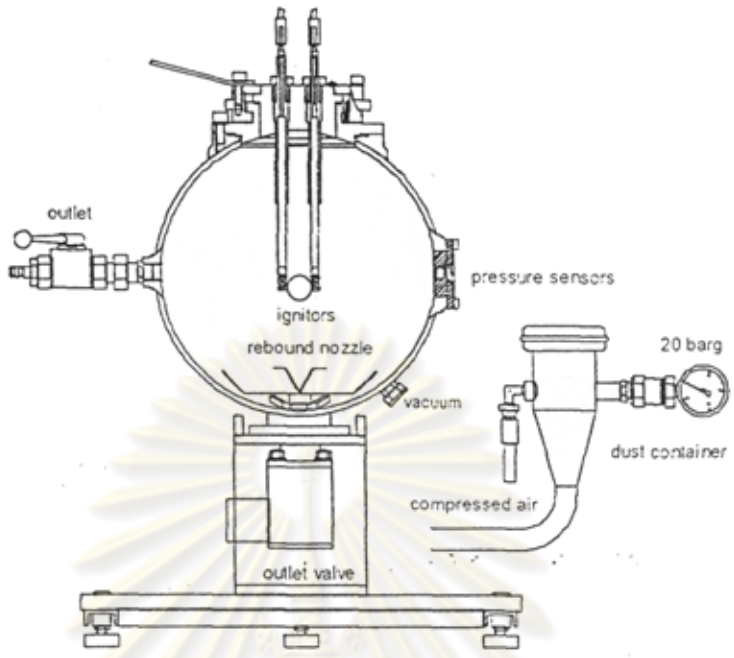
2. การพัฒนา Software ซึ่งเป็นโปรแกรมการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในชุดทดสอบทั้งในส่วนปั๊มสุญญากาศ โซลินอยวาล์วควบคุมการทำงานของ outlet valve และหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจุดชนวนระเบิด และพัฒนาโปรแกรมในการรับค่าความดันที่เกิดจากการระเบิดจากหัววัดแรงดัน

3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ เรียกว่า "ชุดเครื่องมือทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ" (CU Dust Explosion Pressure Tester) โดยในการพัฒนาได้ใช้หลักการทำงานของเครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตร ที่พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Siwek รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องทดสอบนี้ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนห้องจุดระเบิด (Explosion Chamber Section)
2. ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค (Compressed Air and Particle Supply Section)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

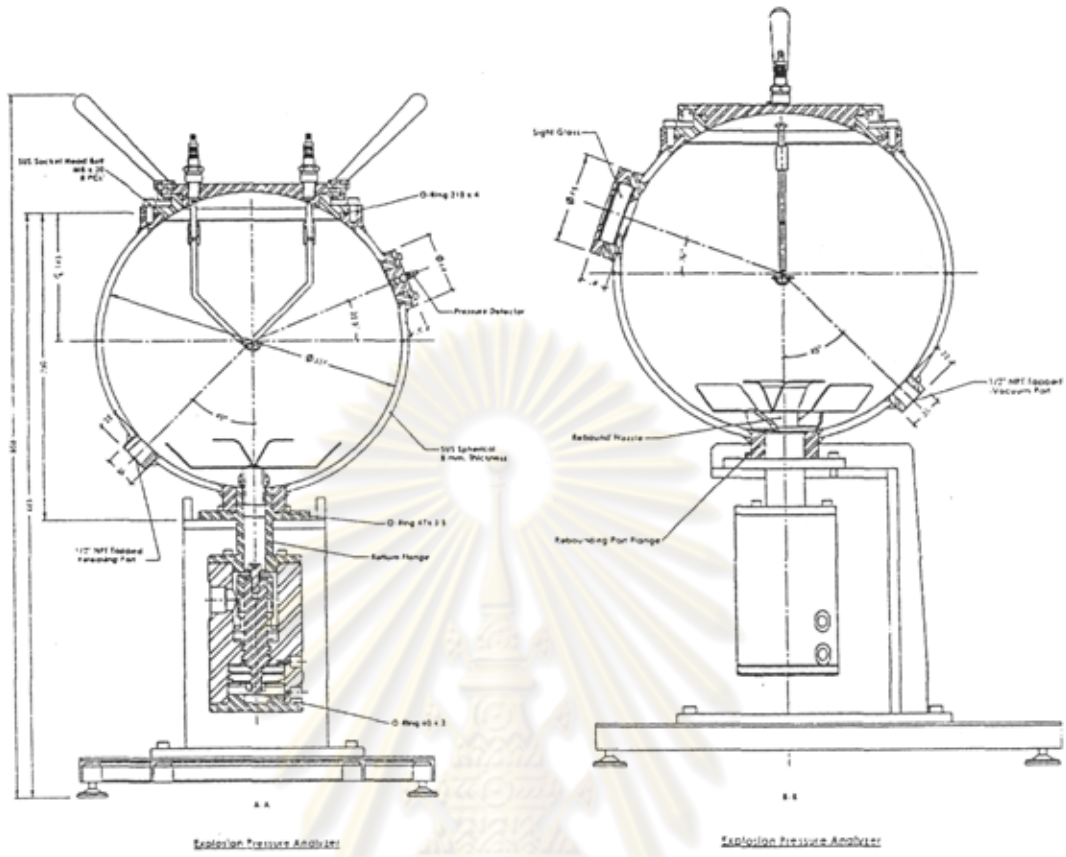


รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร

3.1.1 ส่วนห้องจุดระเบิด มีองค์ประกอบหลักดังนี้

3.1.1.1 ห้องจุดระเบิดปริมาตร 20 ลิตร

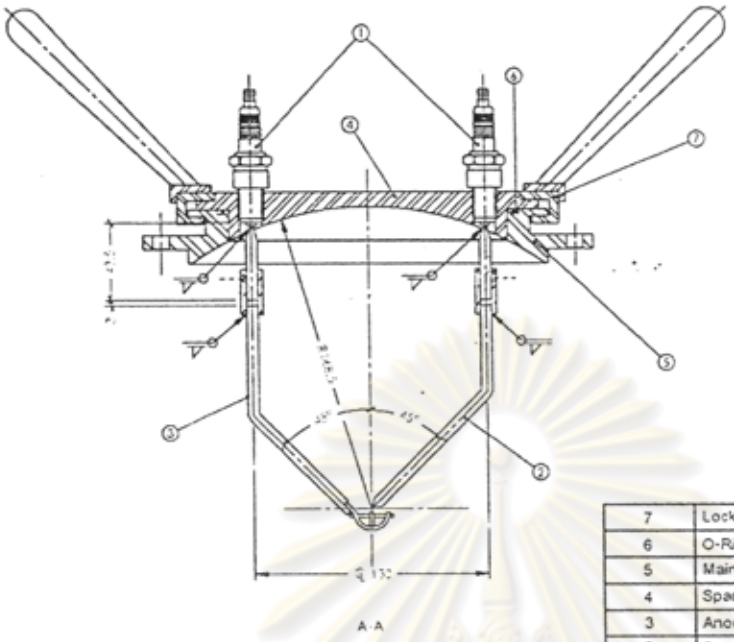
ห้องจุดระเบิดที่พัฒนาขึ้นในงานนี้มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 337 มิลลิเมตร ทำจากสเตนเลส เบอร์ 316 หนา 8 มิลลิเมตร ทนความดันได้ 20 บาร์ ดังรูปที่ 3.2 ด้านบนของถังเป็นฝาปิดประกอบด้วยหน้าแปลนที่เชื่อมติดกับตัวถัง (Upper port flange) และยึดติดกับหน้าแปลนอีกชิ้น (Main support ring) ด้วยน็อตเกลียวปล่อยเบอร์ M8 ขนาด20 มิลลิเมตรซึ่งตรงกลางเป็นที่ว่างเพื่อใส่ฝาของขั้วไฟฟ้า (Spark holding plug plate) ที่ด้านในมีลักษณะโค้งครึ่งวงกลมและมีแหวนล็อกซึ่งมีด้ามจับใช้ล็อกฝาและหน้าแปลน (Main support ring) ผนังของถังมีอุปกรณ์ต่อพ่วงได้แก่ หัววัดแรงดัน ช่องมอง ส่วนของการดึงอากาศออกจากถัง และส่วนของการระบายก๊าซจากการระเบิดออกจากถัง ส่วนด้านล่างของถังมีลักษณะเป็นฐานที่ยึดติดกับท่อทางเข้าของอากาศและอนุภาคที่มีลักษณะเป็นหน้าแปลนสองด้าน ด้านหนึ่งติดกับฐานของถังทรงกลมด้วยการขันเกลียวของอุปกรณ์กระจายลม (Rebound nozzle) และวางอยู่บนฐานของเครื่องทดสอบ ส่วนหน้าแปลนอีกปลายด้านหนึ่งของท่อยึดติดกับวาล์วทรงกระบอกถ่ายเทอากาศอัดและอนุภาค (outlet valve)



รูปที่ 3.2 ห้องจุดระเบิดทรงกลมปริมาตร 20 ลิตร ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านข้าง (ขวา)

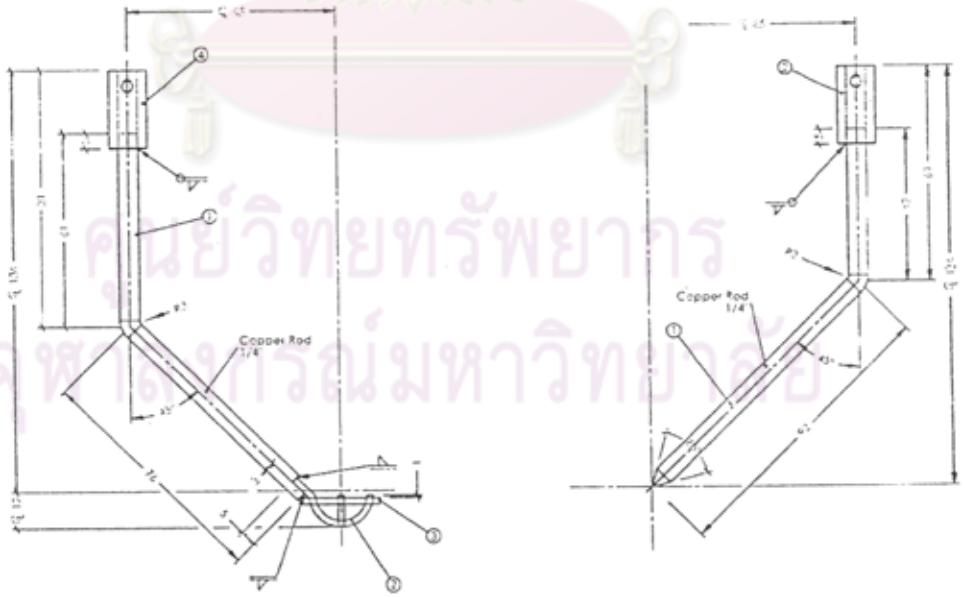
3.1.1.2 ชุดฝาปิดพร้อมขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ตำแหน่งของกระเปาะเพื่อใส่ชนวนเพื่อจุดระเบิดอยู่กึ่งกลางของห้องจุดระเบิดพอดี (รัศมีเท่ากับ 168.5 มิลลิเมตร) ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วของหัวเทียนที่ขันเกลียวอัดเข้าที่ฝาและเชื่อมต่อกับลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ¼นิ้ว ลวดทองแดงที่ต่อยาวลงมาขนาดเดียวกันยึดติดกับลวดทองแดงที่ติดกับหัวเทียนด้วยปลอกที่ออกแบบขึ้นดังรูปที่ 3.4 ชุดฝาทั้งหมดจะยึดกันด้วยตัวล็อก (Locking ring) และป้องกันการรั่วด้วย O-ring ที่หน้าสัมผัสของหน้าแปลน (Main support flange) และฝาปิด (Spark plug plate)



ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.
7	Lock Ring & Handle	1
6	O-Ring 162x3	1
5	Main Support Ring	1
4	Spark Plug Plate	1
3	Anode Arm	1
2	Cathode Arm	1
1	Spark Plug with1/4" Copper Rod/40 Length	2

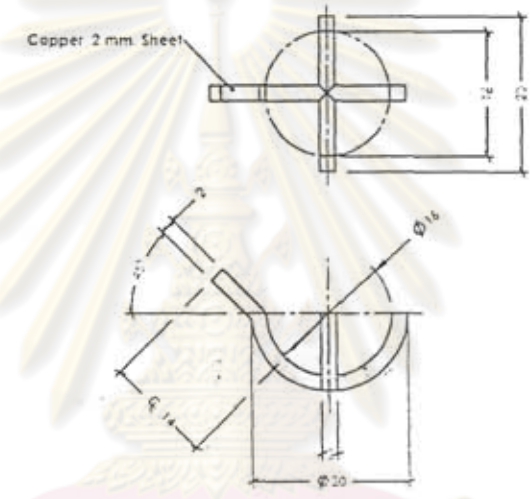
รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าพร้อมฝาปิดของห้องจุดระเบิด



รูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้วหัวเทียนหรือขั้วอิเล็กโทรดดังกล่าวต่ออยู่กับหม้อแปลงและควบคุมเวลาหน่วงของการจ่ายกระแสด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ปลายของขั้วอิเล็กโทรดด้านหนึ่งที่มีลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ปลายขั้วอิเล็กโทรดอีกด้านจะถูกเจียรให้เป็นปลายแหลมทำมุม 60 องศา ใช้ระยะห่างระหว่างปลายขั้ว 6-8 มิลลิเมตร ใช้หม้อแปลงที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ เวลาหน่วงก่อนการสปาร์คจะตั้งค่าหน่วงไว้ที่ 10 ถึง 60 มิลลิวินาทีหลังจากวาล์ว (Outlet valve) ที่ผ่านอากาศอัดและอนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดปิดลง ระยะเวลาของการปล่อยสปาร์คสามารถตั้งค่าได้



รูปที่ 3.5 ปลายขั้วอิเล็กโทรดลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลม

3.1.1.3 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ประกอบด้วยหน้าแปลนที่เชื่อมติดผนังของและหน้าแปลนที่ใส่กระจกลาร์มิเนตหนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับหน้าแปลนที่ถังด้วยน็อตะกลียวปล่อยเบอร์ M4 ขนาด 15.6 มิลลิเมตร

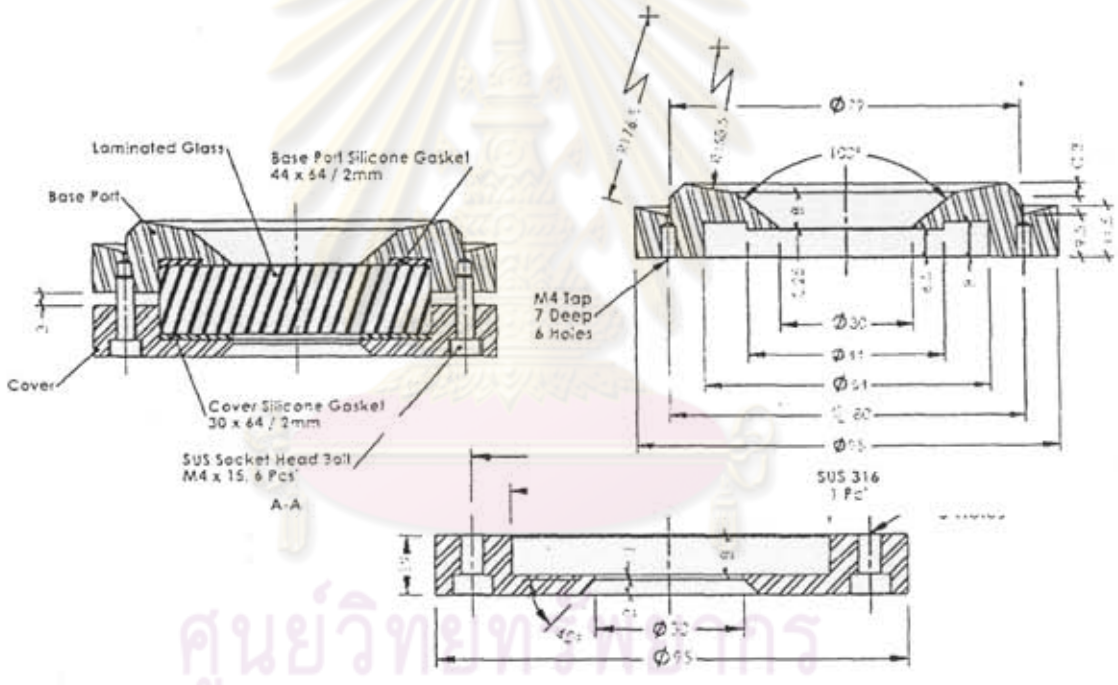
3.1.1.4 ชุดหัววัดแรงดันจากการจุดระเบิด

ในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นลักษณะคล้ายกับช่องมองแต่หน้าแปลนชิ้นที่ไม่ติดกับถังต้องมีความหนาเท่ากับความสูงของหัววัดแรงดัน (Pressure sensor) เพื่อใส่หัววัดเข้าไปได้ให้พอดีผนังด้านในถังซึ่งต้องอาศัยความชำนาญในการกลึงชิ้นงานอย่างมาก นอกจากนี้ที่หัววัดต้องใส่ฉนวนกันรอยรั่วซึ่งมีลักษณะเป็นปลอกวงแหวนใส่ตรงกลางของหัววัด ข้อดีของการให้ชุดหัววัด

แรงดันสามารถถอดจากหน้าแปลนได้ คือหากต้องการเปลี่ยนค่าวัดเป็นตัวแปรอื่น เช่นวัดอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลก็สามารถทำได้โดยใส่ชุดหน้าแปลนใหม่เข้าไป

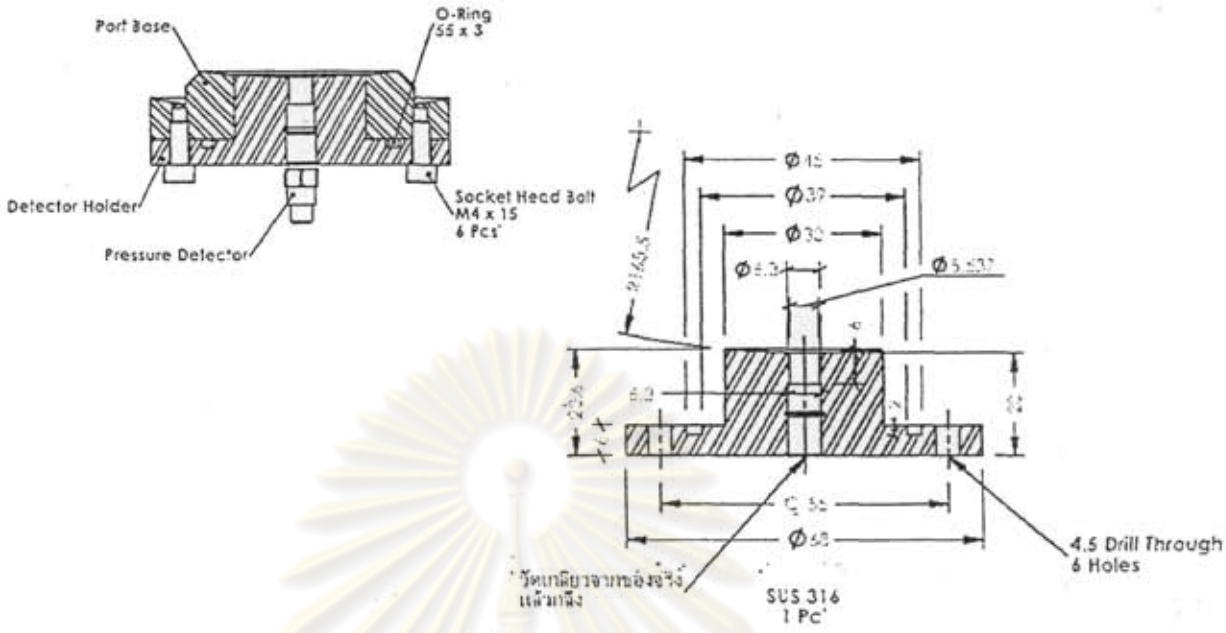
3.1.1.5 ส่วนของช่องดึงอากาศ และระบายก๊าซจากการระเบิด

ส่วนนี้ทำโดยการเจาะรูด้านล่างของถังทำมุม 45 องศากับแกน Y และเชื่อมแหวน (ท่อทรงกระบอกเล็กๆ) สูง 22 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 35 มิลลิเมตร ภายในเป็นเกลียว เพื่อใส่ท่อเพื่อต่อกับเกจวัดแรงดันสุญญากาศ และบอลล์วาล์วเพื่อต่อปั๊มสุญญากาศ การดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิดเพื่อลดแรงดันภายในถังให้เกิดความดันแตกต่างที่มากพอในการกระจายอนุภาคในระยะเวลาสั้น โดยปกติความดันที่ลดลงภายในถังตามมาตรฐานเท่ากับ -0.6 ถึง-0.7 บาร์เกจ ส่วนด้านระบายก๊าซก็มีลักษณะเช่นเดียวกันแต่จะใช้บอลล์วาล์วต่อเข้ากับท่อพลาสติก



รูปที่ 3.6 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

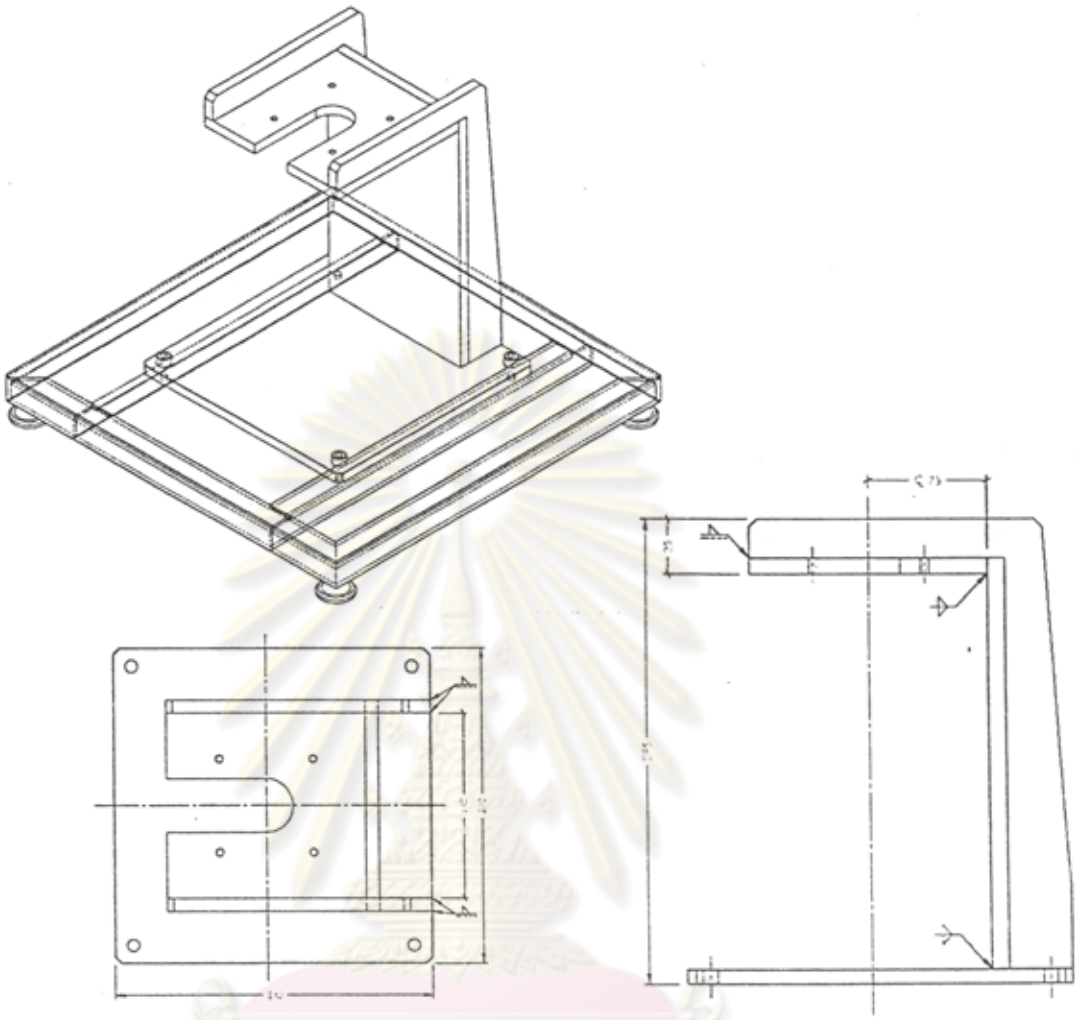


รูปที่ 3.7 หน้าแปลนติดตั้งชุดหัววัดแรงดันจากการจุดระเบิดที่ผนังของห้องจุดระเบิด

3.1.1.6 ฐานและแท่นของเครื่องทดสอบ

ดังในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นฐานของเครื่องทำจากสเตนเลสขนาด 400 x 400 มิลลิเมตรด้านล่างติดขาตั้งซึ่งสามารถปรับระดับได้ที่มุมทั้งสี่ จากฐานมีแท่นลักษณะคล้ายตัว ซี ความสูง 295 มิลลิเมตรใช้รองรับบริเวณฐานของห้องจุดระเบิด โดยเป็นที่วางของหน้าแปลนของท่อลำเลียงอนุภาคและอากาศอัดจากวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ฐานและแท่นรองรับเครื่องทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค มีอุปกรณ์หลักดังนี้

3.1.2.1 ถังอากาศอัด (Air zero)

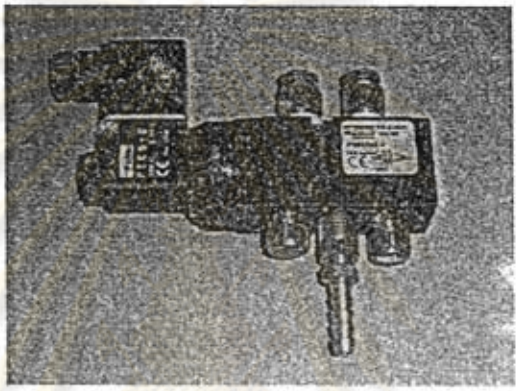
ประกอบด้วยออกซิเจน 21%และไนโตรเจน 79% อัดในถังปริมาตร 6 คิวทำหน้าที่จ่ายอากาศอัดผ่านวาล์วปรับแรงดันเท่ากับ 12.5 บาร์ ผสมกับอนุภาคภายในกระบอกเก็บอนุภาคขนาด 0.6 ลิตร อากาศอัดและอนุภาคจะเข้าสู่ห้องจุดระเบิดผ่านทางวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve) ด้วยความดันแตกต่างของความดันในกระบอก 0.6 ลิตร (12.5 บาร์) กับความดันภายในถังขนาด 20 ลิตร (-0.6 บาร์)

3.1.2.2 คอมเพรสเซอร์

ทำหน้าที่จ่ายลมอัดความดัน 7-9 บาร์ ให้โซลินอยวาล์ว เพื่อทำการจ่ายลมอัดให้กับวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve) เพื่อให้วาล์วเปิดปิด

3.1.2.3 โซลินอยวาล์ว

ดังแสดงในรูปที่ 3.9 วาล์วนี้จะใช้สำหรับเปิดให้ลมอัดจากคอมเพรสเซอร์เข้ามาทางด้านหนึ่งแล้วปล่อยให้ลมอัดออกได้สองทางโดยสามารถตั้งเวลาให้ลมอัดออกช่องแรกและออกอีกช่องหนึ่งเมื่อถึงเวลา เป็นการควบคุมการเปิดปิดลูกสูบภายในวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)



รูปที่ 3.9 โซลินอยวาล์วจ่ายลมอัดให้วาล์วทรงกระบอก

3.1.2.4 ปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มนี้ใช้สำหรับดึงอากาศออกออกจากถังระเบิดขนาด 20 ลิตรเพื่อให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างถังขนาด 0.6 ลิตร และขนาด 20 เพื่อประโยชน์ในการส่งผ่านอนุภาคและอากาศเข้าสู่ถังระเบิดขนาด เมื่อเริ่มทำการทดลองให้เปิดวาล์วกดปุ่มทำงานจากเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นอากาศในถังจะถูกดึงออกผ่านที่กรองอนุภาคจนเกจความดันถึงค่าที่ต้องการ (-0.6 บาร์เกจ)

3.1.2.5 วาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)

รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นวาล์วซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในการจ่ายอนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ถังระเบิดขนาด 20 ลิตร โดยปกติลมอัดจากโซลินอยวาล์วจะเข้าทางท่อด้านล่างของวาล์วทำให้ลูกสูบภายในปิดตลอดเวลาและเมื่อทำการทดสอบจะตั้งเวลาตั้งแต่เริ่มสั่งการทดสอบ (ปุ่ม start) ประมาณ 40 มิลลิวินาที โซลินอยวาล์วจะถูกควบคุมให้ปล่อยลมอีกช่องหนึ่งเพื่อดันลูกสูบให้ตกลงมาเพื่อเปิดให้อนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ถัง วาล์วเปิดนานประมาณ 10 มิลลิวินาที จึงปิดอีกครั้ง ข้อดีของวาล์วทรงกระบอกที่พัฒนาขึ้นนี้คือทนแรงดันจากการระเบิดได้ 20 บาร์

สามารถใช้กับอนุภาคและอากาศแรงดันสูงได้ ถอดทำความสะอาดได้ทุกชิ้นเนื่องจากทำจากสเตนเลส

3.1.2.6 แผ่นกระจายอนุภาค (Rebound nozzle)

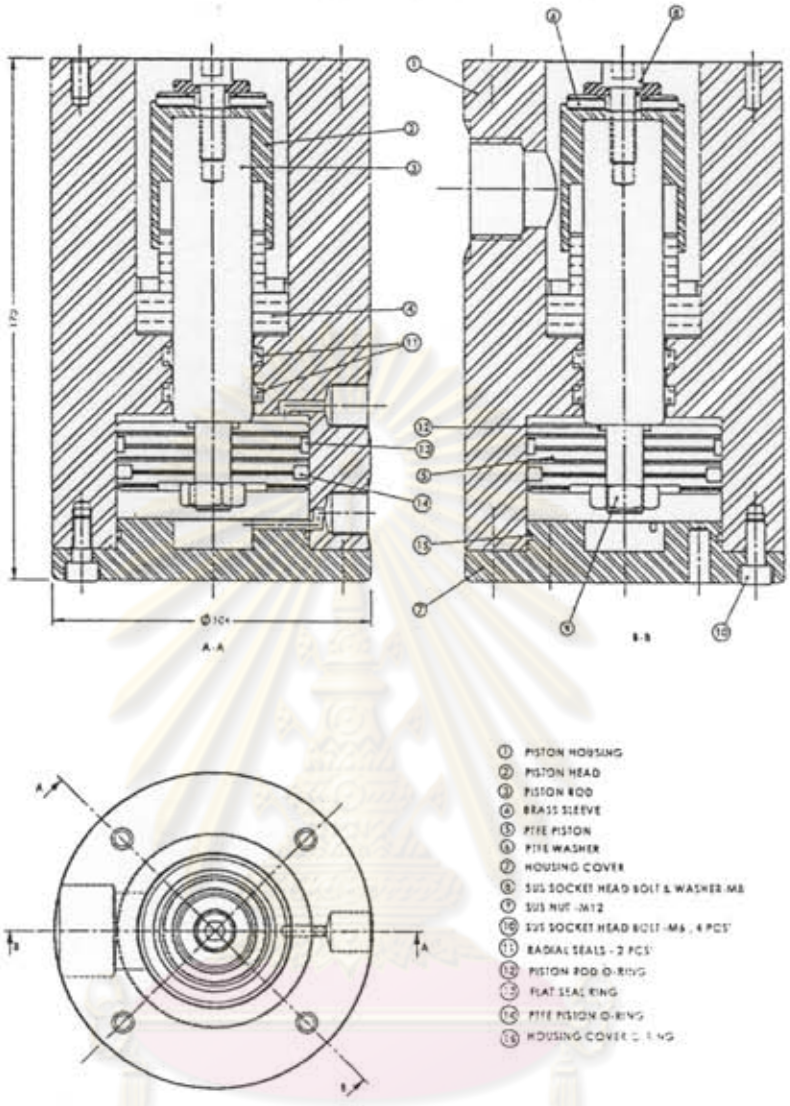
ภายในห้องจุดระเบิดด้านล่างซึ่ง แสดงในรูปที่ 3.11 ด้านล่างของแผ่นกระจายอนุภาคขันเข้ากับท่อที่เชื่อมระหว่างวาล์วทรงกระบอกกับถัง ขนาดและรูปร่างของแผ่นกระจายอนุภาคเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E1226

3.1.2.7 ท่อลม

เป็นท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.5 มิลลิเมตร ต่อจากคอมเพรสเซอร์และโซลินอยวาล์ว อีกเส้นเป็นสายลมแรงดันสูงเข้าหัวแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตรจากถังอากาศอัด

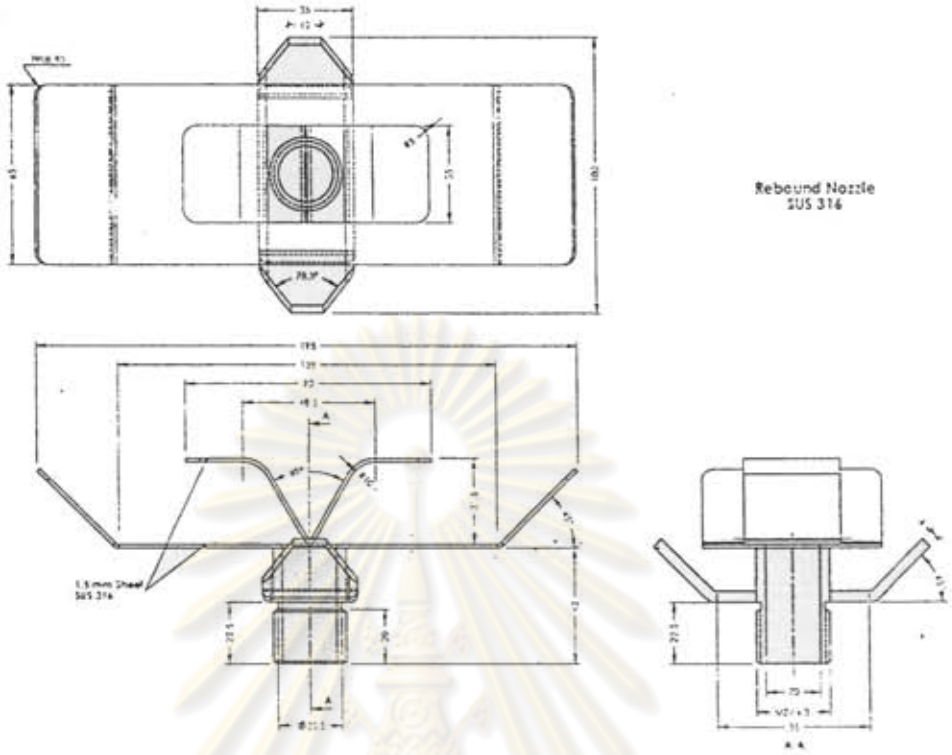
รูปที่ 3.12-3.13 เป็นภาพถ่ายเครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคและอุปกรณ์เสริมในมุมมองที่ต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

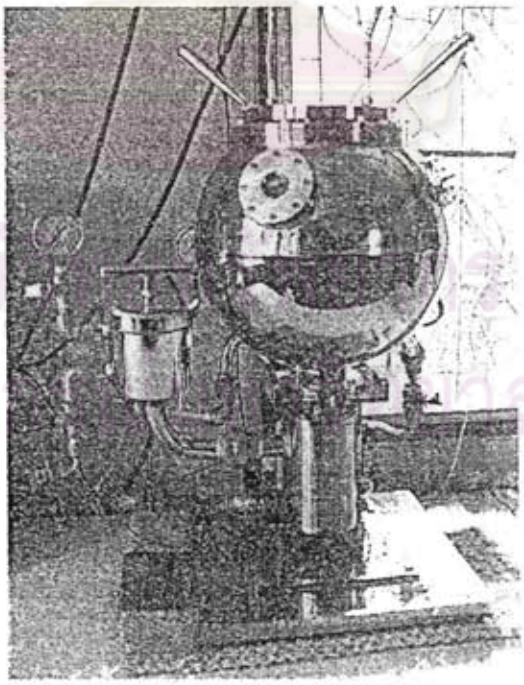


รูปที่ 3.10 วาล์วทรงกระบอกสำหรับถ่ายเทอนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ห้องจุดระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 แผ่นกระจายอนุภาค



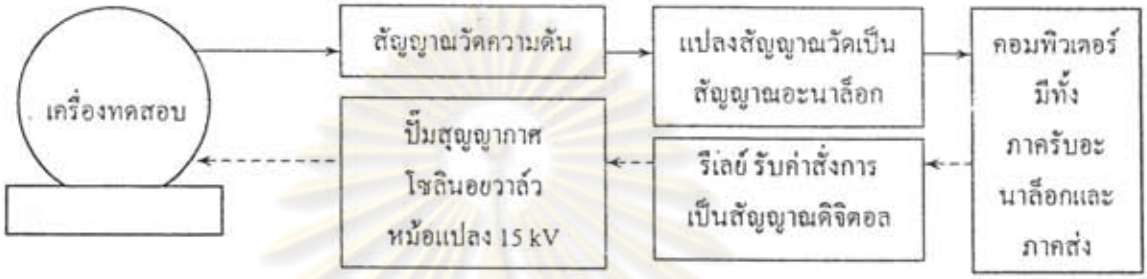
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายห้องจุดระเบิดขนาด 20 ลิตรพร้อมฐานและอุปกรณ์ต่อพ่วง

รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายชุดเครื่องมือทดสอบวัดแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ชุดควบคุมและวัดแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

การควบคุมการทำงานของเครื่องแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนการควบคุมอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบได้แก่ ปั๊มสุญญากาศ โซลินอยวาล์ว และหม้อแปลงไฟฟ้า และส่วนการวัดค่าความดันจากการระเบิดภายในห้องจุดระเบิดขนาด 20 ลิตร ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพลำดับการรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องทดสอบและคอมพิวเตอร์

จากแผนภาพอุปกรณ์ที่สำคัญคือในส่วนของคอมพิวเตอร์ซึ่งต้องมีการ์ดควบคุมซึ่งสามารถส่งทั้งสัญญาณดิจิตอลเพื่อควบคุมรีเลย์และรับสัญญาณอะนาล็อกจากหัววัดแรงดัน เรียกการ์ดดังกล่าวว่า "A/D Converter Multifunction Card" รูปที่ 3.15 แสดงการต่อเชื่อมอุปกรณ์ควบคุมและวัดแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิด

3.2.1 ชุดควบคุมในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง

3.2.1.1 A/D Converter Card

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.16 การ์ดรุ่น PCI 1711ใส่บนเมนบอร์ดที่ช่องใส่แบบ PCI แบ่งส่วนการทำงานเป็น 4 ส่วน คือ

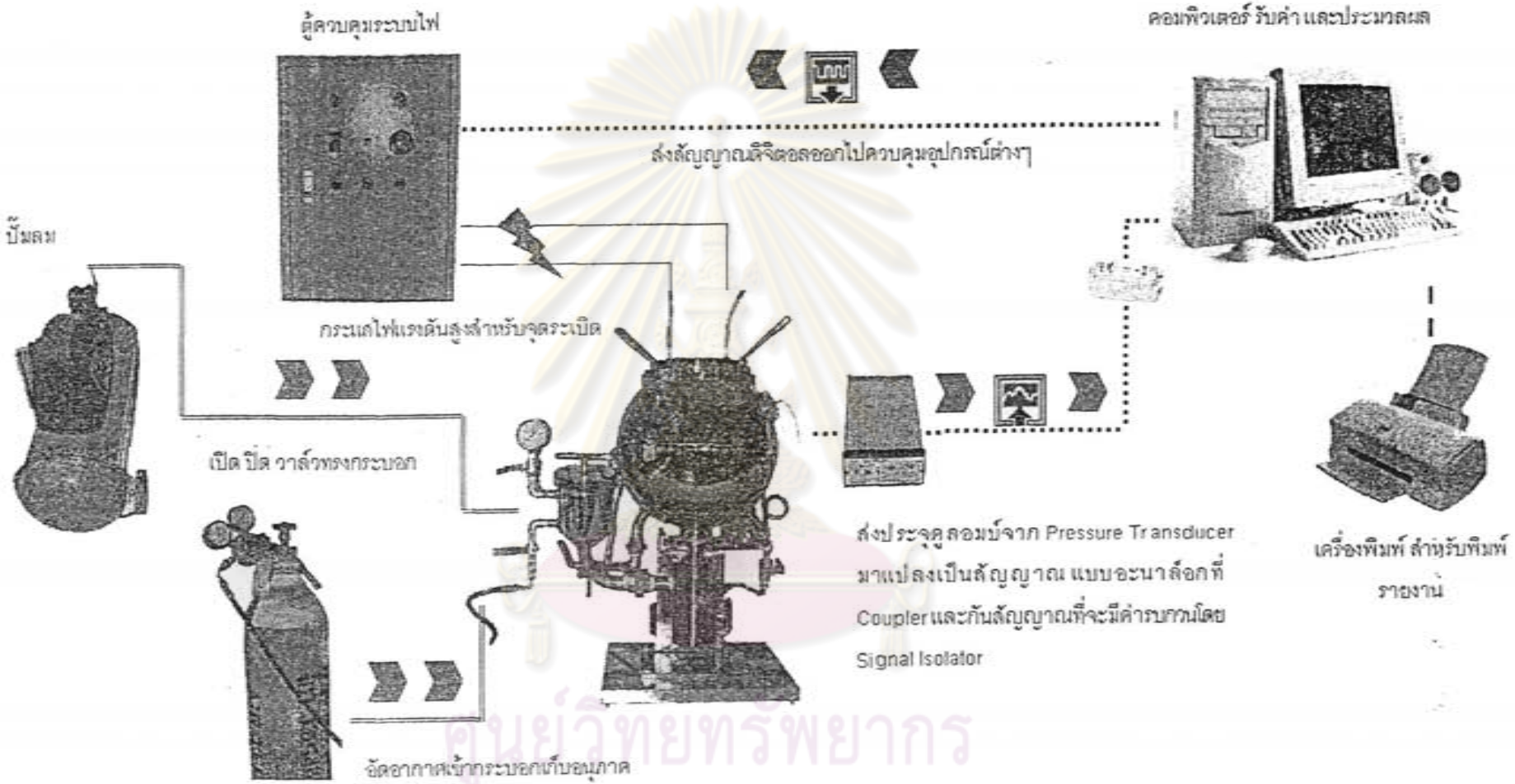
(1) ภาครับสัญญาณอะนาล็อก (Analog Input) มีช่องรับสัญญาณ 16 ช่อง อัตราการรับข้อมูล 100,000 ข้อมูล/วินาที ช่วงสัญญาณที่รับได้ ±15 โวลต์ ช่วงเวลาในการแปลงสัญญาณ 10 μs ความละเอียดของข้อมูลที่รับ 12 bit ส่วนนี้เป็นภาครับสัญญาณจากหัววัดแรงดัน

(2) ภาคส่งสัญญาณอะนาล็อก (Analog Output) มีช่องส่งสัญญาณ 2 ช่องความจุแรงขับสัญญาณ 3 มิลลิแอมป์

(3) ภาครับสัญญาณดิจิตอล (Digital Input) มีช่องรับสัญญาณ 16 ช่อง สัญญาณดิจิตอลรับค่าสองค่าคือเปิด-ปิด (on-off) ค่ามากสุดที่รับได้คือ 2.0 โวลต์ ค่าต่ำสุดที่รับได้คือ 0.8 โวลต์

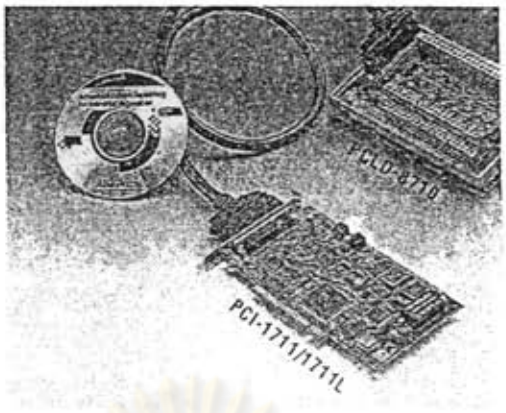
(4) ภาคส่งสัญญาณดิจิตอล (Digital Output) มีช่องส่งสัญญาณ 16 ช่อง ส่งสัญญาณได้ไม่ต่ำกว่า 2.0 โวลต์ที่แรงดันไฟฟ้า 0.4 มิลลิแอมป์ ส่วนนี้เป็นภาคส่งสัญญาณให้รีเลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.15 แผนภาพการต่อเชื่อมอุปกรณ์ควบคุม และวัดแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิด

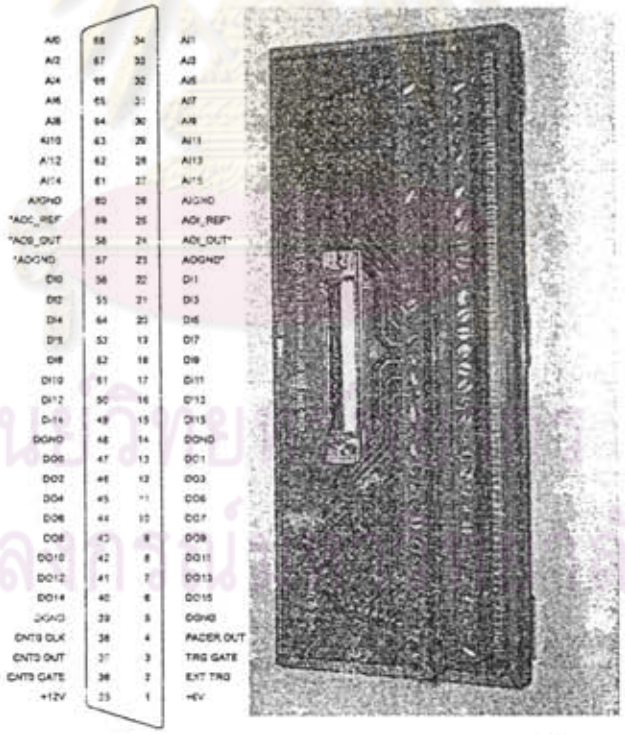
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 A/D Converter card รุ่น PCI 1711 พร้อมสายสัญญาณ

3.2.1.2 สายสัญญาณ

สายสัญญาณหุ้มด้วยฉนวนกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก ที่หัวของสายสัญญาณมีจำนวนช่องรับส่งสัญญาณ 68 ช่องซึ่งระบุตำแหน่งไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งของการรับส่งสัญญาณที่หัวสายสัญญาณ (ซ้าย) และแผงเชื่อมสายสัญญาณ 68 ช่องสัญญาณจากหัวส่งสัญญาณ (ขวา)

3.2.1.3 แผงเชื่อมสายสัญญาณ (Wiring terminal board)

ดังแสดงไว้ที่รูป 3.17 แผงสัญญาณเป็นเหมือนหัวสายสัญญาณที่สามารถต่อสายไฟสายสัญญาณจากหัววัดแรงดัน และสายไฟไปยังรีเลย์

3.2.2 ชุดวัดแรงดันจากการระเบิด

3.2.2.1 หัววัดแรงดัน (Pressure sensors)

หัววัดแรงดันซึ่งติดที่ผนังของห้องจุดระเบิดใช้หลักการ Piezoelectric กล่าวคือภายในหัววัดเป็นผลึกควอทซ์ที่เปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับความดัน การเปลี่ยนรูปร่างของควอทซ์ทำให้เกิดประจุไฟฟ้า (หน่วยคูลอมบ์; C) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความดันแตกต่างที่กระทำต่อผิวสัมผัสของควอทซ์ เพราะหลักการของ Piezoelectric สามารถวัดได้เฉพาะความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นเท่านั้น และย่านในการวัดเท่ากับ 0-500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้นความดันเริ่มต้นเมื่อดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิด (ความดันสุญญากาศ) จึงไม่สามารวัดได้ ดังนั้นกราฟความดันก่อนเปิดวาล์วทรงกระบอกค่าจะอยู่ที่เส้นศูนย์ซึ่งเป็นระดับอ้างอิง

ดังที่กล่าวหัววัดจำต้องมีฉนวนลักษณะเป็นวงแหวนใส่เข้าไปเพื่อกันรอยรั่วบริเวณขั้วสายสัญญาณต้องขันให้แน่นเพราะอาจเกิดการลดลงและไม่เสถียรของประจุค่าวัด

3.2.2.2 ตัวแปลงค่าประจุคูลอมบ์เป็นสัญญาณอะนาล็อก (Transmitter)

ประจุคูลอมบ์ที่เกิดจากหัววัดแรงดันแบบ Piezoelectric ต้องถูกแปลงเป็นค่าโวลต์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าประจุด้วยตัวแปลงที่เรียกว่า "'Coupler หรือ Charge amplifiers" หรือก็คือทรานสมิตเตอร์ที่มีแบตเตอรี่ในตัวเอง ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าออก (output;หน่วยมิลลิโวลต์) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ถูกวัด (input; หน่วยปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หรือเรียกว่า "Sensitivity" เป็นค่าคงที่ในช่วงการวัด (0 ถึง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เนื่องจากแสดงค่ามาที่ใบรับรองการสอบเทียบเครื่องมือประจำชุดวัดความดันนี้ มีค่าเท่ากับ 10.74 มิลลิโวลต์/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่า "Linearity" เท่ากับ 1 (Linearity คือความชันของกราฟเส้นตรงระหว่างค่าออก (output) และค่าที่ถูกวัด (input)) ดังนั้นค่าออก (output) ที่ได้จะเป็นค่ามิลลิโวลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันแตกต่างที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งถือเป็นสัญญาณอะนาล็อกเพราะมีค่าสัญญาณหลายค่าที่ส่งออกมา

3.2.2.3 สายสัญญาณ

สายสัญญาณนี้มีสองสายคือสายจากหัววัดแรงดันมาทรานสมิตเตอร์ซึ่งเข้าหัวแบบ BNC และจากทรานสมิตเตอร์เข้าสู่แผงเชื่อมสายสัญญาณซึ่งเป็นหัวแบบ BNC เช่นเดียวกัน สายสัญญาณมีฉนวนกันสัญญาณรบกวนอย่างดี

3.2.2.4 ชุดกรองสัญญาณรบกวน (Signal isolator)

ทำหน้าที่กรองสัญญาณโวลต์จากภายนอกระบบที่เข้ามารบกวนสัญญาณโวลต์จากชุดวัดแรงดัน นอกจากนี้ยังช่วยให้สัญญาณวัดที่ได้มีความเสถียรมากขึ้น

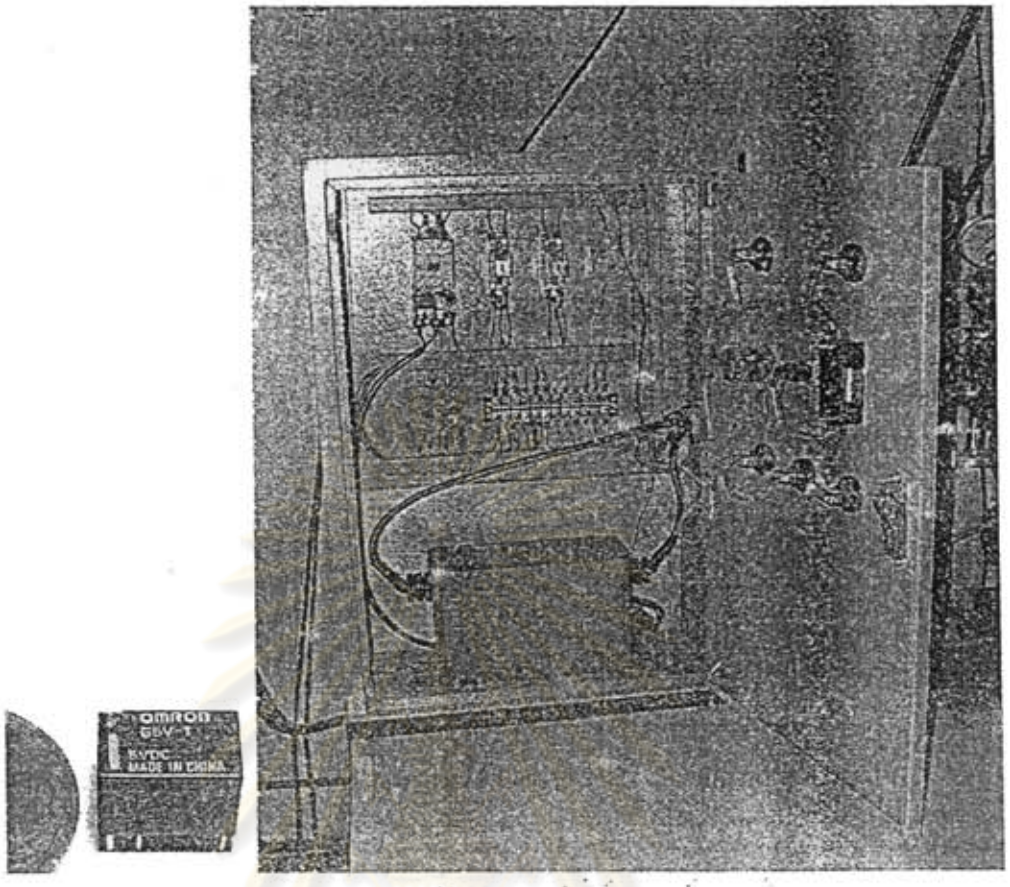
3.2.3 ชุดรีเลย์ควบคุมปั๊ม หม้อแปลง และโซลินอยวาล์ว

รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นแผงเชื่อมสายสัญญาณ ณ ตำแหน่งภาคส่งสัญญาณดิจิตอล (DO 0ถึง DO 15 และ DGND) สามารถต่อสายไฟไปยังรีเลย์เพื่อส่งค่าการควบคุม

3.2.3.1 รีเลย์รับค่าจาก A/D card

ดังแสดงไว้ในรูป 3.18 เป็นรีเลย์ที่ใช้ ยี่ห้อ omron รุ่น G5V-1 เท่านั้น เนื่องจากสามารถรับทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับได้ หลักการทำงานของรีเลย์เหมือนสวิทช์ไฟตัวหนึ่ง ภายในมีแท่งแม่เหล็กพันด้วยขดลวดเรียกว่า คอยล์ ซึ่งจะต่อกับแหล่งพลังงาน ณ ที่นี้คือต่อตรงมาจากแผงเชื่อมสายสัญญาณ ใกล้กับคอยล์จะมีแผ่นโลหะอีกชิ้นที่มีหน้าสัมผัสต่อเข้ากับโหลดและแหล่งจ่ายไฟอีกแหล่งเพื่อส่งไปขับโหลดในที่นี้ต่อกับไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ โดยปกติยังไม่มีไฟเข้ามาที่คอยล์หน้าสัมผัสจะไม่สัมผัสกัน (ไฟเดินไม่ครบวงจร) โหลดไม่ทำงาน เรียก "Normal Close; NC" แต่เมื่อจ่ายกระแสให้กับคอยล์เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นทำให้ผลักแผ่นโลหะเข้าไปสัมผัสกับหน้าสัมผัสไฟเดินครบวงจรโหลดจึงทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.18 ตู้ควบคุมประกอบด้วยรีเลย์รุ่น G5v-1 แรงดันคอยด์ 5 VDC 30 mA แรงดันหน้าสัมผัส 0.5 A 125 VAC หม้อแปลงไฟฟ้า และสวิทช์ไฟฟ้าที่จ่ายไฟเข้าสู่ชุดทดลอง

ข้อดีของรีเลย์รุ่น G5v-1 คือกระแสที่คอยด์น้อยกว่ากระแสที่ A/D card จ่ายได้ และเมื่อจ่ายไฟ 220 โวลต์หน้าสัมผัสยังสามารถรับได้แต่กระแสจะลดลงครึ่งหนึ่งเหลือ 0.25 แอมป์

3.2.3.2 รีเลย์ป้องกันกระแสไฟไหลย้อนกลับ

จากข้อจำกัดของรีเลย์ตัวแรกคือจ่ายกระแสได้น้อย แต่โหลดต้องการกระแสมาก คือ ปั๊มสุญญากาศต้องการกระแส 220 โวลต์ 1 แอมป์ โซลินอยวาล์ว ต้องการกระแส 220 โวลต์ 6.0 โวลต์แอมป์ ดังนั้นจึงต้องมีรีเลย์ตัวใหญ่อีกตัวที่มีแรงดันคอยด์ 220 โวลต์กระแสสลับ แรงดันหน้าสัมผัส 220 โวลต์กระแสสลับแต่กระแสมากขึ้น เป็นตัวขับโหลดและยังช่วยป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสที่จ่ายสู่โหลดด้วย

3.2.3.3 แมกเนติกสวิทช์

เนื่องจากหม้อแปลงไฟเป็นโหลดที่ต้องการกระแสไฟขาเข้า 220 โวลต์ 30 มิลลิแอมป์ แล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเป็น 150 กิโลโวลต์ ดังนั้นรีเลย์ในข้อ 3.2.3.2 จึงไม่สามารถป้องกันการ

ไหลย้อนของกระแสที่เกิดขึ้นได้ จึงต้องใช้แมกเนติกสวิทช์สำหรับไฟฟ้าแรงสูงมีคุณสมบัติปล่อยไฟ 220 โวลต์ และตัดไฟที่สูงกว่า 220 โวลต์ ไม่ให้ย้อนกลับมาที่วงจรไฟฟ้า

3.2.4 สวิทช์ควบคุมการจ่ายไฟสู่ชุดทดลอง

ที่หน้าตู้ควบคุมประกอบด้วยสวิทช์ตัวใหญ่สีดำด้านซ้ายเป็นสวิทช์ควบคุมการจ่ายไฟเข้าสู่ทั้ง ปั๊มสุญญากาศ หม้อแปลงไฟฟ้า และโซลินอยด์วาล์ว ส่วนสวิทช์วงกลมสีแดงด้านขวาเป็นสวิทช์ตัดไฟทั้งระบบในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินระหว่างการทดลอง ด้านข้างของตู้ควบคุมจะมีปลั๊กไฟ 2 เฟส220 โวลต์ซึ่งต้องต่อกับปลั๊กที่ต่อสายดิน เพื่อป้องกันการรั่วของไฟจากหม้อแปลง และสัญญาณรบกวนอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 โปรแกรมควบคุมและประมวลค่าแรงดันของเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องทดสอบถูกพัฒนาขึ้นมาเฉพาะกับเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค จุฬาฯ โปรแกรมจะใช้งานได้เมื่อภายในคอมพิวเตอร์ได้ติดตั้ง A/D Converter Card แล้ว โปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม "Visual Basic" ใช้กับระบบปฏิบัติการ "Microsoft Windows" เวอร์ชัน 98 / ME / 2000 / XP เมื่อเรียกใช้งานโปรแกรม **"CU_ExpTester.exe"** แล้ว ปรากฏหน้าโปรแกรม ดังรูปที่ 3.19

รูปที่ 3.19 หน้าแรกของโปรแกรมควบคุมเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

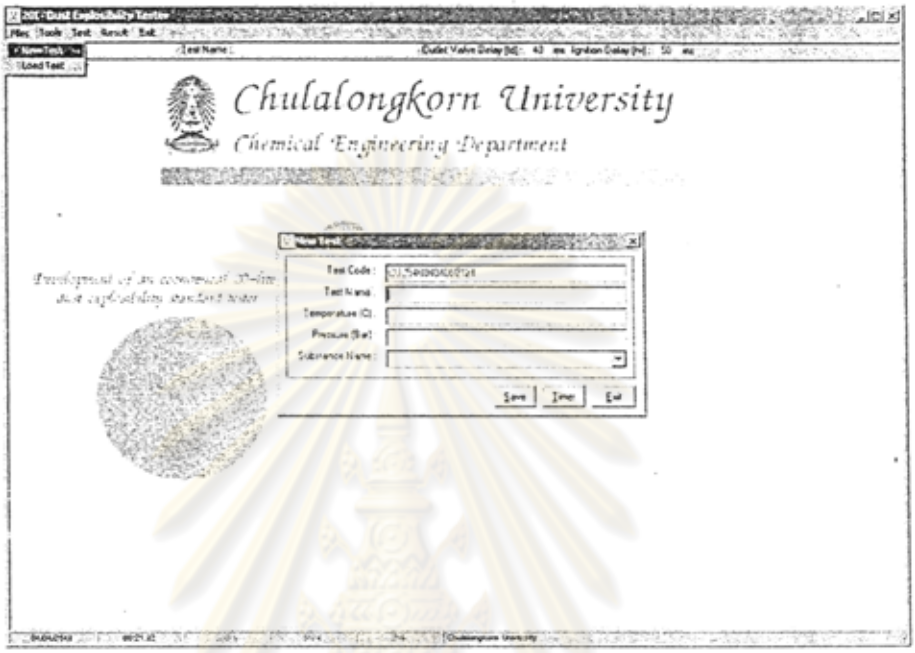
3.3.1 การเริ่มต้นตั้งค่าสภาวะการทดลอง

ในการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม ผู้ใช้จะต้องเลือกเมนู "file" เพื่อเป็นการตั้งค่าการทดลองเริ่มต้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ

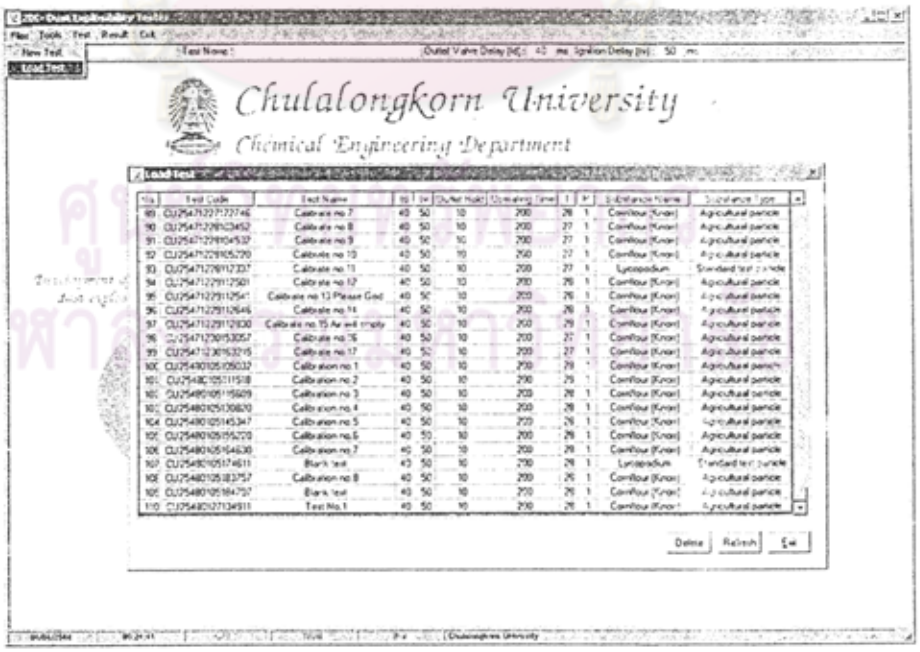
3.3.1.1 เลือก "New Test" เมื่อเริ่มทำการทดลองใหม่ตั้งชื่อการทดลอง (Test name) อุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียส) ความดันบรรยากาศ (หน่วยบาร์) ขณะทำการทดลอง และเลือกสารที่ใช้ทดสอบ โปรแกรมจะบันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติเมื่อกดปุ่ม "Save" แล้วหน้าโปรแกรมจะปิดอัตโนมัติ รูปแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.20

3.3.1.2 เลือก "Load Test" เพื่อเลือกชุดการทดลองที่ได้ทดลองแล้วขึ้นมาทดลองใหม่โดยการดับเบิ้ลคลิกที่แถวของชุดข้อมูลนั้น หรือลบข้อมูลการทดลองโดยกดเลือกแถวของชุด

การทดลองหนึ่งครั้งแล้วกดปุ่ม “Delete” หรือ ปุ่ม “Refresh” เมื่อมีการแก้ไขข้อมูล หรือการเพิ่มข้อมูล กดปุ่ม “Exit” เมื่อไม่ต้องการนำข้อมูลการทดลองเก่ามาทดสอบ รูปแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 หน้าโปรแกรมเริ่มต้นบันทึกข้อมูลสำหรับการทดลองใหม่



รูปที่ 3.21 หน้าโปรแกรมแสดงข้อมูลเก่าเพื่อเลือกมาทดลองใหม่อีกครั้ง

3.3.2 การตั้งช่วงเวลาในการทดลอง

เลือกเมนู "Tools" เลือก "System Setting" แล้วเลือก "Timer" รูปแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.22 หรือที่ "New Test" จะมีปุ่ม "Timer" เพื่อตั้งช่วงเวลาในการทดลองเช่นกัน

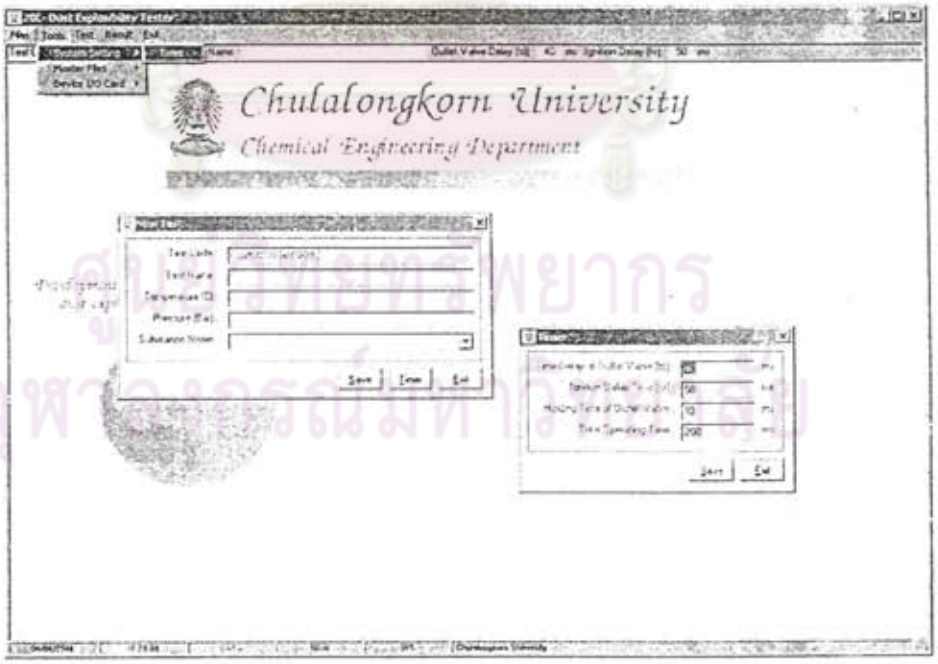
3.3.2.1 Time Delay of Outlet Valve (td) เป็นระยะเวลาตั้งแต่เริ่มกดปุ่มทำการทดสอบ (ปุ่ม Start, ดูหัวข้อ 3.3.5) จนถึงเปิดวาล์วทรงกระบอกเป็นค่าที่ไม่มีผลต่อการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 30-50 มิลลิวินาที เลือกตั้งค่าไว้ที่ 40 มิลลิวินาที

3.3.2.2 Holding Time of Outlet Valve เป็นช่วงเวลาของการเปิดวาล์ว ตั้งค่าไว้ที่ 10 มิลลิวินาที เพราะเป็นช่วงเวลาน้อยสุดที่อนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดหมด

3.3.2.3 Ignition Delay Time (tv) เป็นค่าที่สำคัญที่สุด คือเวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิด (จ่ายไฟให้ขั้วไฟฟ้า) หลังจากวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)ปิดลง มีค่าอยู่ในช่วง 10-60มิลลิวินาที

3.3.2.4 Total Operating Time เป็นช่วงเวลาทั้งหมดที่โปรแกรมบันทึกค่าความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นในห้องจุดระเบิด

เมื่อตั้งค่าเวลาแล้ว กดปุ่ม "Save" หน้าโปรแกรมจะปิดเองอัตโนมัติ และหากเปิดโปรแกรมขึ้นมาใหม่ค่าเวลานี้ก็ยังเป็นค่าเดิมหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แต่หากไม่ต้องการบันทึกกดปุ่ม "Exit"



รูปที่ 3.22 หน้าโปรแกรมสำหรับตั้งค่าเวลาในการทดลอง

3.3.3 การบันทึกข้อมูลหลักของการทดลอง

เลือกเมนู "Tools" เลือก "Master Files" รูปแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.23

3.3.3.1 ฐานข้อมูลหลักใน "Master Files"

(1) Concentration คือค่าความเข้มข้นที่ทำการทดลอง หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ กรัมต่อปริมาตรเครื่องทดสอบ 20 ลิตร

(2) Substance Type คือประเภทของสารที่ใช้ทดสอบ

(3) Substance Name คือชื่อของสารที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.3.2 การเพิ่ม ลด แก้ไขฐานข้อมูลหลัก

(1) เพิ่มข้อมูล โดยพิมพ์ข้อมูล เช่นชื่อสารที่ทดสอบในช่องว่าง จากนั้นกดปุ่ม "Insert"

(2) ลบข้อมูล โดยกดเลือกที่แถวข้อมูลที่จะลบหนึ่งครั้ง แล้วกดปุ่ม "Delete"

(3) แก้ไขข้อมูล โดยการดับเบิ้ลคลิกที่แถวข้อมูลที่ต้องการแก้ไข ข้อมูลจะปรากฏที่ช่องว่างด้านบน เมื่อทำการพิมพ์แก้ไขข้อมูลเรียบร้อยให้กดปุ่ม "Update"

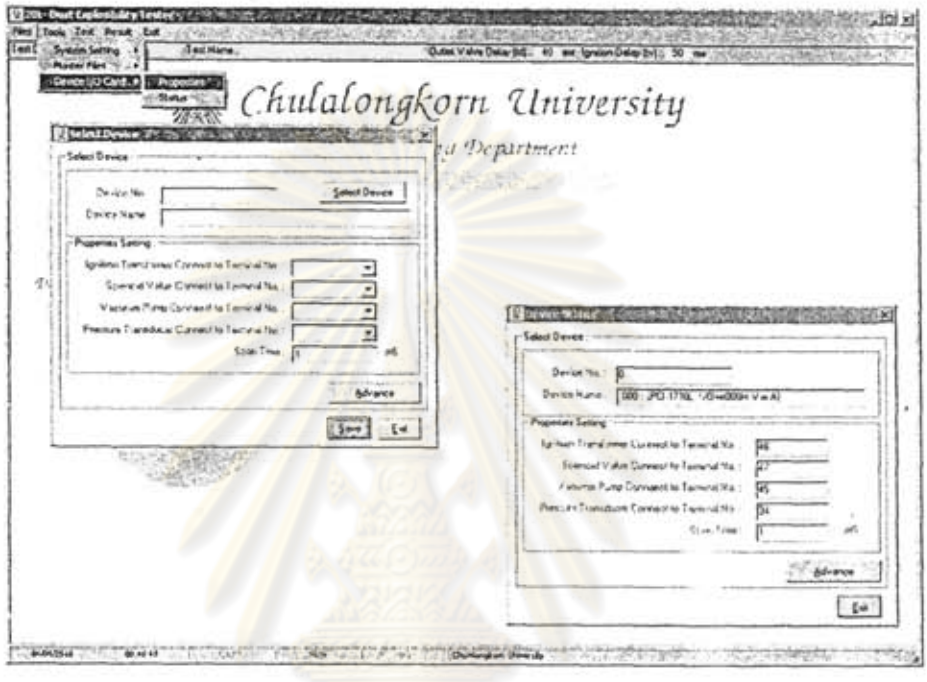
(4) กดปุ่ม "Refresh" เมื่อต้องการดูข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน หลังทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไขฐานข้อมูล

(5) กดปุ่ม "Exit" เมื่อต้องการออกจากหน้าโปรแกรม

รูปที่ 3.23 หน้าโปรแกรมสำหรับบันทึกฐานข้อมูลของการทดลอง

3.3.4 การตั้งค่าช่องรับส่งสัญญาณควบคุม

3.3.4.1 เลือกเมนู "Tools" เลือก "Device I/O Card" จากนั้นเลือกดูสถานะ การต่อช่องสัญญาณโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.17 โดยกดเลือกดูที่ "Status" ซึ่งปกติค่าที่ปรากฏจะตั้งมาประจำเครื่องอยู่แล้วรูปแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.24

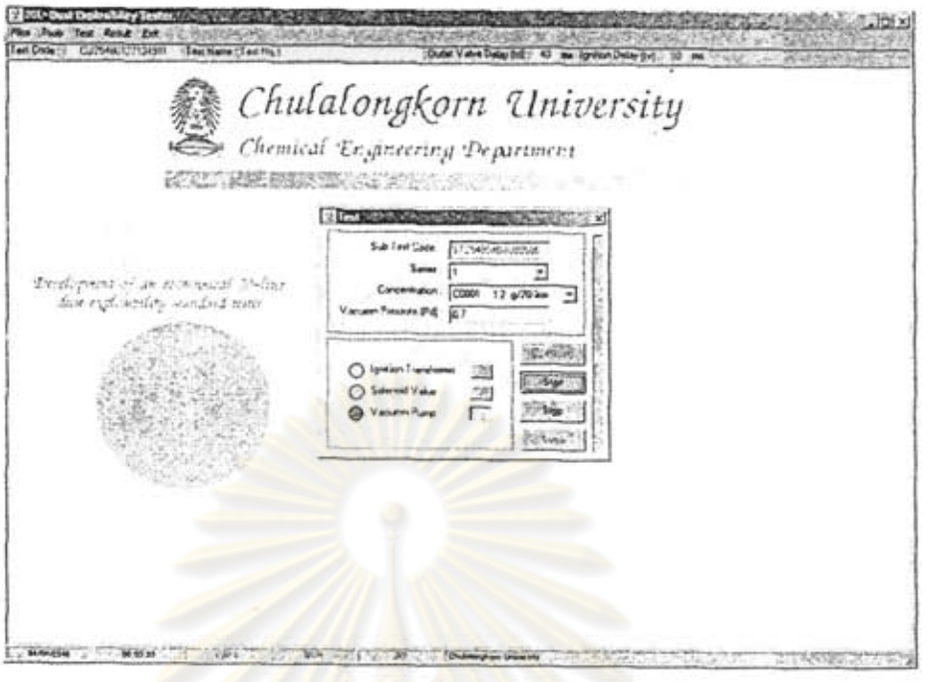


รูปที่ 3.24 หน้าโปรแกรมสำหรับกำหนดตำแหน่งการต่อช่องสัญญาณวัดและควบคุม

3.3.4.2 หากต้องการเปลี่ยนตำแหน่งของช่องสัญญาณให้เลือกเมนู "Tools" เลือก "Device I/O Card" จากนั้นเลือก "Properties" แล้วใส่ค่าตำแหน่งของช่องสัญญาณที่ต่อจริง ณ แผงเชื่อมสายสัญญาณ กดปุ่ม "Select Device" เพื่อเลือกรุ่นของ A/D Card (รุ่นที่ใช้คือ PCI 1711)

3.3.5 การทดสอบ

เลือกเมนู "Test" ใส่ค่า "Series" คือชุดการทดลองถ้าเป็นครั้งแรกเลือกเบอร์ 1 และชุดการทดลองนี้ทดสอบที่ความเข้มข้นใดเลือกมาหนึ่งค่าที่ "Concentration" กดปุ่ม "Operating" ปั๊มสุญญากาศจะทำงานไฟสีเขียวจะปรากฏขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.25 ระบุถึงค่าความดันที่ต้องการบันทึกค่าที่ช่อง "Vacuum Pressure (Pd)" แล้วกดปุ่มสี่เหลี่ยมด้านหลังคำว่า "vacuum pump" ปั๊มจึงหยุดทำงาน เมื่อเริ่มทดลองกดปุ่ม "Start" เครื่องทดสอบจะดำเนินการเปิดปิดวาล์วและจุดชนวนระเบิดตามลำดับเวลาที่ตั้งไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ในขณะทำการทดสอบแถบแสดงสถานะด้านข้างจะเลื่อนขึ้นแสดงช่วงเวลาการบันทึกความดันแตกต่างที่เกิดขึ้น

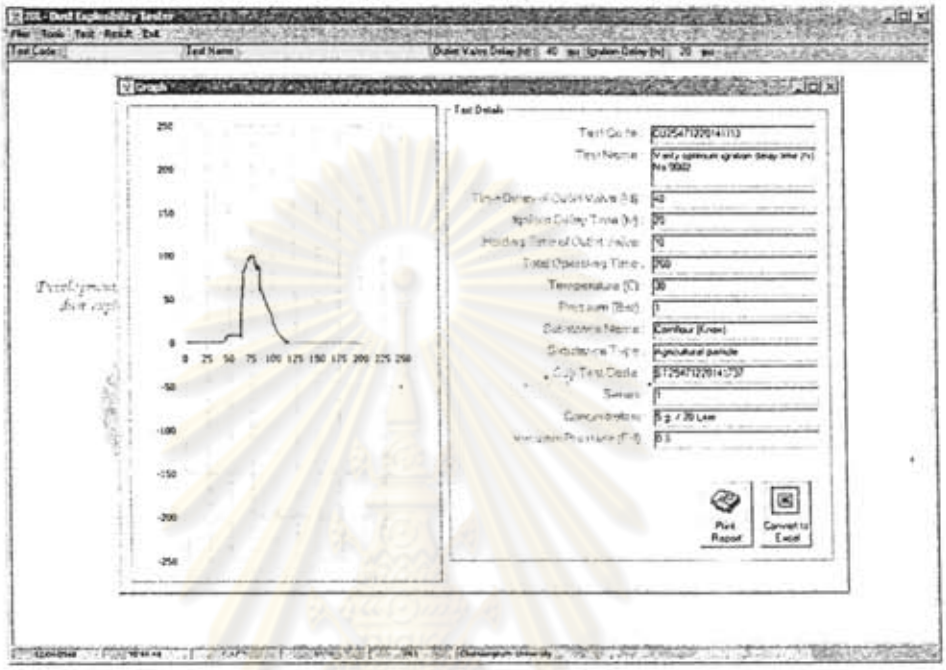


รูปที่ 3.25 หน้าโปรแกรมสำหรับการทดสอบขณะดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิด

รูปที่ 3.26 หน้าโปรแกรมสำหรับการทดสอบขณะจุดชนวนแล้วการระเบิดของวัสดุอนุภาค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีที่จะหยุดทำการทดสอบสามารถกดปุ่ม "Stop" ได้ระบบจะหยุดการทำงานทันที และเมื่อเกิดการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิดและเสร็จสิ้นการทดลองกดปุ่ม "Save" เพื่อแสดงกราฟความดันกับเวลาจากการทดลอง ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 หน้าโปรแกรมแสดงค่าความดันแตกต่างกับเวลาจากการทดสอบ

3.3.6 การแสดงผลการทดสอบ

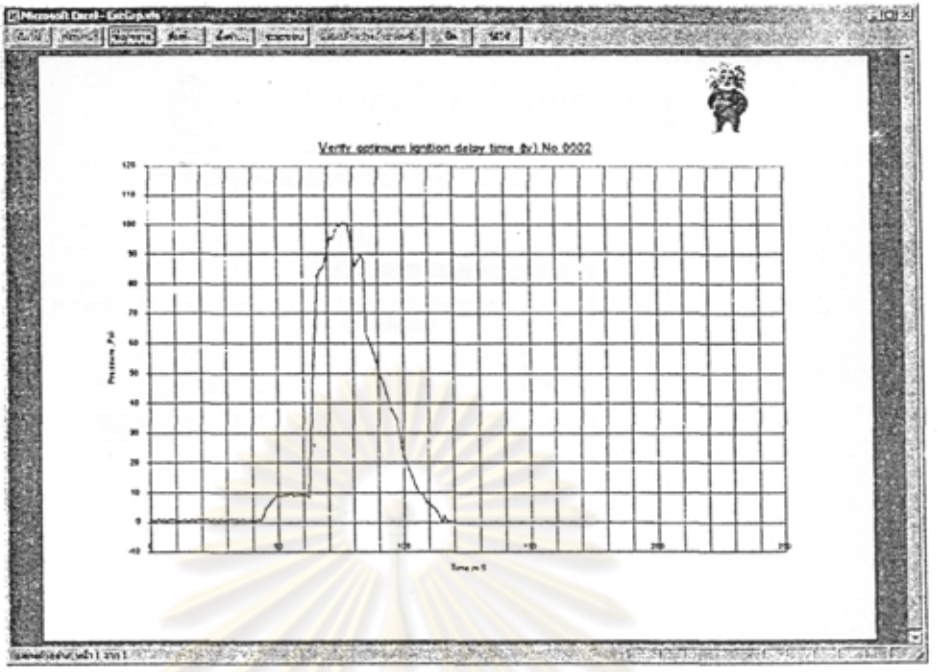
จากรูปที่ 3.27 สามารถแปลงกราฟให้เป็นไฟล์เอ็กเซลดังรูปที่ 3.28 เพื่อนำไปประมวลผลหาค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน (dP/dt) โดยกดปุ่ม "Convert to Excel" หรือแสดงเป็นรายงานดังรูปที่ 3.29 โดยกดปุ่ม "Print Report" ซึ่งจะแสดงค่าความดันสูงสุดของกราฟด้วย การเรียกกราฟของการทดลองเก่าให้ไปที่เมนู "Result" รูปแบบโปรแกรมแสดงไว้ดังรูปที่ 2.30 โดยสามารถเลือกตามโค้ด (Sub Test Code) ของการทดลองเก่าซึ่งแสดงค่าไว้แล้วดังรูปที่ 3.27 และผลการทดลองจะแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 3.27 เช่นกัน

หมายเหตุ "Test Code" โปรแกรมจะตั้งขึ้นมาเองอัตโนมัติเมื่อเริ่มตั้งค่าการทดลอง (New Test)

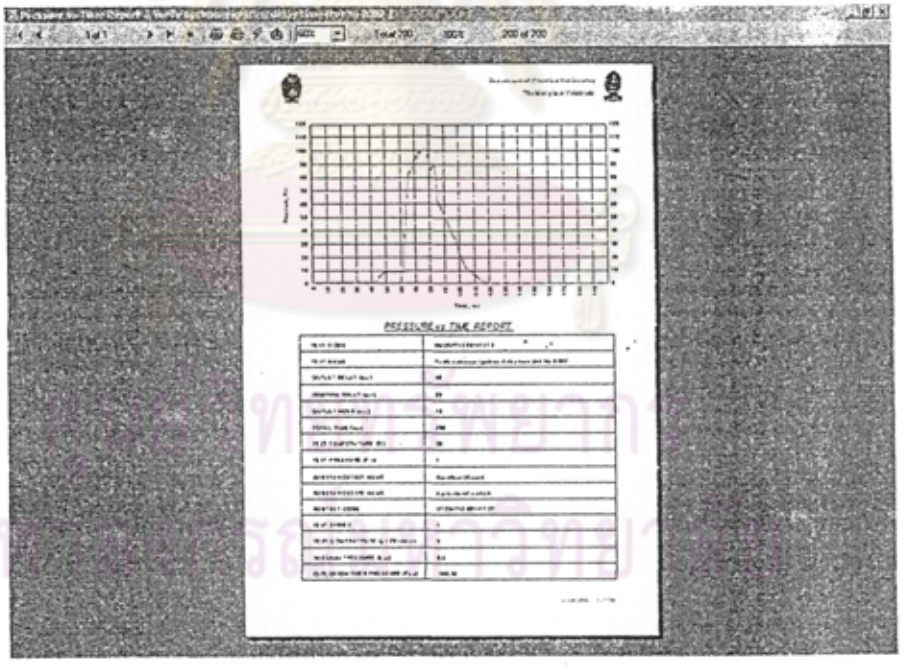
"Sub Test Code" โปรแกรมจะตั้งขึ้นมาเองอัตโนมัติเมื่อเริ่มทดลอง (เลือกเมนู Test)

3.3.7 การออกจากโปรแกรม

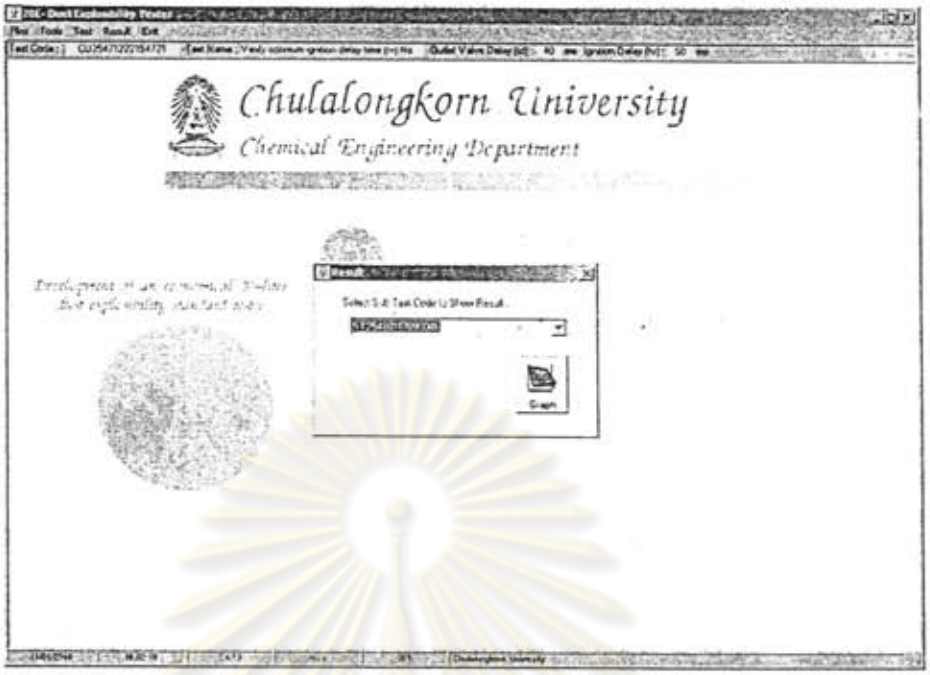
เลือกเมนู "Exit" เมื่อทำการทดลองเสร็จเรียบร้อย หรือเพื่อออกจากโปรแกรม



รูปที่ 3.28 กราฟการทดลองเมื่อแปลงเป็นไฟล์เอ็กเซล



รูปที่ 3.29 รายงานการทดลองความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค



รูปที่ 3.30 หน้าโปรแกรมเรียกกราฟของการทดลองเก่าตามลำดับโค้ดของการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

4.1 สภาวะในการทดสอบ

4.1.1 บรรยากาศขณะทำการทดลอง ได้แก่

- อุณหภูมิควรอยู่ระหว่าง 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)
- ความดันบรรยากาศ ประมาณ 1 บาร์

โดยปกติค่าเหล่านี้จะถูกบันทึกลงในโปรแกรมการทดสอบทุกครั้งเมื่อเริ่มการทดลอง

4.1.2 การตรวจสอบอุปกรณ์

ก่อนการทดสอบควรตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

4.1.2.1 ถังอากาศอัด (Air zero) ควรมีความดันมากกว่า 20 บาร์ คอมเพรสเซอร์ควรมีความดันเท่ากับ 9 บาร์ (ถ้าความดันต่ำกว่า 7 บาร์เครื่องจะทำงานอัดอากาศเองจนถึง 9 บาร์เองอัตโนมัติ)

4.1.2.2 รอยรั่ว โดยอัดอากาศ 12.5 บาร์เข้าสู่กระบอกเก็บอนุภาคขนาด 0.6 ลิตรดูเกจความดันที่กระบอกเก็บอนุภาค หากความดันลดลงมากกว่า 1 บาร์ใน 1 นาที ให้ตรวจสอบรอยรั่วตามท่อและถอดวาล์วทรงกระบอกมาทำความสะอาดและตรวจสอบรอยรั่ว

4.1.2.3 ความสะอาดของห้องจุดระเบิด ต้องแห้งและไม่มีอนุภาคตกค้างบริเวณหัววัดแรงดันและช่องมอง

4.2 การเตรียมก่อนการทดสอบ

4.2.1 วัสดุอนุภาคที่จะใช้ทดสอบนั้น ต้องมีการเตรียมการดังนี้

4.2.1.1 การเก็บ

เพื่อคงสภาพวัสดุอนุภาคไว้ตามเดิม จึงต้องเก็บไว้ในภาชนะที่มิดชิดอากาศและอุณหภูมิไม่สูง แต่ถ้ามีโอกาสสูงที่จะเกิดการเปลี่ยนสภาพระหว่างการเก็บรักษา ก็ควรทดสอบวัสดุอนุภาคนั้นทันทีที่ได้รับมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1.2 การเตรียม

(1) เนื่องจากขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงของการระเบิด จึงจำเป็นต้องทำการร่อนโดยใช้ตะแกรงเพื่อคัดขนาด

(2) วัสดุอนุภาคชนิดใดก็ตามที่มีปริมาณความชื้นสูงหรือดูดความชื้นได้ง่าย ควรอบแห้งก่อน เช่นอนุภาคจำพวกแป้งอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และระวังมิให้เปลี่ยนสภาพ

(3) หากสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบฟุ้งกระจายได้ยาก สามารถเติมสารช่วยกระจายตัวผสมเข้าด้วยกันอนุภาคที่ทดสอบ อาทิเช่นเติมดินแห้ง (fuller earth) ไลโคโพเดียม แมกนีเซียมออกไซด์เบา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ เมื่อใดก็ตามที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัวจะต้องมีการระบุสารที่เติมและปริมาณ หรืออัตราส่วนผสมอย่างชัดเจน อนึ่งควรเติมไม่เกิน 2% โดยน้ำหนัก

(4) อนุภาคที่ทดสอบควรเก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้น (desiccators)

4.2.1.3 การคัดขนาดอนุภาค

(1) เตรียมชุดตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน ประกอบด้วยตะแกรงขนาด 180, 150, 75, 45 ไมครอน แล้วชั่งน้ำหนักของตะแกรงทุกชั้นในสภาพว่างเปล่า บันทึกค่าน้ำหนักไว้เป็นน้ำหนักตะแกรงเปล่า นำตะแกรงวางซ้อนกันโดยเรียงลำดับจากขนาดเล็กไปใหญ่จากล่างขึ้นบน

(2) เครื่องคัดขนาดประกอบด้วยเครื่องตั้งเวลาในการร่อนคัดขนาด และมีกลไกการการสั่นโดยใช้สปริงสามารถปรับความถี่ของการสั่นได้

(3) ใช้อนุภาคตัวอย่างประมาณ 100 กรัมในการคัดขนาดแต่ละครั้ง วางอนุภาคที่ชั่งน้ำหนักแล้วบนตะแกรงบนสุด (ขนาด 180 ไมครอน) จากนั้นปิดฝาล็อกชุดตะแกรงด้วยตัวล็อก ตั้งเวลาไว้ประมาณ 5 นาที ความถี่ในการสั่นที่ 5 เฮิรตซ์ หลังจากการสั่นเสร็จสิ้นลง นำตะแกรงที่มีอนุภาคค้างอยู่ทุกๆ ขนาดไปชั่งทีละตะแกรง นำค่าน้ำหนักนี้มาหักลบด้วยน้ำหนักของตะแกรงเปล่าขนาดเดียวกันนั้น ก็จะได้น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง

ในทางปฏิบัติ จะทำการหาค่ามัธยฐานของขนาดอนุภาค (M) นั่นคือค่าที่อนุภาคมีปริมาณสะสมเท่ากับ 50% โดยน้ำหนักของการกระจายขนาดอนุภาค อนุภาคไลโคโพเดียม ซึ่งเป็นสารทดสอบมาตรฐาน มีค่า M ประมาณ 26 ไมครอน (ระบุข้างขวดใส่สาร) ในขณะที่อนุภาคนิโคตินิกแอซิก มีค่า M ประมาณ 180 ไมครอน ซึ่งจัดว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่มาก

4.2.2 สารจุดชนวนระเบิด

เนื่องจากเครื่องทดสอบมีปริมาตรมากดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการจุดระเบิดจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ จึงต้องมีพลังงานจากการระเบิดจากสารเคมีเรียกว่า "Pyrotechnic ignitors" ซึ่งต้องให้พลังงานจากการระเบิดเท่ากับ 10,000 จูล

4.2.2.1 การเตรียม

สารเคมีที่ให้พลังงานจากการระเบิด 10,000 จูล ตามมาตรฐาน ASTM E1226 ได้แก่ สารผสมน้ำหนัก 2.4 กรัมที่ประกอบด้วย

- เซอโคเนียม (zirconium) 40% โดยน้ำหนัก เป็นของแข็งสีดำออกเทาเก็บอยู่ในน้ำ การเตรียมให้ชั่งน้ำหนักสารตามอัตราส่วนใส่ไว้ในกระดาษชั่งสาร แล้วเก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้น ห่างจากความร้อนและมิดชิดจากอากาศ

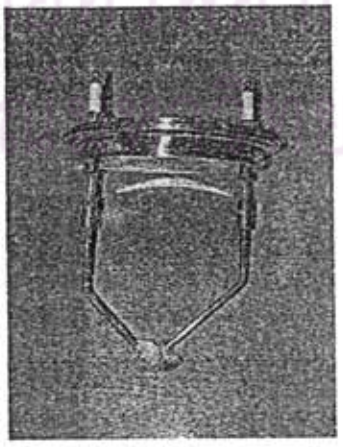
- แบเรียมไนเตรด (barium nitrate) 30% โดยน้ำหนัก ลักษณะเป็นผลึกสีขาวใส การเตรียมและการเก็บเช่นเดียวกับเซอโคเนียม

- แบเรียมเปอร์ออกไซด์ (barium peroxide) 30% โดยน้ำหนัก ลักษณะเป็นผงสีเหลืองออกน้ำตาล การเตรียมและการเก็บเช่นเดียวกับเซอโคเนียม

4.2.2.2 การใส่สารจุดชนวนระเบิดที่ขั้วอิเล็กโทรด

เทนำสารทั้งสามมาผสมกันบนกระดาษชั่งสารของเซอโคเนียมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นให้นำกระดาษชั่งสารที่มีสารจุดชนวนระเบิดอยู่ตรงกลางหุ้มที่ปลายขั้วอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลมให้สารอยู่ภายในกระเปาะ แล้วให้กระดาษหุ้มที่ปลายขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังรูปที่ 4.1

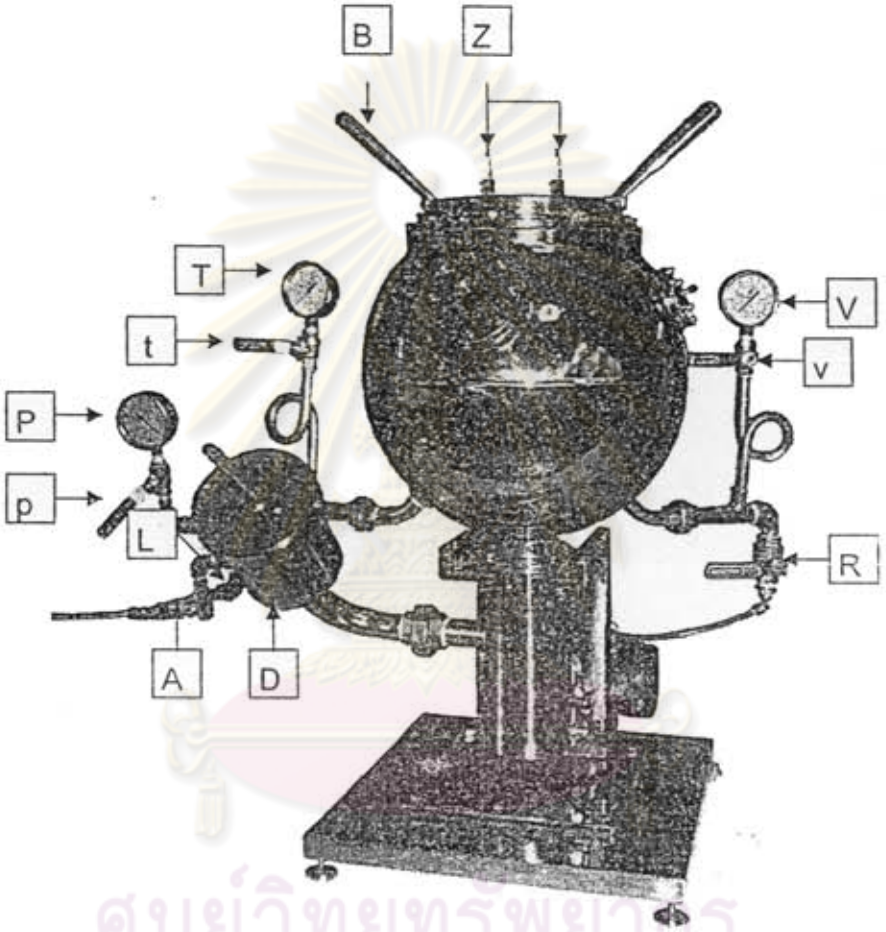
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 การใส่สารจุดชนวนระเบิดที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด

4.3 การทดสอบขั้นต้น

การทดสอบขั้นต้นกระทำเพื่อทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียว โดยปราศจากอนุภาค และเพื่อทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสมโดยอาศัยการสังเกตสภาพอนุภาคที่ค้างอยู่บนขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.2 เครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.1 การทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสม

โดยปกติการทดสอบเบื้องต้นนี้ให้ทำทุกครั้งเมื่อเริ่มทำชุดการทดลองใหม่ (Series)

4.3.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ปิดบอลวาล์ว (L) เปิดวาล์ว (t) – ด้านระบายแรงดัน

(2) ใส่ขั้วอิเล็กโทรด (Z) ทั้งสองอันที่ฝา แล้วใส่ปลายของขั้วอิเล็กโทรดด้วยการสวมปลอกแล้วหมุนน็อตตัวเล็กให้แน่น ดังรูปที่ 4.1 แต่ไม่ต้องใส่สารจุดชนวนระเบิดที่

ปลายขั้วอิเล็กโทรด เพียงวางกระดาษผิวมันไว้ในกระเปาะใส่สารจุดชนวนระเบิดให้พอดี (อาจทากาวที่กระดาษให้ติดผิวของกระเปาะปลายขั้วอิเล็กโทรด) ใส่สายไฟจากหม้อแปลงที่ขั้วอิเล็กโทรด

(3) วาง O-ring ขนาด162 x 3 มิลลิเมตร บนร่องด้านบนของถัง ต้องให้ O-ring วางพอดีในร่องมิฉะนั้นฝาจะปิดไม่สนิทอนุภาคจะรั่วออกมาได้

(4) วางฝาที่มีขั้วอิเล็กโทรดลงปิดด้านบนของห้องจุดระเบิด

(5) ปิดด้วยตัวล็อก (B) ให้แน่น

(6) เปิดบอลวาล์ว (R) และ (v) – ด้านดึงอากาศออกจากถัง

(7) เปิดโปรแกรมการทดสอบตั้งชื่อการทดลอง บันทึกสภาวะการทดลอง ตั้งช่วงเวลาในการทดลอง ดังหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2

(8) เลือกเมนูทดสอบดังหัวข้อ 3.3.5 กดปุ่ม "Operating" ทำให้ปั๊มสุญญากาศเริ่มทำงาน ดูความดันที่เกจ (V) จนได้ค่าตามที่ต้องการ จึงกดปุ่มหยุดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ

(9) ปิดบอลวาล์ว (R) และ (v)

(10) ปิดตัวล็อก (B) ให้แน่นอีกครั้ง

(11) เปิดฝาของกระบอกเก็บอนุภาค เทสารตัวอย่างลงในกระบอก ในขั้นนี้อาจใช้แปรงบดอนุภาคตัวอย่างที่อาจเกาะตัวบางส่วนเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายดีขึ้นและเพื่อให้อนุภาคตกลงไปข้างล่างของกระบอก แต่ต้องระวังมิให้สารอย่างติดที่แปรง จากนั้นปิดฝาให้แน่น

(12) ปรับแรงดันที่วาล์วปรับแรงดันที่ถังอากาศอัดตามที่ต้องการ

(13) ค่อยๆ เปิดบอลวาล์ว (A) เพื่อให้อากาศอัดเข้าสู่กระบอกเก็บอนุภาค ปิดวาล์ว (A) แล้วเปิดวาล์ว (p) เพื่ออ่านความดันที่เกจ (P) จนได้ค่าความดันตามต้องการ ปิดวาล์ว (p) ทันทีเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคที่ฟุ้งในกระบอกมาอุดตันที่เกจ (P)

(14) กดปุ่ม "Start" ที่หน้าโปรแกรม "Test" ระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติ

(15) อ่านค่าความดันเริ่มต้นที่เกจ (T) ในขณะวาล์วทรงกระบอกเปิด

(16) หลังจากวาล์วทรงกระบอกเปิด (อนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดแล้ว) ให้สังเกตลักษณะการกระจายของอนุภาคที่ขั้วอิเล็กโทรดในขณะที่เกิดการสปาร์คของขั้วอิเล็กโทรด

(16) กดปุ่ม "Save" เพื่อบันทึกกราฟการทดลอง

(17) เปิดวาล์ว (L) ช้าๆ จะมีอากาศไหลเข้าหรือออกมาจากสายยางเล็กน้อย (ที่ปลายของสายยางให้หุ้มด้วยผ้าชุบน้ำไว้ด้วย) เพื่อให้ความดันในห้องจุดระเบิดเท่ากับความดันบรรยากาศ

(18) ปลดตัวล็อก (B) ออกแล้วค่อยๆ ยกฝาที่มีขั้วอิเล็กโทรดออกมาดูอนุภาคที่ค้างอยู่บนกระเปาะปลายขั้วอิเล็กโทรด

4.3.1.2 *การวิเคราะห์ผลการทดลอง*

(1) นำกราฟการทดลองที่ได้แปลงเป็นไฟล์เอ็กเซลโดยกดปุ่ม "Convert to Excel" อ่านค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดก่อนการสปาร์คที่ขั้วอิเล็กโทรด

(2) สังเกตปริมาณอนุภาคที่ค้างอยู่ที่ขั้วอิเล็กโทรด ประกอบกับลักษณะการกระจายของอนุภาคที่สังเกตจากการทดลองข้อ 16

4.3.2 การทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียว

การทดสอบเบื้องต้นนี้ให้ทำทุกครั้งเมื่อมีการเตรียมสารจุดชนวนระเบิดชุดใหม่ หรือได้สารจุดชนวนจากแหล่งอื่นมาใหม่

4.3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ปิดบอลวาล์ว (L) และ (r) – ด้านระบายแรงดัน

(2) ใส่ขั้วอิเล็กโทรด (Z) ทั้งสองอันที่ฝา แล้วใส่ปลายของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้างด้วยการสวมปลอกแล้วหมุนน็อตตัวเล็กให้แน่น ใส่สารจุดชนวนจำนวน 2.4 กรัมที่กระเปาะปลายขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ใส่สายไฟจากหม้อแปลงที่ขั้วอิเล็กโทรด

(3) ทำการทดลองตามข้อ 3 ถึงข้อ 7 ของการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสม

(4) เลือกเมนูทดสอบดังหัวข้อ 3.3.5 กดปุ่ม "Operating" ทำให้ปั๊มสุญญากาศเริ่มทำงาน ดูความดันที่เกจ (V) มีค่าเท่ากับ –0.6 บาร์ จึงกดปุ่มหยุดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ

(5) ปิดบอลวาล์ว (R) และ (v) เพื่อป้องกันแรงดันจากการระเบิดของชนวนจุดระเบิดภายในห้องจุดระเบิดไม่ทำให้เกจ (V) เสียหาย

(6) ปิดตัวล็อก (B) ให้แน่นอีกครั้ง

(7) ปรับแรงดันที่ถังอากาศอัดเท่ากับ 12.5 บาร์

(8) เปิดบอลวาล์ว (p) และ (A) เพื่อให้อากาศอัดเข้าสู่กระบอกเก็บอนุภาค อ่านความดันที่เกจ (P) จนได้ค่าความดันเท่ากับ 12.5 บาร์ แล้วปิดวาล์ว (A)

(9) กดปุ่ม "Start" ที่หน้าโปรแกรม "Test" ระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติ

(10) กดปุ่ม "Save" เพื่อบันทึกกราฟการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(11) เปิดวาล์ว (L) ช้าๆ จะมีอากาศไหลเข้าหรือออกมาจากสายยางเล็กน้อย (ที่ปลายของสายยางให้หุ้มด้วยผ้าชุบน้ำไว้ด้วย)

(12) ปลดตัวล็อก (B) ออกแล้วยกฝาที่มีขั้วอิเล็กโทรดออกมา ทำความสะอาดขั้วอิเล็กโทรดด้วยการใช้แปรงทองเหลืองขัดให้เศษเขม่าที่ติดที่ปลายขั้วออกให้หมด

4.3.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำกราฟการทดลองที่ได้แปลงเป็นไฟล์เอ็กเซลโดยกดปุ่ม "Convert to Excel" อ่านค่าความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดเพียงอย่างเดียว ค่าความดันที่ได้ควรมีค่าประมาณ 1.1 $\pm$ 0.1 บาร์เกจ (อ้างอิงจากหนังสือ "Dust explosions in the process industries" หน้า 532 แต่งโดย Rolf K.Eckhoff)

4.4 การวัดค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, P_{max}) และอัตราการสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$)

หลังจากได้เตรียมอนุภาคตัวอย่างและสารจุดชนวนระเบิดดังกล่าวไว้ในขั้นการเตรียมก่อนการทดสอบ และทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียวเมื่อเตรียมสารจุดชนวนใหม่ ทดสอบได้แรงดันเริ่มต้นในการทดลองที่เหมาะสมแล้ว (ผลการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อ 5.1) และตรวจสอบรอยรั่วของชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ปฏิบัติดังต่อไปนี้

4.4.1 การทดลองหาแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum explosion overpressure, P_{ex})

4.4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง พิจารณาจากรูปที่ 4.2 ประกอบ

(1) ปิดบอลวาล์ว (L) – ด้านระบายแรงดัน

(2) ใส่ขั้วอิเล็กโทรด (Z) ทั้งสองอันที่ฝา แล้วใส่ปลายของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้างด้วยการสวมปลอกแล้วหมุนน็อตตัวเล็กให้แน่น ใส่สารจุดชนวนจำนวน 2.4 กรัมที่กระเปาะปลายขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ใส่สายไฟจากหม้อแปลงที่ขั้วอิเล็กโทรด

(3) วาง O-ring ขนาด162 x 3 มิลลิเมตร บนร่องด้านบนของถัง ต้องให้ O-ring วางพอดีในร่องมิฉะนั้นฝาจะปิดไม่สนิทอนุภาคจะรั่วออกมาได้

(4) วางฝาที่มีขั้วอิเล็กโทรดลงปิดด้านบนของห้องจุดระเบิด ปิดด้วยตัวล็อก (B) ให้แน่น

(5) เปิดบอลวาล์ว (R) และ (v) – ด้านดึงอากาศออกจากถัง

(6) เปิดโปรแกรมการทดสอบตั้งชื่อการทดลอง บันทึกสภาวะการทดลอง ตั้งช่วงเวลาในการทดลอง ดังหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2

(7) เลือกเมนูทดสอบดังหัวข้อ 3.3.5 เลือกความเข้มข้นของอนุภาคที่จะทดสอบและชุดการทดลอง กดปุ่ม "Operating" ทำให้ปั๊มสุญญากาศเริ่มทำงาน ดูความดันที่เกจ (V) มีค่าเท่ากับ –0.6 บาร์ บันทึกค่าความดันและกดปุ่มหยุดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ

(8) ปิดบอลวาล์ว (R) และ (v) เพื่อป้องกันแรงดันจากการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิดไม่ทำให้เกจ (V) เสียหาย (ในขั้นนี้ต้องระวังห้ามลืมเด็ดขาด)

(9) ปิดตัวล็อก (B) ให้แน่นอีกครั้ง

(10) เปิดฝาของกระบอกเก็บอนุภาค เทสารตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในกระบอก ในขั้นนี้อาจใช้แปรงบดอนุภาคตัวอย่างที่อาจเกาะตัวบางส่วนเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายดีขึ้นและเพื่อให้อนุภาคตกลงไปข้างล่างของกระบอก แต่ต้องระวังมิให้สารอย่างติดที่แปรง จากนั้นปิดฝาให้แน่น

(11) ปรับแรงดันที่ถังอากาศอัดเท่ากับ 12.5 บาร์

(12) ค่อยๆ เปิดบอลวาล์ว (A) เพื่อให้อากาศอัดเข้าสู่กระบอกเก็บอนุภาค ปิดวาล์ว (A) แล้วเปิดวาล์ว (p) เพื่ออ่านความดันที่เกจ (P) จนได้ค่าความดันเท่ากับ 12.5 บาร์ ปิดวาล์ว (p) ทันทีเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคที่ฟุ้งในกระบอกมาอุดตันที่เกจ (P)

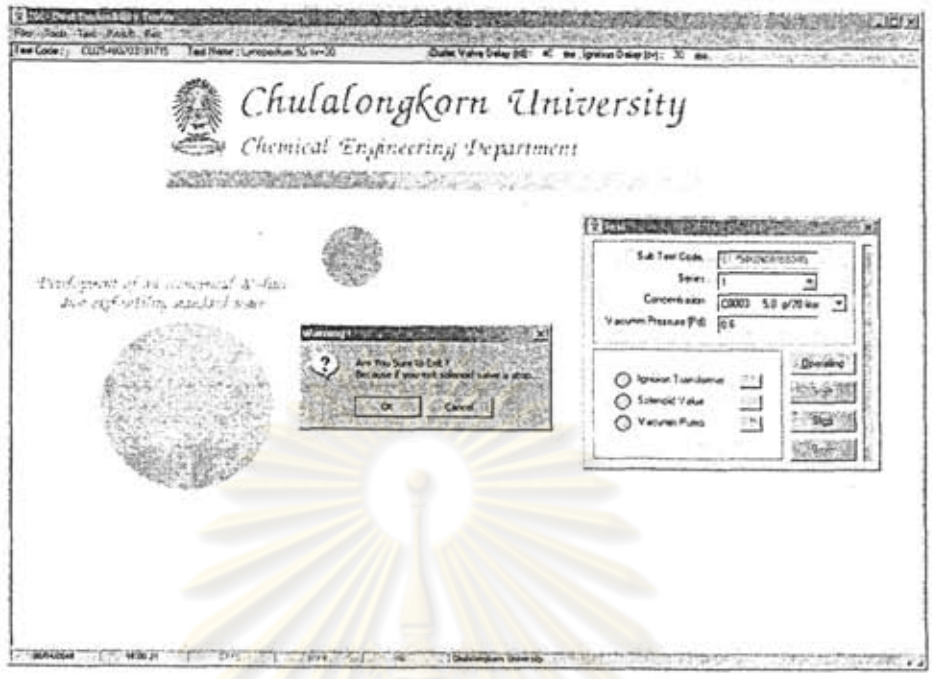
(13) กดปุ่ม "Start" ที่หน้าโปรแกรม "Test" ระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติ

(14) ในขณะที่เครื่องทำการทดสอบ ณ เวลาหลังจากที่อนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดห้ามมองที่ช่องมองโดยตรงเนื่องจากการระเบิดเกิดแสงสว่างมาก

(15) หลังจากการทดลองเสร็จสิ้น (ใช้เวลาประมาณ 200 มิลลิวินาที หลังจากกดปุ่ม "Start" ตามที่ตั้งค่าไว้) ให้กดปุ่ม "Save" เพื่อบันทึกกราฟการทดลอง จะได้กราฟการทดลองดังรูปที่ 3.27

(16) ปิดโปรแกรม "Test" โดยกดปุ่ม X ที่มุมบนขวาของหน้าโปรแกรม จะมีข้อความขึ้นมาดังรูปที่ 4.3 กดปุ่ม "OK" หน้าโปรแกรมจะปิดลงและวาล์วทรงกระบอกจะอยู่ในตำแหน่งปิด (ลูกสูบดันขึ้นเนื่องจากลมที่ค้างอยู่ในท่อลม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 หน้าโปรแกรมออกจากการเมนู "Test" เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง

4.4.1.2 ขั้นตอนหลังการทดลอง

(17) เปิดวาล์ว (L) ช้าๆ จะมีอากาศไหลเข้าหรือออกมาจากสายยางเล็กน้อย (ที่ปลายของสายยางให้หุ้มด้วยผ้าชุบน้ำไว้ด้วย) เพื่อให้ความดันในห้องจุดระเบิดเท่ากับความดันบรรยากาศ

(18) ล้างอนุภาคที่อาจค้างในวาล์วทรงกระบอกด้วยการอัดอากาศเข้ากระบอกเก็บอนุภาคเล็กน้อย แล้วกดปุ่มเปิดปิดวาล์วที่ตู้ควบคุมไฟประมาณ 3 ครั้ง

(19) ปิดสวิทช์ไฟที่ตู้ควบคุมไฟ จึงถอดสายไฟที่ขั้วอิเล็กโทรด

(20) ปลดตัวล็อก (B) ออกแล้วยกฝาที่มีขั้วอิเล็กโทรดออกมา

(21) ทำความสะอาดผนังภายในถังและนำเศษอนุภาคที่เผาไหม้แล้วด้วยเครื่องดูดฝุ่น โดยเฉพาะบริเวณช่องมองและที่หัววัดแรงดัน

(22) ถอดขั้วอิเล็กโทรดออกจากฝา ถอดปลายขั้วออกมาทำความสะอาดด้วยการใช้แปรงทองเหลืองขัดให้เศษเขม่าที่ติดที่ปลายขั้วออกให้หมด

(23) ถอดแผ่นกระจายอนุภาค (Rebound nozzle) ด้วยการหมุนคลายเกลียวที่ฐานของเครื่อง นำมาทำความสะอาด และทำความสะอาดช่องของท่อที่ต่อกับถัง ในขั้นนี้ระวังอย่ากระแทกถังอย่างแรง เนื่องจากได้ถอดแผ่นกระจายอนุภาคซึ่งเป็นตัวยึดถังและท่อที่วางบนฐานของเครื่อง ซึ่งอาจทำให้ถังหล่นลงมาได้

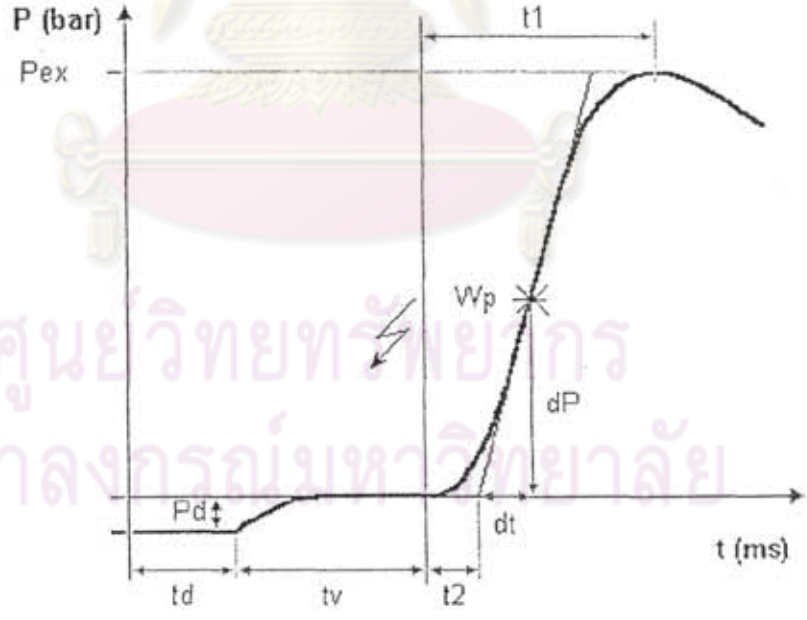
(24) ทำความสะอาดกระบอกเก็บอนุภาคและท่อต่อในกรณีที่มีอนุภาคค้างอยู่ด้วยเครื่องดูดฝุ่น

4.4.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำกราฟการทดลองที่ได้แปลงเป็นไฟล์เอ็กเซลโดยกดปุ่ม "Convert to Excel" แสดงดังรูปที่ 4.4 ค่าความดันจากการระเบิดของอนุภาค (Maximum explosion Overpressure, P_{ex}) เท่ากับผลต่างระหว่างความดัน ณ เวลาที่จุดชนวนระเบิด (ความดันปกติ) กับความดัน ณ จุดสูงสุดของกราฟ

4.4.2 การทดลองหาอัตราของการเพิ่มความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Rate of Pressure Rise with Time, dP/dt)

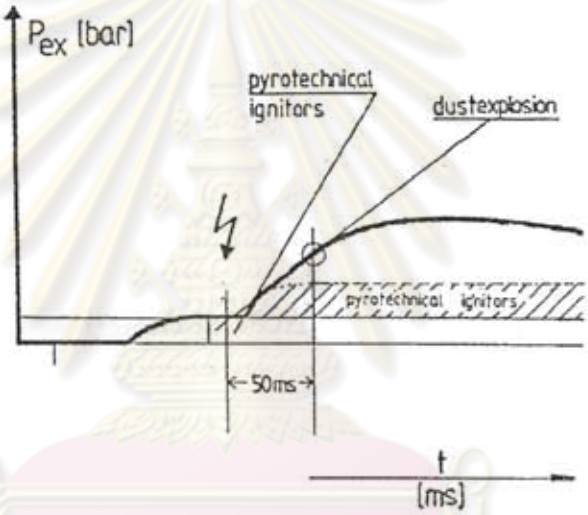
สามารถนำกราฟจากการทดลองหาความดันจากการระเบิดมาหาค่าอัตราของการเพิ่มความดันจาการระเบิด (Rate of Pressure Rise with Time, dP/dt)เท่ากับ ค่าความชันสูงสุดของเส้นสัมผัสที่ลากผ่านจุดที่มีความหักเหของมุมที่กระทำต่อแกน y มากที่สุด (เรียกว่า point of inflexion, W_p) ของกราฟในส่วนที่กราฟพุ่งขึ้นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดลองแสดงความดันจากการระเบิด (P_{ex}) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อแสดงค่าตัวแปรของการทดลองและตัวแปรของผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากวิเคราะห์ค่า $(dP/dt)_{ex}$ หากพบว่ามีค่าต่ำกว่า 150 บาร์/วินาที อาจเป็นไปได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดมากกว่าของวัสดุอนุภาค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบระหว่างกราฟความดันจากการระเบิดของอนุภาคกับเวลา และกราฟความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดเพียงอย่างเดียวกับเวลา ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 จากมาตรฐาน ASTM E 1226 ระบุสารจุดชนวนระเบิดที่ให้พลังงาน 10,000 จูล มีค่าอัตราการเพิ่มความดันเท่ากับ 100 บาร์/วินาที หรืออาจตั้งสมมุติฐานได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดสิ้นสุดลงหลังจากอนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิด 50 มิลลิวินาที (เมื่อค่า tv = 60 มิลลิวินาที)



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาของสารชนวนจุดระเบิดและวัสดุอนุภาค

4.4.3 การทดลองหาแรงดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, P_{max})

ความดันสูงสุดจากการระเบิดของอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, P_{max}) เท่ากับ ค่าความดัน P_{ex} สูงสุด เมื่อทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคหลายๆ ค่า ดังนั้นการทดลองมีดังนี้

4.4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.4.1.1 ที่ความเข้มข้นน้อยๆ เช่น 120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (2.5 กรัมต่อ 20 ลิตร)

(2) เมื่อทำความสะอาดเครื่องทดสอบเรียบร้อยทำการทดลองซ้ำเช่นเดิม แต่เพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคขึ้นอีกหนึ่งระดับ (ในโปรแกรมจะมีค่าความเข้มข้นที่ละระดับให้เลือก)

(3) ทำการทดลองซ้ำเช่นนี้จนพิจารณาได้ค่าความดันสูงสุดจากชุดการทดลองนี้ (Series) เมื่อค่าความดันเปลี่ยนไป ระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

หรือ 2.5; 5; 10; 15; 20; 25; 30 กรัมต่อ 20 ลิตร

(4) เมื่อทำการทดลองในชุดการทดลอง (Series 1) แล้ว ให้ทำการทดลองซ้ำอีกสองชุดการทดลองเพื่อเป็นการตรวจสอบความเที่ยงตรงของข้อมูลการทดลองเพื่อหาความดันสูงสุดจากการระเบิดของอนุภาค โดยทดลองที่ความเข้มข้นต่ำกว่าและสูงกว่าความเข้มข้นที่ให้ค่าความดันสูงสุด ตัวอย่างเช่นความเข้มข้นที่ให้ค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 250 และ 500 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะได้ว่า

Series 1:	125;	250;	500;	750;	1000	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
Series 2:	125;	250;	500;	750		กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
Series 3:	125;	250;	500;	750		กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4.4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดถูกนิยามไว้ (ตามมาตรฐาน ASTM E1226) ว่า คือค่าเฉลี่ยของความดันสูงสุดของแต่ละชุดการทดลอง (มี 3 ชุดการทดลอง)

4.4.4 การทดลองหาอัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$) และ $K_{St}max$

เมื่ออัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิด (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$) ก็คือค่า $(dP/dt)_{ex}$ สูงสุดเมื่อทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคหลายๆ ค่า ดังนั้นจึงสามารถใช้กราฟจากชุดการทดลองในหัวข้อ 4.4.3 แล้วนำมาหาความชันของกราฟตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.2

การวิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับความดันสูงสุดจากการระเบิดของอนุภาค (ตามมาตรฐาน ASTM E1226) อัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิด คือค่าเฉลี่ยของอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันของแต่ละชุดการทดลอง (มี 3 ชุดการทดลอง)

ค่า K_{St} (Explosion Violence, St class) เป็นค่าคงที่ของกฎรากกำลังสาม (cube-root-law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$ กับปริมาตรของ

ภาชนะที่ใช้ทดสอบ เป็นค่าสมบัติประจำตัวของอนุภาคชนิดหนึ่งๆ ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้ คือ

$$K_G \max = (dP/dt)_{\max}(V)^{1/3}$$
$$= 0.27144 \times (dP/dt)_{\max} \quad \text{หน่วย บาร์.เมตร/วินาที}$$

4.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{max}) และ อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$

เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ดังนี้

4.5.1 อิทธิพลของเวลาหน่วงของการจุดชนวนระเบิด (Ignition delay time; tv)

ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า tv เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิวินาที เมื่อกำหนดให้เวลาหน่วงของการเปิดวาล์ว (Delay time of Outlet valve; td) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที และช่วงเวลาของการเปิดวาล์ว (Holding time of Outlet valve) เท่ากับ 10 มิลลิวินาที ซึ่งสามารถตั้งค่าเหล่านี้ในโปรแกรมควบคุมเครื่องทดสอบดังหัวข้อ 3.3.2

4.5.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.4.1 เพื่อหาค่า P_{ex} และตามหัวข้อ 4.4.2 เพื่อหาค่า (dP/dt) ที่ความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 250 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (5 กรัม/ 20 ลิตร) และตั้งค่าเวลาหน่วงของการจุดชนวน (tv) เท่ากับ 10 มิลลิวินาที

(2) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนค่า tv เป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิวินาที ตามลำดับ

(3) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 และ 2 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (10 กรัม/ 20 ลิตร) และ750 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (15 กรัม/ 20 ลิตร) ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการนี้จะพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลอง และค่าความดันสูงสุดที่ได้จากแต่ละ tv ที่ทำการทดลอง

4.5.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาค

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยใช้แป้งข้าวโพดที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงที่มีขนาดอนุภาคต่างกันสองขนาดได้แก่

- ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 45 $\mu m < d_{p1} < 75\ \mu m$
- ขนาดอนุภาคเท่ากับ $d_{p2} < 45\ \mu m$

4.5.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ทำการคัดขนาดแป้งข้าวโพดตามหัวข้อ 4.1.2.3 นำแป้งข้าวโพดที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาดช่องเปิด (Aperture size) = 45 μm และลอดผ่านตะแกรงขนาด 75 μm เก็บไว้ซึ่งกำหนดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ d_{p1} และเก็บอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 μm เก็บไว้อีกส่วนซึ่งกำหนดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ d_{p2}

(2) นำแป้งข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ d_{p1} ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.4.3 เพื่อหาค่า P_{max} และตามหัวข้อ 4.4.4 เพื่อหาค่า $(dP/dt)_{max}$ แต่ทำเพียงสองชุดการทดลอง (2 series) ที่ค่าเวลาหน่วงของการจุดชนวน (tv) เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

(3) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนมาใช้แป้งข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ d_{p2}

4.5.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในที่นี้ จะเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ของแป้งข้าวโพดทั้งสองขนาด

4.5.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากการทดลองกับค่ามาตรฐาน

ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.4.3 และ 4.4.4 เพื่อหาค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ของอนุภาคไลโคโพเดียม และนิโคตินิกแอซิก เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าตามมาตรฐาน ASTM E 1226 และรายงานการสอบเทียบเครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตรของ Adolf Kühner AG ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคที่เปลี่ยนไปต่อความดันจากการระเบิดและอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันอีกด้วย

4.6 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของข้อมูลการทดลอง

4.6.1 ความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (P_{max})

ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดเป็นค่าเฉลี่ยของความดันสูงสุดของแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งค่าสูงสุดของแต่ละชุดการทดลองต้องมีค่าแตกต่างจากค่า P_{max} ไม่มากกว่า 10% หากค่าเบี่ยงเบนเกินให้ทำชุดการทดลองนั้นซ้ำใหม่อีกครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิดวัสดุอนุภาค ($(dP/dt)_{max}$) และ K_{St}

อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มของความดันในแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งอัตราการเพิ่มความดันของแต่ละชุดการทดลองต้องมีค่าแตกต่างจาก $(dP/dt)_{max}$ และ K_{St} max ดังตารางที่ 4.1 หากค่าเบี่ยงเบนเกินให้ทำชุดการทดลองนั้นซ้ำใหม่

ตารางที่ 4.1 ค่าความเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้ของ dP/dt และ K_{St}

(dP/dt)max	K_{St} max	Deviation
≤ 185	≤ 50	± 30%
186-370	51-100	± 20%
371-740	101-200	± 12%
> 740	> 200	± 10%

4.7 **การตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง**

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ เปลือกข้าวจากการสีข้าว ครีมเทียม และแป้งมันสำปะหลัง โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้จะยังไม่ได้ทำการคัดแยกขนาด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ

เนื่องจากตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานเครื่องทดสอบมีหลายตัวแปร แต่ตัวแปรที่สำคัญคือ เวลาหน่วงของการจุดชนวนระเบิด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 5.2 ส่วนตัวแปรอื่นที่มีผลต่อเครื่องทดสอบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อนี้ เป็นค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด และความดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนซึ่งเมื่อสามารถปรับตั้งค่าที่เหมาะสมได้แล้วก็จะถูกตั้งให้เป็นค่าคงที่เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรต่อค่าความดันจากการระเบิด โดยนำข้อมูลจากการทดสอบเบื้องต้นมาพิจารณา

5.1.1 ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด

ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด (Pi) คือความดันเมื่ออากาศอัดและอนุภาคตัวอย่างจากกระบอกเก็บสารเข้าสู่ห้องจุดระเบิดจนหมดก่อนจุดชนวนระเบิด เนื่องจากค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด (P_{max}) และค่า $K_{St}max$ แปรผันโดยตรงกับความดันความดันเริ่มต้น (Pi) ดังนั้นในแต่ละการทดลองต้องมีค่าความความดันเริ่มต้นเท่ากันทุกครั้งและจัดว่าเป็นตัวแปรคงที่ที่สำคัญ เพราะหากค่า Pi มีค่ามากค่าความดันจากการระเบิดก็มีค่ามากขึ้นด้วย ค่าความดันเริ่มต้นที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E 1226 กำหนดเท่ากับ 1.013 บาร์ (14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

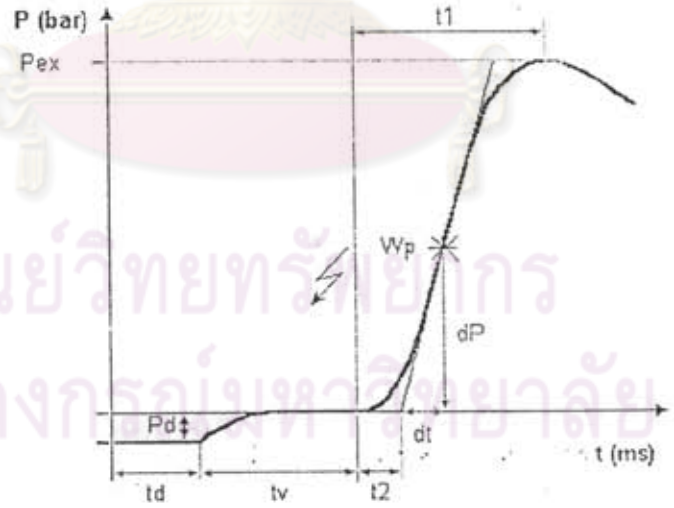
ดังนั้นความดันในการดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิด (Pd) และความดันอากาศอัดภายในกระบอกเก็บอนุภาคตัวอย่างจึงมีผลต่อความดันเริ่มต้น โดยความดันในการดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิดนั้นเมื่อพิจารณา "Operating Instruments for the 20-L Apparatus" ซึ่งเสนอโดย Siwek และ Cesana และจากมาตรฐาน ASTM E1226 ระบุค่าความดัน Pd เท่ากับ –0.6 บาร์เกจ (0.4 บาร์สัมบูรณ์) การทดลองเบื้องต้นจึงทดลองปรับความดันของอากาศอัดภายในกระบอกเก็บอนุภาคให้ได้ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดเท่ากับ 1.013 บาร์ (14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และพิจารณาความฟุ้งกระจายของอนุภาคประกอบด้วย ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นปฏิบัติตามหัวข้อ 4.3.1.1 โดยใช้แป้งข้าวโพด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1

จากผลการทดลองความดันอากาศอัดภาคในกระบอกเก็บอนุภาคที่เหมาะสมเท่ากับ 12.5 บาร์ เนื่องจากทำให้ความดันเริ่มต้นเท่ากับความดันบรรยากาศ และมีส่วนช่วยให้อนุภาคตกลงบริเวณปลายขั้วอิเล็กโทรด นอกจากการทดสอบเบื้องต้นนี้ได้ทดลองจริงเพื่อหาความดันจากการระเบิดของอนุภาคไลโคโพเดียมเข้มข้น 5 กรัม/ 20 ลิตร เมื่อค่าหน่วงการจุดชนวนเท่ากับ 20

มิลลิวินาที ช่วงเวลาเปิดของวาล์วทรงกระบอก 10 มิลลิวินาที ความดันอากาศอัดเท่ากับ 12.5 บาร์ ตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.4.1 ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 5.1

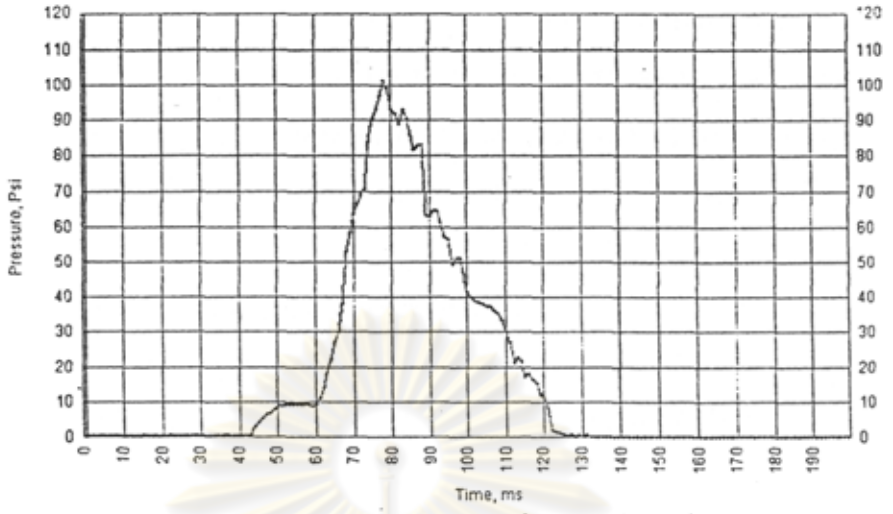
ตารางที่ 5.1 การวัดค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดก่อนการสปาร์คของขั้วอิเล็กโทรด

ความดัน อากาศอัด (บาร์)	ความดัน เริ่มต้น (บาร์)	ลักษณะการฟุ้งกระจายที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด
10	0.9	อนุภาคส่วนมากอยู่ด้านข้างของปลายขั้ว อนุภาคค้างที่กระเปาะเล็กประมาณ 1/5 ส่วน
12.5	1.0	อนุภาคส่วนมากอยู่ด้านบนของกระเปาะ อนุภาคค้างที่กระเปาะเล็กประมาณ 3/5 ส่วน
15	1.2	อนุภาคส่วนหนึ่งอยู่ด้านบนของกระเปาะและ บางส่วนอยู่ติดกับผนังมากกว่าสองกรณีแรก อนุภาคค้างที่กระเปาะเล็กประมาณ 2/5 ส่วน



(ก) รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทดสอบมาตรฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) การเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องทดสอบที่พัฒนา

รูปที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าความดันจากการระเบิดของไลโคโพเดียม เทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากรูปที่ 5.1(ก) ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานเมื่อ outlet valve เปิดความดันในห้องจุดระเบิดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอากาศอัดเข้ามาและความดันแตกต่างระหว่างก่อนเปิดวาล์วและหลังเปิดวาล์วต้องเท่ากับความดันของการดึงอากาศออกจากถัง (Pd) ซึ่งแสดงว่าความดันภายในห้องจุดระเบิดกลับมาเท่ากับความดันบรรยากาศ และเมื่อเปรียบเทียบกราฟการทดลองจริงซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 (ข) ที่ใช้อากาศอัด12.5 บาร์ (1,250 กิโลปาสคาล) ความดันแตกต่างระหว่างก่อนเปิดและหลังเปิดวาล์วเท่ากับ 8.63 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (= 0.6 กิโลปาสคาล) และ 9.09 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (= 0.63 กิโลปาสคาล) แสดงว่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันอากาศอัดที่เหมาะสมเท่ากับ 12.5 บาร์ (1,250 กิโลปาสคาล)

5.1.2 ความดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนระเบิด

จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้สารจุดชนวนระเบิดเพียงอย่างเดียวตามมาตรฐาน ASTM E1226 ความดันที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 16 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 1.1 บาร์ ดังนั้นในการทดสอบการพิจารณาว่าอนุภาคเกิดการระเบิดคือเมื่อความดันจากการระเบิดมีค่ามากกว่า 1.1 บาร์ (110 กิโลปาสคาล)

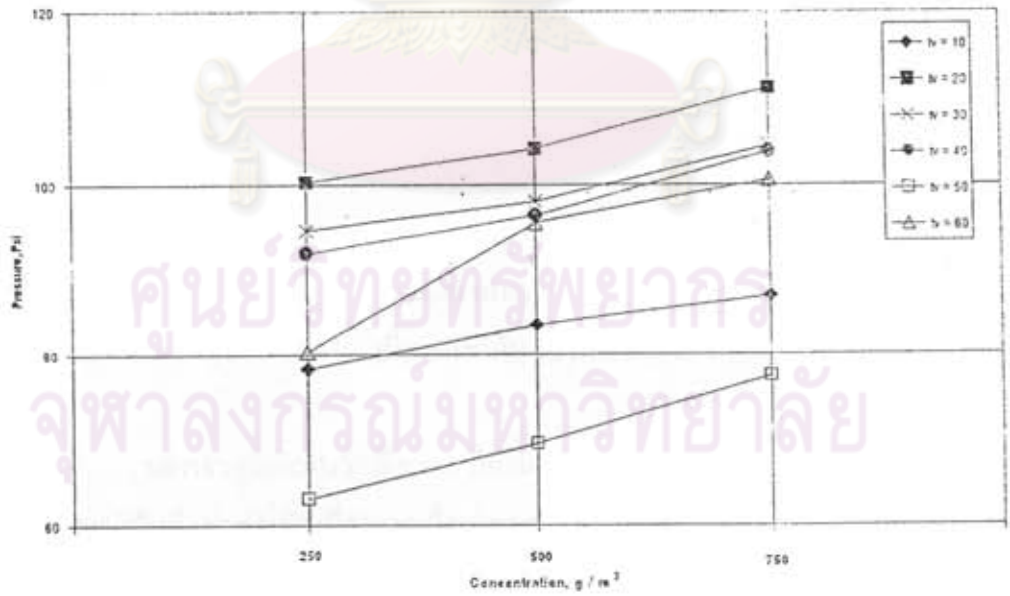
การระเบิดของสารจุดชนวนเป็นตัวอย่างที่ดีในการเปรียบเทียบการระเบิดของวัสดุอนุภาค กับการระเบิดของวัตถุระเบิดกล่าวคือ วัตถุระเบิดได้แก่พวก ทำมะถัน ดินประสิว หรือมีสารมากกว่าสองตัวขึ้นไป ระเบิดขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่รุนแรงที่ถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงาน

ความร้อนเท่านั้น ในที่นี้คือแบเรียมไนเตรต และแบเรียมเปอร์ออกไซด์ ส่วนเซอโคเนียมเป็นเหมือนเชื้อเพลิงเพิ่มพลังงานในปฏิกิริยา ในขณะการระเบิดของวัสดุอนุภาคต้องอาศัยปัจจัยหลักที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นผงที่พอเหมาะ แหล่งพลังงานที่ให้กับหมอกฝุ่น และก๊าซออกซิเจนดังนั้นอนุภาคที่สามารถระเบิดในสภาวะหมอกฝุ่น อาจไม่ใช่วัตถุระเบิดก็ได้

5.1.3 เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิด (tv)

ในเบื้องต้นจะขอกล่าวถึงผลของ tv จำเป็นต้องกล่าวถึงช่วงเวลาของการเปิดวาล์วทรงกระบอกเพื่อให้อนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดเลือกที่ 10 มิลลิวินาทีเนื่องจากเป็นเวลาน้อยสุดที่อนุภาคเข้าสู่ถังจนหมด และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 ในช่วงเวลาของการเปิดวาล์วความดันจะเพิ่มขึ้นและคงที่ซึ่งช่วงเวลา ณ ความดันเริ่มคงที่มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิวินาทีหลังเปิดวาล์ว

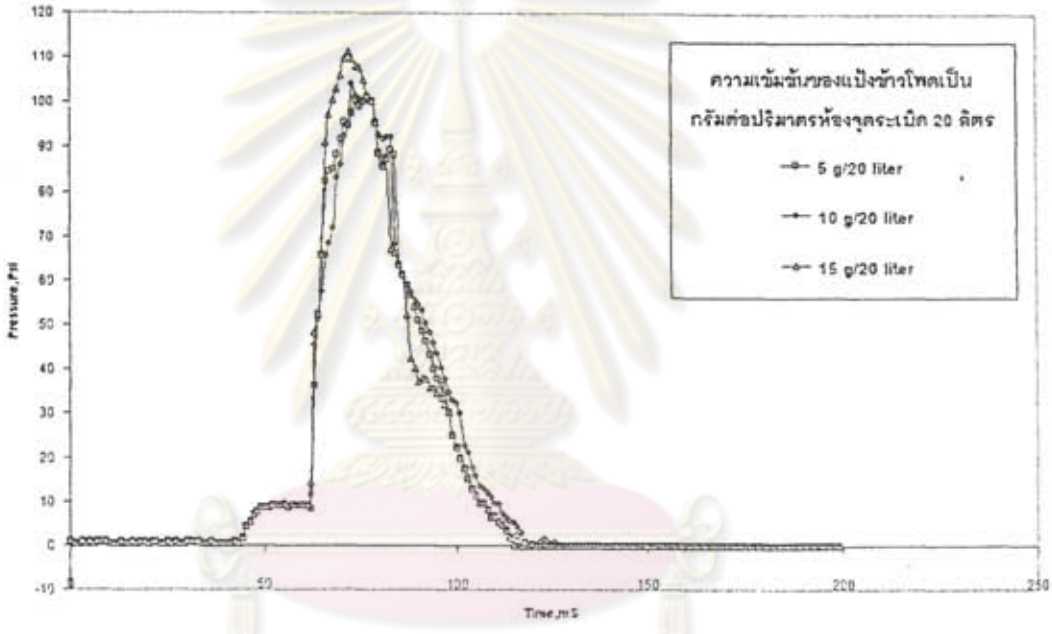
หลังจากวาล์วปิดลงอนุภาคที่ผ่านแผ่นกระจายอนุภาคจะฟุ้งกระจายภายในห้องจุดระเบิด เวลาที่เหมาะสมที่สุดที่จะจุดชนวนระเบิดคือเวลาที่อนุภาคอยู่กลางถังทรงกลมก็คือจะได้รับพลังงานจากชนวนระเบิดมากที่สุด ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากสุดทำให้เกิดก๊าซจากการเผาไหม้มากส่งผลให้ความดันรวมของระบบมีค่ามากที่สุด ดังนั้นค่าตัวแทนที่นำมาพิจารณาหา tv ที่เหมาะสมคือ ค่าความดันสูงสุดจากการทดลอง แสดงผลไว้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ผลของ tv ต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.2 ความดันสูงสุดของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 111.19 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน (Eckhoff, 1991) แป้งข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16 ไมครอน มีค่า P_{max} เท่ากับ 9.7 บาร์ หรือ 141 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะของกราฟความดันกับเวลาที่ได้ แนวโน้มและลักษณะของกราฟไปในลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 5.3 แสดงว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคก่อนและหลังการจุดระเบิดมีลักษณะเหมือนเดิมทำให้ความดันเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดิมถึงแม้ความเข้มข้นของอนุภาคจะเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อ tv เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อ tv มีค่ามากขึ้นลักษณะของกราฟความดันที่ความเข้มข้นต่างๆ มีแนวโน้มที่แตกต่างกันเนื่องจากเมื่อเวลามากขึ้นอนุภาคกระจายอย่างเป็นอิสระมากขึ้นทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคเกิดไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอส่งผลให้ความดันที่เกิดมีความผันแปรเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไป

5.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$

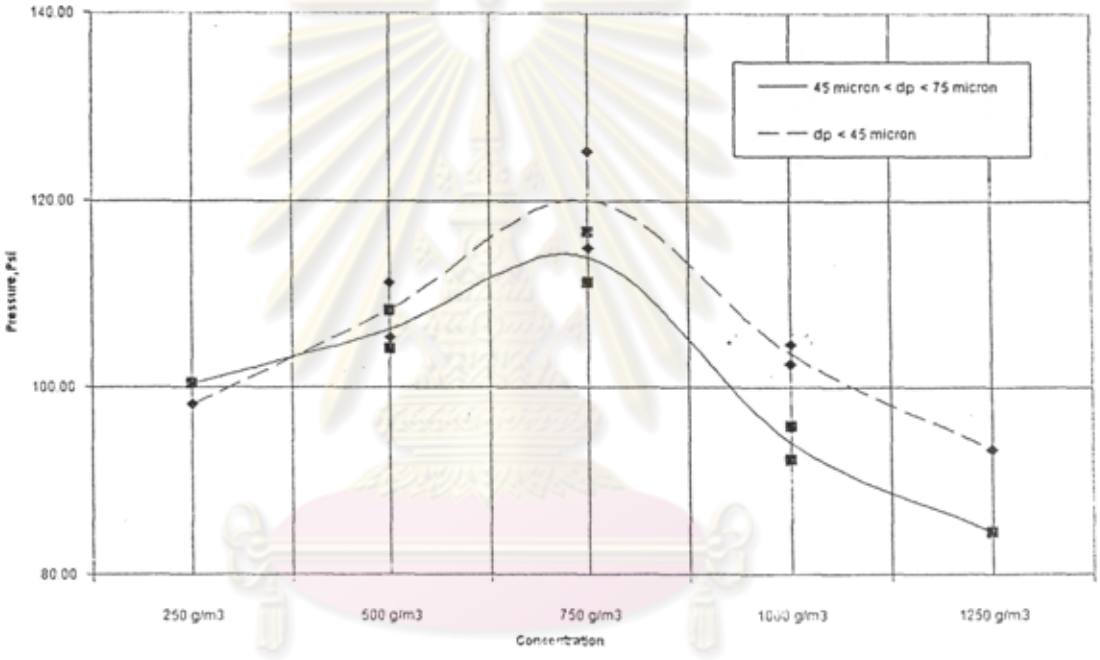
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่าในการทดสอบใช้แป้งข้าวโพดสองกลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $45\ \mu m < d_{p1} < 75\ \mu m$

กลุ่มที่ 2 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ $d_{p2} < 45\ \mu m$

5.2.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max}

การทดลองใช้แป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาค่าความดันสูงสุด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4

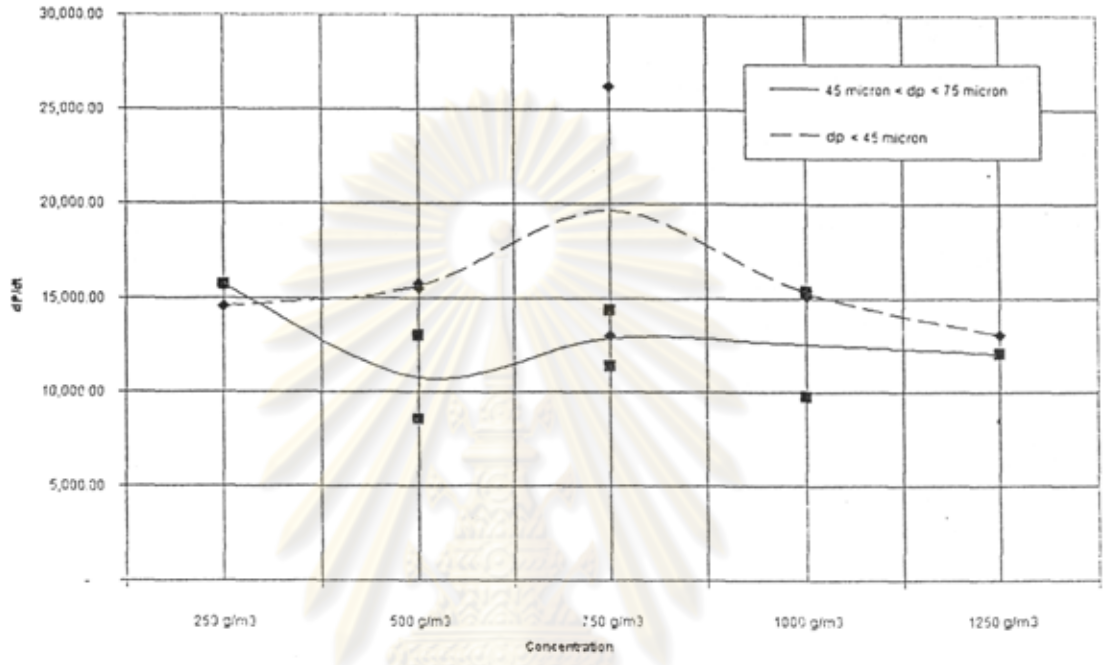


รูปที่ 5.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด

จากรูปที่ 5.4 พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเล็กลงในช่วงต่ำกว่า 45 ไมครอนจะส่งผลให้เกิดความดันจากการระเบิดสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณอนุภาคเท่ากันอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้มากกว่าส่งผลให้ความดันรวมของระบบมีค่ามากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความดันกับมาตรฐานของแป้งข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16 ไมครอน มีค่า P_{max} เท่ากับ 9.7 บาร์ หรือ 141 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าแป้งข้าวโพดที่ทดสอบขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 ไมครอน มีค่า P_{max} เท่ากับ 120.3 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน

5.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $(dP/dt)_{max}$

การทดลองใช้แป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน

จากรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเล็กลงอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันมีค่ามากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับในกรณีความดันสูงสุด นอกจากที่อนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากแล้ว เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของหมอกฝุ่นเท่ากันเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงอากาศ (ออกซิเจน) จะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นอัตราของการเกิดปฏิกิริยาจึงมากขึ้นทำให้ความดันรวมของระบบเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

5.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน

อนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือไลโคโพเดียมขนาดอนุภาคเฉลี่ย 26 ไมครอนตามมาตรฐาน ASTM E1226 และนิโคตินิกแอซิกขนาดอนุภาคเฉลี่ย 180 ไมครอน ตามรายงานการสอบเทียบเครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตรของ Adolf Kühner AG ได้ผลการทดลอง ดังนี้

5.3.1 อนุภาคมาตรฐานไลโคโพเดียม

เนื่องจากอนุภาคมาตรฐานไลโคโพเดียมหายากมีราคาแพง ดังนั้นการทดลองจึงใช้ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 250 กรัม/ลบ.ม. (5 กรัม/20 ลิตร) และ 500 กรัม/ลบ.ม. (10 กรัม/20 ลิตร) ทำการทดลองซ้ำกันสามครั้งแล้วเปรียบเทียบผลตามมาตรฐาน ASTM ทั้งสามครั้ง แสดงผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5.2

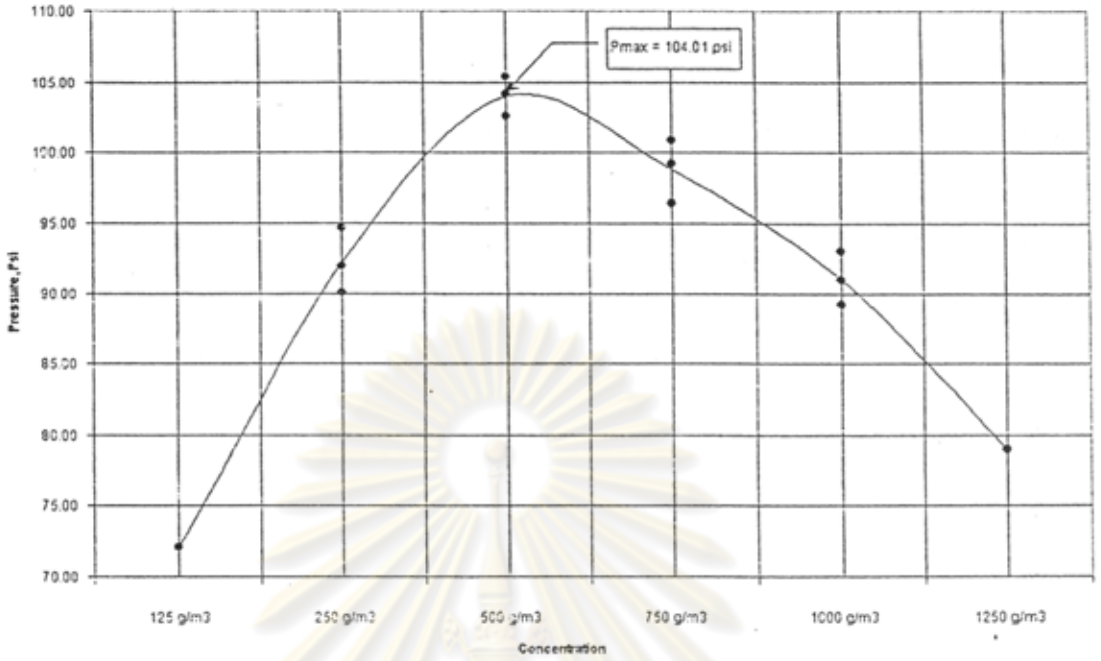
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ของไลโคโพเดียมจากการทดลองกับค่ามาตรฐาน

	P_{max} (psi)		$(dP/dt)_{max}$ (psi/s)	
	ผลการทดลอง	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดลอง	ค่ามาตรฐาน
	101.35	100.1	3,890	3,510
	103.34	102.9	3,950	3,858
	104.54	105.9	4,170	4,075
	108.00	113.2	6,343	4,962
	110.12	116.1	7,175	4,686
	110.92	117.5	4,050	4,352

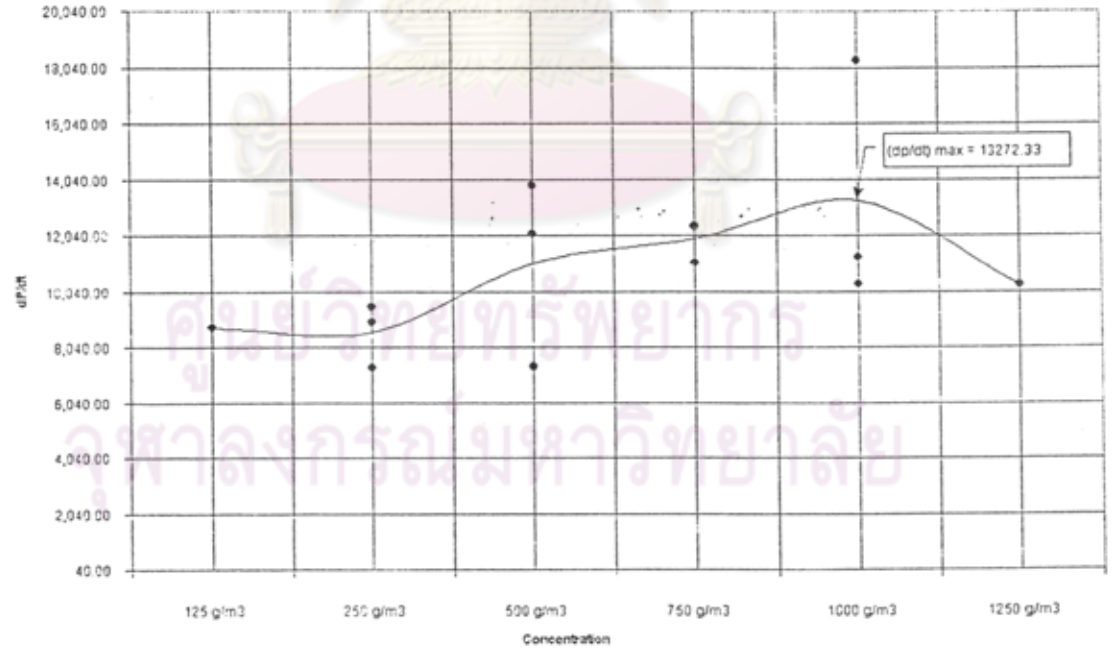
จากตารางพบว่าค่าจากการทดลองทั้งค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากทั้งสองความเข้มข้น โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นน้อยมีค่าใกล้เคียงมาก อาจเนื่องจากอนุภาคมีการกระจายสม่ำเสมอ และเมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้นโอกาสในการชนกันเองของอนุภาคมีมากขึ้นทำให้การกระจายบริเวณกลางถังไม่สม่ำเสมอทำให้ได้ค่าความดันน้อยกว่ามาตรฐาน ส่วนค่า $(dP/dt)_{max}$ ที่ความเข้มข้น 500 กรัม/ลบ.ม. ในสองครั้งแรกที่มีค่ามากอาจเนื่องจากอนุภาคชนและตกมาบริเวณปลายขั้วพอดีทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันสูง และค่า P_{max} สูง แต่ยังไม่เท่ามาตรฐานอาจเนื่องจากอนุภาคที่ชนกันมีปริมาณน้อยกว่าอนุภาคที่กระจายอยู่ในส่วนอื่นๆ

5.3.2 อนุภาคมาตรฐานนิโคตินิกแอซิก

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ทั้งหมด 3 ชุดการทดลองเพื่อหาค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 ค่า P_{max} ของนิโคตินิกแอซิกจากการทดลอง



รูปที่ 5.7 ค่า $(dP/dt)_{max}$ ของนิโคตินิกแอซิกจากการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า P_{max} มาตรฐานของนิโคตินิกแอซิกเท่ากับ 117.5 ± 10% ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (มีค่าระหว่าง 105.9 ถึง 129.1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ผลการทดลองได้เท่ากับ 104.01 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งยังใกล้เคียงกับช่วงของค่ามาตรฐานส่วนค่า $(dP/dt)_{max}$ มาตรฐานของนิโคตินิกแอซิกเท่ากับ 12,401 ± 10% ปอนด์ต่อตารางนิ้ว/วินาที (มีค่าระหว่าง 11,171 ถึง 13,680 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว/วินาที) ผลการทดลองได้เท่ากับ 13,272 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว/วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐาน ดังนั้นจากผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นด้วยอนุภาคมาตรฐานทั้งสองอย่าง อาจกล่าวได้ว่าเครื่องทดสอบให้ผลใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานสากล

5.4 ผลของความเข้มข้นต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$

5.4.1 ผลของความเข้มข้นต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าความดันจากการระเบิดมีค่ามากขึ้นเนื่องจากมีเชื้อเพลิง (วัสดุอนุภาค) ในการทำปฏิกิริยามากขึ้นเกิดก๊าซจากการเผาไหม้มากขึ้น ทำให้ความดันรวมในระบบมีค่ามากขึ้น จนถึงความเข้มข้นค่าหนึ่งค่าความดันมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่ออนุภาคมีความเข้มข้นมากเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นแต่พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลงทำให้ความดันลดลง อีกประการเนื่องจากเมื่ออนุภาคมีปริมาณมากขึ้นอนุภาคที่ไม่ถูกเผาไหม้ดูดซับพลังงานความร้อนจากสารจุดชนวนระเบิดไว้ทำให้พลังงานจากสารจุดชนวนเหลือน้อยลงที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ความดันจึงลดลง และประการสุดท้ายอาจเกิดจากปริมาณออกซิเจนภายในห้องจุดระเบิดไม่เพียงพอสำหรับปริมาณอนุภาคที่มากขึ้น

5.4.2 ผลของความเข้มข้นต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อความเข้มข้นมากขึ้นค่า $(dP/dt)_{max}$ มีค่าแนวโน้มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณอนุภาคมีมากขึ้นอัตราการทำปฏิกิริยามากขึ้นการเปลี่ยนแปลงของความดันมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า $(dP/dt)_{max}$ ลดลงเนื่องจากเมื่อเทียบที่ปริมาตรหมอกฝุ่นเท่ากัน เมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของอนุภาคมีมากขึ้นโอกาสการชนกันเองมีมากขึ้นดังนั้นโอกาสที่อนุภาคจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เพียงอย่างเดียวจึงลดลงทำให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความดันลดลง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้ คือ ทดสอบหาความดันสูงสุดของการระเบิด และอัตราการเพิ่มของความดันของการระเบิด โดยใช้เครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตรที่พัฒนาขึ้นเอง โดยมุ่งเน้นการสร้างเครื่องมือที่มีสมรรถนะตามมาตรฐานสากล แต่มีต้นทุนถูกกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยสอบเทียบด้วยขอนุภาคมาตรฐาน และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ผลของการดำเนินการสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ

เพื่อเป็นการตรวจยืนยันสมรรถนะของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องทดสอบเพื่อให้ได้ผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ทั้งนี้ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ก) ความดันอากาศภายในกระบอกเก็บอนุภาคก่อนการทดลองเท่ากับ 12.5 บาร์ เพื่อทำให้ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดเท่ากับความดันบรรยากาศ

ข) การเตรียมสารจุดชนวนระเบิดให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM E1226 ประกอบด้วยเซอโคเนียม 40% แบเรียมไนเตรด 30% และแบเรียมเปอร์ออกไซด์ 30% โดยน้ำหนัก ผสมเป็นเนื้อเดียวกันน้ำหนักรวม 2.4 กรัม ซึ่งให้ค่าแรงดันของการระเบิดเท่ากับ 16 พีเอสไอ (1.1 บาร์)

ค) เวลาหน่วงก่อนเปิดวาล์วทรงกระบอกเท่ากับ 40 มิลลิวินาทีตามมาตรฐาน

ง) ช่วงเวลาของการเปิดวาล์วทรงกระบอกเท่ากับ 10 มิลลิวินาที

จ) เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิดที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิวินาที

6.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$

ในการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบที่ปรับเทียบแล้วพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงค่า P_{max} มีค่ามากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้มากขึ้น และในทำนองเดียวกันเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงค่า $(dP/dt)_{max}$ มีค่ามากขึ้นเนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของหมอกฝุ่นเท่ากัน

เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงอากาศ (ออกซิเจน) จะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้น ความดันรวมของระบบเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

6.3 การเปรียบเทียบค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน

เนื่องจากการทดสอบอนุภาคมาตรฐานไลโคโพเดียม และนิโคตินิกแอซิก ให้ค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ใกล้เคียงกับที่อ้างอิงไว้ตามมาตรฐาน ASTM E1226 และรายงานที่นักวิจัยอื่นได้รายงานไว้ จึงเป็นการยืนยันว่าเครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่พัฒนาขึ้นนี้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ หลังจากผ่านการปรับปรุงและสอบเทียบข้างต้นแล้ว

6.4 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่า P_{max} และ $(dP/dt)_{max}$

จากการทดสอบพบว่า ค่า P_{max} มีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า P_{max} มีค่าลดลง และในทำนองเดียวกันค่า $(dP/dt)_{max}$ มีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า $(dP/dt)_{max}$ มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

6.5 แนวทางพื้นฐานในการป้องกันอันตรายของการระเบิดของอนุภาคของวัสดุประเภทฝุ่นผง

มาตรการป้องกันการระเบิดในเบื้องต้นเพื่อป้องกันการระเบิดของอนุภาคของวัสดุประเภทฝุ่นผง คือ การหลีกเลี่ยงการมีปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการระเบิดได้ โดยปัจจัยหลักๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ปัจจัย ได้แก่ 1) วัสดุอนุภาคซึ่งสามารถติดไฟได้ 2) เกิดการฟุ้งกระจายเป็นหมอกของวัสดุอนุภาค 3) มีออกซิเจน 4) มีแหล่งจุดระเบิด

6.6 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรดำเนินการทดสอบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันผลการทดสอบว่ามีความถูกต้องและเชื่อถือได้ต่อไป โดยในการนี้ควรดำเนินการดังต่อไปนี้

ก) ทำการวัดค่า P_{max} และค่า $(dP/dt)_{max}$ ของตัวอย่างวัสดุอนุภาคชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลมากขึ้น และรวบรวมเป็นฐานข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเองภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบกับผลิตภัณฑ์ในประเทศภายใต้สภาวะของท้องถิ่น

ข) ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของปริมาณความชื้น และความดันเริ่มต้นต่อค่า P_{max} และค่า $(dP/dt)_{max}$

ค) พัฒนาและสร้างชุดกระจายอนุภาคในรูปแบบอื่น อันได้แก่ Annular Nozzle เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด ค่า P_{max} และค่า $(dP/dt)_{max}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุลและคณะ. รายงานโครงการสิ่งประดิษฐ์เครื่องทดสอบขอบเขตการระเบิดของฝุ่นผง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ,2539 (ค.ศ.1996)

เสรี นันทิวัชรินทร์. อันตรายจากฝุ่นโรงงาน Dust Explosion. อุตสาหกรรมสาร ปีที่ 30 ฉบับที่ 1 (2530): 36-40.

ASTM Standards E 1226-00. Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts. Annual Book of ASTM Standards Vol. 14.02 (2000): 344-355.

Bartknecht, W. Dust explosion: course, prevention protection, 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

Brown, H.R., and Hanson, R.L. Venting of Dust Explosion. National Fire Protection Association Vol.26 (1933): 328-341

Cashdollar, K.L. Overview of dust explosibility characteristics. J.Loss.Prev.Process.Ind. Vol. 13 (2000): 183-199.

Cashdollar, K.L., and Hertzberg, M. 20 litre Explosibility Test Chamber for Dusts and Gases. Rew. Sci. Instruments Vol.56 (1985): 596-602.

Chi-Min Shu and Po-Jiun Wen. Investigation of flammability zone of o-xylene under various pressure and oxygen concentrations at 150° C. J.Loss.Prev.Process.Ind. Vol.15 (2002): 253-263.

Dahoe, A.E., Zevenbergen, J.F., Lemkowitz, S.M., and Scarlett, B. Dust explosion in spherical vessels: The role of flame thickness in the validity of the 'cube-root law'. J.Loss.Prev.Process.Ind. Vol.9 (1996): 33-44.

Eckhoff, R.K. Dust explosions in the process industries. 1st ed. London: Butterworth-Heinemann, 1991.

Glor, M. Electrostatic hazards in powder handling. Research Studies Press: John Wiley&sons, 1998.

Going, J.E., Chatrathi, K., and Cashdollar, K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m^3 vessels. J.Loss.Prev.Process.Ind, Vol.13 (2000): 209-219.

Lazaro, E.C., and Torrent, J.G. Experimental research on explosibility at high initial pressures of combustible dusts. J.Loss.Prev.Process.Ind. Vol. 13 (2000): 221-228.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mckenzie, C.J. Approved code of particle for the prevention, detection and control of fire and explosion in New Zealand dairy industry spray drying plant. Department of labour, Wellington, New Zealand: The occupational safety and health service, 1993.

Mercer, D.B., et al. The influence of injector design on the decay of pre-ignition turbulence in a spherical explosion chamber. J.Loss.Prev.Process.Ind. Vol.14 (2001): 269-282.

NFPA 68. Guide for venting of deflagrations. National Fire Protection Association. (1998): 1-56.

Radandt, S., Shi, J.Y., Vogl, A., Deng, X.F., and Zhong, S.J. Constarch explosion experiments and modeling in vessels ranged by height/diameter ratios. J.Loss.Prev.Process.Ind.. Vol.14 (2001): 495-502.

Schoeff, R.W. Case study of dust explosion at DeBruce Grain Co. Terminal elevator Haysville Kansas. 3 rd Worldwide seminar on the explosion phenomenon and on the application of explosion protection techniques in particle (1999): 248-267.

Siwek. R., and Cesana, C. Operating Instruments for the 20-L Apparatus. 3rd ed. Birsfelden, Switzerland: Adolf Kunher, A.G., August 1984.

Torrent J.G., Lazaro E.C. and Gonzalez O.P., Explosion Risk in a agricultural industry[online]. (n.d.). Available from: http://138.4.183.159[2003, December 19]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ เปลือกข้าวจากการสีข้าว (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)

วันที่ทำการทดลอง		ผู้ทดลอง	น.ส.ฉันทมณี
อุปกรณ์ในการทดลอง	เครื่องทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของฝุ่นผง จุฬาฯ 2		
ชื่อของผงวัสดุที่ทดสอบ	Sample dust 1		
ชนิดของผงวัสดุที่ทดสอบ	เปลือกข้าวที่ได้จากการสีข้าว		
ขนาดอนุภาค	ไม่ได้ทำการแยกขนาด		
การเตรียม	เก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้น เป็นเวลามากกว่า 1 วัน		
สภาวะการอบแห้ง	อบที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 3 ชั่วโมง		
อุณหภูมิในการทดลอง	31 °C		
Spark delay time	0.1 วินาที		
ความกว้างของช่องอากาศ	1 มิลลิเมตร		
ระยะห่างของอิเลคโทรด	4 มิลลิเมตร		
ความดันอากาศอัด	1 kg/cm^2 G		
กระดาษกรอง	1 แผ่น	ชนิด	วัตแมน เบอร์ 40
จำนวนครั้งที่นำมาเฉลี่ย	3		

ครั้งที่	น้ำหนักสารตัวอย่าง (กรัม)	ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (กรัม/ลบ.ม)	หมายเหตุ
1	0.1804	147.3	
2	0.1800	146.9	
3	0.1804	147.3	
เฉลี่ย		147.2	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ 2 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ ครีมเทียม C (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)

วันที่ทำการทดลอง		**ผู้ทดลอง**	น.ส.ฉันทมณี
อุปกรณ์ในการทดลอง	เครื่องทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของฝุ่นผง จุฬาฯ 2		
ชื่อของผงวัสดุที่ทดสอบ	Non-dairy cream (Coffee mate brand)		
ชนิดของผงวัสดุที่ทดสอบ	ครีมเทียมชนิดผง		
ขนาดอนุภาค	ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด		
การเตรียม	เก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้น เป็นเวลามากกว่า 1 วัน		
สภาวะการอบแห้ง	อบที่อุณหภูมิ 75 °C เวลา 3 ชั่วโมง		
อุณหภูมิในการทดลอง	28 °C		
Spark delay time	0.1 วินาที		
ความกว้างของช่องอากาศ	1 มิลลิเมตร		
ระยะห่างของอิเลคโทรด	4 มิลลิเมตร		
ความดันอากาศอัด	1 kg/cm^2 G		
กระดาษกรอง	1 แผ่น	ชนิด	วัตแมน เบอร์ 93
จำนวนครั้งที่นำมาเฉลี่ย	3		

ครั้งที่	น้ำหนักสารตัวอย่าง (กรัม)	ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (กรัม/ลบ.ม)	หมายเหตุ
1	120.1	98.4	
2	118.8	97.4	
3	119.2	97.7	
เฉลี่ย		97.8	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ 3 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของแป้งมันสำปะหลัง ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด

วันที่ทำการทดลอง		**ผู้ทดลอง**	น.ส.ฉันทมณี
อุปกรณ์ในการทดลอง	เครื่องทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของฝุ่นผง จุฬาฯ 2		
ชื่อของผงวัสดุที่ทดสอบ	Cassava flour (dragon fish brand)		
ชนิดของผงวัสดุที่ทดสอบ	อนุภาคจากการเกษตร		
ขนาดอนุภาค	ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด		
การเตรียม	เก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้น เป็นเวลามากกว่า 1 วัน		
สภาวะการอบแห้ง	อบที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 3 ชั่วโมง		
อุณหภูมิในการทดลอง	28 °C		
Spark delay time	0.1 วินาที		
ความกว้างของช่องอากาศ	1 มิลลิเมตร		
ระยะห่างของอิเลคโทรด	4 มิลลิเมตร		
ความดันอากาศอัด	1 kg/cm^2 G		
กระดาษกรอง	1 แผ่น	**ชนิด**	วัตแมน เบอร์ 93
จำนวนครั้งที่นำมาเฉลี่ย	3		

ครั้งที่	**น้ำหนักสารตัวอย่าง (กรัม)**	**ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (กรัม/ลบ.ม)**	**หมายเหตุ**
1	0.2090	170.2	
2	0.2016	164.2	
3	0.1965	160.1	
เฉลี่ย		**164.8**	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย