

การดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลสำหรับการลดการปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อม

SMOKE CAPTURE USING MICRO-NANO BUBBLE TECHNOLOGY FOR REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION

ไพทูน เหล่าดี¹ นำพร ปัญญาใหญ่² ศรีธร อุปคำ¹ และธนวรรธน์ วัชรดำรงศักดิ์^{1*}

Paitoon Laodee¹ Numpron Panyoyai² Srithorn Upakam¹ and Thanawat Watcharadumrongsak^{1*}

^{1*} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

^{2*} คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

*Corresponding author E-mail: thanawatwatcharadumrongsak@gmail.com

Received: May 31, 2026, 2026 Revised: June 23, 2026 Accepted: June 23, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน โดยใช้ควันไฟจากการเผาไหม้เปลือกมะพร้าว แล้วใช้พัดลมดูดควันไปในอุโมงค์ที่ติดตั้งหัวฉีดแรงดันสูง สารทำงานที่ใช้เป็น ฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโนร่วมกับโอโซน ผลการศึกษาพบว่า การใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO₂ ในควันไฟเมื่อเพิ่มความดันของการฉีดที่ 10-50 bar มีผลทำให้ CO₂ ในควันไฟที่ผ่านการบำบัดมีความลดลงเมื่อเทียบกับ ควันไฟที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดคิดเป็นค่าเฉลี่ย 81.76% ที่ความดัน 10 bar และ 84.58% ที่ความดัน 50 bar ผลของการลดลง ของ CO₂ ยังสอดคล้องกับการลดลงของ NO และ CO คิดเป็นค่าเฉลี่ย 45.43% ที่ความดัน 10 bar และ 62.50% ที่ความดัน 50 bar และ 57.27% ที่ความดัน 10 bar และ 72.60% ที่ความดัน 50 bar ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + Ozone ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + โอโซน มีความสามารถในการดูดซับและกำจัด มลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดการปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล นอกจากนี้ สารทำงานดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

คำสำคัญ: ฟองอากาศขนาดไมโคร-นาโน โอโซน การเผาไหม้ชีวมวล หัวฉีดแรงดันสูง มลพิษทางอากาศ

Abstract

This research aims to investigate the smoke-trapping behavior of micro-nano bubble (MNB) technology combined with ozone. In the experiment, smoke generated from coconut shell combustion was drawn by a suction fan into a tunnel equipped with high-pressure nozzles. The working fluid utilized was a mixture of MNBs and ozone. The results indicated that the MNBs + ozone treatment significantly influenced CO₂ capture in the smoke. When the injection pressure was increased from 10 to 50 bar, the treated smoke showed a substantial reduction in CO₂ compared to the untreated smoke, with an average reduction of 81.76% at 10 bar and 84.58% at 50 bar. Furthermore, the decrease in CO₂ correlated with reductions in both NO and CO, which decreased by an average of 45.43% at 10 bar and 62.50% at 50 bar for NO, and 57.27% at 10 bar and 72.60% at 50 bar for CO. These

findings demonstrate that the MNBs + ozone working fluid effectively absorbs and eliminates pollutants, thereby reducing emissions from biomass combustion. Additionally, this working fluid is environmentally friendly and holds strong potential for application in air pollution control systems.

Keywords: Micro-Nano Bubbles (MNBs), Ozone, Biomass Combustion, High-Pressure Nozzle, Air Pollution

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานส่งผลต่อการเกิดมลพิษทางอากาศจากกระบวนการเผาไหม้เครื่องยนต์สันดาปภายในและกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของโรงงานอุตสาหกรรม Panich Intra (2019) กล่าวว่าแหล่งที่มาของ PM 2.5 ได้แก่วัสดุเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม ยังรวมถึงควันที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการหุงต้มอาหาร แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide หรือ SO_2 แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ NO_x และสารอินทรีย์เคมีระเหย (Volatile organic chemicals หรือ VOC) จะเป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดอนุภาคละเอียดได้ ค่ามาตรฐานคุณภาพของอากาศ (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) ที่ยอมรับได้ในสากลโดยมวลอนุภาคเฉลี่ย 24 hr จะต้องน้อยกว่า 35 และ $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และรายปีจะต้องน้อยกว่า 15 และ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2.5 และ $10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ [1] การปล่อย CO_2 อันเนื่องมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งคิดเป็นประมาณ 37% ของการใช้พลังงานหลักทั่วโลก [2] [3] การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (CCS) ถูกมองอย่างกว้างขวางว่าเป็นเทคโนโลยีที่จริงจังในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ CCS เป็นตัวเลือกทางเทคนิคสำหรับวิธีการดักจับ CO_2 ขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะตัวเลือกทางเทคนิค สำหรับการดักจับ CO_2 เช่น การดูดซับการแช่แข็งเมมเบรนและระบบจุลินทรีย์/สาหร่าย [4] อย่างไรก็ตาม ในแง่ของวิธีการมีข้อเสียและข้อจำกัด เช่น การดูดซับการดักจับ CO_2 ทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นน้อยมาก และมีความพุนสูงและมีความเป็นผลึกสูงมาก แต่มีข้อจำกัดประสิทธิภาพในแง่ของ energy นั้นน้อยมาก [5] [6] [7] [8] [9] การดักจับ CO_2 ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนแสดงความหนาแน่นของการบรรจุและประสิทธิภาพของการแยกโดยทั่วไปสูงมาก เนื่องจากความต้องการในการติดตั้งขนาดเล็กของกระบวนการในทางกลับกันมันมีความเข้มข้นมากในแง่ของพลังงานเนื่องจากกระบวนการระบายความร้อนของเชื้อเพลิงร้อนเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญมาก [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] รวมถึงค่าบำรุงรักษาและการดำเนินงาน

ไมโครบับเบิลและนาโนบับเบิล (MNBs) เป็นฟองอากาศอนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-50 μm และ $<200 \text{ nm}$ ตามลำดับ [12] [13] เทคโนโลยีไมโครบับเบิลและนาโน บับเบิลได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขาของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น การบำบัดน้ำเสีย ทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ และวัสดุนาโน [12] เนื่องจากข้อดีบางประการของความสามารถ ในการออกซิเดชันสูงประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสูง อัตราการใช้เอนจินต์ในการบำบัดสารมลพิษเทคโนโลยี ไมโครนาโนบับเบิล (MNBT) จึงค่อยๆ ดึงดูดความสนใจและประสบความสำเร็จในการควบคุมมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [13]

จากที่กล่าวมาปัญหาเรื่องฝุ่น PM2.5 และมลพิษอากาศเป็นปัญหาสำคัญที่นักวิจัยให้ความสนใจศึกษาหาแนวทางแก้ปัญหา ประกอบกับเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลเป็นฟองอากาศอนุภาคขนาดเล็กมีคุณสมบัติสำหรับการประยุกต์ใช้งานหลายด้าน อย่างไรก็ตามช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ยังไม่พบว่า มีการประยุกต์ใช้สำหรับดักจับควันไฟหรือมลพิษทางอากาศ ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่มาของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน โดยการออกแบบอุปกรณ์ทำหน้าที่ดักจับควันไฟ ด้วยการเผาไหม้เปลือกมะพร้าวเป็นแหล่งมลพิษ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือวัด

คุณสมบัติของอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับการทดสอบ บันทึกผลข้อมูลแสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเครื่องมือวัด

รายการ	คุณสมบัติเฉพาะ
เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer)	ยี่ห้อ Multi-gas detecting alarm (product number: M2101001) ย่านการวัด: NO (0–250 ppm), CO ₂ (0.00–5.00 % vol), SO ₂ (0–20 ppm) CO (0–1000 ppm)
เครื่องกำเนิดฟองไมโครนาโน (Micro-Nano bubble generator)	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ AC-input 220V/50Hz ใช้พลังงานไฟฟ้า 1.65 kW การใช้น้ำ ธรรมดาในการเปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นฟองขนาดเล็กไมโครนาโนหรือหยดน้ำขนาดเล็ก หลักการ ทำงานของเครื่องสร้างฟองขนาดเล็กหรือไมโครนาโน คือ การนำก๊าซไนโตรเจนมาผสมกับ น้ำธรรมดา สัดส่วนอัตราการผลิต 30 liters ของก๊าซไฮโดรเจน ถึง 500 liters การ เปลี่ยนแปลงของน้ำส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำลดลงจาก 7.8 mg/L เหลือ 0.2 mg/L
เครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone system)	เครื่องฟอกอากาศโอโซนท่อโอโซน หลอดโอโซน รุ่น 10G/3G 220V ปริมาณการส่งออกของโอโซน: 10,000 mg/h แรงดันไฟฟ้า: 220V/50Hz กำลังไฟฟ้า: 90 W ปริมาณก๊าซออก: 10 L ความเข้มข้นของการส่งออก: 80 mg/L ความดันออก: 3,500 V ขนาดท่อโอโซน: 260 x 67 x 46 มม. ขนาด: ท่อโอโซนขนาด: 260 x 67 x 46 มม ขนาดแหล่งจ่ายไฟ: 150 x 56 x 40 มม รุ่น 3G เหมาะที่เข้ากับพื้นที่ไม่เกิน 50 ลูกบาศก์ รุ่น 10G เหมาะที่เข้ากับพื้นที่ไม่เกิน 100 ลูกบาศก์
เครื่องวัดความเร็วลม (Mini Anemometer)	UNI-T, Model: UT363 Rang measure: 0 – 30 m/s (as standard) Accuracy: (5% rad + 0.5)
เครื่องบันทึกข้อมูล อัตโนมัติ (Data logger)	GRAPHTEC Model: GL820, Input: 20 channels Sampling interval: 10ms/1ch Max.10/20/50/100/200/250/500 ms/1/2/5/10/20/30 sec Clock accuracy: $\pm 0.002\%$ Power supply: AC adapter (100 to 240 VAC, 50 to 60 Hz) DC input (8.5 to 24 VDC (26.4 V max.) Battery pack (7.4 VDC (2200 mAh)
สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple cable)	Thermocouple, Model: IES system, Type: K Temperature range 293 – 1260 °C $\pm 0.75\%$
ปั๊มแรงดัน (Pressure pump)	Model: TOMITSU Power sprayer: Revolution: 800 – 1000 rpm, Discharge: 16.5 – 20.5 L/min, Pressure: 14.71 – 34.32 bar, Irrigation: Revolution: 1200 - 1400 rpm, Discharge: 23 - 29 L/min, Pressure: 9.81 – 14.71 bar

รายการ	คุณสมบัติเฉพาะ
หัวฉีด (Nozzle)	หัวฉีดพ่นละอองน้ำแรงดันสูงขนาด 0.1 mm พร้อมตัวกรอง สำหรับใช้ในเวิร์คช็อปเกี่ยวกับการเพิ่มความชื้นด้วยหมอกเทียม
เครื่องเป่าลม (Air-blower)	Power: 19.2 W, Rotational speed: 3300 rpm Airflow: 345 CFM, Air Pressure: 142 Pa

2.2 กำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

ตัวแปรคงที่ (Constant variable) ได้แก่ ควันไฟ (Smoke) องค์ประกอบทางเคมีที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ประกอบด้วย CO_2 (%vol), NO(ppm) และ CO(ppm) แหล่งมลพิษกำหนดสถานการณ์โดยการจำลองควันไฟ (Smoke) ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel) โดยเลือกใช้เศษวัสดุทางการเกษตร คือ มะพร้าว (Coconut) แต่ใช้เฉพาะส่วนของเปลือกผลชั้นกลาง (Mesocarp: fleshy middle layer) หรือที่นิยมเรียกว่า กากมะพร้าว (Coconut meal/Residue) คุณสมบัติทางเคมี Proximate analyses ด้วยวิธีการ the Association of Official Analytical Chemists (AOAC) พบว่ากากมะพร้าวองค์ประกอบดังนี้ lignin $44.68 \pm 2.3\%$, cellulose $42.46 \pm 2.1\%$, moisture $9.57 \pm 0.40\%$, ash $1.71 \pm 0.05\%$, crude protein $1.12 \pm 0.03\%$ และ crude fat $0.56 \pm 0.05\%$ [14] แสดงรายละเอียดเงื่อนไขตามตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาสารทำงาน (Working fluids) ที่ใช้คือ Micro/Nano-bubble + Ozone (MNBs + Ozone) เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล คือ เครื่องผลิตฟองน้ำอนุภาคนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระดับไมโครหรือ 10 – 50 μm (ไมโครเมตร) และเส้นผ่านศูนย์กลางฟองนาโน น้อยกว่า 200 นาโนเมตร [12] มีองค์ประกอบทางเคมี $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_3$ คุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ขนาดของฟองน้ำที่เล็กมากอนุภาคนาโนไมโคร/นาโน จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (Surface area) และมีความพรุนสูง (High porosity)

ตัวแปรอิสระ (Variable) ได้แก่ ความดันของการฉีด (Injection pressure) กำหนดไว้ช่วง 10 – 50 bar ตัวแปรคือ $P_1 - P_5$ โดยปรับค่าความดันแตกต่างกัน $\Delta P = 10$ bar ความดันที่เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณของการฉีด MNBs + Ozone เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปั๊มแรงดันสูงสุด 70 bar ผู้วิจัยจึงกำหนดความดันสูงสุดเพียง 50 bar

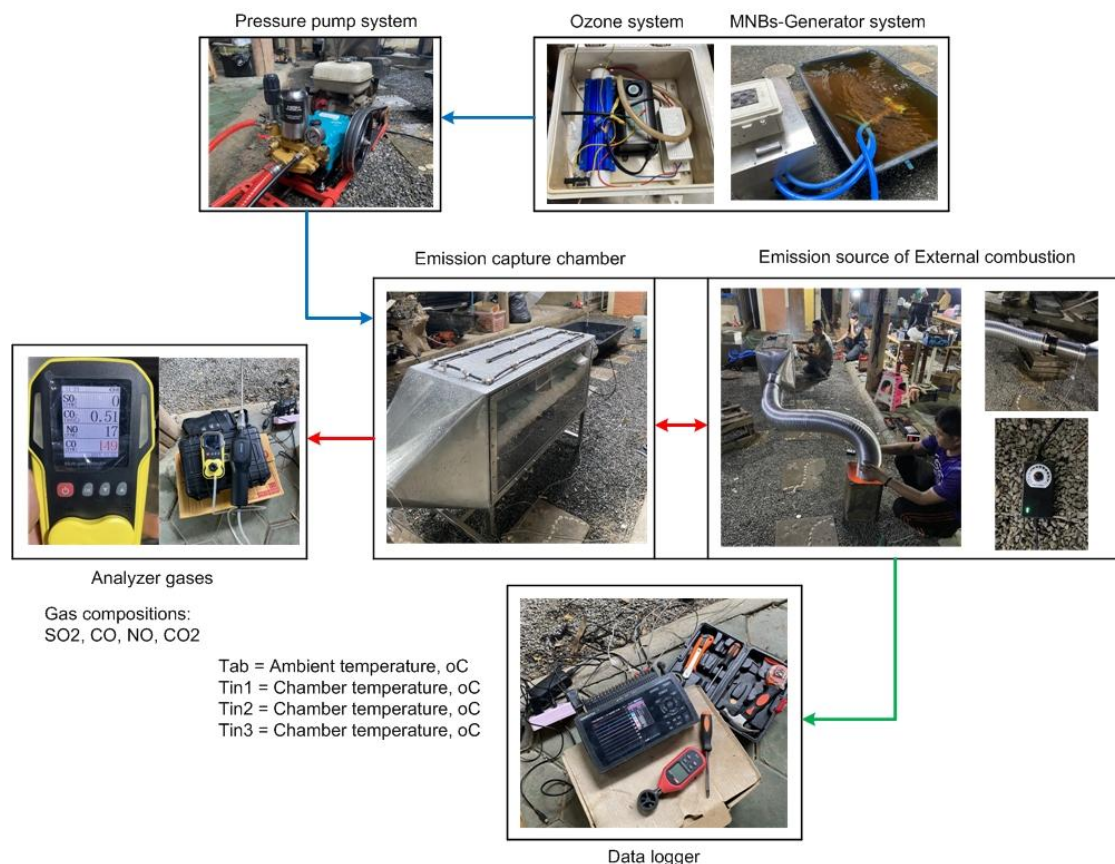
ความเร็วลม (Wind speed) เป็นผลจากการวัดอัตราเร็วของเครื่องเป่าลมโดยแบ่งเป็น 3 ระดับคือ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s, V_{min} : 4.54 m/s; $\dot{m}_{E2}$: 0.094340 kg/s, V_{max} : 5.42 m/s; $\dot{m}_{E3}$: 0.112626 kg/s ความเร็วลมเพิ่มแปรผันตรงกับอัตราการไหลอากาศเชิงมวลเพิ่มขึ้น ทำความเร็วลมระดับ V_{min} มีความแตกต่างกับ V_{low} และ V_{max} เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกำหนดความเร็วลมสำหรับทดลองเพียง V_{low} และ V_{max} เท่านั้น

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดสอบ

ตัวแปร	เงื่อนไขการทดสอบ
ตัวแปรคงที่ (Constants variable)	ควันไฟ (Smoke) มีองค์ประกอบ CO_2 (%vol), NO(ppm) และ CO(ppm) สารทำงาน (Working fluids) คือ Micro/Nano-bubble + Ozone
	Pressure pump: 10 – 50 bar
ตัวแปรอิสระ (Variables)	$P_1 - P_5$: 10 – 50 bars $\Delta P = 10$ bar
	Wind speed/Air mass flow rate
	V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s, CO_2 :1.59(%vol), NO:7.33(ppm), CO:344.00(ppm) V_{max} : 5.42 m/s; $\dot{m}_{E3}$: 0.112626 kg/s, CO_2 :1.67(%vol), NO:8.00(ppm), CO: 364.00(ppm)

2.3 อุปกรณ์เครื่องมือ

อุปกรณ์ประกอบแบบออกเป็น 5 ส่วนหลักประกอบด้วย ส่วนแรก แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้ภายนอก (Emission source of External combustion) ส่วนที่สอง อุโมงค์ดักจับมลพิษ (Emission capture chamber) ส่วนที่สาม ระบบไมโคร/นาโนบับเบิล + โอโซน (Micro/nano-bubble generator system + Ozone system) ส่วนที่สี่ ระบบปั๊มแรงดัน (Pressure pump system) และส่วนสุดท้าย เครื่องมือตรวจวัด ได้แก่ Analyzer gases, Data logger, Wind speed แสดงรายละเอียดตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังส่วนประกอบในการเผาไหม้ภายนอกกับระบบไมโคร/นาโนบับเบิล

2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

หากพิจารณาปฏิกิริยาระหว่างก๊าซมลพิษกับโอโซนในน้ำ $H_2O + O_3$ ซึ่งมักเกิดผ่านกลไกออกซิเดชันและการสร้างอนุมูลอิสระ ($\bullet OH$) ในระบบ Micro/Nano Bubble + Ozone สามารถเขียนสมการโดยรวมที่ดุลแล้วได้ดังนี้



คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะออกซิเดชันสูงสุดของคาร์บอน (+4) แล้ว จึงไม่ถูกออกซิไดซ์ต่อโดยโอโซนได้อย่างมีนัยสำคัญ

คาร์บอนไดออกไซด์ CO_2



หรืออาจเกิดเพียงการละลายน้ำ



คาร์บอนมอนอกไซด์ CO



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ CO ให้เป็น CO_2 ได้



หากต้องการแสดง H_2O เป็นสารในระบบ สามารถเขียนได้เป็น



ไนโตรเจนออกไซด์ Nox



โอโซนออกซิไดซ์ NO เป็น NO_2 ได้อย่างรวดเร็ว



เมื่อมีน้ำอยู่ NO_2 สามารถเกิดกรดไนตริกได้ โดยสมการรวมที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือ



กล่าวโดยสรุปคุณสมบัติของ Micro/Nano Bubble + Ozone ทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ มีอิทธิพลต่อสมการรวมที่เหมาะสมดังนี้

CO_2 ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สำคัญกับ O_3

CO $CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$

NO $2NO + 3O_3 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + 3O_2$

สำหรับกลไกการกำจัดมลพิษในงานวิจัยโอโซนในน้ำสามารถสลายตัวให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์หลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด CO และ NO ในระบบไมโครนาโนบับเบิลได้

2.5 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนที่หนึ่ง การจุดเชื้อเพลิงชีวมวลใช้กากมะพร้าวแห้ง 1.5 kg สำหรับการเผาไหม้สำหรับผลิตมลพิษไอเสียใช้พัดลมดูดอากาศด้วยความเร็วสามระดับ ได้แก่ Low คือ 3.32 m/s Min คือ 4.54 m/s และ Max คือ 5.42 m/s แต่การทดสอบเลือกใช้ค่าความเร็วลมเพียง 2 ระดับเท่านั้น ได้แก่ Low และ Max เนื่องจากต้องการให้ค่าความเร็วแตกต่างกัน พร้อมทั้งทำการวัดผลและบันทึกค่าองค์ประกอบของควันไฟ ได้แก่ CO_2 NO และ CO บันทึก 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนที่สอง การฉีดสารทำงาน (Working fluids) เลือกใช้น้ำที่ผ่านเครื่องกำเนิดฟองอนุภาคขนาดไมโครนาโนร่วมกับระบบโอโซน (Micro/Nano bubble plus Ozone system, MNBs+Ozone) เท่านั้น โดยปรับค่าแรงดันการการฉีด (Injection pressures) ที่ความดัน 10 – 50 bar โดยเพิ่มทีละ 10 bar

ขั้นตอนที่สาม การวัดผลประกอบไปด้วย ค่ามลพิษไอเสีย (Emission gas) ทำการวัดค่ามลพิษไอเสียก่อนก่อนเข้าอุโมงค์ดักจับมลพิษ คือ วัดจากปลายท่อไอสูดอากาศ/ควันไฟผ่านการดูดด้วยพัดลมดูดอากาศ และวัดค่ามลพิษไอเสียหลังจากผ่านอุโมงค์ดักจับมลพิษด้วยสารทำงานประเภทต่างๆ ค่าอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ

2.6 การประเมินประสิทธิภาพ

การคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับมลพิษ (Collection Efficiency) คือ การคำนวณหาอัตราส่วนของปริมาณมลพิษที่ระบบดักจับได้เทียบกับปริมาณมลพิษทั้งหมดที่ปล่อยออกมา ตามความสัมพันธ์ของสมการพื้นฐาน (10)

$$\eta = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \quad (10)$$

กำหนดให้ η คือ ประสิทธิภาพการดักจับมลพิษ (%)

C_{in} คือ ความเข้มข้นของมลพิษก่อนเข้าสู่ระบบดักจับ

C_{out} คือ ความเข้มข้นของมลพิษหลังเข้าสู่ระบบดักจับ

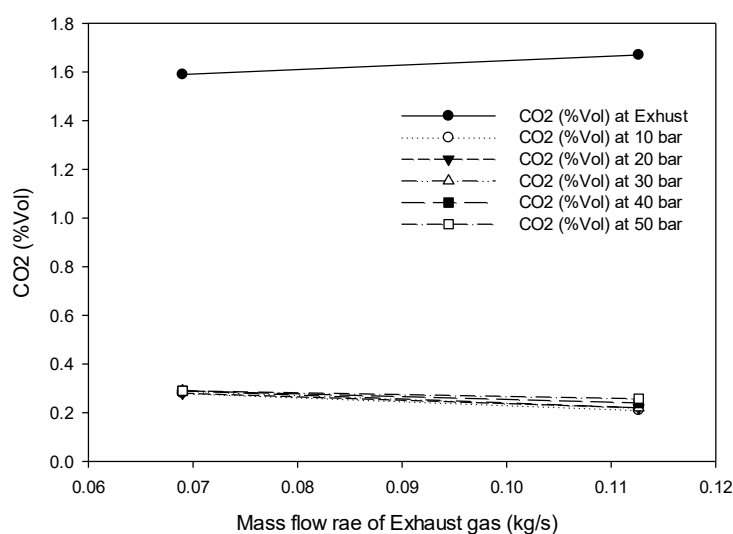
3. ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ CO₂

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO₂ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า CO₂ ของ Exhaust gas เท่ากับ 1.59(%vol) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO₂ ที่ผ่านการบำบัดลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ระดับความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 1.31(%vol) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 81.76% ของการลดลง

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า CO₂ ของ Exhaust gas เท่ากับ 1.67(%vol) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO₂ ที่ผ่านการบำบัดลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ระดับความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 1.46(%vol) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.58% ของการลดลงแสดงตามรูปที่ 2



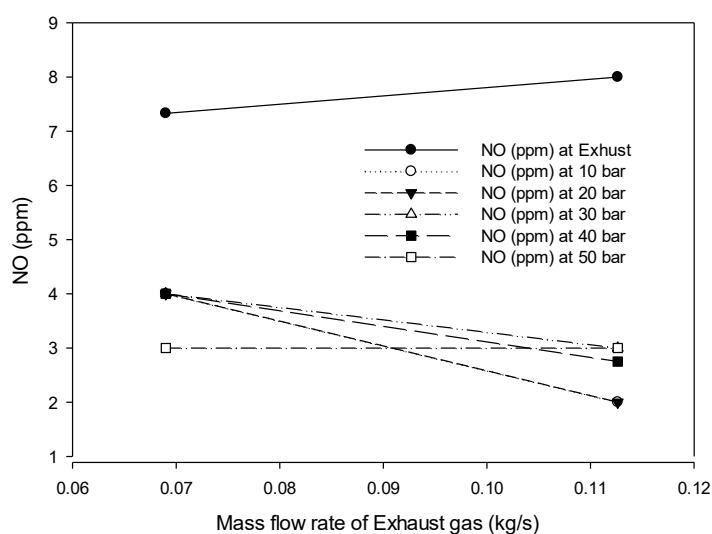
รูปที่ 2 อิทธิพล MNBs + Ozone ต่อ CO₂

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ NO

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ NO สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า NO ของ Exhaust gas เท่ากับ 7.33(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า NO ที่ผ่านการบำบัดมีต่ำกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 3.33(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 45.43%

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า NO ของ Exhaust gas เท่ากับ 8.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า NO ลดต่ำกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 6.00(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 62.50% แสดงตามรูปที่ 3



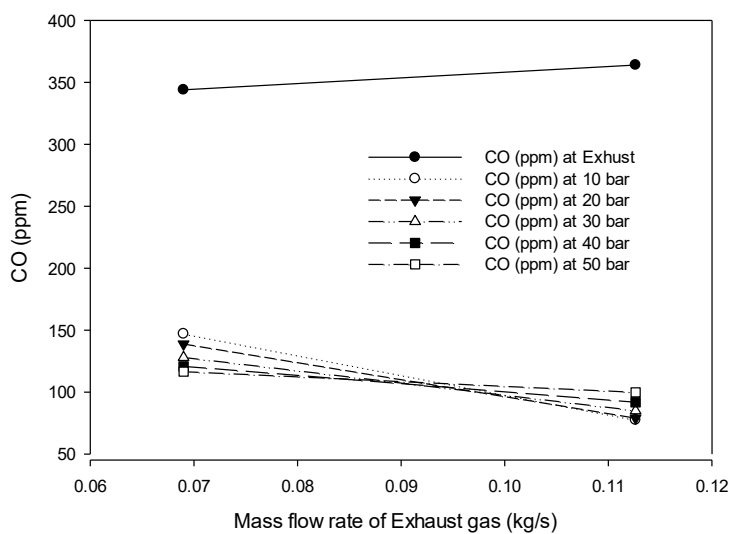
รูปที่ 3 อิทธิพล MNBS + Ozone ต่อ NO

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ CO

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

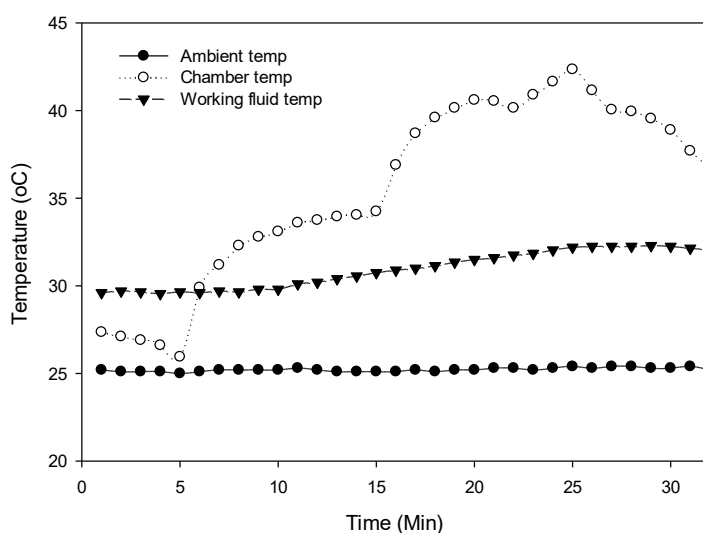
สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า CO ของ Exhaust gas เท่ากับ 344.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ค่า CO ที่ผ่านการบำบัดมีลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 197.00(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 57.27% แสดงตามรูปที่ 4

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า CO ของ Exhaust gas เท่ากับ 364.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO ที่ผ่านการบำบัดลดลงแตกต่างจาก Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 286.50(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 72.60% แสดงตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 อิทธิพลต่อการดักจับ CO

การทดลองการเผาไหม้ภายนอกช่วงระหว่างเวลาทดสอบอุณหภูมิของสารทำงาน (Working fluid temperature, T_{wf}) ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient temperature, T_{ab}) และอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ (Chamber temperature, T_{ch}) ภายใต้เงื่อนไขใกล้เคียงกับสภาพอากาศจริงดังนั้นไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิสารทำงาน โปรไฟล์อุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศแวดล้อม (Ambient temperature, T_{ab}) แสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 โปรไฟล์อุณหภูมิของการทดสอบการเผาไหม้ภายนอก

จากรูปที่ 5 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศแวดล้อม T_{ab} คือ 25.40, 25.00 และ 25.21 °C ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ T_{ch} คือ 42.35, 25.95 และ 35.58 °C ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำงาน T_{wf} คือ 32.30, 29.55 และ 30.92 °C ตามลำดับ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของอุโมงค์ดักจับมลพิษ

อุณหภูมิสารทำงาน/อุโมงค์ดักจับมลพิษ (°C)	T_{ab}	T_{ch}	T_{wa}
ค่าสูงสุด	25.40	42.35	32.30
ค่าต่ำสุด	25.00	25.95	29.55
ค่าเฉลี่ย	25.21	35.58	30.92

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับคาร์บอนด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO_2 เมื่อเพิ่มความดันของการฉีดที่ 10-50 bar มีผลทำให้ค่า CO_2 ในควันไฟที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับควันไฟที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 81.76% ที่ 10 bar และร้อยละ 84.58% ที่ 50 bar ซึ่งผลของการลดลงของ CO_2 ยังสอดคล้องกับการลดลงของ NO และ CO คิดเป็นค่าเฉลี่ย 45.43% ที่ 10 bar และร้อยละ 62.50% ที่ 50 bar และ ร้อยละ 57.27% ที่ 10 bar และร้อยละ 72.60% ที่ 50 bar ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + โอโซน มีความสามารถในการดูดซับและกำจัดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดการปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล เช่น การเผาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ทั้งนี้ข้อดีประการสำคัญคือ สารทำงานดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามสามารถวิจัยและพัฒนาต่อยอดให้สำหรับออกแบบระบบการดักจับมลพิษให้เหมาะสมกับแหล่งมลพิษต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณร้านอู่นาโน ออโต เซอร์วิส และทีมงานช่างที่อนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัยและช่วยติดตั้งอุปกรณ์ประกอบระบบ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวัดมลพิษ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Intra, *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2019.
- [2] O. Ashrafi, Philippe Navarr, and Orsen Zamor, "Energy Integration of Steam-assisted Gravity Drainage Facilities with Carbon Capture," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 74, pp. 635–840, 2019, doi: 10.3303/CET1974140.
- [3] O. Ashrafi, O. Zamor, and P. Navarri, "Impact of carbon capture technologies on GHG emissions from oil sands in-situ facilities: A system prospective," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 188, p. 116603, 2021, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116603.
- [4] E. S. Rubin, H. Mantripragada, A. Marks, P. Versteeg, and J. Kitchin, "The outlook for improved carbon capture technology," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 630–671, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.003.
- [5] G. Li, Penny Xiao, Paul Webley, Jun Zhang, Ranjeet Singh, and Marc Marshall, "Capture of CO_2 from high humidity flue gas by vacuum swing adsorption with zeolite 13X," *Adsorption*, vol. 14, pp. 415–422, 2008, doi: 10.1007/s10450-007-9100-y.
- [6] A. J. Hunt, Emily H. K. Sin, Ray Marriott, and James H. Clark, "Generation, Capture, and Utilization of Industrial Carbon Dioxide," *ChemSusChem Chem. Sustain. Energy Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 306–322, 2010, doi:

10.1002/cssc.200900169.

- [7] Q. Wang, Jizhong Luo, Ziyi Zhong, and Armando Borgna, "CO₂ capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 42–55, 2011, doi: 10.1039/C0EE00064G.
- [8] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, "Current status and challenges on microalgae-based carbon capture," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 10, pp. 456–469, 2012, doi: 10.1016/J.IJGGC.2012.07.010.
- [9] A. Bhavsar, D. Hingar, S. Ostwal, I. Thakkar, S. Jadeja, and M. Shah, "The current scope and stand of carbon capture storage and utilization ~ A comprehensive review," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, p. 100368, 2023, doi: 10.1016/J.CSCEE.2023.100368.
- [10] J. C. M. Pires, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. Simões, "Recent developments on carbon capture and storage: An overview," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 89, no. 9, pp. 1446–1460, 2011, doi: 10.1016/J.CHERD.2011.01.028.
- [11] C. A. Scholes, S. E. Kentish, and G. W. Stevens, "The effect of condensable minor components on the gas separation performance of polymeric membranes for carbon dioxide capture," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 311–317, 2009, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2009.01.043.
- [12] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.05.054.
- [13] Z. Xiao, Tallal Bin Aftab, and Dengxin Li, "Applications of micro–nano bubble technology in environmental pollution control," *Micro Nano Lett.*, vol. 14, no. 7, pp. 782–787, 2019, doi: 10.1049/mnl.2018.5710.
- [14] A. Selamat, Siti Salwa Abd Ghani, Mohd Izuan Effendi Halmi, and Uswatun Hasanah Zaidan, "Properties of coconut (*Cocos nucifera*) husks and its fiber potentials," in *In AIP Conference Proceedings*, 2022, p. 050002. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0104849>.