

การเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่น
แบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด

อิทธิพล กุลวงศ์

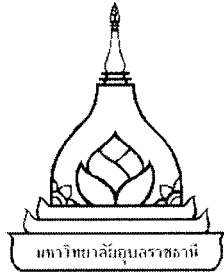
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



COMPARISON OF THE CHARACTERISTIC AND PERFORMANCE OF EJECTOR VENTURI SCRUBBER AND THE VENTURI SCRUBBER.

ITTHIPOL KULLAWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก
ชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด

ผู้วิจัย นายอิทธิพล กุลวงศ์

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2558

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในบทความวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายธนกฤต นนท์ชนะ วิศวกรประจำศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ในการให้คำแนะนำในการเขียนบทความวิชาการ และการออกแบบการทดลอง และตรวจทานบทความวิชาการ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และศูนย์ทดลองวิชาการพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน จังหวัดปทุมธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ รวมทั้งสถานที่สำหรับทำงานวิจัย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคำผอง กุลวงศ์ คุณแม่ไพบุรณ์ กุลวงศ์ และนางสาวคณิงนุช วงศ์เย็น ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

อิทธิพล กุลวงศ์
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด

ผู้วิจัย : อธิธิพล กุลวงศ์

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

คำสำคัญ : อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์, อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด, ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น, ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดิน และสารปนเปื้อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ขนาด 200 kW_{th} ใช้เตาแบบ Double throat downdraft gasifier ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ จะทำงานในช่วงความดันน้ำฉีดที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์เอง ใช้ปั๊มน้ำแบบ Multi stage centrifugal pump ในการจ่ายน้ำในช่วงอัตราการไหล 7-45 ลิตรต่อวินาที โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ 30 °C ช่วงความดันน้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์และชนิดคอคอด คือ 1-6 bar และ 0.25-1.00 bar ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่น มีแนวโน้มแปรผกผันกับความดันน้ำฉีด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 46.7 ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar สำหรับอุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์ และร้อยละ 88.5 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar สำหรับอุปกรณ์ชนิดคอคอด ส่วนประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์และชนิดคอคอด มีแนวโน้มแปรผกผันกับความดันน้ำฉีดเช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 57.2 ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar และร้อยละ 70.5 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ตามลำดับ ในส่วนของความดันตกคร่อมนั้น อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์แปรผกผันกับความดันน้ำที่หัวฉีด ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดแปรผันตามความดันน้ำที่หัวฉีด โดยความดันตกคร่อมต่ำสุดของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ คือ 8 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 6 bar และ 73 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ตามลำดับ และเมื่อคิดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ดักจับได้ต่อพลังงานที่ใช้ พบว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าความสามารถดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนต่อพลังงานสูงกว่า หรือใช้พลังงานน้อยกว่าในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ปริมาณเท่ากัน จากการศึกษาสรุปได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมในอุปกรณ์น้อย แต่ใช้พลังงานสูง และให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนต่ำ เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสกันของน้ำกับกระแสดังกล่าว และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดถึงแม้เป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมในอุปกรณ์สูงกว่า แต่ใช้พลังงานน้อย และให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่สูงกว่า โดยประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีความสอดคล้อง

กันกับงานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่ออัตราการใช้ของก๊าซในอุปกรณ์ที่มากนั้น
ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น ในขณะที่การสเปรย์น้ำฉีดที่ดี หรือเป็นละอองขนาดเล็ก จะให้
ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นที่สูงกว่า

ABSTRACT

TITLE : COMPARISON OF THE CHARACTERISTIC AND PERFORMANCE OF
 EJECTOR VENTURI SCRUBBER AND THE VENTURI SCRUBBER
 AUTHOR : ITTHIPOL KULLAWONG
 DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
 MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
 ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR KULACHATE PIANTHONG, PhD
 KEYWORDS : EJECTOR VENTURI SCRUBBER, VENTURI SCRUBBER, PARTICLE
 COLLECTING EFFICIENCY, TAR COLLECTING EFFICIENCY

This thesis is a comparison study on the characteristic and performance of ejector venturi scrubber and the venturi scrubber operated in the 200 kW_{th} downdraft gasification system. Both scrubber use water as scrubbing fluid and operate at their optimum pressure ranges. The multi stage centrifugal pump is employed to supply high pressure water at flow rate of 7-45 liter/min and the water temperature is controlled at 30 °C. The ejector venturi scrubber and the venturi scrubber are tested in pressure range of 1-6 bar and 0.25-1.00 bar, respectively. Results show that the particle collecting efficiency is reversed to the water pressure. The maximum efficiency of the ejector venturi scrubber and the venturi scrubber are 46.7% at water pressure 1 bar and 88.5% at water pressure 0.25 bar, respectively. The tar collecting efficiency is reversed to the water pressure similar to the particle collecting efficiency. The maximum tar collecting efficiency of the ejector venturi scrubber and the venturi scrubber are 57.2% at water pressure 1 bar and 70.5 % at water pressure 0.25 bar, respectively. The pressure drop across the ejector venturi scrubber is reversed to the water pressure, however the pressure drop across the venturi scrubber are proportional to the water pressure. The minimum pressure drop of both scrubber are 8 Pa at water pressure 6 bar and 73 Pa at water pressure 0.25 bar, respectively. For the specific collection per energy consumption of dust particle and tar, the venturi scrubber has higher specific collection per energy consumption or therefore use lower energy consumption at the same amount of the collection. From this study, it can be concluded that the ejector venturi scrubber usually operates with lower pressure drop but consumes higher energy, and has lower efficiency of dust particle and tar removal, because of having small gas-water contact areas and short scrubbing time. The venturi scrubber has higher pressure drop but it has higher efficiency of dust particle and tar removal and consume lower energy. These results agree well with other previous studies. However, in this study, the

increase of water to gas ratio does not affect to the dust removal efficiency, while the better spray or finer water droplet is more significant and can provide higher dust removal efficiency.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พลังงานชีวมวล	4
2.2 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล	10
2.3 ปัญหาที่พบจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล	16
2.4 ความสำคัญของการทำความสะอาดก๊าซชีวมวล	26
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีวิจัย	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	40
3.2 วิธีการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	
4.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่น	64
4.2 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อน	66
4.3 ความดันตกคร่อม	68
4.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า	69
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่น	72
5.2 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อน	73
5.3 ความดันตกคร่อม	74
5.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า	74
5.5 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่ควรวิจัยต่อไป	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	76
ภาคผนวก	
ก ผลงานทางวิชาการ	83
ข แบบอุปกรณ์ดักฝุ่น	93
ค แบบหัวฉีดอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์	102
ประวัติผู้วิจัย	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซชีวมวล	8
2.2	องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และก๊าซธรรมชาติ	9
2.3	ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ	12
2.4	ส่วนประกอบของก๊าซดิบที่ผลิตจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ ที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง	17
2.5	การจำแนกระดับน้ำมันดิน	18
2.6	ปริมาณน้ำมันดินจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบ Downdraft แบบต่างๆ	19
2.7	ปริมาณสารองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำมันดิน	22
2.8	ปริมาณน้ำมันดินที่ผลิตจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ	22
2.9	ปริมาณสารปนเปื้อนสูงสุดในก๊าซเชื้อเพลิงที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ	26
2.10	ระดับของน้ำมันดินที่ยอมรับได้ในการใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน และเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	26
2.11	ช่วงความดันน้ำฉัดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด	30
2.12	ช่วงความดันน้ำฉัดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์	31
3.1	ข้อมูลทางเทคนิคเตา Gasifier	42
3.2	ขนาดและวัสดุของหัวสเปรย์น้ำฉัด	44
3.3	ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม	49
3.4	ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า	49
3.5	เงื่อนไขการทดลองช่วงความดันของน้ำฉัด	52
3.6	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)	61

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน	5
2.2	กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อากาศหรือออกซิเจนเป็นสารตัวกลาง	7
2.3	แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล	10
2.4	กลไกการเผาไหม้ชีวมวลและชั้นอุณหภูมิ	11
2.5	ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวมวล	12
2.6	ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลง	15
2.7	แนวความคิดการจัดนํ้ามันดินแบบทุติยภูมิ	20
2.8	แนวความคิดการจัดนํ้ามันดินแบบปฐมภูมิ	20
2.9	ความสัมพันธ์ของช่วงอุณหภูมิและการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนในก๊าซ นอกจากการจัดนํ้ามันดิน	21
2.10	ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่า ตามเกณฑ์ต่างๆ	25
2.11	ตัวอย่างกราฟแสดงประสิทธิภาพย่อยของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบต่างๆ	28
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพในการจับฝุ่น	28
2.13	แรงกระทบที่กระทำกับอนุภาคฝุ่นและละอองนํ้า	29
2.14	กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่นโดยการแพร่	29
2.15	ลักษณะการสเปรย์นํ้าฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด	30
2.16	ลักษณะการสเปรย์นํ้าฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์	31
2.17	ตัวอย่างในการศึกษาการกำจัดก๊าซพิษโดยเวนจูรี	33
2.18	กราฟแสดงการสูญเสียความดันในระบบสเปรย์นํ้าในเวนจูรี	33
2.19	ลักษณะการทำงานของเครื่องดักอนุภาค	34
2.20	สคริปเตอร์แบบเวนจูรี	35
2.21	ลักษณะการผสมกันระหว่างอากาศกับนํ้าภายในคอคอด	37
2.22	การเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วของของไหลที่ภายใน Ejector	38
3.1	ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล แบบ Double throat downdraft gasifier ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อน รุ่น UBU-DTG-003	41
3.2	ผังระบบแก๊สซิฟิเคชัน ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อน	42
3.3	ขนาดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด (a) และอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก ชนิดอีเจ็คเตอร์ (b)	43
3.4	ลักษณะของการสเปรย์นํ้าฉีดและลักษณะของหัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก ชนิดคอคอด	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.5	ลักษณะของการสเปรย์น้ำฉีดและลักษณะของหัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์	44
3.6	ผังชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน	46
3.7	ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน	46
3.8	ชุดอุ่นก๊าซและส่วนติดตั้งกระดาศกรอง	47
3.9	ตู้อบ Hot Air Oven (Model TS8000)	47
3.10	เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง Mettler-Toledo รุ่น AB204-S	48
3.11	อุปกรณ์วัด Digital micro manometer	48
3.12	อุปกรณ์วัด Digital Clamp Multimeters รุ่น UT200	49
3.13	ผังทิศทางการไหลของกระแสก๊าซในการทดลอง	52
3.14	ตำแหน่งเก็บตัวอย่างการทดลอง	53
3.15	ตัวอย่างการดูความขึ้นกระดาศกรอง	54
3.16	ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักกระดาศกรอง	54
3.17	การเชื่อมต่ออนุกรมด้วยสายซิลิโคนทนความร้อนของชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน	55
3.18	ผังชุดอุปกรณ์ดักฝุ่น	56
3.19	ตัวอย่างการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์วัดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนหลังเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น	56
3.20	ตัวอย่างการวัดกระแสไฟฟ้าปั้มน้ำ	57
3.21	ตัวอย่างการดูความขึ้นกระดาศกรอง	58
3.22	ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักกระดาศกรอง	58
3.23	ตัวอย่างปริมาณฝุ่นที่ติดบนกระดาศกรองก่อนเข้าอุปกรณ์	59
3.24	ตัวอย่างการดูความขึ้นด้วยระเหย	59
3.25	ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักด้วยระเหย	60
3.26	ตัวอย่างด้วยระเหยบรรจุสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)	62
3.27	ตัวอย่างการอบระเหยสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)	62
3.28	นำด้วยระเหยที่มีน้ำมันดินและสารปนเปื้อนชั่งน้ำหนัก	63
3.29	ตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อนในด้วยระเหย	63
4.1	ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	66
4.3 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	67
4.4 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	68
4.5 ความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	69
4.6 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	70
4.7 ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ต่อพลังงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	71
4.8 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ต่อพลังงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	71
5.1 ปริมาณฝุ่นหลังออกของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	73
5.2 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนหลังออกของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโต พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นแป้งน้ำตาล กักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง ก็จะได้พลังงานออกมา เมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้เกิดพลังงานความร้อน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป วิธีการหนึ่งที่นิยมนำเอาชีวมวลไปใช้งานในรูปแบบของก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยเทคโนโลยี Gasification เป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo chemical conversion) ที่ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นอย่างซับซ้อน ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี รวมถึงมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ จะได้ก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Producer gas) มีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซเชื้อเพลิงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ทั้งการนำไปใช้โดยตรงในการให้ความร้อน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในการผลิตไฟฟ้า หรือใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีชนิดต่างๆ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลจากเทคโนโลยี Gasification ยังประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซที่เผาไหม้ได้และก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่ก๊าซ ได้แก่ ถ่าน ถ่านลอย ผุ่และน้ำมันดิน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่ก๊าซเหล่านี้ทำให้ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ มีคุณภาพต่ำ และเกิดปัญหากับอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งระบบนำก๊าซชีวมวลไปใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำก๊าซชีวมวลมาผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซเสียก่อน การดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับก๊าซชีวมวลในระบบ Gasification ก่อนที่จะนำไปใช้งาน จำเป็นต้องดักจับสิ่งปนเปื้อนออกมาให้ได้มากที่สุด เพราะสิ่งปนเปื้อนในก๊าซชีวมวล (ปริมาณผุ่และน้ำมันดิน) ถ้ามีปริมาณมากเกินไปอาจทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบผลิตก๊าซชีวมวลและเครื่องยนต์ที่นำก๊าซชีวมวลไปใช้งาน อาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซชีวมวล จึงเป็นหัวใจสำคัญในระบบ Gasification

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซชีวมวล ที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมนำไปใช้งานในระบบ Gasification คือ อุปกรณ์ดักผุ่แบบเปียก (Wet scrubber) ใช้หลักการทำงาน คือ การพ่นละอองน้ำในทิศทางเดียวกันกับกระแสก๊าซ ผ่านบริเวณคอขวด (Venturi) โดยอนุภาคและสิ่งเจือปนจะถูกดักจับด้วยน้ำและไหลลงสู่ถังพักด้านล่าง ส่วนก๊าซที่ถูกทำความสะอาดแล้วจะไหลออกไปทางด้านบน สำหรับอุปกรณ์ดักผุ่แบบเปียกที่ใช้งานเป็นอุปกรณ์หลักในระบบ Gasification มี 2 แบบ ได้แก่ อุปกรณ์ดักผุ่แบบเปียกชนิดคอขวด (Venturi scrubber) มีข้อดีคือ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความดันน้ำฉีดไม่สูงมาก ให้ประสิทธิภาพในการดักจับผุ่ค่อนข้างดี อุปกรณ์มีราคาไม่สูง แต่มีข้อเสียคืออุปกรณ์ชนิดนี้จะทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมในระบบสูง ส่วนอุปกรณ์ดักผุ่แบบเปียกชนิด

อีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) มีข้อดีคือ ช่วยลดค่าความดันตกคร่อมในระบบได้สูง ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นค่อนข้างดี แต่มีข้อเสียคืออุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ความดันน้ำฉีดในการทำงานสูง บำบัดน้ำที่ใช้จะต้องเป็นบ้ำน้ำประสิทธิภาพสูง ดังนั้นต้นทุนก็จะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิของก๊าซชีววมวลได้ด้วย

การนำก๊าซชีววมวลไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในการผลิตไฟฟ้า นั้น จะต้องควบคุมคุณภาพก๊าซชีววมวลให้ได้ค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ซึ่งค่ามาตรฐานปริมาณสารปนเปื้อนสูงสุดในก๊าซชีววมวลที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริมาณฝุ่นไม่ควรเกิน 50 mg/m^3 และปริมาณน้ำมันดิน ไม่ควรเกิน 100 mg/m^3 เพราะถ้าสารปนเปื้อนนี้มีปริมาณมากเกินไป อาจทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหายได้ ดังนั้น อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกเป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวลที่สำคัญในระบบ Gasification ซึ่งอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด เป็นอุปกรณ์ที่ให้ประสิทธิภาพในการดักจับสิ่งปนเปื้อนในกระแสก๊าซได้ดี แต่ยังเกิดความสูญเสียจากความดันตกคร่อมในอุปกรณ์มาก จึงได้มีการนำเอาอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์มาช่วยลดความสูญเสียความดันตกคร่อมในอุปกรณ์ แต่ประสิทธิภาพการดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับกระแสก๊าซของอุปกรณ์ชนิดนี้ ยังไม่มีการทดสอบ นอกจากนี้ยังไม่มี การทดสอบถึงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ เมื่อนำไปใช้งาน ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดสอบเปรียบเทียบในเรื่องของประสิทธิภาพในการดักจับสิ่งปนเปื้อน (ปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน) ค่าความดันตกคร่อมในอุปกรณ์ สภาวะการทำงานที่เหมาะสม รวมทั้งการใช้พลังงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ในการใช้งานจริงในระบบ Gasification

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดักฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความดันตกคร่อมและการใช้พลังงาน ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้ระบบผลิตก๊าซชีววมวลที่มีอยู่แล้ว คือ เตา Gasifier รุ่น UBU-DDTG-003 ที่ศูนย์ทดลองวิชาการพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จังหวัดปทุมธานี

1.3.2 สร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน โดยใช้มาตรฐาน US.EPA Method 5

1.3.3 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) ที่ช่วงความดันของน้ำฉีดที่ 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00 และ 6.00 bar

1.3.4 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอด (Venturi scrubber) ที่ช่วงความดันของน้ำฉีดที่ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 bar

1.3.5 ทำการทดลองในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ขนาด $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ ใช้เตาแบบ Double throat downdraft gasifier

1.3.6 ค่าที่จะทดสอบคือ ปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ของอุปกรณ์ดักฝุ่น ค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่น ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบประสิทธิภาพในการดักฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

1.4.2 ทราบความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venture scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

1.4.3 ทราบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector venturi scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber)

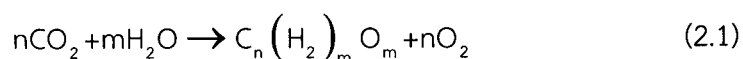
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานชีวมวล

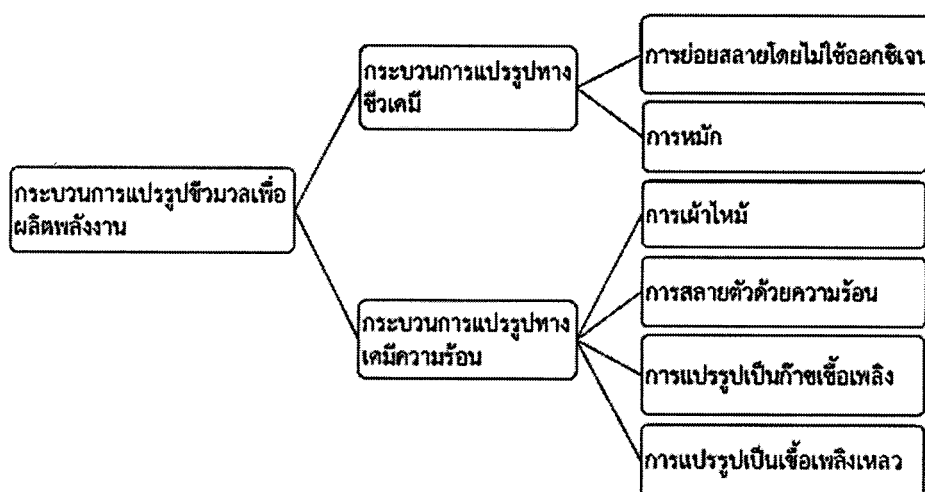
ชีวมวล หมายถึง มวลหรือวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ซึ่งสะสมพลังงานเคมี สามารถนำไปเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงและสามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงฟอสซิลมีที่มาจากแหล่งเดียวกัน คือ พืชและสัตว์ แต่มีความแตกต่างกันด้านเวลา นั่นคือการเกิดเชื้อเพลิงฟอสซิล ต้องใช้ระยะเวลายาวนานมากในการแปรสภาพซากพืช ซากสัตว์ ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่แตกต่าง [1]

แหล่งชีวมวลประกอบด้วยวัสดุหลายประเภท แต่ในทางพลังงานมักจะหมายถึงวัสดุจากพืชเป็นหลัก เช่น วัสดุที่เหลือจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เศษไม้จากการทำป่าไม้หรือแปรรูปไม้ เป็นต้น ชีวมวลจึงกำเนิดจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีของพืชในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ เรียกว่า การสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศและน้ำ (H_2O) เกิดเป็นโมเลกุลคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสะสมพลังงานศักย์ทางเคมี ดังสมการที่ (2.1) ในรูปของคาร์บอน (C) ซึ่งได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H) ซึ่งได้มาจากน้ำ (H_2O)



2.1.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน

การแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน คือ การนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการที่ทำให้อินทรีย์สารในชีวมวลเกิดการสลายตัว และเปลี่ยนรูปได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานที่อยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ กระบวนการหลักที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานมี 2 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการทางเคมีความร้อน และ 2) กระบวนการทางเคมี กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อน และกระบวนการทางเคมี ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน [2]

2.1.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล

กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลหรือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ชีวมวล (Biomass) ถ่านหิน (Coal) ให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์หรือสารตั้งต้นในกระบวนการทางเคมี โดยจะมีปฏิกิริยาเคมีหลายปฏิกิริยาที่เชื่อมโยงกัน ได้แก่ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial oxidation) และไฮโดรเจนเนชัน (Hydrogenation) กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เป็นการเปลี่ยนวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ให้กลายเป็นก๊าซไอเสียและพลังงานความร้อน แต่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้น เป็นการเก็บกักพลังงานเข้าไปในรูปของพันธะทางเคมี จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปให้พลังงานได้ โดยความแตกต่างของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกับกระบวนการเผาไหม้ คือ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีปฏิกิริยารีดิวซ์ (Reduce) ที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แต่กระบวนการเผาไหม้ จะมีเพียงปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเพียงอย่างเดียว

ประวัติความเป็นมาของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล เริ่มในปี ค.ศ.1639 Jan Baptista Van Helmont [3] นักเคมีและนักฟิสิกส์ชาวเบลเยียม ได้ค้นพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ไม้หรือถ่านหิน จะให้ก๊าซที่เผาไหม้ได้ออกมา จากการค้นพบนี้เป็นหลักการที่เป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1669 Thomas Shirley ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากคาร์บอน

ในปี ค.ศ. 1788 Robert Gardner ได้รับการรับรองสิทธิบัตรเกี่ยวกับระบบแก๊สซิฟิเคชันใบแรก

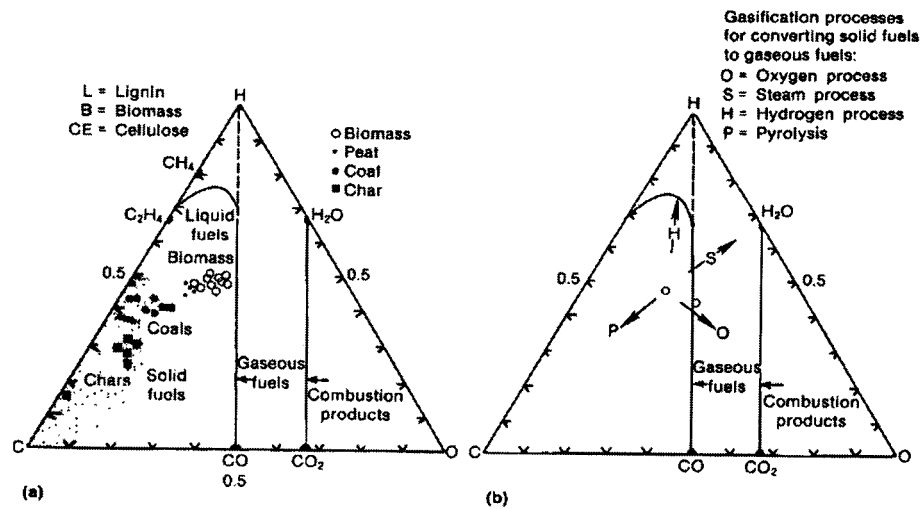
ในปี ค.ศ. 1792 John Barber ได้รับการรับรองสิทธิบัตรการใช้ก๊าซชีวมวล (Producer gas) ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ในปี ค.ศ. 1798 Philippe Lebon ได้ทำให้ระบบผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซชีวมวลเป็นที่รู้จัก โดยเป็นผู้ริเริ่มนำไม้มาเป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซิฟิเคชัน

การใช้งานกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยเริ่มแรกมีการนำมาใช้ในการผลิตก๊าซ เพื่อใช้ในการสร้างแสงสว่าง หรือ “town gas” โดยเริ่มแรกจะเป็นก๊าซที่ใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบในการผลิต และหลังจากนั้นกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงเป็นที่แพร่หลายในแถบประเทศอเมริกา ในปี ค.ศ. 1920 ในเขตชุมชนและเมืองต่างๆ โดยการจ่ายก๊าซไปตามบ้านเรือนเพื่อใช้ในการหุงต้มและเป็นแสงสว่าง โดยใช้ชื่อว่า “gasworks”

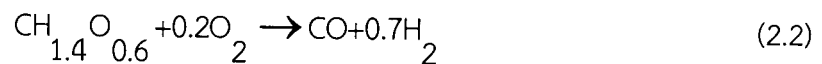
จากนั้นในปี ค.ศ.1930 ได้เริ่มมีการเดินท่อก๊าซธรรมชาติเพื่อส่งก๊าซธรรมชาติ จากบ่อน้ำมันในรัฐ Texas มายังเมือง Denver รัฐ Colorado สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นแนวท่อก๊าซที่วางข้ามรัฐ ทำให้ก๊าซธรรมชาติที่มีราคาถูกมาก เข้ามาแทนที่อุตสาหกรรมแก๊สซิฟิเคชัน และค่อยๆ ลดบทบาทลง ในประเทศอังกฤษ town gas ยังถูกใช้งานจนถึงปี ค.ศ. 1970 และค่อยๆ ลดบทบาทลง เมื่อมีการค้นพบน้ำมันในทะเลเหนือ (The North sea oil)

กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงก๊าซ ด้วยปฏิกิริยาเคมีความร้อน โดยใช้อากาศหรือออกซิเจนดังภาพ 2.2 ที่อินทรีย์สารที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซ ภายใต้ปฏิกิริยาที่ใช้ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) ในปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยปกติกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่าปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ประมาณร้อยละ 30 กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 600-1,500 °C ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีค่าความร้อน 4.5-5.5 MJ/Nm³ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ได้แก่ ประเภทของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ชนิดของเชื้อเพลิง และเงื่อนไขการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ก๊าซที่ผลิตจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะเรียกชื่อแตกต่างกันตามกระบวนการที่ใช้ในการผลิต องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

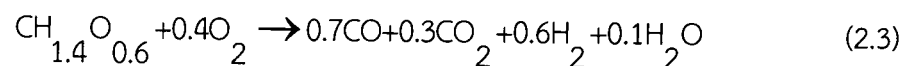


ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลโดยใช้อากาศหรือออกซิเจนเป็นสารตัวกลาง
 (a) เฟสไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนในเชื้อเพลิงในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ
 (b) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีตลอดกระบวนการเปลี่ยนรูปของชีวมวล [4]

ในทางทฤษฎีแล้วต้องการออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก เพราะชีวมวลมีองค์ประกอบที่เป็นออกซิเจนอยู่แล้ว ดังภาพที่ 2.2 (a) เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ (2.2)



เนื่องจากในก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น มีพลังงานในตัวสูงกว่าในชีวมวล ดังนั้นในปฏิกิริยาดังกล่าว จึงต้องการแหล่งความร้อนจากภายนอก ซึ่งในทางปฏิบัติจึงต้องมีการให้ก๊าซออกซิเจนเกินความพอดี (excess oxygen) ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จากรูปที่ 2.2 (b) ในปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ดังสมการที่ (2.3)



นอกจากส่วนประกอบในสมการที่ (2.3) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมี มีเทน (CH_4) ปริมาณเล็กน้อยอีกด้วย โดยองค์ประกอบของก๊าซชีววมวลที่ใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยทั่วไป แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซชีววมวล [4]

องค์ประกอบ	สัญลักษณ์	Gas (% vol)	Dry Gas (% vol)
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	21.0	22.1
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	9.7	10.2
ไฮโดรเจน	H ₂	14.5	15.2
ไอน้ำ	H ₂ O	4.8	-
มีเทน	CH ₄	1.6	1.7
ไนโตรเจน	N ₂	48.4	50.8
ค่าความร้อนสูง (HHV)			
ก๊าซชีววมวลตามมาตรฐานเปียก 5,506 kJ/Nm ³			
ก๊าซชีววมวลตามมาตรฐานแห้ง 5,800 kJ/Nm ³			
อัตราส่วนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน			2.38 kg wood/kg air
อัตราส่วนอากาศสำหรับการเผาไหม้ก๊าซ			1.18 kg gas/kg air
อัตราส่วนอากาศสำหรับการเผาไหม้แบบสมบูรณ์			1.293 kg/m ³

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการทำปฏิกิริยา อยู่ในช่วงระหว่าง 500-1,000 °C ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะเป็นก๊าซผสมของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซมีเทน (CH₄) จะเรียกก๊าซผสมนี้ว่า โพรดิวเซอร์ก๊าซ (Producer gas) ซึ่งหมายถึงก๊าซที่ผลิตโดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ไม่ได้เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โพรดิวเซอร์ก๊าซสามารถผลิตได้จากเชื้อเพลิงหลากหลาย เช่น ถ่านหิน ถ่าน และชีวมวล สำหรับโพรดิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล อาจเรียกชื่อเป็น ก๊าซชีววมวล สำหรับก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูง และใช้ไอน้ำหรือออกซิเจนเป็นสารตัวกลางในการทำปฏิกิริยา จะได้ก๊าซที่เป็นก๊าซผสมของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H₂) จะเรียกก๊าซที่ผลิตจากกระบวนการนี้ว่า ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas; syn gas) นอกจากนี้ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป จากชื่อที่ใช้ในทางวิชาการ ได้แก่ 1) พัวก๊าซ (Pool gas) หมายถึงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ นิยมใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการทำปฏิกิริยา ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนต่ำถึงปานกลาง คือมีค่าความร้อนประมาณ 4-6 MJ/Nm³ ซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนประมาณ 10-15 เท่าของค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ 2) ทาวน์ก๊าซ (Town gas) หมายถึงก๊าซที่ใช้ในเมือง เนื่องจากยุคแรกๆ ที่มีการใช้ก๊าซเชื้อเพลิง ได้มีการนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในการหุงต้มในครัวเรือน และการส่องสว่างทางสาธารณะในพื้นที่ชนบทห่างไกล 3) ซักชันก๊าซ (Suction gas) หมายถึงก๊าซที่ได้จากการดูดอากาศเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยดูดผ่านเครื่องยนต์ 4) วู้ดก๊าซ (Wood gas) หมายถึงก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากไม้ เนื่องจากในยุคแรกๆ ที่นำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิง นิยมใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง [5]

สมบัติและองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวล จะมีความแตกต่างจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากกระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน และก๊าซธรรมชาติที่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยก๊าซธรรมชาติจะมีค่าความร้อนสูงสุด เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในก๊าซธรรมชาติมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณ ร้อยละ 90-99 องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และก๊าซธรรมชาติ แสดงรายละเอียดสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และก๊าซธรรมชาติ [6]

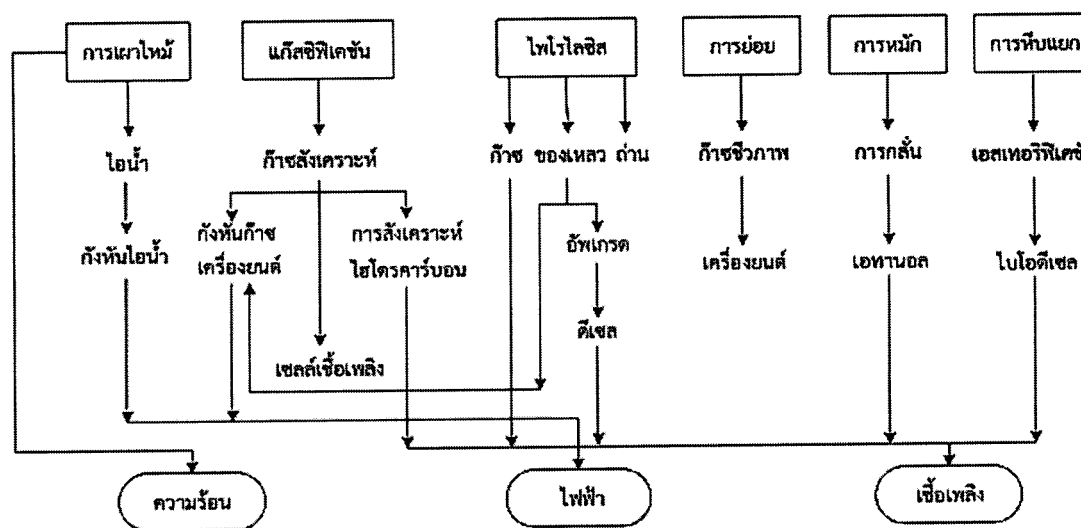
ปริมาณ	ก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล (% vol.)	ก๊าซชีวภาพ (% vol.)	ก๊าซธรรมชาติ (% vol.)
CO	12-20	<1	<0.5
H ₂	15-35	<1	<0.5
CH ₄	1-5	50-75	90-99
CO ₂	10-15	20-50	<1
N ₂	40-50	<1	<1
ค่าความร้อน	4.8-6.4	8-18	35

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานก๊าซชีวมวล

การใช้งานก๊าซชีวมวลเริ่มต้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 โดยมีการพัฒนาเตาแก๊สซิฟิเออร์ขนาดเล็กเพื่อใช้กับเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านไม้และไม้ โดยมีการนำก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์มาใช้กับรถยนต์ รถไฟ เรือ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก [7] การประยุกต์ใช้งานก๊าซชีวมวล มีวิวัฒนาการมาเป็นลำดับอย่างต่อเนื่องตามองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น การนำก๊าซชีวมวลไปใช้งาน จะพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในด้านต่างๆ ได้แก่ ราคาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล นโยบายสนับสนุนการผลิตพลังงานจากพลังงานหมุนเวียนของแต่ละประเทศ แหล่งชีวมวลที่จะนำไปใช้งาน และสถานที่ติดตั้งใช้งาน เป็นต้น ดังจะเห็นได้ว่าในช่วงที่พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาไม่สูงมาก การนำก๊าซชีวมวลไปใช้งานจะไม่แพร่หลายมากนัก ส่วนใหญ่จะนิยมนำก๊าซชีวมวลไปใช้งานในสถานที่ที่ห่างไกลจากความเจริญที่สายส่งไฟฟ้าไปไม่ถึง แต่ในปัจจุบันพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาสูงขึ้นมาก ทำให้รูปแบบการนำพลังงานจากก๊าซชีวมวลไปใช้งาน มีรูปแบบที่เปลี่ยนไป โดยวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน และ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันเริ่มนิยมนำก๊าซชีวมวลไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น ได้แก่ การประยุกต์เพื่อใช้เป็นงานกลในกระบวนการทางอุตสาหกรรม การประยุกต์เพื่อนำไปใช้งานด้านการชลประทานเพื่อการเกษตร [8] การประยุกต์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ การประยุกต์เพื่อนำไปใช้งานในด้านความร้อน และการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งานในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

2.2 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งที่ให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญแหล่งแรกที่มีมนุษยชาติได้ใช้ ปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนา ภาพที่ 2.3 แสดงวิธีใช้ประโยชน์จากชีวมวล ตั้งแต่การใช้พื้นฐานในการเผาไหม้ จนถึงการใช้ด้วยการแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น



ภาพที่ 2.3 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล [1]

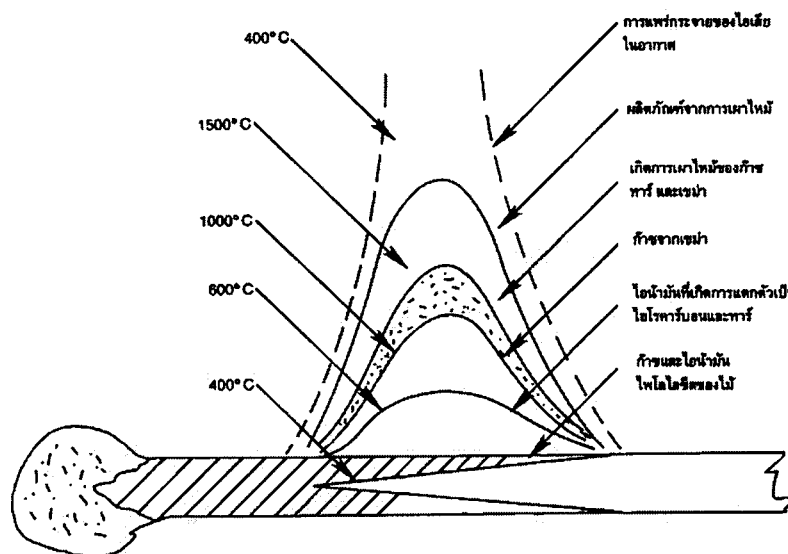
การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานหรือเป็นเชื้อเพลิง มีกระบวนการในการเปลี่ยนรูปหลายวิธี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและประเภทของชีวมวล โดยทั่วไปแบ่งได้ 2 กระบวนการ คือ การเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (Bio-chemical conversion) และการเปลี่ยนรูปโดยเคมีความร้อน (Thermo-chemical conversion)

(1) การเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (Bio-chemical conversion) ปฏิกริยาทางเคมีเป็นการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลาย แบ่งออกได้ 2 กระบวนการ คือ การหมักในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) พลังงานในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซเรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Bio-gas) และการหมักผลิตแอลกอฮอล์ (Fermentation) เป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์หรือยีสต์เป็นตัวทำปฏิกิริยาย่อยสลาย

(2) การเปลี่ยนรูปโดยความร้อน (Thermo-chemical conversion) การเปลี่ยนรูปโดยความร้อนเป็นการสลายพันธะเคมีของชีวมวลไปเป็นแหล่งพลังงานที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ วิธีการเปลี่ยนรูปโดยความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทชีวมวล และเป้าหมายในการใช้งาน ในที่นี้จะเน้นการเปลี่ยนรูปทางความร้อน 2 แบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และใช้งานง่าย การเผาไหม้โดยตรงและการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(2.1) การเผาไหม้ชีวมวลโดยตรงเพื่อให้พลังงานความร้อน การเผาไหม้ตรงเป็นปฏิกิริยาเคมี การรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการลุกไหม้และการคายความร้อนออกมา โดยใช้ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 23 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก ซึ่งมี

ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ก๊าซออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวเชื้อเพลิง การเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่พื้นผิว และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ โดยกลไกการเผาไหม้ ดังภาพที่ 2.4



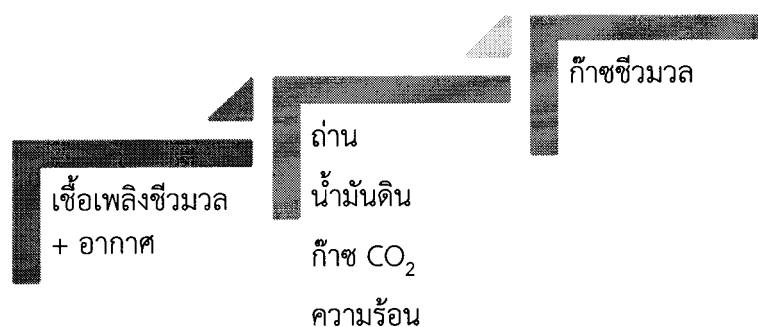
ภาพที่ 2.4 กลไกการเผาไหม้ชีวมวลและชั้นอุณหภูมิ [1]

ถ้าวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าไม้ที่นำมาตากแห้ง (air-dried wood) ที่มีค่าความชื้นประมาณร้อยละ 20 จะให้พลังงานออกมา 10 GJ/m³ ถ้าเปรียบเทียบพลังงานดังกล่าวกับการต้มน้ำ 1 ลิตร ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C ต้องการพลังงานความร้อน 4.2 kJ ถ้าต้มน้ำจนเดือดจะต้องใช้พลังงานความร้อน 420 kJ ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่ผลิตจากไม้แห้งเพียง 42 m³ แต่ในทางปฏิบัติการต้มน้ำปริมาณนี้ ต้องใช้ไม้ตากแห้งมากกว่าปริมาณที่คำนวณได้ถึง 50 เท่า ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยตรงมีค่าต่ำมาก ซึ่งอาจจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 และนอกจากนี้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ยังขึ้นกับปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงอีกด้วย [9]

ตารางที่ 2.3 ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ [10]

เชื้อเพลิง	ค่าพลังงาน	
	GJ/ton	GJ/m ³
ไม้ (ความชื้น 20%)	15	10
กระดาษ	17	9
มูลสัตว์ (แห้ง)	16	4
ฟาง	14	1.4
อ้อย	14	10
ขยะ	9	1.5
หญ้า (สด)	4	3
น้ำมันปิโตรเลียม	42	34
ถ่านหิน	28	50
ก๊าซธรรมชาติ	55	0.04

(2.2) กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Gasification) กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Gasification) คือ กระบวนการเปลี่ยนวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น ถ่านหิน ชีวมวล ขยะ กากสารเคมี ปิโตรเคมี ฯลฯ ให้กลายเป็นก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) หรือก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer gas) หรืออาจเรียกตามชนิดของวัตถุดิบ เช่น ก๊าซชีวมวล (Biomass gas) คือ ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวล เป็นต้น โดยที่นี้จะใช้คำว่าก๊าซชีวมวล ซึ่งก๊าซสังเคราะห์จะประกอบด้วย ส่วนประกอบหลักคือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) และ ก๊าซอื่นๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) และการออกแบบระบบผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Gasifier) โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาเคมีเชิงความร้อน (Thermal reaction) อาศัย ออกซิเจน (O₂) หรือไอน้ำ (H₂O) เป็นตัวออกซิไดซ์ในการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ประกอบด้วยสมการเคมี ในการเกิดก๊าซสังเคราะห์ โดยกลไกการเกิดก๊าซชีวมวล ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวมวล [1]

ปฏิกิริยาเคมีความร้อนของการเกิดก๊าซชีวมวล (Gasification) กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลแบบจำกัดอากาศนั้นประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการอบแห้ง (Drying) โดยจะแยกเป็นโซน หรือช่วงบริเวณของปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดังนี้

(1) โซนการเผาไหม้ (Combustion zone) โซนการเผาไหม้ บางที่อาจเรียกว่าโซนออกซิเดชัน (Oxidation zone) อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาในบริเวณนี้และสัมผัสกับเชื้อเพลิงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4)



ปฏิกิริยา (2.3) และ (2.4) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในโซนรีดักชันและโซนการกลั่นสลายต่อไป อุณหภูมิในโซนการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 1,100-1,500 °C

(2) โซนรีดักชัน (Reduction zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าสู่โซนการเผาไหม้และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจน ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วก็จะไหลผ่านสู่โซนรีดักชัน ดังนั้นปฏิกิริยาหลักในโซนนี้จะปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน (Reduction reaction) อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ระหว่าง 500-900 °C โซนการเผาไหม้จะเปลี่ยนบางส่วนของก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ (คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ) ให้เป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่เกิดขึ้นไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการต่อไปนี้

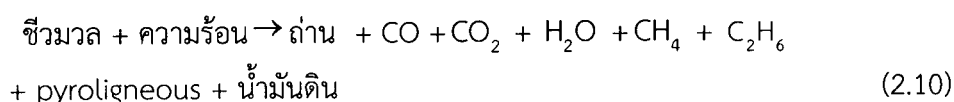


ปฏิกิริยา (2.5) เรียกว่า Boudouard reaction และปฏิกิริยา (2.6) เรียกว่า Water gas reaction เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C และก๊าซที่ได้จาก 2 ปฏิกิริยานี้เป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในก๊าซผสมที่ได้จากเตาผลิตก๊าซ (Producer gas) ก๊าซหลักนี้ก็คือก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ซึ่งในหลักการแล้วควรมีจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในก๊าซชีวมวลนี้ ขึ้นอยู่กับว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้มากแค่ไหนในโซนรีดักชัน การเปลี่ยนแปลงนี้

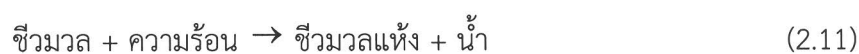
จะขึ้นอยู่กับความเร็วระหว่างก๊าซกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่ผิวสัมผัสก๊าซ ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ใส่ในเตาผลิตก๊าซจึงมีผลต่อการเกิดก๊าซเชื้อเพลิง กล่าวคือถ้าขนาดของเชื้อเพลิงใหญ่เกินไป อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรจะมีค่าต่ำ เมื่อจะทำการจุดเตาจึงยากกว่าปกติ และช่องว่างระหว่างชั้นของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่มากเกินไป ทำให้เกิดช่องว่างมาก ก๊าซออกซิเจนบางส่วนจะไหลผ่านบริเวณช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงนี้ โดยไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิง เป็นผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงเล็กเกินไปจะเกิดความดันสูญเสีย (Pressure loss) ในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมดูดก๊าซขนาดใหญ่ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และก๊าซที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากกว่าปกติ นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงที่ขึ้นเล็กเกินไปทำให้เกิดโพรงเล็กๆ ขึ้นในตัวเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง อากาศจะพยายามแทรกขึ้นตามโพรงเหล่านี้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอากาศที่ไหลขึ้นตามโพรงนี้จึงไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นต้นเหตุให้ก๊าซที่ได้มีคุณภาพต่ำลง จากปฏิกิริยา (2.5) ถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชันสูงกว่า 900°C แล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 90% และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$ แล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หมด ดังนั้นประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซนรีดักชันในเตาผลิตก๊าซ

เมื่อก๊าซอุณหภูมิสูงจากโซนการเผาไหม้ไหลเข้าสู่โซนนี้ อุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในปฏิกิริยา (2.5) และ (2.6) ปฏิกิริยาไอน้ำกับคาร์บอนเพื่อที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยา (2.6) โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ $500-600^{\circ}\text{C}$ ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญ เพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซมีมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ก๊าซมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น แต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา (2.7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water shift reaction ทำให้เกิดความร้อนของก๊าซที่ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระมัดระวังเกี่ยวกับความชื้นของเชื้อเพลิงที่จะเข้าเตาผลิตก๊าซ ส่วนใหญ่ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในโซนรีดักชันนี้ จะยังคงเป็นรูปไฮโดรเจน แต่อย่างไรก็ตาม บางส่วนของไฮโดรเจนก็จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้เล็กน้อยดังในปฏิกิริยา (2.9) ที่เรียกว่า การผลิตมีเทน (Methane production)

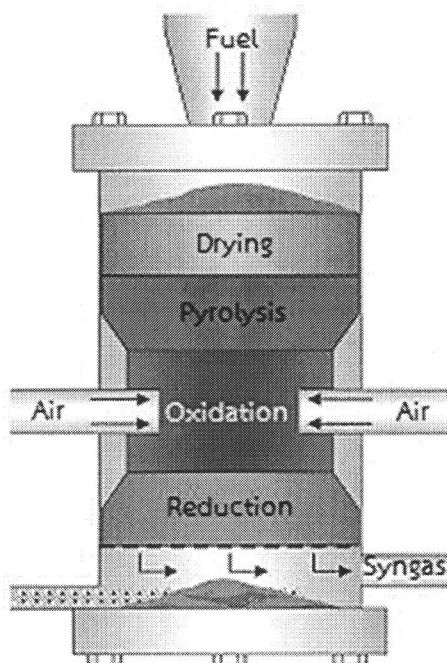
(3) โซนการกลั่นสลาย (Pyrolysis zone) ในโซนนี้จะได้รับความร้อนจากโซนรีดักชันเพื่อที่จะสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง ทำให้ได้เมทานอล กรดน้ำส้ม และน้ำมันดิน (Tar) อุณหภูมิในโซนนี้จะประมาณ $200-500^{\circ}\text{C}$ ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่านซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาต่อในโซนรีดักชันและโซนการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโซนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้



(4) โซนการอบแห้ง (Drying zone) ในบริเวณโซนนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยออกมาในรูปของไอน้ำ โซนนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ $100-200^{\circ}\text{C}$ ดังสมการต่อไปนี้



เตาผลิตก๊าซชีวมวลถือเป็นหัวใจสำคัญของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล เพราะเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวล ซึ่งภายในเตาจะมีการแบ่งเป็นโซนหรือช่วงบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว ชนิดของเตาโดยทั่วไปมีหลายประเภท แต่จะขอนำเสนอข้อมูลของเตาที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้ คือ เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasifier) เป็นเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง (Imbert type) เตาชนิดนี้มีลักษณะเด่น คือ เป็นเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่มีวงแหวน (Construction ring) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยารีดักชันและมีหัวฉีด (Nozzle) เพื่อจ่ายอากาศเข้าสู่โซนเผาไหม้ โดยที่มาของชื่อ Imbert type มาจากนักประดิษฐ์ที่สร้างเตาแบบนี้เป็นคนแรกคือ Jacques Imbert [11] โดยหลักการทำงานในกรณีที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ อากาศจะถูกอัดเข้าหรือถูกดึงเข้าสู่ตัวเตา ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้โบเวอร์ (Blower) ในการดูดผ่านอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงระบบทำความสะอาด ก่อนนำไปใช้งาน เช่น นำไปใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตไฟฟ้า หรือส่งไปใช้งานในด้านความร้อน เป็นต้น ในขณะที่เตานี้ทำงาน อากาศที่เข้าสู่โซนเผาไหม้ จะเกิดการเผาไหม้กับถ่านและทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิส เชื้อเพลิงที่อยู่เหนือหัวฉีดอากาศ ซึ่งจะได้อาหารระเหยและทาร์ จะไหลลงมาและเกิดการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ดังกล่าวจะไหลลงไปทำปฏิกิริยากับถ่านที่ยังเหลืออยู่ ในบริเวณใต้หัวฉีดอากาศที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงในบริเวณโซนนี้ [12]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลง [1]



2.3 ปัญหาที่พบจากกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของแข็งของเหลวและก๊าซ ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นก๊าซประกอบด้วยก๊าซที่เผาไหม้ได้ ส่วนก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ได้แก่ อนุภาคคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ ผุ่น เถ้า และถ่าน ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลว ได้แก่ ความชื้น แต่ในทางปฏิบัติก๊าซชีววมวลจะประกอบไปด้วยสารองค์ประกอบของก๊าซที่มีอนุภาคฝุ่น น้ำมันดินและสารประกอบอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งทำให้ก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำและก่อให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งระบบนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำก๊าซชีววมวลมาผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซเสียก่อน และต้องเลือกอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซให้เหมาะสมกับการนำก๊าซชีววมวลไปใช้งาน เช่น ถ้าต้องการดักจับฝุ่นที่มีขนาดใหญ่นิยมใช้ไซโคลน ถ้าต้องการดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กและน้ำมันดินนิยมใช้เวนจูร์สครับเบอร์ เป็นต้น

ส่วนประกอบของก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้ [13] จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแต่ละประเภท มีหลักการทำงานและลำดับในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน ดังนั้น ก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้จึงมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ก๊าซที่ผลิตจากกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลจะประกอบด้วยก๊าซที่เผาไหม้ได้เรียกว่า ก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และก๊าซอีเทน (C_2H_6) ส่วนก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นที่เกิดขึ้นอีกได้แก่ แกลลอย ออกไซด์ ไนโตรเจน (NO_x) และน้ำมันดิน ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบผลิตก๊าซชีววมวล รวมไปถึงเครื่องยนต์ที่นำก๊าซชีววมวลไปใช้งาน ก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้ก่อนที่จะนำไปผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซ เรียกว่า ก๊าซดิบ (Raw gas) ส่วนประกอบของก๊าซดิบที่ผลิตจากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบต่างๆ ที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของก๊าซดิบที่ผลิตจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ ที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง [4]

สารปนเปื้อน	หน่วย	เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น	เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบเบดเคลื่อนที่แบบของไหล
ความชื้น	%	ไม่มีข้อมูล	6-25	13-20
อนุภาคฝุ่น	mg/Nm ³	100-3,000	100-8,000	8,000-100,000
น้ำมันดิน (ค่าเฉลี่ย)	mg/Nm ³	10,000-150,000 50000	10-6,000 500	2,000-30,000 8000
ค่าความร้อนต่ำ	MJ/Nm ³	3.7-5.1	4.0-5.6	3.6-5.9
H ₂	% Vol	10-14	15-21	15-22
CO	% Vol	15-20	10-22	13-15
CO ₂	% Vol	8-10	11-13	13-15
CH ₄	% Vol	2-3	1-5	2-4
C _n H _m	% Vol	วัดไม่ได้	9.5-2	0.1-1.2

อนุภาคฝุ่นที่ปนเปื้อนในก๊าซชีววมวลขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของเชื้อเพลิง ประเภทของเตาผลิตก๊าซชีววมวล อัตราการผลิตก๊าซชีววมวล และอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้ ประเภทของเตาผลิตก๊าซชีววมวลเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการเกิดฝุ่น จากลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตามขวางที่มีช่องทางออกของก๊าซเชื้อเพลิงอยู่ตรงข้ามกับช่องจ่ายอากาศ จะมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซที่ช่องทางออกมีค่าสูง ซึ่งจะมีผลทำให้อนุภาคฝุ่นปนเปื้อนในก๊าซชีววมวลสูง อัตราการผลิตก๊าซชีววมวลก็เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเกิดฝุ่น ถ้าเตาผลิตก๊าซชีววมวลทำงานที่อัตราการผลิตก๊าซชีววมวลสูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้ จะทำให้มีฝุ่นปนเปื้อนในปริมาณสูงถึง 2,000 mg/m³ สำหรับกรณีที่นำก๊าซชีววมวลไปใช้กับเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้า ถ้าอนุภาคฝุ่นปนเปื้อนในก๊าซชีววมวล มีค่ามากกว่า 10 mg/m³ จะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ [15]

ความชื้นที่ปนเปื้อนในก๊าซชีววมวลจะอยู่ในรูปของไอน้ำ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ ความชื้นในเชื้อเพลิง ความชื้นที่ปนมากับอากาศที่ใช้เป็นสารตัวกลางในการทำปฏิกิริยา ความชื้นที่มาจากไอน้ำในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการทำปฏิกิริยา และน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีววมวล

น้ำมันดิน (Tar) จัดเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานมากที่สุดสำหรับระบบผลิตก๊าซชีววมวล เพราะในก๊าซชีววมวลมีน้ำมันดินปนเปื้อนอยู่จำนวนมาก เมื่อก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดเดือดของน้ำมันดิน น้ำมันดินก็จะควบแน่นจากสถานะก๊าซเป็นของเหลว และจะเกาะตามผนังท่อ วาล์ว โบลเวอร์ และในกรณีใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน น้ำมันดินมักจะไปควบแน่นในบริเวณคาบูเรเตอร์ และวาล์วไอดี เพราะบริเวณดังกล่าว ก๊าซจะมีการไหลผ่านด้วยความเร็วสูง จึงทำให้อนุหภูมิของก๊าซ

ที่ผ่านบริเวณนั้นลดลง นอกจากนี้ น้ำมันดินมักจะจับตัวกับผงฝุ่น (Soot) ทำให้เกิดลักษณะของชั้นโคลนสีดำติดในอุปกรณ์ต่างๆ

ทั้งนี้ส่วนประกอบของน้ำมันดินจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการเกิดขึ้นของน้ำมันดินโดย Evans และ Milne (Evans & Milne) ได้จำแนกน้ำมันดินที่ออกจากเตาไพโรไลซิสและเตาแก๊สซิฟิเคชัน ออกเป็น 4 กลุ่มหลักๆ คือ น้ำมันดินปฐมภูมิ (Primary tars) น้ำมันดินทุติยภูมิ (Secondary tars) น้ำมันดินตติยภูมิอัลคาไลน์ (Alkyl tertiary tars) และน้ำมันดินตติยภูมิควบแน่น (Condensed tertiary tars) โดยน้ำมันดินปฐมภูมินั้น เป็นส่วนประกอบดั้งเดิมที่ได้โดยตรงจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล น้ำมันดินทุติยภูมิจะมีส่วนประกอบหลักๆ เป็นฟีนอล (Phenolic) และโอเลฟิน (Olefin) และผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนรูปมาจากน้ำมันดินปฐมภูมิ ส่วนน้ำมันดินตติยภูมิอัลคาไลน์จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นกลุ่มเมทิลที่ได้จากพวกอะโรมาติก (Aromatic) ได้แก่ สเตียรีน (Styrene) และไซลีน (Xylene) และสุดท้ายน้ำมันดินตติยภูมิควบแน่นจะเป็นพวกโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) โดยไม่มีการเปลี่ยนรูป นอกจากนี้ สามารถจัดลำดับชั้นของน้ำมันดินและการตรวจวัด (Tar classification and measurement) [16] ระดับชั้นของน้ำมันดินนั้น สามารถจำแนกออกเป็นระดับได้ 5 ระดับตามระดับผลกระทบที่มีต่อการใช้งาน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การจำแนกระดับน้ำมันดิน [16]

ระดับชั้น	รายละเอียด
Class 1	ไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยเครื่อง GC น้ำมันดินระดับนี้จะมีโมเลกุลที่หนักที่สุด โดยจะสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิสูง แต่มีปริมาณน้อยมาก
Class 2	เป็นสารประกอบในกลุ่ม Heterocyclic (ได้แก่ phenol, pyridine, cresol) โดยสารพวกนี้จะสามารถละลายน้ำได้ดี เพราะมีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Polarity)
Class 3	เป็นสารประกอบในกลุ่ม Aromatic (ได้แก่ 1 ring xylene, styrene, toluene) เป็นกลุ่ม Light hydrocarbon ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก เพราะสามารถควบแน่นและละลายในน้ำได้
Class 4	เป็นสารประกอบในกลุ่ม Light polycyclic aromatic hydrocarbon (2-3 ring PAH compound เช่น naphthalene, fluorene, phenanthrene) น้ำมันดินกลุ่มนี้จะควบแน่นที่อุณหภูมิปานกลางที่ความเข้มข้นสูง
Class 5	เป็นสารประกอบในกลุ่ม Heavy polycyclic aromatic hydrocarbons (4-7 ring PAH compounds เช่น fluoranthene, pyrene, และ coronene) น้ำมันดินกลุ่มนี้จะควบแน่นที่อุณหภูมิสูงที่ความเข้มข้นต่ำ

โดยทั่วไปนั้นเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบ Downdraft gasifier จะมีน้ำมันดินปนออกมาประมาณ 1% ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับระบบผลิตก๊าซชีวมวลแบบอื่นๆ โดยปริมาณน้ำมันดินจากเตาผลิตก๊าซชีวมวล Downdraft แบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณน้ำมันดินจากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบ Downdraft แบบต่างๆ [17]

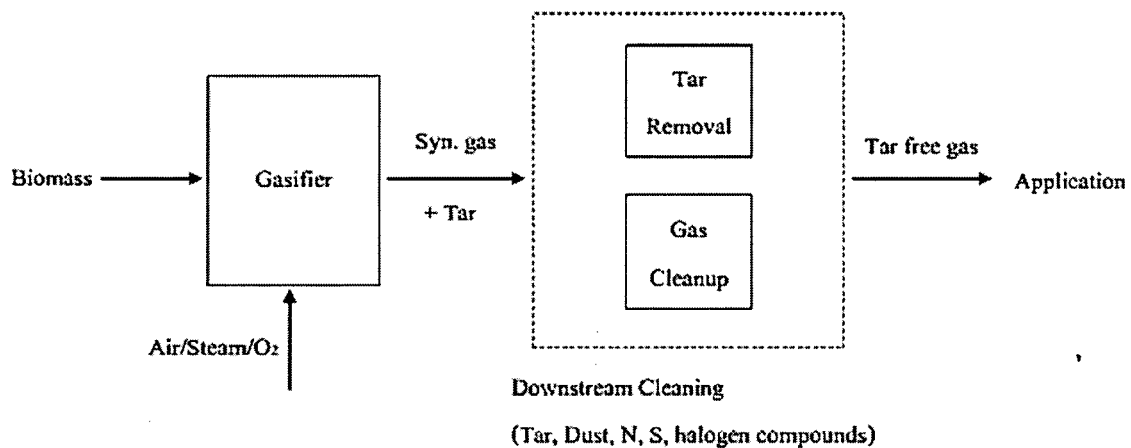
เตาผลิตก๊าซ	กำลังการผลิต (kg/hr)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง คอคอด (m)	ภาระจำเพาะ (kg/hr.m ²)	ปริมาณ น้ำมันดิน (g/Nm ³)
Kromag KS-12	15.0	0.12	1,330	0.62
Kromag K-4	7.5	0.09	1,180	1.90
Semmler	12.0	0.15	680	0.88
Danneberg	19.0	0.15	1,075	0.70
Leobersdorer	36.0	0.42	260	1.20
TH. Twente	20.0	0.20	640	0.5
Forintek Canada	50.0	-	-	3.00
Minigasifier	0.2	0.01	2,550	3.00

การกำจัดน้ำมันดิน [18] มีวิธีการซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ตามตำแหน่งที่ตั้งเอาน้ำมันดินออกมา คือ การกำจัดน้ำมันดินภายในตัวเตาเอง (วิธีการแบบปฐมภูมิ (Primary method)) และการกำจัดน้ำมันดินภายนอกตัวเตา (วิธีการแบบทุติยภูมิ (Secondary)) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) วิธีการแบบทุติยภูมิ วิธีการแบบนี้เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดน้ำมันดินจากก๊าซชีววมวลที่ออกจากเตา โดยแนวคิดของวิธีการนี้ ดังภาพที่ 2.7 โดยจะใช้การบำบัดโดยเคมี (Chemical treatment) หรือการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) ได้แก่

(1.1) การทำให้น้ำมันดินแตกตัว (Tar cracking) หลังจากก๊าซชีววมวลออกจากเตาแล้ว โดยกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic)

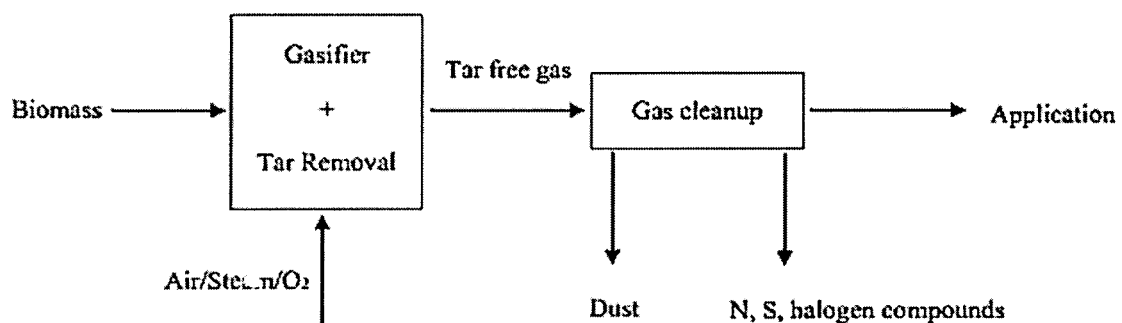
(1.2) การใช้วิธีทางกล เช่น ไซโคลน (cyclone), แผ่นกรอง (baffle filter), กรองเซรามิค (ceramic filter), กรองผ้า (fabric filter), เครื่องแยกฝุ่น (particle separator), เครื่องแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic), และเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 แนวคิดการกำจัดน้ำมันดินแบบทุติยภูมิ [18]

ทั้งนี้โดยส่วนใหญ่แล้วระบบกำจัดน้ำมันดินจากก๊าซที่ออกจากเตาแล้ว ถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดี ถึงแม้ในบางกรณีอาจจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ ผลพลอยได้จากวิธีการแบบนี้ คือ สามารถลดแอมโมเนียที่ปนเปื้อนในก๊าซได้ [19] โดยพบว่า ถ้าต้องการให้ก๊าซที่ออกมา มีความสะอาดมาก ต้องใช้กระบวนการกำจัดที่ซับซ้อน ซึ่งกระบวนการแบบ 3 ขั้นตอน [20] สามารถทำให้ก๊าซชีวมวลที่ได้มีความสะอาดมาก (มีระดับความเข้มข้นของน้ำมันดินต่ำ)

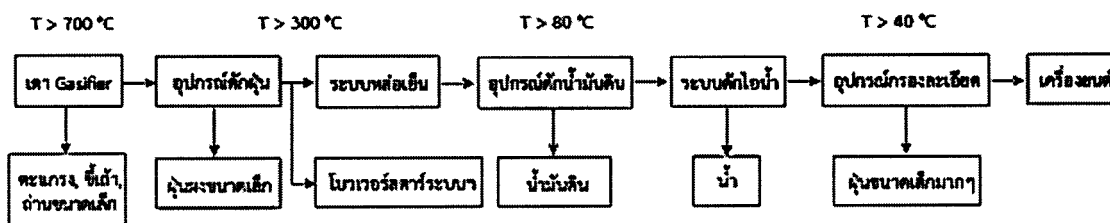
(2) วิธีการแบบปฐมภูมิ วิธีการแบบนี้ ใช้หลักการป้องกันการเกิดน้ำมันดินตั้งแต่ในเตา คือการยับยั้งการก่อตัวของน้ำมันดิน ซึ่งจะทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวมวลไม่ต้องการวิธีกำจัดน้ำมันดินแบบทุติยภูมิ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แนวคิดการกำจัดน้ำมันดินแบบปฐมภูมิ [18]

แต่ทั้งนี้วิธีการแบบนี้ ก็ยังมีหลายอย่างที่ยังหาคำตอบไม่ได้ รวมทั้งยังไม่มีการสร้างในเชิงพาณิชย์ โดยการที่จะได้ก๊าซชีวมวลที่ออกมา มีคุณภาพดีที่สุดนั้น จะต้องออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลให้เหมาะสมกับการใช้งาน และให้เตาดังกล่าวทำงานที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด Corella et al. [21] ได้นำเสนอว่าการใส่โดโลไมต์ (dolomite) เข้าไปในเตาแบบฟลูอิดไดเบด (fluidized-bed gasifier) นั้น พบว่า น้ำมันดินที่ออกมาจากเตามีค่าใกล้เคียงกันกับ การใช้โดโลไมต์ในถังปฏิกรณ์ภายนอกเตา

ขั้นตอนการออกแบบระบบทำความสะอาดก๊าซชีววมวลที่มีประสิทธิภาพนั้น จะต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ขนาด และลักษณะของการปนเปื้อนของก๊าซ เพื่อใช้ประกอบการออกแบบระบบกำจัดสิ่งปนเปื้อนให้เหมาะสมกับก๊าซที่ออกจากเตา และนอกจากนี้ ในการออกแบบระบบทำความสะอาด ต้องคำนึงถึงช่วงอุณหภูมิของก๊าซที่ผ่านเข้ามาสู่ระบบผลิต เพราะช่วงอุณหภูมิของก๊าซ ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันดิน และไอน้ำที่มีอยู่ในก๊าซ โดยสามารถจำแนกระบบต่างๆ ที่ทำงานที่อุณหภูมิต่างกัน ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของช่วงอุณหภูมิและการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนในก๊าซนอกจากการกำจัดน้ำมันดิน [22]

นอกจากนี้น้ำมันดิน ยังเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการควบแน่นของสารไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบเชิงซ้อนอื่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน ในระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล มีสารองค์ประกอบต่างๆ มากกว่า 10 ชนิด ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ สารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ ฝุ่น และก๊าซต่างๆ รวมทั้งก๊าซชีววมวลที่เผาไหม้ได้ และก๊าซชีววมวลที่เผาไหม้ไม่ได้ สารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา ไปจนถึงสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สำหรับสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเบา สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้ แต่สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลหนัก เช่น น้ำมันดิน จะควบแน่นหรือเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลที่ท่อทางออกของก๊าซ ทำให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำไปใช้งาน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กัน ซึ่งมีทั้งสารไฮโดรคาร์บอนเบาที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และสารไฮโดรคาร์บอนหนัก ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดนิยามของน้ำมันดินโดยองค์การพลังงานระหว่างชาติ (The International Energy Agency; IEA) และกรมพลังงาน (Department of Energy; DOE) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ตกลงร่วมกันกำหนดความหมายของน้ำมันดิน หมายถึงองค์ประกอบทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเบนซีน (benzene) [15] ปริมาณสารองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในน้ำมันดิน ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7. ปริมาณสารองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำมันดิน [2]

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (%)
เบนซิน	37.9
โทลูอีน	14.3
สารอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 1 วง	13.9
แนพทาลิน	9.6
สารอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 2 วง	7.8
สารอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 3 วง	3.6
สารอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 4 วง	0.8
สารประกอบฟีนอลิก	4.6
สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก	6.5
สารประกอบอื่น	1.0

เตาผลิตก๊าซชีววมวลแต่ละชนิด ก็มีปริมาณน้ำมันดินที่ปนเปื้อนมากับก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้ มากน้อยไม่เท่ากัน เพราะเตาผลิตก๊าซชีววมวลชนิดต่างๆ มีลักษณะและกลไกในการทำงาน ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณน้ำมันดินที่ปนเปื้อนออกมากับก๊าซชีววมวล ปริมาณน้ำมันดินที่ผลิต จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ปริมาณน้ำมันดินที่ผลิตจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ [22]

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	ปริมาณน้ำมันดิน ในก๊าซเชื้อเพลิง (g/Nm ³)	ปริมาณน้ำมันดิน ต่อน้ำหนักชีววมวล (%)
แบบไหลขึ้น	50	10-20
แบบไหลลง	น้อยกว่า 1	น้อยกว่า 2
แบบเบดเคลื่อนที่แบบของไหล	10	1-5
แบบอนุภาคไหลเป็นแถว	น้อยมากไม่สามารถ ตรวจวัดได้	น้อยมากไม่สามารถ ตรวจวัดได้

2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีววมวลโดยการประมาณค่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีววมวลโดยการประมาณค่า [13] (proximate analysis) จะวิเคราะห์โดยอ้างอิงหลักวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและ ถ่านโค้ก ที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ และวัสดุของสมาคมอเมริกันสำหรับถ่านหิน ASTM D3172-07 ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์และมาตรฐานปริมาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ไว้ การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีววมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่า ปริมาณที่ทำการ วิเคราะห์มี 4 ปริมาณได้แก่

(1) ความชื้น (Moisture Content) ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม โดยเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน D-871-1762-84 (ASTM D-1762-84) และสำหรับเชื้อเพลิงขยะ (refuse derived fuel: RDF) ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน E-949-88 (ASTM E-949-88) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่างๆ จะแตกต่างกันไป เช่นการวิเคราะห์ค่าความชื้นของไม้ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-1762-84 (ASTM D-1762-84) จะใช้ไม้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้ำหนัก 50 g อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 30 min และหลังจากนั้นทิ้งไม้ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 °C เป็นระยะเวลา 16 hr และหลังจากนั้นนำไม้ออกมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไปคือค่าความชื้นที่อยู่ในไม้

(2) สารระเหย (Volatile Matter) สารระเหยที่อยู่ในชีวมวลหมายถึง ไขมันที่สามารถควบแน่นได้ และไขมันที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ที่ปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ปริมาณสารระเหยที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิ ในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม สำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน E-872 (ASTM E-872) การวิเคราะห์ทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 50 g ที่สุ่มมาจากเชื้อเพลิงไม้ 10 kg โดยการสุ่มตัวอย่างใช้วิธีตามมาตรฐาน D-346 (ASTM D-346) และนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 mm และนำเชื้อเพลิงแห้งที่บดแล้วน้ำหนัก 1 g มาใช้ในการวิเคราะห์โดยวางตัวอย่างในเบ้าหลอมที่มีฝาปิดและใส่ลงไปในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 950 °C โดยให้ความร้อนเป็นเวลา 7 min สารระเหยจะปล่อยออกมา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเปลวไฟ หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาและทำให้เย็น และชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงไม้ น้ำหนักส่วนที่หายไปคือสารระเหย

(3) เถ้า (Ash) คือ สารอนินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากที่คาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว สารอนินทรีย์ที่อยู่ในเถ้าได้แก่ ซิลิกา อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-1102 (ASTM D-1102) การวิเคราะห์เถ้าทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 2 g ที่มีขนาดเล็กกว่า 475 µm อบแห้งตามวิธีมาตรฐาน และนำมาวางบนเบ้าหลอมที่ไม่ต้องปิดฝา และใส่ไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อคาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น และนำมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้เป็นน้ำหนักของเถ้าที่อยู่ในเชื้อเพลิง

(4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนในชีวมวลที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านชาร์หลังจากที่สารระเหยถูกปล่อยออกมาในกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน การหาค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถหาได้เมื่อทราบปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และเถ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.12)

$$F_C = 1 - M - VM - Ash \quad (2.12)$$

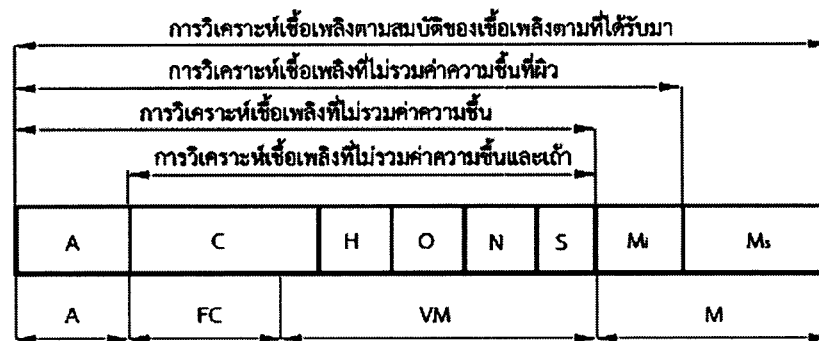
เมื่อ F_C = ปริมาณคาร์บอนคงตัว
 M = ปริมาณความชื้น
 VM = ปริมาณสารระเหย
 Ash = ปริมาณเถ้า

ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและจากการวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหย ซึ่งโดยปกติจะหมายถึงถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสลายด้วยความร้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลโดยการประมาณค่าอาจทำการวิเคราะห์ตามลักษณะของชีวมวลที่ใช้ในการพิจารณาที่มีลักษณะที่แตกต่างกันเป็น 4 แบบ

- (1) วิเคราะห์เชื้อเพลิงตามสมบัติของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา (As received basis)
- (2) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้ง (Total dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงที่ไม่พิจารณาความชื้นทั้งหมดที่อยู่ในเชื้อเพลิง
- (3) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาที่ไม่รวมความชื้นที่ผิว (air dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งที่ไม่พิจารณาความชื้นที่อยู่ผิวของเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง
- (4) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งและไม่มีเถ้า (dry ash free basis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งที่ไม่พิจารณาความชื้นและเถ้าเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ภายใต้เกณฑ์ต่างๆ ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์และปริมาณองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าแตกต่างกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามเกณฑ์ที่พิจารณาต่างๆ กันจะได้ข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่นการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งตามลักษณะของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา ข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วย เถ้า คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของชีวมวลและความชื้นที่อยู่ผิวของชีวมวล ปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งตามเกณฑ์ต่างๆ ทั้ง 4 แบบ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2.10



A หมายถึง เถ้า H หมายถึง ไฮโดรเจน N หมายถึง ไนโตรเจน
 C หมายถึง คาร์บอน O หมายถึง ออกซิเจน S หมายถึง ซัลเฟอร์
 M หมายถึง ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของชีวมวล FC หมายถึง คาร์บอนคงตัว
 M_i หมายถึง ความชื้นที่อยู่ผิวของชีวมวล VM หมายถึง สารระเหย
 M_s หมายถึง ความชื้นทั้งหมดของชีวมวล

ภาพที่ 2.10 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่าตามเกณฑ์ต่างๆ [2]

2.3.2 ปริมาณสารปนเปื้อนสูงสุดในก๊าซชีวมวลที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

จากตารางที่ 2.9 จะเห็นได้ว่ามีสารปนเปื้อนในก๊าซชีวมวล ได้แก่ อนุภาคฝุ่น น้ำมันดิน แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ คลอรีน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะต้องนำก๊าซดิบเหล่านี้ไปผ่านระบบทำความสะอาด ก่อนนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตไฟฟ้า การนำไปใช้กับเครื่องยัดกังหันก๊าซ และการสังเคราะห์เมทานอล จึงจำเป็นต้องกำจัดสารปนเปื้อนในก๊าซชีวมวลให้มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน เพราะอาจทำให้อุปกรณ์ที่นำก๊าซชีวมวลไปใช้งาน เกิดความเสียหายได้ สำหรับปริมาณสารปนเปื้อนสูงสุดในก๊าซชีวมวลที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณสารปนเปื้อนสูงสุดในก๊าซเชื้อเพลิงที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ [14]

สารปนเปื้อน	หน่วย	เครื่องยนต์สันดาปภายใน	กังหันก๊าซ	สังเคราะห์เมทานอล
อนุภาคฝุ่น	mg/Nm ³	<50	<30	<0.02
ขนาดของอนุภาค	μm	<10	<5	-
น้ำมันดิน	mg/Nm ³	<100	-	<0.1
ด่าง	mg/Nm ³	-	0.24	-
แอมโมเนีย	mg/Nm ³	-	-	<0.1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	mg/Nm ³	-	-	<1
คลอรีน	mg/Nm ³	-	-	<0.1
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	% vol	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	<12

ในส่วนองปริมาณน้ำมันดินตามมาตรฐานในก๊าซชีววมล สำหรับใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) และเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine) ที่ยอมรับได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ระดับของน้ำมันดินที่ยอมรับได้ในการใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายในและเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การนำไปใช้งาน	ความเข้มข้นของน้ำมันดินที่ยอมรับได้	อ้างอิง
เครื่องยนต์สันดาปภายใน	<10 mg/Nm ³	(Bui, Loof, and Bhattacharya, 1994) [23]
	สูงสุด 30 mg/Nm ³	(Bridgwater, 1995) [24]
	<100 mg/Nm ³	(BTG, 1995) [25]
	<100 mg/Nm ³	(Hasler and Nussbaumer, 1999) [26]
เครื่องยนต์กังหันก๊าซ	0.05-0.5 ppm	(Brown, 1996) [27]
	0.5 mg/Nm ³	(Aigner, 1996) [28]

2.4 ความสำคัญของการทำความสะอาดก๊าซชีววมล

ก่อนที่จะนำก๊าซชีววมลไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ นั้น จะต้องดูวัตถุประสงค์ของการนำก๊าซชีววมลไปใช้งาน อย่างเช่น ถ้าต้องการนำก๊าซเชื้อเพลิงชีววมลไปใช้งานด้านความร้อน ก็ไม่มีความจำเป็นสำหรับการทำความสะอาดก๊าซชีววมล แต่ถ้าต้องการนำก๊าซชีววมลไปใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตไฟฟ้า จะต้องมีการทำความสะอาดก๊าซชีววมล เพื่อไม่ให้

สารปนเปื้อนปริมาณฝุ่นและน้ำมันดิน เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจะต้องผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซชีววมวลก่อนนำไปใช้งาน

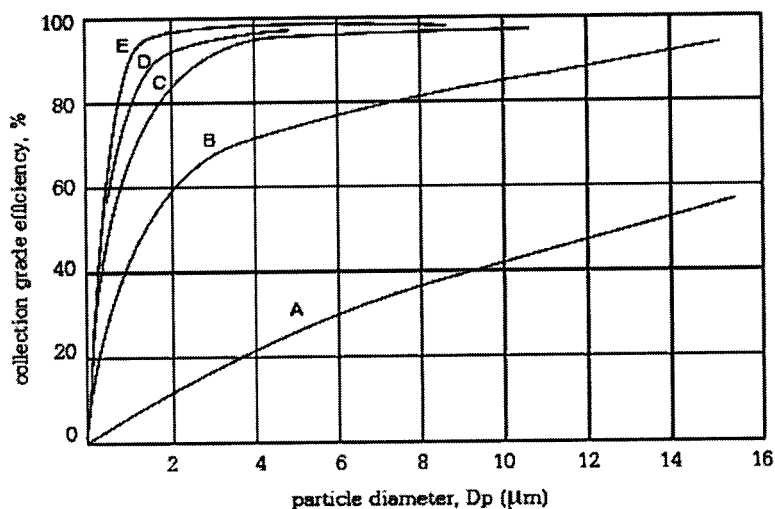
2.4.1 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีววมวล

ระบบทำความสะอาดก๊าซชีววมวล เป็นระบบที่มีความสำคัญมากสำหรับระบบผลิตก๊าซชีววมวล เพราะก๊าซที่ออกจากเตาผลิตก๊าซนั้น มีอุณหภูมิและการเจือปนของสิ่งปนเปื้อนสูงโดยทั่วไปแล้ว การทำความสะอาดก๊าซชีววมวลมีหลักการใหญ่ๆ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ การทำความสะอาดแบบแห้งและการทำความสะอาดแบบเปียก ซึ่งประสิทธิภาพและหลักการทำงานก็จะต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) การทำความสะอาดก๊าซชีววมวลแบบแห้ง เป็นอุปกรณ์ที่สร้างง่าย และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถดักหรือแยกฝุ่นที่มีปริมาณและความเข้มข้นมากได้ดี ไม่ต้องการการดูแลรักษามากนัก เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ยกตัวอย่างเช่น ไซโคลนดักฝุ่น (cyclone dust collector) เครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง (fabric dust collector) เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และเครื่องดักฝุ่นแบบสำเร็จรูป (unit dust collector) [29]

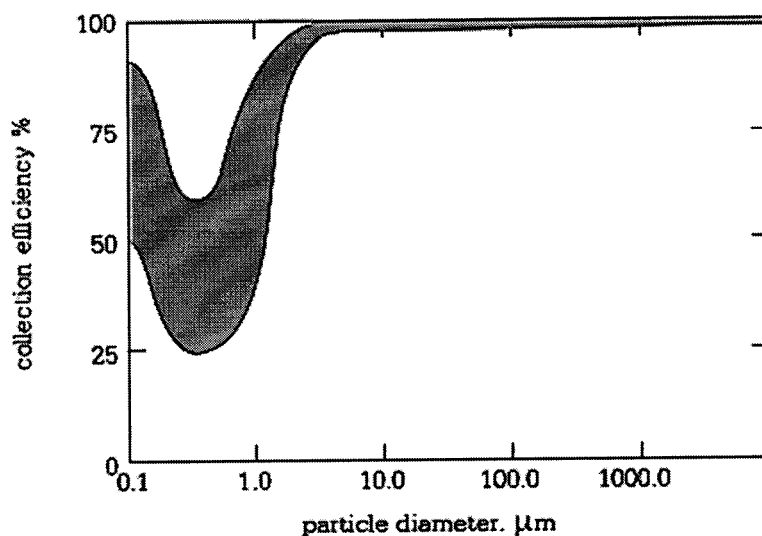
(2) การทำความสะอาดก๊าซชีววมวลแบบเปียก เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทำงานโดยอาศัยการสัมผัสกันระหว่างฝุ่น (หรือสารปนเปื้อนที่เป็นก๊าซและไอ) กับของเหลวซึ่งโดยปกติใช้น้ำ การสัมผัสกันนี้จะทำให้ฝุ่นและสิ่งปนเปื้อนละลายในน้ำหรือถูกพาไปกับน้ำ ส่งผลให้ฝุ่นมีขนาดใหญ่ขึ้นและแยกตัวออกจากก๊าซ โดยฝุ่นที่แยกออกมาจะมีลักษณะคล้ายโคลน (sludge) ในกรณีที่เป็นฝุ่นละเอียดของเหลวที่ใช้จะต้องมีลักษณะเป็นหยดเล็กๆ หรือเป็นฝอยละออง และต้องไหลหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงซึ่งลักษณะเช่นนี้ต้องใช้พลังงานมาก โดยพลังงานที่ใช้เพื่อการทำให้อากาศสัมผัสกับฝุ่นถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการทำงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบนี้ ยกตัวอย่างอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก เช่น หอพ่นของเหลว (spray tower or spray chamber) สครับเบอร์แบบแพ็กเบด (packed-bed scrubber) สครับเบอร์แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal scrubber) และสครับเบอร์แบบเวนจูรี (venturi scrubber) [29]

ตัวอย่างกราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น แยกตามขนาดของอนุภาคซึ่งเรียกว่า Grade Efficiency Curve ของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดต่างๆ ดังภาพที่ 2.11 นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ ยังขึ้นอยู่กับขนาดของฝุ่นและสภาวะการเดินเครื่องการทำงาน ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น ดังภาพที่ 2.12



A = ไชโคลนชนิดประสิทธิภาพต่ำ B = ไชโคลนชนิดประสิทธิภาพสูง
 C = หอฉีบน้ำ D = เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์
 E = เวเนจรีสครับเบอร์

ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างกราฟแสดงประสิทธิภาพย่อยของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบต่างๆ [30]



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับประสิทธิภาพในการจับฝุ่น [31]

ในส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซชีววมวล จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังข้อ 2.4.2

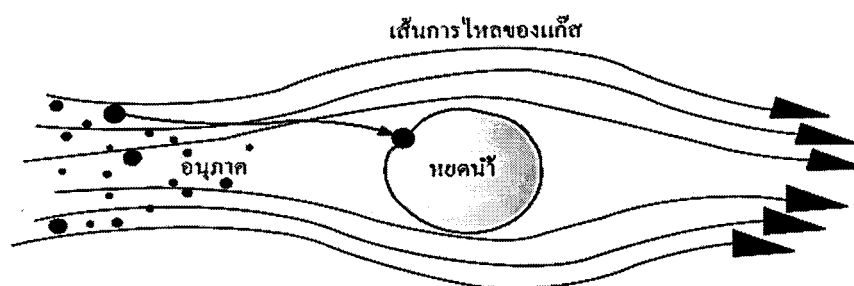
2.4.2 อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกหรือสครับเบอร์แบบเปียก (Wet scrubber)

สครับเบอร์แบบเปียก (Wet scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดักจับอนุภาคฝุ่นละเอียด โดยใช้หยดน้ำหรือละอองน้ำ เพื่อแยกอนุภาคฝุ่นออกจากกระแสก๊าซ โดยใช้น้ำหรือของเหลวเป็นตัวกลาง สามารถทำได้ 3 วิธี คือ 1) ฉีดน้ำเป็นละอองพวยผ่านไปยังกระแสก๊าซ 2) ปลอ่ยให้กระแสก๊าซไหลผ่าน

ฟิล์มของของเหลวหรือน้ำด้วยความเร็วสูง และ 3) ปลอยให้กระแสก๊าซไหลผ่านแผ่นวัสดุที่มีของเหลวเคลือบที่ผิว เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียกนอกจากจะสามารถดักจับฝุ่นขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในกระแสก๊าซได้แล้ว ยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิของก๊าซได้ด้วย

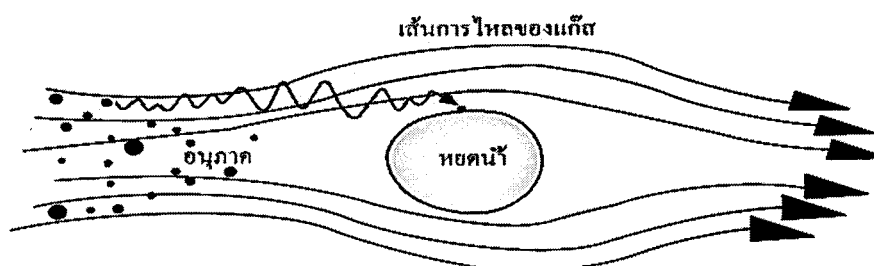
(1) กลไกการดักจับฝุ่นในอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก อาศัยกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคฝุ่น กระแสก๊าซและน้ำ ซึ่งได้แก่ การกระทบและการแพร่

การดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้การกระทบกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับละอองน้ำ เกิดขึ้นเมื่อฉีดหยดน้ำผ่านในกระแสก๊าซ จากความแรงของน้ำที่ฉีดไปกระทบอนุภาค จะทำให้อนุภาคฝุ่นเบนออกจากกระแสก๊าซและติดอยู่กับหยดน้ำ ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปกับกระแสก๊าซได้ ขนาดของแรงกระทบจะมีค่าแปรตามขนาดของอนุภาคฝุ่น โดยแรงกระทบจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออนุภาคฝุ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น กระแสก๊าซมีความเร็วมากกว่า 3 m/s และอนุภาคฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $1\ \mu\text{m}$ จะรับแรงกระทบได้ดี แรงกระทบที่กระทำกับอนุภาคฝุ่นและละอองน้ำ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แรงกระทบที่กระทำกับอนุภาคฝุ่นและละอองน้ำ [32]

ส่วนการดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้การแพร่ จะเกิดขึ้นในกรณีที่อนุภาคฝุ่นมีขนาดเล็กมากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $1\ \mu\text{m}$ อนุภาคเหล่านี้จะเบาและชนกับโมเลกุลของก๊าซขณะเคลื่อนที่ในกระแสก๊าซ การชนกันจะทำให้อนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการแพร่ กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่นโดยการแพร่ ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่นโดยการแพร่ [32]

(2) ขั้นตอนการดักจับอนุภาคฝุ่นในอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก การดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก มีขั้นตอนที่เกิดขึ้น 3 ขั้นตอน [13] ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การดักจับอนุภาคฝุ่น ขั้นตอนนี้อ่อนภาคฝุ่นที่อยู่ในกระแสก๊าซ จะถูกดักจับด้วยหยดน้ำหรือฟิล์มของเหลว หรือแผ่นวัสดุที่มีของเหลวเคลือบผิว

ขั้นตอนที่ 2 การแยกหยดน้ำออกจากกระแสก๊าซ ขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องดักละอองน้ำเพื่อแยกหยดน้ำออกจากกระแสก๊าซ

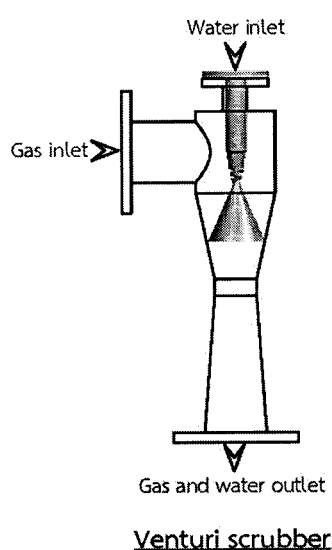
ขั้นตอนที่ 3 การบำบัดของเหลวที่จับฝุ่น ขั้นตอนนี้ของเหลวที่มีฝุ่นปนเปื้อนจะปล่อยทิ้งลงในบ่อพัก ซึ่งจะต้องทำการบำบัดก่อนทิ้งลงท่อระบายน้ำทิ้ง

อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกที่นิยมนำไปใช้งานและให้ประสิทธิภาพสูงในการดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับกระแสก๊าซในระบบแก๊สซิฟิเคชัน มี 2 แบบ ได้แก่ อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดและอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด (Venturi scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทำงาน คือ กระแสก๊าซจะถูกบังคับให้ไหลผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า คอคอด (venturi) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะคอที่แคบลง ทำให้กระแสก๊าซไหลผ่านด้วยความเร็วสูงหรือถูกเร่งความเร็ว โดยจะมีการสเปรย์น้ำฉีดในทิศทางเดียวกันกับกระแสก๊าซ เมื่อออกจากบริเวณคอคอด ความเร็วของกระแสก๊าซและสเปรย์น้ำก็ลดลง จึงเกิดการสัมผัสกันระหว่างก๊าซกับสเปรย์น้ำ ทำให้ดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับกระแสก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ดักฝุ่นนี้มีส่วนประกอบหลักๆ ที่สำคัญ คือ ส่วนของหัวฉีดน้ำ ทางเข้าของก๊าซ ห้องผสม และส่วนที่เป็นหัวใจสำคัญของระบบนี้คือท่อเวนจูรี (Venturi tube) ทั้งนี้ อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดจะมีช่วงความดันน้ำใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.11 ส่วนลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด ดังภาพที่ 2.15

ตารางที่ 2.11 ช่วงความดันน้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด

อุปกรณ์	ความดันน้ำฉีด
Venturi scrubber	7-100 kPa [33]



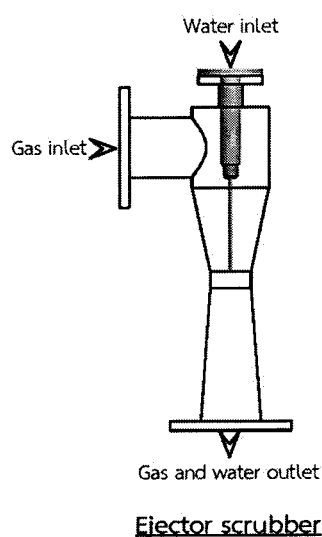
ภาพที่ 2.15 ลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด

สมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบผลิตก๊าซชีววมวล เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กสูงมาก และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานน้อยเพราะใช้ความดันน้ำฉีดไม่สูง และเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่เก็บได้ 50% คือประมาณ $0.1\ \mu\text{m}$ [48]

(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector scrubber) ใช้หลักการทำงานเหมือนกันกับชนิดคอคอด ต่างกันที่การสเปรย์น้ำฉีดเป็นลำ ใช้ความดันน้ำฉีดด้วยความเร็วสูงกว่าอุปกรณ์ชนิดคอคอด ทั้งนี้ อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์จะมีช่วงความดันน้ำใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.12 และลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ ดังภาพที่ 2.16

ตารางที่ 2.12 ช่วงความดันน้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์

อุปกรณ์	ความดันน้ำฉีด
Ejector scrubber	100-830 kPa [33]



ภาพที่ 2.16 ลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์

สมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วนของการเหนียวน้ำกระแสบก๊าศในระบบได้สูง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความดันน้ำฉีดที่มีความเร็วสูง และเป็นอุปกรณ์ที่มีความดันสูญเสีย้น้อยมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดต่างๆ และเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่เก็บได้ 50% คือ ประมาณ $0.2\ \mu\text{m}$ [34]

สำหรับขนาดของอนุภาคเล็กสุดที่ดักเก็บไว้ได้ของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ คือ อุปกรณ์ชนิดคอคอดดักเก็บอนุภาคได้ขนาดเล็กสุด $0.1 - 0.3\ \mu\text{m}$ ส่วนอุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์ดักเก็บอนุภาคได้ขนาดเล็กสุด $0.5 - 1.0\ \mu\text{m}$ [35]

การคำนวณหาปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ หาได้จากสมการที่ (2.13)

$$M_c = M_i - M_r \quad (2.13)$$

โดยที่ M_c = ปริมาณฝุ่นที่อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกสามารถดักจับได้ (mg)
 M_i = มวลของอนุภาคทั้งหมดที่เข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก (mg)
 M_r = มวลของอนุภาคหลังออกอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก (mg)

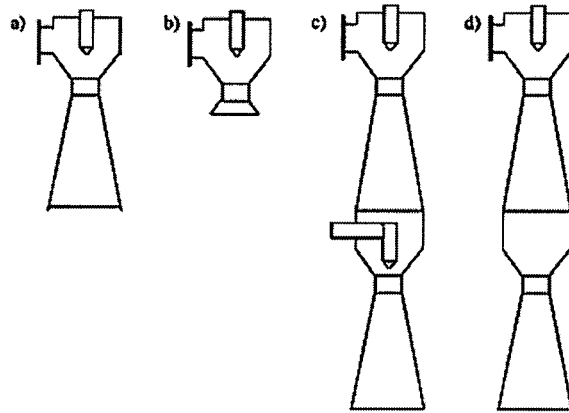
ส่วนประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาค (Collecting efficiency) หมายถึง อัตราส่วนของอนุภาคที่สามารถดักเก็บไว้ได้ต่ออนุภาคทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาในระบบ ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก โดยสามารถหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก ได้จากการคำนวณในความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.14) [36]

$$\eta_r = \frac{M_c}{M_i} \times 100 \quad (2.14)$$

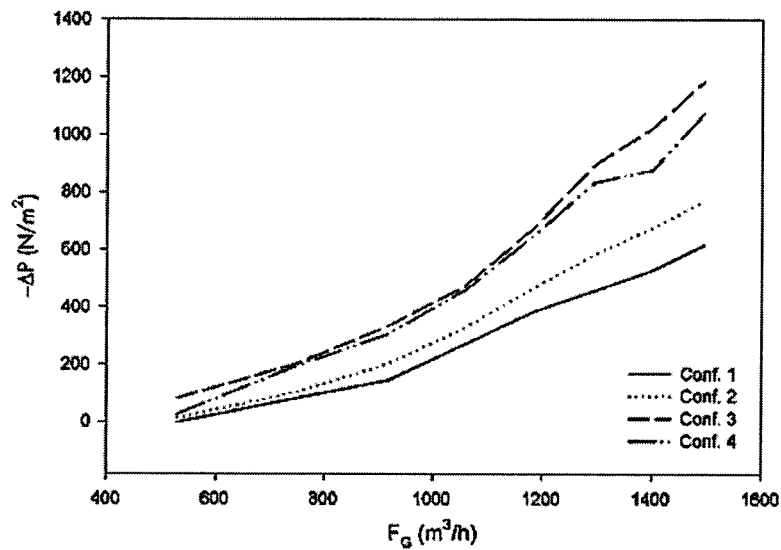
โดยที่ η_r = ประสิทธิภาพรวมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

X. Gamisans et al. (2002) [37] ศึกษาการกำจัดก๊าซพิษโดยการพ่นของเหลวหนึ่งตำแหน่งและสองตำแหน่งใน Venturi scrubber หนึ่งชั้นและสองชั้น ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณี คือ ทำการสเปรย์น้ำบริเวณด้านบนของเวนจูรีชั้นเดียว ภาพที่ 2.17 (a) ทำการสเปรย์น้ำด้านบนของเวนจูรีซึ่งเป็นเวนจูรีแบบกระจาย ภาพที่ 2.17 (b) ทำการสเปรย์น้ำสองตำแหน่งในเวนจูรีสองชั้น ภาพที่ 2.17 (c) ทำการสเปรย์น้ำด้านบนเวนจูรีหนึ่งตำแหน่ง ในเวนจูรีสองชั้น ภาพที่ 2.17 (d) จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำที่ 5.0 m³/hr กรณีที่ 3 เกิดการสูญเสียความดันมากที่สุด กรณีที่ 4 กรณีที่ 2 และกรณีที่ 1 ตามลำดับ และการสเปรย์น้ำในกรณีที่ 3 ภาพที่ 2.17 (c) สามารถลดสารปนเปื้อนได้ดีที่สุด

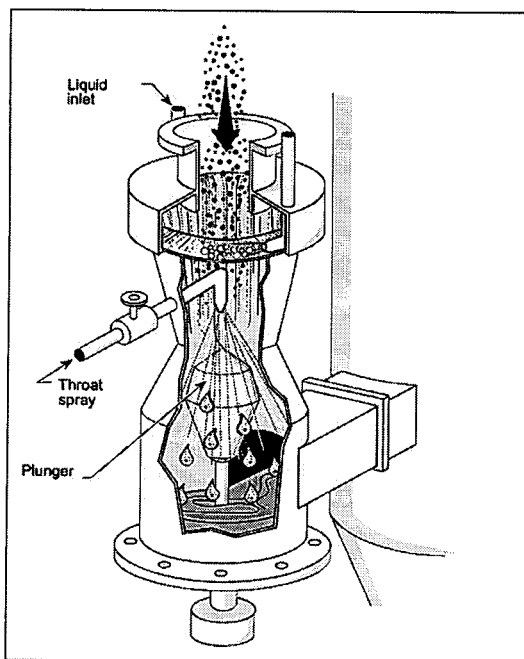


ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างในการศึกษาการกำจัดก๊าซพิษโดยเวนจูรี [37]



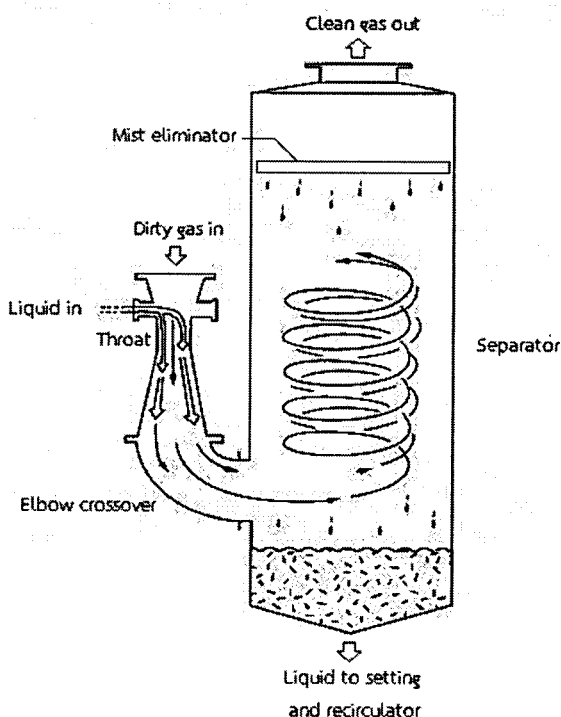
ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงการสูญเสียความดันในระบบสเปรย์น้ำในเวนจูรี [37]

H.F. Johnstone et al. (1949) [38] ได้ศึกษาออกแบบเครื่องดักจับอนุภาคและสิ่งปนเปื้อนในก๊าซพิษ โดยใช้ Venturi scrubber โดยก๊าซพิษถูกส่งเข้าไปในอุปกรณ์โดยใช้โบวเวอร์ จึงเกิดการผสมระหว่างก๊าซพิษกับละอองน้ำ และเกิดการไหลแบบปั่นป่วนตรงบริเวณทางออกของคอคอด มีเวลาสัมผัสกันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการผสมกันของก๊าซพิษกับละอองน้ำ สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในก๊าซพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.19 ลักษณะการทำงานของเครื่องดักอนุภาค [38]

C. David Cooper et al. (2002) [39] ได้ทำการศึกษาการทำงานและประสิทธิภาพของสกรับเบอร์แบบเวนจูรี (venturi scrubber) พบว่าอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ ได้ โดยกระแสก๊าซพิษจะถูกบังคับให้ไหลผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า เวนจูรี ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้มีคอที่แคบลง ทำให้กระแสก๊าซไหลผ่านด้วยความเร็วสูงหรือถูกเร่งความเร็ว โดยจะมีการฉีดพ่นน้ำที่บริเวณคอหรือบริเวณก่อนที่จะถึงบริเวณคอ และจากการไหลของกระแสก๊าซด้วยความเร็วสูง ทำให้น้ำเกิดการแตกตัวเป็นละอองหรือหยดน้ำเล็กๆ ที่มีความเร็วสูง ส่งผลให้สามารถดักจับอนุภาคที่มากับกระแสก๊าซ โดยมีกลไกการกระทบด้วยความเฉื่อย ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญที่สุดในการดักจับอนุภาค และเนื่องจากการแตกตัวเป็นหยดน้ำเล็กๆ ที่มีความเร็วสูงนี้ ทำให้อัตราการดักจับอนุภาคของสกรับเบอร์แบบเวนจูรีนี้ บางทีถูกเรียกว่า gas atomizing spray scrubbers ภายหลังจากที่หยดน้ำดักจับอนุภาคได้แล้ว จะถูกปล่อยให้แยกตัวออกจากกระแสก๊าซ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไซโคลอน หรือที่ดักละอองน้ำในการแยกน้ำออกจากกระแสก๊าซ สกรับเบอร์แบบเวนจูรีถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคสูง แต่ก็มีค่าความดันสูญเสียที่สูงด้วย ดังนั้นสกรับเบอร์ประเภทนี้จึงจัดเป็นสกรับเบอร์ที่ใช้พลังงานสูง



ภาพที่ 2.20 สกรับเบอร์แบบเวนจูรี [39]

สุทธิพงศ์ นิมเจริญ และคณะ (2545) [40] ศึกษาการกำจัดฝุ่นโรงงานไม้ไผ่อัดโดยไซโคลนและสกรับเบอร์แบบเปียก จากการทดลองพบว่าความเร็วอากาศที่เหมาะสมต่อการกำจัดฝุ่นของไซโคลนมีค่า 27 m/s โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นร้อยละ 82.50 ความเร็วอากาศที่เหมาะสมต่อการดักจับฝุ่นของสกรับเบอร์แบบเปียกมีค่า 0.41 m/s โดยไม่มีวัสดุตัวกลาง มีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นร้อยละ 61.11 และอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการกำจัดฝุ่นของทั้งระบบมีค่า 0.20 m³/s โดยไม่มีวัสดุตัวกลาง มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นร้อยละ 90.74

บรรเทิง เจาะปาด และคณะ (2547) [41] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการยึดจับฝุ่นในช่วงขนาดต่างๆ ของเครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด ซึ่งตัวแปรที่สนใจ คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในกระแสก๊าซ และอัตราส่วนน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซ พบว่าประสิทธิภาพในการยึดจับอนุภาคจะสูงขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่มากขึ้นและอัตราส่วนน้ำเพิ่มขึ้น

มานะ อมรกิจบำรุง และคณะ (2548) [42] ได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์ดักจับฝุ่นต้นแบบชนิดไซโคลนสกรับเบอร์และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น ได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณอากาศป้อนฝุ่นที่เข้าในระบบ ($L/G = 2.8, 3.4$ และ 4.4 l/m^3) จำนวนและตำแหน่งของหัวฉีดน้ำ ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า ($C_d = 2, 4, 6$ และ 8 g/m^3) อนุภาคฝุ่นที่ใช้ในการทดลองคืออนุภาคฝุ่นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ $8.8 \mu\text{m}$ จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน L/G สูงขึ้นความเข้มข้นของฝุ่นเถ้าลอยต่ำๆ และที่จำนวนหัวฉีดน้ำที่มากขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องไซโคลนสกรับเบอร์จะสูงขึ้น สถานะการทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคืออัตราส่วน L/G เท่ากับ 4.4 l/m^3 ที่จำนวนหัวฉีดน้ำเท่ากับ 16 หัว

ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้าเท่ากับ 2 g/m^3 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเถ้าลอยของเครื่องไซโคลนสกรับเบอร์เท่ากับร้อยละ 99 ที่ขนาดอนุภาคของฝุ่นเถ้าลอยมากกว่า $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ เมื่อพิจารณาผลของจำนวนและตำแหน่งของหัวฉีดน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเถ้าลอย พบว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเถ้าลอยที่ความเข้มข้นของฝุ่นต่ำๆ

S.T. Bonnington et al. (1972) [43] สรุปการทำงานและประเภทของ Ejector ว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแรงขับของไหล (Driving fluid) ชนิดหนึ่งเพื่อใช้ในการดูดเอาของไหล (Entrain fluid) อีกชนิดหนึ่งผ่านเข้า Ejector โดยมีข้อดีคือไม่มีส่วนเคลื่อนที่ และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมีส่วนประกอบหลักได้แก่ หัวฉีด (Nozzle) ห้องดูด (Suction box) ห้องผสม (Mixing) หรือที่เรียกว่า คอคอด (Throat) และตัวกระจาย (Diffuser) แต่ข้อเสียคือ ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำไม่เกิน 35% ทำงานโดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของของไหล (Fluid dynamic) คือ ของไหลที่มีค่าความดันสูงจะไหลผ่านหัวฉีดเพื่อเปลี่ยนรูปจากพลังงานศักย์ (Pressure energy) ไปเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ดังนั้นเมื่อของไหลที่ผ่านหัวฉีดจะทำให้ความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นมาก เพื่อจะเหนี่ยวนำเอาของไหลที่สองซึ่งมีความดันต่ำกว่าผ่านเข้ามาในห้องดูด และหลังจากนั้นของไหลทั้งสองจะเข้ามาผสมกันในห้องผสม โดยการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างของไหลด้วยกัน ก่อนจะถูกทำให้ความเร็วลดลงเมื่อผ่านตัวกระจาย โดยเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของของไหลผสม ไปอยู่ในรูปพลังงานศักย์ และได้จัดแบ่งประเภทของ Ejector ที่ใช้อยู่ว่า ขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลที่ใช้ขับหรือของไหลที่ถูกดูด โดยมีรูปแบบพื้นฐาน คือ Gas-Gas, Liquid-Liquid, Gas-Liquid และ Liquid-Gas ชื่อแรกหมายถึงตัวขับ ส่วนชื่อหลังคือตัวที่ถูกขับ และประสิทธิภาพโดยรวม (Overall efficiency) ที่ได้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ

$$\frac{(Q_e + Q_d)H_1}{Q_d H_2} \quad (2.15)$$

โดยที่ Q_e = อัตราการไหลโดยมวลของของไหลที่ถูกดึงเข้ามา

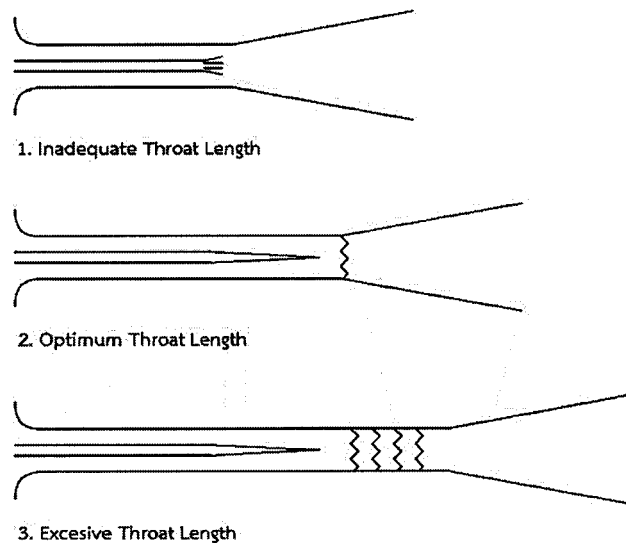
Q_d = อัตราการไหลโดยมวลของตัวขับ

H_1 = เหนือแตกต่างระหว่างทางด้านดูดกับทางออกที่ตัวกระจาย

H_2 = เหนือแตกต่างระหว่างทางด้านส่งกับทางออกที่ตัวกระจาย

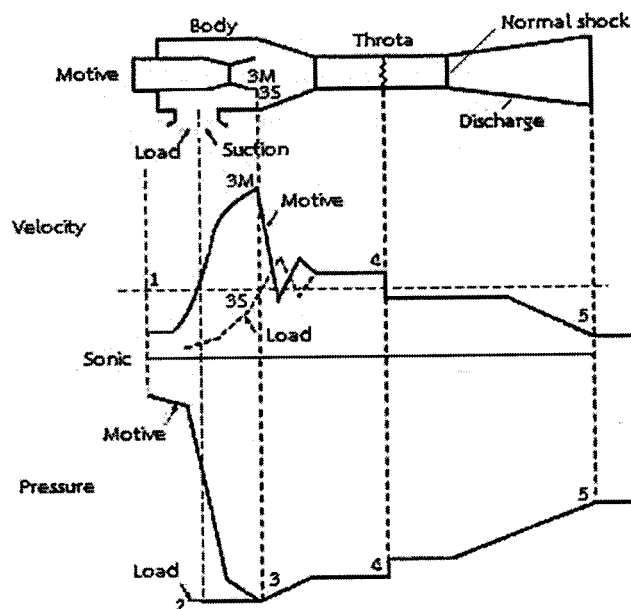
R.G. Cunningham et al. (1974) [44] ได้ทดสอบหาความยาวคอคอดที่เหมาะสมที่สุดของ Ejector ภายใต้ภาวะการอัดก๊าซที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression) เพื่อทำนายค่าคุณลักษณะ (Performance characteristics) ของ Ejector ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้จะอยู่ในรูปของสัดส่วนการอัดกับสัดส่วนการไหลเชิงปริมาตร ระหว่างอากาศกับน้ำ (Air-water compression ratio versus inlet volumetric flow ratio) และแสดงให้เห็นตำแหน่งที่เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำ และสรุปว่าความยาวคอคอดที่เหมาะสมที่สุด คือ ตำแหน่งที่ก่อนที่จะเข้าตัวกระจายในภาพที่ 2.21 (2) สำหรับภาพที่ 2.21 (1) จะเกิดขึ้นกรณีที่ความยาวคอคอดสั้นเกินไป จะทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำเกิดขึ้นที่ตัวกระจาย เป็นผลให้สูญเสียพลังงานจลน์จากลำน้ำไป และสำหรับภาพที่ 2.21

(3) จะเกิดขึ้นกรณีเมื่อคอคอดยาวเกินไปทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำเกิดก่อนช่วงที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อผสมกันอย่างสมบูรณ์แล้วจะมีของไหลผสมที่ค้างอยู่ภายในคอคอด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียเนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงต้านการไหลเพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์ทั้ง 2 จะมีผล ทำให้ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำอากาศเนื่องจากน้ำและประสิทธิภาพของ Ejector ลดลง



ภาพที่ 2.21 ลักษณะการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำภายในคอคอด [44]

R.B. Power (1993) [45] อธิบายการทำงานของ Ejector ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับดูดของไหลด้วยลำน้ำ มีส่วนประกอบ คือ หัวฉีด (Nozzle) ตัวเรือนทางดูด (Body or suction box) ห้องผสม (Mixing chamber) และตัวกระจาย (Diffuser) ใช้หลักการทำงานโดยการเคลื่อนที่ของของไหล (Fluid dynamic) เพียงอย่างเดียว ซึ่งต่างจากการทำงานของปั๊มแบบปกติ เช่น ปั๊มหอยโข่ง มีข้อดี คือ เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างง่าย ไม่มีส่วนเคลื่อนที่จึงต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีความเชื่อถือสูง ซึ่งนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานเกี่ยวกับการดูดสารเคมีหรือก๊าซพิษที่มีผลให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย Ejector มีหลักการทำงานคือการให้น้ำที่มีค่าความดันสูง (Motive fluid) ไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) เพื่อเปลี่ยนรูปจากพลังงานศักย์ (Pressure energy) ไปเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) โดยน้ำที่ผ่านออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วสูงมากและเหนี่ยวนำเอาของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid หรือ Suction fluid) มีความดันต่ำกว่า เช่น น้ำ ไขมัน ก๊าซ หรืออากาศ ผ่านเข้าไปในห้องผสม และจะแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างของไหลด้วยกัน ทำให้เมื่อของไหลผสมกันสมบูรณ์แล้ว ของไหลผสมจะไหลออกจากคอคอดที่ความเร็วเดียวกัน ก่อนจะถูกทำให้ความเร็วลดลงเมื่อผ่านตัวกระจาย โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของของไหลผสมไปอยู่ในรูปพลังงานศักย์ ก่อนจะออกจากปั๊มหัวฉีด ของไหลทุติยภูมิจะถูกดึงออกไป จนกระทั่งความดันที่ทางดูดมีค่าเท่ากับความดันที่ภายใน ห้องผสม สำหรับลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วของของไหลที่เกิดขึ้นภายใน Ejector แสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วของของไหลที่อยู่ใน Ejector [45]

N. Kijowsky (1985) [46] ได้ศึกษาวิธีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นหรือแก๊สลอย ด้วยเครื่องสครับเบอร์แบบเปือก ซึ่งจะทำการติดตั้งหัวฉีดน้ำ 3-4 ชั้น ตามแนวการไหลของอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นผสมอยู่ ระยะห่างหัวฉีดประมาณ 120-200 mm. ความดันของน้ำอยู่ที่ 8-15 bar และอากาศเข้าระบบใช้อัตราการไหลประมาณ 6-20 m/s ประสิทธิภาพรวมของการดักจับฝุ่นมากกว่า 95% ซึ่งมากกว่าแบบทั่วไป ที่มีประสิทธิภาพประมาณ 50-70%

F. Mayinger et al. (1995) [47] ได้ศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของอุปกรณ์สครับเบอร์แบบ Venturi เป็นระบบที่ใช้ความเร็วก๊าซสูงร่วมกับการฉีดของเหลวเข้าระบบที่ความดันสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงขึ้น แต่ปัญหาหลักที่พบคือ การสูญเสียความดัน (Pressure drop) นอกจากนี้ระบบยังต้องการพลังงานสูงด้วย

G. Schwarting (1996) [48] ได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์สครับเบอร์ โดยการนำไปดักจับอนุภาคฝุ่นที่ละเอียดกับแก๊สลอยจากก๊าซพิษ ซึ่งเป็นการปรับให้อนุภาคฝุ่นหรือแก๊สลอยกลายเป็นอะตอมอิสระวิธีนี้เหมาะสำหรับการแยกเขม่าและน้ำมันดิน ที่อยู่ในก๊าซเสียได้จำนวนมาก ขนาดของอนุภาคฝุ่นที่ดักจับได้จะอยู่ระหว่าง 0.1-1 μm ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นที่ได้มากกว่า 90% ในระยะเริ่มต้นได้มีการติดตั้งระบบนี้กับเตาเผาขยะของโรงพยาบาล

JL. Peter (1992) [49] ได้ทำการศึกษาการดักจับอนุภาคฝุ่นละเอียดจากก๊าซเสียจากการเผาไหม้โดยใช้ Confined Vortex Scrubber (CVS) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกประกอบด้วยทางเข้าก๊าซเสีย 4 ทาง และก๊าซที่ทำความสะอาดแล้วจะออกตรงกลางของถังทรงกระบอกทางด้านบนและด้านล่าง น้ำจะถูกสเปรย์ผ่านทางด้านข้างของถัง ระบบนี้จะเกิดแรงเหวี่ยงภายในสูงมาก ทำให้เกิดฟองของละอองน้ำภายในขนาดเล็กจำนวนมาก เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลวเพิ่มมากขึ้น และทำให้เกิดแรงเฉื่อยของการแยกมากด้วย ผลที่ได้คืออนุภาคฝุ่นละเอียด

จะถูกดักจับได้มากขึ้น ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 99.5% ของฝุ่นขนาดอนุภาค 3 μm และ 98% ของอนุภาคขนาด 0.3 μm

H. James et al. (1993) [50] ได้อธิบายเปรียบเทียบผลการศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับอนุภาคฝุ่นชนิดต่างๆ เช่น ไซโคลน ห้องตกตะกอน ถังกรอง และสครับเบอร์ ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง รวมทั้งการควบคุมดูแลรักษา ซึ่งได้พูดถึงสครับเบอร์ ว่าเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำไปใช้งานทั่วไป แต่ปัญหาใหญ่ที่พบคือ การลดลงของความดันที่เกิดขึ้นในระบบทำให้เกิดความชื้นสูงจากละอองน้ำที่ใช้ของอุปกรณ์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในระบบได้

E.V. Devster et al. (1994) [51] ได้ทำการศึกษากระบวนการทำความสะอาดก๊าซเสียจากเตาเผาขยะโดยใช้อุปกรณ์การดักจับฝุ่นแบบเปียก หลักการทำงานของอุปกรณ์ประกอบด้วย การสเปรย์น้ำในทิศทางเดียวกันกับก๊าซเสีย พบว่าสามารถดักจับอนุภาคฝุ่นที่ออกจากก๊าซเสียได้ปริมาณมากหรือเทียบเป็นประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแล้วจะประมาณมากกว่า 82% ของอนุภาคฝุ่นที่ออกมา แต่ปัญหาที่พบคือน้ำที่ออกมาจากกระบวนการ จะต้องผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง

D.A. Marshall et al. (1995) [52] ได้ทำการศึกษาการแยกอนุภาคฝุ่นพวก SiO_2 ด้วยเครื่องสครับเบอร์แบบเปียก พบว่าตัวแปรที่สำคัญของการควบคุมคือ อัตราการไหลของอากาศและประเภทของหัวฉีดที่ใช้ ซึ่งจากการทดลองใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 2.48, 1.84, 1.42 และ 1.27 m^3/min และน้ำเข้าระบบที่ 5.7 L/min ให้ประสิทธิภาพของการดักจับอยู่ที่ 85-87%

H.T. Kim et al. (2001) [53] ได้ทำการศึกษาการดักจับฝุ่นโดยใช้ Gravitational Wet Scrubber โดยจะพิจารณาถึงกลไกในการดักจับฝุ่น ซึ่งได้แก่ กลไกการแพร่ กลไกการสกัดกั้น และกลไกการตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า กลไกการแพร่และกลไกการตกกระทบ ด้วยแรงเฉื่อยเป็นกลไกหลักในการดักจับฝุ่นในระบบนี้ สภาพการทำงานที่เหมาะสมของระบบนี้คือ ที่ความเร็วตกอิสระของหยดน้ำที่ต่ำ ขนาดของหยดน้ำเล็กๆ และอัตราส่วนระหว่างของเหลวกับก๊าซ ที่สูงๆ และพบว่าระบบนี้จะมีประสิทธิภาพดีในการดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1 μm จำนวนมากได้

ทรงวุฒิ ศรีสว่าง (2540) [54] ได้ทำการศึกษาการดักจับฝุ่นเถ้าลอยด้วยอุปกรณ์สครับเบอร์แบบหมุนวน เพื่อใช้ดักจับฝุ่นเถ้าลอยในไอเสียจากการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วน L/G ที่สูงขึ้น อัตราการปล่อยฝุ่นเถ้าลอยในปริมาณที่ต่ำ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดน้ำที่เล็กลง ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเถ้าลอยของอุปกรณ์สครับเบอร์จะเพิ่มขึ้นจาก 78.2% เป็น 97.2% จากการทดลองพบว่า ที่อัตรา L/G เท่ากับ 10 L/m^3 อัตราการปล่อยฝุ่นเถ้าลอยเข้าอุปกรณ์สครับเบอร์ที่ 2.8 g/s และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดน้ำ 0.5 mm. จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้สูงสุดคือ 97.2% และขนาดของอนุภาคที่ถูกดักจับได้มีขนาดมากกว่า 5 μm ขึ้นไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการทดสอบถึงความแตกต่างของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาและเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงาน และสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector Venturi Scrubber) กับชนิดคอคคอด (Venturi Scrubber) กับเตา Gasifier แบบ Double throat downdraft gasifier ขนาด 200 กิโลวัตต์ ความร้อน รุ่น UBU-DTG-003 [55] มีรายละเอียดอุปกรณ์และวิธีการทดลองอยู่ในเนื้อหาบทที่ 3

บทที่ 3

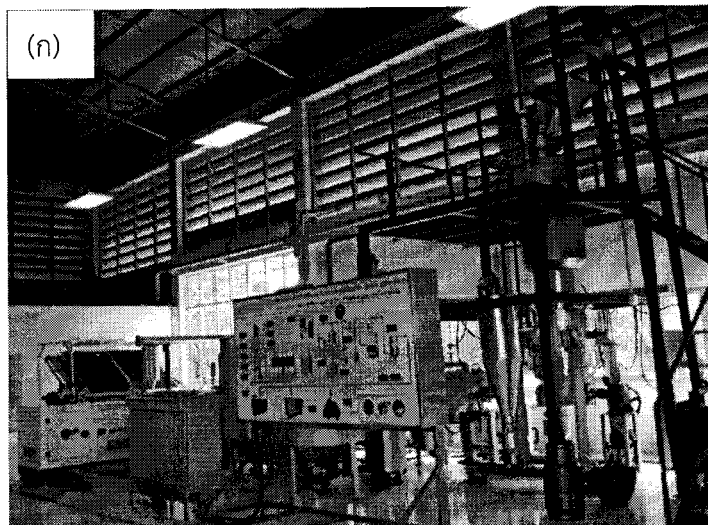
อุปกรณ์และวิธีวิจัย

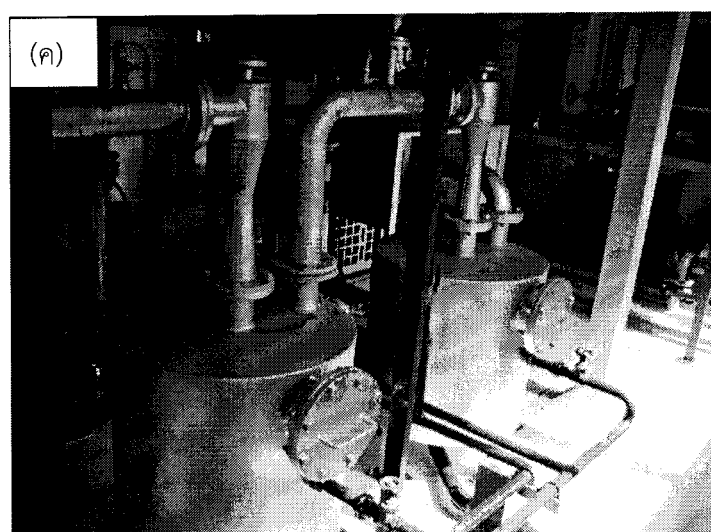
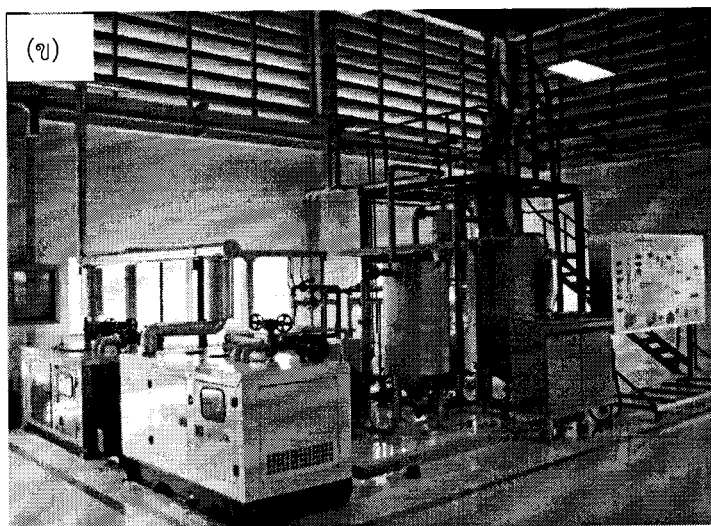
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เตาผลิตก๊าซชีวมวล

การทดลองในงานวิจัยนี้ ใช้อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอดกับเตา Gasifier แบบ Double throat downdraft gasifier ขนาด 200 กิโลวัตต์ ความร้อนรุ่น UBU-DTG-003 ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งรายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคดังตารางที่ 3.1 เป็นเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง (Imbert type) เตาชนิดนี้มีลักษณะเด่น คือ เป็นเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่มีวงแหวน (Construction ring) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยารีดักชัน และมีหัวฉีด (Nozzle) เพื่อจ่ายอากาศเข้าสู่โซนเผาไหม้ ในขณะที่เตานี้ทำงานอากาศที่เข้าสู่โซนเผาไหม้ จะเกิดการเผาไหม้กับถ่านและทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงที่อยู่เหนือหัวฉีดอากาศ ซึ่งจะได้สารระเหยและทาร์ จะไหลลงมาและเกิดการเผาไหม้ ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ดังกล่าวจะไหลลงไปทำปฏิกิริยากับถ่านที่ยังเหลืออยู่ในบริเวณใต้หัวฉีดอากาศที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงในบริเวณโซนนี้

ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ประกอบด้วย 4 ระบบที่สำคัญ ดังภาพที่ 3.2 ได้แก่ 1) ระบบผลิตก๊าซชีวมวล ทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวมวล 2) ระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง ทำหน้าที่ทำความสะอาดก๊าซชีวมวลก่อนนำไปใช้งาน 3) ระบบเก็บก๊าซเชื้อเพลิง ทำหน้าที่สะสมก๊าซชีวมวลเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ และ 4) การนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้งาน

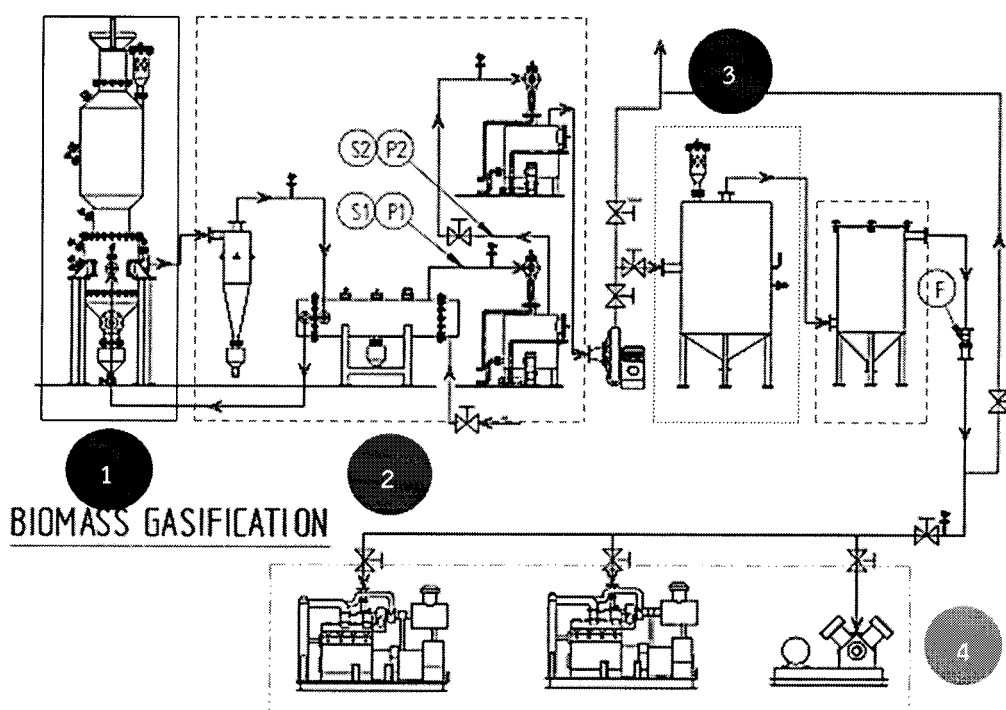




ภาพที่ 3.1 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล แบบ Double throat downdraft gasifier ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อน รุ่น UBU-DTG-003: (ก), (ข) ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล และ (ค) อุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเปียก

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิค Gasifier

ลำดับที่	รายละเอียด
1. เตา Gasifier รุ่น	UBU-DDTG-003
2. กำลังการผลิตพลังงานความร้อน	200 kW _{th}
3. ชนิดของระบบผลิตก๊าซชีวมวล	Downdraft gasifier
4. อัตราการไหลของก๊าซชีวมวล	160 Nm ³ /hr.
5. ค่าความร้อนเฉลี่ยของก๊าซชีวมวล	5.0 MJ/Nm ³
6. ความดันใช้งาน	0.5 Mpa
7. อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาในเตา	900 – 1,200 °C
8. ปริมาณความจุของเชื้อเพลิง	1.75 m ³
9. การกำจัดขี้เถ้า	สกรูตัวหนอน กระปาะเก็บเถ้าแบบแห้ง
10. ชนิดและขนาดของเชื้อเพลิง	ไม้สับขนาดไม่เกิน 2"x2"x2"
11. ความชื้นของเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 15 %



ภาพที่ 3.2 ผังระบบแก๊สซิฟิเคชัน ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อน

3.1.2 อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก

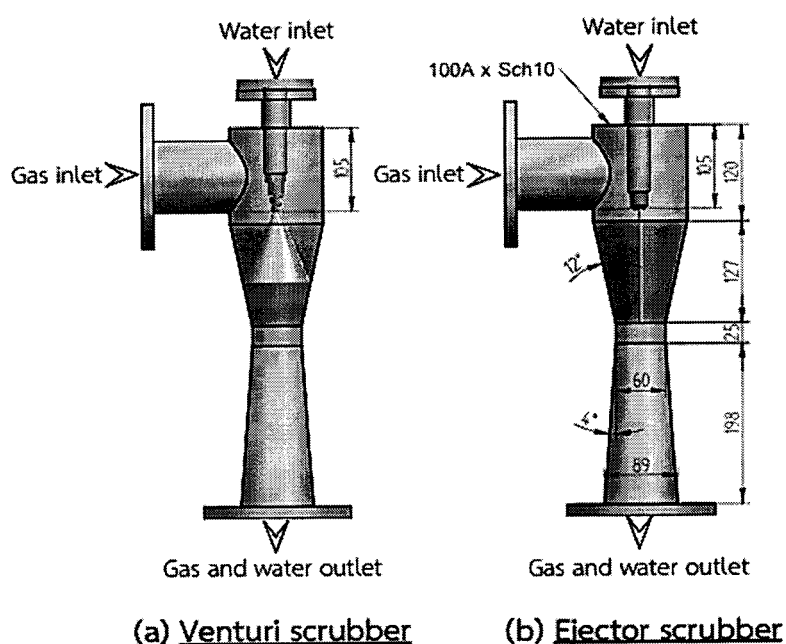
อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกหรือสครับเบอร์แบบเปียก (Wet scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำมาความสะอาดก๊าซชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง และนิยมนำไปใช้งานในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

เพื่อใช้ในการดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับก๊าซชีววมวล ได้แก่ อนุภาคฝุ่นละออง น้ำมันดินและสารปนเปื้อน เป็นต้น โดยใช้น้ำหรือของเหลว เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากกระแสก๊าซ ในระบบผลิตก๊าซชีววมวล นิยมนำเอาอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกมาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการกำจัดฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน มีขั้นตอนการดักจับที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ดักฝุ่น 3 ขั้นตอน 1) การดักจับอนุภาคฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน 2) การแยกหยดน้ำออกจากกระแสก๊าซ และ 3) การบำบัดน้ำที่จับฝุ่น อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกนอกจากจะสามารถดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็ก น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่มากับกระแสก๊าซได้แล้ว ยังช่วยลดอุณหภูมิของก๊าซได้ด้วย

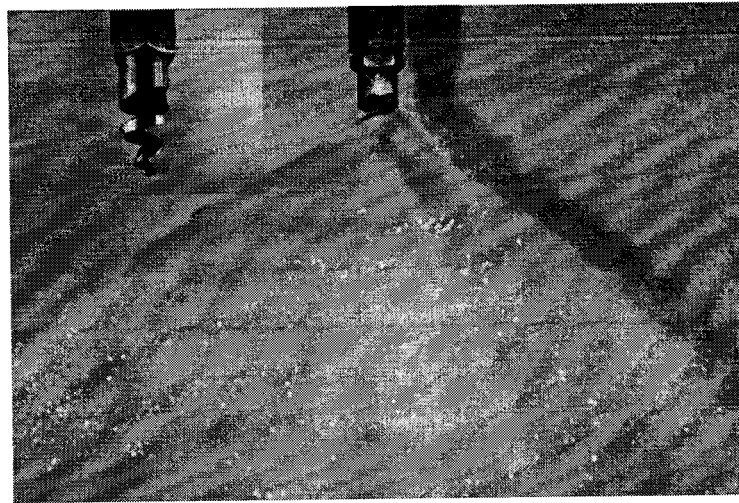
ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก 2 แบบ ที่นิยมนำมาใช้งานและให้ประสิทธิภาพสูง ในการดักจับสิ่งปนเปื้อนในกระแสก๊าซในระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีรายละเอียดดังนี้

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด (Venturi scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทำงาน คือการสเปรย์น้ำฉีดให้เป็นละออง ในทิศทางเดียวกันกับกระแสก๊าซ ใช้ความดันน้ำฉีดไม่สูง โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนของหัวฉีดน้ำ ทางเข้าของก๊าซ ห้องผสม และส่วนท่อเวนจูรี (Venturi tube)

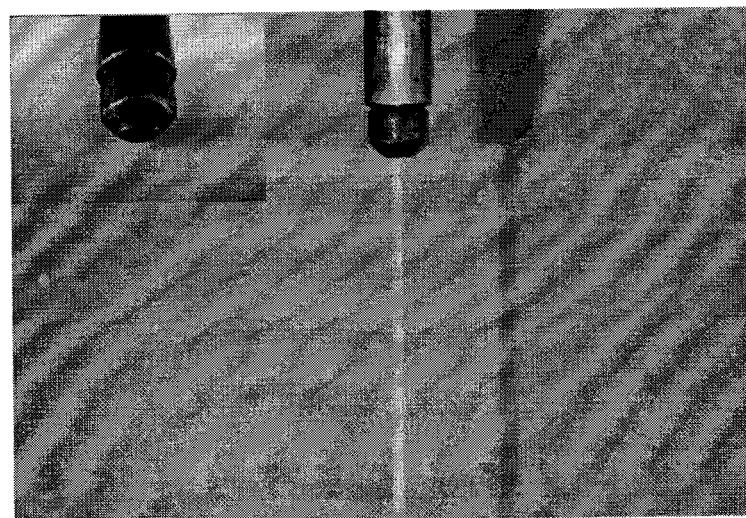
(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector scrubber) ใช้หลักการทำงาน เหมือนกันกับชนิดคอคอด แตกต่างที่ การสเปรย์น้ำฉีดมีลักษณะเป็นลำ ใช้ความดันน้ำฉีดในการทำงาน สูงกว่าชนิดคอคอด โดยขนาดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ดังภาพที่ 3.3 ส่วนลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของหัวฉีดและลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ดังภาพที่ 3.4 – 3.5 ส่วนขนาดและวัสดุของหัวสเปรย์น้ำที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.3 ขนาดของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด (a) และอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (b)



ภาพที่ 3.4 ลักษณะของการสเปรย์น้ำฉีดและลักษณะของหัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปี่ยงชนิดคอคอด



ภาพที่ 3.5 ลักษณะของการสเปรย์น้ำฉีดและลักษณะของหัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปี่ยงชนิดอีเจ็คเตอร์

ตารางที่ 3.2 ขนาดและวัสดุของหัวสเปรย์น้ำฉีด

ชนิดคอคอด		ชนิดอีเจ็คเตอร์	
มุมฉีด	120°	มุมฉีด	0°
Orifice size	9.5 mm	φ หัวฉีด	3 mm
φ Nozzle	4.8 mm	วัสดุ	Brass (JIS) H3250
วัสดุ	SUS304		C3604

3.1.3 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการใช้งานจริงของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ในระบบผลิตก๊าซชีววมวล ต้องวัดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ที่อุปกรณ์ดักฝุ่น สามารถดักจับไว้ได้ ดังนั้นต้องสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อหาค่าปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ซึ่งจะดำเนินการสร้างตามวิธีการตรวจวัดมาตรฐาน US.EPA Method 5 [56] โดยแบ่งชุดอุปกรณ์ออกเป็น 4 ส่วน ดังภาพที่ 3.7 มีรายละเอียด ดังนี้

ส่วนที่ 1 ชุดอุปกรณ์เก็บฝุ่น ประกอบด้วย

(1) ฮีตเตอร์รัdtท่อขนาด 2" Model:IES/B 2" x 100 mm (220VAC 600W)

(2) Thermocouple Type k Model:TH-04 6x50 mm เกลียว 1/2" NPT

สปริงสายสแตนเลสถักยาว 1 m

(3) กระจาขกรองความละเอียด 3 μm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm

ส่วนที่ 2 ชุดอุปกรณ์เก็บน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ประกอบด้วย

(1) ขวดชมพู่ จุกยาง หลอดแก้วนำก๊าซ ท่อยางซิลิโคน

(2) สารละลายไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)

ส่วนที่ 3 ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน ประกอบด้วย

(1) "Linking" Temp-Controller Model:LT400-101-000

(2) Digital counter Cl4-RC60

ส่วนที่ 4 ชุดอุปกรณ์ดูดก๊าซ ประกอบด้วย

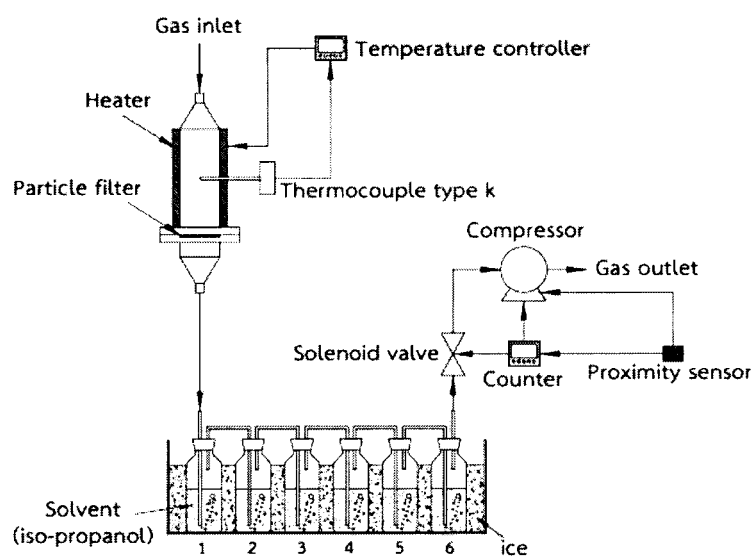
(1) หัวปั๊มลม PUMA 1/4 HP

(2) มอเตอร์ 1/2 HP

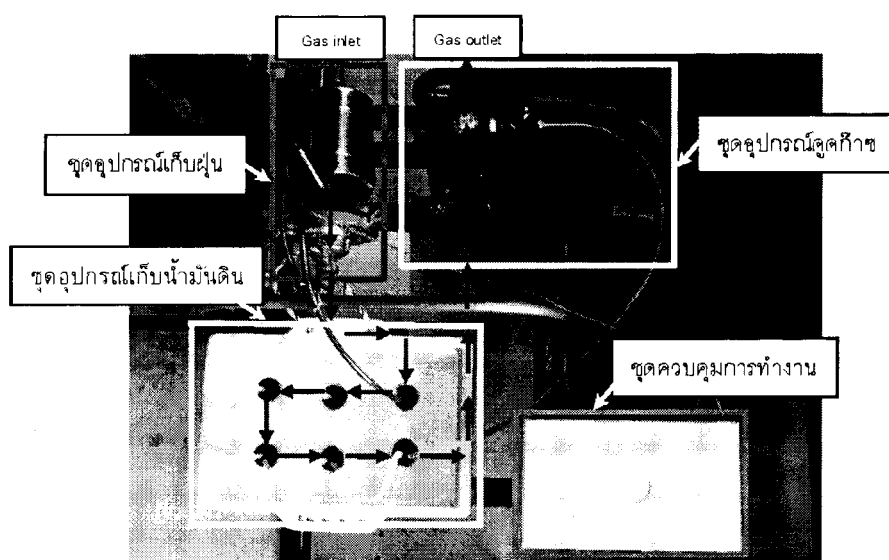
(3) Proximity sensor PSC1206-N (Sensor Riko NPN, Dia 12 mm sense 6 mm)

(4) Solenoid valve

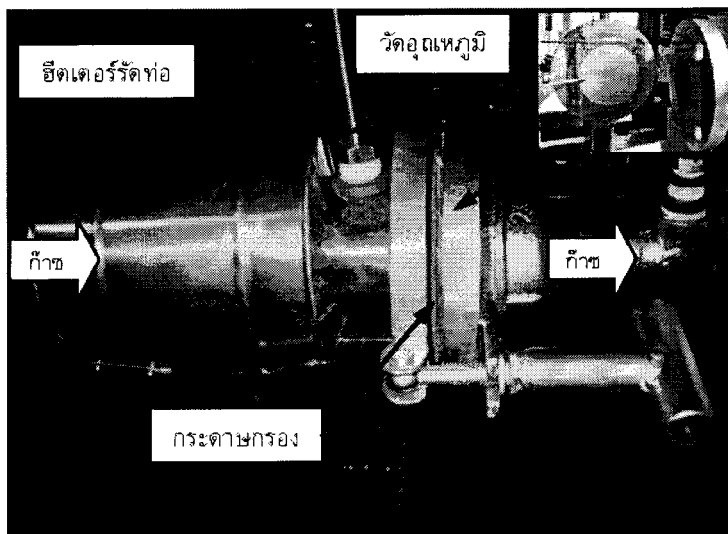
ขั้นตอนการทำงานของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อหาค่าปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน เริ่มจากก๊าซตัวอย่างไหลผ่านชุดอุ่นก๊าซ ดังภาพที่ 3.8 ทำหน้าที่ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ เพื่อให้้ำมันดินระเหยกลายเป็นไอ ด้วยอุณหภูมิ 200 $^{\circ}\text{C}$ ควบคุมการทำงานด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นก๊าซตัวอย่างไหลผ่านกระจาขกรอง ความละเอียด 3 μm ทำหน้าที่ดักจับฝุ่น และไหลเข้ามายังชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ด้วยการไหลผ่านสารละลายไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) ที่อุณหภูมิ 0 - 5 $^{\circ}\text{C}$ ทำหน้าที่ในการละลายน้ำมันดินออกจากก๊าซตัวอย่าง ซึ่งก๊าซตัวอย่างจะถูกดูดเข้ามายังชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนด้วยปั๊มลูกสูบ ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ผังชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน



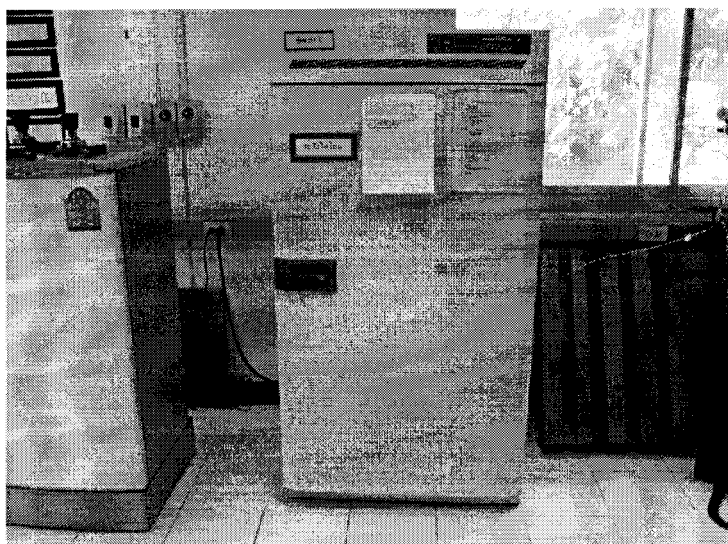
ภาพที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน



ภาพที่ 3.8 ชุดอุ่นก๊าซและส่วนติดตั้งกระดาศกรอง

3.1.4 ตู้อบ

การทดลองจะอบกระดาศกรองก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างฝุ่น เพื่อระเหยความชื้น ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก และอบระเหยสารละลายไฮโดรคาร์บอน (C_3H_8O) เพื่อชั่งน้ำหนักน้ำมันดิน และสารปนเปื้อน จะใช้ตู้อบ Hot Air Oven (Model TS8000) ดังภาพที่ 3.9 สามารถกำหนดค่า ได้ตั้งแต่ 8 - 200 °C



ภาพที่ 3.9 ตู้อบ Hot Air Oven (Model TS8000)

3.1.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก

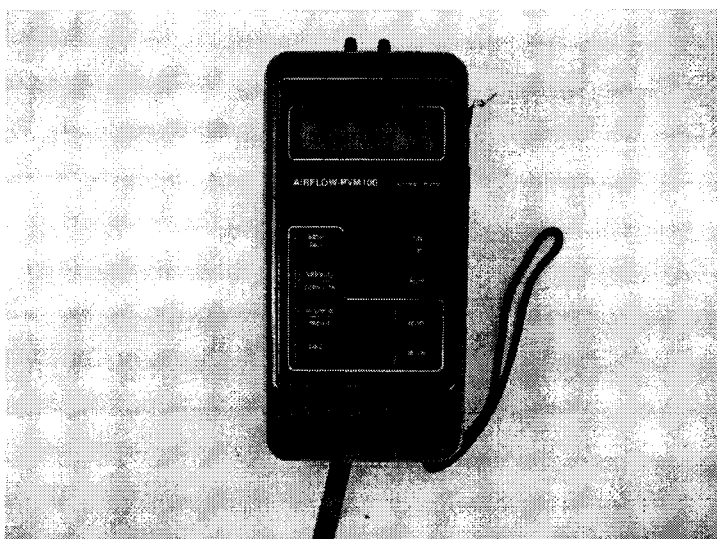
การชั่งน้ำหนักเพื่อวัดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนของการทดลอง จะใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ดังภาพที่ 3.10 มีค่าการวัดต่ำสุด 10 mg และมีค่าการวัดสูงสุด 220 g



ภาพที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง Mettler-Toledo รุ่น AB204-S

3.1.6 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม

การหาค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ จะใช้อุปกรณ์วัด Digital micro manometer รุ่น Airflow-PVM100 ดังภาพที่ 3.11 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ ดังตารางที่ 3.3



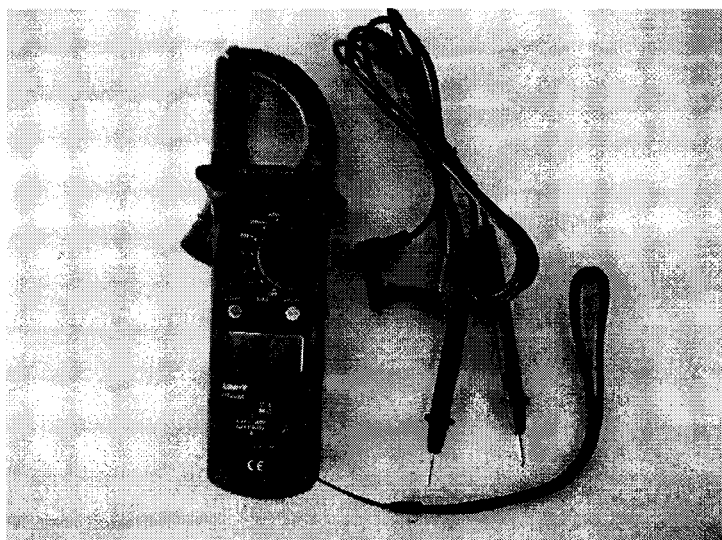
ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์วัด Digital micro manometer

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม

Parameter	Metric mode
Velocity range	0-76 m/s
Pressure range	0-3,500 Pa
Pressure resolution	1 Pa

3.1.7 อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า

การหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าวทั้ง 2 แบบ (ปั๊มน้ำและพัดลมดูดก๊าซ) จะใช้อุปกรณ์ Digital Clamp Multimeters รุ่น UT200 ดังภาพที่ 3.12 ส่วนข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ ดังตารางที่ 3.4 การวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ จะวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละการทดลอง และนำมาคำนวณตามสมการที่ 2.15 และ 2.16 ได้พลังงานไฟฟ้า (kWh)



ภาพที่ 3.12 อุปกรณ์วัด Digital Clamp Multimeters รุ่น UT200

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า

Basic functions	Range	Basic accuracy
DC voltage	600V	$\pm (1.5\%+5)$
AC voltage Effective value of sine wave	600V	$\pm (1.0\%+3)$ 40Hz ~ 400Hz
AC Current RMS sine wave	2 / 20A / 200A	$\pm (1.5\%+5)$ 50Hz ~ 60Hz
Resistance	20k Ω	$\pm (1.0\%+4)$

3.1.8 ตัวแปรในการคำนวณและวัดค่าสำหรับการทดลองในบทที่ 3

3.1.8.1 ปริมาณฝุ่น

ปริมาณฝุ่นหรืออนุภาคฝุ่นที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวมวล ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของเชื้อเพลิง ประเภทของเครื่องผลิตก๊าซชีวมวล อัตราการผลิตก๊าซชีวมวล และอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้ ในการทดลองจะวัดปริมาณฝุ่นที่มากับก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จากเตา จะวัดปริมาณฝุ่นก่อนเข้าอุปกรณ์และหลังเข้าอุปกรณ์ เพื่อนำน้ำหนักฝุ่นที่ซั่งได้มาหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น ของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ ของแต่ละการทดลอง ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ หาได้จากสมการที่ 2.13

ประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาค (Collecting efficiency) หมายถึง อัตราส่วนของอนุภาคที่สามารถดักเก็บไว้ได้ต่ออนุภาคทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาในระบบของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก โดยสามารถหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก ได้จากการคำนวณในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.14

3.1.8.2 ปริมาณน้ำมันดิน (tar) และสารปนเปื้อน

น้ำมันดินและสารปนเปื้อน คือ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการควบแน่นสารไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบเชิงซ้อนอื่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง น้ำมันดินประกอบด้วยสารองค์ประกอบต่างๆ มากกว่า 10 ชนิด ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ สารอนินทรีย์ที่ไม่บริสุทธิ์ ฝุ่น และก๊าซต่างๆ รวมทั้งก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้และก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่ได้ ในการทดลองวัดค่าปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ก่อนเข้าอุปกรณ์และหลังเข้าอุปกรณ์ เพื่อนำน้ำหนักที่ซั่งได้มาหาประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ ของแต่ละการทดลอง ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ หาได้โดยใช้สมการที่ 2.13 ส่วนประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ หาได้จากการคำนวณในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.14 โดยนำน้ำหนักปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่วัดได้มาแทนที่น้ำหนักปริมาณฝุ่น (ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนในการทดลอง คือ ปริมาณน้ำมันดินและฝุ่นที่มีอนุภาคเล็กกว่า 3 μm)

3.1.8.3 ความดันตกคร่อม

ในระบบผลิตก๊าซชีวมวลจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ เตาผลิตก๊าซชีวมวล อุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวมวล ถังเก็บก๊าซ ท่อก๊าซ เป็นต้น ทำให้เกิดความดันตกคร่อมในระบบของกระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล ซึ่งอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกก็เป็นอุปกรณ์หนึ่งในระบบที่เกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูง เนื่องจากใช้การสเปรย์น้ำในการทำทำความสะอาดก๊าซชีวมวลผ่านบริเวณคอคอด ในการทดลองจะวัดค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ก่อนเข้าและหลังเข้าอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ ของแต่ละการทดลอง

3.1.8.4 พลังงานที่ใช้

สำหรับพลังงานที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งระบบผลิตก๊าซชีวมวล ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ปั๊มน้ำและพัดลมดูดก๊าซ ซึ่งจะวัดกระแส

และแรงดันไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์วัด Clamp Meter ของแต่ละการทดลอง นำมาหาการใช้พลังงานของอุปกรณ์ดังกล่าวได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$P = EI \quad (3.1)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้า (W)
 E = แรงดัน (V)
 I = กระแส (A)

$$W = Pt \quad (3.2)$$

โดยที่ W = พลังงานไฟฟ้า (kWh)
 P = กำลังไฟฟ้า (kW)
 t = เวลา (h)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 วิธีเดินระบบเตาผลิตก๊าซชีววมวล มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

- 3.2.1.1 เติมเชื้อเพลิงชีววมวลไม้ ขนาด 2"x2"x2" เข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีววมวล
- 3.2.1.2 กดปุ่ม Start เดินระบบผลิตก๊าซชีววมวล (เปิดวาล์วและพัดลมดูดก๊าซ)
- 3.2.1.3 ปรับอัตราการไหลก๊าซที่ 6.21 m³/min โดยใช้ Inverter ปรับรอบของพัดลม

ดูดก๊าซ

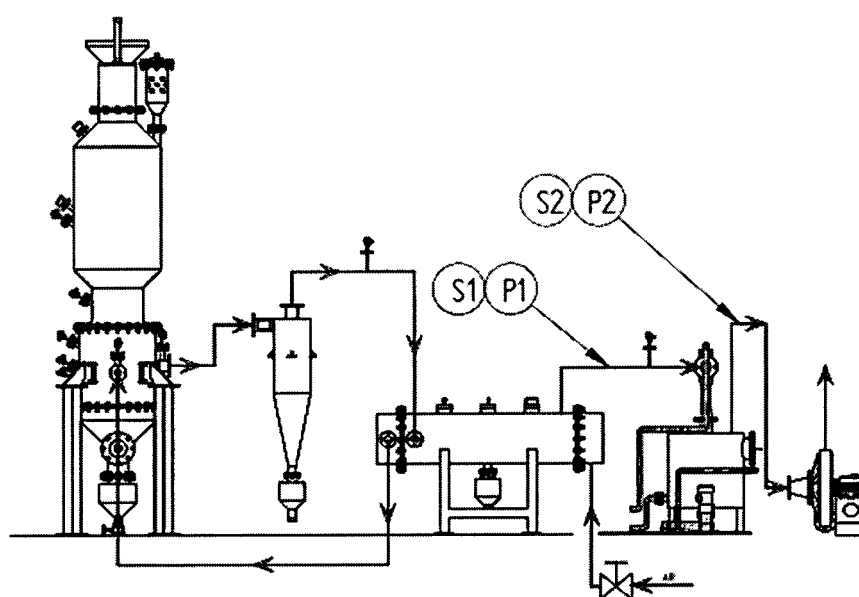
- 3.2.1.4 จุดเตา Gasifier
- 3.2.1.5 เดินระบบผลิตก๊าซชีววมวล ประมาณ 30 min
- 3.2.1.6 เปิดระบบน้ำอุปกรณ์ดักฝุ่น (เปิดปั๊มน้ำ Muti stage centrifugal pump)
- 3.2.1.7 ควบคุมความดันน้ำฉีดตามเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3.5
- 3.2.1.8 เก็บตัวอย่างก๊าซชีววมวลหาปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน วัดความดัน

ตกคร่อม และวัดพลังงานการใช้ไฟฟ้า ของแต่ละการทดลอง

สำหรับทิศทางการไหลของกระแสก๊าซชีววมวลที่ผลิตออกจากเตา Gasifier ก่อนจะเข้ามายังอุปกรณ์ดักฝุ่น จะผ่านอุปกรณ์ไซโคลน (Cyclone) และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ด้วยพัดลมดูดก๊าซชีววมวล ดังภาพที่ 3.13

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการทดลองช่วงความดันของน้ำฉีด

ลำดับที่	ชนิดคอคอด (bar)	ชนิดอีเจ็คเตอร์ (bar)
1	0.25	1.00
2	0.50	2.00
3	0.75	3.00
4	1.00	4.00
5	-	5.00
6	-	6.00



ภาพที่ 3.13 ผังทิศทางการไหลของกระแสก๊าซในการทดลอง

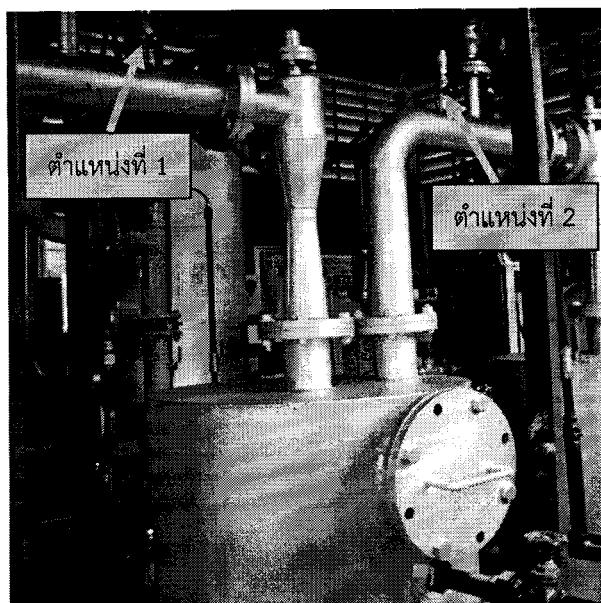
3.2.2 วิธีเก็บตัวอย่างการทดลอง

3.2.2.1 วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน

ในส่วนของการเก็บตัวอย่างเพื่อหาค่าปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ในการทดลอง มีการดำเนินงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1) วิธีการเตรียมจุดเก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล

ในการทดลองจะต้องเตรียมจุดเก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งสำหรับเก็บตัวอย่างปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งสำหรับเก็บตัวอย่างปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน หลังเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างการทดลอง

2) วิธีการเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล

การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล อุปกรณ์ประกอบด้วย ขวดชมพู จุกยาง หลอดแก้ว สายซิลิโคนทนความร้อน ถังโฟม น้ำแข็ง ฮีตเตอร์ กระจกกรอง ปั้นลูกสูบ ดูดก๊าซ และเกลือ การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.1) การเตรียมอุปกรณ์เก็บฝุ่น เริ่มจากนำกระจกกรองที่มีความละเอียด $3\ \mu\text{m}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $90\ \text{mm}$ ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\ ^\circ\text{C}$ ด้วยตู้อบ Hot Air Oven (Model TS800) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระจกกรองออกมาทิ้งไว้ให้เย็น เอาเข้าในตู้ดูดความชื้น 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.15 หลังจากนั้น นำกระจกกรองไปชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 3.16 จะได้ น้ำหนักกระจกกรองก่อนการเก็บฝุ่นในการทดลอง นำกระจกกรองที่ได้ไปประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น



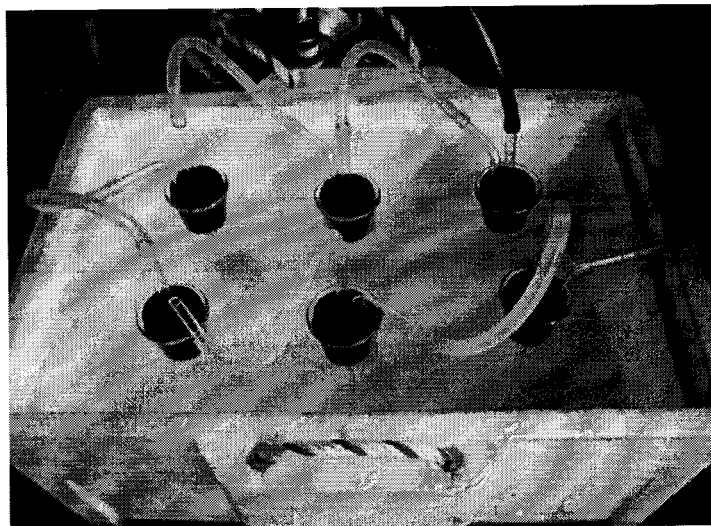
ภาพที่ 3.15 ตัวอย่างการวัดความขึ้นกระดาชกรอง



ภาพที่ 3.16 ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักกระดาชกรอง

2.2) การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน การเตรียมอุปกรณ์ทำโดยเตรียมขวดชมพู และบรรจุสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) ลงในขวดชมพูขวดละ 50 ml จำนวน 6 ขวด เพื่อละลายน้ำมันดินออกจากก๊าซชีวมวล จากนั้นนำขวดชมพูที่บรรจุสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) ทั้ง 6 ขวด มาวางต่อกันแบบอนุกรมด้วยสายซิลิโคนทนความร้อน นำขวดชมพูทั้ง 6 ขวดที่เตรียมไว้แล้ว นำไปวางแช่ในกล่องโฟมที่บรรจุน้ำแข็งผสมเกลือเพื่อให้อุณหภูมิประมาณ $0 - 5^\circ C$ ดังภาพที่ 3.17 แล้วนำไปต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นตรงทางเข้า และต่อกับชุดอุปกรณ์ดูดก๊าซตรงทางออกของชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ตัวอย่างก๊าซชีวมวลจะถูกดูดออกจากท่อก๊าซในระบบผลิตก๊าซชีวมวล เข้าไปยัง

ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นและชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ด้วยชุดอุปกรณ์ดูดก๊าซ (ปั๊มลูกสูบ)



ภาพที่ 3.17 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยสายซิลิโคนทนความร้อนของชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน

3) วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน

การเก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล จะเริ่มดำเนินการหลังจากที่ได้เดินระบบผลิตก๊าซชีวมวลไปประมาณ 30 min โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติ ดังนี้

3.1) ควบคุมความดันน้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นตามเงื่อนไขการทดลอง มีวิธีการดังนี้ จากภาพที่ 3.18

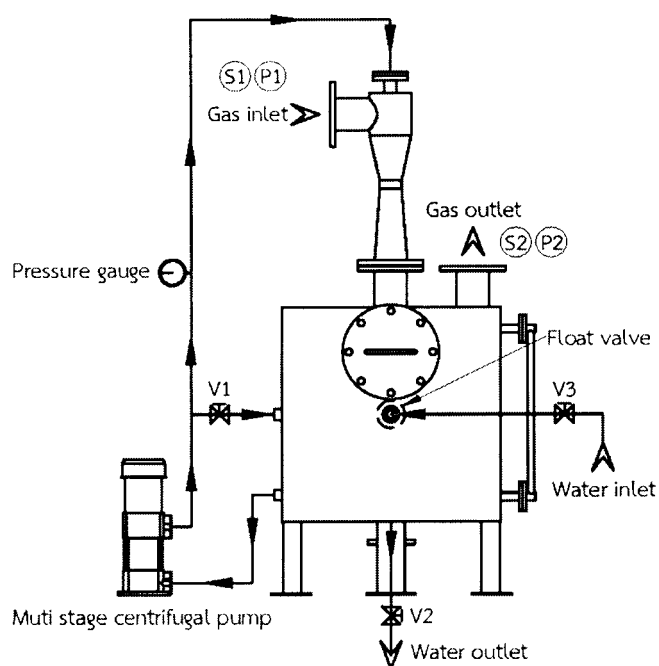
3.1.1) เปิดวาล์วปล่อยน้ำ (V1) ผ่านทางท่อ Bypass เข้าสู่ถังพักเพื่อลดความดันน้ำฉีดตามเงื่อนไขการทดลอง ดูค่าความดันน้ำฉีดได้จาก Pressure gauge

3.1.2) เปิดวาล์วน้ำทิ้ง (V2) ด้านล่างของถังในกรณีที่อุณหภูมิน้ำสูงขึ้นจนเกินค่าที่กำหนด และน้ำจะถูกเติมเข้ามาทางวาล์วลูกลอย (V3) เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำ

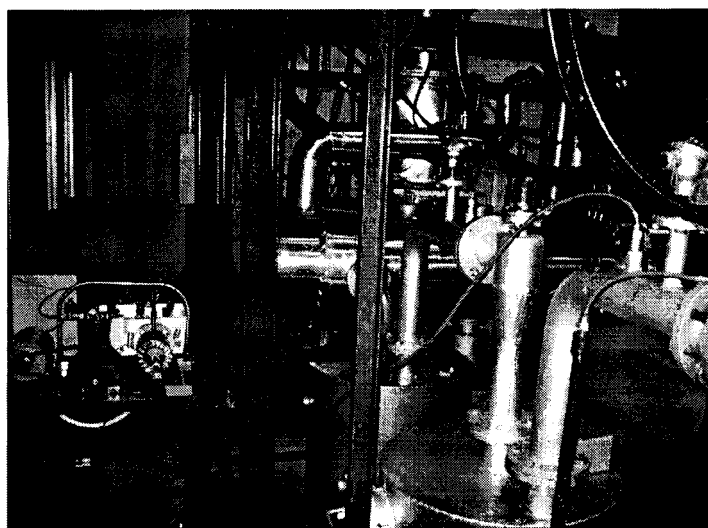
3.2) เชื่อมต่อสายยางทนความร้อนเข้ากับจุดที่จะเก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวลเข้ากับชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ดังภาพที่ 3.19

3.3) ทำการตั้งค่าเครื่องดูดก๊าซให้ดูดก๊าซผ่านเข้าไปในชุดเก็บตัวอย่างฝุ่น ชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ด้วยปั๊มลูกสูบจากตู้ควบคุมการทำงาน การทดลองในงานวิจัยนี้ จะทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวมวล ที่ปริมาตร 0.5 m³

3.4) เปิดระบบการทำงานชุดเก็บตัวอย่างฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน



ภาพที่ 3.18 ผังชุดอุปกรณ์ดักฝุ่น



ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์วัดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนหลังเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น

3.2.2.2 วิธีการวัดความดันตกคร่อม มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดการทำงานของอุปกรณ์วัด Digital micro manometer และ Clear zero
- 2) เชื่อมต่อสายยางจากจุดที่จะวัดความดันเข้ากับอุปกรณ์วัด Digital micro manometer วัดความดันก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น (P1) และวัดความดันหลังเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น (P2) ดังภาพที่ 3.20 ของแต่ละการทดลอง ได้ค่าการวัดเป็น Pa

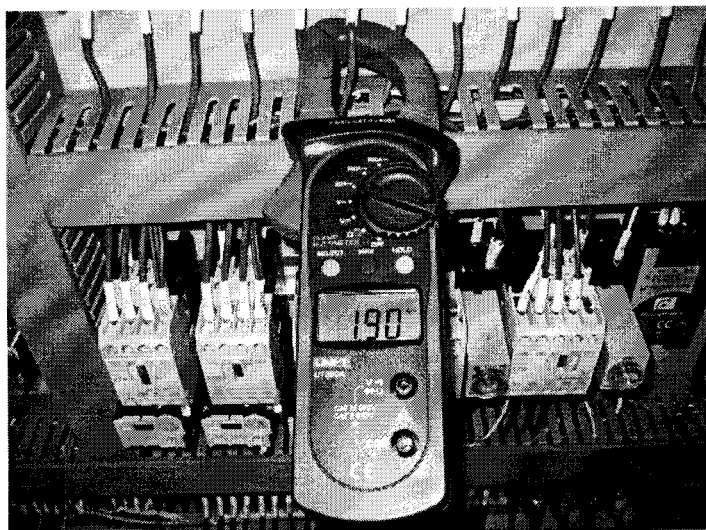
3) นำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบ (P1-P2) จะได้ค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์
 ดักฝุ่น

3.2.2.3 วิธีการวัดพลังงานไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

1) เปิดการทำงานของอุปกรณ์วัด Digital Clamp Multimeters ปิดสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง 200A~ วัดกระแส และปิดสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง V~ วัดแรงดัน

2) วัดพลังงานไฟฟ้าของปั้มน้ำและพัดลมดูดก๊าซที่ผู้ควบคุมการทำงาน
 ดังภาพที่ 3.21 วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละการทดลอง นำค่าที่ได้มาคำนวณพลังงานไฟฟ้า (kWh) จากสมการที่ 2.15 และ 2.16

3) นำพลังงานไฟฟ้า (kWh) ของปั้มน้ำและพัดลมดูดก๊าซมารวมกัน จะได้
 พลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ดักฝุ่น



ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างการวัดกระแสไฟฟ้าปั้มน้ำ

3.2.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

3.2.3.1 วิธีหาปริมาณฝุ่น มีขั้นตอนดังนี้

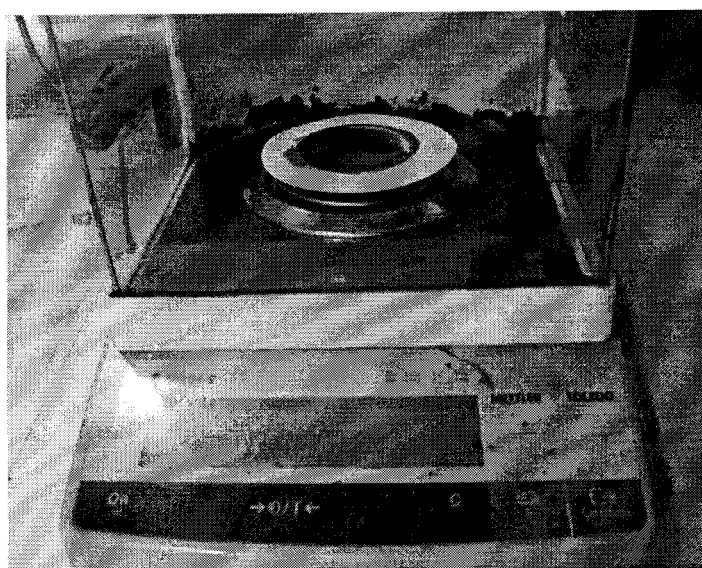
1) นำกระดาษกรองที่มีตัวอย่างฝุ่นของแต่ละการทดลองไปอบแห้งในตู้อบ
 ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) หลังจากนั้นนำกระดาษกรองไปเข้าตู้ดูดความชื้น 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.21

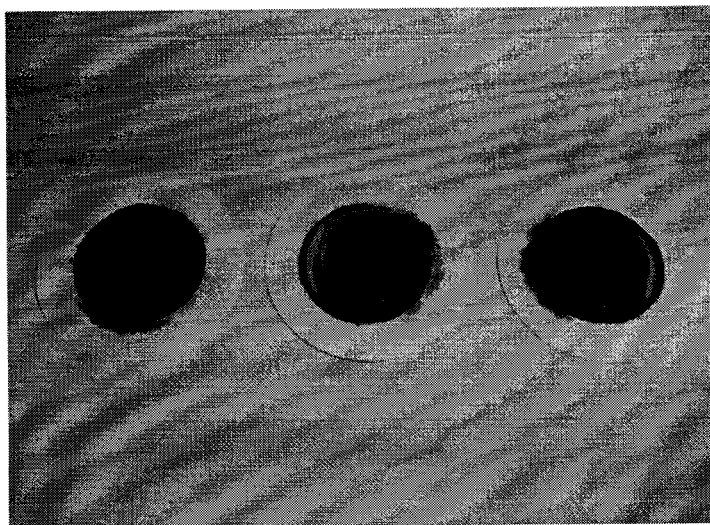
3) นำกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 3.22 จะได้ปริมาณฝุ่นของแต่ละ
 การทดลอง



ภาพที่ 3.21 ตัวอย่างการทดสอบความชื้นกระดาษกรอง



ภาพที่ 3.22 ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง



ภาพที่ 3.23 ตัวอย่างปริมาณฝุ่นที่ติดบนกระดาศกรงก่อนเข้าอุปกรณ์

3.2.3.2 วิธีหาปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อน แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ มีขั้นตอนดังนี้

1.1) ล้างทำความสะอาดถ้วยระเหยให้สะอาด

1.2) นำถ้วยระเหยไปเข้าตู้อบ อบถ้วยระเหยที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา

1 ชั่วโมง

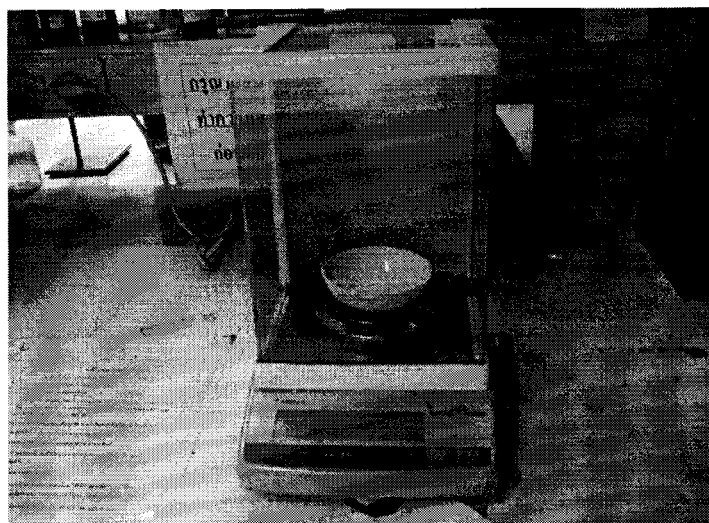
1.3) นำถ้วยระเหยเข้าตู้ดูดความชื้น 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.24

1.4) นำถ้วยระเหยไปชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 3.25 จะได้ถ้วยระเหยก่อนการ

หาปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อน



ภาพที่ 3.24 ตัวอย่างการดูดความชื้นถ้วยระเหย



ภาพที่ 3.25 ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักถ้วยระเหย

2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ ชั่งน้ำหนักน้ำมันดินและสารปนเปื้อน มีขั้นตอนดังนี้

2.1) เทสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) ที่มีน้ำมันดินและสารปนเปื้อนละลายอยู่ ลงในถ้วยระเหย ดังภาพที่ 3.26 สารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเคมีภัณฑ์เกรดสำหรับการวิเคราะห์ทดลองในห้อง Lab ซื้อจาก บริษัท เอ็น เค อินเตอร์แอคทีฟ จำกัด มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังตารางที่ 3.6

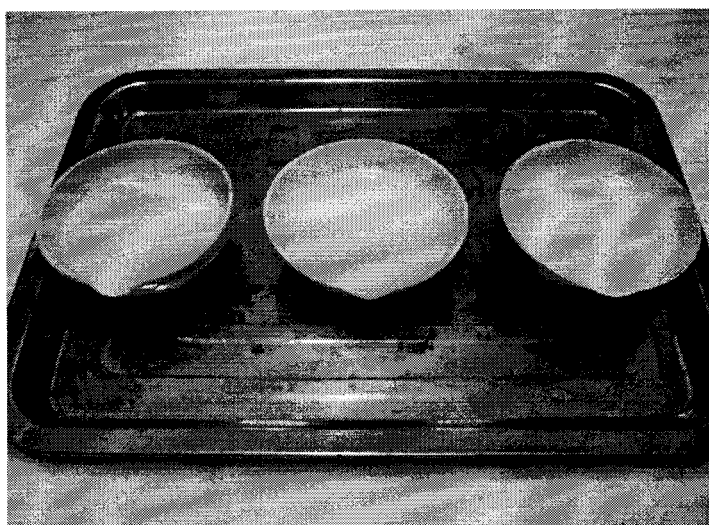
2.2) นำถ้วยระเหยที่บรรจุสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) เข้าตู้อบ ดังภาพที่ 3.27 เพื่อระเหยสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O) ออกจากน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ที่อุณหภูมิ $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

2.3) นำถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อน เข้าตู้อบความชื้นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

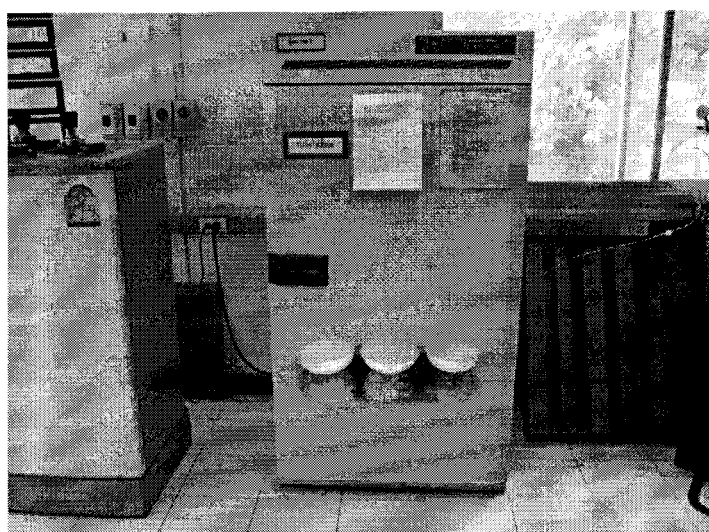
2.4) นำถ้วยระเหยที่มีน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ไปชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 3.28 นำน้ำหนักถ้วยระเหยที่ชั่งได้ ไปเทียบค่าน้ำหนักถ้วยระเหยก่อนการหาปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อน จะได้ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)

Physical and Chemical Properties	Volume
Boiling point	82-83 °C
Melting/freezing point	Typical -88 °C
Acidity/alkalinity (meq/g)	0.0001 meq/g
Assay (GC)	99.97%
Calcium (Ca)	<0.005 ppm
Colour	<5 APHA
Copper (Cu)	<0.002 ppm
C4 alcohols	0.0002%
C5 alcohols	Not Detected%
Ethanol	0.00008%
Iron (Fe)	<0.002 ppm
Lead (Pb)	<0.002 ppm
Magnesium (Mg)	<0.002 ppm
Methanol	0.00007%
Potassium (K)	<0.002 ppm
Propan-1-ol	0.0273%
Residue after evaporation (ppm)	0.51 ppm
Sodium (Na)	<0.02 ppm
Substances darkened by H_2SO_4 (APHA)	<5 APHA
Substances reducing $KMnO_4$	<0.0005%
Total phosphorus (P)	<0.01 ppm
Total silicon (Si)	<0.02 ppm
Total sulfur (S)	<0.05 ppm
Water	0.007%
Zinc (Zn)	<0.002 ppm



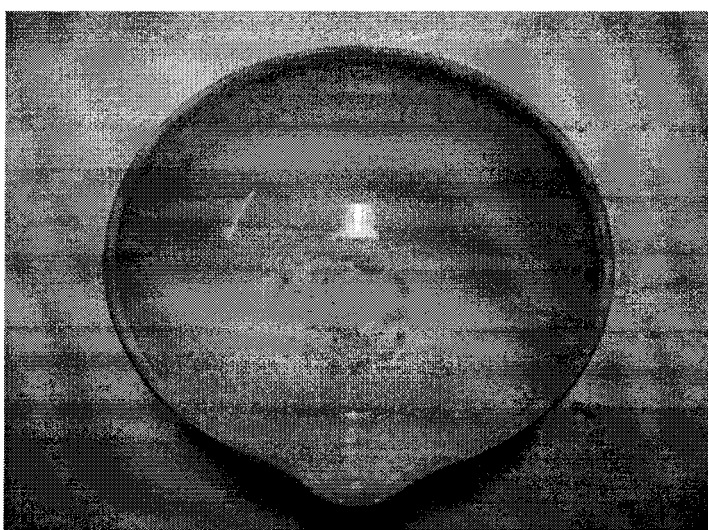
ภาพที่ 3.26 ตัวอย่างถ้วยระเหยบรรจุสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)



ภาพที่ 3.27 ตัวอย่างการอบระเหยสารละลายไอโซโพรพานอล (C_3H_8O)



ภาพที่ 3.28 นำถ้วยระเหยที่มีน้ำมันดินและสารปนเปื้อนซึ่งน้ำหนัก



ภาพที่ 3.29 ตัวอย่างน้ำมันดินและสารปนเปื้อนในถ้วยระเหย

บทที่ 4

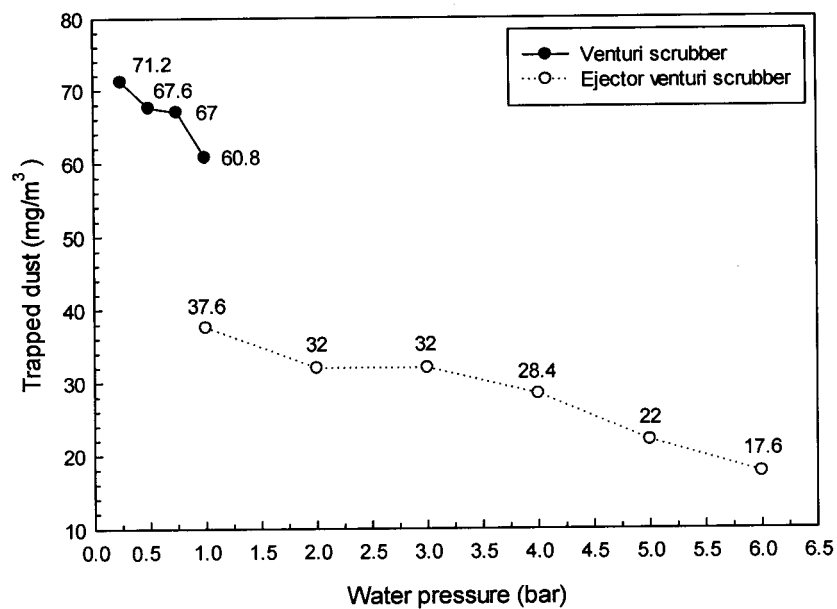
ผลการทดลองและวิเคราะห์

จากผลการทดลองอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล สามารถนำเสนอออกเป็น 4 ประเด็น ดังนี้

4.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่น

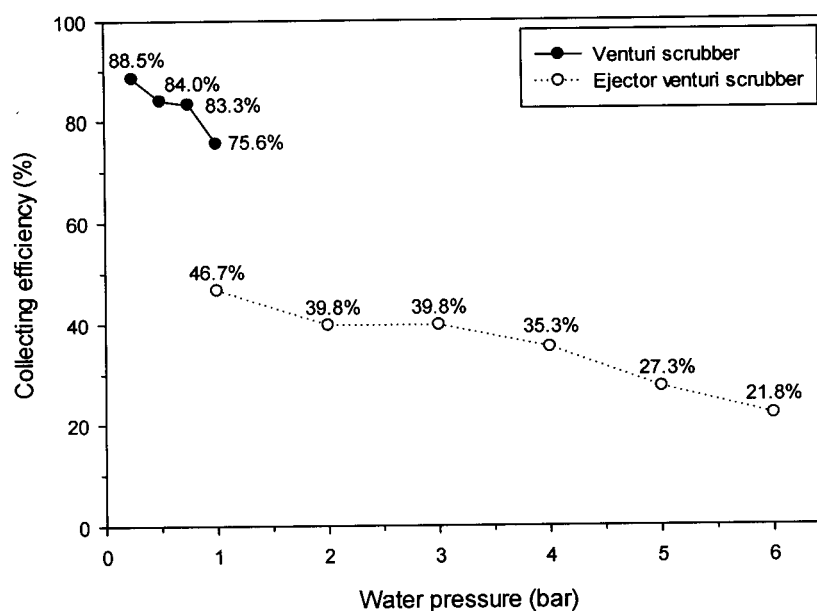
จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ดังภาพที่ 4.1 เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบนั้น ทำให้น้ำฉีดมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การสัมผัสกันของน้ำกับกระแสก๊าซในอุปกรณ์ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเป็นผลทำให้การดักจับฝุ่น ดักจับได้น้อยลง อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดดักจับฝุ่นได้ปริมาณมากที่สุด คือ 71.2 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ดักจับฝุ่นได้ปริมาณมากที่สุด คือ 37.6 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar (ปริมาณฝุ่นที่วัดได้ก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ คือ 80.4 mg/m^3)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ พบว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ ดักจับฝุ่นได้น้อยกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด จะสังเกตได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ เมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีดสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นน้อยลง ดังนั้นอุปกรณ์ดักฝุ่นจะดักจับฝุ่นได้ดีจะต้องมีการสเปรย์น้ำฉีดให้มีลักษณะเป็นละอองที่ความดันน้ำฉีดไม่สูงมาก จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นที่สูงกว่า



ภาพที่ 4.1 ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

และจากข้อมูลการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ สามารถนำมาคำนวณหา ประสิทธิภาพรวมของอุปกรณ์ดักฝุ่นตามสมการที่ (2.14) ดังภาพที่ 4.2 โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงสุด 88.5% ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงสุด 46.7% ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar

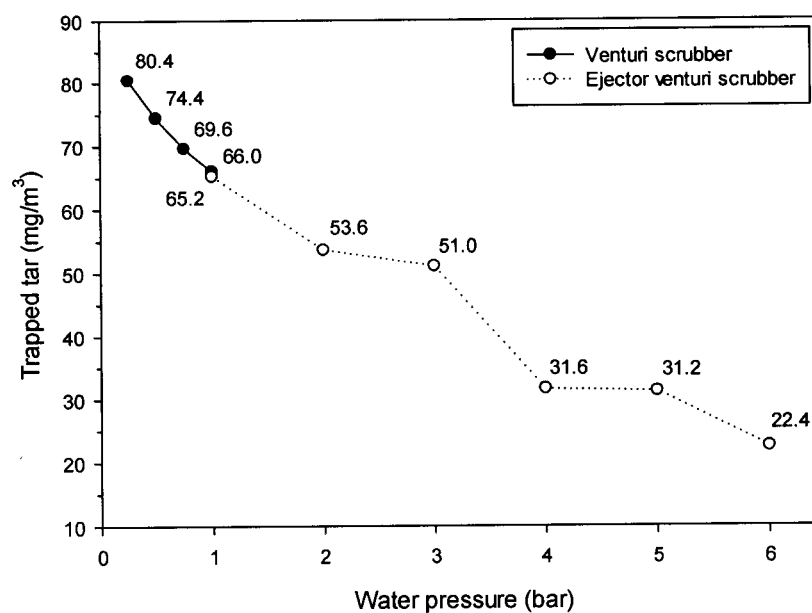


ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

4.2 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อน

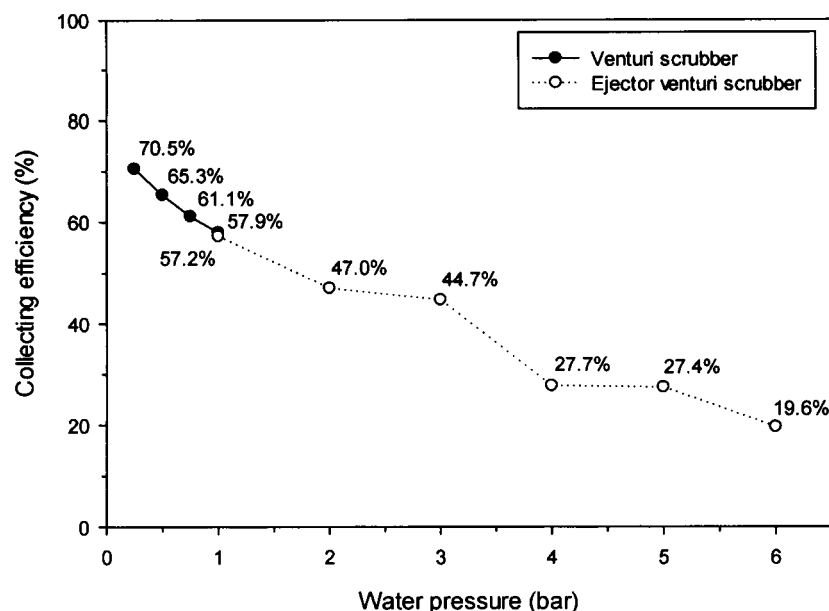
จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ดังภาพที่ 4.3 เนื่องจาก เมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ลักษณะของการสเปรย์น้ำไม่เป็นละออง จะมีลักษณะเป็นลำน้ำฉีดที่มีความเร็ว ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างน้ำที่ใช้ในการทำ ความสะอาดกับกระแสดำโคลน เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้การดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ดักจับได้น้อยลง อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดสามารถดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้ปริมาณมากที่สุด คือ 80.4 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ ดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้มากที่สุดที่ 65.2 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar (ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อน ที่วัดได้ก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ คือ 114 mg/m^3)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ พบว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ ดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้น้อยกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด จะสังเกตได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ เมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีดสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนน้อยลง ดังนั้นอุปกรณ์ดักฝุ่นจะดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้ดีจะต้องมีการสเปรย์น้ำฉีดให้มีลักษณะเป็นละอองที่ความดันน้ำฉีดไม่สูงมาก จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่สูงกว่า



ภาพที่ 4.3 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

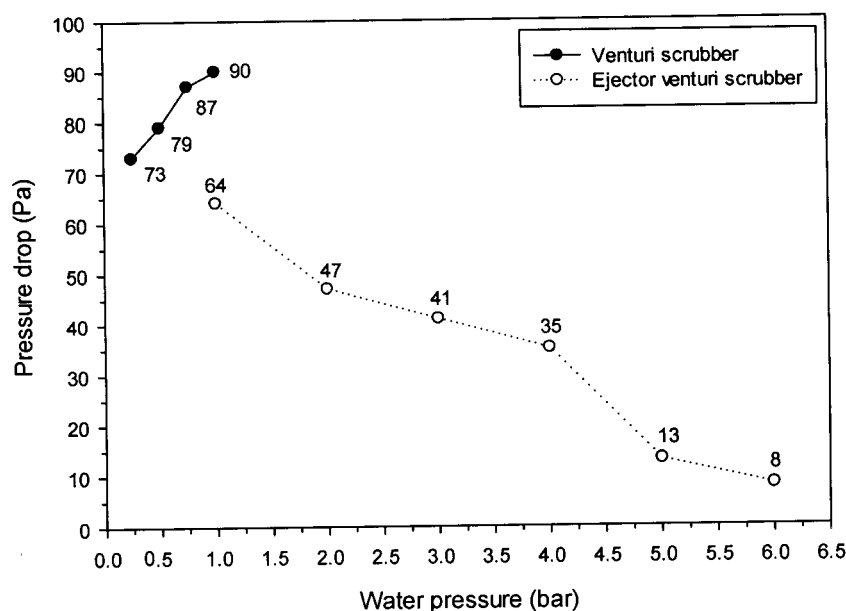
และจากข้อมูลการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ สามารถนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพรวมของอุปกรณ์ดักฝุ่นตามสมการที่ (2.14) โดยนำน้ำหนักปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่วัดได้มาแทนที่น้ำหนักปริมาณฝุ่น ดังภาพที่ 4.4 โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดให้ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูงสุด 70.5% ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ให้ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูงสุด 57.2% ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเป๊ยกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

4.3 ความดันตกคร่อม

จากผลการทดลอง จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ เนื่องจากลักษณะการสเปรย์น้ำของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดเป็นละอองที่ความดันน้ำฉีดไม่สูง เมื่อเพิ่มความดันน้ำฉีดก็ยิ่งทำให้การสเปรย์น้ำฉีดเป็นลำ ไปขวางทิศทางการไหลของกระแสก๊าซ ส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้น โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าความดันตกคร่อมในอุปกรณ์มีค่าน้อยที่สุด คือ 73 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีค่าความดันตกคร่อมลดลงเมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ซึ่งจะแตกต่างจากอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด เนื่องจากลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นลำขนาดเล็ก เมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีดมากขึ้น ทำให้โมเมนตัมของลำน้ำฉีดเพิ่มสูงขึ้น สามารถเหนี่ยวนำกระแสก๊าซให้ไหลผ่านอุปกรณ์บริเวณคอคอดได้มากขึ้น ทำให้เมื่อเพิ่มความดันน้ำฉีด ก็ยิ่งช่วยลดค่าความดันตกคร่อมให้กับอุปกรณ์ได้มากขึ้น โดยค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีค่าน้อยสุด คือ 8 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 6 bar



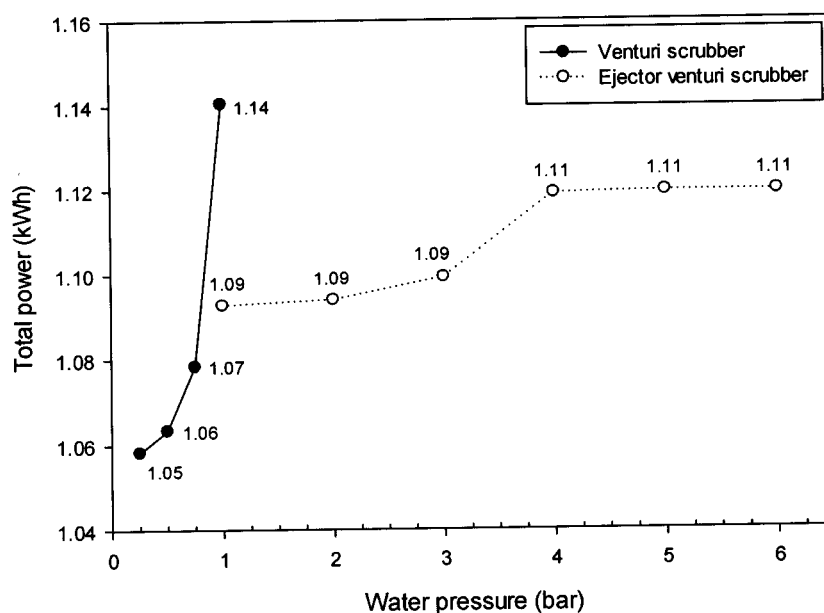
ภาพที่ 4.5 ความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

4.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า

สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้ารวมในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งระบบผลิตก๊าซชีววมวล โดยมีแหล่งที่มาของพลังงานไฟฟ้า 2 แหล่ง ได้แก่ ปั๊มน้ำและพัดลมดูดก๊าซ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าพลังงานรวมที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ดังภาพที่ 4.6 เนื่องจากการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ปั๊มน้ำยังใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นตามความดันน้ำฉีด ซึ่งลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย ทำให้ยิ่งไปทางทิศทางการไหลของกระแสก๊าซ ส่งผลให้พัดลมดูดก๊าซก็ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมน้อยสุด คือ 1.05 kWh ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดเมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีด เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มความดันของน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ ปั๊มน้ำใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น แต่จากช่วงความดันน้ำฉีดที่ 4-6 bar พลังงานรวมของอุปกรณ์เริ่มมีค่าคงที่ เพราะว่าที่ความดันน้ำฉีดสูง อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์สามารถเหนี่ยวนำกระแสก๊าซได้มากขึ้น ทำให้พัดลมดูดก๊าซทำงานน้อยลง

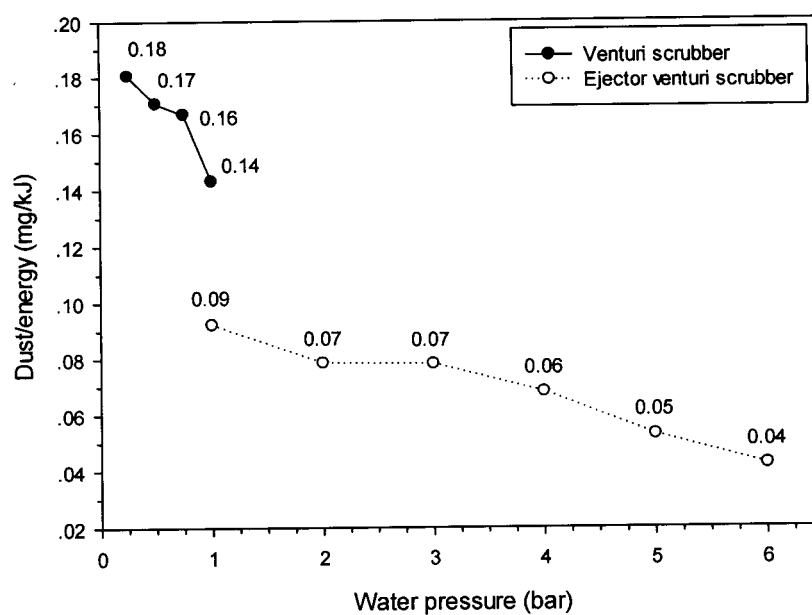
จากการเปรียบเทียบอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ พบว่า มีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมเหมือนกัน คือ เมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีดให้กับอุปกรณ์ การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เพราะว่า ปั๊มน้ำทำงานที่ความดันน้ำฉีดสูงขึ้นจะใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar จะใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงสุดของการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ เนื่องจากลักษณะการสเปรย์

น้ำฉีดของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย เมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีด สเปรย์น้ำฉีดมีลักษณะเป็นลำ ยิ่งเกิดม่านน้ำทำให้ไปขวางทิศทางการไหลของกระแสก๊าซ พัดลมดูดก๊าซทำงานมากขึ้น ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมจึงมากกว่าทุกผลการทดลอง

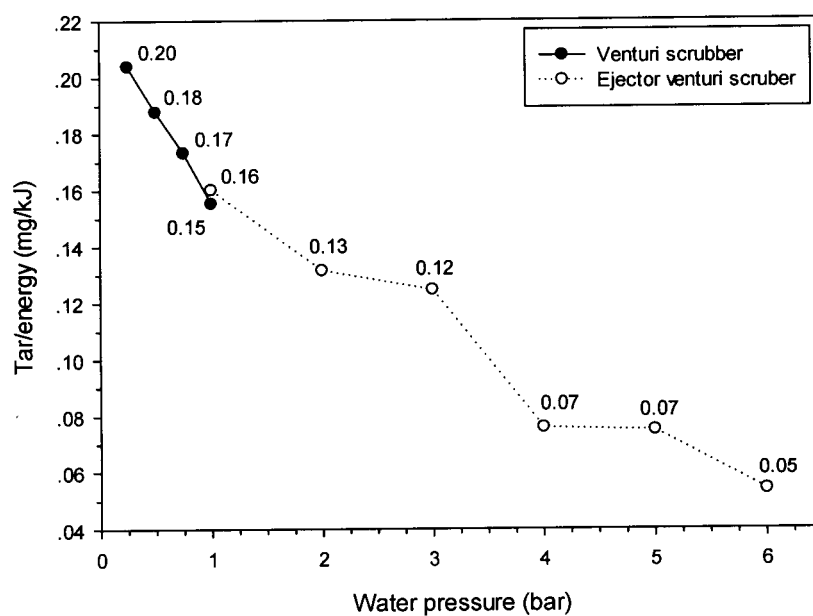


ภาพที่ 4.6 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด กับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

จากภาพ 4.7 – 4.8 เป็นการคิดปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ดักจับได้ต่อพลังงานที่ใช้ โดยปริมาณฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้มีหน่วยเป็นปริมาณ (mg) ต่อพลังงานที่ใช้ไปของอุปกรณ์มีหน่วยเป็น (kJ) พบว่าค่าปริมาณฝุ่นต่อพลังงานของอุปกรณ์ ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ แปรผกผันกับความดันของน้ำฉีด โดยค่าสูงสุดของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด คือ 0.18 mg/kJ ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์มีค่าสูงสุดคือ 0.09 mg/kJ ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar ส่วนปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ต่อพลังงานของอุปกรณ์ ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ต่อพลังงาน โดยค่าสูงสุดของ อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด คือ 0.20 mg/kJ ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิด อีเจ็คเตอร์ มีค่าสูงสุด คือ 0.16 mg/kJ ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar จากผลการทดลองที่ได้นี้สรุปได้ว่า ผลการทดลองมีค่าสูงยิ่งดี หมายความว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นสามารถดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อน ได้มากและใช้พลังงานน้อย



ภาพที่ 4.7 ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ต่อพลังงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ



ภาพที่ 4.8 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ต่อพลังงานของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

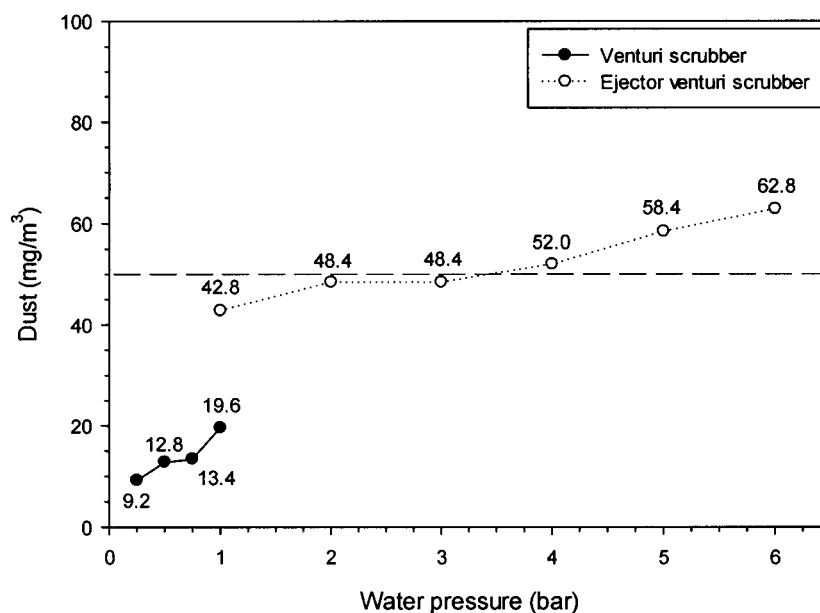
สรุปผลการทดลองการเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็น 4 ข้อดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่น

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นมากกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ 89.36% ที่ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงสุดในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ (อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีประสิทธิภาพสูงสุด 88.5% ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีประสิทธิภาพสูงสุด 46.7% ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar)

(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ มีค่าความสามารถในการดักจับฝุ่นสูงที่ความดันน้ำฉีดต่ำ โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดดักจับฝุ่นได้สูงสุด 71.2 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ดักจับฝุ่นได้สูงสุด 37.6 mg/m^3 ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar (ปริมาณฝุ่นที่วัดได้ก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ คือ 80.4 mg/m^3)

(3) จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำก๊าซชีววมวลที่ผ่านการทำความสะอาดจากอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในการผลิตไฟฟ้า จะต้องควบคุมคุณภาพก๊าซชีววมวลให้ได้ค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ซึ่งค่ามาตรฐานปริมาณฝุ่นสูงสุดในก๊าซชีววมวลที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริมาณฝุ่นไม่ควรเกิน 50 mg/m^3 จากผลการทดลองพบว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดผ่านค่ามาตรฐานทุกช่วงความดันน้ำฉีด ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ผ่านค่ามาตรฐานในช่วงความดันน้ำฉีด 1-3 bar ดังภาพที่ 5.1



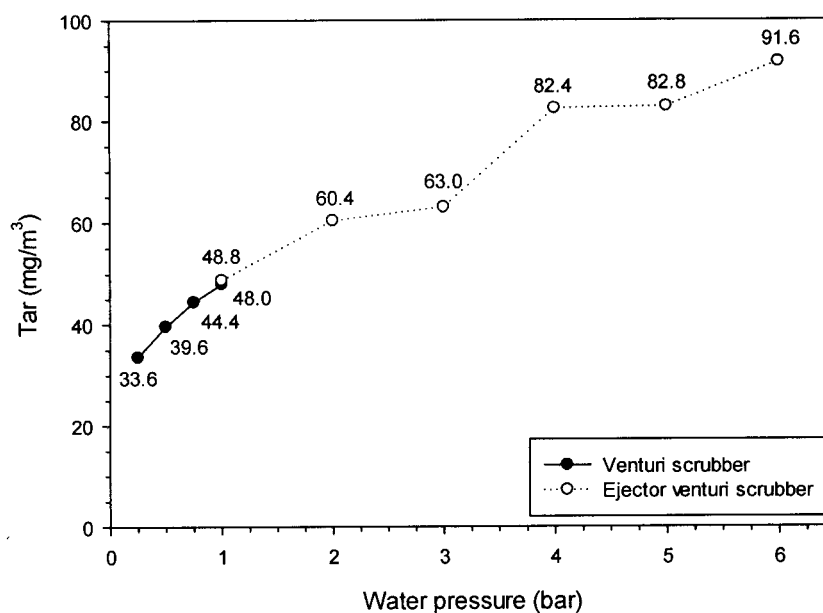
ภาพที่ 5.1 ปริมาณฝุ่นหลังออกของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปือกชนิดคอคอดกับชนิดอีเจ็คเตอร์ ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

5.2 ประสิทธิภาพการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อน

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดให้ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนมากกว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ 23.31% ที่ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูงสุดในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ (อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีประสิทธิภาพสูงสุด 70.5% ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีประสิทธิภาพสูงสุด 57.2% ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar)

(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ มีค่าความสามารถในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูง ที่ความดันน้ำฉีดต่ำ โดยอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้สูงสุด 80.4 mg/m³ ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้สูงสุด 65.2 mg/m³ ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar (ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่วัดได้ก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ คือ 114 mg/m³)

(3) จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำก๊าซชีววมวลที่ผ่านการทำความสะอาดจากอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในการผลิตไฟฟ้า จะต้องควบคุมคุณภาพก๊าซชีววมวลให้ได้ค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ซึ่งค่ามาตรฐานปริมาณน้ำมันดินสูงสุดในก๊าซชีววมวลที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริมาณน้ำมันดินไม่ควรเกิน 100 mg/m³ จากผลการทดลองพบว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ผ่านค่ามาตรฐานทุกช่วงความดันน้ำฉีด ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนหลังออกของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด กับชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีดต่างๆ

5.3 ความดันตกคร่อม

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์มีค่าความดันตกคร่อมน้อยกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด 89.04% ที่ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุดในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ (อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด มีค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด 73 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ มีค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด 8 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 6 bar)

(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีค่าความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันน้ำฉีด โดยมีค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด 73 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์มีค่าความดันตกคร่อมน้อยลงเมื่อเพิ่มความดันน้ำฉีด โดยมีค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด 8 Pa ที่ความดันน้ำฉีด 6 bar

5.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า

(1) อุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ ใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำฉีด ซึ่งอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอด 3.26% (พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ไปของอุปกรณ์ ที่ประสิทธิภาพสูงสุดในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนในการทดลอง ซึ่งอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar และอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar)

(2) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยสุด คือ 1.05 kWh ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยสุด คือ 1.09 kWh ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar และในช่วงความดันน้ำฉีด 4 – 6 bar ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์คงที่ เนื่องจาก

ที่ความดันน้ำฉีดในช่วงนี้ อุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์สามารถเหนียวน้ำก๊าซชีวมวลได้มาก ทำให้พัดลมดูดก๊าซใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง

(3) ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ (mg) ต่อพลังงานที่ใช้ (kJ) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดดักจับฝุ่นได้มาก และใช้พลังงานน้อยกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ 95.65% ที่ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงสุดในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ

(4) ปริมาณน้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่ดักจับได้ (mg) ต่อพลังงานที่ใช้ (kJ) อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนได้มาก และใช้พลังงานน้อยกว่าอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ 27.5% ที่ประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูงสุดในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ

5.5 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่ควรวิจัยต่อไป

จากผลการทดลองที่ได้ สรุปได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมในอุปกรณ์น้อย ใช้พลังงานสูง ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนต่ำ เนื่องจากพื้นที่การสัมผัสกันระหว่างน้ำกับกระแสน้ำน้อยและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดเป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมในอุปกรณ์สูง ใช้พลังงานน้อย ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนสูง โดยประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยที่ผ่านมา สิ่งที่แตกต่างกันงานวิจัยอื่นจากผลการทดลองที่ได้ คือ การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซในอุปกรณ์ที่มากขึ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น แต่การสเปรย์น้ำฉีดที่ดี หรือเป็นละอองขนาดเล็ก จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นที่สูงกว่า

ในส่วนของงานวิจัยที่ควรจะทำต่อในอนาคต ควรนำข้อดีของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ มาปรับใช้ในการออกแบบใหม่ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ให้มีประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและสารปนเปื้อนที่สูง แต่ยังมีค่าความดันสูญเสียต่ำ และควรศึกษาอิทธิพลของรูปแบบลำพองของน้ำที่ใช้ในการสเปรย์รวมทั้งระยะติดตั้งและขนาด Area ratio ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. **คู่มือฝึกอบรม เทคโนโลยีพลังงานทดแทน Renewable Energy Technology**. อุบลราชธานี: ศิริธรรมออฟเซ็ท, 2553.
- [2] Basu, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. USA: Elsevier, 2010.
- [3] Jan Baptist Van Helmont. (1644). “The Leuven Local Heroes in Thermal Sciences and Engineering”, **Identifie gases as a substance (1579-1644)**. http://people.mech.kuleuven.be/~erik/local_heroes.html. 2 May, 2014.
- [4] Reed, T.B. **A Survey of Biomass Gasification**. New Jersey: Solar Energy Research Institue, 1981.
- [5] Larson, E.D. (1998). “Small-Scale Gasification-Based Biomass Power Generation”, **Biomass Workshop**. https://www.princeton.edu/pei/energy/publications/texts/Small_scale_gasification.pdf. 20 May, 2014.
- [6] Intelligent Energy for Europe Programme. (2009). “Guideline for Safe and Eco-Friendly Biomass Gasification”, **Energy**. http://www.gasification-guide-eu/gsg_uploads/documenten/D10_Final-Guideline.pdf. 5 March, 2014.
- [7] Smith, E.W. “Modern gas producers”, **Journal of the Society of Chemical Industry**. 42(41): 993-993, 1923.
- [8] มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาพัฒนาระบบก๊าซชีวมวลในการสูบน้ำเพื่อการเกษตร. รายงานต่อกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน**, 2553.
- [9] วรณัฐ แจ่มสว่าง. **พลังงานหมุนเวียน**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [10] Boyle, G. **Renewable Energy Power for a Sustainable Future**. United Kingdom: Alden University, 1996.
- [11] Thoms B. Reed and Agua Das. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. Colorado: Solar Technical Information Program, 1988.
- [12] Reed, T.B. Levie, B. and Markson, M.L. “A Mathematical Model for Stratified Downdraft Gasification”, **Fuel**. 28(5): 410-420, 1983.
- [13] วรณัฐ แจ่มสว่าง. **เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล**. กรุงเทพฯ: บริษัทแดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น จำกัด, 2556.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] Hasler, P. Buehler, R. and Nussbaumer, Th. "Evaluations of Gas Cleaning Technologies for Biomass Gasification", **10th European Conference and Technology Exhibition**. Germany: Wurzburg, 1998.
- [15] Kaupp, A. and Goss, J.R. **Small Scale Gas Producer-Engine Systems**. Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 1984.
- [16] J.H.A. Kiel et al. "Primary measures to reduce tar formation in fluidised-bed biomass gasifiers", **Sustainable Energy**. 4(14): 09-12, 2004.
- [17] Susanto, H. and A.A.C.M. beenackers. "A moving-bed gasifier with internal recycle of pyrolysis gas", **Fuel**. 75(11): 1339-1347, 1996.
- [18] Lopamudra Devi, Krzysztof J. Ptasinski, Frans J.J.G. Janssen. "A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes", **Biomass and Bioenergy**. 24(2): 125-140, 2003.
- [19] Mojtahedi W. Ylitalo M. Maunula T. and Abbasian J. "Catalytic decomposition of ammonia in fuel gas produced in pilot scale pressurized fluidized bed gasifier", **Fuel Processing Technology**. 45(3): 221-236, 1995.
- [20] Narvaez, I. Corella, J. and Orio, A. "Fresh tar (from a biomass gasifier) elimination over a commercial steam-reforming catalyst. Kinetics and effect of different variables of operation", **Ind. Eng. Chem. Res**. 36(2): 317-327, 1997.
- [21] Corella, J. Aznar, MP. Gil, J. and Caballero, MA. "Biomass gasification in fluidized bed: Where to locate the dolomite to improve gasification", **Energy and Fuels**. 13(6): 1122-1127, 1999.
- [22] Miline, T.A., Abatzoglou, N., and Evans, R.J. **Biomass Gasifiers "Tas": Their Nature Formation and Conversion**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1988.
- [23] Bui, T. Loof, R. and Bhattacharya, S. "Multi-stage reactor for thermal gasification of wood", **Energy**. 19(4): 397-404, 1994.
- [24] Bridgwater, A.V. "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation", **Fuel**. 74(5): 631-653, 1995.
- [25] BTG biomass technology group BV. **Cleaning of hot producer gas in a catalytic, reverse flow reactor**. Netherlands: NOVEM, 1995.
- [26] Hasler P. and Nussbaumer Th. "Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification", **Biomass and Bioenergy**. 16(6): 385-395, 1999.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [27] Brown, A.E. “Producer gas quality requirements for IGCC gas turbine use”, **Biomass Technology Group BV**. The Netherlands. NOVEM EWAB Report 9603, 1996.
- [28] Aigner, M. “LCV Gas-turbine requirements”, **Ananalysis and Coordination of the activities concerning gasification of biomass**. (AIR3-CT94-2284), 1996.
- [29] ฉัตรชัย นิยมล. **ระบบกำจัดฝุ่นและการระบายอากาศ**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550.
- [30] Robert Jennings Heinsohn and John M. Cimbala. **Indoor Air Quality Engineering**. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [31] ยองโย หอมนาน. **การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น Spray Tower**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.
- [32] Joseph, G. and Beachler, D. (1998). “Scrubber Systems Operation Review”, **Flue Gas Desulfurization (Acid Gas Removal) Systems**.
[http://yosemite.epa.gov/oaqps/eogtrain.nsf/b81bacb527b016d78525e4a004c0393/d4ec501f07c0e03a85256b6c006caf64/\\$FILE/si412c_lesson9.pdf](http://yosemite.epa.gov/oaqps/eogtrain.nsf/b81bacb527b016d78525e4a004c0393/d4ec501f07c0e03a85256b6c006caf64/$FILE/si412c_lesson9.pdf).
10 May, 2014.
- [33] Books, L. **Liquid-Phase and Gas-Phase Contacting Scrubbers: Cyclonic Spray Scrubber, Mechanically Aided Scrubber, Baffle Spray Scrubber**. USA: General Books LLC, 2010.
- [34] สามารท พรเจริญ. **การจับเก็บฝุ่นขนาดเล็กด้วยไซโคลนสครับเบอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [35] ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. **มลภาวะอากาศ**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- [36] Japanese Standard Association. **Method of Measuring Performance for Dust Collector**. JIS B 9910, 1977.
- [37] X. Gamisans, M. Sarra and F. Javier. “Gas pollutants removal in a single and two-stage ejector venturi scrubber”, **Journal of Hazardous Materials**. 90(3): 251-266, 2002.
- [38] Johnstone, H.F. and M.H. Roberts. “Deposition of aerosol particles from moving gas streams”, **Industrial and Engineering Chemistry**. 41(11): 2417-2423, 1949.
- [39] C. David Cooper and F.C. Alley. **Air Pollution Control: A Design Approach**. Illinois: Waveland Press, 2002.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] สุทธิพงศ์ นิ่มเจริญ และสมรรถพร อุณจะนำ. การกำจัดฝุ่นโรงงานไม้ไผ่อัดโดยไซโคลนและสครับเบอร์แบบเปียก. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร: มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2545.
- [41] บันเทิง เจาะปาด และชินรัช ธีรพงษ์. “การหาประสิทธิภาพในการยึดจับฝุ่นในช่วงขนาดต่างๆ ของเครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด”, ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. น. AMM23. ขอนแก่น: โรงแรม โซฟีเทล ราชาออร์คิด ขอนแก่น, 2547.
- [42] มานะ อมรกิจบำรุง และสามารถ พรเจริญ. “การพัฒนาไซโคลนสครับเบอร์ประสิทธิภาพสูง”, ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. น. 122. ชลบุรี: โรงแรมจอมเทียนปาล์ม บีช รีสอร์ท พัทยา, 2548.
- [43] Bonnington, S.T. and King, A.L. **Jet Pumps and Ejectors-A State of the Art Review and Bibliography**. London: BHRA Fluid Engineering, 1972.
- [44] Cunningham, R.G. and Dopkin, R.J. “Jet Breakup and Mixing Throat Lengths for the Liquid Jet Gas Pump”, **Journal of fluids engineering**. 96(3): 216-226, 1974.
- [45] Power R.B. **Steam jet ejectors for the process industries**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [46] Kijowsky, N. “Wet scrubber for opening gases”, **Chemical Abstract**. 103(55809w): 102, 1985.
- [47] Mayinger, F., and Lehner, M. “Operating results and aerosol deposition of a venturi scrubber in self-priming operation”, **Chemical Engineering and Processing**. 34(3): 283-288, 1995.
- [48] Schwarting, G. “Depositions of aerosols and fine dusts from flue gases”, **Fuel and Energy Abstracts**. 37(2): 136-136, 1996.
- [49] Loftus, Peter J., David B. Stickler, and Richard C. Diehl. “A Confiner Vortex Scrubber for Fine Particulate Removal Form Flue Gases”, **Environmental Progress**. 11(1): 27-32, 1992.
- [50] Hanly, James, and John J. Petchonka. “Equipment Selection for Solid Gas Separation”, **Chemical Engineering**. 100(7): 83-85, 1993.
- [51] Devster, E.V., Mensing, A., Jiang, MX. And Majdeski, H. “Cleaning of five Gas From Solid Waste Inoinomtor Plants by Wet/Semi-Dry Process”, **Environmental Progress**. 13(2): 149-153, 1994.
- [52] Marshall, D.A., Summer, R.J. and Shook, C.A. “Removal of SiO₂ Particles with an Ejector Venturi Scrubber”, **Environmental Progress**. 14(1): 28-32, 1995.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [53] Kim, H.T., Jong, C.H., H, S.N. and Lee, K.W. "Particle Removal Efficiency of Gravitational Wet Scrubber Considering Diffusion, Interception, and Impaction", **Environmental Engineering Science**. 18(2): 125-136, 2001.
- [54] ทรงวุฒิ ศรีสว่าง. การกำจัดเถ้าลอยด้วยเครื่องสครับเบอร์แบบหมุนวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [55] มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการออกแบบและผลิตต้นแบบอุปกรณ์ด้านพลังงานทดแทนเพื่อการสาธิต. รายงานต่อกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557.
- [56] United States of Environmental Protection Agency. **Determination of Particulate Emission from Stationary Sources**. US. EPA method 5, 1995.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานทางวิชาการ

รายการบทความทางวิชาการ

ประชุมวิชาการระดับชาติ

อิทธิพล กลวงศ์, ธนกฤต นนทชนะ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง. “ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความ
ต้านตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด” การประชุม
วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, นครราชสีมา, 2558.

ETM-19

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
30 มิถุนายน - 2 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา

ME-NETT2015

**ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเป็ยกชนิดอีเจ็คเตอร์
กับชนิดคอคอด**
**Dust Particle Removal Efficiency and Pressure Drop of Ejector Scrubber
and Venturi Scrubber**

อิทธิพล กุลวงศ์¹, ธนฤต นนทชนะ² และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

² ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*ติดต่อ: E-mail: itthipol13@gmail.com, โทร 045-353300, โทรสาร 045-353333

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความดันตกคร่อม ของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเป็ยกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi scrubber) ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อน ใช้เตาแบบ Double throat downdraft gasifier ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการดักจับฝุ่น โดยอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ จะทำงานในช่วงความดันที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ ใช้ปั๊มน้ำแบบ Multi stage centrifugal pump ในการจ่ายน้ำ ในช่วงอัตราการไหลน้ำ 7 - 45 ลิตรต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ช่วงความดันของน้ำฉีดของอุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์และชนิดคอคอด คือ 1-6 bar และ 0.25-1 bar ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์แปรผกผันกับแรงดันน้ำที่หัวฉีด ส่วนความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ชนิดคอคอดแปรผันตรงกับแรงดันน้ำที่หัวฉีด โดยความดันตกคร่อมสูงสุดของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ คือ 64 Pa และ 90 Pa ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ชนิดอีเจ็คเตอร์และชนิดคอคอด มีแนวโน้มแปรผันตามแรงดันน้ำฉีด มีประสิทธิภาพสูงสุด 46.7% และ 88.5% ตามลำดับ จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเป็ยกชนิดอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นต่ำ เนื่องจากพื้นที่สัมผัสของน้ำกับก๊าซน้อย ส่วนชนิดคอคอดเป็นอุปกรณ์ที่มีแรงดันตกคร่อมสูง เนื่องจากลำของสเปรย์น้ำไปขวางทิศทางการไหลของก๊าซ แต่ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงกว่า

คำหลัก: Ejector scrubber, Venturi scrubber, ความดันตกคร่อม, ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น

Abstract

This research is a comparison study on the particle collecting efficiency and pressure drop between the ejector scrubber and the venturi scrubber operated with the 200 kW_{th} downdraft gasification system. Both scrubber use water as scrubbing fluid and operate at their suitable pressure ranges. The multi stage centrifugal pump is employed to supply high pressure water at flow rate of 7-45 liter/min and the water temperature is controlled at 30 °C. The ejector scrubber and the venturi scrubber are tested in pressure range of 1-6 bar and 0.25-1.0 bar, respectively. Results show that the pressure drop across the ejector scrubber is reversed to the water pressure but the pressure drop across the venturi scrubber is directly proportional to the water pressure. The maximum pressure drop of both scrubber are 64 Pa and 90 Pa, respectively. The particle collecting efficiency of the ejector scrubber and the venturi scrubber are proportional to water pressure. The maximum efficiency of the ejector scrubber and the venturi scrubber are 46.7% and 88.5%, respectively. From this study, it can be concluded that the ejector

ETM-19

scrubber usually operated with lower pressure drop, and has lower efficiency of dust particle removal, because of fewer gas-water contact areas. The venturi scrubber has higher pressure drop than that of the ejector scrubber because of the water sprays are designed to obstruct the gas stream, but it gives a higher efficiency of dust particle removal.

Keywords: Ejector scrubber, Venturi scrubber, Pressure drop, Dust removal efficiency.

1. บทนำ

การดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบแก๊สซิฟิเคชันก่อนที่จะนำไปใช้งาน จำเป็นต้องดักจับสิ่งปนเปื้อนออกมาให้ได้มากที่สุด เพราะสิ่งปนเปื้อนในก๊าซเชื้อเพลิง (ปริมาณฝุ่นและน้ำมันดิน) ถ้ามีปริมาณมากเกินไปอาจทำให้อุปกรณ์ต่างๆในระบบและเครื่องยนต์ที่นำก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้งาน เกิดความเสียหายได้ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล จึงเป็นหัวใจสำคัญในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

อุปกรณ์ที่ใช้ทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมนำไปใช้งานในระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ การทำความสะอาดก๊าซชีวมวลแบบเปียก (Wet scrubber) ใช้หลักการทำงาน คือ การพ่นละอองน้ำในทิศทางเดียวกันกับกระแสก๊าซ ผ่านบริเวณคอคอด (Venturi) โดยอนุภาคและสิ่งเจือปนจะถูกดักจับด้วยน้ำ และไหลลงสู่ถังพักด้านล่าง ส่วนก๊าซที่ถูกทำความสะอาดแล้ว จะไหลออกไปทางด้านบน และจากงานวิจัยของ X. Gamisans *et al.* [1] ศึกษาการกำจัดก๊าซพิษโดยการ ใช้ Venturi scrubber 2 ชั้นคอน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ จะเกิดความสูญเสียความดันมากขึ้น แต่สามารถลดสารปนเปื้อนได้ดี Johnstone [2] ได้ออกแบบเครื่องดักอนุภาคและสิ่งเจือปนในก๊าซไอเสีย โดยใช้ Venturi scrubber โดยไอเสียถูกส่งเข้าไปโดยใช้ใบเวอร์ จึงเกิดการผสมระหว่างไอเสียกับละอองน้ำ และเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นผลต่อการผสมกันของก๊าซกับละอองน้ำ และมีเวลาสัมผัสกันมากขึ้น ในประเทศไทย บรรเทา และคณะ [3] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นในช่วงขนาดต่างๆ ซึ่งตัวแปรที่สนใจ คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในกระแสก๊าซ และอัตราส่วนน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซ พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคจะสูงขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและอัตราส่วนน้ำเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ในงานระบบแก๊สซิฟิเคชันนิยมนำเอาอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์และอุปกรณ์ดักฝุ่น

แบบเปียกชนิดคอคอด มาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการกำจัดฝุ่นและน้ำมันดิน แต่ยังไม่มีการทดสอบถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพและความดันตกคร่อม ของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาความดันตกคร่อมและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ (Ejector Scrubber) กับชนิดคอคอด (Venturi Scrubber)

2. ทฤษฎี

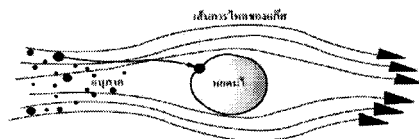
สครับเบอร์แบบเปียก (Wet scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดักจับอนุภาคฝุ่นละออง โดยใช้หยดน้ำหรือละอองน้ำเพื่อแยกอนุภาคฝุ่นออกจากกระแสก๊าซ โดยใช้ น้ำหรือของเหลว สามารถทำได้ 3 วิธี คือ 1) ให้น้ำเป็นละอองฝอยผ่านไปยังกระแสก๊าซ 2) ปล่อยให้กระแสก๊าซไหลผ่านฟิล์มของของเหลวหรือน้ำด้วยความเร็วสูง และ 3) ปล่อยให้กระแสก๊าซไหลผ่านแผ่นวัสดุที่มีของเหลวเคลือบที่ผิว เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียกนอกจากจะสามารถดักจับฝุ่นขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในกระแสก๊าซได้แล้ว ยังช่วยลดอุณหภูมิของก๊าซได้ด้วย

2.1 กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่นในเครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก

การดักจับอนุภาคฝุ่นภายในเครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก อาศัยกลไกต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคฝุ่น กระแสก๊าซและน้ำ ซึ่งได้แก่ การกระทบและการแพร่

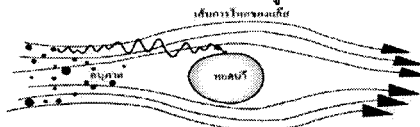
การดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้การกระทบกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับละอองน้ำ เกิดขึ้นเมื่อฉีดหยดน้ำผ่านไปกับกระแสก๊าซ จากความแรงของกระแสที่ดี ไปกระทบอนุภาคฝุ่น จะทำให้อนุภาคฝุ่นเบนออกจากกระแสก๊าซ และติดอยู่กับหยดน้ำ ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปกับกระแสก๊าซได้ ขนาดของแรงกระทบจะมีค่าแปรตามขนาดของอนุภาคฝุ่น โดยแรงกระทบจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออนุภาคฝุ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 1

ETM-19



รูปที่ 1 แรงกระทบที่กระทำกับอนุภาคฝุ่นและละอองน้ำ [4]

การดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้การแพร่ จะเกิดขึ้นในกรณีที่อนุภาคฝุ่นมีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 1 ไมครอน อนุภาคเหล่านี้จะเบาและชนกับโมเลกุลของก๊าซขณะเคลื่อนที่ในกระแสก๊าซ การชนกันจะทำให้อนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการแพร่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่นโดยการแพร่ [4]

2.2 ขั้นตอนการดักจับอนุภาคฝุ่นในเครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก [5]

การดักจับอนุภาคฝุ่นโดยใช้เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก มีขั้นตอนที่เกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การดักจับอนุภาคฝุ่น ขั้นตอนนี้ออนุภาคฝุ่นที่อยู่ในกระแสก๊าซจะถูกดักจับด้วยหยดน้ำหรือฟิล์มของของเหลว หรือแผ่นวัสดุที่มีของเหลวเคลือบผิว

ขั้นตอนที่ 2 การแยกหยดน้ำออกจากกระแสก๊าซ ขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องดักละอองน้ำที่ติดอยู่ด้านบนของเครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก เพื่อแยกหยดน้ำออกจากกระแสก๊าซ

ขั้นตอนที่ 3 การบำบัดของเหลวที่จับฝุ่น ขั้นตอนนี้ของเหลวที่มีฝุ่นปนเปื้อนจะปล่อยทิ้งลงในบ่อพัก ซึ่งจะต้องทำการบำบัดก่อนทิ้งลงท่อระบายน้ำทิ้ง

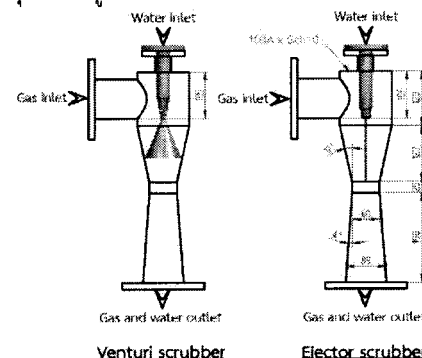
2.3 ประเภทของเครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก

อุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกที่นิยมนำไปใช้งานและให้ประสิทธิภาพสูงในการดักจับสิ่งปนเปื้อนที่มากับกระแสก๊าซในระบบแก๊สซิฟิเคชัน มี 2 แบบ ดังนี้

1. อุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด (Venturi scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการการทำงาน คือการสเปรย์น้ำฉีดให้เป็นละอองรูปทรงกรวย ในทิศทางเดียวกันกับ

กระแสก๊าซ ใช้แรงดันน้ำฉีดไม่สูง โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนของหัวฉีดน้ำ ทางเข้าของก๊าซ ห้องผสม และส่วนท่อเวนจูรี (Venturi tube)

2. อุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจกเตอร์ (Ejector scrubber) ใช้หลักการการทำงานเหมือนกันกับชนิดคอคอด ต่างกันที่ การสเปรย์น้ำฉีดเป็นลำ ใช้แรงดันน้ำฉีดสูงกว่าชนิดคอคอด ลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดและขนาดของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการสเปรย์น้ำฉีดและขนาดของอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดและชนิดอีเจกเตอร์

ทั้งนี้ อุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ จะมีช่วงความดันน้ำใช้งานต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ช่วงความดันน้ำฉีดของอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดและชนิดอีเจกเตอร์

Operating characteristics	Liquid-inlet pressure (P_L)
Venturi scrubber	7-100 kPa [6]
Ejector scrubber	100-830 kPa [6]

2.4 การคำนวณหาประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาคของอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียก

ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ของอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ หาได้จากสมการที่ 1

$$M_C = M_I - M_T \quad (1)$$

M_C = ปริมาณฝุ่นที่อุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียกสามารถดักจับได้ (mg)

ETM-19

M_i = มวลของอนุภาคทั้งหมดที่เข้าอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก (mg)

M_T = มวลของอนุภาคหลังออกอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก (mg)

ประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาค (Collecting efficiency) หมายถึง อัตราส่วนของอนุภาคที่สามารถดักเก็บไว้ได้ต่ออนุภาคทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาในระบบของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก โดยสามารถหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก ได้จากการคำนวณในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2 [7]

$$\eta_T = \frac{M_C}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ η_T = ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก

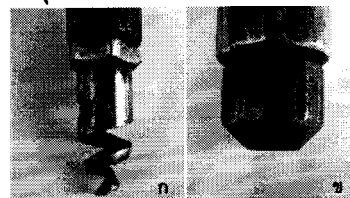
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอกคอตกับเตา Gasifier แบบ Double throat downdraft gasifier ขนาด 200 กิโลวัตต์ความร้อนทำการทดลองที่อัตราการไหลก๊าซ 6.21 ลูกบาศก์เมตร ต่อ นาที อัตราการไหลน้ำช่วง 7-45 ลิตรต่อนาที โดยใช้ ปั๊มน้ำแบบ Multi stage centrifugal pump และทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส จากช่วงความดันน้ำฉีดที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบในตารางที่ 1 อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ จะทำการทดลองในช่วงความดันของน้ำฉีดที่เหมาะสมกับหลักการออกแบบอุปกรณ์ดักฝุ่น ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองช่วงความดันของน้ำฉีด

ลำดับที่	ชนิดคอกคอต (bar)	ชนิดอีเจ็คเตอร์ (bar)
1	0.25	1.00
2	0.50	2.00
3	0.75	3.00
4	1.00	4.00
5	-	5.00
6	-	6.00

ลักษณะของหัวฉีดทั้ง 2 แบบ ดังรูปที่ 4 ส่วนขนาดและวัสดุของหัวสเปรย์น้ำฉีดที่ใช้ในการทดลองของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ ดังตารางที่ 3

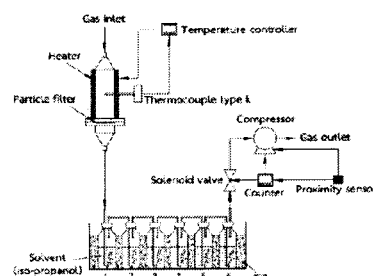


รูปที่ 4 ลักษณะของหัวฉีดทั้ง 2 แบบ (ก) หัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอกคอต (ข) หัวฉีดสำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์

ตารางที่ 3 ขนาดและวัสดุของหัวสเปรย์น้ำฉีด

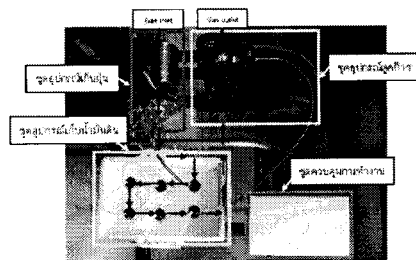
ชนิดคอกคอต		ชนิดอีเจ็คเตอร์	
มุมฉีด	120°	มุมฉีด	0°
Office size	9.5 มม.	φ หัวฉีด	3 มม.
φ Nozzle	4.8 มม.	วัสดุ	Brass (JIS)
วัสดุ	SUS304.		H3250 C3604

วิธีเก็บฝุ่นและการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อหาค่าปริมาณฝุ่น จะดำเนินการตามวิธีการตรวจวัดมาตรฐาน US.EPA Method 5 [8] จะแบ่งชุดอุปกรณ์ออกเป็น 4 ส่วน คือ ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำมันดิน (tar) ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน และชุดอุปกรณ์ดูก๊าซ ดังรูปที่ 5-7

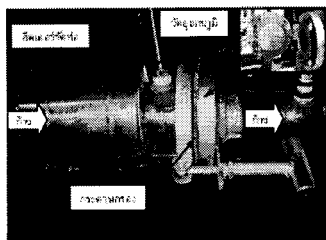


รูปที่ 5 ผังชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น

ETM-19



รูปที่ 6 ภาพด้านบนชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น



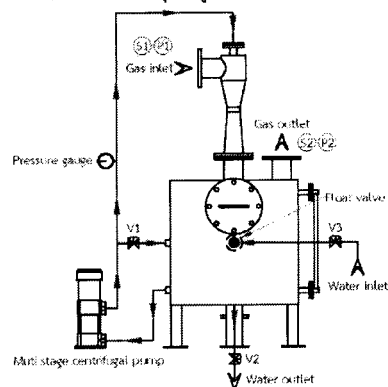
รูปที่ 7 ชุดอุปกรณ์และส่วนติดตั้งกระดาดกรอง

3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพการดักฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด

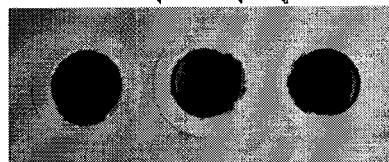
ในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของแก๊สให้คงที่ที่ 6.21 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยใช้ Inverter ปรับรอบของพัดลมดูดแก๊ส โดยรายละเอียดของการดำเนินการทดลอง 2 อุปกรณ์ มีดังนี้ จากรูปที่ 8 แก๊สจะถูกดูดผ่านอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ ด้วยพัดลมดูดแก๊ส และทำการจ่ายน้ำเพื่อสเปรย์น้ำในทิศทางเดียวกันกับกระแสแก๊ส ผ่านบริเวณคอคอด โดยอนุภาคฝุ่นที่ถูกดักจับด้วยน้ำจะไหลลงสู่ถังพักด้านล่าง ซึ่งทำหน้าที่ในการแยกแก๊สและของเหลว (Gas liquid separator) แก๊สที่ถูกทำความสะอาดแล้วจะไหลออกไปทางด้านบน วิธีการปรับแรงดันของน้ำฉีดในการทดลอง จะเปิดวาล์วปล่อยน้ำ (V1) ผ่านทางท่อ Bypass เข้าสู่ถังพักเพื่อลดแรงดันน้ำฉีด และเปิดวาล์วน้ำทิ้ง (V2) ด้านล่างของถังในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น

จนเกินค่าที่กำหนด และน้ำเต็มจะถูกเติมเข้ามาทางวาล์วลูกลอย (V3) เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำ



รูปที่ 8 ผังชุดอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียก

ค่าปริมาณฝุ่นก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น จะเก็บตัวอย่างปริมาณฝุ่นก่อนเข้าอุปกรณ์ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นก่อนเข้าอุปกรณ์ โดยปริมาณฝุ่นที่วัดได้ก่อนเข้าอุปกรณ์ คือ 80.4 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างปริมาณฝุ่นหลังเข้าอุปกรณ์ของแต่ละการทดลอง แล้วนำปริมาณฝุ่นที่ติดบนกระดาดกรองขนาดความละเอียด 3 ไมครอน ไปอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นและนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณฝุ่นที่อุปกรณ์ดักฝุ่นสามารถดักจับได้ตั้งสมการที่ 1 ตัวอย่างกระดาดกรองก่อนเข้าอุปกรณ์ดักฝุ่น ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างกระดาดกรองก่อนเข้าอุปกรณ์

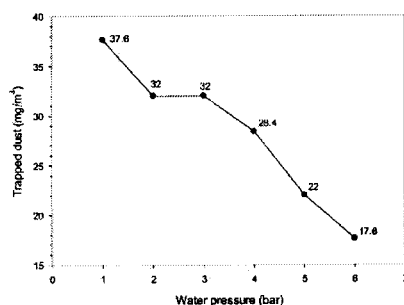
ส่วนการหาค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ จะใช้อุปกรณ์วัด Digital micro manometer (Airflow-PVM100) โดยวัดค่าความดันก่อนเข้า (P1) และหลังเข้าอุปกรณ์ (P2) ของแต่ละการทดลอง

ETM-19

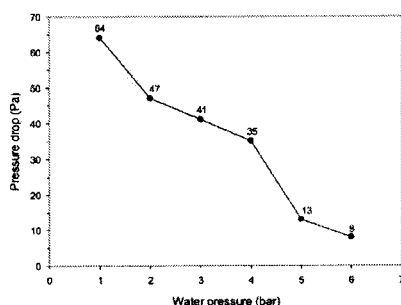
4. ผลการทดลอง

4.1 ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้และความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด ดังรูปที่ 10 เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำฉีด ทำให้น้ำฉีดมีความเร็วมากขึ้น ส่งผลให้การสัมผัสกันของน้ำกับก๊าซเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้การดักจับฝุ่นได้น้อย และค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด ซึ่งมาจาก เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำฉีดมากขึ้น ทำให้โมเมนตัมของลำน้ำฉีดสูงขึ้น และสามารถเหนี่ยวนำกระแสก๊าซได้มากขึ้น ดังรูปที่ 11



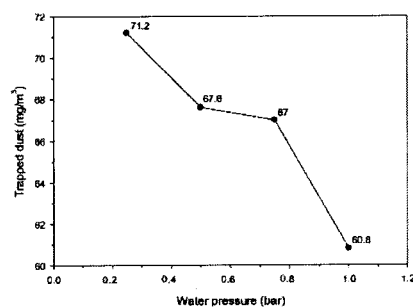
รูปที่ 10 ปริมาณฝุ่นที่ถูกดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ



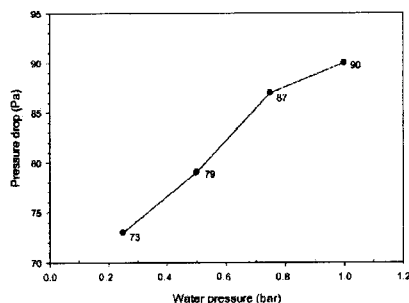
รูปที่ 11 ความดันตกคร่อมเมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์ที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ

4.2 ปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้และความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณฝุ่นที่ดักจับได้ มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด ดังรูปที่ 12 เนื่องจากการสเปรย์น้ำฉีดที่แรงดันสูงขึ้น ทำให้น้ำฉีดมีความเร็วมากขึ้น ส่งผลให้การสัมผัสกันของน้ำกับก๊าซเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ดักจับฝุ่นได้น้อย ส่วนความดันตกคร่อมของอุปกรณ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด เนื่องจากการสเปรย์น้ำฉีดเป็นรูปทรงกรวยไปขวางทิศทางการไหลของก๊าซ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 ปริมาณฝุ่นที่ถูกดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ

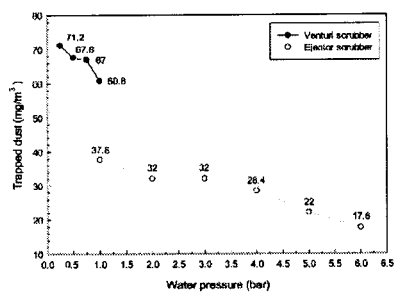


รูปที่ 13 ความดันตกคร่อมเมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอดที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ

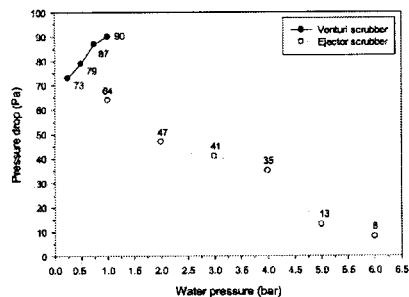
ETM-19

4.3 เปรียบเทียบอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด

เมื่อเปรียบเทียบการดักจับฝุ่นและความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 2 แบบ พบว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์ดักจับฝุ่นได้น้อยกว่าชนิดคอคอด ดังรูปที่ 14 เนื่องจากสเปรย์น้ำของอีเจ็คเตอร์มีลักษณะเป็นลำน้ำฉีดที่มีความเร็ว ทำให้การสัมผัสกันของน้ำกับก๊าซเกิดขึ้นได้น้อย จึงดักจับฝุ่นได้น้อยกว่าชนิดคอคอด ส่วนความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์มีความดันตกคร่อมลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด เนื่องจากลำน้ำฉีดมีความเร็วสูง สามารถเหนี่ยวลากกระแสก๊าซได้มากขึ้น แต่อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดคอคอดมีความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด ดังรูปที่ 15 เนื่องจากการสเปรย์น้ำฉีดเป็นรูปทรงกรวย ไปขวางทิศทางการไหลของก๊าซ

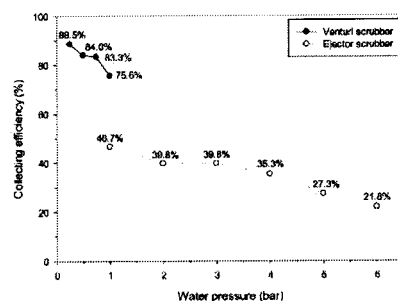


รูปที่ 14 ปริมาณฝุ่นที่ถูกดักจับได้เมื่อผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอดที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ



รูปที่ 15 ความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอดที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ

และจากข้อมูลการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นที่ได้สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพรวมและเพื่อนำมาเปรียบเทียบจะได้ผล ดังรูปที่ 16 โดยใช้สมการ 2



รูปที่ 16 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอดที่แรงดันน้ำฉีดต่างๆ

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ แปรผกผันกับแรงดันของน้ำฉีด โดยชนิดอีเจ็คเตอร์ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 46.7% ที่ความดันน้ำฉีด 1 bar ส่วนชนิดคอคอดมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 88.5% ที่ความดันน้ำฉีด 0.25 bar ส่วนความดันตกคร่อมของชนิดอีเจ็คเตอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด โดยมีค่าต่ำสุด 8 Pa ส่วนชนิดคอคอด มีความดัน

ETM-19

ตุ๊กตร้อมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันของน้ำฉีด และมีค่าต่ำสุด 73 Pa

จากผลการทดลองที่ได้ สรุปได้ว่า อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความดันตกคร่อมต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นต่ำ เนื่องจากพื้นที่สัมผัสของน้ำกับก๊าซน้อย ส่วนชนิดคอคอดเป็นอุปกรณ์ที่มีแรงดันตกคร่อมสูง เนื่องจากส่ายของสเปร์ยน้ำไปทางทิศทางการไหลของก๊าซ แต่ให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูง โดยประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของอุปกรณ์ชนิดคอคอด มีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยที่ผ่านมา สิ่งที่แตกต่างกันจากงานวิจัยอื่นจากการทดลองที่ได้ คือ การเพิ่มอัตราส่วนน้ำในอุปกรณ์ที่มากขึ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น แต่การสเปร์ยน้ำฉีดให้เป็นละออง จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นที่สูงกว่า

ในส่วนของงานวิจัยที่ควรจะทำต่อไปในอนาคต ควรศึกษาในเรื่องของพลังงานที่ใช้ไปของอุปกรณ์ดักฝุ่นทั้ง 2 แบบ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบในด้านการลงทุน ความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบแก๊สซีพีเคชั่น นำข้อดีของอุปกรณ์ทั้ง 2 แบบ มาปรับในการออกแบบใหม่ ให้มีประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นสูง แต่ยังคงมีความดันสูญเสียต่ำ และควรศึกษาอิทธิพลของรูปแบบลำพุ่งของน้ำที่ใช้สเปร์ย รวมทั้งระยะติดตั้งและขนาด Area ratio ที่เหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัย

ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นที่ปรึกษาในการทำงานวิจัย และศูนย์ทดลองวิชาการพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน จังหวัดปทุมธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ รวมทั้งสถานที่สำหรับทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] X. Gamisans, M. Sarra and F. Javier. (2002). Gas pollutants removal in a single- and two-stage ejector

venture scrubber. Journal of Hazardous Materials B90 (2002) 251-266

[2] Johnstone. (1949) Adjustable-throat venture scrubber with plunger.

[3] บันเทิง เจาะปาด, และ ชินวัชร เวียงพงษ์, (2547). การหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นในช่วงขนาดต่างๆ ของเครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียกชนิดคอคอด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (2547)

[4] Joshep, G.T., and Beachler, D.S. (1998). Scrubber Systems Operation Review: Self Instruction Manual ATPI Course SI 412C. North Carolina State University.

[5] วรณัฐ แจ้งสว่าง, (2556). เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล. โรงพิมพ์ บริษัทแดเน็กซ์ อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1 (2556) 116

[6] Books, L., Liquid-Phase and Gas-Phase Contacting Scrubbers: Cyclonic Spray Scrubber, Mechanically Aided Scrubber, Baffle Spray Scrubber 2010: General Books LLC.

[7] JIS B 9910 (1977) . Method of Measuring Performance for Dust Collector, Japanese Standard Association

[8] US. EPA method 5 (Total Suspended Particulate). Determination of Particulate Emissions From Stationary Sources 371-442

ภาคผนวก ข
แบบอุปกรณ์ดักฝุ่น

[illegible]

[illegible]

ภาคผนวก ค
แบบหัวฉีดอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอีเจ็คเตอร์

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายอิทธิพล กุลวงศ์
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2550 - 2552 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีเครื่องกล)
ประวัติการวิจัย	ทุนสนับสนุนงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2552 – 2554 ตำแหน่งวิศวกร บริษัท อินโนแวลูส์ พร๊อซัน (ประเทศไทย) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมไฮเทค ตำบลบ้านเลน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พ.ศ. 2554 – 2555 ตำแหน่งเจ้าหน้าที่ด้านข้อมูล บริษัท ไอ.เอ็น.เอ็น. เรดิโอ จำกัด อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน วิศวกรโครงการ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ตำแหน่ง	วิศวกรโครงการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

