

การศึกษาและการออกแบบไซโคลน
เพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้



นางสาว เบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-691-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY AND DESIGN OF A CYCLONE
FOR PARTICULATE REDUCTION IN FLUE GAS



Miss. Benjawan Chokpipatpol

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate school

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-635-691-7



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

เบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล : การศึกษาและการออกแบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ (STUDY AND DESIGN OF A CYCLONE FOR PARTICULATE REDUCTION IN FLUE GAS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สมศรี จรุงเรือง, 195 หน้า.
ISBN 974-635-691-7

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและออกแบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี ไซโคลนที่จัดสร้างขึ้นเป็นชนิดแก๊สไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัสและอนุภาคออกในแนวแกน แบบ high efficiency, medium throughput รูปร่างและขนาดถูกกำหนดตามสมมติฐานของ Stairmand ส่วนสมรรถนะของไซโคลนประเมินด้วยวิธีของ Leith และ Licht

จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นว่าอัตราการไหลของแก๊สร้อนเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความดันสูญเสีย อุณหภูมิขาเข้าเฉลี่ยของแก๊สร้อนและประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนเท่ากับ 0.554 และ 0.568 กิโลกรัม/วินาที อุณหภูมิขาเข้าเฉลี่ยของแก๊สร้อนเท่ากับ 335.4 และ 334.2 องศาเซลเซียส ความดันสูญเสียในไซโคลน 236.79 และ 214.74 กิโลปาสคาล ไซโคลนจะมีประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาคได้สูงสุดเท่ากับ 94.27 และ 91.22 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแก๊สที่ได้จากการเผาผลาญประเภทไบโມแห้ง, กิ่งไม้แห้ง และกระดาษ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องมือที่มีชื่อว่า 'MASTERSIZER' พบว่าสภาวะที่ไซโคลนให้ประสิทธิภาพสูงสุดจะมีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 24.85 และ 24.6 ไมครอน สำหรับการเผาผลาญประเภทไบโມแห้ง, กิ่งไม้แห้ง และกระดาษ ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของไซโคลนด้วยวิธีของ Leith และ Licht ปรากฏว่าผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1.43 ถึง 10.12 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิติกร เบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมศรี จรุงเรือง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C 716110 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CYCLONE / PARTICULATE REDUCTION / FLUE GAS

BENJAWAN CHOKPIPATPOL : STUDY AND DESIGN OF A CYCLONE FOR PARTICULATE REDUCTION IN FLUE GAS. 195 pp. ISBN: 974-635-691-7

The purpose of this thesis is to study and design a cyclone for particulate reduction in flue gas and to compare the experimental results with the theoretical ones. The cyclone model is of the tangential inlet and axial discharge type; high efficiency, medium throughput pattern. The shapes and dimensions were designed by following the hypothesis of Stairmand where the cyclone 's performance could be evaluated by Leith and Licht.

This study show that the hot gas flow rate is an importance variable affecting the pressure loss, the average inlet gas temperature and cyclone 's efficiency. From the experiment it was found that the hot gas flow rate, the average inlet gas temperature and the pressure loss in cyclone were 0.554 and 0.568 kg/s, 335.4 and 334.2 °C, 236.79 and 314.74 kPa, respectively, the efficiency of particle collection of cyclone were found to be 94.27 and 91.22 percents for burning dried leaves and waste paper, respectively.

The results of particle size distribution analysis with 'MASTERSIZER' equipment indicated that the maximum efficiency was achieved for cyclone with particle size of 24.85 and 24.6 microns for burning dried leaves and waste paper, respectively.

Consequently, in performance analysis of cyclone with Leith and Licht 's hypothesis the trend of the results appears to be the same as those predicted by theory. The errors involved ranged from 1.43 to 10.12 percents.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา..... 2539.....

ลายมือชื่อนิสิต..... ชญจวรรณ ไชค้ำที่ตมผล.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ๑๖/๑๒/๕๖.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศรี จรุงเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยนี้มาด้วยดีตลอด ได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จน สำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง ที่ได้ กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

และเนื่องจากในการศึกษาปริญญาโทบัณฑิตนี้ ข้าพเจ้าได้รับทุนการศึกษาจาก บริษัท โบอิง คอมเมอร์เชียล จำกัด รวมทั้งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัยด้วย บางส่วน จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, คุณอภิชัย อัสโสรัตนกุล และเพื่อนๆทุกคน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยในการแนะนำช่วยเหลือด้วยดี มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณรุ่งโรจน์ ส่งเจริญทรัพย์ เพื่อนที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการช่วยเหลือ ระหว่างดำเนินการทดลองและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาวและน้องชาย อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนด้านการเงินและได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ภูมิหลังที่มาของปัญหา	1
1.2 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	3
1.6 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้	4
2. ทฤษฎี	5
2.1 กลไกของการแยกอนุภาคด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	5
2.1.1 ลักษณะการไหลของแก๊สในไซโคลน	5
2.1.2 การแยกอนุภาคในแก๊สที่เกิดการหมุนวน	8
2.2 ลักษณะการไหลของแก๊ส	13
2.2.1 แบบไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัส	13
2.2.2 แบบไหลเข้าในแนวแกน	14
2.3 ความดันสูญเสียในไซโคลน	15
2.4 ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน	16
3. การออกแบบและการคำนวณ	18
3.1 หลักการออกแบบ	18
3.1.1 การดูดแก๊สและอนุภาค	19

3.1.2 การดักเก็บอนุภาคด้วยไซโคลน	19
3.1.3 การนำอนุภาคออกจากที่รองรับด้านล่าง	20
3.1.4 การนำอนุภาคออกจากแผ่นกรองและถุงกรอง	20
3.2 หลักการคำนวณ	21
3.2.1 ระบบท่อจากเตาเผามูลฝอย	21
3.2.2 ระบบท่อทางเข้าสู่ไซโคลน	23
3.2.3 ตัวไซโคลน	24
3.2.4 ระบบท่อทางออกจากไซโคลน	27
3.2.5 ระบบพัดลม	28
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	30
3.3.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3.1.1 เตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว	30
3.3.1.2 ตัวไซโคลน	30
3.3.1.3 ระบบวัดอุณหภูมิ	31
3.3.1.4 ระบบวัดอัตราการไหล	32
3.3.1.5 พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง	33
3.3.1.6 ระบบกรองอากาศ	33
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	33
4. การทดลอง	42
4.1 ลักษณะของมูลฝอยที่ใช้ในการทดลอง	42
4.1.1 ใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง และหญ้า	42
4.1.2 กระดาษ	42
4.1.3 ปริมาณความชื้น	42
4.2 ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดลอง	43
4.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบที่ใช้ในการทดลอง	43
4.2.2 ส่วนประกอบของระบบที่ใช้ในการทดลอง	43
4.2.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล	44
4.2.4 การควบคุมอัตราการไหลของแก๊สร้อน	45
4.2.5 ตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซ	46
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	47
5. ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์	50
5.1 ผลการทดลองหาสมรรถนะของไซโคลน	50

5.1.1	ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณอนุภาคในแก๊ส	51
5.1.2	ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ	52
5.1.3	ผลของอุณหภูมิขาเข้าของแก๊สกับความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ	53
5.1.4	ผลของความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศกับประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน	54
5.2	ผลที่ได้จากการทดลอง	57
5.2.1	ผลการทดลองจากการใช้มูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง	57
5.2.2	ผลการทดลองจากการใช้มูลฝอยประเภทกระดาษ	57
5.3	การวิเคราะห์ผลการทดลองและการเปรียบเทียบผลการทดลอง	58
6.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	102
6.1	สรุปผลการทดลอง	102
6.2	ข้อเสนอแนะ	106
	รายการอ้างอิง	107
	ภาคผนวก	109
ก.	การหาอัตราการไหลของแก๊ส	109
ข.	การหาค่าความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ	119
ค.	การหาค่าความดันสูญเสียในไซโคลน	122
ง.	การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคในแก๊ส	126
จ.	การหาประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน	137
ฉ.	การออกแบบเตาเผาชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว	146
ช.	ตารางและรูปประกอบการออกแบบระบบไซโคลน	150
ซ.	โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบเครื่องมือวัดอัตราการไหล	182
ฅ.	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการประเมินสมรรถนะของไซโคลน	188
	ประวัติผู้เขียน	195

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงสัดส่วนมาตรฐานการออกแบบไซโคลน	17
ตารางที่ 4.1	แสดงตำแหน่งการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สร้อน	61
ตารางที่ 5.1	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.866 kg/s	62
ตารางที่ 5.2	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.722 kg/s	63
ตารางที่ 5.3	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.554 kg/s	64
ตารางที่ 5.4	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.487 kg/s	65
ตารางที่ 5.5	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.399 kg/s	66
ตารางที่ 5.6	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.711 kg/s	67
ตารางที่ 5.7	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.624 kg/s	68
ตารางที่ 5.8	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.568 kg/s	69
ตารางที่ 5.9	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.536 kg/s	70
ตารางที่ 5.10	แสดงผลการทดลองจากการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.476 kg/s	71
ตารางที่ 5.11	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ สำหรับการเผาไหม้ฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr	72
ตารางที่ 5.12	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ สำหรับการเผาไหม้ฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr	73

ตารางที่ 6.1	แสดงผลสรุปข้อมูลสมรรถนะของไซโคลนเปรียบเทียบระหว่าง สมรรถนะตามสมมติฐานกับสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง	105
ตารางที่ จ-1	แสดงผลการทดลองการหาสมรรถนะของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.805 kg/s	140
ตารางที่ จ-2	แสดงผลการทดลองการหาสมรรถนะของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.683 kg/s	141
ตารางที่ จ-3	แสดงผลการทดลองการหาสมรรถนะของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.551 kg/s	142
ตารางที่ จ-4	แสดงผลการทดลองการหาสมรรถนะของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.507 kg/s	143
ตารางที่ จ-5	แสดงผลการทดลองการหาสมรรถนะของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.438 kg/s	144
ตารางที่ ช-1	แสดงค่าความเร็วจับของอนุภาค	150
ตารางที่ ช-2	แสดงค่าความเร็วของแก๊สที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่	150
ตารางที่ ช-3	แสดงค่าความเร็วของอากาศในรูปของความเร็วเนื่องจากความดัน	151
ตารางที่ ช-4	แสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในข้องอ 90°	152
ตารางที่ ช-5	แสดงขนาดของท่อลด ตามมาตรฐาน JIS B 2311 SGP	152
ตารางที่ ช-6	แสดงค่า Discharge coefficient ; (C_d)	153
ตารางที่ ช-7	แสดงคุณสมบัติเฉพาะของแผ่นกรอง	154
ตารางที่ ช-8	แสดงคุณสมบัติเฉพาะของถุงกรอง	155
ตารางที่ ช-9	แสดงพิกัดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ ตามประกาศสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ในราชกิจจานุเบกษา ตอนที่ 197 (1 ธ.ค.2524)	156

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะการไหลเข้าของแก๊สและทางออกของอนุภาคในแบบต่าง ๆ ของไซโคลน	7
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะการเกิดการหมุนวนและการไหลวนของแก๊สภายในไซโคลนแบบที่มีการไหลเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส, อนุภาคออกในแนวแกน .	8
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงค่า friction loss factor ของไซโคลนขนาดต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.4	แสดงสัดส่วนมาตรฐานการออกแบบของไซโคลนแบบทางเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส	13
รูปที่ 2.5	แสดงไซโคลนแบบทางเข้าของแก๊สในแนวแกน	14
รูปที่ 3.1	แสดงสัดส่วนต่าง ๆ ของตัวไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง	29
รูปที่ 3.2	แสดงเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (แบบ Chromel - Alumel; CA)	31
รูปที่ 3.3	แสดงระบบวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิซ ชนิด D, D/2 tapping ...	32
รูปที่ 3.4	แสดงเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว	35
รูปที่ 3.5	แสดงตัวไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง	36
รูปที่ 3.6	แสดงพัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยงที่ใช้ในการทดลอง	37
รูปที่ 3.7	แสดงเทอร์โมคัปเปิล และ digital thermometer ที่ใช้ในการทดลอง	38
รูปที่ 3.8	แสดงระบบกรองอากาศแบบแผ่นกรองและถุงกรอง	39
รูปที่ 3.9	แสดงเครื่องมือ clamp on ammeter - voltmeter	40
รูปที่ 3.10	แสดงเครื่องชั่งมวลของอนุภาค 'Mettler Teledo AB 204'	41
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะทั่วไปของระบบไซโคลน	44
รูปที่ 4.2	แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล	45
รูปที่ 4.3	แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นออริฟิซ	46
รูปที่ 4.4	แสดงตำแหน่งในการวัดค่าต่าง ๆ ของระบบไซโคลน	49
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศกับประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลนสำหรับการเผามูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง	55

รูปที่ 5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศกับประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลนสำหรับการเผาผลาญประเภทกระดาษ	55
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับความดันสูญเสียในไซโคลน สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง	56
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับความดันสูญเสียในไซโคลน สำหรับการเผาผลาญประเภทกระดาษ	56
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.866 kg/s)	73
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.722 kg/s)	74
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.554 kg/s)	75
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.487 kg/s)	76
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.399 kg/s)	77
รูปที่ 5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.711 kg/s)	78
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาผลาญประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.624 kg/s)	79

รูปที่ 5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.568 kg/s)	80
รูปที่ 5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.536 kg/s)	81
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.476 kg/s)	82
รูปที่ 5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันสูญเสียในไซโคลน (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr)	83
รูปที่ 5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันสูญเสียในไซโคลน (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr)	84
รูปที่ 5.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง flow area ของแก๊สร้อนกับ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อน	85
รูปที่ 5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ ความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ	86
รูปที่ 5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ ความดันสูญเสียในไซโคลน	87
รูปที่ 5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน	88
รูปที่ 5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ ในช่วงเวลา 60 นาทีแรก ขณะทำการป้อนมูลฝอย	89
รูปที่ 5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สขาเข้า ในช่วงเวลา 60 นาทีแรก ขณะทำการป้อนมูลฝอย	90
รูปที่ 5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สร้อนกับ กำลังของมอเตอร์	91
รูปที่ 5.24	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผาไหม้ฟอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.866 kg/s)	92

รูปที่ 5.25	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.722 kg/s)	93
รูปที่ 5.26	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.554 kg/s)	94
รูปที่ 5.27	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.487 kg/s)	95
รูปที่ 5.28	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทใบไม้แห้ง, กิ่งไม้แห้ง ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.399 kg/s)	96
รูปที่ 5.29	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.711 kg/s)	97
รูปที่ 5.30	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.624 kg/s)	98
รูปที่ 5.31	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.568 kg/s)	99
รูปที่ 5.32	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.536 kg/s)	100
รูปที่ 5.33	แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ (สำหรับการเผามูลฝอยประเภทกระดาษ ในอัตรา 25 kg/hr ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.476 kg/s)	101
รูปที่ ก-1	แสดงระบบการวัดค่าอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิซ แบบ D, D/2 tapping	109
รูปที่ ง-1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ การกระจายขนาดของอนุภาค	126
รูปที่ ง-2	แสดงส่วนป้อนตัวอย่างของอนุภาค	127

รูปที่ ง-3	แสดงส่วนกำเนิดแสงและวัดการตกกระทบของแสงบนอนุภาค	128
รูปที่ ง-4	แสดงส่วนประมวลผลและแสดงผล	128
รูปที่ ง-5	แสดงส่วนคำนวณผลด้วยคอมพิวเตอร์	129
รูปที่ ง-6	แสดงเครื่องมือโดยรวม	129
รูปที่ ง-7	แสดงตัวอย่างการพล็อตกราฟเพื่อแสดงการกระจายขนาดของอนุภาค .	136
รูปที่ จ-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพย่อย ของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.805 kg/s	140
รูปที่ จ-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพย่อย ของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.683 kg/s	141
รูปที่ จ-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพย่อย ของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.551 kg/s	142
รูปที่ จ-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพย่อย ของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.507 kg/s	143
รูปที่ จ-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพย่อย ของไซโคลน ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวล = 0.438 kg/s	144
รูปที่ ช-1	แสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ; (f_d)	157
รูปที่ ช-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนืดของของไหล ชนิดต่าง ๆ	158
รูปที่ ช-3	แสดงภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง	159
รูปที่ ช-4	แสดงเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว	160
รูปที่ ช-5	แสดงลักษณะของฝาครอบเตาเผา	161
รูปที่ ช-6	แสดงระบบท่อจากฝาครอบเตาเผาถึงทางเข้าไซโคลน	162
รูปที่ ช-7	แสดงท่อลดขนาด 10 x 6 นิ้ว	163
รูปที่ ช-8	แสดงท่อลดขนาด 6 x 4 นิ้ว	164
รูปที่ ช-9	แสดงข้องอ 90° ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 4 นิ้ว (R/D = 1.5) ...	165
รูปที่ ช-10	แสดงขนาดแผ่นออริฟิซ ณ ตำแหน่งทางเข้าไซโคลน	166
รูปที่ ช-11	แสดงระบบท่อ ณ บริเวณทางเข้าไซโคลน	167
รูปที่ ช-12	แสดงสัดส่วนของตัวไซโคลน	168
รูปที่ ช-13	แสดงระบบท่อ ณ ตำแหน่งทางออกจากไซโคลน	169
รูปที่ ช-14	แสดงขนาดบริเวณด้านล่างของตัวไซโคลนสู่ที่รองรับอนุภาค	170
รูปที่ ช-15	แสดงขนาดของ hopper gate	171
รูปที่ ช-16	แสดงระบบท่อ ณ ตำแหน่งทางออกจากไซโคลนถึงพัดลมดูดอากาศ	172

รูปที่ ช-17	แสดงข้ออ 90° ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 6 นิ้ว ($R/D = 1.5$) ...	173
รูปที่ ช-18	แสดงขนาดแผ่นอริฟิซ ณ ตำแหน่งทางออกจากไซโคลน	174
รูปที่ ช-19	แสดงระบบท่อ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่พัดลมดูดอากาศ	175
รูปที่ ช-20	แสดงลักษณะพัดลมดูดอากาศ	176
รูปที่ ช-21	แสดงลักษณะกล่องใส่แผ่นกรอง	177
รูปที่ ช-22	แสดงขนาดของแผ่นกรอง	178
รูปที่ ช-23	แสดงลักษณะการแบ่งพื้นที่ทางออกของแก๊สด้วย sliding door	179
รูปที่ ช-24	แสดงลักษณะและขนาดของถุงกรอง	180
รูปที่ ช-25	แสดงหลอดแก้วรูปตัว U ที่ใช้ในการทดลอง	181



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	ความสูงที่ทางเข้าไซโคลน; m
A	พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด; m^2
b	ความกว้างที่ทางเข้าไซโคลน; m
B	เส้นผ่าศูนย์กลางที่บริเวณทางออกของอนุภาค; m
C	cyclone geometric parameter; ไม่มีหน่วย
d	เส้นผ่าศูนย์กลาง; m
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของไซโคลน; m
F	แรงต้านการเคลื่อนที่; N
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก; m/s^2
G	แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อใช้แยกอนุภาค; N
h	ความยาวทรงกระบอกของไซโคลน; m
Δh	velocity head; m. of air column
H	ความยาวทั้งหมดของไซโคลน; m
m	มวลของอนุภาค; kg
m	อัตราการไหลเชิงมวล; kg/s
P	ความดัน; kPa
ΔP	ความดันสูญเสียในไซโคลน; m
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร; m^3/s
r	รัศมีการหมุนวน; m
R	รัศมีของไซโคลน; m
Re	Reynolds' number; dimensionless
S	ความยาวของท่อทางออกของแก๊ส; m
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์; K
\bar{u}	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคกับแก๊ส; m/s
v	ความเร็วของแก๊ส; m/s
V	ปริมาตร; m^3
VP	ความดันเนื่องจากความเร็ว; mm. of H_2O
w	มวลของมูลฝอย; kg
β	อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ; ไม่มีหน่วย

η	ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน; %
ϕ	friction loss factor; dimensionless
ρ	ความหนาแน่น; kg/m^3
μ	ความหนืดของแก๊ส; Pa.s
ν	ปริมาตรจำเพาะ; m^3/kg
γ	vortex exponent; dimensionless
ψ	cyclone inertia parameter; dimensionless
Γ	ค่าคงที่ของการเสียดทาน = 0.005 (สำหรับแก๊สในไซโคลน); ไม่มีหน่วย

สัญลักษณ์กำกับล่าง

c	ไซโคลน
d	สภาวะหลังผ่านการอบแห้ง ณ อุณหภูมิ 85°C
e	ทางออก
el	ข้ออ 90°
f	friction loss
g	แก๊ส
i	ทางเข้า
l	ของเหลวที่ไซในमानอมิเตอร์รูปตัว U
max	มากที่สุด
motor	มอเตอร์ของพัดลมดูดอากาศ
ov	รวมทั้งหมด
p	อนุภาค
p_a	อนุภาคที่อยู่ในแก๊สก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ
p_o	อนุภาคที่ถูกดักเก็บไว้ในแผ่นกรอง
T	แนวเส้นสัมผัส ที่รัศมี r
T_p	แนวเส้นสัมผัส ที่รัศมี R
w	สภาวะก่อนการอบแห้ง
50	ขนาดตัดของอนุภาคที่ไซโคลนมีประสิทธิภาพ 50%