



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์  
เรื่อง

การพัฒนาเครื่องวัดสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค  
Development of Explosibility Measuring Apparatus for Particulate

โดย  
ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน  
ประจำปีงบประมาณ 2546



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## เรื่อง

การพัฒนาเครื่องวัดสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค

Development of Explosibility Measuring Apparatus for Particulate

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน

ประจำปีงบประมาณ 2546



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การวัดค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด ( $P_{MAX}$ ) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน  $(dP/dt)_{MAX}$  ของวัสดุอนุภาคมาตรฐาน และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่มีต่อค่า  $P_{MAX}$  และ  $(dP/dt)_{MAX}$  การทดสอบเบื้องต้นพบว่าเวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิดที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิวินาที จากการทดสอบซึ่งอ้างอิงโดยใช้อุณหภูมิมาตรฐาน 2 ชนิด (lycopodium และ nicotinic acid) พบว่าค่า  $P_{MAX}$  และ  $(dP/dt)_{MAX}$  ที่ได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับที่มีตีพิมพ์ในต่างประเทศ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องต้นแบบสำหรับทดสอบสมบัติการระเบิดวัสดุอนุภาคที่สร้างขึ้นนี้ให้ค่าน่าเชื่อถือเพียงพอในการวัดต่อไป ภายหลังจากการปรับแต่งและสอบเทียบด้วยอนุภาคมาตรฐาน นอกจากนี้การทดลองหลังจากปรับค่าที่เหมาะสมชี้ให้เห็นว่าค่า  $P_{MAX}$  และ  $(dP/dt)_{MAX}$  จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของหมอกฝุ่นที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นค่าหนึ่งจากนั้นก็มีค่าลดลง สำหรับอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่าค่า  $P_{MAX}$  และ  $(dP/dt)_{MAX}$  มีค่ามากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง

ประเด็นความปลอดภัยในภาคอุตสาหกรรมเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจ นับตั้งแต่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุอนุภาคนั้นเป็นที่ยอมรับว่าเป็นจุดกำเนิดของหายนะภัยเนื่องจากการระเบิด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังคงมีข้อมูลของการศึกษาการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่ถูกเปิดเผยต่อสาธารณะเพียงจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนารวมทั้งประเทศไทย เนื่องจากการขาดแคลนอุปกรณ์ทดสอบการระเบิดมาตรฐานซึ่งมีราคาแพง

## Abstract

The Objectives of this research are 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. The investigation showed the optimum delay times in ignition should be 20 millisecond. The investigations based on two types of standard particle (lycopodium and nicotinic acid) could reveal  $P_{MAX}$  and  $(dP/dt)_{MAX}$  values obtained in this research is close to the published data. Therefore it could be concluded that the prototype dust explosibility tester developed by the research team 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 reach 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.

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, in particular, in many developing countries including Thailand became of shortage of standard explosibility testing equipment which to very expensive.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยความร่วมมือระหว่างภาครัฐ-เอกชน (งบประมาณแผ่นดิน) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้ดำเนินการในศูนย์เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อการพัฒนาเครื่องวัดคุณสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค โครงการนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ หากปราศจากความร่วมมือของบริษัทอุตสาหกรรมแปงไทย จำกัด ดังนั้นในนามของคณะวิจัย จึงขอแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

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

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 มุลเหตุจูงใจของการทำงานพัฒนา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัยพัฒนา	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	3
2 ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานพัฒนา	5
2.1 นิยามของการระเบิด	5
2.2 นิยามของการระเบิดของวัสดุอนุภาค	5
2.2.1 วัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาค	6
2.2.2 ขอบเขตการระเบิดได้ของวัสดุอนุภาค	7
2.2.3 แหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาค	8
2.3 นิยามของฝุ่นผง	12
2.4 การทดสอบความไวต่อการจุดชนวนของอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ	12
2.4.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosible Dust Concentration, MEC)	13
2.4.2 อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Temperature, MIT)	13
2.4.3 พลังงานต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Energy, MIE)	13
2.4.4 ขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจน (Limiting Oxygen Concentration, LOC)	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การทดสอบความรุนแรงของการระเบิดอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ	15
2.5.1 ความดันสูงสุดของการระเบิด (Maximum Explosion Pressure, $P_{max}$ )	15
2.5.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure rise, $(dP/dt)_{max}$ )	17
2.5.3 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร	17
2.5.4 นิยามค่าความดันและการปรับแก้ค่าความดันจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร	20
2.5.5 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร	23
2.6 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความดันการระเบิดของวัสดุอนุภาค	25
2.6.1 ผลของขนาดอนุภาค	25
2.6.2 ผลของความชื้น	26
2.6.3 ผลของอุณหภูมิ	27
2.6.4 ผลของความดันเริ่มต้น	27
2.6.5 ผลของความปั่นป่วน	30
2.6.6 พลังงานของการจุดระเบิด	32
2.7 การกำหนดขนาดช่องระบายแรงดันจากการระเบิดในกระบวนการอุตสาหกรรม	33
2.7.1 ช่องระบายแรงดันจากการระเบิด	33
2.7.2 ท่อดับเปลวไฟจากการระเบิด	34
2.8 งานวิจัยและผลการศึกษาอื่นที่เกี่ยวข้อง	34
2.9 ผลงานวิจัยในอดีต	37
3 การพัฒนาสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	39
3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค	39
3.1.1 ส่วนห้องจุดระเบิด	39
3.1.2 ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค	46
3.2 ชุดวัดแรงดันจากการระเบิด	50
3.2.1 หัววัดแรงดัน	50
3.2.2 ตัวแปลงค่าประจุลอมบ์เป็นสัญญาณอะนาล็อก (Transmitter)	50
3.2.3 สายสัญญาณ	50



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 ชุดกรองสัญญาณรบกวน (Signal isolator)	50
4 วิธีทดลอง	51
4.1 สภาพะในการทดสอบ	51
4.1.1 บรรยากาศขณะทำการทดลอง	51
4.1.2 การตรวจสอบอุปกรณ์	51
4.2 การเตรียมก่อนการทดสอบ	51
4.3 การทดสอบขั้นต้น	53
4.3.1 การทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสม	54
4.3.2 การทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียว	54
4.4 การวัดค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, $P_{max}$ ) และอัตราการสูงสุดของการเพิ่มความดัน (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$ )	54
4.4.1 การทดลองหาแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum explosion overpressure, $P_{ex}$ )	55
4.4.2 การทดลองหาอัตราของการเพิ่มความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Rate of Pressure Rise with Time, $dP/dt$ )	55
4.4.3 การทดลองหาแรงดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Explosion Pressure, $P_{max}$ )	56
4.4.4 การทดลองหาอัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค (Maximum Rate of Pressure Rise, $(dP/dt)_{max}$ ) และ $K_{St,max}$	57
4.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความดันสูงสุดจากการระเบิด ( $P_{max}$ ) และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน $(dP/dt)_{max}$	57
4.5.1 อิทธิพลของเวลาหน่วงของการจุดชนวนระเบิด (Ignition delay time; $t_v$ )	57
4.5.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาค	58
4.5.3 การเปรียบเทียบค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากการทดลองกับค่ามาตรฐาน	59
4.6 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของข้อมูลการทดลอง	59
4.6.1 ความดันสูงสุดจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค ( $P_{max}$ )	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.2 อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิดวัสดุอนุภาค ( $(dP/dt)_{max}$ ) และ $K_{St}$	59
4.7 การตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง	59
5 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	60
5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ	60
5.1.1 ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด	60
5.1.2 ความดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนระเบิด	62
5.1.3 เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิด ( $t_v$ )	63
5.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$	64
5.2.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $P_{max}$	65
5.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $(dP/dt)_{max}$	65
5.3 การเปรียบเทียบค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน	66
5.3.1 อนุภาคมาตรฐานไลโคโทเดียม	66
5.3.2 อนุภาคมาตรฐานนิโคตินิกแอซิก	67
5.4 ผลของความเข้มข้นต่อค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$	69
5.4.1 ผลของความเข้มข้นต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด	69
5.4.2 ผลของความเข้มข้นต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน	69
5.5 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง	69
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
6.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ	71
6.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$	71
6.3 การเปรียบเทียบค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$ กับค่ามาตรฐาน	72
6.4 ผลของความเข้มข้นต่อค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$	72
6.5 แนวทางพื้นฐานในการป้องกันอันตรายของการระเบิดของอนุภาคของวัสดุ ประเภทฝุ่นผง	72
6.6 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	75

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 Hazard Class of Dust Deflagration ค่าในตารางเป็นค่าโดยประมาณ เมื่อทดสอบในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ตามมาตรฐาน ATM E1226	4
ตารางที่ 2.1 แหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)	36
ตารางที่ 2.2 บริเวณที่เกิดการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา (1988-1997)	36
ตารางที่ 4.1 ค่าความเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้ของ $dP/dt$ และ $K_{St}$	59
ตารางที่ 5.1 การวัดค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดก่อนการสปาร์คของขั้วอิเล็กโทรด	61
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$ ของไลโคโปเดียมจากการทดลอง กับค่ามาตรฐาน	67
ตารางที่ 5.3 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	70
ตารางภาคผนวก	
ตารางภาคผนวกที่ 1 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ เปลือกข้าวจากการสีข้าว (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	76
ตารางภาคผนวกที่ 2 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ ครีมเทียม C (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	77
ตารางภาคผนวกที่ 3 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของแป้งมันสำปะหลัง (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)	78

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะอัตราการเผาไหม้ของของแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อของแข็งนั้นมีขนาดเล็กกลง	6
รูปที่ 2.2 ช่วงความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดในอากาศที่สามารถเกิดการระเบิดได้	8
รูปที่ 2.3 smouldering nest ของอนุภาคในไซโลอาจทำให้เกิดการระเบิดได้เมื่อถูกพาไปในหมอกฝุ่นที่สามารถระเบิดได้	9
รูปที่ 2.4 อนุภาคที่กองอยู่ภายในท่อสามารถลุกไหม้ได้จากความร้อนของผนังท่อจากภายนอก	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะการสปาร์คเมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหลกะทันหันและ ณ จุดนั้นเกิดการแยกตัวด้วยความเร็วสูง	11
รูปที่ 2.6 วงจรของการจุดชนวน 3 แบบเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวน	14
รูปที่ 2.7 ผลการทดลองค่าความดันจากการระเบิดอนุภาคที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง	16
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเข้มข้นค่าต่างๆ ของวัสดุอนุภาค	16
รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตรพัฒนาโดย Siwek	18
รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบใหม่ rebound nozzle สำหรับกระจายอนุภาคภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร	19
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{max}$ และ $(dP/dt)_{max}$ ที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบ 1 m <sup>3</sup> ISO vessel และ 20 litre Siwek sphere	20
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการระเบิด ( $P_{ex}$ ) และ เวลาของการระเบิดวัสดุอนุภาคภายในเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร	21
รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐาน ISO	23
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ประกอบด้วยฝาครึ่งวงกลมประกบติดกันและสามารถถอดออกจากกันได้	24
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class)	25
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class)	26

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของหมอกฝุ่นกับความดันสูงสุดจากการระเบิด	27
รูปที่ 2.18 ข้อมูลการทดลองของ Wiemann (1987) ค่าความดันจากการระเบิดด้านหินสีน้ำตาลที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ทดสอบในเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ที่ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ	28
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะปริมาตรคงที่กับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Bartknecht 1978, Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987	29
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของอัตราสูงสุดของการเพิ่มขึ้นจากการระเบิดอนุภาคโพลีเมอร์และด้านหินสีน้ำตาลในภาชนะทดสอบปริมาตรคงที่ 1 ลบ.ม. และ 20 ลิตรกับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987	29
รูปที่ 2.21 อิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่ออัตราการระเบิดของหมอกฝุ่นไลโคโพเดียมเข้มข้น 420 กรัม/ลบ.ม. ในเครื่องสอบปริมาตร 1.2 ลิตร (Hartmann bomb)	31
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน	32
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน	33
รูปที่ 2.24 เหตุการณ์ระเบิดของอนุภาคในเมือง Blaye (1997)	35
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร	39
รูปที่ 3.2 ห้องจุดระเบิดทรงกลมปริมาตร 20 ลิตร ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)	40
รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าพร้อมฝาปิดของห้องจุดระเบิด	41
รูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด	42
รูปที่ 3.5 ปลายขั้วอิเล็กโทรดลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลม	43
รูปที่ 3.6 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด	44
รูปที่ 3.7 หน้าแปลนติดตั้งชุดหัววัดแรงดันจากการจุดระเบิดที่ผนังของห้องจุดระเบิด	44
รูปที่ 3.8 ฐานและแท่นรองรับเครื่องทดสอบ	45
รูปที่ 3.9 โซลินอยวาล์วจ่ายลมอัดให้วาล์วทรงกระบอก	46
รูปที่ 3.10 วาล์วทรงกระบอกสำหรับถ่ายเทอนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ห้องจุดระเบิด	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 แผ่นกระจายอนุภาค	49
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายห้องจุกระเบิดขนาด 20 ลิตร พร้อมฐานและอุปกรณ์ต่อพ่วง	49
รูปที่ 4.1 การใส่สารจุกชนวนระเบิดที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด	53
รูปที่ 4.2 เครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุกฟ้า	54
รูปที่ 4.3 กราฟผลการทดลองแสดงความดันจากการระเบิด ( $P_{\text{max}}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อแสดงค่าตัวแปรของการทดลองและตัวแปรของผลการทดลอง	55
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาของสารชนวนจุกระเบิดและวัสดุอนุภาค	54
รูปที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าความดันจากการระเบิดของไลโคโพเดียม เทียบกับกราฟมาตรฐาน	62
รูปที่ 5.2 ผลของ $t_v$ ต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด	63
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อ $t_v$ เท่ากับ 20 มิลลิวินาที	64
รูปที่ 5.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด	65
รูปที่ 5.5 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน	66
รูปที่ 5.6 ค่า $P_{\text{max}}$ ของนิโคตินิกแอซิกจากการทดลอง	68
รูปที่ 5.7 ค่า $(dP/dt)_{\text{max}}$ ของนิโคตินิกแอซิกจากการทดลอง	68

# บทที่ 1

## บทนำ

การระเบิดของวัสดุอนุภาคนับเป็นอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นได้ในโรงงานที่มีการใช้งานวัตถุติดไฟ และ/หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคหรือผง อาทิเช่น อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี สี ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงเลื่อยและผลิตภัณฑ์ไม้ เกษษ โลหะบางพารา พลาสติก รวมทั้งเหมืองถ่านหิน จากสถิติของประเทศอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อังกฤษ ปรากฏว่าทุกปีจะมีอุบัติเหตุวัสดุอนุภากระเบิดเกิดขึ้น 30-50 ราย ในปัจจุบันนับวันอุบัติเหตุประเภทนี้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมนุษย์กำลังคิดค้นประดิษฐ์สังเคราะห์สารต่างๆ ที่อยู่ในรูปของอนุภาคหรือผงนาาชนิดให้มากขึ้นตามความเจริญทางเทคโนโลยี และตามวัตถุประสงค์การนำมาใช้ประโยชน์

สำหรับในประเทศไทย แม้จะยังไม่มีการเก็บรวบรวมสถิติจากอุบัติเหตุวัสดุอนุภากระเบิดที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ แต่การเรียนรู้ทราบสาเหตุ และวิธีป้องกันแก้ไขไว้จะเป็นประโยชน์ไม่แพ้ทางโรงงานอุตสาหกรรมต้องเสี่ยงกับความสูญเสียทางด้านชีวิตทรัพย์สิน เนื่องจากสาเหตุของการระเบิดวัสดุอนุภาคเริ่มขึ้นจากการสันดาปของเม็ดวัสดุอนุภาค ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถเป็นเชื้อเพลิงได้ในตัว ในสถานที่ที่มีออกซิเจน และแหล่งจุดระเบิด (ignition source) ที่มีพลังงานสูงพอเพียง วัสดุอนุภาคที่เกิดการสันดาป (และไหม้ลุกลามต่อไป) จะต้องเป็นวัสดุอนุภาคที่มีน้ำหนักเบา ลอยตัวอยู่ในอากาศเป็นระยะเวลาพอสมควร มีขนาดพอควร และมีปริมาณอยู่มากพอ การเกิดสันดาปให้ก๊าซร้อนเพิ่มความกดดันภายในบริเวณตัวอาคาร พร้อมกับปริมาณวัสดุอนุภาคที่ทวีจากการลุกไหม้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากวัสดุอนุภาคที่ขังสะสมจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศยิ่งมาก จะฟุ้งกระจายขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการระเบิด และถ้ายังไม่หยุดก็จะลุกลามต่อไปจนทั่วทั้งโรงงาน หรือบริเวณข้างเคียงติดต่อกัน

### 1.1 มุมเหตุจูงใจของการทำงานพัฒนา

แม้ว่าในประเทศไทย จะยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับสถิติการระเบิดของวัสดุอนุภาคอย่างเป็นระบบ แต่ก็ได้ทราบจากแหล่งต่างๆ และจากบุคคลที่ทำงานในวงการอุตสาหกรรมบ้าง ว่ามีอุบัติเหตุประเภทนี้เกิดขึ้นไม่น้อย ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2545 บริษัท แป้งมันราชสีมา จำกัด ได้เกิดอุบัติเหตุเนื่องจากการระเบิดของแป้งมันที่ขนถ่ายในท่อ มีผู้เสียชีวิต 1 ราย และบาดเจ็บ 6 ราย ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง คือ ผู้ปฏิบัติงานจำนวนไม่น้อยในโรงงานอุตสาหกรรมของไทยไม่ทราบว่าวัสดุอนุภาคที่มีอยู่ในโรงงานของตนเองนั้นสามารถระเบิดได้ในเงื่อนไขที่เหมาะสม

ดังนั้นวิธีการป้องกันอันตรายจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคมีหลายวิธี คือ การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระเบิด (explosion suppression techniques) เป็นเครื่องมือรับรู้ความดัน เมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้นเรื่อยๆ จนความกดดันของบรรยากาศในห้องขึ้นสูงกว่าค่าหนึ่ง (0.02 บาร์) อุปกรณ์จะฉีดพ่นน้ำยาดับเพลิงออกมาโดยอัตโนมัติ เหมาะกับวัสดุอนุภาคที่เป็นพิษ ราคาแพง การติดตั้งผนังนิรภัยที่ต้านทานแรงดันได้อ่อนเอาไว้เมื่อเกิดระเบิดขึ้น แรงระเบิดจะกระแทกให้ผนังนิรภัยหลุดออก เป็นการผ่อนคลายนแรงกดดัน และการออกแบบเครื่องมือให้ทนต่อแรงระเบิดได้สูง ความดันจากการระเบิดอาจสูงได้ถึง 8-10 บาร์ ซึ่งมากพอที่จะทำให้อาคารพังทลายลงมาได้ วิธีป้องกันดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบถึงค่าความดันสูงสุดที่เกิดจากการระเบิด และอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ซึ่งมีอ้างอิงน้อยมากในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้ทำให้มีความต้องการในการจัดหาเครื่องมือเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติการระเบิดดังกล่าวของวัสดุอนุภาค แต่ทั้งนี้ยังมีปัญหาคือเรื่องราคาของเครื่องมือทดสอบดังกล่าวจะมีราคาแพงมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการจัดทำเครื่องมือทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่สามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานสากล แต่มีต้นทุนต่ำกว่าเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งจะเป็นการสนองนโยบายของภาครัฐในการใช้องค์ความรู้ที่มีอยู่แล้วมาทดแทนการนำเข้า

## 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะการพัฒนา และสร้างเครื่องวัดสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค เพื่อทดสอบหาค่าความดันสูงสุดของการระเบิด และอัตราการเพิ่มของความดันของการระเบิด ซึ่งสอดคล้องและสามารถใช้อ้างอิงตามมาตรฐานสากล และใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาและเก็บรวบรวมค่าคุณสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาค แต่จะมีจุดเด่นที่สำคัญคือมีต้นทุนถูกกว่าการนำเข้าเครื่องมือลักษณะใกล้เคียงกันจากต่างประเทศ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการงานวิจัยพัฒนา

- 1) พัฒนา และสร้างเครื่องวัดสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร โดยในที่นี้จะยึดตามมาตรฐานสากล ASTM E1226
- 2) ทดสอบ และปรับปรุงการทำงานของเครื่องทดสอบจนได้ประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับ โดยใช้วัสดุอนุภาคมาตรฐาน เช่น โลโคโพเดียม เป็นต้น และทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อให้ได้ค่าสมบัติการระเบิดของอนุภาคดังกล่าวตามที่มาตรฐานกำหนด
- 3) ทดสอบหาค่าความดันสูงสุดของการระเบิด และอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันของการระเบิดวัสดุอนุภาคมาตรฐาน เปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับสมบัติอื่นๆ ของวัสดุ เช่น ค่าการกระจายขนาด ขนาดเฉลี่ย เป็นต้น



#### 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

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

1) ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosion Concentration, MEC) คือค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นซึ่งถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ ฝุ่นจะไม่ระเบิด มีหน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เมตร คำนี้ออกความยากง่ายในการจุดระเบิด

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

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

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 วัสดุอนุภาคที่เกิดปฏิกิริยารุนแรงอาจจะจุดระเบิดได้ยาก 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 ATME1226

Hazard Class	$K_{st}$ (bar.m/sec)	$P_{max}$ (bar)
St-1	$\leq 200$	$\leq 10$
St-2	201–300	$\leq 10$
St-3	$> 300$	12

## บทที่ 2

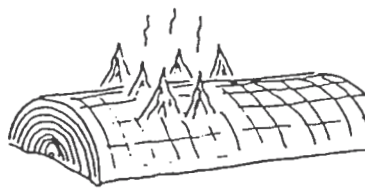
### ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานพัฒนา

#### 2.1 นิยามของการระเบิด

นิยามของการระเบิดนั้น มี Encyclopedia หลายเล่มได้ให้นิยามไว้หลายอย่างแตกต่างกัน แต่โดยหลักๆ สามารถแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ โดยนิยามแรก เน้นที่การเกิดเสียงดัง เนื่องมาจากความแรงของคลื่นความดันหรือคลื่นการระเบิดที่เกิดขึ้นมาทันทีทันใด และจากคลื่นความดันที่เกิดจากพลังงานเคมีหรือพลังงานกล ซึ่งนิยามของการระเบิดนี้เป็นไปตามความหมายของคำโดยพื้นฐานทั่วไป ส่วนนิยามที่สอง จะจำกัดขอบเขตของการระเบิดในการเกิดพลังงานทางเคมีขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งรวมไปถึงการระเบิดของก๊าซ ฝุ่น และวัตถุระเบิดที่เป็นของแข็ง ซึ่งความสำคัญจะอยู่ที่พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมาและอีกนิยามที่สามารถสรุปได้คือ การระเบิดคือ กระบวนการคายความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาตรคงที่ และเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันอย่างทันทีทันใด อย่างเห็นได้ชัด

#### 2.2 นิยามของการระเบิดของวัสดุอนุภาค

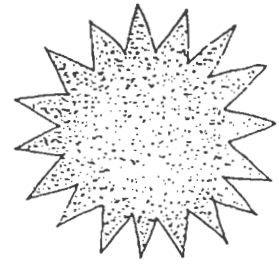
ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “การระเบิดของวัสดุอนุภาค” เป็นสิ่งที่จะเห็นได้จากประสบการณ์ในชีวิตประจำวัน วัตถุของแข็งทุกชนิดที่สามารถลุกไหม้ในอากาศได้จะเกิดการระเบิดที่รุนแรงได้เมื่อวัสดุอนุภาคนั้นมีขนาดเล็ก (มีพื้นที่ผิวมากขึ้น) ดังรูปที่ 2.1(a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของชิ้นไม้ที่ลุกไหม้อย่างช้าๆ ด้วยความร้อนของตัวเองในระยะเวลาหนึ่ง และเมื่อตัดให้เป็นชิ้นเล็กดังแสดงในรูปที่ 2.1(b) อัตราการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไม้กับอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นการลุกไหม้ของไม้ก็จะง่ายขึ้น และถ้าย่อยขนาดให้มีขนาดเล็กลงไปอย่างต่อเนื่องให้กลายเป็นวัสดุอนุภาคขนาดเล็กๆ จนถึงขนาด 0.1 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่า อนุภาคนี้อาจจะแขวนลอยอยู่ในอากาศและมีที่ว่างหรือปริมาตรอากาศที่สัมผัสกับพื้นที่ผิวของเม็ดวัสดุอนุภาคอย่างเพียงพอ เพื่อให้แต่ละอนุภาคเกิดการเผาไหม้ที่ไม่มีขีดจำกัด ทำให้อัตราการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก แต่พลังงานที่ต้องการเพื่อการลุกไหม้น้อยมาก อาทิเช่นการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นซึ่งเป็นการระเบิดของฝุ่นผง ดังรูป 2.1(c)



(a) Slow combustion



(b) Fast combustion



(c) Explosion

### รูปที่ 2.1 ลักษณะอัตราการเผาไหม้ของของแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อของแข็งนั้นมีขนาดเล็กลง

โดยทั่วไปหมอกฝุ่นง่ายต่อการลุกไหม้และการเผาไหม้จะรุนแรงขึ้นถ้าขนาดเม็ดวัสดุเล็กลงจนถึงระดับขนาดอนุภาคและยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอนุภาคซึ่งเกิดขึ้นในอุปกรณ์ของกระบวนการหรือภายในห้องปฏิบัติการ ความดันรอบๆ ในบริเวณที่เกิดการระเบิดบางส่วนหรือทั้งหมดอาจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องจักรในกระบวนการหรือสิ่งก่อสร้างอาจระเบิด ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียชีวิต พิกัด และสูญเสียชีวิตทรัพย์สิน สรุปลงข้อเท็จจริงที่จำเป็นสำหรับการระเบิดของวัสดุอนุภาค คือ

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

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การระเบิดของวัสดุอนุภาคส่วนใหญ่ จะเกิดกับกรณีของวัสดุอนุภาคประเภทที่เป็นฝุ่นผง ซึ่งมักจะมีการฟุ้งกระจายได้ง่าย และมีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่

#### 2.2.1 วัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดวัสดุอนุภาคได้

การระเบิดของวัสดุอนุภาคโดยทั่วไปจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจากปฏิกิริยาการเผาไหม้



ในบางกรณีวัสดุอนุภาคโลหะยังเกิดปฏิกิริยาข้างต้นกับก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ส่วนมากมักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจน และเกิดความร้อนขึ้นในการระเบิดวัสดุอนุภาค นั้นหมายความว่าวัสดุที่ยังไม่เป็นสารประกอบออกไซด์ที่เสถียรเท่านั้นจึง

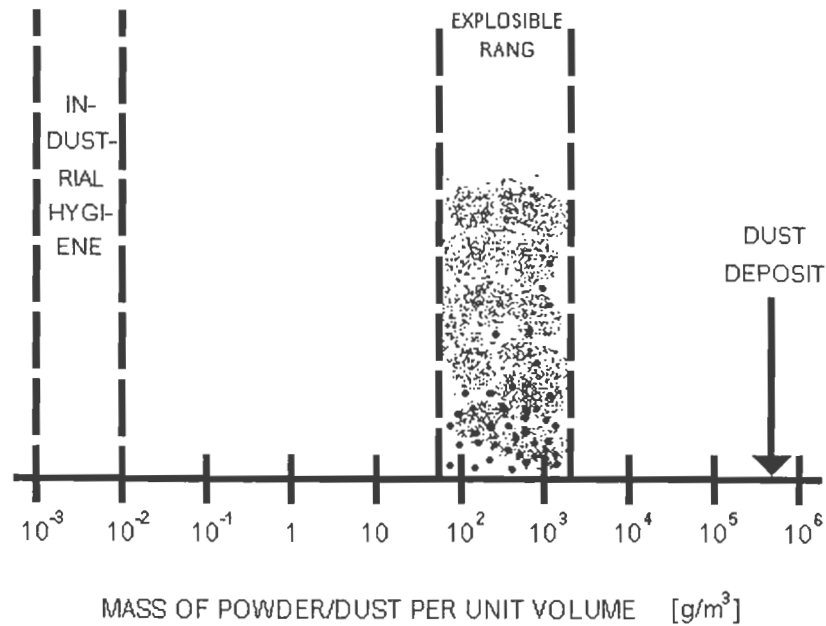
จะสามารถเกิดการระเบิดของวัสดุอนุภาคได้ แต่สารประกอบที่ไม่เป็นสารประกอบออกไซด์บางตัว เช่น สารประกอบซิลิเกต ซัลเฟต ไนเตรต คาร์บอเนต และฟอสเฟต รวมถึงหมอกฝุ่นของ ปอร์แลนด์ซีเมนต์ ทราบ หินปูน ฯลฯ ก็ไม่สามารถเกิดการระเบิดได้ ดังนั้นวัสดุที่สามารถเกิดการระเบิดของวัสดุอนุภาค ได้แก่

- 1) วัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ เช่น เมล็ดพืช ถินิน น้ำตาล ฯลฯ
- 2) วัสดุอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก สีย้อมอินทรีย์ ยางฆ่าแมลง ฯลฯ
- 3) ถ่านหิน และถ่านหินร่วน
- 4) โลหะ เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม สังกะสี เหล็ก ฯลฯ

ความร้อนจากการเผาไหม้วัสดุจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เนื่องจากสามารถกำหนดหาปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยจากการระเบิด และเมื่อต้องการเปรียบเทียบระดับความอันตรายของวัสดุหลายๆ ชนิด ค่าความร้อนจากการเผาไหม้จึงเป็นประโยชน์ในการหาความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปเนื่องจากถ้าทราบปริมาณก๊าซที่แน่นอนของหมอกฝุ่น ก็จะทราบปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ไปทำให้หาปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยในการระเบิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของหมอกฝุ่น

#### 2.2.2 ขอบเขตการระเบิดได้ของวัสดุอนุภาค

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



รูปที่ 2.2 ช่วงความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดในอากาศ  
ที่สามารถเกิดการระเบิดได้ (Eckhoff, 1991:8)

ขอบเขตความสามารถในการระเบิดได้ของอนุภาคต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน เช่น จากรูป 2.2 แป้งข้าวโพดมีความเข้มข้นต่ำสุดของการระเบิดเท่ากับ 80 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่อนุภาคสังกะสีมีค่า 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ความเข้มข้นต่ำสุดของการระเบิดหมอกฝุ่นมักมีความหนาแน่นสูงในการผ่านแสง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศภายในโรงงานที่ถูกสุขลักษณะจะมีความหนาแน่นหรือความเข้มข้นน้อยกว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถระเบิดได้อยู่มาก ซึ่งมักเข้าใจกันผิดว่าการระเบิดของอนุภาคในโรงงานเกิดจากอนุภาคทั่วไปในโรงงานซึ่งจริงๆ มีความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้นของอนุภาคที่สามารถเกิดการระเบิดได้อยู่มาก ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้สัมพันธ์กับความหนาแน่นในการผ่านแสง

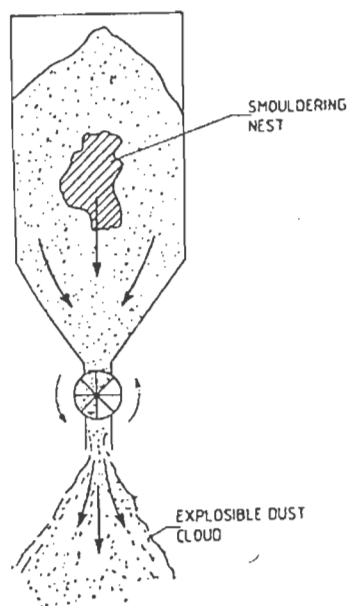
### 2.2.3 แหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาค

การลุกไหม้ของหมอกฝุ่นจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะมีการลุกติดไฟจากแหล่งพลังงานความร้อนที่สูงพอ ส่วนมากแหล่งพลังงานของการระเบิดวัสดุอนุภาคมีดังนี้

#### 2.2.3.1 อนุภาคที่ระอุด้วยความร้อน

อนุภาคที่ถูกเผาไหม้แล้วเมื่อมากองรวมกันก็อาจเกิดการเผาไหม้ภายในอีกครั้ง เนื่องจาก โครงสร้างของช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ทับถมกันอยู่ยังมีออกซิเจนที่จะทำให้

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิปานกลางภายในกองอนุภาค ปฏิกิริยาจะเกิดไปนานเท่าที่ยังมีออกซิเจนอยู่ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็ยิ่งสูงขึ้น และเมื่อเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างก๊าซร้อนจากการเผาไหม้และอากาศบริสุทธิ์อาจทำให้เกิดแรงในการพาออกซิเจนบริสุทธิ์เข้ามาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย กองอนุภาคที่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังกล่าวมักถูกเรียกว่า “smouldering nest” ซึ่งสามารถทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาคได้ง่ายมากถ้าถูกพาไปสัมผัสกับหมอกฝุ่นที่สามารถเกิดการระเบิดได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 smouldering nest ของอนุภาคในไซโลอาจทำให้เกิดการระเบิดได้  
เมื่อถูกพาไปในหมอกฝุ่นที่สามารถระเบิดได้

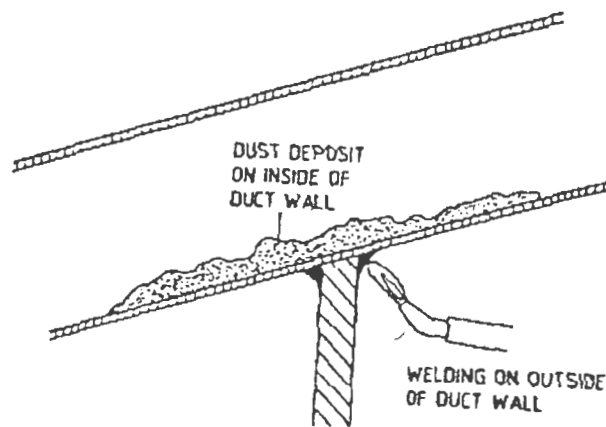
### 2.2.3.2 เปลวไฟ

เปลวไฟหรือประกายไฟจากการเชื่อมหรือจากหัวก๊าซตัดเหล็กเป็นแหล่งความร้อนที่ทำให้เริ่มเกิดการระเบิดของหมอกฝุ่นได้อย่างมากเพราะเมื่อหมอกฝุ่นติดไฟแล้วสามารถลุกไหม้ต่อได้ด้วยตัวเอง โดยเฉพาะหัวก๊าซตัดเหล็กจะมีอันตรายมากเนื่องจากนอกจากมีเปลวไฟแล้วยังมีก๊าซออกซิเจนที่มากเกินพอกออกมาในบริเวณที่ทำงานอีกด้วย และหากในบริเวณดังกล่าวมีอนุภาคที่ลุกไหม้ได้กระจายอยู่ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินพอ (เกิดปฏิกิริยาได้คึกซึ้ง) ทำให้ทั้งสมบัติความว่องไวและความรุนแรงของการระเบิดเพิ่มสูงขึ้นกว่าในกรณีที่มีอากาศเพียงอย่างเดียว ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังอย่างมากในการทำงานที่มีเปลวไฟในบริเวณที่มีอนุภาค รวมทั้งควรห้ามสูบบุหรี่ในบริเวณที่มีอนุภาคที่ลุกไหม้ได้เนื่องจากการจุดไม้ขีด

ไฟหนึ่งก้านทำให้เกิดพลังงานความร้อน 100 จูลต่อวินาที ซึ่งมากพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาคหลายๆ ชนิด

### 2.2.3.3 พื้นผิวร้อน

ในบางกรณีหากกองหรือชั้นของอนุภาคอยู่บนพื้นผิวที่ร้อนพออาจทำให้เกิดการลุกไหม้ของอนุภาคเองได้ เช่นที่ผนังของเครื่องอบแห้ง ฮีตเตอร์ หลอดไฟ ฯลฯ หรือตัวอย่างดังรูปที่ 2.4 วิธีการป้องกันคือหุ้มฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าหากชั้นของอนุภาคมีความหนามากขึ้น อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นผิวที่ทำให้อนุภาคเกิดการลุกไหม้ยิ่งต่ำลง(ลุกไหม้ได้ง่ายขึ้น) แต่หากเป็นหมอกฝุ่นอุณหภูมิต่ำสุดของพื้นผิวที่ทำให้อนุภาคเกิดการลุกไหม้จะสูงกว่ามาก (เช่นหมอกฝุ่นของสารอินทรีย์ เท่ากับ 400-500 °C) เมื่อเทียบกับกรณีที่อนุภาคกองรวมกัน



รูปที่ 2.4 อนุภาคที่กองอยู่ในท่อสามารถลุกไหม้ได้จากความร้อนของผนังท่อจากภายนอก

### 2.2.3.4 ความร้อนจากการกระทบกันของเครื่องจักร

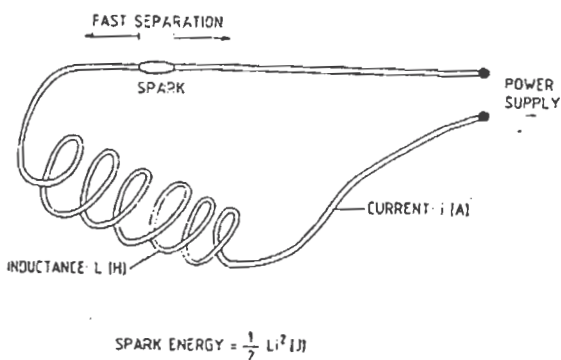
บทความต่างๆ ที่เกี่ยวกับการระเบิดของอนุภาคมักสับสนเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของการลุกไหม้หมอกฝุ่นจากการกระทบกันของเครื่องจักรว่ามีความหมายเดียวกับ การขัดสีกันระหว่างวัสดุ ซึ่งในความเป็นจริงความหมายของทั้งสองคำมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ การขัดสีจะต้องใช้เวลานานในการเกิดความร้อน เมื่อวัตถุขัดสีกันความร้อนจะค่อยๆ สะสมทีละน้อยจนทำให้เกิดผิวร้อนหรือลุกไหม้ เช่นสายพานลำเลียงถูกขัดสีจนขาด ส่วนการกระทบ เกิดในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นการกระทำกันของของแข็งสองอันซึ่งอาจเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ภายใต้เงื่อนไขว่าต้องเกิดแรงทางกลที่สูงทันทีทันใด โลหะที่เมื่อกระทบกันและเกิดความร้อนขึ้นได้ง่าย คือ ไททาเนียม และ เซอโคเนียม



รวมถึงปฏิกิริยาเรอไมท คือ อลูมิเนียมผสมกับออกไซด์ของเหล็กใช้เพื่อก่อความร้อนอย่างแรงเช่น ในการเชื่อมโลหะ และการทำลูกระเบิดเพลิง

### 2.2.3.5 การสปาร์คของไฟฟ้า และการอาร์ค

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



### รูปที่ 2.5 ลักษณะการสปาร์คเมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหลกระทันหัน

และ ณ จุดนั้นเกิดการแยกด้วยความเร็วสูง

นอกจากนี้การสะสมของไฟฟ้าสถิตก็อาจก่อให้เกิดการระเบิดของอนุภาคได้ ด้วยกลไกพื้นฐานจากการขัดสีกันระหว่างวัตถุเช่นในกระบวนการขนย้ายอนุภาคและฝุ่น เกิด

การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ากันระหว่างอนุภาค/ฝุ่น กับอุปกรณ์ในกระบวนการแล้วเกิดการสะสมของประจุในอุปกรณ์หรือในกองอนุภาคและสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้หลายรูปแบบขึ้นกับสภาพแวดล้อม

### 2.3 นิยามของฝุ่นผง

ฝุ่นผง (Dust) คือ วัสดุอนุภาคของแข็งขนาดเล็กซึ่งมีความเร็วของการแตกตัวในอากาศอย่างคงที่ภายหลังการเร่งในช่วงสั้นๆ ความเร็วจะอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 11 cm./s

Bartknecht (1989)<sup>(4)</sup> ได้นิยามคำว่า “ฝุ่นผง” ไว้ว่าเป็นของแข็งที่ฟุ้งกระจายโดยของแข็งนี้อาจมีรูปร่างโครงสร้าง และความหนาแน่นเท่าใดก็ได้ โดยปกติจะเรียก “ฝุ่นผง” ถ้าหากมีขนาดของอนุภาคตั้งแต่ 100 ถึง 300  $\mu\text{m}$  ของผสมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 100 ถึง 300  $\mu\text{m}$  เรียกว่าเป็น “ฝุ่นผงละเอียด” หากขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30 ถึง 100  $\mu\text{m}$  จะเรียกว่าเป็น “ฝุ่นผงละเอียดมาก” ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30  $\mu\text{m}$  จะเรียกว่า “ฝุ่นในฝุ่นผง”

ส่วนฝุ่นผงหรือวัสดุอนุภาคที่จะกล่าวในงานวิจัยนี้เป็นฝุ่นผงที่สามารถลุดติดไฟได้นอกจากนี้ Bartknecht ยังกล่าวอีกว่าวัสดุอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ทุกชนิดที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนจะจุดระเบิดได้ภายใต้บางสภาวะ นั่นคือ ฝุ่นผงที่เคยคิดกันว่าไม่อาจจะระเบิดได้สามารถถูกจุดระเบิดได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งอาจจะต้องใช้แหล่งชนวนพลังงานสูง ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคของถ่านหินแอนทราไซต์ ซึ่งในสภาพปกติจะไม่เกิดการระเบิด ในการใช้งานวัสดุอนุภาคที่ระเบิดได้จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการทดสอบในการกำหนดว่าวัสดุอนุภาคดังกล่าวจะระเบิดได้ในโรงงานหรือไม่ และประเมินระดับของความรุนแรงที่เกิดขึ้นด้วย

อนุภาคละเอียดจะทำปฏิกิริยารุนแรงมากกว่าอนุภาคหยาบ ตัวอย่างเช่นอนุภาคที่ทดสอบควรจะมีขนาดมาตรฐานต่ำกว่า 63  $\mu\text{m}$  เพื่อมั่นใจได้ว่าจะให้ลักษณะสมบัติการระเบิดสูงสุด โดยทั่วไปวัสดุอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 400  $\mu\text{m}$  ถึง 500  $\mu\text{m}$  (40 mesh ขึ้นไป) จะไม่ระเบิด แต่อันตรายจากการระเบิดก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ หากมีฝุ่นผงละเอียดจำนวนเพียงพอซึ่งเกิดจากการขัดสีหรือการแตกหัก

### 2.4 การทดสอบความไวต่อการจุดชนวนของอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

ขั้นเริ่มต้นของทดสอบถึงการระเบิดได้ของอนุภาค ควรตรวจสอบว่าอนุภาคที่สนใจสามารถเกิดการระเบิดได้หรือไม่ ก็คือสามารถลุดติดไฟได้หรือไม่โดยพิจารณาที่องค์ประกอบทางเคมีของสาร จากนั้นจึงทดสอบหาสมบัติของการระเบิดอนุภาคซึ่งมักทดสอบในสภาวะที่อนุภาคฟุ้งกระจายในอากาศหรือที่เรียกว่าหมอกฝุ่นเพราะเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่จะเกิดการระเบิดของอนุภาคได้ในอุตสาหกรรม การทดสอบหาสมบัติของการระเบิดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

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

การทดสอบเหล่านี้เกี่ยวข้องกับมาตรการป้องกันการระเบิด อนึ่งผลการทดสอบอาจใช้ในการตัดสินใจว่าวัสดุอนุภาคจะใช้ในกระบวนการในอุตสาหกรรมได้อย่างปลอดภัยหรือไม่

#### 2.4.1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Minimum Explosible Dust Concentration, MEC)

ขอบเขตด้านต่ำของการระเบิดคือค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นซึ่งถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ ฝุ่นจะไม่ระเบิด แม้ว่าการทดสอบจะดูเหมือนธรรมดาแต่เป็นการยากที่จะได้ค่าที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากหมอกฝุ่นไม่สม่ำเสมอหรือเป็นหมอกฝุ่นปั่นป่วน การทดสอบมักกระทำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ผลของอุณหภูมิมิมีผลไม่มากนักจนถึง 100 องศาเซลเซียส ในทางทฤษฎีการระเบิดจะไม่เกิดขึ้นหากควบคุมให้ความเข้มข้นของหมอกฝุ่นไม่มากกว่าขอบเขตด้านต่ำแต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมอนุภาคในทุกๆ กระบวนการได้มีบางอุปกรณ์เท่านั้นที่ควบคุมให้ความเข้มข้นของหมอกฝุ่นต่ำได้ เช่นการพ่นสีด้วยระบบไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคเมล็ดสีในอากาศที่ถูกฉีดออกสม่ำเสมอและควบคุมได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ มีดังนี้

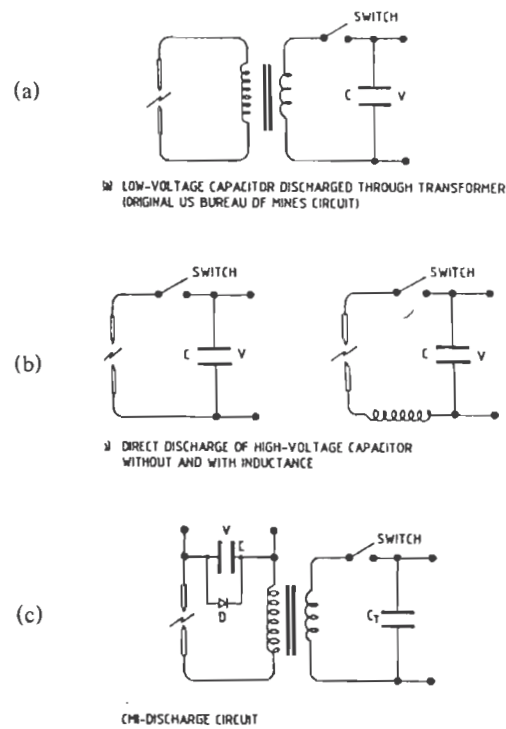
#### 2.4.2 อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Temperature, MIT)

อุณหภูมิต่ำสุดของการจุดชนวนวัดได้โดยใช้เครื่องมือทดสอบการระเบิด เมื่อใดก็ตามที่สังเกตเห็นเปลวไฟ อุณหภูมิของอากาศจะถูกปรับให้ลดลง จนกระทั่งอนุภาคไม่สามารถติดไฟเป็นเปลวไฟที่มีความเข้มข้นใดๆ ค่านี้เหมาะกับการป้องกันการระเบิดของหมอกฝุ่นในพื้นที่ที่ร้อนของเตาอบ เตาเผา และเครื่องอบแห้ง อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

#### 2.4.3 พลังงานต่ำสุดในการจุดชนวน (Minimum Ignition Energy, MIE)

ค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวนวัดได้จากค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ผลิตสปาร์คที่ขั้วอิเล็กโทรด ค่าพลังงานนี้หาได้จาก  $E = 1/2 CV^2$  การวัดค่าพลังงานอาจใช้การอินทิเกรตผลคูณระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในระยะเวลาที่มีการสปาร์ค อย่างไรก็ตามยังเป็นที่ยกเถียงกันว่า การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเป็นการวัดพลังงานในการจุดชนวนอนุภาคบาง

ชนิดมีค่า MIE ต่ำเท่ากับ [ไฮโดรเจน 0.02 มิลลิจูล, มีเทน 0.3 มิลลิจูล, ไลโคโพลีเอท (31 ไมครอน) 5-15 มิลลิจูล, แอนทราควิโคน (18 ไมครอน) 2-6 มิลลิจูล] อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือ Hartmann tube เมื่อข้อผิดพลาดสามารถปรับค่าประจุและความต่างศักย์ได้ โดยวงจรที่ใช้ในการจุดชนวนที่ได้พัฒนามี 3 แบบ ดังรูปที่ 2.6 แบบแรกดังรูปที่ 2.6(a) พลังงานจากตัวเก็บประจุ C และความต่างศักย์ กระแสตรง V ภายในหม้อแปลง โดยสมมุติว่าค่าพลังงานเท่ากับ  $1/2 CV^2$  เมื่อไม่คิดพลังงานสูญเสีย ในหม้อแปลง แบบที่สองจึงใช้การต่อวงจรโดยตรงของตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์สูง ดังรูปที่ 2.6(b) มีทั้งแบบที่มีและไม่มีอินดักแทนที่มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเฮนรี วงจรที่ใช้ขดลวดอินดักแทนจะเพิ่ม ประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานระหว่างการสปาร์คซึ่งก็มีอยู่ทั้งในแบบแรก (หม้อแปลง) และแบบ สุดท้าย CMI ดังรูปที่ 2.6(c) เป็นการรวมทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน โดยจะวัดค่าพลังงานได้โดยตรง จากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความต่างศักย์และระยะเวลาในการสปาร์ค



รูปที่ 2.6 วงจรของการจุดชนวน 3 แบบเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสุดของการจุดชนวน

#### 2.4.4 ขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจน (Limiting Oxygen Concentration, LOC)

อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้เพื่อป้องกันการระเบิด ทดลองโดยลดความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศลงเรื่อยๆ โดยการเพิ่มก๊าซเฉื่อย จะถึงจุดที่อนุภาคไม่สามารถจุดระเบิดได้อีกต่อไป ค่าความเข้มข้นนี้คือขอบเขตความเข้มข้นของออกซิเจนตามปกติจะใช้ก๊าซใน โตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาร์กอน แทนที่ออกซิเจน อนึ่งการใช้ก๊าซจากการเผาไหม้หรือไอน้ำก็ใช้ได้ถ้าไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคนั้นๆ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรทรงกลม

ในการเติมก๊าซเฉื่อยเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการป้องกันการระเบิดของอนุภาคในอุตสาหกรรม แม้ว่าจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายเพิ่มและจะต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนที่ดีพอ ในทางปฏิบัติยอมรับให้มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดต่ำกว่าค่าขอบเขตอีก 2% เพื่อเหตุผลด้านความปลอดภัย

## 2.5 การทดสอบความรุนแรงของการระเบิดอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ

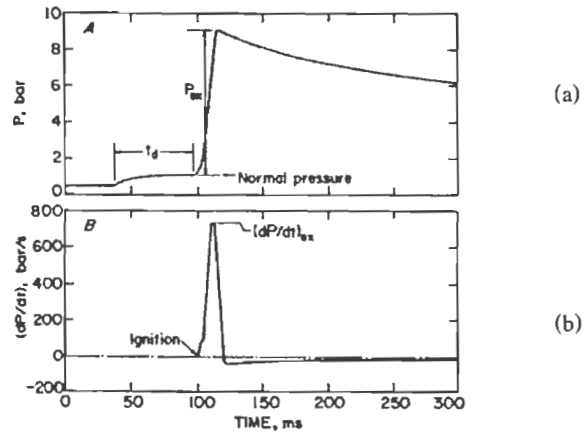
ถ้าเกิดการระเบิดของอนุภาคขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมภัยอันตรายและความสูญเสียจะเกิดขึ้นสูง ถ้าการระเบิดเกิดเริ่มแรกภายในโครงสร้างที่ปิดมิดชิดหรือในอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรงพอที่จะทนความดันสูงเต็มที่จากการระเบิด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจะบอกถึงความรุนแรงของการระเบิด ส่วนความดันสูงสุดจากการระเบิดเป็นตัวบอกให้ทราบว่า โครงสร้างล้อมรอบจะต้องแข็งแรงเท่าไร จึงจะทนแรงระเบิดได้โดยไม่พังเสียหาย ดังนั้นค่าสูงสุดที่สำคัญคือ

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

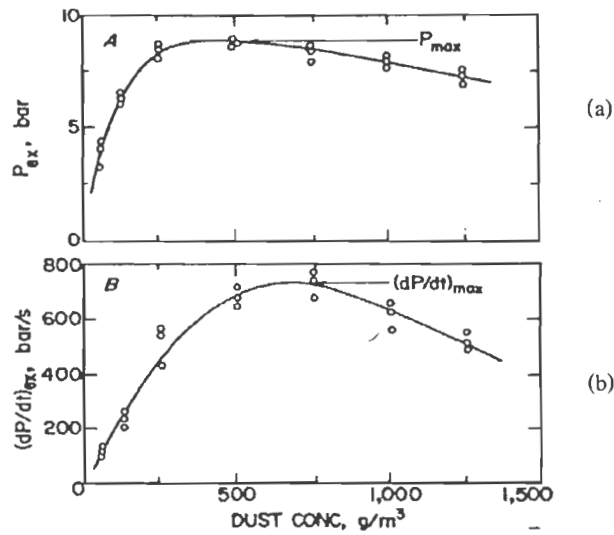
โดยปกติค่าสูงสุดทั้งสองเป็นค่าเฉพาะตัวของอนุภาคที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ค่าทั้งสองนี้หาได้จากการทดลองตลอดช่วงกว้างของความเข้มข้น

### 2.5.1 ความดันสูงสุดของการระเบิด (Maximum Explosion Pressure, $P_{max}$ )

ในการวัดความดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคเริ่มต้นที่กำหนดค่าความเข้มข้นของหมอกฝุ่นค่าหนึ่งจากนั้นทำการทดสอบการระเบิดภายในอุปกรณ์ปิดสนิทเพื่อวัดแรงดันจากการระเบิด ( $P_{xx}$ ) จากกราฟการทดลองระหว่างความดันกับเวลาดังรูปที่ 2.7 (a) และเมื่อทดสอบที่ความเข้มข้นต่างๆ จะได้ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดดังรูปที่ 2.8 (a) ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดแปรผันโดยตรงกับค่าความดันเริ่มต้นของระบบหากความดันเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 1 บรรยากาศ ค่าความดันสูงสุดของการระเบิดจะยิ่งมากขึ้น และเนื่องจากอุปกรณ์



รูปที่ 2.7 ผลการทดลองค่าความดันจากการระเบิดอนุภาค ที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง (ASTM E1226, 2000)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเข้มข้นค่าต่างๆ ของวัสดุอนุภาค (ASTM E1226, 2000)

ในกระบวนการจะเชื่อมต่อกันดังนั้นหากเกิดการระเบิด ณ จุดหนึ่งและความดันจากการระเบิดสูงกว่าความดันเริ่มต้นของอุปกรณ์ (ส่วนมากเท่ากับความดันบรรยากาศ) ที่เชื่อมต่อทำให้เกิดการแพร่กว้างของเปลวไฟไปยังหมอกฝุ่นที่ยังไม่ระเบิด ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจึงใช้เป็นค่าที่บอกว่าโครงสร้างของอุปกรณ์เหล่านั้นต้องทนแรงดันได้เท่าใดหรืออุปกรณ์นิรภัยเพื่อลดแรงดันจากการระเบิดต้องทนแรงดันเท่าใด

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

จากรูปที่ 2.7 (a) เมื่อนำมาหาค่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงเวลา คือ  $(dP/dt)_{ex}$  มาพล็อตกราฟกับเวลาจะได้ดังรูปที่ 2.7 (b) และเมื่อทดสอบแรงดันที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ก็จะได้ดังรูปที่ 2.8 (b) นั่นคือ ได้ค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน  $(dP/dt)_{max}$  ค่านี้บางทีก็เรียกว่าค่าความรุนแรงของการระเบิด (Explosion violence) เนื่องจากเป็นค่านี้เป็นค่าที่บอกถึงความรุนแรงของการระเบิดจากอนุภาคคือหากมีค่ามากแสดงว่ามีความรุนแรงมาก โดยทั่วไปค่า  $(dP/dt)_{max}$  และค่าความดันสูงสุดจะเกิดที่ความเข้มข้นต่างกัน และค่านี้จะขึ้นกับปริมาตรของเครื่องทดสอบคือจะมีค่าลดลงเมื่อเครื่องทดสอบมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $K_{St(max)}$  ยังคงขึ้นกับชนิดของวัสดุอนุภาคและวิธีการทดสอบเท่านั้น ไม่ขึ้นกับปริมาตรของเครื่องทดสอบ และจากสมการที่ 1.1 สำหรับเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร จะได้ว่า

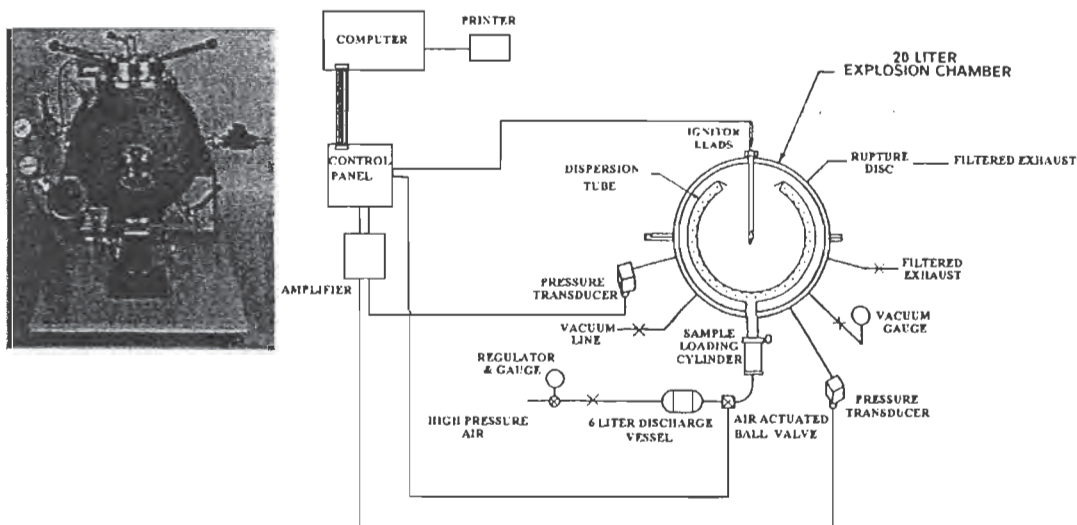
$$0.02 [m^3]^{1/2} \times (dP/dt)_{max} [bar/s] = K_{St(max)} [bar \cdot m/s] \quad (2.2)$$

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

### 2.5.3 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร

(The Siwek 20 litre sphere)

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



รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 20 ลิตรพัฒนาโดย Siwek (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 จุดสำคัญในการทดสอบหาค่าอัตราการเพิ่มความดันจากการระเบิดจุดหนึ่งคือด้วยเหล็กที่ใส่สารในการจุดชนวนระเบิด Zhu *et al* (1988) พบว่าในการทดสอบอนุภาคชนิดเดียวกันโดยใช้ถ้วยที่เป็นโลหะ และถ้วยที่เป็นพลาสติกใส่ชนวนแล้วให้ค่า  $K_{St}$  ที่ต่างจาก

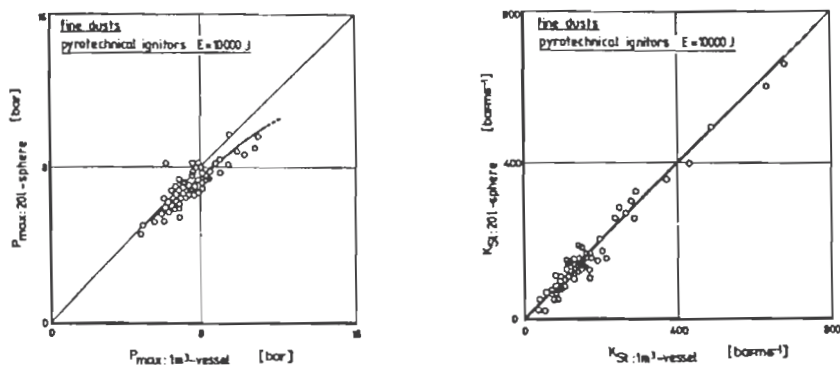
ในการทดสอบมักพบว่าอนุภาคที่นำมาทดสอบจะเหนียว หรือมีเส้นใยสูงทำให้เกิดการอุดตันภายใน perforated dispersion tube จึงได้มีการพัฒนาหัวฉีดกระจายอนุภาคแบบใหม่ที่มีลักษณะเปิดเรียกว่า 'rebound' nozzle แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่ง Siwek (2001) กล่าวว่าหัวฉีดแบบใหม่ให้ค่าความดันสูงสุด อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน และ ค่า  $K_{St}$  ที่ใกล้เคียงกับเมื่อใช้หัวฉีดแบบเดิม





รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบใหม่ rebound nozzle สำหรับกระจายอนุภาค  
ภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร

เนื่องจากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร มีค่าน้อยกว่าเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. ทำให้ค่าความดันสูงสุดของการระเบิดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากผลของการหล่อเย็น (cooling effect) และถ้าเปรียบเทียบกับกราฟระหว่างความดันที่วัดได้กับเวลาที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.12 พบว่าค่าความดันลดลงอย่างรวดเร็วกว่าหลังการระเบิดเมื่อทดสอบในเครื่องขนาด 20 ลิตร ดังนั้นค่าความดันที่ได้จึงมีค่าเดียวที่เด่นชัด แต่ในเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. จะต้องเฉลี่ยค่าความดันเนื่องจากมีช่วงกว้างทำให้สามารถหาค่าความต่างกันของค่าความดันสูงสุดที่ได้จากทั้งสองเครื่องส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งอาจหาค่าด้วยพลังงานของชนวนจุดระเบิดในเครื่องทดสอบขนาด 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 2.11 และถ้าต้องการให้มีความถูกต้องสูงแล้วควรใช้ aluminum dusts ( $K_{St(max)} > 700 \text{ bar.m/sec}$ ) เป็นวัสดุอนุภาคมาตรฐาน



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{max}$  และ  $(dP/dt)_{max}$  ที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบ  $1\text{ m}^3$  ISO vessel และ 20 litre Siwek sphere (Eckhoff, 1991:541)

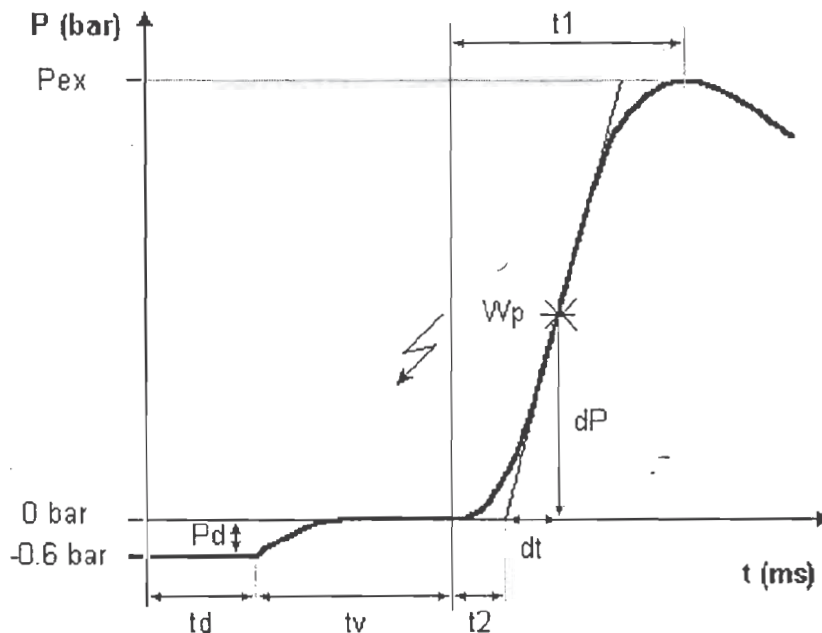
นอกจากนี้เครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรยังใช้ทดสอบกับก๊าซ/ไอของตัวทำละลายที่ลุกติดไฟได้ผสมอากาศ เนื่องจากปริมาตรน้อยสุดที่สามารถทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของการระเบิดของก๊าซผสมคือ 1 ลิตร ดังนั้นเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรจึงสามารถใช้ทดสอบได้ถ้าออกแบบให้ทนแรงดันสูงๆ และติดตั้งระบบหล่อเย็นนอกจากนี้ “Hybrid mixtures” คือหมอกฝุ่นที่มีก๊าซเชื้อเพลิงหรือไอของสารที่ลุกติดไฟได้ผสมอยู่ด้วย ก็สามารถทดสอบกับเครื่องขนาด 20 ลิตรได้เมื่อเทียบผลการทดสอบกับเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.แล้วให้ค่าใกล้เคียงกัน

#### 2.5.4 นิยามค่าความดันและการปรับแก้ค่าความดันจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร

เพื่อความเข้าใจในทางเดียวกันจึงมีนิยามของเทอมความดันที่ได้จากเครื่องทดสอบระบุไว้ตามมาตรฐาน ASTM E 1226 (2000) โดยเริ่มจากรูปที่ 2.7 (a) เป็นกราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบ ณ การทดสอบแต่ละครั้งที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งนำมาแสดงให้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.12 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 2.12
- $(dP/dt)_{max}$  **Maximum rate of pressure with time** คือ ค่า  $(dP/dt)_m$  สูงสุดเมื่อทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของวัสดุอนุภาคหลายๆ ค่า
- $K_{max}$  **Product specific constant** มีค่าเท่ากับ  $0.27144 \times (dP/dt)_{max}$
- $t_1$  **Duration of combustion** คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่จุดชนวนระเบิด กับเวลา ณ จุดที่มีความดันมีค่าสูงสุด
- $t_2$  **Induction time** คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่จุดชนวนระเบิด และเวลา ณ จุดตัดของเส้นสัมผัส inflexion point กับ เส้นตรง (ขนานแกน x) ที่ลากผ่านเส้นความดัน 0 บาร์ (ความดันปกติ)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการระเบิด ( $P_{ex}$ ) และ เวลาของการระเบิดวัสดุอนุภาคภายในเครื่องทดสอบมาตรฐานขนาด 20 ลิตร

ตัวแปรที่สามารถควบคุมเพื่อใช้ปรับปรุงเครื่องทดสอบเพื่อให้ได้ค่าความดันจริง ( $P_{ex}$ ),  $P_m$ ,  $(dP/dt)_m$ ,  $t_1$  และ  $t_2$  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

#### 2.5.4.1 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

$$P_m = 0.775 \times P_{ex}^{1.15} \quad (2.3)$$

เมื่อทำการปรับแก้ค่าดังสมการจะทำให้ได้ค่า  $P_m$  ที่เทียบเท่ากับค่าความดันที่ได้จากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.

#### 2.5.4.2 การปรับแก้ค่าความดัน เมื่อ $P_{ex} < 5.5$ บาร์

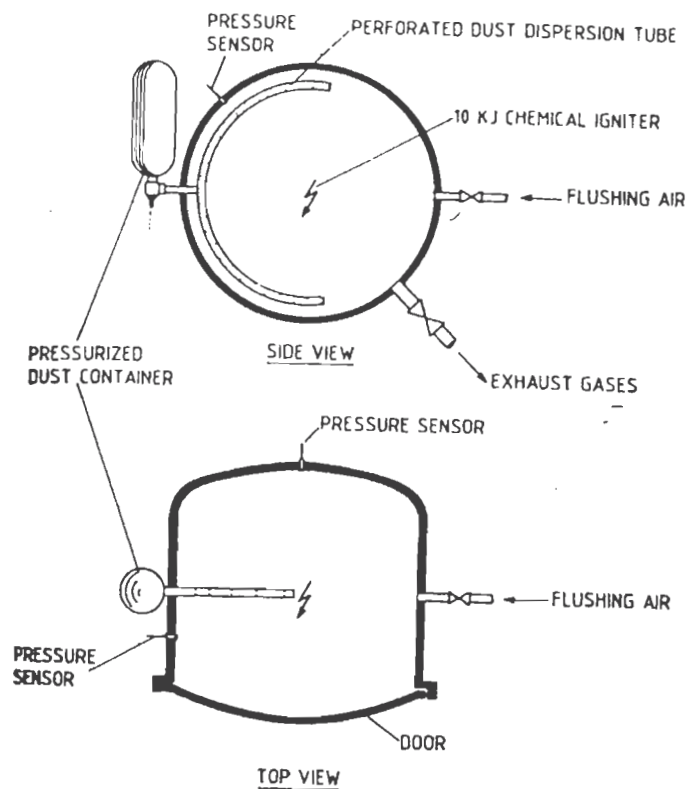
เนื่องจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรมีปริมาตรน้อย ดังนั้นความดันที่วัดได้เมื่อมีค่าน้อยกว่า 5.5 บาร์ จะต้องพิจารณาผลของพลังงานจากการจุดชนวนระเบิด จากการทดสอบเมื่อไม่มีหมอกฝุ่น (blind test) มีแต่เพียงชนวนระเบิดอย่างเดียวจะได้ค่าความดัน ( $P_{ex}$ ) เท่ากับ 1.6 บาร์ และในการทดสอบที่มีหมอกฝุ่นค่าความดัน  $P_{ex}$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

$$P_m = 0.55 \times (P_{ex} - P_{ci}) / (5.5 - P_{ci}) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $P_{ci}$  = pressure due to chemical igniters  
 $= 1.6 \text{ bar} \times \text{IE}/10,000$

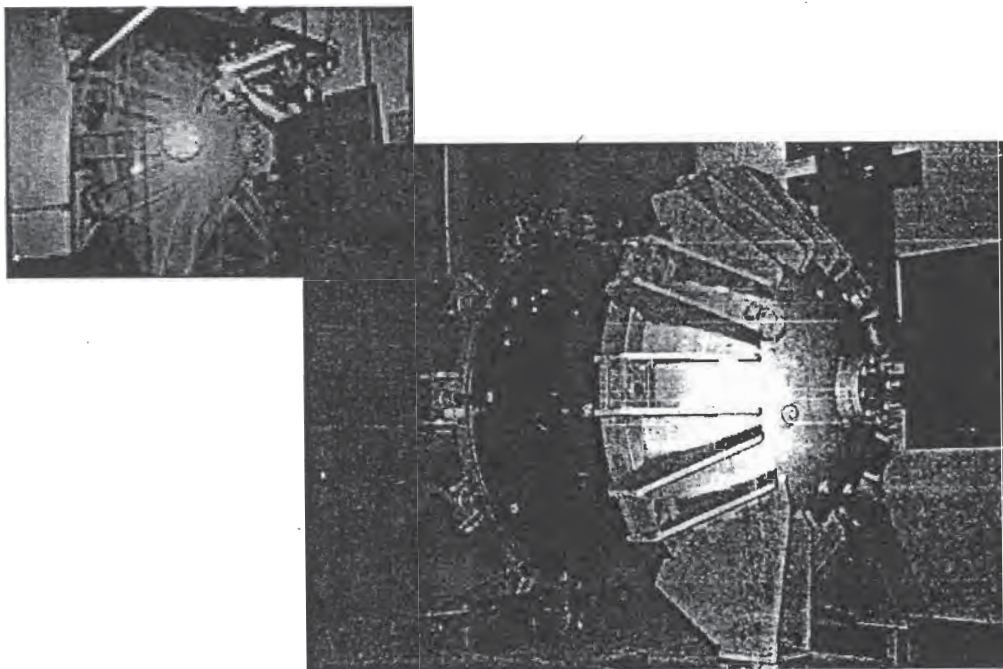
2.5.5 เครื่องมาตรฐานสำหรับทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาคขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร  
 (The 1 m<sup>3</sup> standard ISO vessel)

รูปที่ 2.13 แสดงด้านข้างและด้านบนของเครื่องทดสอบ จากรูปประกอบด้วย กระเปาะขนาด 5 ลิตรเพื่อใส่อนุภาคและอัดอากาศเข้าไป 20 บาร์เพื่อเกิดความดันแตกต่างระหว่าง กระเปาะและตัวถังทดสอบ (explosion chamber) ในการพาวอนุภาคเข้าสู่เครื่องโดยผ่าน วาล์วขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตรซึ่งจะเปิดให้อนุภาคเข้าเป็นเวลา 10 มิลลิวินาที วาล์วก็ต่อกับ อุปกรณ์กระจายอนุภาคมีลักษณะเป็นท่อโค้งครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตรเจาะ รูตลอดท่อมีขนาดประมาณ 4-6 มิลลิเมตร จำนวนรูที่เจาะต้องทำให้ได้พื้นที่ตัดขวาง (cross-section area) ของรูทั้งหมดมีค่าประมาณ 300 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 2.13 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 2.7 และ 2.8 ก็ประยุกต์ใช้กับเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของเครื่องทดสอบดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณของอนุภาคและเวลาในการทดลองแต่ละครั้งมากจึงมีข้อจำกัดของจำนวนครั้งในการทดสอบไม่เท่ากับปกติที่ควรปฏิบัติ ส่วนค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจากเครื่องทดสอบนี้คาดว่าน่าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความดัน adiabatic สูงสุดที่ได้จากทฤษฎี รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO ที่ใช้งานได้จริง



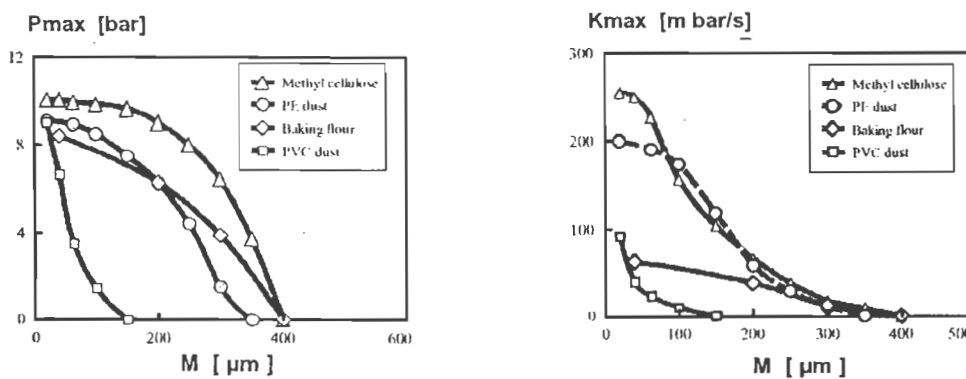
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบการระเบิดขนาด 1 ลบ.ม. ประกอบด้วยฝาครึ่งวงกลมประกบติดกัน และสามารถถอดออกจากกันได้ (Eckhoff, 1991:539)

เครื่องทดสอบดังที่กล่าวมาถูกเลือกให้เป็นเครื่องทดสอบมาตรฐานในการวิเคราะห์หาค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันของวัสดุอนุภาค กล่าวคือเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตรถูกเลือกให้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการทดสอบค่าแรงดันทั้งสองค่าตามมาตรฐาน ASTM (2000) และเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐาน ISO โดยใช้ค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดเป็นเกณฑ์ของการระเบิดซึ่งควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5 บาร์เกจซึ่งความดันนี้รวมค่าความดัน  $1.1 \pm 0.1$  บาร์เกจจากการลุกไหม้ขนาดที่ให้พลังงาน 10 กิโลจูลเพียงอย่างเดียว โดยปราศจากอนุภาค ในการทดสอบหากลดปริมาณของอนุภาคที่ละ 0.2 กรัมและวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงปริมาณอนุภาคที่ทำให้ได้ความดันสูงสุดมีค่าต่ำกว่า 1.5 บาร์เกจโดยทดสอบซ้ำที่ปริมาณอนุภาคเท่าเดิมสามครั้งแล้วให้สันนิษฐานไว้ก่อนว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ (Minimum Explosible Concentration, MEC) มีค่าอยู่ระหว่างค่าความเข้มข้น (มวลของอนุภาคที่กระจายในถังต่อปริมาตรของถังทดสอบ) สูงสุดที่ทำให้ได้แรงดันต่ำกว่า 1.5 บาร์เกจกับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้ได้แรงดันเท่ากับ 1.5 บาร์เกจหรือมากกว่าเล็กน้อยเมื่อทำการทดลองซ้ำแล้วสามครั้ง

2.6 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความดันการระเบิดของวัสดุอนุภาค

2.6.1 ผลของขนาดอนุภาค

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

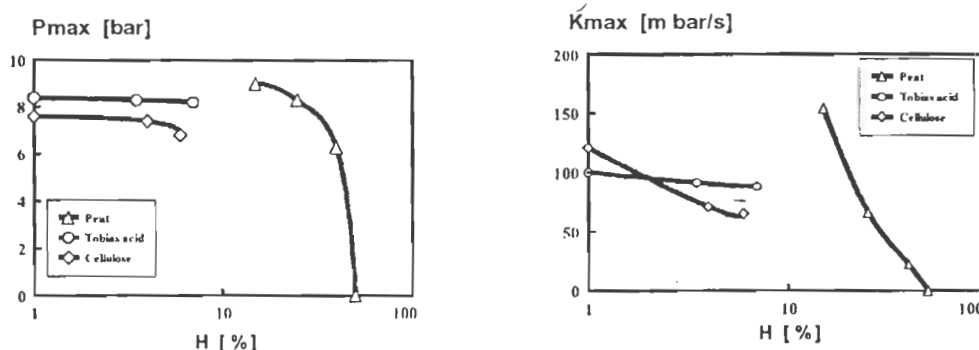


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) (R.Siwiek and Ch.Cesana, 2001)

จากรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของผลของขนาดที่มีต่อค่าความดันสูงสุดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) จะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงค่าทั้งสองค่ามีค่าสูงขึ้น Siwek (2001: 12) กล่าวว่าขนาดอนุภาคตัวอย่างที่เหมาะสมในการทดสอบด้วยเครื่องมาตรฐานขนาด 20 ลิตรควรมีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 63 ไมครอน และจากประสบการณ์พบว่าอุปกรณ์กระจายอนุภาคและวาล์วเปิดปิดการเข้าของอนุภาคสู่ถังทดสอบ มีผลในการลดขนาดของอนุภาคก่อนเข้าสู่ถังทดสอบนั่นคืออนุภาคมีขนาดเล็กลงโดยกระบวนการกระจายอนุภาค และถ้าอิทธิพลนี้มีผลต่อขนาดอนุภาคอย่างมาก การวัดขนาดอนุภาค (เมื่อ ไม่มีการจุดระเบิด) หลังจากผ่านอุปกรณ์กระจายอนุภาคก็เป็นสิ่งจำเป็น

### 2.6.2 ผลของความชื้น

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาค (Relative product humidity; H) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำในอนุภาคต่อปริมาณอนุภาคแห้ง เป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความดันสูงสุดและอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิด เรามักได้ยินว่าวัสดุอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการระเบิดของวัสดุอนุภาค จากรูปที่ 2.16 อาจโต้แย้งสมมติฐานนี้เนื่องจากกราฟแสดงให้เห็นว่าความชื้นของอนุภาคต้องต่ำกว่า 10% จึงจะหลีกเลี่ยงผลจากความชื้นต่อความดันจากการระเบิด



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาคกับความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) (R.Siwek and Ch.Cesana, 2001)

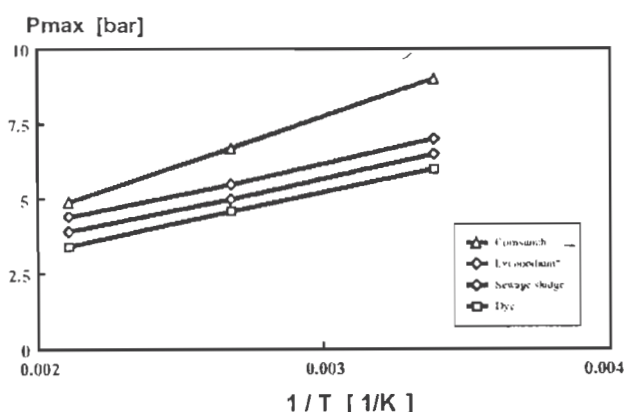
จากรูปที่ 2.16 เมื่อแกนในแนวนอนเป็นแบบล็อกกาลิทึมเพื่อให้เห็นผลของความชื้นในช่วงต่ำกว่า 10% ได้ชัดเจน จากกราฟเมื่อความชื้นของอนุภาคมีมากขึ้นค่าความดันสูงสุดและค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) มีค่าลดลง อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความรุนแรงและแรงดันในการระเบิดของหมอกฝุ่น โดยเฉพาะอนุภาคอินทรีย์มีความซับซ้อน อิทธิพลของความชื้น



อันดับแรกคือพลังงานที่ให้อนุภาคถูกนำไปประเหยและให้ความร้อนแก่น้ำที่เกาะอยู่บนผิวอนุภาค อันดับที่สองคือไอน้ำที่ระเหยออกมารวมตัวกับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ขนวน ณ ช่วง preheating zone ของเปลวการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซผสมที่ลดอัตราปฏิกิริยาการเผาไหม้อนุภาค และอันดับสามคือความชื้นของอนุภาคเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคและลดการกระจายตัวของอนุภาคทำให้ทั้งความว่องไวในการระเบิดและความรุนแรงจากการระเบิดอนุภาคมีค่าลดลง

### 2.6.3 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในกระบวนการอุตสาหกรรม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคที่สามารถระเบิดได้ลดลง (ระเบิดได้ง่ายขึ้น) นอกจากนี้อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความดันสูงสุดก็ควรนำมาพิจารณา จากรูปที่ 2.17 พบว่าค่าความดันสูงสุดของการระเบิดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณออกซิเจนภายในหมอกฝุ่นที่ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) กล่าวคือถ้าอนุภาคเกิดการเผาไหม้รุนแรงขึ้นอุณหภูมิตั้งขึ้นจะทำให้ค่าความรุนแรงลดลง แต่ถ้าอนุภาคเกิดการเผาไหม้อย่างช้าค่าความรุนแรงจะสูงขึ้น สำหรับในเครื่องทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความรุนแรงมีผลน้อยมากจนไม่ต้องพิจารณา

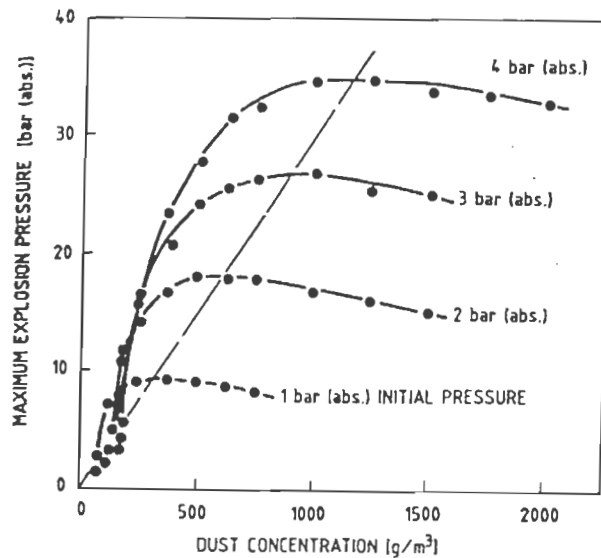


รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของหมอกฝุ่นกับความดันสูงสุดจากการระเบิด (R.Siwiek and Ch.Cesana, 2001)

### 2.6.4 ผลของความดันเริ่มต้น

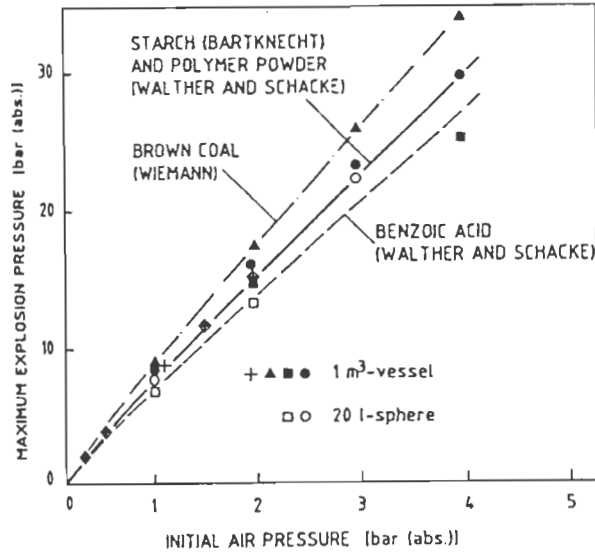
Eckhoff (1991:46) อ้างถึงในข้อมูลของ Wiemann's (1987) ในการทดสอบการระเบิดของอนุภาคถ่านหินสีน้ำตาลภายในภาชนะปิดปริมาตร 1 ลบ.ม. ดังรูปที่ 2.18 แสดงถึง

อิทธิพลของความดันเริ่มต้นต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดจะเห็นได้ว่าค่าพีคสูงสุดของกราฟความดันแต่ละเส้นค่อนข้างจะแปรผันโดยตรงกับความดันเริ่มต้น (สัมบูรณ์) และความเข้มข้นของอนุภาคที่ให้แรงดัน ณ จุดพีคก็แปรผันโดยตรงด้วยเช่นกัน แสดงความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงที่ลากผ่านในกราฟดังกล่าว

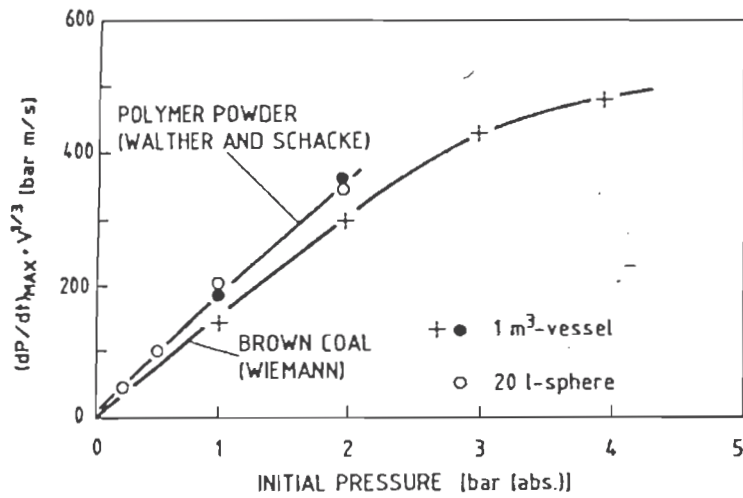


รูปที่ 2.18 ข้อมูลการทดลองของ Wiemann (1987) ค่าความดันจากการระเบิด ถ่านหินสีน้ำตาลที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ทดสอบในเครื่องขนาด 1 ลบ.ม. ที่ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ (Eckhoff, 1991:47)

นอกจากนี้ Eckhoff (1991:47) อ้างถึงในข้อมูลของ Walther and Schacke (1986) ซึ่งทำการทดสอบเช่นกันโดยใช้อนุภาคโพลีเมอร์ภายในเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 2.18 เมื่อความดันเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3 บาร์ (สัมบูรณ์) และอ้างอิงข้อมูลของ Bartknecht (1978) ซึ่งทำการทดสอบผงแป้งในช่วงความดันเริ่มต้น 0.2 ถึง 2 บาร์ (สัมบูรณ์) และได้สรุปผลการทดสอบของทั้งสามท่านแสดงดังรูปที่ 2.19 นอกจากนี้ความดันเริ่มต้นยังมีผลต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นเชิงเส้นตรงเมื่อความดันเริ่มต้นไม่เกิน 2 บาร์ (สัมบูรณ์) ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะปริมาตรคงที่ กับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Bartknecht 1978, Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987 (Eckhoff, 1991:48)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันจากการระเบิดอนุภาคโพลิเมอร์และถ่านหินสีน้ำตาลในภาชนะทดสอบปริมาตรคงที่ 1 ลบ.ม. และ 20 ลิตรกับความดันเริ่มต้น ทดสอบโดย Walther and Schacker 1986 และ Wiemann 1987 (Eckhoff, 1991:49)

### 2.6.5 ผลของความปั่นป่วน

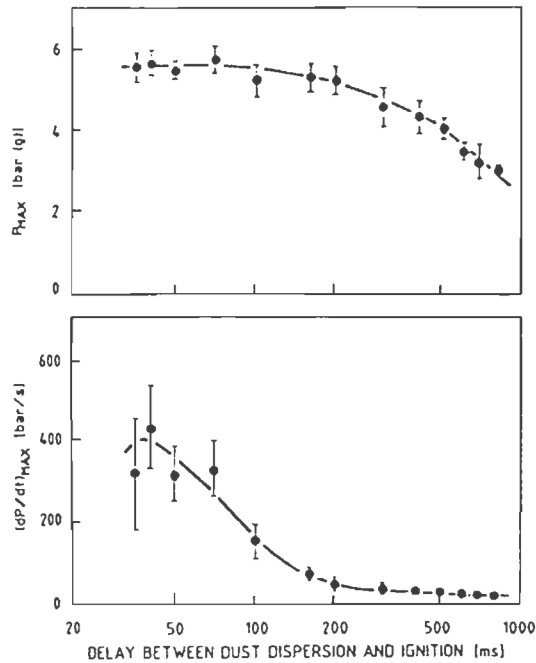
ความปั่นป่วนในทางปฏิบัติคือสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างรวดเร็วในที่นี้ระบบคือหมอกฝุ่นที่ภายในมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (ทั้งมากและน้อย) ของอนุภาคในทิศทางทั้งสามมิติ และหากเป็นหมอกฝุ่นที่กำลังเผาไหม้ ความปั่นป่วนจะมากขึ้นเพราะมีทั้งชั้น (ส่วน) ของอนุภาคร้อนที่ถูกเผาไหม้และอนุภาคเย็นที่ไม่เผาไหม้สลับกันและหมอกฝุ่นที่มีความปั่นป่วนจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าหมอกฝุ่นที่อยู่นิ่งแล้วมีเปลวไฟเคลื่อนที่ผ่าน

ในกรณีของการจุดชนวนให้กับหมอกฝุ่นทั้งการจุดชนวนด้วยการสปาร์กด้วยกระแสไฟฟ้าหรือการใช้พื้นผิวที่ร้อนนั้นความปั่นป่วนจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงานออกสู่บรรยากาศด้วยการพาความร้อนอย่างรวดเร็วดังนั้นการจุดชนวนของหมอกฝุ่นที่ปั่นป่วนจึงต้องใช้พลังงาน/อุณหภูมิสูงกว่าการจุดชนวนของหมอกฝุ่นที่อยู่นิ่ง

ในการระเบิดของหมอกฝุ่นความปั่นป่วนแบ่งได้เป็นสองประเภทตามแหล่งกำเนิด

- ความปั่นป่วนอันเกิดจากกระบวนการในส่วนที่ทำให้เกิดหมอกฝุ่นไม่ว่าจะเป็นเครื่องแอร์ เจ็ท มิลล์ (air jet mill), เครื่องผสม, ไซโคลน, ถังกรอง, ท่อขนถ่ายอนุภาคด้วยลม หรือสายพานลำเลียงอนุภาค ความปั่นป่วนชนิดนี้เรียกว่า ความปั่นป่วนเริ่มต้น (initial turbulence)

- ความปั่นป่วนอันเกิดจากการระเบิดเองจากการขยายตัวของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้เหนือเปลวไฟจากการระเบิด ระดับของความปั่นป่วนจะมากขึ้นขึ้นกับความเร็วในการไหล (เคลื่อนที่) ของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้ และลักษณะของระบบ โดยปกติจะเกิดขึ้นได้ยาก



รูปที่ 2.21 อิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่ออัตราการระเบิดของหมอกฝุ่นไลโคโพลีเอียม เข้มข้น 420 กรัม/ลบ.ม. ในเครื่องสอบปริมาตร 1.2 ลิตร (Hartmann bomb) (Eckhoff, 1991:38)

รูปที่ 2.21 แสดงอิทธิพลของความปั่นป่วนเริ่มต้นต่อความดันสูงสุดจากการระเบิด และอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันในถังทดสอบที่ปิดสนิท หมอกฝุ่นเกิดจากการเป่าอากาศผ่าน กองอนุภาคที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในตอนแรกนี้หมอกฝุ่นยังไม่ปั่นป่วนนักแต่จากนั้นเมื่ออนุภาค เริ่มฟุ้งเพราะแรงจากอากาศความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากทดสอบกับอนุภาคชนิดเดิมแต่ เปลี่ยนเวลาหน่วงระหว่างการกระจายอนุภาคจนจุดชนวนระเบิดก็เป็นการเปลี่ยนความปั่นป่วนของ หมอกฝุ่นด้วย จากรูปที่ 2.21 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเวลาหน่วง (ความปั่นป่วน) ทำให้อัตราสูงสุดของ การเพิ่มความดันเปลี่ยนแปลงมากในขณะที่ความดันสูงสุดจากการระเบิดจะมีค่าค่อนข้างคงที่จนค่า เวลาหน่วงเท่ากับ 200 มิลลิวินาที แสดงให้เห็นว่าค่าความดันสูงสุดเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โม ไดนามิกส์ในขณะที่อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นคุณสมบัติทางจลนศาสตร์

Siwek (2001: 10) กล่าวว่าคิกรีของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับค่าเวลาหน่วงของการ จุดชนวน (ignition delay time :  $t_i$ ) เป็นหลัก ซึ่งก็คือขึ้นอยู่กับช่วงเวลาตั้งแต่อนุภาคเริ่มเข้าสู่ถัง ทดสอบจนถึงจุดชนวนระเบิด ซึ่งมีผลต่อค่าอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดัน (ส่งผลต่อค่า  $K_{max}$ ) ดังนั้นในการทดสอบค่า ignition delay time ควรเป็นค่ามาตรฐาน คือ

เครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร:  $t_v = 60$  มิลลิวินาที

เครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม.:  $t_v = 0.6$  วินาที

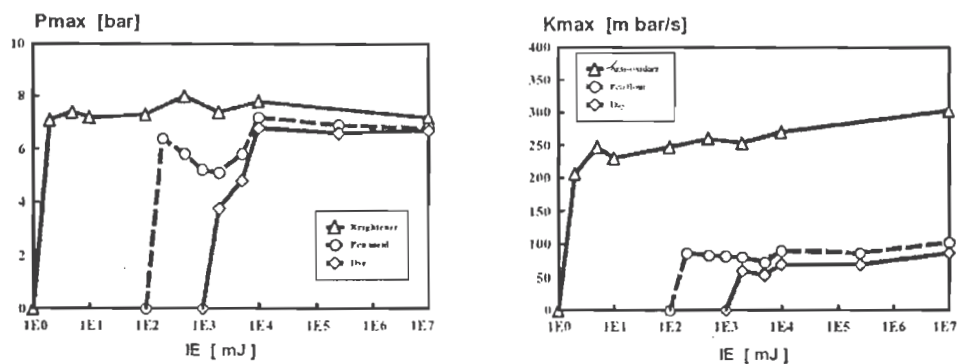
โดยปกติการเพิ่มความปั่นป่วน ( $t_v < 0.6$  วินาที หรือ  $t_v < 60$  มิลลิวินาที) จะเพิ่มความรุนแรงในการระเบิด

## 2.6.6 พลังงานของการจุดระเบิด

จากผลการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานต่ำสำหรับการระเบิด (Minimum Ignition Energy; MIE) จากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลบ.ม. และขนาด 20 ลิตร พบว่าวัสดุอนุภาคสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของพลังงานของการจุดระเบิดต่อค่าความรุนแรงในการระเบิด ดังนี้

### 2.6.6.1 วัสดุอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน (Energy independent dusts)

จากรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าค่าความดันสูงสุดและค่า  $K_{st}$  ที่ได้จากการทดลองไม่ขึ้นกับพลังงานของการจุดระเบิด (Ignition Energy; IE) โดยชนวนระเบิดที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM E1226 ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ 40wt% zirconium, 30 wt%barium nitrate และ 30wt% barium peroxide ถ้าวางรวมกัน 1.2 กรัมจะให้พลังงานในการจุดระเบิดเท่ากับ 5,000 จูล



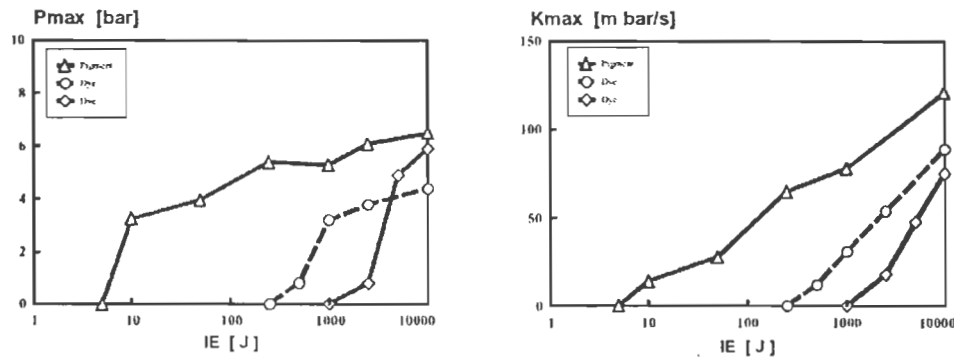
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน

(R.Siwiek and Ch.Cesana, 2001)

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าสำหรับ “วัสดุอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับพลังงาน” ลักษณะของแหล่งจุดระเบิดไม่มีความสำคัญ ไม่ว่าจะจ่ายกระแสแตก่า หรือชนวนระเบิดมีความรุนแรงก็ให้ผลแรงดันเท่าเดิม โดยทั่วไปวัสดุอนุภาคกลุ่มนี้จะมีค่าพลังงานต่ำสุดสำหรับการระเบิดต่ำกว่า 1 จูล

### 2.6.6.2 วัสดุอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน (Energy dependent dusts)

สำหรับอนุภาคในกลุ่มนี้ การลดลงของพลังงานในการจุดระเบิดมีผลให้ความดันสูงสุดจากการระเบิดและค่า  $K_{max}$  ลดลงแสดงดังรูปที่ 2.23 โดยทั่วไปวัสดุอนุภาคกลุ่มนี้จะมีค่าพลังงานต่ำสุดสำหรับการระเบิดมากกว่า 1 จูล



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการจุดชนวนกับความดันสูงสุดจากการระเบิด และค่าความรุนแรงจากการระเบิด (st class) ของอนุภาคที่ขึ้นกับพลังงาน

(R.Siwiek and Ch.Cesana, 2001)

## 2.7 การกำหนดขนาดช่องระบายแรงดันจากการระเบิดในกระบวนการอุตสาหกรรม

ในกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีอนุภาคเกี่ยวข้องการป้องกัน (prevention) ไม่ให้เกิดการระเบิดเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการแต่ส่วนมากการระเบิดของอนุภาคมักเป็นอุบัติเหตุที่คาดไม่ถึงในกระบวนการ ดังนั้นหากเกิดขึ้นแล้วก็ควรมีการบรรเทาการระเบิดนั้นให้ส่งผลน้อยที่สุดต่อกระบวนการ การป้องกันการระเบิดจากแหล่งชนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบได้กล่าวไว้ในข้างต้น ส่วนการป้องกันจากหมอกฝุ่นโดยเติมสารเฉื่อยเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ หรือก๊าซไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับระบบในกระบวนการ แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการบรรเทาแรง (ความดัน) จากการระเบิดด้วยตัวช่องระบายแรงดันจากการระเบิด

### 2.7.1 ช่องระบายแรงดันจากการระเบิด

จุดประสงค์ของการระบายแรงดันคือปลดปล่อยแรงดันจากการระเบิดด้วยช่องระบายที่มีพื้นที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วโดยช่องระบายแรงดันนี้จะมีขีดจำกัดการทนแรงดันที่เพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดันที่ยอมรับได้พิจารณาจากภาชนะว่าเป็นแรงดันที่ยังไม่ทำให้ภาชนะแตกฉีกขาดหรือไม่เปลี่ยนรูปร่าง แรงดันสูงสุดจากการระเบิดภายในภาชนะที่มีช่องระบายเรียกว่า”

แรงดันลดของการระเบิด” (Reduced explosion pressure;  $P_{red}$ ) แรงดันนี้เกิดจากกระบวนการสองขั้นตอน คือการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นทำให้เกิดความร้อนและการเพิ่มขึ้นของแรงดัน อีกกระบวนการคือการไหลออก(การระบาย)ของหมอกฝุ่นที่ไม่เผาไหม้ หมอกฝุ่นที่กำลังเผาไหม้ และหมอกฝุ่นที่เผาไหม้แล้วเป็นการลดแรงดัน ทั้งสองกระบวนการนี้จะทำให้หมอกฝุ่นปั่นป่วนเป็นการเพิ่มอัตราการเผาไหม้ของหมอกฝุ่นด้วย ค่า  $P_{red}$  ส่วนมากจะมีค่าประมาณสองส่วนสามเท่าของความดันที่ทำให้ภาชนะแตกฉีกขาด

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
- (4) ความน่าเชื่อถือ คือช่องระบายแรงดันต้องใช้งานได้ตลอดเวลาเมื่อเกิดการระเบิด

## 2.7.2 ท่อดับเปลวไฟจากการระเบิด (Quenching tube)

เป็นอุปกรณ์เพิ่มเติมที่ต่อจากแผ่นระบายแรงดัน (bursting panels) ออกมานอกภาชนะที่ใส่วัสดุอนุภาค มีลักษณะเป็นท่อขนาดใหญ่ภายในผนังท่อมี่พื้นที่มากและออกแบบให้มีความดันลดต่ำแต่ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคสูงและประสิทธิภาพการหล่อเย็นก๊าซเผาไหม้สูง ข้อดีของท่อดับเปลวไฟอีกข้อคือถ้าก๊าซเผาไหม้เป็นก๊าซพิษ เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ จะไม่เกิดการรั่วไหลสู่บรรยากาศ แรงดันสูงสุดจากการระเบิดในภาชนะจะมากขึ้นปานกลางเมื่อติดท่อดับเปลวไฟ แต่สามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มพื้นที่ระบายแรงดัน อุณหภูมิที่สูงของก๊าซเผาไหม้จากหมอกฝุ่นโลหะเบา (เช่น แมกนีเซียม อลูมิเนียม ซิลิกอน เป็นต้น) จะทำให้ผนังด้านในท่อดับเปลวไฟเสียหายได้แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยเปลี่ยนวัสดุของผนังท่อ

## 2.8 งานวิจัยและผลการศึกษานานที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1979 การระเบิดของวัสดุอนุภาคครั้งใหญ่เกิดขึ้นที่โรงงานผลิตอาหารสัตว์ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Lerida ประเทศสเปน มีผู้เสียชีวิต 10 คนและอาคารลำเลียงอนุภาคเสียหาย อุบัติเหตุการระเบิดของวัสดุทางการเกษตรมีได้มีเพียงที่เดียวยังเกิดขึ้นที่ Pozoblanco (Córdoba) 1984, Nogales (Palencia) 1993 and Fuentepelayo (Segovia) 1993



อุบัติเหตุจากการระเบิดวัสดุอนุภาคไม่ใช่เรื่องใหม่ที่เกิดขึ้น แต่เป็นปัญหาเดิมที่มักเกิดกับของแข็งที่มีขนาดเล็ก เช่น ในปี 1785 ได้มีบทความเกี่ยวกับการระเบิดของโรงเก็บแป้งที่เมือง Turin เป็นครั้งแรกอุบัติเหตุดังกล่าวยังเกิดในหลายประเทศดังที่ทราบกันดี เช่น ที่นอร์เวย์ (Port silo in Stavanger), เยอรมัน (Flour mill in Bremen), อาเจนตินา (Terminal de Grano in Bahía Blanca), ฝรั่งเศส (Malt silo in Metz), สหรัฐอเมริกา (Grain silo plant at Corpus Christi, Texas)<sup>(6)</sup> จากความเสียหายของการระเบิดที่เกิดขึ้นทำให้งานวิจัยส่วนมากมิได้มุ่งไปที่ผลหลังจากเกิดการระเบิดเพียงอย่างเดียว แต่ยังหาวิธีชะงขวางไม่ให้เกิดอุบัติเหตุดังที่ผ่านมา



รูปที่ 2.24 เหตุการณ์ระเบิดของอนุภาคในเมือง Blaye (1997)

ถึงแม้ความรู้ของการระเบิดวัสดุอนุภาคจะมีมากกว่า 200 ปี แต่ก็ยังมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นอยู่บ่อย เช่น ที่เพิ่งเกิดขึ้นในไซโลเก็บผงจากเมล็ดพืชทางการเกษตรที่เมือง Blaye ประเทศฝรั่งเศส เมื่อเดือนสิงหาคม ปี 1997 (ดังรูปที่ 2.24) มีผู้เคราะห์ร้าย 11 ราย และการระเบิดของผงจากเมล็ดพืชในลิฟท์ขนย้ายอนุภาคที่เมือง Haysville รัฐ Kansas สหรัฐอเมริกา เมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 1998 เป็นเหตุให้มีผู้เสียชีวิต 7 ราย บาดเจ็บ 10 ราย ประเมินความเสียหายทั้งในระยะสั้นและระยะยาวเป็นเงิน 850,000 เหรียญสหรัฐ

จากการศึกษาข้อมูลในอดีต พบว่าอุตสาหกรรมเกษตรมีประวัติของการเกิดอุบัติเหตุมาช้านาน ซึ่งจุดที่สามารถเกิดได้ทั้งที่ลิฟท์ลำเลียงของ (grain elevators) เครื่องโม่วัตถุดิบ (feed mills) เครื่องโม่แป้ง (flour mills) ดังนั้นศาสตราจารย์ Schoeff (Dept. of Grain Science and Industry, KSU) ได้ร่วมมือกับ Ralph Regan (Safety Director, US Department of Agriculture) ได้ทำการรวบรวมสถิติของการระเบิดผงจากเมล็ดพืชทางการเกษตรในสหรัฐอเมริกา พบว่าในช่วงปี

1980 จำนวนอุบัติเหตุของการระเบิดวัสดุทางการเกษตรที่มีการรายงานมีประมาณ 17 ราย ในช่วงปี 1988-1997 มีประมาณ 13 รายต่อปี (รวม 129 ข้อมูล) ประเมินค่าเสียหายประมาณ 7.7 ล้านดอลลาร์สหรัฐ นอกจากนี้ยังได้สรุปเปอร์เซ็นต์ของแหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิดจาก 70% ของข้อมูลการระเบิดในอุตสาหกรรมการเกษตรทั้งหมด 129 ข้อมูล และบริเวณแรกที่เกิดการระเบิดจาก 91% ของข้อมูลทั้งหมด ในช่วงปี 1988-1997 ไว้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 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 2.2 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

ในประเทศไทย ยังไม่พบเห็นรายงานเกี่ยวกับสถิติการระเบิดของวัสดุอนุภาคอย่างเป็นทางการ แต่จะพบเห็นได้จากทางหนังสือพิมพ์บ้าง หรือจากบุคคลที่ทำงานในอุตสาหกรรมต่างๆ บ้างว่ามีอุบัติเหตุประเภทนี้เกิดขึ้นอยู่เรื่อยๆ ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2545 บริษัท แป้งมัน ราชสีมา จำกัด ก็มีอุบัติเหตุการระเบิดของแป้งมันที่ขนถ่ายในท่อ มีผู้เสียชีวิต 1 ราย และบาดเจ็บ 6 ราย ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วเป็นต้น

## 2.9 ผลงานวิจัยในอดีต

ต้นทระพานิชกุล และคณะ (1996) จัดสร้างเครื่องค้นแบบสำหรับทดสอบคุณสมบัติการระเบิดของวัสดุอนุภาคชนิด Hartmann bomb ใช้ในการศึกษาวัดค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (Lower Explosion Limit, LEL) ของตัวอย่างวัสดุอนุภาคต่างๆ ภายในประเทศ โดยใช้ Lycopodium, HDPE, dextrin และ sulfur ในการสอบเทียบเครื่องพบว่าให้ค่า LEL ใกล้เคียงกับค่า LEL ที่มีตีพิมพ์ในต่างประเทศ ผลการทดลองพบว่าค่า LEL จะเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของแต่ละส่วนย่อยของวัสดุอนุภาค และยังได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของวัสดุอนุภาคละเอียดสุดในแต่ละส่วนย่อยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากันด้วย นอกจากนี้ตามที่กล่าวไว้ความชื้นมีผลให้ค่า LEL สูงขึ้น

Shu และ Wen (2002) ศึกษาสมบัติด้านการระเบิดของ o-xylene (OX)/air mixture ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต phthalic anhydride (PA) สมบัติที่ศึกษาได้แก่ ขอบเขตของการระเบิด ปริมาณออกซิเจนน้อยสุดที่ใช้ (MOC) ความดันสูงสุดของการระเบิด และบริเวณที่เกิดการแพร่กว้างของเปลวไฟ ซึ่งได้ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบขนาด 20 ลิตร (20-l-apparatus) ภายใต้ความดันเริ่มต้นค่าต่างๆ คือ 760, 1520 mmHg และ 2280 mmHg ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าถ้าออกซิเจนในอากาศมีปริมาณถึง 40vol% ใน OX/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixture จะทำให้ระดับ Kst class เปลี่ยนจาก St-0 เป็น St-3 และ MOC มีค่าลดลงเมื่อ O<sub>2</sub> มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณ O<sub>2</sub> เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการประเมินความรุนแรงของการระเบิด การเพิ่มค่าความดันเริ่มต้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณ PA ให้มากขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มช่วงกว้างของบริเวณเปลวไฟซึ่งทำให้เกิดอันตรายมากขึ้น ดังนั้นวิธีแก้ไขก็คือต้องให้ความเข้มข้นของ OX สูงกว่า upper flammable limit ดังนั้นสภาวะในกระบวนการจึงไม่ลุกติดไฟ. นอกจากนี้ผลการทดลองยังสามารถได้จากเครื่องทดสอบขนาด 1 ลิตรอีกด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองก็ได้ผลเป็นที่ยอมรับได้เช่นกัน

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

หัวฉีดแบบ rebound และ Dahoe ทำให้อุณหภูมิถูกฉีดขึ้นถึงด้านบนของเครื่องและตกลงมากลางเครื่อง (ตำแหน่งการจุดระเบิด) ภายใน 10 มิลลิวินาที

Radandt และคณะ (2001) ทำการทดลองโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาผลของสัดส่วนความสูงต่อความกว้าง (H/D ratio ; ในช่วง 8-15) ของเครื่องทดสอบที่ปริมาตรเท่ากัน ต่อค่าความดันสูงสุด ( $P_{max}$ ) 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) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบแบบ Fike 1- $m^3$  chamber และ Pittsburgh Research Laboratory 20 liters chamber เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของการระเบิดวัสดุอนุภาค (เช่น LEL, Pressure,  $K_{st}$ , Percent  $O_2$  เป็นต้น) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ข้อได้เปรียบของเครื่องทดสอบขนาด 20 liters คือ ใช้เวลาในการทดลองน้อย และใช้ตัวอย่างน้อยกว่า แต่ถ้าตัวอย่างวัสดุอนุภาคระเบิดได้ยาก (มีค่า LEL สูง) แนะนำให้ใช้เครื่องขนาด 1  $m^3$

Conde Lazaro และ Garcia Torrent (2000) ศึกษาผลของความดันเริ่มต้นก่อนการระเบิด (ศึกษาในช่วง 1-15 บาร์) ในเครื่องทดสอบขนาด 1  $m^3$  sphere พบว่าความดันเริ่มต้นถ้ามีค่ามากขึ้น ทำให้ค่าความดันสูงสุดของการระเบิด ( $P_{max}$ ) สูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นยังศึกษาผลของความปั่นป่วนว่ามีผลทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน  $[(dP/dt)_{max}]$  สูงขึ้น

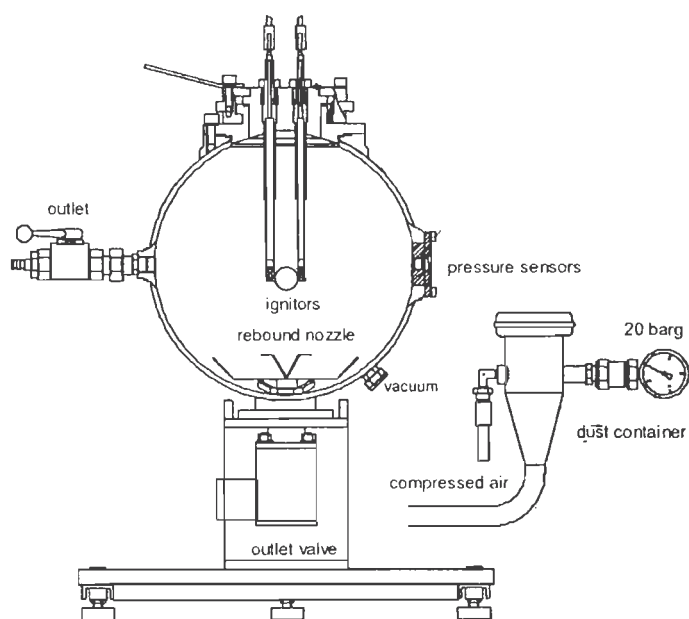
## บทที่ 3

### การพัฒนาสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดวัสดุอนุภาค

#### 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. ส่วนห้องจุกระเบิด (Explosion Chamber Section)
2. ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค (Compressed Air and Particle Supply Section)

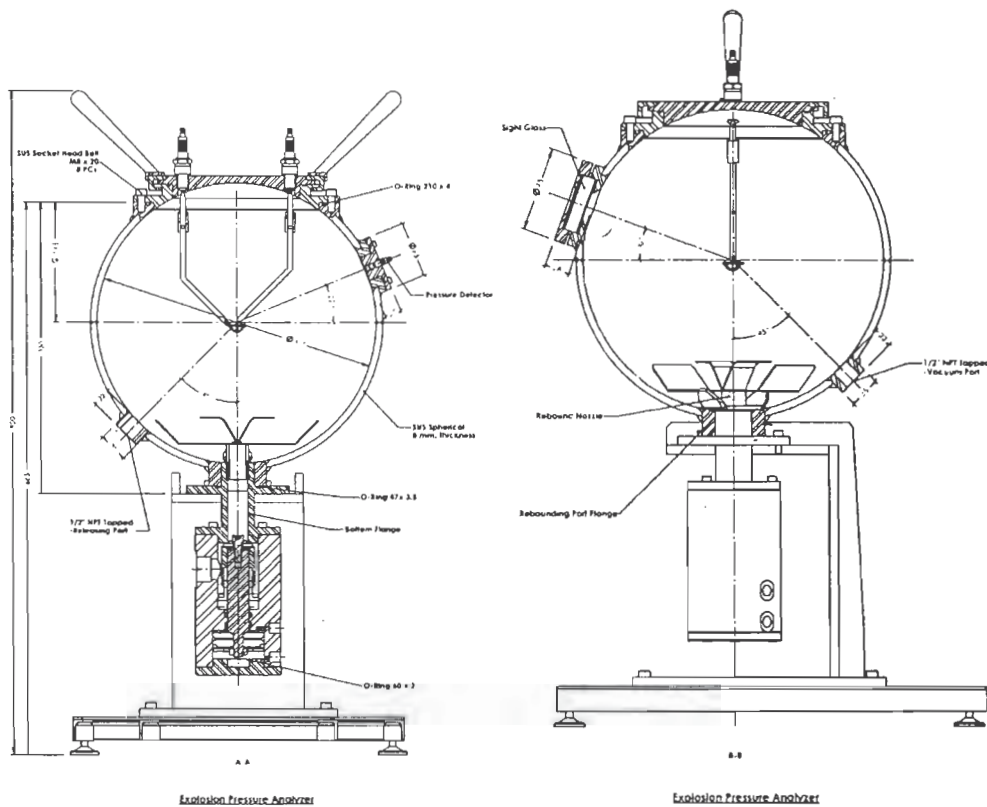


รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร

#### 3.1.1 ส่วนห้องจุกระเบิด มีองค์ประกอบหลักดังนี้

##### 3.1.1.1 ห้องจุกระเบิดปริมาตร 20 ลิตร

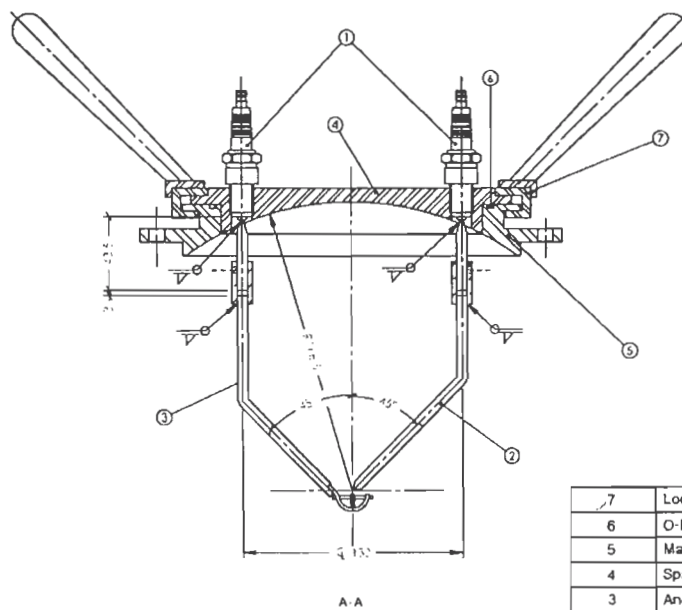
ห้องจุดระเบิดที่พัฒนาขึ้นในงานนี้มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 337 มิลลิเมตร ทำจากสเตนเลส เบอร์ 316 ทนความดันได้ 20 บาร์ ดังรูปที่ 3.2 ด้านบนของถังเป็นฝาปิดประกอบด้วยหน้าแปลนที่เชื่อมติดกับตัวถัง (Upper port flange) และยึดติดกับหน้าแปลนอีกชั้น (Main support ring) ด้วยน็อตเกลียวปลั๊ยเบอร์ M8 ขนาด 20 มิลลิเมตรซึ่งตรงกลางเป็นที่วางเพื่อใส่ฝาของขั้วไฟฟ้า (Spark holding plug plate) ที่ด้านในมีลักษณะโค้งครึ่งวงกลม และมีแหวนล็อกซึ่งมีด้ามจับใช้ล็อกฝาและหน้าแปลน (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)

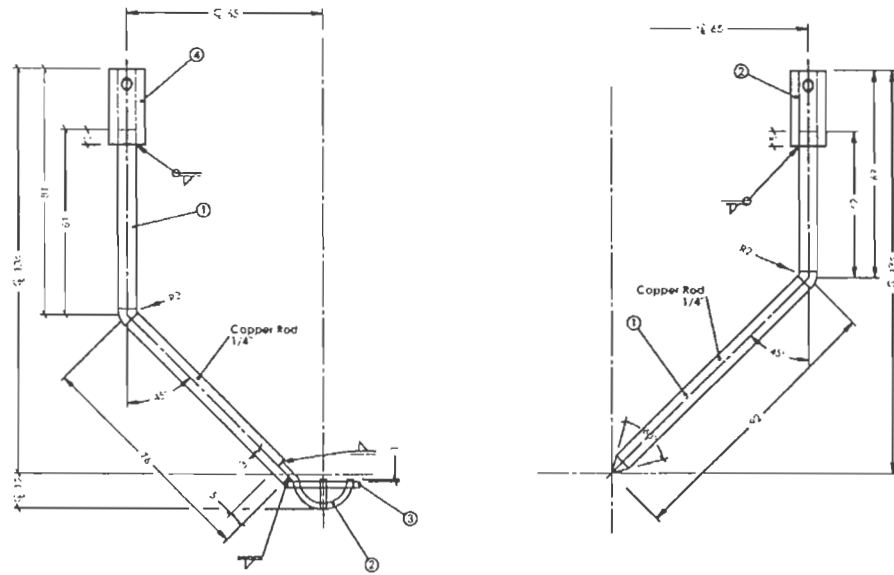
### 3.1.1.2 ชุดฝาปิดพร้อมขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ตำแหน่งของกระเปาะเพื่อใส่จำนวนเพื่อจุดระเบิด อยู่กึ่งกลางของห้องจุดระเบิดพอดี (รัศมีเท่ากับ 168.5 มิลลิเมตร) ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วของหัวเทียนที่ขันเกลียวอัดเข้ากับฝาและเชื่อมต่อกับลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ลวดทองแดงที่ต่อยาวลงมาขนาดเดียวกันยึดติดกับลวดทองแดงที่ติดกับหัวเทียนด้วยปลอกที่ออกแบบขึ้นดังรูปที่ 3.4 ชุดฝาทั้งหมดจะยึดกันด้วยตัวล็อก (Locking ring) และป้องกันการรั่วด้วย O-ring ที่หน้าสัมผัสของหน้าแปลน (Main support flange) และฝาปิด (Spark plug plate)



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 with 1/4" Copper Rod 40 Length	2
ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.

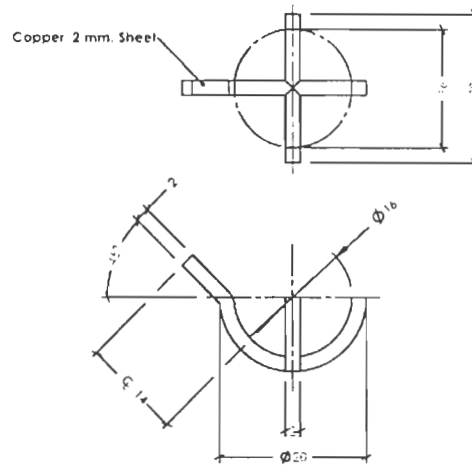
รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าพร้อมฝาปิดของห้องจุดระเบิด



รูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด

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





รูปที่ 3.5 ปลายข้อวิเล็คโทรดลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลม

#### 3.1.1.3 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุดระเบิด

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ประกอบด้วยหน้าแปลนที่เชื่อมติดผนังของและหน้าแปลนที่ใส่กระจกคาร์มิเนตหนา 8 มิลลิเมตร บิดติดกับหน้าแปลนที่ถึงด้วยน็อตเกลียวปล่อยเบอร์ M4 ขนาด 15.6 มิลลิเมตร

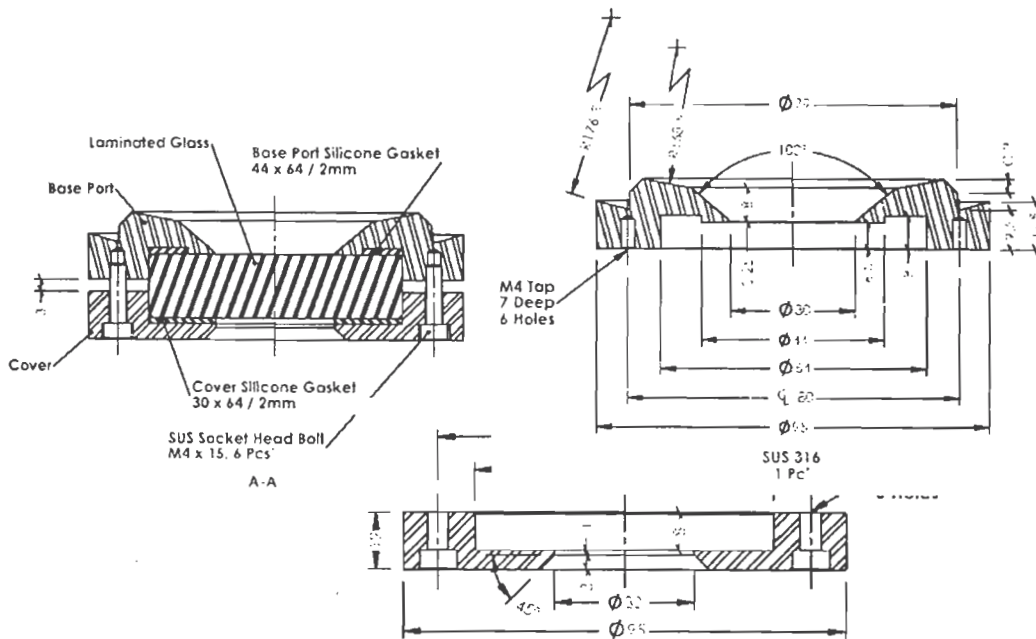
#### 3.1.1.4 ชุดหัววัดแรงดันจากการจุดระเบิด

ในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นลักษณะคล้ายกับช่องมองแต่หน้าแปลนชิ้นที่ไม่ติดกับถังต้องมีความหนาเท่ากับความสูงของหัววัดแรงดัน (Pressure sensor) เพื่อให้หัววัดเข้าไปได้ ให้พอดีผนังด้านในถึงซึ่งต้องอาศัยความชำนาญในการกลึงชิ้นงานอย่างมาก นอกจากนี้ที่หัววัดต้องใส่ฉนวนกันรอยรั่วซึ่งมีลักษณะเป็นปลอกวงแหวนใส่ตรงกลางของหัววัด ข้อดีของการให้ชุดหัววัดแรงดันสามารถถอดจากหน้าแปลนได้ คือหากต้องการเปลี่ยนค่าวัดเป็นตัวแปรอื่น เช่น วัดอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลก็สามารถทำได้โดยใส่ชุดหน้าแปลนใหม่เข้าไป

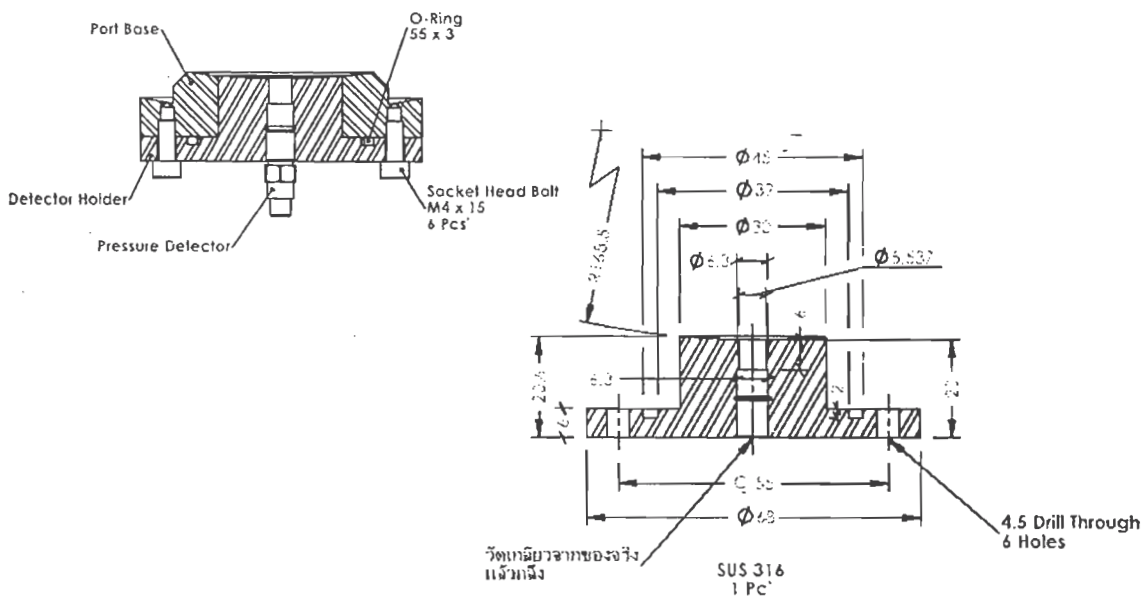
#### 3.1.1.5 ส่วนของช่องดึงอากาศ และระบายก๊าซจากการระเบิด

ส่วนนี้ทำโดยการเจาะรูด้านล่างของถังทำมุม 45 องศา กับแกน Y และเชื่อมแหวน (ท่อทรงกระบอกเล็กๆ) สูง 22 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 35 มิลลิเมตร ภายในเป็นเกลียวเพื่อใส่ท่อเพื่อต่อกับเกจวัดแรงดันสุญญากาศ และบอลวาล์วเพื่อต่อบีมสุญญากาศ การดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิดเพื่อลดแรงดันภายในถึงให้เกิดความดันแตกต่างที่มากพอในการ

กระจายอนุภาคในระยะเวลาสั้น โดยปกติความดันที่ลดลงภายในถึงตามมาตรฐานเท่ากับ -0.6 ถึง -0.7 บาร์เกจ ส่วนด้านระบายก๊าซก็มีลักษณะเช่นเดียวกันแต่จะใช้บอลส่วลั่วต่อเข้ากับท่อพลาสติก



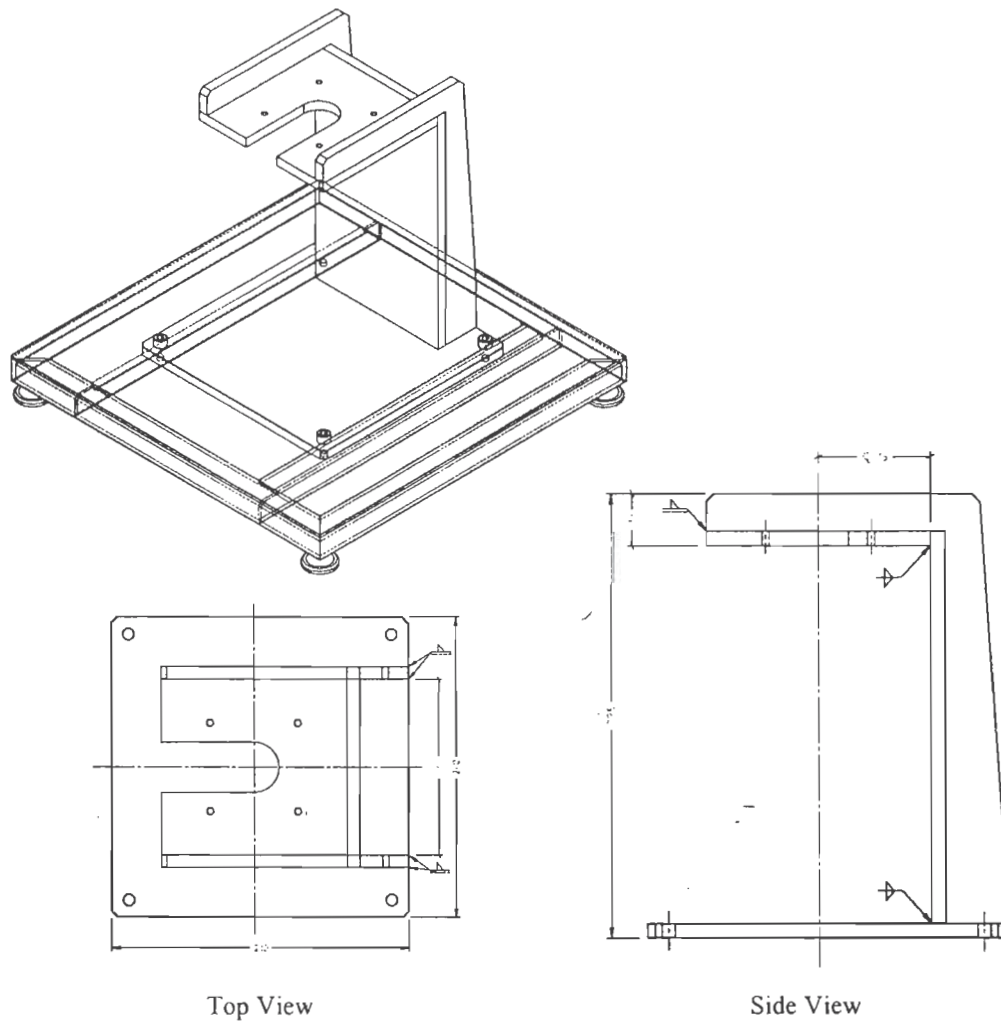
รูปที่ 3.6 ช่องมองการระเบิดของอนุภาคภายในห้องจุกระเบิด



รูปที่ 3.7 หน้าแปลนติดตั้งชุดหัววัดแรงดันจากการจุกระเบิดที่ผนังของห้องจุกระเบิด

### 3.1.1.6 ฐานและแท่นของเครื่องทดสอบ

ดังในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นฐานของเครื่องทำจากสแตนเลสขนาด 400 x 400 มิลลิเมตรด้านล่างติดขาตั้งซึ่งสามารถปรับระดับได้ที่มุมทั้งสี่ จากฐานมีแท่นลักษณะคล้ายตัว Z ซึ่งมีความสูง 295 มิลลิเมตรใช้รองรับบริเวณฐานของห้องจูดระเบิด โดยเป็นที่วางของหน้าแปลนของท่อลำเลียงอนุภาคและอากาศอัดจากวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)



รูปที่ 3.8 ฐานและแท่นรองรับเครื่องทดสอบ

### 3.1.2 ส่วนจ่ายลมอัดและวัสดุอนุภาค มีอุปกรณ์หลักดังนี้

#### 3.1.2.1 ถังอากาศอัด (Air zero)

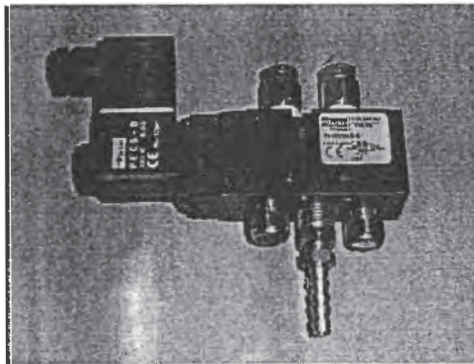
ประกอบด้วยออกซิเจน 21%และไนโตรเจน 79% อัดในถังปริมาตร 6 ลิว ทำหน้าที่จ่ายอากาศอัดผ่านวาล์วปรับแรงดันเท่ากับ 12.5 บาร์ ผสมกับอนุภาคภายในกระบอกเก็บอนุภาคขนาด 0.6 ลิตร อากาศอัดและอนุภาคจะเข้าสู่ห้องจุดระเบิดผ่านทางวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve) ด้วยความดันแตกต่างของความดันในกระบอก 0.6 ลิตร (12.5 บาร์) กับความดันภายในถังขนาด 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 วาล์วนี้อาจใช้สำหรับเปิดให้ลมอัดจากคอมเพรสเซอร์เข้ามาทางด้านหนึ่งแล้วปล่อยให้ลมอัดออกได้สองทางโดยสามารถตั้งเวลาให้ลมอัดออกช่องแรกและออกอีกช่องทางหนึ่งเมื่อถึงเวลา เป็นการควบคุมการเปิดปิดลูกสูบภายในวาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)



รูปที่ 3.9 โซลินอยวาล์วจ่ายลมอัดให้วาล์วทรงกระบอก

#### 3.1.2.4 บีบสูญญากาศ

บีบนี้ใช้สำหรับดึงอากาศออกออกจากถังระเบิดขนาด 20 ลิตรเพื่อให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างถังขนาด 0.6 ลิตร และขนาด 20 เพื่อประโยชน์ในการส่งผ่านอนุภาคและอากาศเข้าสู่ถังระเบิดขนาด เมื่อเริ่มทำการทดลองให้เปิดวาล์วคัปป์ทำงานจากเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นอากาศในถังจะถูกดึงออกผ่านที่กรองอนุภาคจนแก่ความดันถึงค่าที่ต้องการ (-0.6 บาร์เกจ)

### 3.1.2.5 วาล์วทรงกระบอก (Outlet valve)

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

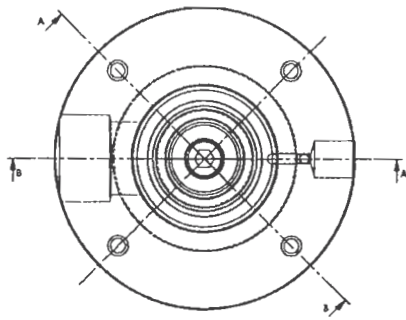
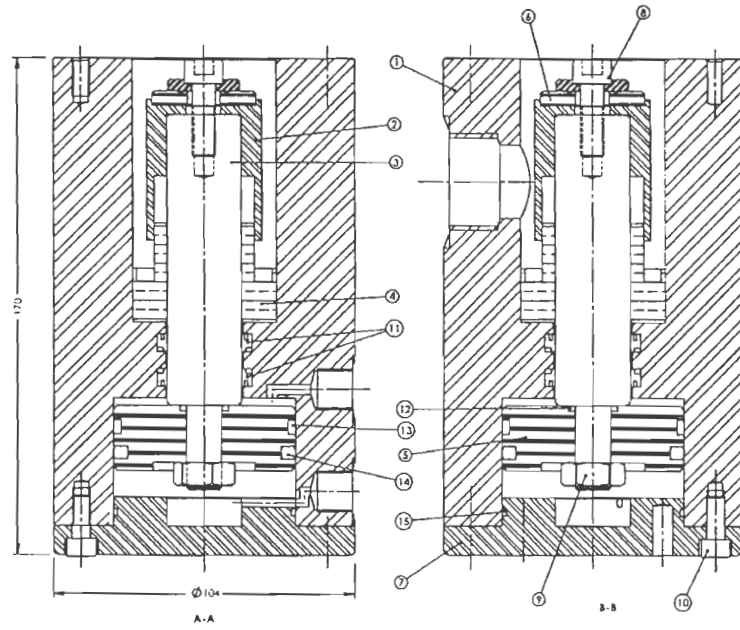
### 3.1.2.6 แผ่นกระจายอนุภาค (Rebound nozzle)

ภายในห้องจุดระเบิดด้านล่างซึ่ง แสดงในรูปที่ 3.11 ด้านล่างของแผ่นกระจายอนุภาคชั้นเข้ากับท่อที่เชื่อมระหว่างวาล์วทรงกระบอกกับถัง ขนาดและรูปร่างของแผ่นกระจายอนุภาคเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E1226

### 3.1.2.7 ท่อลม

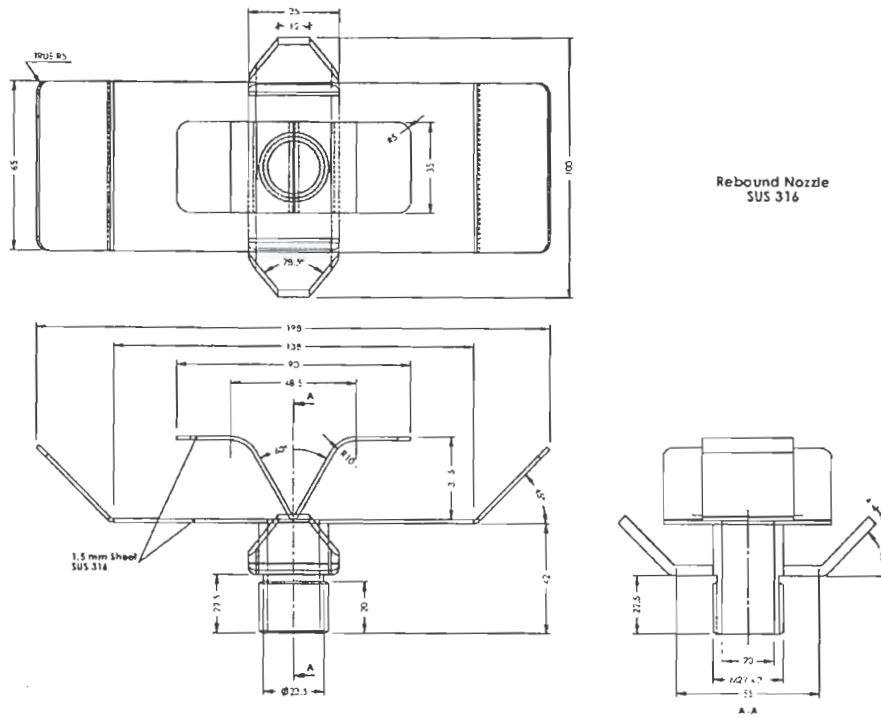
เป็นท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.5 มิลลิเมตร ต่อจากคอมเพรสเซอร์และโซลินอยวาล์ว อีกเส้นเป็นสายลมแรงดันสูงเข้าหัวแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตรจากถังอากาศอัด

รูปที่ 3.12-3.13 เป็นภาพถ่ายเครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคและอุปกรณ์เสริมในมุมมองที่ต่างกัน

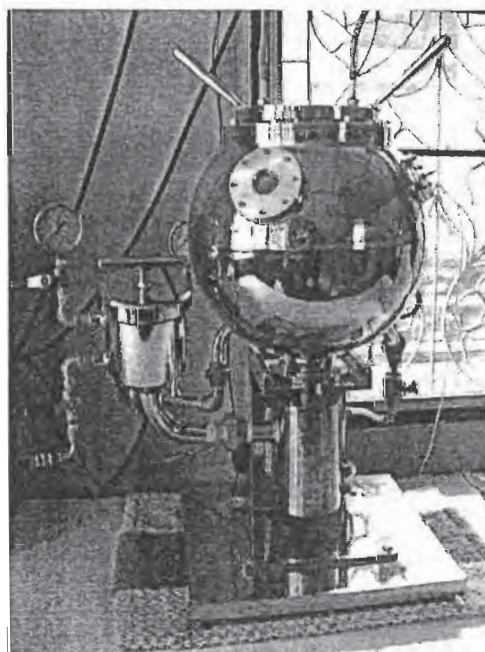


- ① PISTON HOUSING
- ② PISTON HEAD
- ③ PISTON ROD
- ④ BRASS SLEEVE
- ⑤ PTFE PISTON
- ⑥ PTFE WASHER
- ⑦ HOUSING COVER
- ⑧ SUS SOCKET HEAD BOLT & WASHER -M8
- ⑨ SUS NUT -M12
- ⑩ SUS SOCKET HEAD BOLT -M6 . 4 PCS'
- ⑪ RADIAL SEALS - 2 PCS'
- ⑫ PISTON ROD O-RING
- ⑬ FLAT SEAL RING
- ⑭ PTFE PISTON O-RING
- ⑮ HOUSING COVER O-RING

รูปที่ 3.10 วาล์วทรงกระบอกสำหรับถ่ายเทอนุภาคและอากาศอัดเข้าสู่ห้องจุดระเบิด



รูปที่ 3.11 แผ่นกระจายอนุภาค



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายห้องจุกระเบิดขนาด 20 ลิตรพร้อมฐานและอุปกรณ์ต่อพ่วง

### 3.2. ชุดวัดแรงดันจากการระเบิด

#### 3.2.1 หัววัดแรงดัน (Pressure sensors)

หัววัดแรงดันซึ่งติดตั้งที่ผนังของห้องจุกระเบิดใช้หลักการ Piezoelectric กล่าวคือ ภายในหัววัดเป็นผลึกควอทซ์ที่เปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับความดัน การเปลี่ยนรูปร่างของควอทซ์ทำให้เกิดประจุไฟฟ้า (หน่วยคูลอมบ์; C) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความดันแตกต่างที่กระทำต่อผิวสัมผัสของควอทซ์ เพราะหลักการของ Piezoelectric สามารถวัดได้เฉพาะความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นเท่านั้น และย่านในการวัดเท่ากับ 0-500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้นความดันเริ่มต้นเมื่อดึงอากาศออกจากห้องจุกระเบิด (ความดันสูญญากาศ) จึงไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นกราฟความดันก่อนเปิดวาล์วทรงกระบอกค่าจะอยู่ที่เส้นศูนย์ซึ่งเป็นระดับอ้างอิง

ดังที่กล่าวหัววัดต้องมีฉนวนลักษณะเป็นวงแหวนใส่เข้าไปเพื่อกันรอยรั่วบริเวณหัวสายสัญญาณต้องขันให้แน่นเพราะอาจเกิดการลดลงและไม่เสถียรของประจุค่าวัด

#### 3.2.2 ตัวแปลงค่าประจุคูลอมบ์เป็นสัญญาณอะนาล็อก (Transmitter)

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

#### 3.2.3 สายสัญญาณ

สายสัญญาณนี้มีสองสายคือสายจากหัววัดแรงดันมาทรานสมิตเตอร์ซึ่งเข้าหัวแบบ BNC และจากทรานสมิตเตอร์เข้าสู่แผงเชื่อมสายสัญญาณซึ่งเป็นหัวแบบ BNC เช่นเดียวกันสายสัญญาณมีฉนวนกันสัญญาณรบกวนอย่างดี

#### 3.2.4 ชุดกรองสัญญาณรบกวน (Signal isolator)

ทำหน้าที่กรองสัญญาณ โวลต์จากภายนอกระบบที่เข้ามารบกวนสัญญาณ โวลต์จากชุดวัดแรงดัน นอกจากนี้ยังช่วยให้สัญญาณวัดที่ได้มีความเสถียรมากขึ้น



## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

#### 4.1 สภาพะในการทดสอบ

##### 4.1.1 บรรยากาศขณะทำการทดลอง ได้แก่

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

โดยปกติค่าเหล่านี้จะถูกบันทึกลงในโปรแกรมการทดสอบทุกครั้งเมื่อเริ่มการ

ทดลอง

##### 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 ให้ตรวจสอบรอยรั่วตามท่อและถอดควาล์วทรงกระบอกมาทำความสะอาดและตรวจสอบรอยรั่ว

4.1.2.3 ความสะอาดของห้องจุระเบิด ต้องแห้งและไม่มีอนุภาคตกค้างบริเวณหัววัดแรงดันและช่องมอง

#### 4.2 การเตรียมก่อนการทดสอบ

##### 4.2.1 วัสดุอนุภาคที่จะใช้ทดสอบนั้น ต้องมีการเตรียมการดังนี้

##### 4.2.1.1 การเก็บ

เพื่อคงสภาพวัสดุอนุภาคไว้ตามเดิม จึงต้องเก็บไว้ในภาชนะที่มีชนิดอากาศและอุณหภูมิไม่สูง แต่ถ้ามีโอกาสสูงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพระหว่างการเก็บรักษา ก็ควรทดสอบวัสดุอนุภาคนั้นทันทีที่ได้รับมา

##### 4.2.1.2 การเตรียม

(1) เนื่องจากขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงของการระเบิด จึงจำเป็นต้องทำการร่อนโดยใช้ตะแกรงเพื่อคัดขนาด

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

(3) หากสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบฟุ้งกระจายได้ยาก สามารถเติมสารช่วยกระจายตัวผสมเข้าด้วยกันอนุภาคที่ทดสอบ อาทิเช่นเต็มดินแห้ง (fuller earth) ไกลโคโพลีเอทิลีน แมกนีเซียมออกไซด์เบา หรือ ซิลิกอน ไดออกไซด์ เมื่อใดก็ตามที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัว จะต้องมีการระบุสารที่เติมและปริมาณ 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 และมีกลไกการการัน โดยใช้สปริงสามารถปรับความถี่ของการร่อนได้

(3) ใช้อนุภาคตัวอย่างประมาณ 100 กรัมในการคัดขนาดแต่ละครั้ง วางอนุภาคที่ชั่งน้ำหนักแล้วบนตะแกรงบนสุด (ขนาด 180 ไมครอน) จากนั้นปิดฝาถือชุดตะแกรงด้วยตัวล็อก ตั้งเวลาไว้ประมาณ 5 นาที ความถี่ในการร่อนที่ 5 เฮิร์ตซ์ หลังจากการร่อนเสร็จสิ้นลง นำตะแกรงที่มีอนุภาคค้างอยู่ทุกๆ ขนาด ไปชั่งที่ตะแกรง นำค่าน้ำหนักนี้มาหักลบด้วยน้ำหนักของตะแกรงเปล่าขนาดเดียวกันนั้น ก็จะได้ น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง

#### 4.2.2 สารจุดชนวนระเบิด

เนื่องจากเครื่องทดสอบมีปริมาตรมากดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการจุดระเบิดจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ จึงต้องมีพลังงานจากการระเบิดจากสารเคมี เรียกว่า “Pyrotechnic ignitors” ซึ่งต้องให้พลังงานจากการระเบิดเท่ากับ 10,000 จูล

##### 4.2.2.1 การเตรียม

สารเคมีที่ให้พลังงานจากการระเบิด 10,000 จูล ตามมาตรฐาน ASTM E1226 ได้แก่สารผสมน้ำหนัก 2.4 กรัมที่ประกอบด้วย

เซอโคเนียม (zirconium) 40% โดยน้ำหนัก เป็นของแข็งสีดำออกเทา เก็บอยู่ในน้ำ การเตรียมให้ชั่งน้ำหนักสารตามอัตราส่วนใส่ไว้ในกระดาศขังสาร แล้วเก็บไว้ในภาชนะดูความชื้น ห่างจากความร้อนและมิดชิดจากอากาศ

- แบริยมไนเตรด (barium nitrate) 30% โดยน้ำหนัก ลักษณะเป็นผลึกสีขาวใส การเตรียมและการเก็บเช่นเดียวกับเซอโคเนียม

- แบริยมเปอร์ออกไซด์ (barium peroxide) 30% โดยน้ำหนัก ลักษณะเป็นผงสีเหลืองออกน้ำตาล การเตรียมและการเก็บเช่นเดียวกับเซอโคเนียม

#### 4.2.2.2 การใส่สารจุดชนวนระเบิดที่ขั้วอิเล็กโทรด

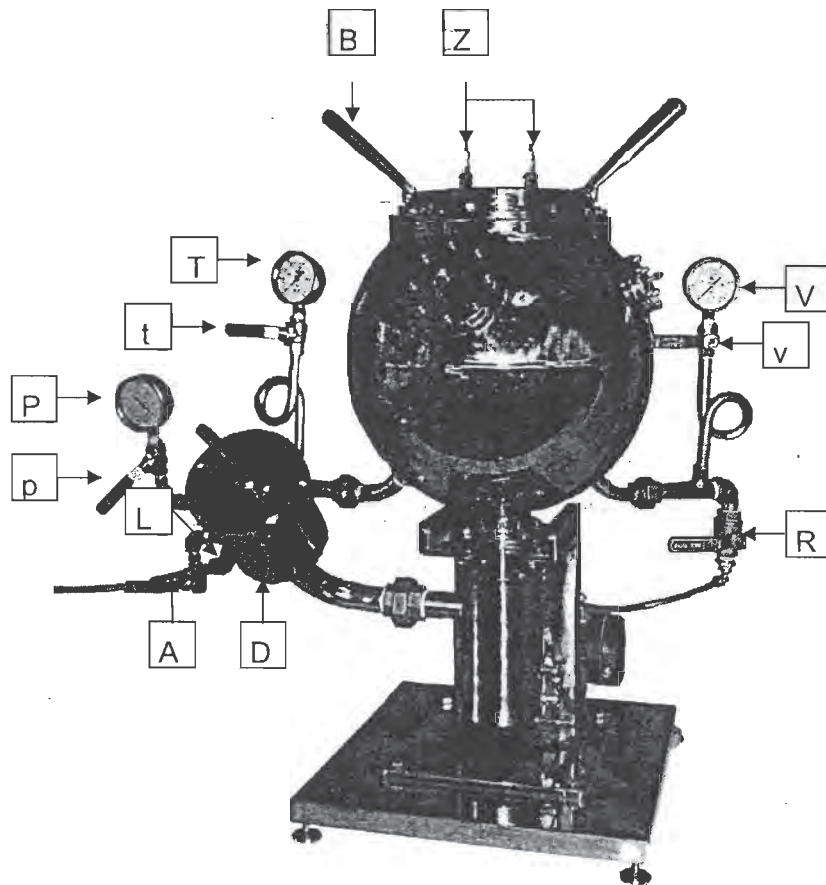
เทนำสารทั้งสามมาผสมกันบนกระดาศขังสารของเซอโคเนียมให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นให้นำกระดาศขังสารที่มีสารจุดชนวนระเบิดอยู่ตรงกลางหุ้มที่ปลายขั้วอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นกระเปาะครึ่งวงกลมให้สารอยู่ภายในกระเปาะ แล้วให้กระดาศหุ้มที่ปลายขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การใส่สารจุดชนวนระเบิดที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด

#### 4.3 การทดสอบขั้นต้น

การทดสอบขั้นต้นกระทำเพื่อทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียวโดยปราศจากอนุภาค และเพื่อทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสมโดยอาศัยการสังเกตสภาพอนุภาคที่ค้างอยู่บนขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.2 เครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาค จุฬาฯ

4.3.1 การทดสอบหาความดันเริ่มต้นที่เหมาะสม

การทดสอบเบื้องต้นนี้ให้ทำทุกครั้งเมื่อเริ่มทำชุดการทดลองใหม่ (Series)

4.3.2 การทดสอบแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่างเดียว

การทดสอบเบื้องต้นนี้ให้ทำทุกครั้งเมื่อมีการเตรียมสารจุดชนวนระเบิดชุดใหม่ หรือได้สารจุดชนวนจากแหล่งอื่นมาใหม่

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

หลังจากได้เตรียมอนุภาคตัวอย่างและสารจุดชนวนระเบิดดังกล่าวไว้ในขั้นการเตรียมก่อนการทดสอบ และทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแรงดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนเพียงอย่าง

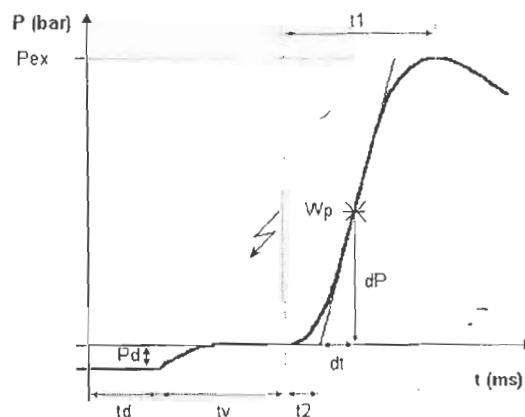
เดียวเมื่อเตรียมสารจุดชนวนใหม่ ทดสอบได้แรงดันเริ่มต้นในการทดลองที่เหมาะสมแล้ว (ผลการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อ 5.1) และตรวจสอบรอยร้าวของชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ปฏิบัติดังต่อไปนี้

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

สามารถนำกราฟการทดลองที่ได้แปลงเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 4.3 ค่าความดันจากการระเบิดของอนุภาค (Maximum explosion Overpressure,  $P_{ex}$ ) เท่ากับผลต่างระหว่างความดัน ณ เวลาที่จุดชนวนระเบิด (ความดันปกติ) กับความดัน ณ จุดสูงสุดของกราฟ

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

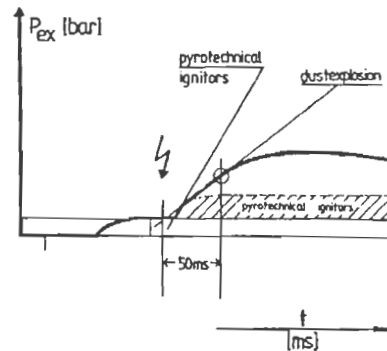
สามารถนำกราฟจากการทดลองหาความดันจากการระเบิดมาหาค่าอัตราของการเพิ่มความดันจากการระเบิด (Rate of Pressure Rise with Time,  $dP/dt$ ) เท่ากับ ค่าความชันสูงสุดของเส้นสัมผัสที่ลากผ่านจุดที่มีความหักเหของมุมที่กระทำต่อแกน  $y$  มากที่สุด (เรียกว่า point of inflexion,  $W_p$ ) ของกราฟในส่วนที่กราฟพุ่งขึ้นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟผลการทดลองแสดงความดันจากการระเบิด ( $P_{ex}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อแสดงค่าตัวแปรของการทดลองและตัวแปรของผลการทดลอง

หลังจากวิเคราะห์ค่า  $(dP/dt)_{ex}$  หากพบว่ามิต่ำกว่า 150 บาร์/วินาที อาจเป็นไปได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดมากกว่าของวัสดุอนุภาค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบระหว่างกราฟความดันจากการระเบิดของอนุภาคกับเวลา และกราฟความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดเพียงอย่างเดียวกับเวลา ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 จากมาตรฐาน ASTM E 1226 ระบุสารจุดชนวนระเบิดที่ให้พลังงาน 10,000

จุด มีค่าอัตราการเพิ่มความดันเท่ากับ 100 บาร์/วินาที หรืออาจตั้งสมมติฐานได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันจากการระเบิดของสารชนวนจุดระเบิดสิ้นสุดลงหลังจากอนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิด 50 มิลลิวินาที (เมื่อค่า  $t_v = 60$  มิลลิวินาที)



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาของสารชนวนจุดระเบิดและวัสดุอนุภาค

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

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

#### 4.4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ทำการทดลองโดยค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นจนพิจารณาได้ค่าความดันสูงสุดจากชุดการทดลองนี้ (Series) เมื่อค่าความดันเปลี่ยนไป ระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
หรือ 2.5; 5; 10; 15; 20; 25; 30 กรัมต่อ 20 ลิตร

(2) 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 แล้วนำมาหาความชันของกราฟตามที่กำลังกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.2

การวิเคราะห์ผลการทดลอง เช่นเดียวกับความดันสูงสุดจากการระเบิดของอนุภาค (ตามมาตรฐาน ASTM E1226) อัตราสูงสุดของการเพิ่มแรงดันจากการระเบิด คือค่าเฉลี่ยของอัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันของแต่ละชุดการทดลอง (มี 3 ชุดการทดลอง)

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

$$K_{St,max} = (dP/dt)_{max} (V)^K$$

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

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; $t_v$ )

ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า  $t_v$  เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิวินาที เมื่อกำหนดให้เวลาหน่วงของการเปิดวาล์ว (Delay time of Outlet valve;  $t_d$ ) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที และช่วงเวลาของการเปิดวาล์ว (Holding time of Outlet valve) เท่ากับ 10 มิลลิวินาที

#### 4.5.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

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

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

(3) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 และ 2 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (10 กรัม/ 20 ลิตร) และ 750 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (15 กรัม/ 20 ลิตร) ตามลำดับ

#### 4.5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

พิจารณากราฟที่ได้จากการทดลอง และค่าความดันสูงสุดที่ได้จากแต่ละ  $t_v$  ที่ทำการทดลอง

#### 4.5.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาค

ทดลองโดยใช้แป้งข้าวโพดที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงที่มีขนาดอนุภาคต่างกันสองขนาดได้แก่

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

- ขนาดอนุภาคเท่ากับ  $d_{p2} < 45 \mu\text{m}$

#### 4.5.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

(1) ทำการคัดขนาดแป้งข้าวโพดตามหัวข้อ 4.1.2.3 นำแป้งข้าวโพดที่ล้างอยู่บนตะแกรงขนาดช่องเปิด (Aperture size) =  $45 \mu\text{m}$  และลอดผ่านตะแกรงขนาด  $75 \mu\text{m}$  เก็บไว้ซึ่งกำหนดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ  $d_{p1}$  และเก็บอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด  $45 \mu\text{m}$  เก็บไว้ส่วนซึ่งกำหนดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ  $d_{p2}$

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

(2) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนมาใช้แป้งข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ  $d_{p2}$

#### 4.5.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เปรียบเทียบค่า  $P_{\text{max}}$  และ  $(dP/dt)_{\text{max}}$  ของแป้งข้าวโพดทั้งสองขนาด



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

ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.4.3 และ 4.4.4 เพื่อหาค่า  $P_{max}$  และ  $(dP/dt)_{max}$  ของอนุภาคไลโคโปเดียม 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

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

อัตราสูงสุดของการเพิ่มความดันเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มความดันในแต่ละชุดการทดลอง 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
$\leq 185$	$\leq 50$	$\pm 30\%$
186-370	51-100	$\pm 20\%$
371-740	101-200	$\pm 12\%$
$> 740$	$> 200$	$\pm 10\%$

#### 4.7 การตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ เปลือกข้าวจากการสีข้าว คริมเทียม และแป้งมันสำปะหลัง โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้จะยังไม่ได้ทำการคัดแยกขนาด

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

#### 5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ

เนื่องจากตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องทดสอบมีหลายตัวแปร แต่ตัวแปรที่สำคัญคือ เวลา หนึ่งของการจุดชนวนระเบิด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 5.2 ส่วนตัวแปรอื่นที่มีผลต่อเครื่องทดสอบซึ่ง จะกล่าวในหัวข้อนี้ เป็นค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด และความดันจากการระเบิดของ สารจุดชนวนซึ่งเมื่อสามารถปรับตั้งค่าที่เหมาะสมได้แล้วก็จะถูกตั้งให้เป็นค่าคงที่เพื่อลดอิทธิพล ของตัวแปรต่อค่าความดันจากการระเบิด โดยนำข้อมูลจากการทดสอบเบื้องต้นมาพิจารณา

##### 5.1.1 ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด

ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิด ( $P_i$ ) คือความดันเมื่ออากาศอัดและอนุภาค ตัวอย่างจากกระบอกเก็บสารเข้าสู่ห้องจุดระเบิดจนหมดก่อนจุดชนวนระเบิด เนื่องจากค่าความดัน สูงสุดจากการระเบิด ( $P_{max}$ ) และค่า  $K_{st,max}$  แปรผันโดยตรงกับความดันความดันเริ่มต้น ( $P_i$ ) ดังนั้น ในแต่ละการทดลองต้องมีค่าความความดันเริ่มต้นเท่ากันทุกครั้งและจัดว่าเป็นตัวแปรคงที่ที่สำคัญ เพราะหากค่า  $P_i$  มีค่ามากค่าความดันจากการระเบิดก็มีค่ามากขึ้นด้วย ค่าความดันเริ่มต้นที่กำหนด ตามมาตรฐาน ASTM E 1226 กำหนดเท่ากับ 1.013 บาร์ (14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

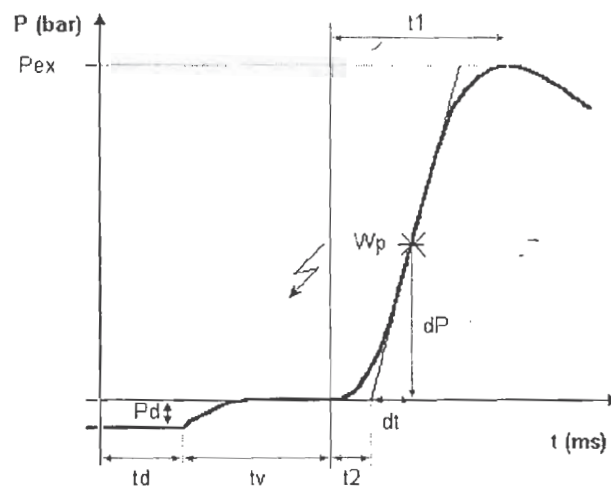
ดังนั้นความดันในการดึงอากาศออกจากห้องจุดระเบิด ( $P_d$ ) และความดันอากาศอัด ภายในกระบอกเก็บอนุภาคตัวอย่างจึงมีผลต่อความดันเริ่มต้น โดยความดันในการดึงอากาศออก จากห้องจุดระเบิดนั้นเมื่อพิจารณา "Operating Instruments for the 20-L Apparatus" ซึ่งเสนอโดย Siwek และ Cesana และจากมาตรฐาน ASTM E1226 ระบุค่าความดัน  $P_d$  เท่ากับ  $-0.6$  บาร์เกจ (0.4 บาร์สัมบูรณ์) การทดลองเบื้องต้นจึงทดลองปรับความดันของอากาศอัดภายในกระบอกเก็บอนุภาค ให้ได้ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดเท่ากับ 1.013 บาร์ (14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และ พิจารณาความฟุ้งกระจายของอนุภาคประกอบด้วย ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นปฏิบัติตามหัวข้อ 4.3.1.1 โดยใช้แป้งข้าวโพด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1

จากผลการทดลองความดันอากาศอัดภาคในกระบอกเก็บอนุภาคที่เหมาะสมเท่ากับ 12.5 บาร์ เนื่องจากทำให้ความดันเริ่มต้นเท่ากับความดันบรรยากาศ และมีส่วนช่วยให้อนุภาคตกลง บริเวณปลายหัวอิเล็กโทรด นอกจากการทดสอบเบื้องต้นนี้ได้ทดลองจริงเพื่อหาความดันจากการ ระเบิดของอนุภาคไลโคโปเดียมเข้มข้น 5 กรัม/ 20 ลิตร เมื่อกำหนดวงจรถัดชนวนเท่ากับ 20

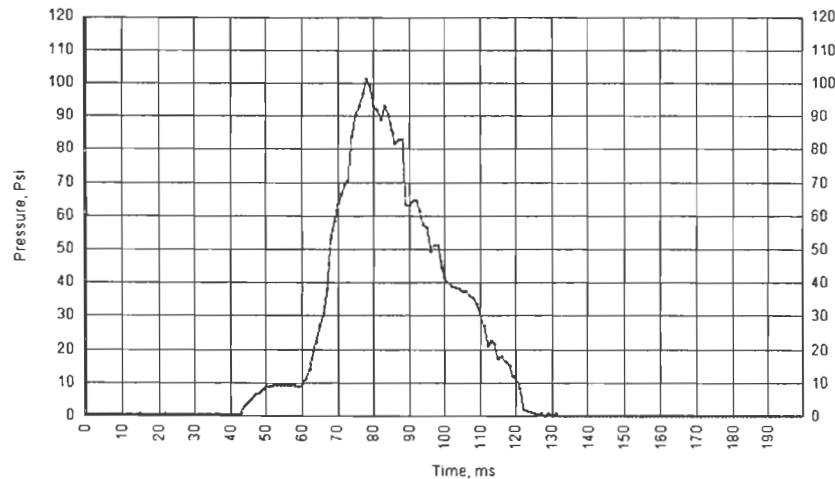
มิลลิวินาที ช่วงเวลาเปิดของวาล์วทรงกระบอก 10 มิลลิวินาที ความดันอากาศอัดเท่ากับ 12.5 บาร์ ตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.4.1 ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การวัดค่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดก่อนการสปาร์คของหัวอเล็กโทรด

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



(ก) รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทดสอบมาตรฐาน



(ข) การเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องทดสอบที่พัฒนา

### รูปที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าความดันจากการระเบิดของไลโคโพเดียม เทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากรูปที่ 5.1(ก) ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานเมื่อ outlet valve เปิดความดันในห้องจุดระเบิดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอากาศอัดเข้ามาและความดันแตกต่างกันระหว่างก่อนเปิดวาล์วและหลังเปิดวาล์วต้องเท่ากับความดันของการดึงอากาศออกจากถัง (Pd) ซึ่งแสดงว่าความดันภายในห้องจุดระเบิดกลับมาเท่ากับความดันบรรยากาศ และเมื่อเปรียบเทียบกราฟการทดลองจริงซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 (ข) ที่ใช้อากาศอัด 12.5 บาร์ (1,250 กิโลปาสกาล) ความดันแตกต่างกันก่อนเปิดและหลังเปิดวาล์วเท่ากับ 8.63 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (= 0.6 กิโลปาสกาล) และ 9.09 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (= 0.63 กิโลปาสกาล) แสดงว่าความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันอากาศอัดที่เหมาะสมเท่ากับ 12.5 บาร์ (1,250 กิโลปาสกาล)

#### 5.1.2 ความดันจากการระเบิดของสารจุดชนวนระเบิด

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

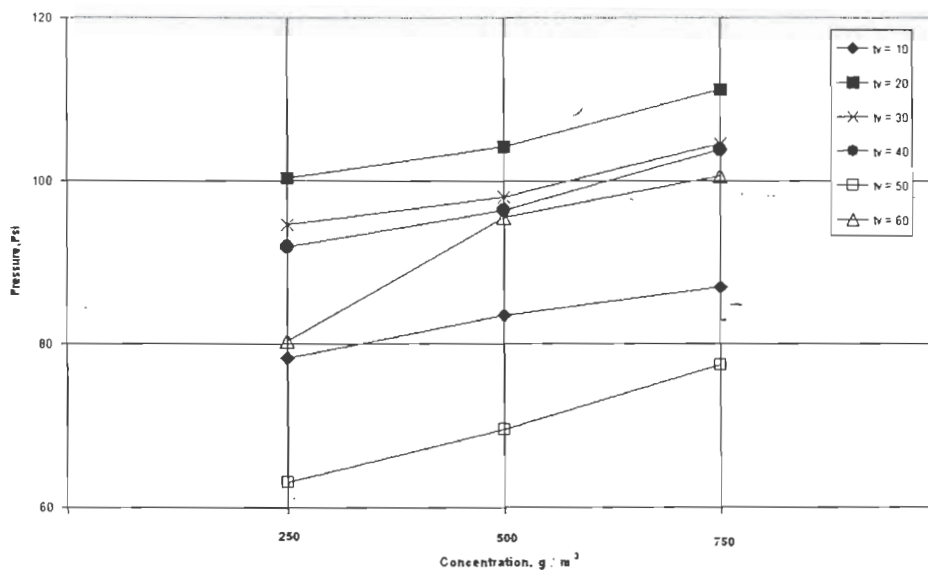
การระเบิดของสารจุดชนวนเป็นตัวอย่างที่ดีในการเปรียบเทียบการระเบิดของวัสดุอนุภาค กับการระเบิดของวัตถุระเบิดกล่าวคือ วัตถุระเบิดได้แก่พวก กำมะถัน ดินประสิว หรือมีสารมากกว่าสองตัวขึ้นไป ระเบิดขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่รุนแรงที่ถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงานความร้อนเท่านั้น ในที่นี้คือแบเรียมไนเตรด และแบเรียมเปอร์ออกไซด์ ส่วนเซอโคเนียมเป็น

เหมือนเชื้อเพลิงเพิ่มพลังงานในปฏิกิริยา ในขณะที่การระเบิดของวัสดุอนุภาคต้องอาศัยปัจจัยหลักที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นผงที่พอเหมาะ แหล่งพลังงานที่ให้กับหมอกฝุ่น และก๊าซออกซิเจนดังนั้นอนุภาคที่สามารถระเบิดในสภาวะหมอกฝุ่น อาจไม่ใช่วัสดุระเบิดก็ได้

### 5.1.3 เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิด (tv)

ก่อนกล่าวถึงผลของ tv จำเป็นต้องกล่าวถึงช่วงเวลาของการเปิดวาล์วทรงกระบอกเพื่อให้อนุภาคเข้าสู่ห้องจุดระเบิดเล็กที่ 10 มิลลิวินาทีเนื่องจากเป็นเวลาน้อยสุดที่อนุภาคเข้าสู่ถึงจนหมด และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 ในช่วงเวลาของการเปิดวาล์วความดันจะเพิ่มขึ้นและคงที่ซึ่งช่วงเวลา ณ ความดันเริ่มคงที่มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิวินาทีหลังเปิดวาล์ว

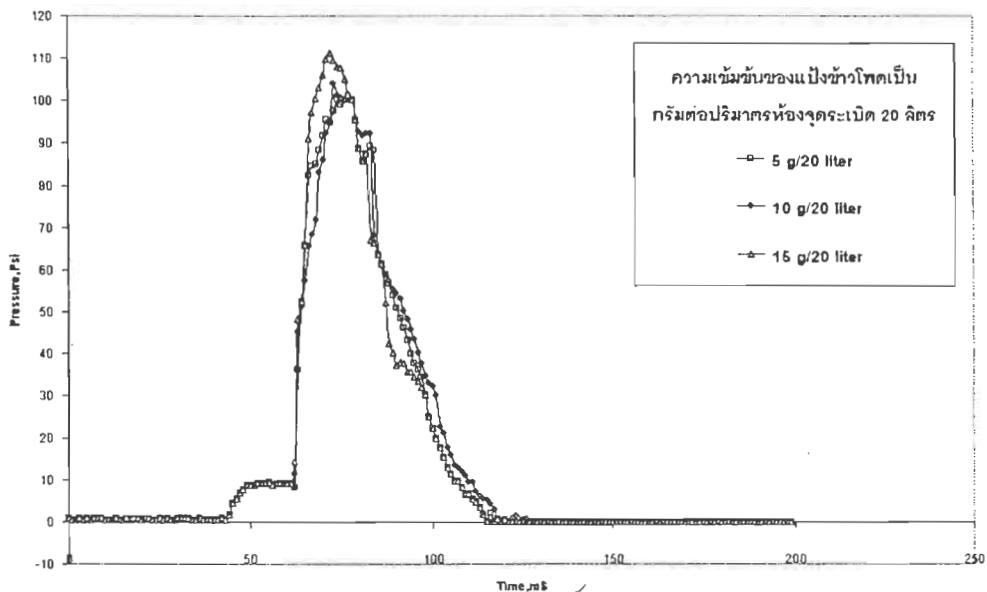
หลังจากวาล์วปิดลงอนุภาคที่ผ่านแผ่นกระจายอนุภาคจะฟุ้งกระจายภายในห้องจุดระเบิด เวลาที่เหมาะสมที่สุดที่จะจุดชนวนระเบิดคือเวลาที่อนุภาคอยู่กลางถึงทรงกลมก็ก็จะได้รับพลังงานจากชนวนระเบิดมากที่สุด ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากที่สุดทำให้เกิดก๊าซจากการเผาไหม้มากที่สุดผลให้ความดันรวมของระบบมีค่ามากที่สุด ดังนั้นค่าตัวแทนที่นำมาพิจารณาหา tv ที่เหมาะสมคือ ค่าความดันสูงสุดจากการทดลอง แสดงผลไว้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ผลของ tv ต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด

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 แสดงว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคก่อนและหลังการจู่ระเบิดมีลักษณะเหมือนเดิมทำให้ความดันเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดิมถึงแม้ความเข้มข้นของอนุภาคจะเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบกราฟความดันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อ  $t_v$  เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อ  $t_v$  มีค่ามากขึ้นลักษณะของกราฟความดันที่ความเข้มข้นต่างๆ มีแนวโน้มที่แตกต่างกันเนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอนุภาคกระจายอย่างเป็นอิสระมากขึ้นทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคเกิดไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอส่งผลให้ความดันที่เกิดมีความผันแปรเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไป

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

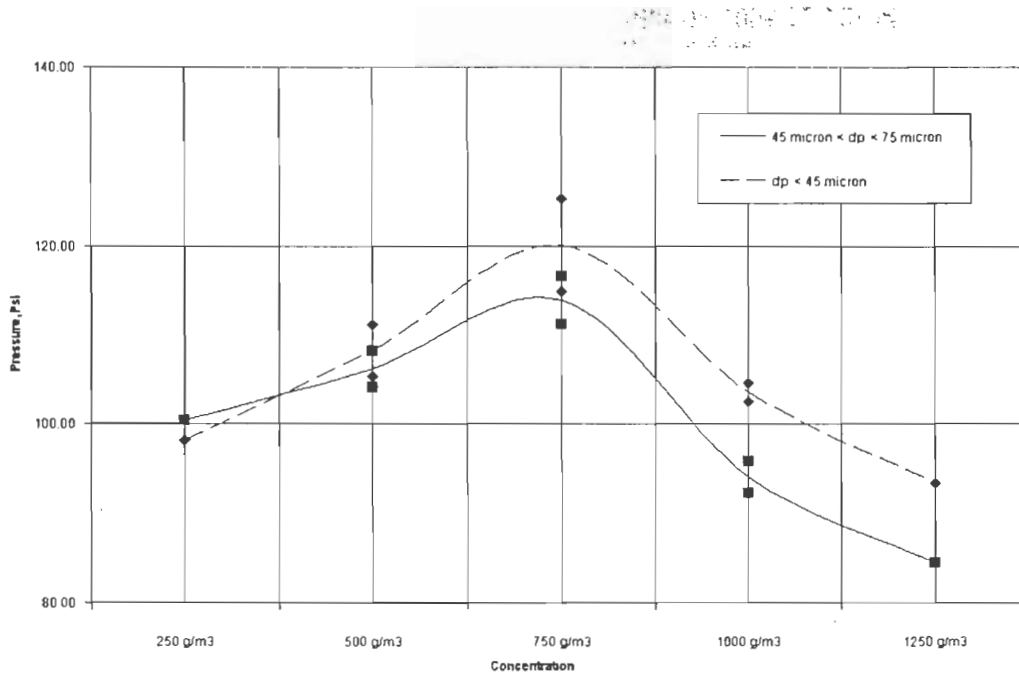
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่าในการทดสอบใช้แป้งข้าวโพดสองกลุ่ม คือ

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

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

### 5.2.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่า $P_{max}$

การทดลองใช้แป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาค่าความดันสูงสุด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4

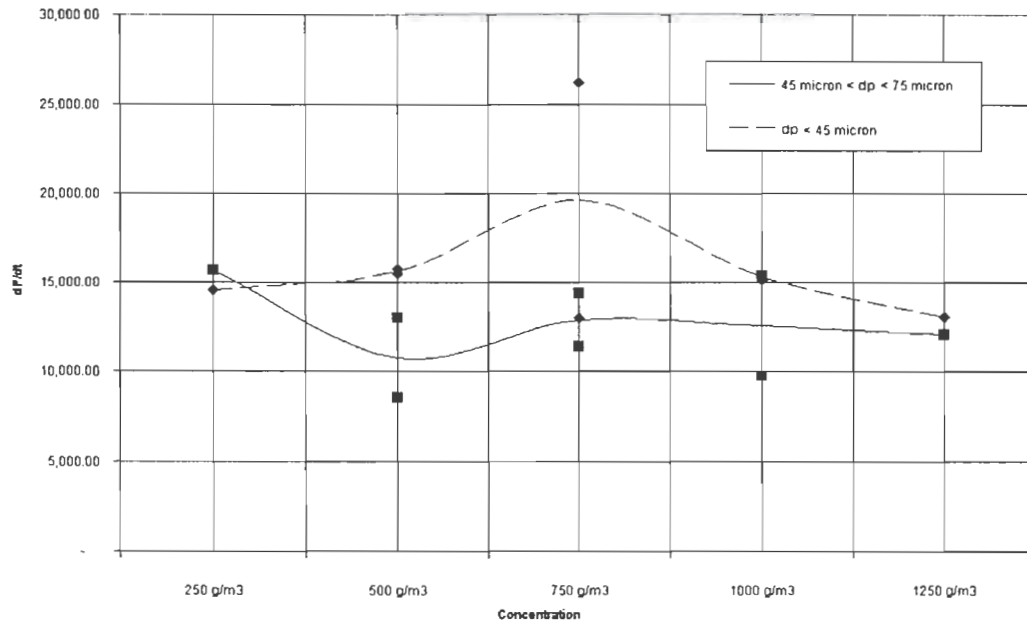


รูปที่ 5.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่าความดันสูงสุดจากการระเบิด

จากรูปพบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเล็กลงในช่วงต่ำกว่า 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

จากรูปพบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดอนุภาคเล็กลงอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับในกรณีความดันสูงสุด นอกจากที่อนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากแล้ว เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของหมอกฝุ่นเท่ากันเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงอากาศ (ออกซิเจน) จะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นอัตราของการเกิดปฏิกิริยาจึงมากขึ้นทำให้ความดันรวมของระบบเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

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

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

#### 5.3.1 อนุภาคมาตรฐาน ไลโคโพลีเอทิลีน

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



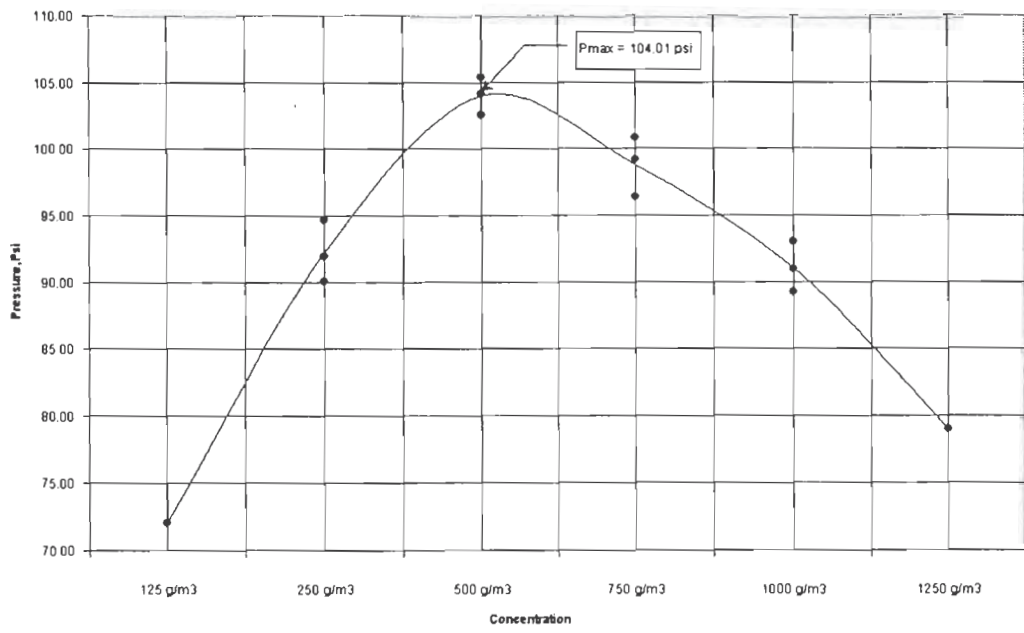
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า  $P_{\max}$  และ  $(dP/dt)_{\max}$  ของไลโคโปเดียมจากการทดลองกับค่ามาตรฐาน

	$P_{\max}$ (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

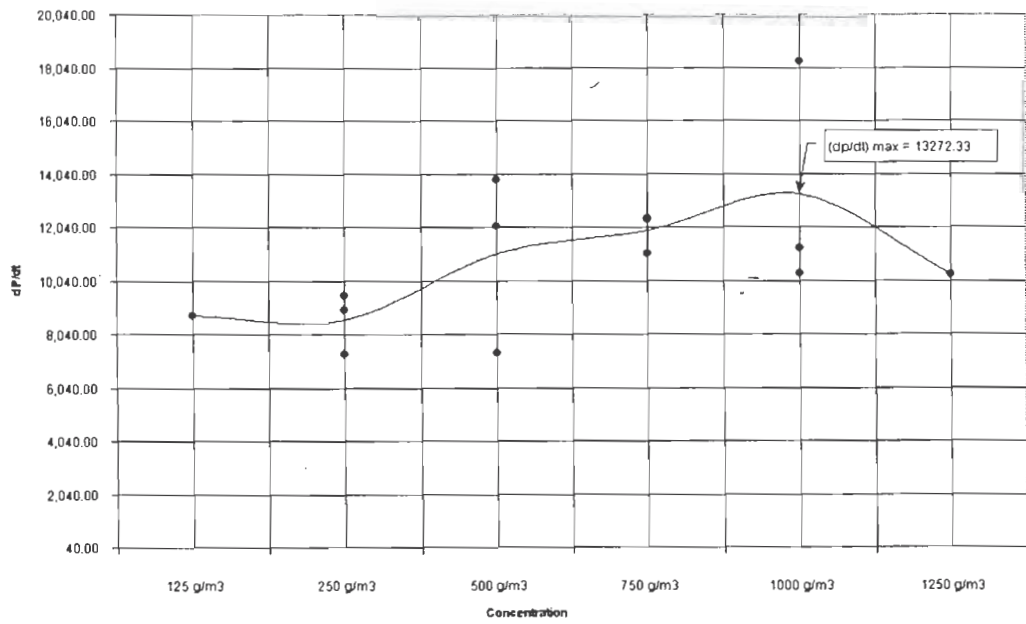
จากตารางพบว่าค่าจากการทดลองทั้งค่า  $P_{\max}$  และ  $(dP/dt)_{\max}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากทั้งสองความเข้มข้น โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นน้อยมีค่าใกล้เคียงมากอาจเนื่องจากอนุภาคมีการกระจายสม่ำเสมอ และเมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้น โอกาสในการชนกันเองของอนุภาคมีมากขึ้นทำให้การกระจายบริเวณกลางถึงไม่สม่ำเสมอทำให้ได้ค่าความดันน้อยกว่ามาตรฐาน ส่วนค่า  $(dP/dt)_{\max}$  ที่ความเข้มข้น 500 กรัม/ลบ.ม. ในสองครั้งแรกที่มีค่ามากอาจเนื่องจากอนุภาคชนและตกมาบริเวณปลายหัวพอดีทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันสูง 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

ค่า  $P_{max}$  มาตรฐานของนิโคตินิกแอซิกเท่ากับ  $117.5 \pm 10\%$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (มีค่าระหว่าง 105.9 ถึง 129.1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ผลการทดลองได้เท่ากับ 104.01 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งยังใกล้เคียงกับช่วงของค่ามาตรฐานส่วนค่า  $(dP/dt)_{max}$  มาตรฐานของนิโคตินิกแอซิกเท่ากับ  $12,401 \pm 10\%$  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  $(dP/dt)_{max}$  มีค่าแนวโน้มน่ามากขึ้นเนื่องจากปริมาณอนุภาคมีมากขึ้นอัตราการทำปฏิกิริยามากขึ้นการเปลี่ยนแปลงของความดันมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า  $(dP/dt)_{max}$  ลดลงเนื่องจากเมื่อเทียบที่ปริมาตรหมอกฝุ่นเท่ากันเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของอนุภาคมีมากขึ้น โอกาสการชนกันเองมีมากขึ้นดังนั้นโอกาสที่อนุภาคจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เพียงอย่างเดียวจึงลดลงทำให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความดันลดลง

#### 5.5 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่าง

จากการทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้โดยใช้เครื่องทดสอบการระเบิด ที่สภาวะการทดสอบเดียวกันพบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่างแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของครีมเทียมมีค่าต่ำที่สุด

นอกจากวัสดุอนุภาคมาตรฐาน คือ ผงไลโคโปเดียม จะนำมาทดสอบเพื่อใช้สอบเทียบการทำงานของเครื่องทดสอบแล้ว ยังมีการทดสอบหาค่า LEL ของสารตัวอย่าง คือ แป้งมัน แป้งข้าวที่ได้จากการสี และครีมเทียม (มีส่วนผสมของ กลูโคส 58% ไขมันปาล์ม 33% และเคซีน 2%) ให้ค่า LEL เฉลี่ย เท่ากับ  $164.8 \text{ g/m}^3$   $147.2 \text{ g/m}^3$  และ  $97.8 \text{ g/m}^3$  ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นต่ำสุดที่ระเบิดได้ (กรัม/ลบ.ม)
แป้งข้าวจากการสีข้าว	147.2
ครีมเทียม	97.8
แป้งมันสำปะหลัง	164.8

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้ คือ การพัฒนาและสร้างเครื่องทดสอบการระเบิดของวัสดุอนุภาคขนาด 20 ลิตร เพื่อนำมาทดสอบหาความดันสูงสุดของการระเบิด และอัตราการเพิ่มของความดันของการระเบิด โดยมุ่งเน้นการสร้างเครื่องมือที่มีสมรรถนะตามมาตรฐานสากล แต่มีต้นทุนถูกกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยสอบเทียบด้วยอนุภาคมาตรฐาน และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อค่า  $P_{max}$  และ  $(dP/dt)_{max}$  ผลของการดำเนินการสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 6.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องทดสอบ

6.1.1 ความดันอากาศภายในกระบอกเก็บอนุภาคก่อนการทดลองเท่ากับ 12.5 บาร์ เพื่อให้ความดันเริ่มต้นภายในห้องจุดระเบิดเท่ากับความดันบรรยากาศ

6.1.2 การเตรียมสารจุดชนวนระเบิดให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM E1226 ประกอบด้วย เซอโคเนียม 40% แบเรียมไนเตรด 30% และแบเรียมเปอร์ออกไซด์ 30% โดยน้ำหนัก ผสมเป็นเนื้อเดียวกันน้ำหนักรวม 2.4 กรัม ซึ่งให้ค่าแรงดันของการระเบิดเท่ากับ 16 พิเอสไอ (1.1 บาร์)

6.1.3 เวลาหน่วงก่อนเปิดวาล์วทรงกระบอกเท่ากับ 40 มิลลิวินาทีตามมาตรฐาน

6.1.4 ช่วงเวลาของการเปิดวาล์วทรงกระบอกเท่ากับ 10 มิลลิวินาที

6.1.5 เวลาหน่วงก่อนการจุดชนวนระเบิดที่เหมาะสมเท่ากับ 20-มิลลิวินาที

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

6.2.1 เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงค่า  $P_{max}$  มีค่ามากขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้มากขึ้น

6.2.2 เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงค่า  $(dP/dt)_{max}$  มีค่ามากขึ้นเนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของหมอกฝุ่นเท่ากัน เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงอากาศ (ออกซิเจน) จะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นความดันรวมของระบบเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

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

เนื่องจากการทดสอบอนุภาคมาตรฐานไลโคโทเคียม และนิโคตินิกแอซิก ให้ค่า  $P_{max}$  และ  $(dP/dt)_{max}$  ที่ใกล้เคียงกับที่อ้างอิงไว้ตามมาตรฐาน ASTM E1226 และรายงานที่นักวิจัยอื่นได้ รายงานไว้ จึงเป็นการยืนยันว่าเครื่องทดสอบแรงดันจากการระเบิดของวัสดุอนุภาคที่พัฒนาขึ้นนี้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ หลังจากผ่านการปรับปรุงและสอบเทียบข้างต้นแล้ว

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

6.4.1 ค่า  $P_{max}$  มีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า  $P_{max}$  มีค่าลดลง

6.4.1 ค่า  $(dP/dt)_{max}$  มีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งค่า  $(dP/dt)_{max}$  มีค่าลดลง

### 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

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

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

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

## เอกสารอ้างอิง

- วิวัฒน์ คัมพะพานิชกุลและคณะ. รายงานโครงการสิ่งประดิษฐ์เครื่องทดสอบขอบเขตการระเบิดของฝุ่นผง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, 2539 (ค.ศ.1996)
- เสรี นันทิวชรินทร์. 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, 1<sup>st</sup> 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. 1<sup>st</sup> 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<sup>3</sup> 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.

- Mckenzie, C.J. Approved code of practice 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<sup>rd</sup> 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. 3<sup>rd</sup> 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]



ภาคผนวก

## ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของ เปลือกข้าวจากการสีข้าว (ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด)

วันที่ทำการทดลอง	วันที่ 2 กันยายน 2547	ผู้ทดลอง	น.ส.ฉันทมณี
อุปกรณ์ในการทดลอง	เครื่องทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของฝุ่นผง จูฬาฯ 2		
ชื่อของผงวัสดุที่ทดสอบ	Sample dust 1		
ชนิดของผงวัสดุที่ทดสอบ	เปลือกข้าวที่ได้จากการสีข้าว		
ขนาดอนุภาค	ไม่ได้ทำการแยกขนาด		
การเตรียม	เก็บไว้ในภาชนะสุญญากาศ เป็นเวลามากกว่า 1 วัน		
สภาวะการอบแห้ง	อบที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 3 ชั่วโมง		
อุณหภูมิในการทดลอง	31 °C		
Spark delay time	0.1 วินาที		
ความกว้างของช่องอากาศ	1 มิลลิเมตร		
ระยะห่างของอิเล็กโทรด	4 มิลลิเมตร		
ความดันอากาศอัด	1 kg/cm <sup>2</sup> 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	

ตารางภาคผนวกที่ 3 การทดสอบเพื่อหาค่า LEL ของแป้งมันสำปะหลัง ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด

วันที่ทำการทดลอง	วันที่ 5 กันยายน 2547	ผู้ทดลอง	น.ศ.ฉันทมณี
อุปกรณ์ในกาทดลอง	เครื่องทดสอบความสามารถในการระเบิดได้ของฝุ่นผง จุฬาฯ 2		
ชื่อของผงวัสดุที่ทดสอบ	Cassava flour (dragon fish brand)		
ชนิดของผงวัสดุที่ทดสอบ	อนุภาคจากการเกษตร		
ขนาดอนุภาค	ยังไม่ได้ทำการแยกขนาด		
การเตรียม	เก็บไว้ในภาชนะสุญญากาศ เป็นเวลามากกว่า 1 วัน		
สภาวะการอบแห้ง	อบที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 3 ชั่วโมง		
อุณหภูมิในการทดลอง	28 °C		
Spark delay time	0.1 วินาที		
ความกว้างของช่องอากาศ	1 มิลลิเมตร		
ระยะห่างของอิเล็กโทรด	4 มิลลิเมตร		
ความดันอากาศอัด	1 kg/cm <sup>2</sup> 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	