ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

นายสำเริง สันทาลุนัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

THE EFFECTS OF HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELDS ON CARBON DIOXIDE LEVEL REDUCTION IN THE AIR

SAMROENG SANTALUNAI

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)
กรรมการ

(ผศ. ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์)
กรรมการ

(อ. ดร.มาโนทย์ มาปะโท)
กรรมการ

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำเริง สันทาลุนัย : ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (THE EFFECTS OF HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELDS ON CARBON DIOXIDE LEVEL REDUCTION IN THE AIR)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา, 134 หน้า.

คำสำคัญ: พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน/การคายประจุโคโรนาดีซี/การคายประจุโคโรนาเชิงลบ/ความเข้มของสนามไฟฟ้า/คาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน ในการปล่อยประจุลบ (Negative Corona Discharge) สำหรับการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อช่วยลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้ทำจากทองแดงและออกแบบเป็นพิเศษให้มีปลายแหลมทรงสามเหลี่ยม รวมถึงใช้แผ่นเพลทอลูมิเนียมเป็นกราวด์เพื่อสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ทดสอบการสลายตัวของ CO_2 ภายใต้สภาวะความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Glow Streamer และ Electric Field Strength) และอัตราการไหลของอากาศที่ต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงสุดอยู่ที่ 96.44% ที่ระดับ Electric Field Strength และอัตราการไหลของอากาศที่ 40 ลิตร/นาที อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ยังทำให้เกิดผลพลอยได้ที่สำคัญ ได้แก่ โอโซน (O_3) ที่ 8.4 ppm และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่ 34 ppm ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ประสิทธิภาพของการสลายตัว CO_2 และการเกิดผลพลอยได้ นอกจากนี้งานวิจัยยังศึกษาความเข้มข้นของ CO_2 ที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการสลายตัวและการเกิดผลพลอยได้ในสภาวะ Electric Field Strength โดยพบว่าความเข้มข้นของ CO_2 ที่สูงขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวและลดระดับของผลพลอยได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการปล่อยประจุแบบโคโรนา ด้วยการทำงานที่อุณหภูมิต่ำและความสามารถในการปรับขนาด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีแนวโน้มในการพัฒนาเทคโนโลยีการจับ การใช้ประโยชน์ และการจัดเก็บคาร์บอน (CCUS) และการลดมลพิษทางอากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ปีการศึกษา 2567 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

SAMROENG SANTALUNAI: THE EFFECTS OF HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELDS ON CARBON DIOXIDE LEVEL REDUCTION IN THE AIR.
THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 134 PP.

Keyword: NON-THERMAL PLASMA/DC CORONA DISCHARGE/NEGATIVE CORONA DISCHARGE/ ELECTRIC FIELD INTENSITY/CARBON DIOXIDE (CO_2)

This research investigates the use of cold plasma technology, specifically negative corona discharge, for the efficient and cost-effective decomposition of carbon dioxide (CO_2) to reduce air pollution. Using specially designed copper electrodes with pointed triangular tips and an aluminum ground plate, the study evaluates CO_2 decomposition under varied states of electric field intensities (Glow, Streamer, and Electric Field Strength) and airflow rates. The experiment achieved a maximum CO_2 decomposition efficiency of 96.44% at the Electric Field Strength level with a 40 L/min airflow rate. However, this process also generated significant byproducts, notably ozone (O_3) at 8.4 ppm and nitrogen oxides (NO_x) at 34 ppm, illustrating the relationship between electric field intensity, CO_2 decomposition efficiency, and byproduct generation. Additionally, the study examines the impact of varying CO_2 concentrations on decomposition efficiency and byproduct formation at the Electric Field Strength state, finding that higher CO_2 concentrations increase decomposition efficiency and decrease byproduct levels. This research demonstrates the potential of corona discharge plasma, with its low-temperature operation and scalability, as a promising tool for advancing Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technologies and mitigating air pollution.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electronic Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature S. Samroeng.
Advisor's Signature T. Chanchai.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากบุคคลและกลุ่มบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือทั้งทางวิชาการและการดำเนินงานวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษา สนับสนุนในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังได้ตรวจสอบและปรับแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ครบถ้วน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษาเชิงวิชาการ แก้ไขปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการตรวจสอบและปรับแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นุชนาฏ สันทาลุนัย อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงเพื่อน ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงบุคลากรทุกท่านจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการใช้งานอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการที่สำคัญตลอดระยะเวลาการศึกษา ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ได้อบรมเลี้ยงดูด้วยความรักและความอบอุ่นมาโดยตลอด รวมถึงการสนับสนุนทางการศึกษาอย่างไม่หยุดยั้ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสุภาพซึ่งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในช่วงเวลาที่ผู้วิจัยพบความทุกข์ใจและท้อแท้ ทำให้สามารถทำสำเร็จการศึกษาไปได้อย่างเต็มที่ สุดท้ายผู้วิจัยขอมอบความขอบคุณที่ล้ำลึกแก่บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ได้เป็นกำลังใจและเสมอภาคในทุกสถานการณ์ ทั้ง ๆ ที่ผู้วิจัยได้รับความสำเร็จจากวิทยานิพนธ์นี้ มันเป็นผลมาจากความทุ่มเทและพยายามของทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการสร้างเสริมสร้างให้เกิดผลงานที่ดีขึ้นได้

สำเริง สันทาลุนัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย 4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น 4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย 4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.8 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ 27
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 29
2.1 กล่าวนำ 29
2.2 แหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ 30
2.2.1 แหล่งที่มาจากภายนอกอาคาร 30
2.2.2 แหล่งที่มาจากภายในอาคาร 30
2.3 ผลกระทบด้านสุขภาพ 31
2.3.1 ผลกระทบด้านเคมีในเลือด 31
2.3.2 ผลกระทบด้านระบบทางเดินหายใจ 31
2.3.3 ผลกระทบด้านทางระบบประสาท 32
2.3.4 ผลกระทบด้านระบบหัวใจและหลอดเลือด 32
2.4 คุณสมบัติของพลาสมา 34
2.4.1 พลาสมาความร้อน 34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน 35
2.4.3 พลาสมาอุ่น 35
2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า 36
2.5.1 สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ 37
2.5.2 สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ 37
2.6 ทฤษฎีการปล่อยประจุโคโรนา 39
2.6.1 กลไกการเกิดการคายประจุแบบโคโรนา 39
2.6.2 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของการคายประจุแบบโคโรนา รูปแบบอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท 41
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรทวีแรงดัน 42
2.7.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง 42
2.8 หลักการแตกตัวของ CO_2 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา 43
2.8.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ 43
2.8.2 กลไกการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา 44
2.8.3 การนำคาร์บอนมอนนอกไซด์ไปใช้ประโยชน์ 47
2.8.4 การเกิดสารประกอบขึ้นระหว่างการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา 49
2.8.5 การใช้พลังงานสำหรับการแตกตัว CO_2 50
2.9 สรุป 51
3 การวิเคราะห์และการออกแบบระบบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา 52
3.1 กล่าวนำ 52
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะของรูปแบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม 53
3.3 การวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างระยะห่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท 57
3.4 การออกแบบและวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ทดสอบ 60
3.5 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมและการปรับระยะห่างของแผ่นเพลท 64
3.6 สรุป 71
4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล 72
4.1 กล่าวนำ 72
4.2 ระบบทดสอบการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา 73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Glow....75
4.4 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Streamer....78
4.5 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Electric Field Strength....81
4.6 ผลการทดสอบแต่ละความเข้มสนามไฟฟ้าที่เวลาเพิ่มขึ้น....91
4.7 ผลการทดสอบที่กำลังงานเพิ่มขึ้นในช่วงของการเกิด Electric Field Strength....95
4.8 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น....96
4.9 ผลการทดสอบของความเข้มข้นของ CO_2 ต่อประสิทธิภาพการสลายตัวและการเกิดผลพลอยได้ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า Electric Field Strength....100
4.10 ผลการทดสอบการแตกตัวของ CO_2 ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง....103
4.11 ผลการเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้....104
4.12 การเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO2 ในพลาสมาแบบต่างๆ....106
4.13 สรุป....107
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....108
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์....108
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ....109
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต....109
รายการอ้างอิง....110
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....117
ประวัติผู้เขียน....134

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แสดงประสิทธิภาพในการแปลง CO_2 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน 3
1.2 แสดงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีพลาสมา 15
2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในการศึกษามนุษย์ 33
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ CO_2 44
3.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดลมไอออนิกของแต่ละรูปแบบ 56
3.2 ตารางสรุปความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ช่วงของ Glow - Arc 59
3.3 สรุปพารามิเตอร์ของอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ 70
4.1 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบที่อัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ และช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow, Streamer และ Electric Field Strength 88
4.2 ผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min 94
4.3 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1200 ppm และผลพลอยได้เกิดขึ้นในระบบ ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min ระดับและช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow Streamer และ Electric Field Strength 99
4.4 การแสดงอัตราส่วนการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ต่อ 1200 ppm ที่ช่วงของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ 101
4.5 การแสดงความสัมพันธ์ในกระบวนการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ppm ที่ช่วงของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength 103
4.6 การเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ในพลาสมาประเภทต่างๆ: งานวิจัยก่อนหน้าเทียบกับงานวิจัยที่เสนอ 106

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ DBD 7
1.2 ผลการทดสอบของการใช้กำลังงานต่อการแปลง CO_2 8
1.3 ผลการทดสอบของอัตราการไหล ต่อการแปลง CO_2 8
1.4 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ Microwave 9
1.5 ประสิทธิภาพการแปลง CO_2 ด้วย Microwave 10
1.6 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ GAD 10
1.7 ผลการทดสอบอัตราการไหลของก๊าซต่อการสลายตัว
ของคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 11
1.8 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ Corona discharge 12
1.9 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่อัตราการไหลต่างกัน 13
1.10 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่ความถี่ต่างกัน 13
1.11 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่แรงดันต่างกัน 14
1.12 ลักษณะอิเล็กโทรดของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ corona 17
1.13 ลักษณะอิเล็กโทรดของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ DBD 17
1.14 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิก
ของการปล่อยประจุแบบ corona 17
1.15 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิกของการปล่อยประจุ
แบบ DBD 18
1.16 ภาพถ่ายการทำงานของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona และ DBD 19
1.17 ผลการทดสอบที่วัดความเร็วลมไอออนิก (ionic wind velocity) 19
1.18 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับปล่อยประจุโคโรนา 20
1.19 ลักษณะอิเล็กโทรดรูปแบบต่าง ๆ ก) เงื่อนไขระยะห่างแนวราบระหว่างอิเล็กโทรด
(ข) เงื่อนไข ระยะห่างตามแนวยาวระหว่างอิเล็กโทรด (ค) เงื่อนไขความสูงของ
ตัวรองรับอิเล็กโทรด 20
1.20 การแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแส
ที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลท 21
1.21 การแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแส
ที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 22
1.22 การแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแส
ที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุตามแนวยาวต่าง ๆ 23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

1.23 การแสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแส ที่เกิดขึ้นในกรณีของความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุต่าง ๆ 23
1.24 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแสของการเกิด forward และ back discharges ในอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ 25
1.25 แสดงกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของการคายประจุ แบบโคโรนาที่เกิดขึ้นในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ 26
1.26 แสดงภาพถ่ายของการคายประจุโคโรนาขั้วลบใน CO_2 ภายใต้ความดันบรรยากาศ 26
2.1 แผนผังของเทคโนโลยีพลาสมา 36
2.2 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ 37
2.3 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย 38
2.4 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง 38
2.5 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ 39
2.6 ลักษณะของการคายประจุโคโรนาบวก 40
2.7 ลักษณะของการคายประจุโคโรนาลบ 40
2.8 ภาพถ่าย ก) การคายประจุโคโรนา ข) การเกิดอาร์ค 41
2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของการคายประจุแบบโคโรนา 42
2.10 ไดอะแกรมวงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง Cockcroft–Walton 42
2.11 องค์ประกอบสมดุลของการไพโรไลซิส CO_2 และการแปลง CO_2 คำนวณโดยใช้หลักอุณหพลศาสตร์ภายใความดันปกติ 46
3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ 53
3.2 การกำหนดพารามิเตอร์ของรูปแบบปลายแหลม 53
3.3 รูปแบบปลายแหลมที่ได้จากการกำหนดพารามิเตอร์ 54
3.4 รูปแบบการวัดผลลมไอออนิก 55
3.5 ผลการทดสอบการวัดลมไอออนิกของรูปแบบปลายแหลมแบบต่างๆ 55
3.6 ช่วงของการเกิดแสง (Glow) จนถึงการอาร์ค (Arc) ในอากาศ 57
3.7 ลักษณะของรูปแบบปลายแหลมที่ออกแบบและการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ 61
3.8 การหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด จะได้สมการเป็น 62
3.9 การติดตั้งอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ก) อิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างการติดตั้งใช้งานจริง 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 การจัดเรียงอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์
ก) การจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างการติดตั้งใช้งานจริง 66
3.11 การปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์
เพื่อกำหนดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ต้องการ มุมมองด้านหน้า 67
3.12 ลักษณะของตัวเครื่องของการคายประจุโคโรนา
ก) ลักษณะของตัวเครื่องที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างของตัวเครื่องที่ใช้งานจริง 68
3.13 ชุดควบคุมการทำงานของระบบการปล่อยโคโรนา 69
3.14 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ 70
4.1 ระบบการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุโคโรนาเชิงลบและ
การวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ 73
4.2 ระบบการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุโคโรนาที่ใช้ทดสอบจริง 74
4.3 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย testo 350 74
4.4 เครื่องตรวจวัดก๊าซโอโซน (Ozone Gas Detector) 75
4.5 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow
a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2
c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 75
4.6 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer
a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2
c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 78
4.7 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด
Electric Field Strength a) ผลการสลายตัวของ CO_2
b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 81
4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้ม
สนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของ CO_2
b) ประสิทธิภาพการสลาย CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.9 ผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้า ที่อัตราการไหล
ที่ 40 L/min a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพ
การสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 91
4.10 ผลการทดสอบที่กำลังงานเพิ่มขึ้น ในช่วงของการเกิด Electric Field Strength
ที่อัตราการไหล 160 L/min a) ผลการสลายตัวของ CO_2
b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 95
4.11 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลที่
40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ
a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2
c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น
d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 96
4.12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์
ที่ความเข้มข้น 420 ppm และ 1200 ppm 100
4.13 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบโคโรนาดิจชาร์จ
ระหว่างระบบที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ a) ค่าความเข้มข้นของโอโซน
ที่เกิดขึ้น b) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น 102
4.14 ผลการทดสอบการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น 103
4.15 การเปรียบเทียบผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้
a) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า
ในช่วงของการเกิด Electric Field Strength
b) ความเร็วที่ใช้ในการสลายตัว 105

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$APPJ$	=	Atmospheric Pressure Plasma Jet
CCP	=	Capacitively Coupled Plasma
CCS	=	Carbon Capture and Storage
$CCUS$	=	Capture, Utilization, and Storage
CH_4	=	Methane
CO	=	คาร์บอนมอนอกไซด์
CO_2	=	คาร์บอนไดออกไซด์
DBD	=	Dielectric Barrier Discharge
DC	=	Direct Current Plasma Arc
GA	=	Gliding Arc Discharge
GC	=	Gas Chromatograph
GHG	=	การปล่อยก๊าซเรือนกระจก
ICP	=	Inductively Coupled Plasma
LTE	=	local thermodynamic equilibrium
L/min	=	หน่วยวัดสำหรับบอกปริมาตรการไหลหรืออัตราการไหล
MFC	=	Mass Flow Controller
MS	=	Mass Spectrometer
MW	=	Microwave Plasma
$NOAA$	=	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOx	=	ไนโตรเจนออกไซด์
NTP	=	Non-Thermal Plasma
O_2	=	ออกซิเจน
O_3	=	โอโซน
PPM	=	parts per million
RF	=	Radio Frequency Plasma
SEI	=	Specific Energy Input
Slm	=	Standard Liters per Minute
TP	=	Thermal Plasma

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) นับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญซึ่งสังคมมนุษย์ต้องการการแก้ไขเร่งด่วน ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการพัฒนาและขยายตัวของสังคมสมัยใหม่ได้นำไปสู่การบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีคาร์บอนสูงอย่างไม่เคยมีมาก่อน ส่งผลให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Jingying Huang, et al. 2021) การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะ CO_2 ทำให้ความเข้มข้นในบรรยากาศสูงถึง 420 ppm จากการวัดและบันทึกข้อมูลโดย National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ที่ Mauna Loa Observatory ในปี 2024 ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นจาก 280 ppm ยุคก่อนอุตสาหกรรม (Rajendra K. Pachauri, et al. 2014, David W. Lea, 2015) ผลกระทบนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างรุนแรง เช่น ภาวะโลกร้อน ระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ ซึ่งเป็นภัยคุกคามต่อสังคมทั้งในปัจจุบันและอนาคต ดังนั้น การลดการปล่อย CO_2 จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกในระยะยาว (Danhua Mei and Xin Tu, 2017, M. Ghahramani and F. Pilla, 2021) นอกจากนี้ ความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคารที่เกิน 1000 ppm อาจมีผลกระทบต่อสุขภาพหลายประการ ซึ่งเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการควบคุมระดับ CO_2 (M. Simoni, et al. 2010, Usha Satish, et al. 2012) ซึ่งตลอดประวัติศาสตร์จนถึงปัจจุบัน มีแนวทางหลายประการในการจัดการกับปัญหาก๊าซ CO_2 รวมถึงวิธีการทางธรรมชาติ เช่น การปลูกป่าและการปลูกป่าทดแทน การจัดการมหาสมุทรและชายฝั่ง และการกักเก็บคาร์บอนในดิน (Nathalie Seddon, et al. 2020, Samer Fawzy, et al. 2020) นอกจากนี้ยังมีวิธีการทางเทคโนโลยี ได้แก่ การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ดักจับการปล่อย CO_2 ที่แหล่งกำเนิด (เช่น โรงไฟฟ้า กระบวนการอุตสาหกรรม) ก่อนที่จะถูกปล่อยเข้าสู่บรรยากาศ (J. Gibbins and H. Chalmers, 2008) แม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะเป็นไปได้ในทางเทคนิค แต่ก็ไม่ใช่การแก้ปัญหาการปล่อยคาร์บอนในระยะยาว เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้นทุนการดำเนินงานที่สูงและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของก๊าซ ซึ่งในปัจจุบันก็มีทางเลือกอื่น ๆ ที่ยั่งยืน ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากที่ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหา CO_2 เช่น การดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization, and Storage: CCUS) (Xinghua Liu, et al. 2023, Li Li, et al. 2019) วิธีการนี้เกี่ยวข้องกับการดักจับการปล่อย CO_2 จากแหล่งต่าง ๆ เช่น โรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากบรรยากาศโดยตรง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือกักเก็บใต้ดิน (Berend Smit, et al. 2014) และ CCUS สามารถเปลี่ยน CO_2 ให้เป็นวัตถุดิบที่มีคุณค่าได้ เช่น เมทานอล มีเทน ฟอร์มาลดีไฮด์ ไดเมทิลอีเทอร์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ (Evgenii V. Kondratenko, et al. 2013, Mette Mikkelsen, et al. 2010, T Nunnally, et al. 2011, Danhua Mei, et al. 2015)

อย่างไรก็ตาม CO_2 เป็นโมเลกุลที่มีเสถียรภาพสูง และการกระตุ้นโครงสร้างโมเลกุลของมันเพื่อทำลายพันธะคู่ (O=C=O) (Bryony Ashford and Xin Tu, 2017) ต้องใช้พลังงานมากในการสลายพันธะ ดังนั้น วิธีการเหล่านี้ยังคงเผชิญกับความท้าทายด้านประสิทธิภาพและมักต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลาย CO_2 ซึ่งทำให้เกิดปัญหาหลายประการในการใช้งานจริง

ด้วยเหตุนี้มีเทคโนโลยีใหม่อีกประเภทหนึ่งที่ถือว่ามีศักยภาพสูงในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลาสมา โดยพลาสมาเป็นก๊าซที่ถูกไอออไนซ์ ซึ่งหมายความว่าอย่างน้อยหนึ่งอิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะ ทำให้เกิดไอออนที่มีประจุบวก ในทางปฏิบัติ ระดับของการไอออไนซ์ในพลาสมาสามารถมีตั้งแต่ก๊าซที่ถูกไอออไนซ์อย่างสมบูรณ์ไปจนถึงก๊าซที่ถูกไอออไนซ์บางส่วน นอกจากไอออนชนิดต่าง ๆ (ทั้งประจุบวกและประจุลบ) พลาสมายังประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นกลางจำนวนมาก เช่น อะตอม โมเลกุล อนุมูลอิสระ และอนุภาคที่ถูกกระตุ้นชนิดต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปสู่การปล่อยแสงได้ ยิ่งไปกว่านั้น อนุภาคทั้งหมดนี้สามารถทำปฏิกิริยากันได้ ทำให้พลาสมาเป็นสารเคมีที่มีที่มีปฏิกิริยาสูงและซับซ้อน จึงเป็นแนวทางนวัตกรรมสำหรับกระบวนการ CCUS โดยเฉพาะการสลาย CO_2 ซึ่งประเภทของพลาสมาถูกแบ่งออกหลักๆ เป็นพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (Non-thermal plasmas) และพลาสมาร้อน (Thermal plasmas) โดยแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (Seiji Samukawa, et al. 2012, Ramses Snoeckx and Annemie Bogaerts, 2017, Danhua Mei, 2016, Hao Zhang, et al. 2017, Masaaki Okubo, et al. 2018) พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อนมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงและการเลือกปฏิบัติในการประยุกต์ใช้ที่เหมาะสม มักใช้ในการกระตุ้น CO_2 ด้วยอิเล็กตรอนพลังงานสูง (1–10 eV) ผ่านการไอออนไนซ์และความแรงของสนามไฟฟ้าเพื่อสลายโครงสร้างโมเลกุลภายใต้สภาวะพลังงานต่ำ (Adwek George, et al. 2021, Hao Zhang, et al. 2021, 2018, X. Tu and J.C. Whitehead, 2012) ในขณะที่พลาสมาร้อนถูกเลือกใช้เพราะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ พลาสมาเป็นสถานะของสสารคล้ายแก๊สที่บางอนุภาคถูกไอออนไนซ์ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าและตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Shadfar Davood, et al. 2023, Kangkang Li, et al. 2022, Bartosz Dziejarski, et al. 2023) คุณสมบัติเฉพาะเหล่านี้ช่วยให้พลาสมาเริ่มต้นและเร่งปฏิกิริยาเคมี สามารถดักจับและเปลี่ยน CO_2 ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ (Guoxing Chen et al. 2021)

เทคโนโลยีพลาสมา แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการรวบรวมงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการสลายตัวของ CO_2 แสดงข้อมูลตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลาย CO_2 ของเทคโนโลยีพลังงานพลาสมาต่างๆ โดยเน้นถึงการแลกเปลี่ยนระหว่างการใช้พลังงาน อัตราการไหล และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การคายประจุแบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD) แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โดยที่ $12\%Ni/\gamma-Al_2O_3$ แสดงประสิทธิภาพสูงสุด (Guoxing Chen, et al. 2021) ในทางกลับกัน เทคโนโลยี gliding arc แสดงประสิทธิภาพต่ำ (8.40%) แม้จะใช้พลังงานและอัตราการไหลสูง (An-Jie Zhang et al. 2010) พลาสมาร้อนสามารถทำให้เกิดการสลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (88%) แต่มีการใช้พลังงานที่สูงมาก (3400 W) (Ming-Wei Li, et al. 2004) ที่น่าสนใจ เทคโนโลยีการคายประจุแบบโคโรนาให้ประสิทธิภาพสูง (54.2%) โดยใช้พลังงานต่ำ (45 W) และไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (J.A. Andersen, et al. 2020)

ตารางที่ 1.1 แสดงประสิทธิภาพในการแปลง CO_2 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน

Type	Power (W)	Total flow rate (ml/min)	catalyst	CO_2 Decomposition (%)	Ref.
DBD	45	50	Cu / Al_2O_3	16.1	J.A. Andersen et al. 2020
DBD	60	60	$12\%Ni / \gamma - Al_2O_3$	24	An-Jie Zhang et al. 2010
Gliding arc	165	7500	None	8.40	Xin Tu et al. 2014
Thermal plasma	3400	16,000	None	88.0	Sun Yanpeng et al. 2014
Corona	45	60	None	70	Ming-wei Li et al. 2004

จากความเป็นมาข้างต้น เทคโนโลยีพลาสมาแบบการคายประจุโคโรนาเกิดขึ้นเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการสลาย CO_2 เนื่องจากการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งช่วยให้สามารถใช้งานร่วมกับกระบวนการที่มีอยู่ได้ง่าย (Krittiya Pornmai, et al. 2019, Hoang Hai Nguyen, et al. 2015) การทำงานที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยลดความจำเป็นในการใช้ระบบให้ความเย็นขนาดใหญ่และช่วยลดความเครียดทางความร้อนบนวัสดุ ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์นานขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอเทคโนโลยีพลาสมาแบบการคายประจุโคโรนาสำหรับการการสลายตัวของ CO_2 โดยในงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะของการเกิดต่าง ๆ วิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศที่เปลี่ยนแปลง ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบ รวมถึงความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าไปในระบบของการทดสอบ ซึ่งจะได้ทราบถึงรูปแบบในการสลาย CO_2 ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าข้อมูลของการออกแบบอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นรูปแบบปลายแหลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของกระบวนการคายประจุโคโรนาในการสลาย CO_2 ในอากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาความเข้มของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศอย่างเป็นระบบเพื่อระบุสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสลาย CO_2 สูงสุดและให้ข้อมูลเชิงลึกสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการลด CO_2 ที่มีประสิทธิภาพ

1.2.3 เพื่อตรวจสอบผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเฉพาะ O_3 และ NO_x ที่เกิดขึ้นพร้อมกับกระบวนการสลาย CO_2 ในทุกระดับความเข้มสนามไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นของความเข้มข้น CO_2 ที่เปลี่ยนแปลงต่อการสลาย CO_2 และการเกิด O_3 และ NO_x เพื่อเข้าใจถึงประสิทธิภาพและการเกิดผลพลอยได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ความเข้มของสนามไฟฟ้าในแต่ละสภาวะของการคายประจุแบบโคโรนามีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน รวมถึงผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบของแต่ละสภาวะที่ทดสอบ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ศึกษาการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนาที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าต่าง ๆ

1.4.2 วิเคราะห์และออกแบบลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ สำหรับการสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า และสามารถปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าได้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์

1.4.3 ทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และวัดผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบด้วย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาเทคโนโลยีการคายประจุแบบโคโรนาที่ใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม เพื่อสร้างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้

1.5.2 ศึกษาหาความเข้มของความสนามไฟฟ้าจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ เพื่อให้ทราบถึงช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ ของการคายประจุแบบโคโรนา

1.5.3 ทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.5.4 วัดผลพลอยได้ของ O_3 และ NO_x ที่เกิดขึ้นในระบบทั้งในสภาวะที่อากาศมีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.5 ทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเดินงาน

1) ทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้หลักการคายประจุแบบโคโรนาที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

2) วิเคราะห์ผลระดับความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยข้อมูลทางคณิตศาสตร์

3) ออกแบบและสร้างระบบการทดสอบ สำหรับการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

4) วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

5) จัดเขียนวิทยานิพนธ์และเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1) ดำเนินการวิจัยและรวบรวมข้อมูลโดยการศึกษาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์อย่างละเอียดและครอบคลุม

2) วิเคราะห์ ออกแบบ และหาข้อมูลงานวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือถึงระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากรูปแบบอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

3) สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและปรับปรุงเครื่องให้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111, ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer)

2) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย (testo 350)

3) เครื่องตรวจวัดก๊าซโอโซน (Ozone Gas Detector)

4) เครื่องวัดความเร็วลม (Digital Anemometer)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2) สรุปผลจากการออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพของระบบสลายคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการคายประจุแบบโคโรนา

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถวิเคราะห์ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ได้

1.7.2 ได้ทราบถึงระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าจากการประจุแบบโคโรนาและอัตราการไหลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

1.7.3 เข้าใจกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ เพื่อนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการทำงานด้านอื่น ๆ แก้ไขปัญหาในทางปฏิบัติ และสามารถนำไปใช้ในการประกอบวิชาชีพได้

1.8 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

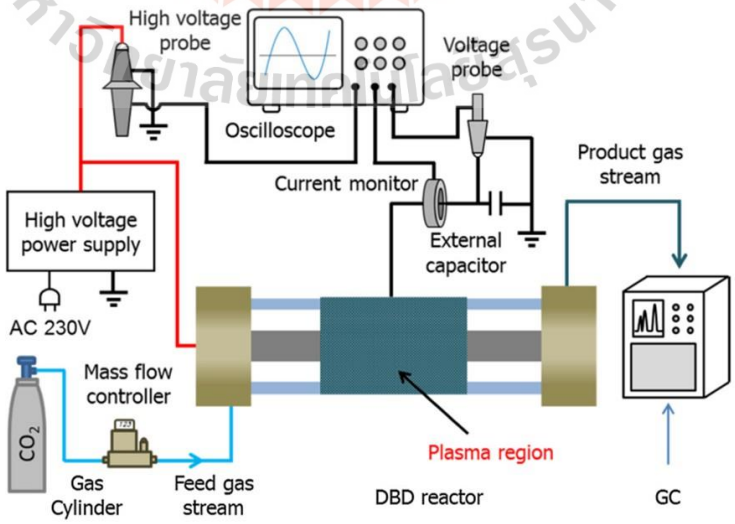
การใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการแก้ปัญหาการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นทั่วโลก เนื่องจากการใช้เทคโนโลยีพลาสมาให้ทางเลือกที่มีคุณค่าทากกว่ากระบวนการทางความร้อนแบบดั้งเดิม ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการใช้พลาสมาประเภทต่าง ๆ รวมถึงรูปแบบของการสร้างพลาสมาแบบต่าง ๆ ในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ประเภทของพลาสมาที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจน รวมถึงการประเมินทิศทางความ

เป็นไปได้ของงานวิจัยในอนาคต ตลอดจนระบุปัญหาและข้อเสนอแนะที่จะช่วยนำพางานวิจัยไปสู่เป้าหมายที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยละเอียด โดยใช้ฐานข้อมูลที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในวงการวิชาการ เช่น ScienceDirect IEEE, และ SCOPUS, ซึ่งเป็นแหล่งรวบรวมผลงานวิจัยระดับโลกที่มีคุณภาพและความน่าเชื่อถือสูง ทำให้สามารถเข้าถึงงานวิจัยที่มีเนื้อหาครอบคลุมหลากหลายด้านในสาขาที่เกี่ยวข้องนอกจากนี้ยังได้ค้นคว้าจากแหล่งข้อมูลอื่นๆ เช่น อินเทอร์เน็ต ห้องสมุดมหาวิทยาลัย และสื่อการเรียนรู้ต่างๆ ผลจากการสืบค้นเหล่านี้จะนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไป ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ รูปแบบต่าง ๆ ของการสร้างพลาสมา และการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดพลาสมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายคาร์บอนไดอ ออกไซด์ ผลจากการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ในหัวข้อต่อไปนี้

1.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการสลายตัวแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พลาสมาถือว่าเป็นสถานะที่สี่ของสสาร พลาสมาเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้าสูงกับก๊าซที่เป็นตัวกลาง เมื่อพลังงานถูกส่งไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนชนกับอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว จนก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมา โดยพลาสมาแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก คือ พลาสมาความร้อนและพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน ขึ้นอยู่กับสมดุลทางอุณหภูมิของอนุภาคภายใน ซึ่งพลาสมาความร้อน (Thermal Plasma, TP) เป็นสถานะของก๊าซที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างสมบูรณ์ ทำให้อนุภาคทั้งหมดในพลาสมามีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกัน ทั้งอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลางมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน ที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคอื่นๆ มาก และมักถูกสร้างขึ้นในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงมาก โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 4000 K ถึง 20,000 K และถูกใช้งานในกระบวนการทางอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การเชื่อมโลหะ การตัดโลหะ การผลิตพลังงานจากฟิวชัน และการเคลือบผิววัสดุ เป็นต้น พลาสมาความร้อนมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถสร้างและควบคุมได้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยให้สามารถทำปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการพลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเทคโนโลยีพลาสมาความร้อน ได้แก่ Direct Current (DC) Plasma Arc ใช้ในการเชื่อมโลหะและการตัดวัสดุ Inductively Coupled Plasma (ICP) ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีและการผลิตนาโนวัสดุ Radio Frequency (RF) Plasma ใช้ในการเคลือบพื้นผิวและการสลาย CO_2 และ Microwave Plasma ใช้ในกระบวนการที่ต้องการอุณหภูมิสูงมาก (อุณหภูมิ > 1000°C) และในส่วนของพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (Non-Thermal Plasma, NTP) หรือพลาสมาเย็นเป็น สถานะของก๊าซที่มีการแตกตัวเป็นไอออนบางส่วน ซึ่งในสถานะนี้ อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคหนัก (ไอออนและโมเลกุลที่เป็นกลาง) อย่างมากทำให้อุณหภูมิโดยรวมของพลาสมาเย็นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพลาสมาความร้อน และพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อนสามารถสร้างได้ที่ อุณหภูมิห้องหรือใกล้เคียง โดยการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงระหว่างอิเล็กโทรดสองตัวในบรรยากาศของก๊าซ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า จะถูกเร่งไปชนกับโมเลกุลของก๊าซ ทำให้เกิดการแตกตัว การกระตุ้น และการแยกตัว กระบวนการนี้ทำให้เกิดอนุภาคที่มีปฏิกิริยาสูง เช่น ราดิคัล และอนุภาค

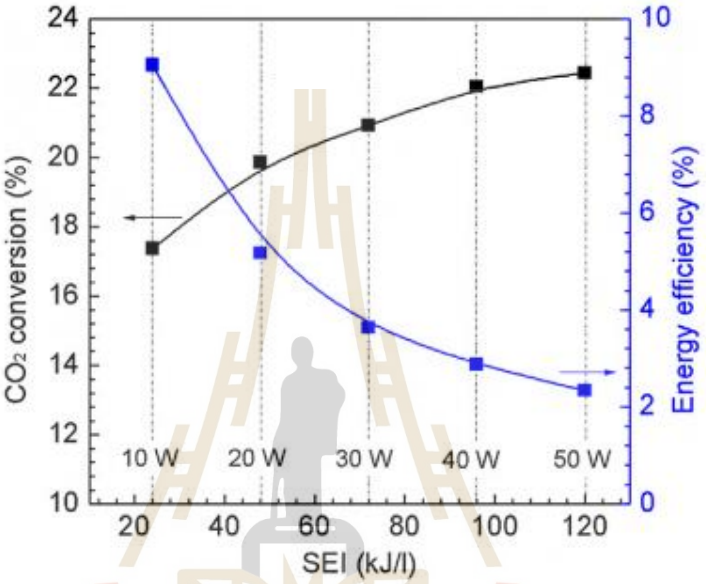
ที่ถูกกระตุ้น ตัวอย่างเทคโนโลยีในกลุ่มนี้ ประกอบไปด้วย Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma ใช้ในการแปลงก๊าซและการทำความสะอาดพื้นผิว Corona Discharge Plasma ใช้ในการกำจัดโอโซนและสารมลพิษในอากาศ Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ) ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคและทำความสะอาดพื้นผิว Microwave Plasma ใช้ในการผลิตนาโนวัสดุและการสลาย CO_2 (มีอุณหภูมิ < 1000°C) Capacitively Coupled Plasma (CCP) ใช้ในการเคลือบพื้นผิวและการทำความสะอาดในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และ Gliding Arc Discharge ใช้ในการแปลง CO_2 และการผลิตไฮโดรเจน ด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำงานได้ในอุณหภูมิต่ำ พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อนจึงมีความปลอดภัยและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานหลากหลาย ทำให้เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีความสนใจเพิ่มขึ้นในการใช้เทคโนโลยีพลาสมาสำหรับการแปลง CO_2 โดยมีการทดลองในพลาสมาหลายประเภท ซึ่งประเภทที่พบบ่อยที่สุดในงานวิจัยคือพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (NTP) ซึ่งเทคโนโลยีส่วนใหญ่จะใช้การปล่อยประจุของสิ่งกีดขวางไดอิเล็กทริก (DBD) การปล่อยของไมโครเวฟ (MW) การปล่อยอาร์กร่อน (GA) และการคายประจุแบบโคโรนาในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจและได้ศึกษาค้นคว้าเทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อนเป็นหลักรวมถึงเทคโนโลยีพลาสมาความร้อนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและสรุปผลสำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อไป

จากการศึกษางานวิจัยของ Danhua Mei และ Xin Tu (Danhua Mei, Xin Tu, 2017) ได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการแปลงสภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกซิเจน (O_2) โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนสูง (Non-thermal plasma) ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการประมวลผลพลาสมา เช่น ความถี่ของการปล่อยประจุ อัตราการไหล กำลังไฟฟ้าในการปล่อยประจุ และการออกแบบตัวนำไฟฟ้าภายในระบบ DBD ต่อประสิทธิภาพในการแปลงสภาพ CO_2 และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการตั้งค่าการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.1

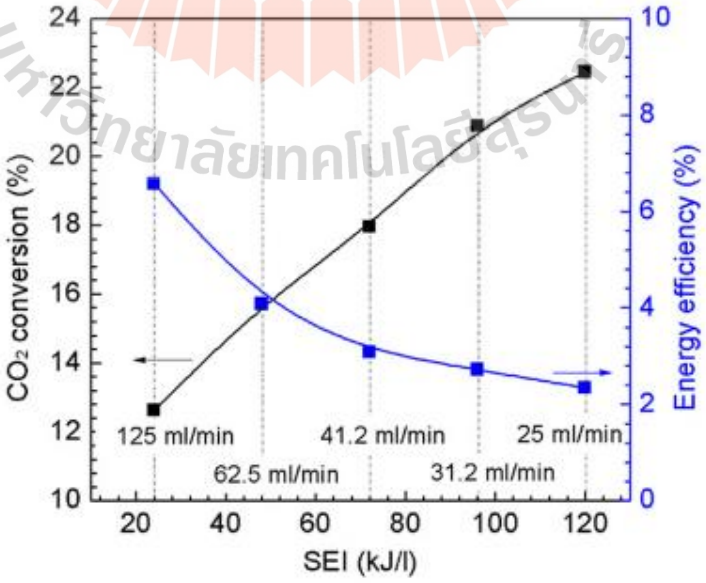


รูปที่ 1.1 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ DBD

จากรูปที่ 1.1 เป็นการตั้งค่าระบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD) เพื่อสลาย CO_2 โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ควบคุมผ่านโพรบวัดแรงดันและเครื่องวัดกระแสซึ่งเชื่อมต่อกับออสซิลโลสโคปสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณ ก๊าซ CO_2 ถูกจ่ายจากถังเก็บผ่านตัวควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่ DBD reactor ที่ซึ่งพลาสมาถูกสร้างขึ้นเพื่อแปลง CO_2 หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) เพื่อตรวจสอบปริมาณของก๊าซ ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 1.2 และ 1.3



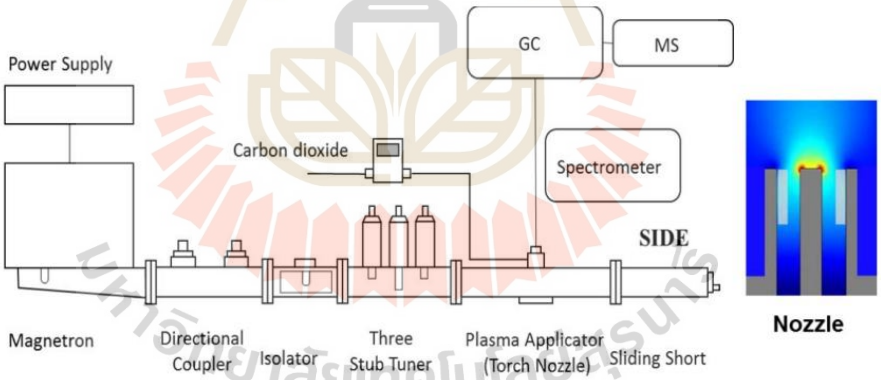
รูปที่ 1.2 ผลการทดสอบของการใช้กำลังงานต่อการแปลง CO_2



รูปที่ 1.3 ผลการทดสอบของอัตราการไหล ต่อการแปลง CO_2

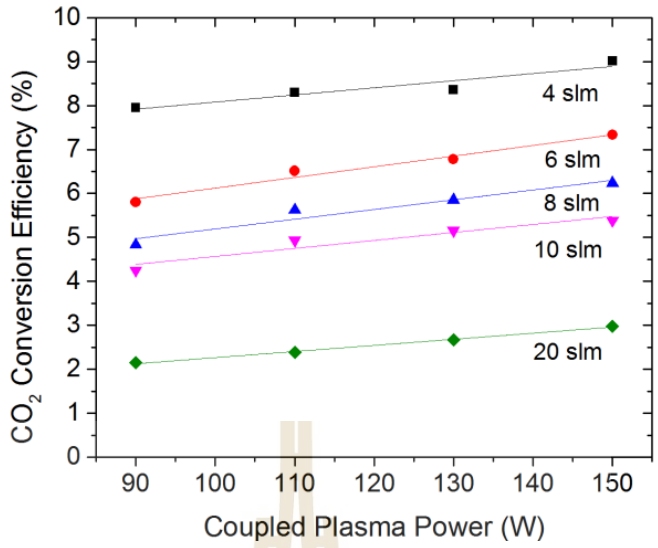
จากรูปที่ 1.2 เป็นผลการทดสอบการใช้กำลังงานต่อการแปลง CO_2 ในกระบวนการ Dielectric Barrier Discharge (DBD) พบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าในการปล่อยประจุเพิ่มขึ้นจาก 10 W ถึง 50 W และ SEI เพิ่มขึ้นจาก 20 kJ/L ถึง 120 kJ/L โดยที่การแปลง CO_2 สูงสุดที่ประมาณ 22.4% ที่กำลังไฟฟ้า 50 W ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มการแปลง CO_2 ได้ และรูปที่ 1.3 การแปลง CO_2 เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซลดลง โดยที่อัตราการแปลง CO_2 สูงสุดที่ประมาณ 22.4% เมื่ออัตราการไหลอยู่ที่ 25 mL/min และ SEI ที่ 120 kJ/L ซึ่งแสดงว่าการลดอัตราการไหลของก๊าซช่วยเพิ่มระยะเวลาที่ CO_2 อยู่ในบริเวณพลาสมา ทำให้มีโอกาสมากขึ้นที่จะเกิดการแปลงสภาพ ถึงแม้กระกระบวการนี้สามารถแปลง CO_2 ได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง และมีความยืดหยุ่นในการปรับแต่งพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ แต่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลงเมื่อเพิ่ม SEI และมีอัตราการแปลง CO_2 ที่ค่อนข้างต่ำ

จากงานวิจัยของ Constandinos M. และคณะ (Constandinos M. et al., 2016) ได้ศึกษาการใช้ระบบพลาสมาไมโครเวฟที่ควบคู่โดยตรงภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีจุดเด่นคือการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการแปลง CO_2 ไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า งานวิจัยนี้ได้เน้นที่การพัฒนาระบบที่สามารถลดการใช้พลังงานในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพในการแปลง CO_2 ให้อยู่ในระดับสูง โดยใช้วิธีการทดลองและวิเคราะห์ผลการแปลงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี การทดลองนี้ใช้เครื่องมืออย่างละเอียดเพื่อวัดอุณหภูมิและการปล่อยรังสีของพลาสมา เพื่อให้สามารถเข้าใจกลไกของการแปลง CO_2 ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดยมีการตั้งค่าการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ Microwave

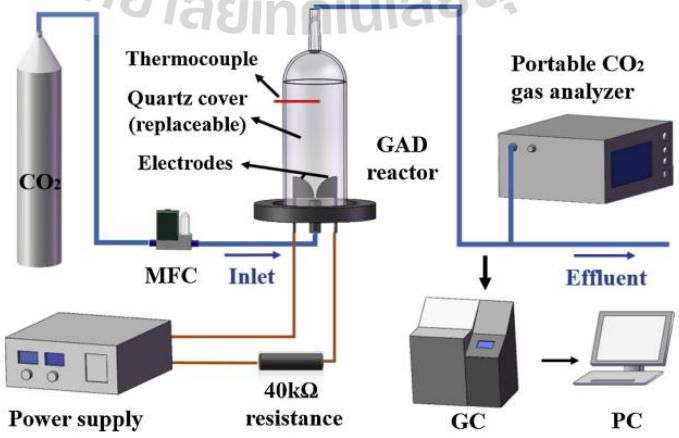
จากรูปที่ 1.4 เป็นการตั้งค่าการทดลองโดยใช้ Magnetron ในการสร้างคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อกระตุ้นการสลายตัวของ CO_2 ภายใน Plasma Applicator หรือ Torch Nozzle โดยคลื่นไมโครเวฟจะถูกควบคุมผ่าน Directional Coupler, Isolator, และ Three Stub Tuner เพื่อให้พลังงานถูกส่งไปยังพื้นที่ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบจะป้อน CO_2 เข้าไปใน Torch Nozzle ซึ่งเป็นจุดที่พลาสมาถูกสร้างขึ้นเพื่อทำลายโมเลกุล CO_2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกวิเคราะห์ผ่าน Gas Chromatograph (GC) และ Mass Spectrometer (MS) รวมถึงการใช้ Spectrometer เพื่อตรวจสอบสเปกตรัมแสงที่เกิดจากพลาสมา เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและเข้าใจกลไกการสลายตัวของ CO_2 อย่างละเอียด ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ประสิทธิภาพการแปลง CO_2 ด้วย Microwave

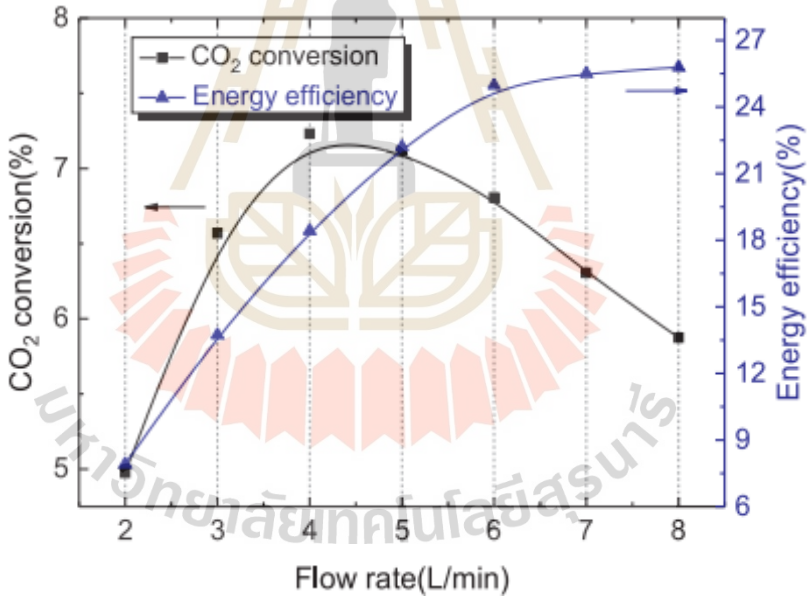
จากรูปที่ 1.5 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการแปลง CO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานพลาสมาที่ส่งผ่านเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลของ CO_2 ที่ต่ำกว่า (4 slm) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ประมาณ 9% ในขณะที่อัตราการไหลที่สูงกว่า (20 slm) ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าอยู่ที่ประมาณ 3-5% เมื่อใช้พลังงานสูงสุด 150 W จากผลการทดสอบของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงในการแปลง CO_2 สภาวะบรรยากาศ แต่ยังมีประสิทธิภาพการแปลงที่ต่ำและข้อจำกัดในการขยายขนาดเพื่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

จากงานวิจัยของ Li Li และคณะ (Li Li et al., 2018) ได้ศึกษาการสลายตัวของ CO_2 โดยใช้พลาสมาแบบ Gliding Arc Discharge (GAD) ซึ่งเป็นวิธีที่มีศักยภาพสำหรับการแปลง CO_2 เนื่องจากสามารถทำการสลายตัวของ CO_2 ได้ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ พร้อมกับลดต้นทุนพลังงาน โดยมีการตั้งค่าการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ GAD

จากรูปที่ 1.6 เป็นการตั้งค่าการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบการคายประจุโค้ง (Gliding Arc Discharge, GAD) ที่ใช้ในการสลายตัวของ CO_2 โดยก๊าซ CO_2 ถูกนำมาจากถังเก็บ ผ่านตัวควบคุมการไหลของก๊าซ (Mass Flow Controller, MFC) เพื่อให้แน่ใจว่าอัตราการไหลถูกต้องและคงที่ จากนั้นจึงถูกนำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ GAD ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ขั้วไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟแรงสูงจะสร้างพลาสมาโดยการคายประจุโค้ง ช่วยให้การสลายตัวของ CO_2 เกิดขึ้น ตัวเครื่องปฏิกรณ์ถูกปิดล้อมด้วยฝาครอบควอตซ์ และมีการวัดอุณหภูมิของก๊าซภายในระบบด้วยเทอร์โมคัปเปิล หลังจากเกิดปฏิกิริยา ก๊าซที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC) และเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ CO_2 แบบพกพาเพื่อระบุส่วนประกอบและความเข้มข้นของ CO_2 และก๊าซอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกและประมวลผลในคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป การตั้งค่านี้ช่วยให้นักวิจัยสามารถปรับแต่งเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการแปลง CO_2 โดยการปรับตัวแปร เช่น อัตราการไหล การกำหนดค่าของขั้วไฟฟ้า และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ได้ และในส่วนของของผลการทดสอบงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ผลการทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัวของ CO_2 ดังแสดงในรูปที่ 1.7

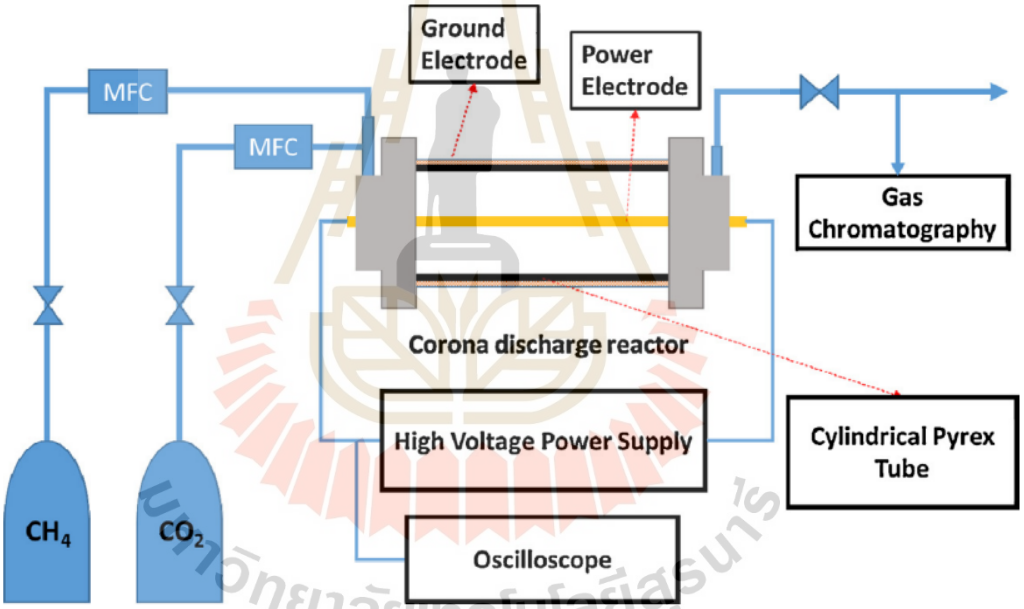


รูปที่ 1.7 ผลการทดสอบอัตราการไหลของก๊าซต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 1.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 การแปลง CO_2 และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครื่องปฏิกรณ์ Gliding Arc Discharge (GAD) ซึ่งพบว่าการแปลง CO_2 จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอัตราการไหลของก๊าซจนถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 7.2% เมื่ออัตราการไหลอยู่ที่ 4 ลิตรต่อนาที (L/min) แต่หลังจากนั้นการแปลง CO_2 จะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอีก สาเหตุมาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่าง CO

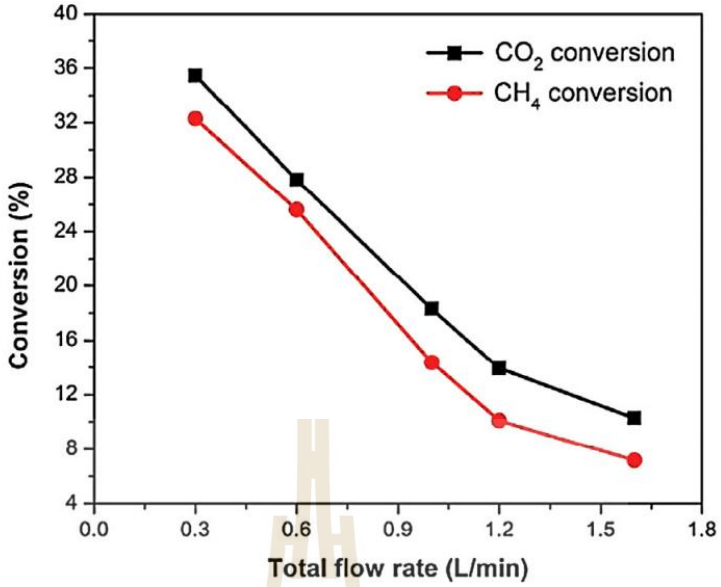
และ O_2 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการใช้พลังงานกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอัตราการไหลของก๊าซ โดยสูงสุดที่ประมาณ 25.8% ที่อัตราการไหล 8 L/min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้การแปลง CO_2จะลดลงที่อัตราการไหลสูง แต่เครื่องปฏิกรณ์ยังคงสามารถประมวลผลก๊าซได้มากขึ้นและใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการปรับปรุงการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ เช่น การปรับขนาดหัวฉีดและฝาครอบ แต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดในด้านการกระจายของสนามก๊าซและพื้นที่ของพลาสมา ซึ่งส่งผลให้การแปลง CO_2 และประสิทธิภาพการใช้พลังงานยังไม่สูงเท่าที่คาดหวัง

จากงานวิจัยของ Hoang Hai Nguyen และคณะ (Hoang Hai Nguyen et al., 2015) ได้ศึกษาการศึกษาการแปลง CO_2 และ CH_4 โดยกระบวนการการปล่อยประจุแบบโคโรนาเพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ (syngas) โดยงานวิจัยนี้สำรวจผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราส่วน CO_2 / CH_4 อัตราการไหลทั้งหมด, ความถี่ของพัลส์, และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ โดยมีการตั้งค่าการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.8



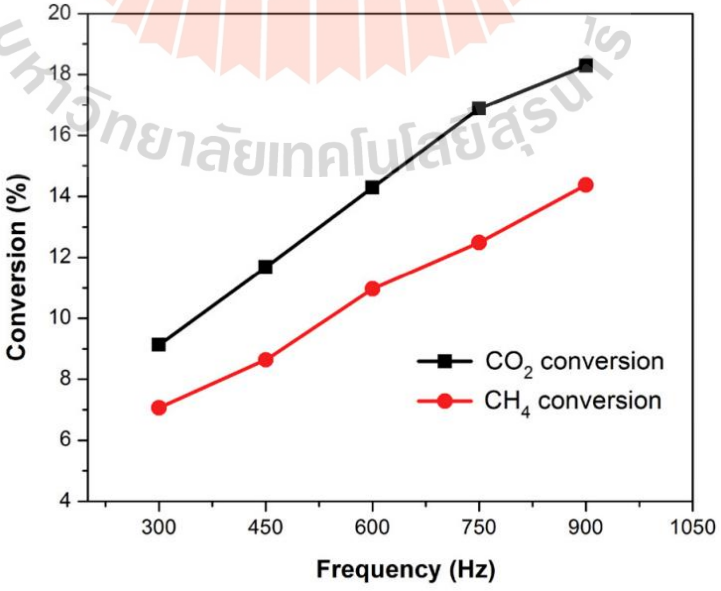
รูปที่ 1.8 การตั้งค่าการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 โดยพลาสมาแบบ Corona discharge

จากรูปที่ 1.8 เป็นระบบการทดลองสำหรับการแปลง CO_2 และ CH_4 โดยใช้กระบวนการปล่อยประจุแบบโคโรนาในเครื่องปฏิกรณ์แบบโคโรนา (Corona Discharge Reactor) ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ CH_4 และ CO_2 โดยใช้เครื่องควบคุมการไหลของมวล (MFC) ก่อนที่จะผสมก๊าซและปล่อยเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อ Pyrex ทรงกระบอก โดยมีกระแสไฟฟ้าแรงสูงส่งผ่านอิเล็กโทรดไฟฟ้ากำลัง ทำให้เกิดการปล่อยประจุโคโรนาในท่อ เกิดการปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซ CH_4 และ CO_2 จนได้ก๊าซสังเคราะห์ (syngas) ซึ่งจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแก๊ส และบันทึกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการด้วยออสซิลโลสโคปเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 1.9, 1.10 และ 1.11



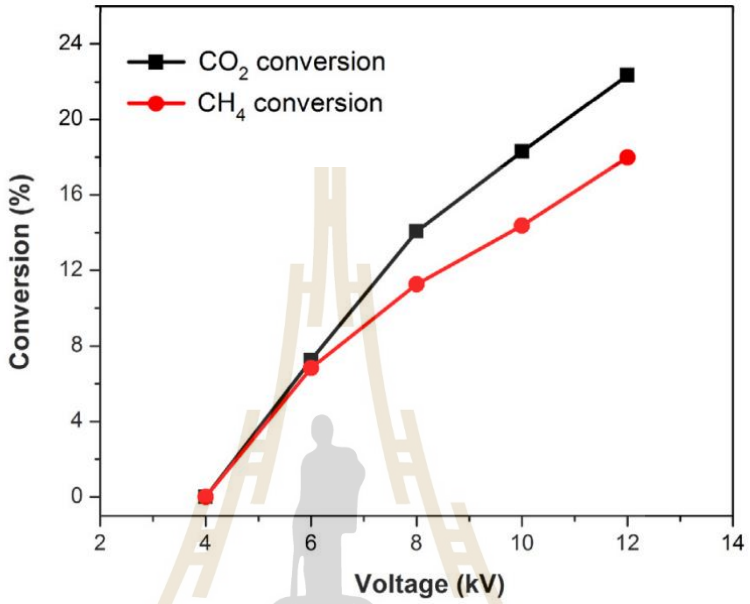
รูปที่ 1.9 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่อัตราการไหลต่างกัน

จากรูปที่ 1.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลทั้งหมด (L/min) กับเปอร์เซ็นต์การแปลงของ CO_2 และ CH_4 ในกระบวนการแปลงด้วยประจุโคโรนา พบว่าการแปลงของทั้ง CO_2 และ CH_4 ลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลลดเวลาที่ก๊าซอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแตกตัวและปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ การแปลง CO_2 มีค่ามากกว่าการแปลงของ CH_4 ในทุกอัตราการไหล ซึ่งอาจบ่งบอกว่า CO_2 สามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าหรือมีปฏิกิริยากับพลาสมามากกว่า CH_4 ในเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 1.10 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่ความถี่ต่างกัน

จากรูปที่ 1.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของพัลส์ (Hz) กับเปอร์เซ็นต์การแปลงของ CO_2 และ CH_4 ในกระบวนการปฏิรูปด้วยประจุโคโรนา พบว่าการแปลงของทั้ง CO_2 และ CH_4 เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความถี่ของพัลส์เพิ่มขึ้นจาก 300 Hz ถึง 900 Hz ซึ่งบ่งบอกว่าความถี่ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงก๊าซทั้งสองชนิด



รูปที่ 1.11 การแปลง CO_2 และ CH_4 ที่แรงดันต่างกัน

จากรูปที่ 1.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ (Voltage) กับเปอร์เซ็นต์การแปลงของ CO_2 และ CH_4 ในกระบวนการแปลงด้วยการปล่อยประจุแบบโคโรนา พบว่าการแปลงของทั้ง CO_2 และ CH_4 เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 4 kV ถึง 12 kV ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงก๊าซทั้งสองชนิด นอกจากนี้ การแปลงของ CO_2 มีค่าสูงกว่าการแปลงของ CH_4 ในทุกช่วงแรงดันไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า CO_2 มีการแตกตัวหรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการแปลงมีลักษณะชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระดับที่สูงกว่า 8 kV ซึ่งการแปลงของ CO_2 เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าการแปลงของ CH_4 เล็กน้อย กราฟนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลง CO_2 และ CH_4 ในกระบวนการปล่อยประจุแบบโคโรนา จากการศึกษางานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอัตราการแปลง CO_2และ CH_4 เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้หรือความถี่ของพัลส์เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่ออัตราการไหลทั้งหมดเพิ่มขึ้น การวิจัยนี้ให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการปฏิรูป CO_2 โดยกระบวนการปล่อยประจุแบบโคโรนา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบกระบวนการในระดับอุตสาหกรรมหรือการศึกษาต่อเนื่องเพื่อหาสภาวะกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการแปลง CO_2 หรือ CH_4 ได้

จากงานวิจัยของ Vernon Cooray และ Mahbubur Rahman (Vernon Cooray, Mahbubur Rahman., 2005) ได้ศึกษาการผลิตไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และโอโซน (O_3) จากการปล่อยกระแสไฟฟ้าชนิด streamer ในอากาศที่ความดันบรรยากาศ งานวิจัยนี้ใช้การทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการผลิต NO_x และ O_3 โดยใช้เซลล์ทรงกระบอกร่วมแกนและแรงดันไฟฟ้าที่จำลองจากฟ้าผ่า การศึกษานี้ยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตของ streamer ที่มีขั้วไฟฟ้าบวกและลบ และพบว่าการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบบวกมีประสิทธิภาพในการผลิต NO_x และ O_3 สูงกว่า ซึ่งจากงานวิจัยนี้บ่งบอกถึงการเกิดผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในการทดสอบปล่อยประจุแบบโคโรนา

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการสลายตัวแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เป็นพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (NTP) สามารถสรุปประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีพลาสมา

Ref.	Plasma Type	Power (W)	Total flow rate (ml/min)	catalyst	CO_2 Decomposition (%)
Dmitry Mansfeld et al. 2020	MW	5,000	30,000	None	31.3
Jiao Li et al. 2017	Thermal plasma	15,000	25,000	None	48.0
T Nunnally et al. 2011	Gliding arc	1,500	14,000	None	9.0
An-Jie Zhang et al. 2010	DBD	60	60	12%Cu-12%Ni/ γ-Al_2O_3	75.0
Yue-ping Zhang et al. 2003	DBD	75	70	None	43.1
Ming-wei Li et al. 2004	Corona	100	60	None	70.0

จากตารางที่ 1.2 แสดงการวิเคราะห์เปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ด้วยพลาสมาชนิดต่าง ๆ ซึ่งตารางนี้ให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการใช้พลังงาน อัตราการไหล การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สำหรับแต่ละวิธี งานวิจัยที่ใช้พลาสมาแบบการคายประจุแบบโคโรนาโดดเด่นด้วยประสิทธิภาพในการสลายตัวของ CO_2 ที่สูงถึง 70% โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำเพียง 100 วัตต์และอัตราการไหลรวมที่สูงถึง 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพนี้

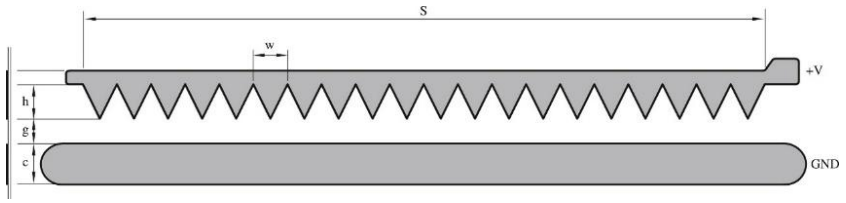
สูงกว่าวิธีอื่น ๆ ที่ระบุไว้ รวมถึงพลาสมาไมโครเวฟที่ 31.3%, พลาสมาความร้อนที่ 48.0%, การปล่อยประจุแบบ Gliding arc ที่ 9.0% และพลาสมาประเภท DBD ที่มีประสิทธิภาพการสลายตัวอยู่ในช่วง 43.1% ถึง 75.0%

ประสิทธิภาพสูงของวิธีใช้พลาสมาแบบการปล่อยประจุแบบโคโรนา โดยเฉพาะที่ระดับพลังงานต่ำและอัตราการไหลที่สูง แสดงถึงความมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพพลาสมาสำหรับการสลายตัวของ CO_2 การไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการบรรลุประสิทธิภาพสูง ชี้ให้เห็นว่าพารามิเตอร์เฉพาะที่ใช้ในวิธีการปล่อยประจุแบบโคโรนาเป็นสิ่งที่มีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่ใช้กำลังไฟฟ้าและอัตราการไหลที่สูงกว่า เช่น พลาสมาไมโครเวฟและพลาสมาความร้อน ซึ่งไม่สามารถบรรลุประสิทธิภาพเทียบเท่ากันได้ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับพารามิเตอร์ทั้งกำลังไฟฟ้าและอัตราการไหล

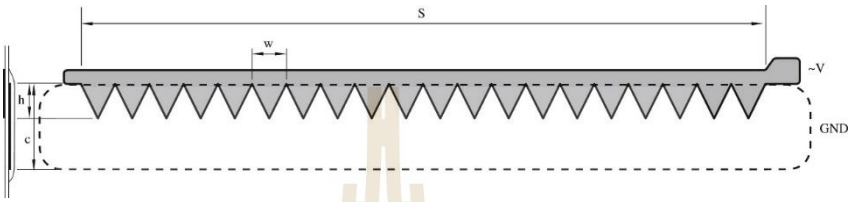
1.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบลักษณะของอิเล็กโทรดสำหรับเป็นตัวปล่อยประจุสำหรับการสลายตัวของ CO_2 มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก อิเล็กโทรดที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกโมเลกุล CO_2 ให้แตกตัวเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และออกซิเจนหรือสารประกอบอื่น ๆ ผ่านกระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า การออกแบบอิเล็กโทรดจำเป็นต้องคำนึงถึงรูปทรงและขนาดที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้า และการควบคุมทิศทางของประจุ วัสดุที่ใช้ในการออกแบบอิเล็กโทรดยังต้องมีความทนทานสูงเพื่อลดการสึกหรอและระบบมีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ การออกแบบที่เหมาะสมยังสามารถลดการเกิดอาร์คไฟฟ้า (Arc Discharge) ซึ่งอาจทำให้ระบบเสียหายหรือทำให้การสลายตัวของ CO_2 ไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง ดังนั้น การศึกษาและออกแบบอิเล็กโทรดสำหรับการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายต่อไป

จากงานวิจัยของ Belen และ Messanelli (Belen and Messanelli., 2015) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดและเปรียบเทียบลมไอออนิกที่เกิดจากเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona และ DBD (Dielectric Barrier Discharge) โดยใช้อิเล็กโทรดที่มีรูปทรงเป็นปลายแหลมหลายจุด (multi-tip) การวัดความเร็วของลมไอออนิกจากเครื่องกระตุ้นทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้น เนื่องจากความเร็วลมไอออนิกสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้หลายวิธี เช่น การปรับระยะห่างของอิเล็กโทรด ขนาด รูปร่าง รวมถึงรูปแบบของคลื่นไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรด โดยเฉพาะการใช้อิเล็กโทรดที่มีปลายแหลมหลายจุดบนขอบของอิเล็กโทรด

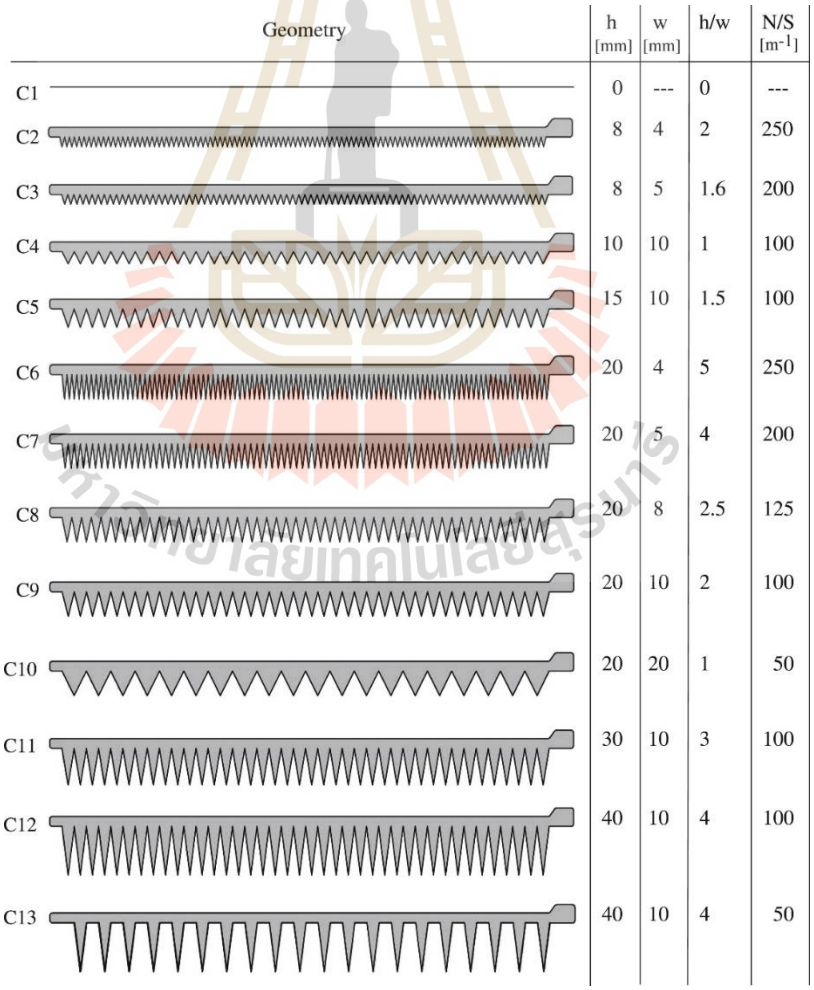
ในงานวิจัยนี้ได้เซตค่าการทดสอบเพื่อพิจารณาลักณษณะอิเล็กโทรดต่างๆ ของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona และ DBD ที่มีการใช้งานในการสร้างลมไอออนิก โดยมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของปลายแหลม (h/w) และจำนวนปลายแหลมต่อหน่วยความยาว (n) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 1.12, 1.13 และลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิกแสดงดังรูปที่ 1.14 และ 1.15



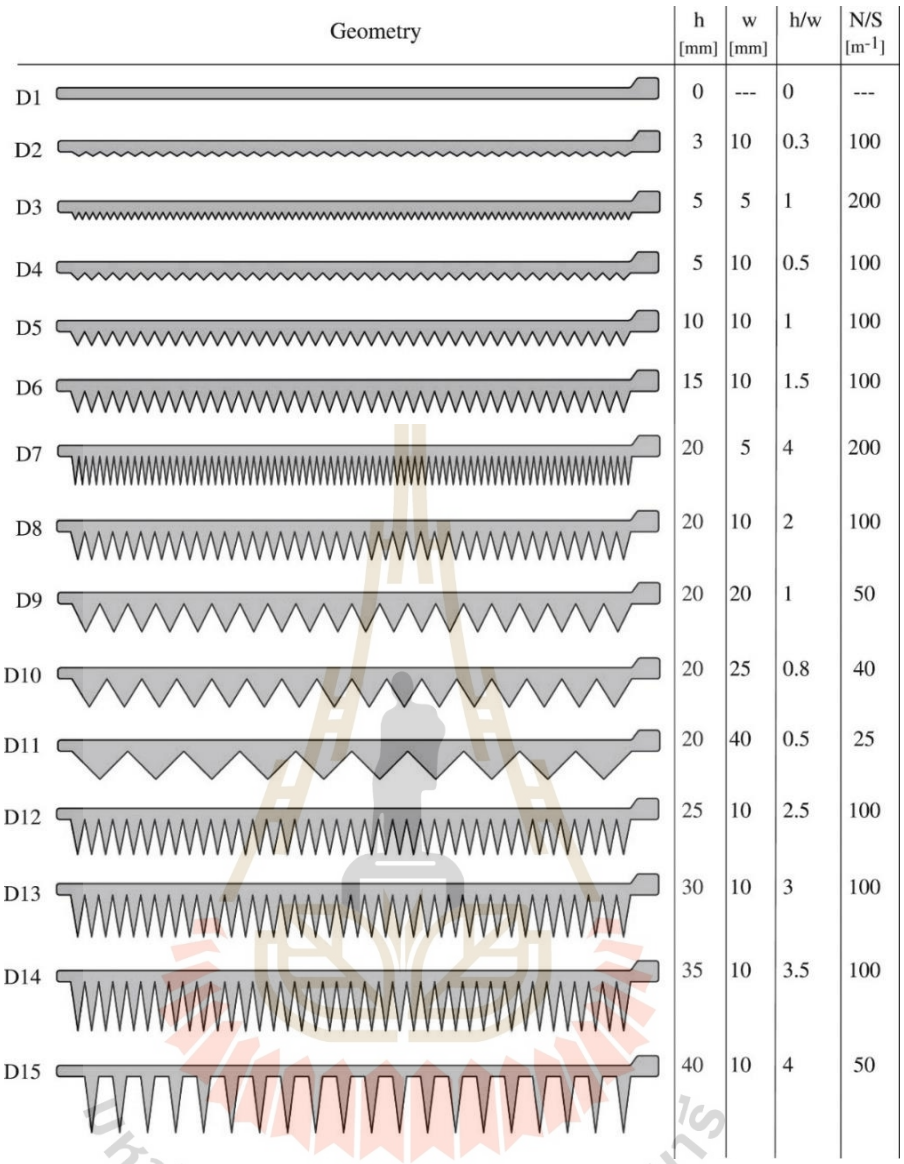
รูปที่ 1.12 ลักษณะอิเล็กโทรดของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ corona



รูปที่ 1.13 ลักษณะอิเล็กโทรดของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ DBD



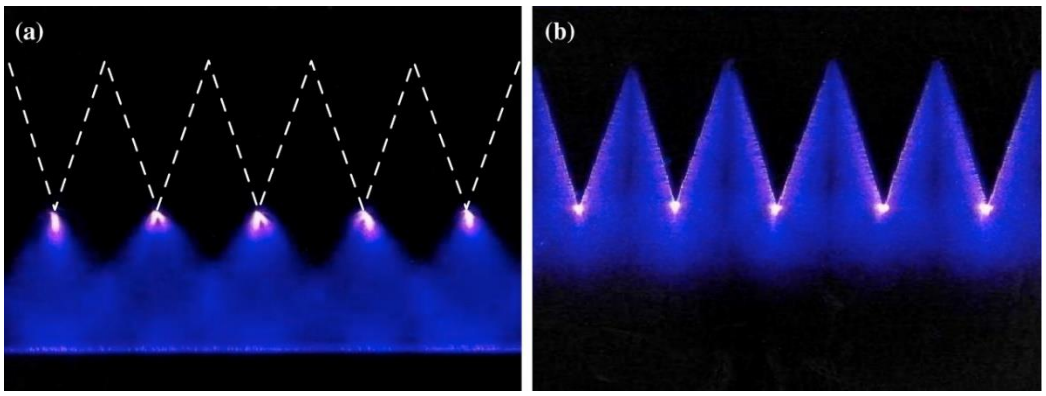
รูปที่ 1.14 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิกของการปล่อยประจุแบบ corona



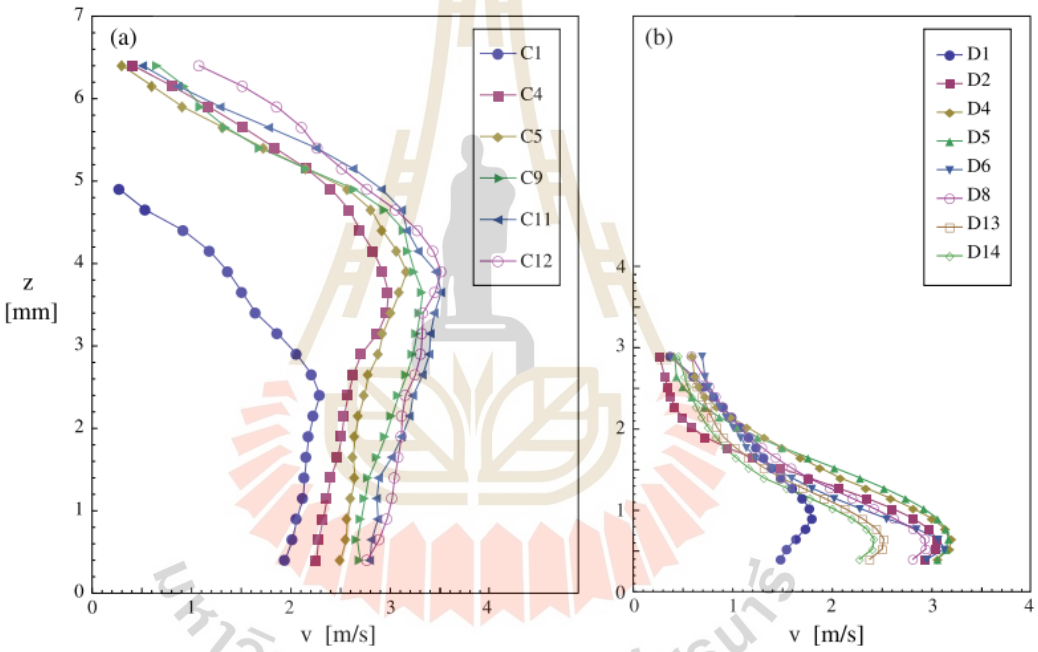
Geometry	h [mm]	w [mm]	h/w	N/S [m^{-1}]
D1	0	---	0	---
D2	3	10	0.3	100
D3	5	5	1	200
D4	5	10	0.5	100
D5	10	10	1	100
D6	15	10	1.5	100
D7	20	5	4	200
D8	20	10	2	100
D9	20	20	1	50
D10	20	25	0.8	40
D11	20	40	0.5	25
D12	25	10	2.5	100
D13	30	10	3	100
D14	35	10	3.5	100
D15	40	10	4	50

รูปที่ 1.15 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิกของการปล่อยประจุแบบ DBD

จากรูปที่ 1.14 และ 1.15 เป็นลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับวัดลมไอออนิกของการปล่อยประจุแบบ corona (C1 ถึง C13) และ DBD (D1 ถึง D15) ที่ใช้ในการทดลอง โดยแต่ละแบบมีการออกแบบขนาดและอัตราส่วนของปลายแหลมที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเกิดลมไอออนิก (ionic wind) ซึ่งในการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อค้นหาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างเครื่องกระตุ้นพลาสมาที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการสร้างลมไอออนิก ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1.16 และ 1.17



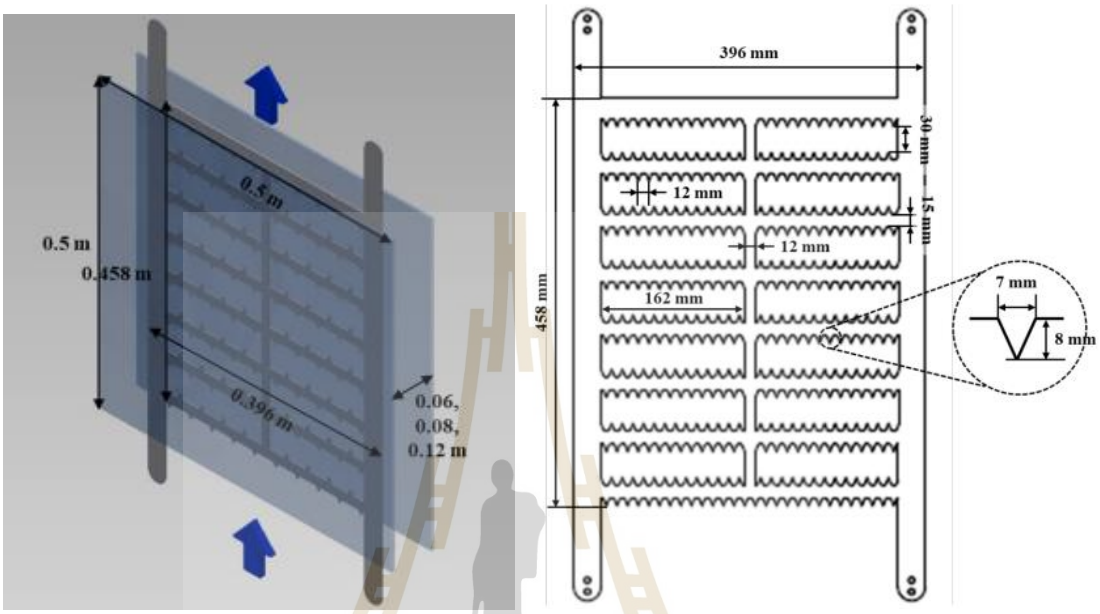
รูปที่ 1.16 ภาพถ่ายการทำงานของเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona และ DBD



รูปที่ 1.17 ผลการทดสอบที่วัดความเร็วลมไอออนิก (ionic wind velocity)

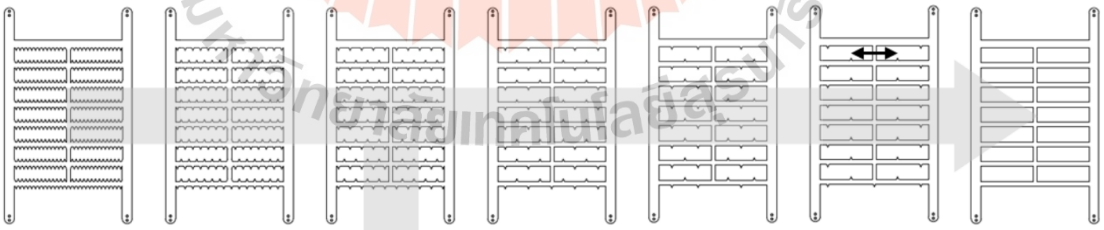
จากรูปที่ 1.17 แสดงถึงความแตกต่างของการเกิดลมไอออนิกระหว่างเครื่องกระตุ้นแบบ Corona และ DBD โดยพบว่าเครื่องกระตุ้นแบบ Corona ตอบสนองต่อการเพิ่มความคมของปลายแหลมได้อย่างชัดเจน เช่น C12 ที่สามารถสร้างความเร็วลมไอออนิกสูงสุดประมาณ 4.5 m/s ซึ่งสูงกว่าความเร็วลมของ C1 ที่ไม่มีปลายแหลมอย่างชัดเจน ในขณะที่เครื่องกระตุ้นแบบ DBD ไม่ได้แสดงการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมไอออนิกอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความคมของปลายแหลม โดยความเร็วลมสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 3 m/s ผลการทดสอบนี้แสดงถึงความแตกต่างในวิธีการสร้างและประสิทธิภาพของลมไอออนิกระหว่างเครื่องกระตุ้นทั้งสองประเภท โดยที่ Corona มีประสิทธิภาพดีกว่าในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเรขาคณิตของปลายแหลม

จากงานวิจัยของ Jin-Seon Kim และคณะ (Jin-Seon Kim et al., 2020) เป็นการศึกษาลักษณะอิเล็กโทรดรูปแบบต่าง ๆ สำหรับปล่อยประจุแบบโคโรนา ในการศึกษาได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยปรับเปลี่ยนตามรูปทรง ขนาด และระยะห่างของอิเล็กโทรด โดยลักษณะของการออกแบบแสดงดังรูปที่ 1.18



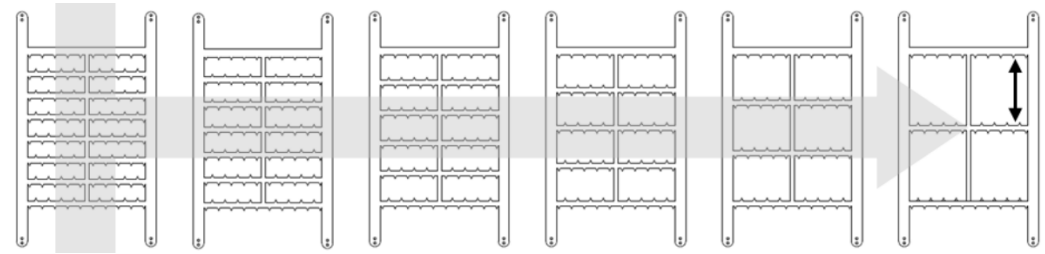
รูปที่ 1.18 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ออกแบบสำหรับปล่อยประจุโคโรนา

สำหรับเงื่อนไขของการทดสอบจะเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอิเล็กโทรดสำหรับปล่อยประจุ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ดังรูปที่ 1.19

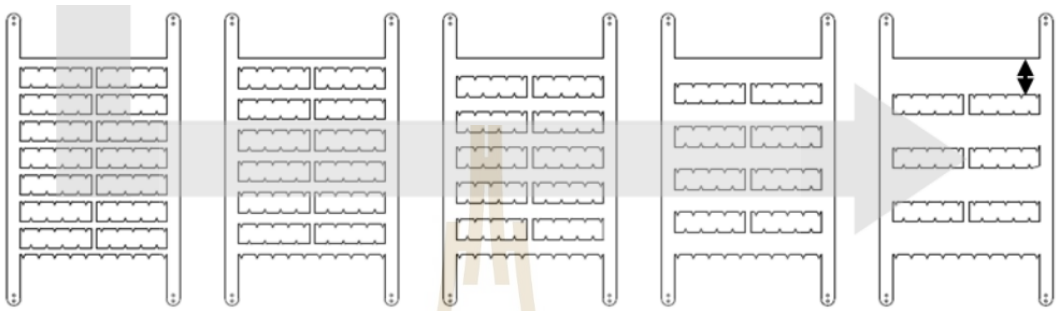


(ก)

รูปที่ 1.19 ลักษณะอิเล็กโทรดรูปแบบต่าง ๆ ก) เงื่อนไขระยะห่างแนวราบระหว่างอิเล็กโทรด (ข) เงื่อนไขระยะห่างตามแนวยาวระหว่างอิเล็กโทรด (ค) เงื่อนไขความสูงของตัวรองรับอิเล็กโทรด



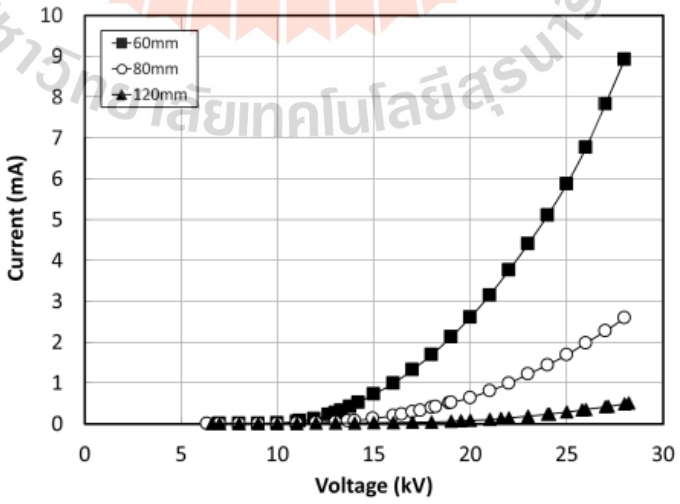
(ข)



(ค)

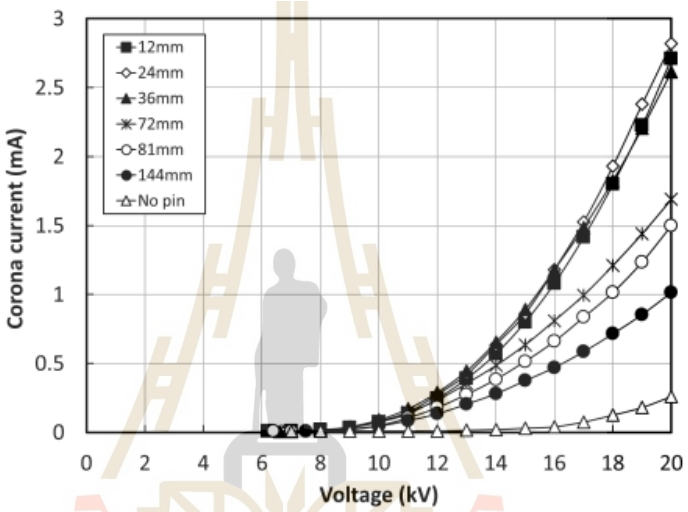
รูปที่ 1.19 ลักษณะอิเล็กโทรดรูปแบบต่าง ๆ ก) เงื่อนไขระยะห่างแนวราบระหว่างอิเล็กโทรด (ข) เงื่อนไขระยะห่างตามแนวยาวระหว่างอิเล็กโทรด (ค) เงื่อนไขความสูงของตัวรองรับอิเล็กโทรด (ต่อ)

สำหรับผลการทดสอบนี้ จะได้ทำการอธิบายผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไขอย่างละเอียด ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เพื่อให้เข้าใจถึงผลของการปรับระยะห่างเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพในการคายประจุ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1.20-1.23



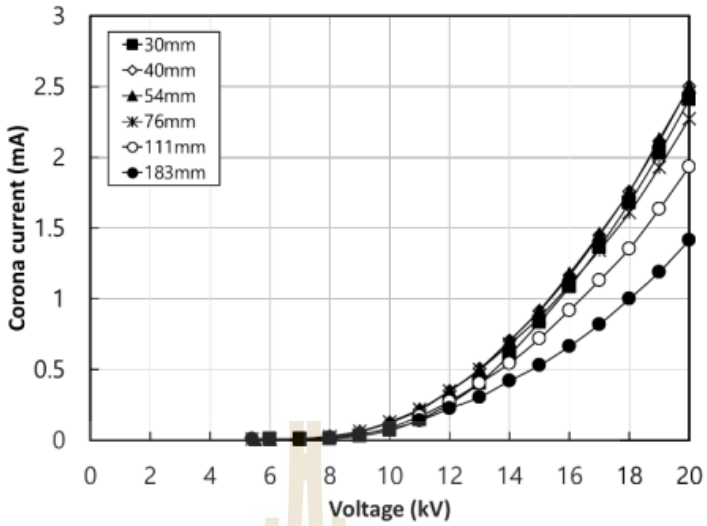
รูปที่ 1.20 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลท

จากรูปที่ 1.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Current) ที่เกิดขึ้นในขั้วไฟฟ้าคายประจุที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ระยะ 60 80 และ 120 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการคายประจุจะลดลง ซึ่งสะท้อนผ่านการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ช้าลง โดยระยะห่างที่ 60 มิลลิเมตร มีการคายประจุสูงที่สุด (กระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 9 mA ที่แรงดันไฟฟ้า 28 kV) ในขณะที่ระยะห่างที่ 120 มิลลิเมตร มีการคายประจุต่ำที่สุด (กระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 2 mA ที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน) ดังนั้นระยะห่างที่น้อยกว่าจะทำให้สนามไฟฟ้าเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพดีขึ้น



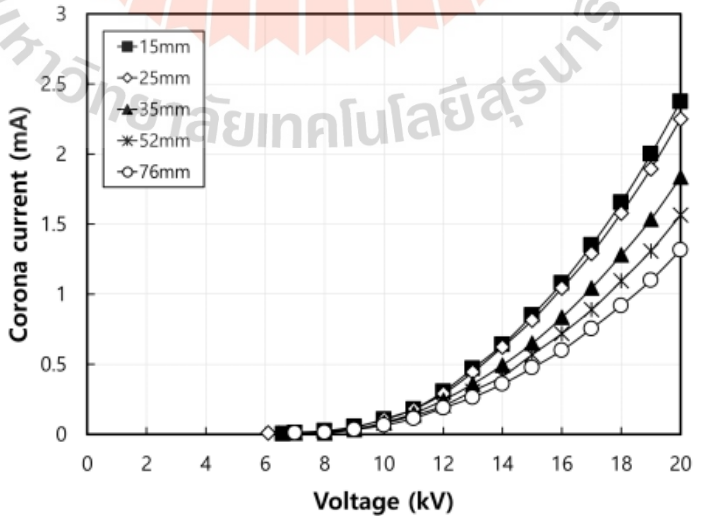
รูปที่ 1.21 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 1.21 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และกระแสโคโรนา (Corona current) ที่เกิดขึ้นจากการคายประจุในขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุต่าง ๆ ที่ระยะ 12 24 36 72 81 และ 144 มิลลิเมตร และกรณีไม่มีขั้วคายประจุ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุเพิ่มขึ้น กระแสโคโรนาจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคายประจุมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ระยะห่าง 12 มิลลิเมตร และลดลงตามลำดับเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น โดยกระแสโคโรนาสูงสุดที่ประมาณ 2.8 mA ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV ในระยะห่าง 12 มิลลิเมตร และต่ำสุดที่ประมาณ 0.4 mA ในกรณีที่ไม่มีขั้วคายประจุ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างที่เล็กลงส่งผลให้การคายประจุมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1.22 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุตามแนวยาวต่าง ๆ

จากรูปที่ 1.22 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสโคโรนา ที่เกิดขึ้นจากการคายประจุในขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างตามแนวยาวระหว่างขั้วคายประจุต่าง ๆ ที่ระยะ 30 40 54 76 111 และ 183 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อระยะห่างตามแนวยาวเพิ่มขึ้น กระแสโคโรนาจะลดลง โดยระยะห่าง 30 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาสูงสุดประมาณ 2.8 mA ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV ขณะที่ระยะห่าง 183 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาต่ำสุดประมาณ 1.5 mA ที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างที่สั้นกว่าจะทำให้การคายประจุมีประสิทธิภาพสูงกว่าและสามารถเพิ่มกระแสโคโรนาได้มากขึ้น



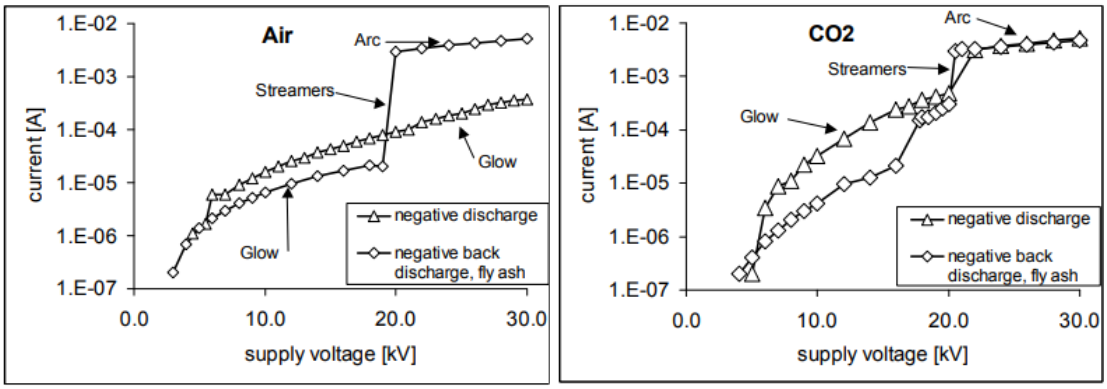
รูปที่ 1.23 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในกรณีของความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุต่าง ๆ

จากรูปที่ 1.23 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และกระแสโคโรนา (Corona current) ที่เกิดขึ้นจากการคายประจุในขั้วไฟฟ้าที่มีความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุต่าง ๆ ที่ระยะ 15 25 35 52 และ 76 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าเมื่อความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุเพิ่มขึ้น กระแสโคโรนาจะลดลง โดยความสูง 15 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาสูงสุดที่ประมาณ 2.6 mA ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV ขณะที่ความสูง 76 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาต่ำสุดที่ประมาณ 1.6 mA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคายประจุมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุน้อยลง

จากการศึกษางานวิจัยของ Jin-Seon Kim พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทและระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการคายประจุจะลดลง โดยระยะห่าง 60 มม. ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ประมาณ 9 mA ในขณะที่ระยะห่าง 120 มิลลิเมตร ให้กระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ประมาณ 2 mA และเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุเพิ่มขึ้นจาก 12 มิลลิเมตร เป็น 144 มิลลิเมตรกระแสโคโรนาจะลดลงจากประมาณ 2.8 mA เป็น 0.4 mA นอกจากนี้ ความสูงของตัวรองรับขั้วคายประจุที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้กระแสโคโรนาลดลงเช่นกัน โดยที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาสูงสุดที่ประมาณ 2.6 mA และความสูง 76 มิลลิเมตร ให้กระแสโคโรนาต่ำสุดที่ประมาณ 1.6 mA ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างและความสูงที่น้อยลงจะทำให้การคายประจุมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ แตกตัวเป็นสารประกอบอื่น ๆ การสลายตัวของ CO_2 ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสามารถนำไปสู่การลดปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศได้ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยน CO_2 ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า เช่น เชื้อเพลิงสังเคราะห์หรือสารเคมีที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ ดังนั้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและการสลายตัวของ CO_2 จึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืนสำหรับการจัดการกับปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการสร้างพลังงานสะอาดในอนาคตได้

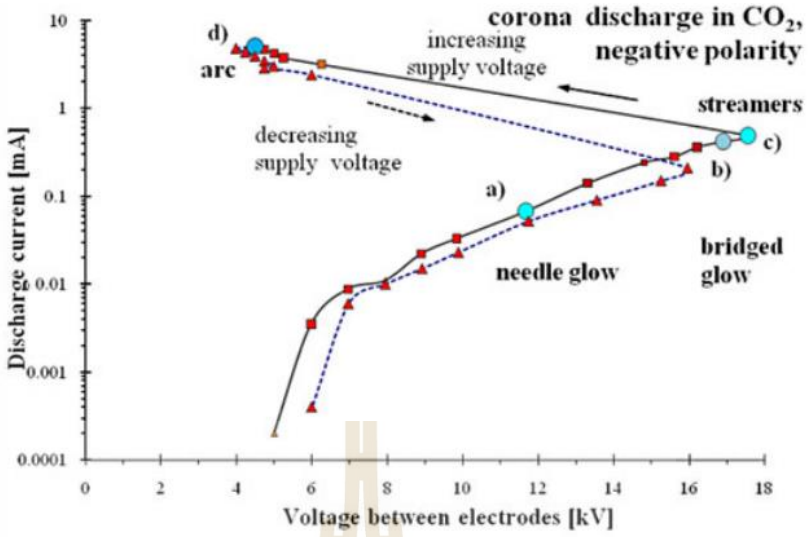
จากงานวิจัยของ Jaworek และคณะ (Jaworek et al., 2008) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของการเกิด discharge แบบ corona ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การทดลองในห้องทดสอบที่มีการสร้างสภาวะจำลองเพื่อวิเคราะห์การเกิด discharge ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่างกัน โดยผลการทดสองได้แบ่งออกเป็นช่วงหลัก ได้แก่ glow, streamers และ arc discharges ดังแสดงในรูปที่ 1.24



รูปที่ 1.24 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของการเกิด forward และ back discharges ในอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 1.24 แสดงผลลัพธ์ของการเกิด negative discharge และ negative back discharge ในอากาศ (Air) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีการปกคลุมแผ่นอิเล็กโทรดด้วยเถ้าลอย (fly ash) สำหรับในอากาศการเกิด negative discharge จะเริ่มที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ โดยกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เริ่มจาก glow discharge ไปสู่ streamer discharge และสุดท้ายเป็น arc discharge ที่แรงดันสูงขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่การเกิด negative back discharge ในอากาศจะแสดงกระแสในช่วง glow discharge ต่ำกว่าการเกิด negative discharge ปกติ แต่กระแสจะเพิ่มขึ้นเร็วขึ้นในช่วง streamer discharge และ arc discharge ที่แรงดันสูงกว่า (มากกว่า 20 kV) ในขณะเดียวกัน ในส่วนของ CO_2 การเกิด negative discharge จะเกิดคล้ายกับในอากาศ แต่กระแสจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในช่วงแรก และการเกิดจาก glow discharge ไปสู่ streamer discharge และ arc discharge ต้องใช้แรงดันที่สูงกว่า ขณะที่ negative back discharge ใน CO_2 จะแสดงให้เห็นว่าการเกิด arc discharge ต้องใช้แรงดันที่สูงกว่าเล็กน้อย และมีความเสถียรมากกว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น โดยสรุป อากาศและ CO_2 มีการเกิด discharge ที่คล้ายกัน แต่ในอากาศกระแสจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในช่วงแรก และการมีเถ้าลอยปกคลุมแผ่นอิเล็กโทรดทำให้การเกิด negative back discharge ต้องใช้แรงดันสูงกว่าในการเกิด arc discharge โดยเฉพาะใน CO_2 ซึ่งความเสถียรของ arc discharge จะดีกว่าในอากาศ

จากงานวิจัยของ Tadeusz Czech และคณะ (Tadeusz Czech et al., 2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการคายประจุโคโรนาในบรรยากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์คุณลักษณะทางสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยแสงและการดูดกลืนแสงของสารภายใต้การคายประจุ เพื่อทำความเข้าใจถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาที่เกิดจากการคายประจุ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการคายประจุโคโรนา ดังแสดงในรูปที่ 1.25



รูปที่ 1.25 แสดงกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของการคายประจุแบบโคโรนาที่เกิดขึ้นในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 1.25 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดขึ้น ซึ่งเริ่มจากจุดที่เกิดการเรืองแสงรอบๆ อิเล็กโทรดที่เรียกว่า "needle glow" ซึ่งบ่งบอกถึงการเริ่มต้นของกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น การเรืองแสงจะครอบคลุมพื้นที่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งหมด ("bridged glow") และหากเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต่อไป จะเกิด "streamers" ซึ่งเป็นการคายประจุที่เกิดเป็นเส้นแสงสว่างครอบคลุมช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด สุดท้ายเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงพอ จะเกิด "arc" ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงรูปถ่ายรูปที่ 1.26

a) needle glow	b) bridged glow	c) breakdown streamers	d) arc
U_{supply}=12 kV, $U_{electrodes}$= 11.67 kV, $I_{discharge}$=0.07 mA	U_{supply}=20 kV, $U_{electrodes}$= 17.5 kV, $I_{discharge}$=0.5 mA	U_{supply}=20.5 kV, $U_{electrodes}$= 17.75 kV, $I_{discharge}$=0.55 mA	U_{supply}=30 kV, $U_{electrodes}$= 4.5 kV, $I_{discharge}$=5.1 mA
Exposure: 15 s	Exposure: 5 s	Exposure: 1 s	Exposure: 1 s

รูปที่ 1.26 แสดงภาพถ่ายของการคายประจุโคโรนาขั้วลบใน CO_2 ภายใต้ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 1.26 แสดงภาพถ่ายของการคายประจุโคโรนาขั้วลบใน CO_2 ภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของการคายประจุเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า เริ่มจากการเรืองแสงรอบ ๆ ปลายเข็มอิเล็กโทรดที่แรงดันไฟฟ้า 12 kV ซึ่งแสดงถึงการเริ่มต้นของกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ("needle glow") เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 20 kV การเรืองแสงจะขยายตัวครอบคลุมช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ("bridged glow") และเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 20.5 kV จะเกิดสตรีมเมอร์ (streamers) ซึ่งเป็นเส้นแสงสว่างที่เชื่อมช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ("breakdown streamers") สุดท้ายเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 30 kV จะเกิดการคายประจุอาร์ก (arc) ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความเข้มสูงที่สุด โดยในภาพถ่ายทั้งหมดจะเห็นเงาสะท้อนของคอลัมน์เรืองแสงบนพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรด

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาและนำเสนอเกี่ยวกับการสลายตัวของ CO_2 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา พบว่าพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (Non-Thermal Plasma: NTP) โดยเฉพาะการปล่อยประจุแบบโคโรนา มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัว CO_2 เนื่องจากใช้พลังงานต่ำและสามารถทำงานได้ที่อัตราการไหลสูง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปรับสภาพพลาสมาสำหรับการสลายตัวของ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพารามิเตอร์เฉพาะที่ใช้ในการปล่อยประจุแบบโคโรนาถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ สำหรับการออกแบบอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นตัวปล่อยประจุในการสลายตัวของ CO_2 พบว่าอิเล็กโทรดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วคายประจุและระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทน้อยที่สุด จะช่วยเพิ่มกระแสโคโรนาและส่งผลให้การสลายตัวของ CO_2 มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวกับระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการสลายตัวของ CO_2 ยังมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ในบรรยากาศได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการปล่อยประจุแบบโคโรนาในการสลายตัว CO_2 โดยออกแบบอิเล็กโทรดให้เป็นรูปแบบปลายแหลม และกำหนดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัวของ CO_2 ต่อไป

1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อสมมติฐานเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ประกอบไปด้วย แหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ผลกระทบต่อสุขภาพ คุณสมบัติของพลาสมา ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า ทฤษฎีการปล่อยประจุโคโรนา ทฤษฎีพื้นฐานวงจรทวีแรงดัน และหลักการแตกตัวของ CO_2 ด้วยพลาสมา

บทที่ 3 การวิเคราะห์และการออกแบบระบบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา ซึ่งจะประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ลักษณะของรูปแบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม การวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างระยะห่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท

การออกแบบและวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ทดสอบและลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลมและการปรับระยะห่างของแผ่นเพลท

บทที่ 4 การทดสอบและการอภิปรายผล ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบทดสอบการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Glow Streamer และ Electric Field Strength ผลการทดสอบแต่ละความเข้มสนามไฟฟ้าที่เวลาเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบที่กำลังงานเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และผลการทดสอบของความเข้มข้นของ CO_2 ต่อประสิทธิภาพการสลายตัวและการเกิดผลพลอยได้ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า Electric Field Strength ผลการทดสอบการแตกตัวของ CO_2 ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ผลการเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้ และการเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ในพลาสมาแบบต่าง ๆ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ รวมถึงปัญหาและข้อเสนอแนะที่พบจากการทดลอง ตลอดจนแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ โดยการใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความสนใจในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเป็นพลาสมา โดยพลาสมาสามาแบ่งประเภทแยกเป็นส่วนหลัก ๆ ได้แก่ พลาสมาความร้อน และพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน ซึ่งแต่ละประเภทจะแบ่งส่วนย่อยได้อีกมากมาย ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้มีความสนใจจะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เป็นประเภทพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน โดยเลือกช่วงของสภาวะการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้าแบบการคายประจุแบบโคโรนา เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาวน์ โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไปยังอากาศที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง และเกิดการแตกตัวของไอออนอากาศรอบขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งรูปแบบของการคายประจุแบบโคโรนาจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของขั้วอิเล็กโทรด รวมถึงระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้วย ดังนั้นจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของรูปแบบสนามไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบของอิเล็กโทรดปลายแหลมจัดอยู่ในกลุ่มของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การสร้างความเข้มสนามไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะการคายประจุแบบโคโรนาได้ จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่สูง จึงจำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีพื้นฐานวงจรทวีแรงดัน และเมื่อทราบถึง คุณสมบัติของพลาสมา ทฤษฎีการปล่อยประจุโคโรนา ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า และการสร้างแรงดันสูงแล้ว ในส่วนของการนำความเข้มสนามไฟฟ้าไปสลายตัวจำเป็นต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะพื้นฐานของพลาสมาที่ใช้ในการแตกตัว CO_2 กลไกการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการแตกตัวด้วยวิธีต่างๆ เช่น การแตกตัว CO_2 โดยการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนโดยตรง การแตกตัว CO_2 โดยการกระตุ้นแบบสั่น และการแตกตัว CO_2 โดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิพลาสมาสูง ซึ่งในการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมาที่ด้วยวิธีการกระตุ้นแบบต่างๆ พลาสมาจะสลายตัว CO_2 เป็น CO และ O และจำเป็นต้องทราบการใช้พลังงานสำหรับการแตกตัว CO_2 รวมไปถึงพารามิเตอร์ต่างที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ซึ่งส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของแต่ละส่วน รวมถึงการประยุกต์ใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ออกแบบ และทดสอบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน โดยจะเน้นเฉพาะส่วนที่มีประโยชน์หรือเกี่ยวข้องกับการวิจัย เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจน ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความเข้มสูงในระยะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศต่อไป

2.2 แหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

2.2.1 แหล่งที่มาจากภายนอกอาคาร

แหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาจากแหล่งธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ แหล่งที่มาจากธรรมชาติเช่น การหายใจของสัตว์และพืช การย่อยสลายของสารอินทรีย์ การปล่อยก๊าซจากพื้นผิวน้ำ ไฟป่า และการปะทุของภูเขาไฟ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาแหล่งธรรมชาติถูกกำจัดออกจากอากาศโดยการดูดซึมลงในน้ำและการสังเคราะห์แสงของพืช ส่วนแหล่งที่มาจากการกระทำของมนุษย์ มาจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เช่น การตัดไม้ทำลายป่า และกระบวนการทางอุตสาหกรรมบางอย่าง โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลสำหรับการผลิตไฟฟ้า การขนส่ง และอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นแหล่งหลักของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.2 แหล่งที่มาจากภายในอาคาร

แหล่งที่มาหลักของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารคืออากาศที่ถูกหายใจออกจากผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ คนทั่วไปจะผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 15 ลิตรต่อชั่วโมงขณะพักผ่อน และประมาณ 45 ลิตรต่อชั่วโมงขณะทำกิจกรรมระดับปานกลาง ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคารที่มาจากการหายใจของผู้อยู่อาศัยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น จำนวนคนในอาคาร ระดับกิจกรรมทางกาย ปริมาณอากาศต่อคน และระยะเวลาที่อยู่ในอาคาร ดังนั้นสถานที่ที่มีความหนาแน่นของผู้อยู่อาศัยสูง เช่น โรงเรียน อาคารสำนักงาน และศูนย์ดูแลเด็ก มีแนวโน้มที่จะมีระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการระบายอากาศไม่เพียงพอ

ข้อมูลจาก Health Canada ที่รวบรวมจากบ้านในหลายเมืองในแคนาดา แสดงว่าระดับ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับจำนวนผู้อยู่อาศัยแม้บางครั้งอาจไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ บ้านที่มีสัตว์เลี้ยงก็มีระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเล็กน้อย และแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารอื่น ๆ มาจากอุปกรณ์การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่มีการระบายอากาศหรือระบายอากาศไม่ดี เช่น เตาแก๊ส เครื่องทำความร้อน และการสูบบุหรี่

เครื่องทำน้ำอุ่นที่มีการระบายอากาศถูกต้องคาดว่าจะไม่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากนัก แต่หากความดันอากาศในอาคารต่ำกว่าอากาศภายนอก อุปกรณ์เผาไหม้อาจระบายก๊าซเข้าสู่บ้านโดยตรง การใช้เตาแก๊สหรือเครื่องทำความร้อนเชื้อเพลิงสามารถเพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในบ้านได้อย่างมาก เช่น เตาแก๊สสามารถทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง 3,000 ppm การใช้เตาอบทุกวันทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการใช้เครื่องทำความร้อนที่ใช้น้ำมันก๊าดสามารถทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง 4,500 ppm ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทุกกรณีของระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิน 1,000 ppm มาจากแหล่งการเผาไหม้

การสูบบุหรี่ก็ยังเป็นแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร การสูบบุหรี่สองมวนในหนึ่งชั่วโมงเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง 9 ถึง 27 ppm และการสูบบุหรี่สิบมวนในหกชั่วโมงสามารถเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ถึงประมาณ 1,900 ppm อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่สามารถระบุได้ว่าสัดส่วนของการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์มาจากการสูบบุหรี่เพียงอย่างเดียวหรือจากแหล่งอื่น ๆ ด้วย เช่น การหายใจของผู้อยู่อาศัย

2.3 ผลกระทบด้านสุขภาพ

ส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบต่อสุขภาพในมนุษย์หลังจากการสูดดมหรือสัมผัสคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลานาน โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คาดว่าจะพบในสภาพแวดล้อมภายในอาคารตามปกติ และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นเนื่องจากอาจเกี่ยวข้องกับสถานการณ์การสัมผัสที่ไม่ปกติ การศึกษาทางวิชาการหลายชิ้นชี้ให้เห็นว่าการสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงเป็นเวลานานสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพหลายประการ เช่น การระคายเคืองทางเดินหายใจ ภาวะกรดเกินในเลือด (acidosis) และการเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด การสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงกว่า 1,000 ppm สามารถทำให้เกิดอาการเช่น ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ และไม่มีสมาธิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบประสาทและการทำงานของสมอง นอกจากนี้ การสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงกว่า 5,000 ppm เป็นเวลานานอาจทำให้เกิดภาวะกรดเกินในเลือด ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์และระบบต่างๆ ในร่างกาย โดยเฉพาะการแลกเปลี่ยนก๊าซในปอดและการทำงานของเอนไซม์ การศึกษาทางวิชาการยังพบว่าการสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงมาก เช่น ในสถานที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดี สามารถทำให้เกิดอาการรุนแรงเช่น ภาวะขาดอากาศหายใจ ความดันโลหิตสูง และภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ ซึ่งสามารถเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 ผลกระทบด้านเคมีในเลือด

การลดลงของค่า pH ในเลือด (ภาวะกรดเกิน) ถูกพบในผู้ที่สัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง (7,000 ถึง 15,000 ppm เป็นเวลาอย่างน้อย 20 วัน) ในการศึกษาที่ดำเนินการในสภาพแวดล้อมของเรือดำน้ำ ซึ่งการลดลงของค่า pH นี้เกิดจากการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ส่งผลให้เลือดมีความเป็นกรดมากขึ้น ปกติแล้วระบบการควบคุมสมดุลกรด-ด่างในร่างกาย เช่น การหายใจและการทำงานของไต จะพยายามปรับสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไประบบเหล่านี้จะไม่สามารถรักษาสมดุลได้ ในกรณีทั่วไปค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศภายในอาคารที่พักอาศัยมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3,500 ppm เนื่องจากระดับที่สูงกว่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพ โดยเฉพาะในระบบหายใจและระบบประสาท การศึกษาเพิ่มเติมชี้ให้เห็นว่าการสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงมากเป็นเวลานานยังสามารถทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะกรดเกินในเลือด (acidosis) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์และระบบต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น ลดประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนก๊าซในปอดและการทำงานของเอนไซม์ในเซลล์

2.3.2 ผลกระทบด้านระบบทางเดินหายใจ

ผลกระทบจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับอาการทางเดินหายใจ ผู้ที่สัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 800 ppm มีโอกาสที่จะเกิดอาการทางเดินหายใจและเยื่อเมือก เช่น การระคายเคืองตา เจ็บหรือคอแห้ง คัดจมูก น้ำมูกไหล จาม และไอมากกว่าผู้ที่สัมผัสในระดับต่ำกว่า เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถกระตุ้นการอักเสบของเยื่อ

เมือกในระบบทางเดินหายใจ เมื่อสัมผัสความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่า 1,000 ppm จะเชื่อมโยงกับความเสี่ยงที่สูงขึ้นในการเกิดอาการจมูกอักเสบ เช่น จาม น้ำมูกไหล หรือจมูกอุดตัน เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำให้เยื่อบุทางเดินหายใจระคายเคืองมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทุก ๆ 100 ppm ยังเพิ่มโอกาสในการเกิดอาการทางเดินหายใจหรือเยื่อเมือกอื่นๆ เช่น ตาแห้ง เจ็บคอ ไซนัส แน่นหน้าอก จาม ไอ เสียงแหบ และจมูกอักเสบ ซึ่งเป็นผลจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มความเป็นกรดในเลือด ทำให้เกิดการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันมากขึ้น เมื่อมีการสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่สูงมาก ๆ เช่น ระดับ 50,000 ถึง 80,000 ppm อย่างเฉียบพลัน จะทำให้หายใจยากขึ้น หายใจติดขัดหรือหายใจไม่สะดวก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดส่งผลให้การแลกเปลี่ยนก๊าซในปอดลดลง ระดับสูงกว่า 350,000 ppm ทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก อาจทำให้รู้สึกแสบหรือคันในจมูก และที่ระดับ 700,000 ppm จะทำให้เกิดภาวะขาดอากาศหายใจ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะไปแทนที่ออกซิเจนในอากาศ ทำให้ร่างกายได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลให้เกิดการทำงานของระบบประสาทและหัวใจลดลง และอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้

2.3.3 ผลกระทบด้านทางระบบประสาท

ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อระบบประสาทและประสิทธิภาพการทำงาน ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1,000 ppm ส่งผลเสียต่อการตัดสินใจและการทำงาน รวมถึงลดคุณภาพอากาศที่รู้สึกได้ การสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับ 6,000 ถึง 45,000 ppm เป็นเวลานาน ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ เหนื่อยล้า การมองเห็นไม่ชัดเจน การรับรู้ความรู้สึกและการเคลื่อนไหวลดลง และเพิ่มความวิตกกังวล โดยเฉพาะในผู้ที่มีความผิดปกติทางความวิตกกังวล ซึ่งได้รับการยืนยันจากการศึกษาที่พบว่าความเข้มข้นสูงของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถกระตุ้นระบบประสาทส่วนกลางให้ตอบสนองต่อภาวะขาดออกซิเจน ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง 50,000 ถึง 80,000 ppm ทำให้เกิดอาการทางเดินหายใจและลดการส่งอากาศไปยังปอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูงมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบหายใจและการแลกเปลี่ยนก๊าซ ระดับที่สูงมากกว่า 150,000 ppm สามารถทำให้หมดสติและเกิดอาการชักเนื่องจากการขาดออกซิเจนในสมอง และระดับที่สูงมากกว่า 350,000 ppm อาจทำให้เกิดการระคายเคืองจมูกและภาวะขาดอากาศหายใจได้

2.3.4 ผลกระทบด้านระบบหัวใจและหลอดเลือด

การสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องที่ไม่มีการระบายอากาศเป็นเวลาหลายชั่วโมง ทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดเพิ่มขึ้น ความแปรปรวนของอัตราการเต้นของหัวใจเปลี่ยนแปลง และการไหลเวียนเลือดที่ปลายเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เชื่อมโยงกับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และฝุ่นละออง (PM) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CO_2 ในเลือดสามารถกระตุ้นระบบประสาทอัตโนมัติให้ปรับอัตราการเต้นของหัวใจและการไหลเวียนเลือด การสัมผัส CO_2 ที่ 1,000 และ 3,000 ppm ทำให้อัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CO_2 สามารถกระตุ้นตัวรับในสมองที่ควบคุมการหายใจและการทำงานของหัวใจ การสัมผัสกับ CO_2 ในระดับสูง 7,000 หรือ 12,000 ppm ทำให้การทำงานของหัวใจลดลงเนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงซึ่งมีผลต่อการขนส่งออกซิเจนในร่างกาย นอกจากนี้ การสัมผัส

คาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูง 50,000 ถึง 80,000 ppm ยังทำให้ความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้น และใจสั่น เนื่องจาก CO_2 มีผลกระทบโดยตรงต่อระบบประสาทและการหดตัวของหลอดเลือด และในระดับความเข้มข้นที่สูงมาก 300,000 ppm ทำให้เกิดภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะเนื่องจากการขาดออกซิเจนในกล้ามเนื้อหัวใจ

ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในมนุษย์ได้โดยเป็นการรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบต่อสุขภาพและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในการศึกษามนุษย์

ผลลัพธ์ด้านสุขภาพ	**ระดับความเข้มข้นของ CO_2 (ppm)**	**ผลกระทบ**
ผลต่อระบบทางเดินหายใจหรืออาการของเยื่อเมือก	876	การระคายเคืองตา เจ็บหรือคอแห้ง คัดจมูก น้ำมูกไหล จาม และไอ
	655	หายใจลำบาก
	1000	ไอแห้ง จมูกอักเสบ น้ำมูกไหลหรืออุดตัน
	467-2,800	เจ็บคอแห้ง
	750-2,100	การระคายเคืองจมูกจากภูมิแพ้
	907-4,113	หายใจเสียงหวีด
ผลกระทบต่อสรีรวิทยา	809	ปวดหัว, เหนื่อยล้า
	984	ขาดสมาธิ
	352-1,591	ขาดสมาธิ, เหนื่อยล้า
	467-2,800	เหนื่อยล้า, เวียนหัว
	750-2,100	เหนื่อยล้า
	1500	ปวดหัว, เวียนหัว, หนักหัว, เหนื่อยล้า
	2,260	เหนื่อยล้า
	2,756	ปวดหัว, ง่วงนอน
	3,000	ปวดหัว, เหนื่อยล้า, ง่วงนอน
	5,000	เหนื่อยล้า
	6,000-45,000	ปวดหัว, เหนื่อยล้า, การมองเห็นไม่ชัด, การไหลเวียนเลือดในสมองเพิ่มขึ้นชั่วคราว
ผลกระทบต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด	7,000-45,000	ลดความสามารถในการแพร่ของ CO, การทำงานของหัวใจลดลง, อัตราการเต้นของหัวใจและการหายใจเพิ่มขึ้นชั่วคราว
ผลกระทบต่อเคมีของเลือด	7,000 ขึ้นไป	ภาวะกรดเกิน

2.4 คุณสมบัติของพลาสมา

คำว่า ‘พลาสมา’ ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Irving Langmuir ในปี 1928 พลาสมาเป็นก๊าซที่มีการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวในก๊าซนั้นหลุดออกจากอะตอม ทำให้เกิดไอออนที่มีประจุบวก ระดับการแตกตัวเป็นไอออนในพลาสมาสามารถแตกต่างกันได้ ตั้งแต่ก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนอย่างเต็มที่ (100%) ไปจนถึงก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนบางส่วน (เช่น 10^{-4} - 10^{-6}) นอกจากไอออนที่มีประจุบวกและประจุลบแล้ว พลาสมายังประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นกลางจำนวนมาก เช่น อะตอม โมเลกุล ราดิคัล และอนุภาคที่ถูกกระตุ้นต่าง ๆ อนุภาคที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้สามารถปล่อยแสงออกมา ที่สำคัญยิ่งไปกว่านั้น อนุภาคทั้งหมดเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากัน ทำให้พลาสมาเป็นสภาวะเคมีที่มีความซับซ้อนและมีปฏิกิริยาสูง ซึ่งมีศักยภาพในการใช้งานในหลาย ๆ ด้าน

พลาสมามักถูกเรียกว่า ‘สถานะที่สี่ของสสาร’ เนื่องจากสสารเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนสภาพตามลำดับคือ ของแข็ง, ของเหลว, ก๊าซ และสุดท้ายเป็นพลาสมา แม้ว่าพลาสมาจะไม่เป็นที่รู้จักเท่าสถานะอื่น ๆ ของสสาร แต่กว่า 99% ของสสารที่มองเห็นได้ในจักรวาลอยู่ในสถานะพลาสมา เช่น ดวงอาทิตย์ รวมถึงปรากฏการณ์ทางธรรมชาติหลายอย่างที่ปล่อยแสง เช่น Saint Elmo's fire, ฟ้าผ่า , red sprites, แสงเหนือและแสงใต้ นอกจากนี้ พลาสมาที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติใกล้โลกได้แก่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ และชั้นแมกนีโตสเฟียร์

พลาสมาที่มนุษย์สร้างขึ้นสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลัก กลุ่มแรกคือพลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาฟิวชัน ซึ่งเป็นพลาสมาที่แตกตัวเป็นไอออนทั้งหมด เช่น ใน tokomaks, stellarators, plasma pinches และ focuses กลุ่มที่สองคือพลาสมาที่แตกตัวเป็นไอออนบางส่วนหรือ gas discharges

การแบ่งย่อยอีกประเภทคือการพิจารณาว่าพลาสมาอยู่ในสมดุลความร้อนหรือไม่ อุณหภูมิในพลาสมาถูกกำหนดโดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคต่าง ๆ (อิเล็กตรอน, อนุภาคที่เป็นกลาง, ไอออน) และระดับอิสระที่เกี่ยวข้อง (การเคลื่อนที่เชิงแปล, การหมุน, การสั่นสะเทือน และการกระตุ้นทางอิเล็กทรอนิกส์) พลาสมาที่มีอุณหภูมิของอนุภาคทั้งหมดเท่ากันในพื้นที่หนึ่งจะถูกเรียกว่า ‘พลาสมาความร้อน’ (thermal plasmas) หรือ ‘สมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่’ (local thermodynamic equilibrium, LTE) ส่วนพลาสมาที่มีอุณหภูมิหลากหลายและไม่อยู่ในสมดุลอุณหพลศาสตร์จะถูกเรียกว่า ‘พลาสมาไม่ร้อน’ (non-thermal plasmas) หรือ ‘สมดุลอุณหพลศาสตร์ไม่เฉพาะที่’ (non-local thermodynamic equilibrium, non-LTE)

2.4.1 พลาสมาความร้อน

พลาสมาความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้สองวิธี คือ ที่อุณหภูมิสูง (4000 K ถึง 20,000 K) หรือที่ความดันก๊าซสูง ในวิธีแรก อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในระหว่างการเคลื่อนที่ และสูญเสียพลังงานเล็กน้อยในระหว่างการชนกับอนุภาคหนัก (เช่น โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ) การชนกันเหล่านี้หลายครั้งเรียกว่า ‘ความร้อนแบบจูล’ (Joule heating) ทำให้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและอนุภาคหนักเข้าสู่สมดุล และในวิธีที่สอง ที่ความดันสูง เส้นทางเฉลี่ยก่อนการชนกันจะสั้นลง ทำให้เกิดการชนกันบ่อยขึ้นและการแลกเปลี่ยนพลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น สัดส่วนของอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้า (E) กับความดัน (p) ยกกำลังสอง หรือ $(E/P)^2$ จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิในกระบวนการปลดปล่อยประจุก๊าซ

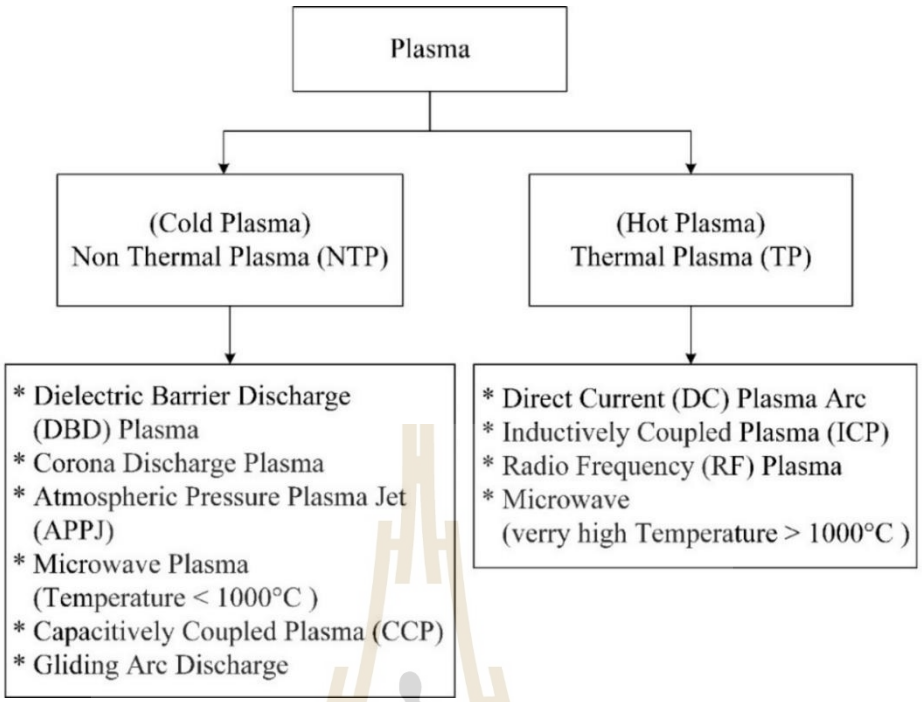
2.4.2 พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน

วิธีที่ง่ายที่สุดในการสร้างพลาสมาไม่ร้อนคือการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดสองตัวที่ขนานกันในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีแก๊สอยู่ ความต่างศักย์นี้สร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้แก๊สเกิดการสลายตัวบางส่วนเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดบวก (แอโนด) และเมื่อชนกับโมเลกุลของแก๊สจะเกิดการแตกตัว การกระตุ้น และการแยกตัว ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออนใหม่ ไอออนถูกเร่งไปยังอิเล็กโทรดลบ (แคโทด) และทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ การชนกันที่ทำให้เกิดการกระตุ้นจะสร้างโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น ซึ่งจะปล่อยแสงเมื่อกลับสู่สถานะพื้นฐาน การชนกันที่ทำให้เกิดการแยกตัวจะสร้างราดิคัล ซึ่งสามารถสร้างสารประกอบใหม่ได้ง่าย

2.4.3 พลาสมาอุ่น

พลาสมาอุ่น (Warm plasma) เป็นประเภทของพลาสมาที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างพลาสมาแบบความร้อนและพลาสมาแบบไม่ร้อน ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติร่วมกันของทั้งสองแบบ พลาสมาอุ่นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการแปลงก๊าซเนื่องจากสามารถสร้างสารที่มีปฏิกิริยา (reactive species) และมีอุณหภูมิการเคลื่อนที่ (translational temperature) ที่ควบคุมได้ ในพลาสมาอุ่น อุณหภูมิของแก๊สสามารถสูงถึง 2000–3000 K ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิห้องแต่ยังคงต่ำกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมาก ทำให้พลาสมาอุ่นสามารถรักษาสภาวะที่ไม่สมดุล (non-equilibrium condition) ได้ ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิแก๊สที่สูงขึ้นยังสามารถส่งผลต่อจลนพลศาสตร์เคมี (chemical kinetics) โดยการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในรูปแบบเฉพาะ เช่น การกระตุ้นสถานะการสั่นสะเทือนที่ถูกกระตุ้น ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ พลาสมาอุ่นจึงมีศักยภาพในการใช้งานในหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแปลง CO_2 ให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าเพิ่ม ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ที่มีความสำคัญในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม พลาสมาอุ่นสามารถสร้างและควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการ ทั้งในด้านของการสร้างสารที่มีปฏิกิริยาและการควบคุมอุณหภูมิแก๊ส ซึ่งช่วยให้กระบวนการแปลง CO_2 มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

จากที่ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของพลาสมา เพื่อให้เข้าใจถึงเทคโนโลยีพลาสมาได้อย่างชัดเจน จะใช้แผนผังในการแบ่งประเภทของพลาสมาออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ พลาสมาความร้อน และพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน พลาสมาอุ่นจะจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน ซึ่งแต่ละกลุ่มมีลักษณะและการใช้งานที่แตกต่างกันไป ซึ่งแผนผังนี้จะช่วยให้เห็นภาพรวมของเทคโนโลยีพลาสมาในรูปแบบที่เป็นระบบ และเข้าใจถึงการประยุกต์ใช้ในแต่ละด้านได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.1 แผนผังของเทคโนโลยีพลาสมา

แผนผังนี้แบ่งประเภทของพลาสมาออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน (Non-Thermal Plasma, NTP) และพลาสมาความร้อน (Thermal Plasma, TP) โดยพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อนหรือ Cold Plasma มีอุณหภูมิของอนุภาคหนักต่ำกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนอย่างมาก ตัวอย่างเทคโนโลยีในกลุ่มนี้ ได้แก่ Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma, Corona Discharge Plasma, Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ), Microwave Plasma (ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C), Capacitively Coupled Plasma (CCP) และ Gliding Arc Discharge ในขณะที่พลาสมาความร้อนหรือ Hot Plasma มีอุณหภูมิของอนุภาคหนักและอิเล็กตรอนใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงทั้งสองส่วนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้การแตกตัวของโมเลกุลเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเทคโนโลยีในกลุ่มนี้ ได้แก่ Direct Current (DC) Plasma Arc, Inductively Coupled Plasma (ICP), Radio Frequency (RF) Plasma และ Microwave Plasma (ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C) การแบ่งประเภทนี้ช่วยให้เราเข้าใจและเลือกใช้เทคโนโลยีพลาสมาได้อย่างเหมาะสมตามการใช้งานที่ต้องการ เช่น การแปลงก๊าซ การเคลือบผิว การตัดโลหะ และการทำความสะอาดพื้นผิว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพลาสมาแต่ละประเภท

2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า

การเกิดสนามไฟฟ้าเป็นผลมาจากการจ่ายแรงดันสูง (high voltage) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (electrode) โดยทั่วไป สนามไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก คือ สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็นสองประเภท คือ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ

ขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูปแบบและลักษณะต่าง ๆ ซึ่งวางอยู่ในอากาศ จะพบว่าแรงดันเบรกดาวน์ (breakdown voltage) ที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกัน แม้ว่าจะจัดวางระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้เท่ากันก็ตาม

2.5.1 สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอคือสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มเท่ากันทั่วทั้งพื้นที่ กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าจะกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณขั้วอิเล็กโทรด ตัวอย่างเช่น ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดแผ่นเพลทขนาน (parallel plate) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (maximum electric field strength) สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

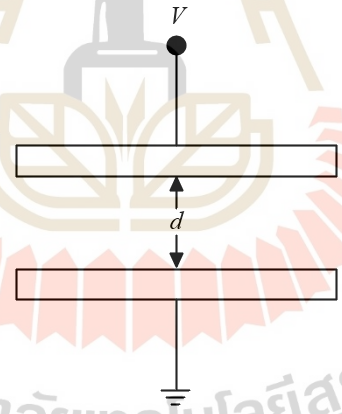
$$E_{\max} = E = \frac{V}{d} \qquad 2.1$$

เมื่อ $E_{\max}$ คือความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

E คือความเข้มสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่าง อิเล็กโทรด

V คือแรงดันที่จ่ายให้ระหว่างอิเล็กโทรด

d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.2 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

2.5.2 สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มแตกต่างกันในแต่ละจุด ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างของความเข้มสนามไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างเรขาคณิต (geometry) ของอิเล็กโทรดที่สร้างสนามไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การจัดวางอิเล็กโทรดตามรูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างของสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งหมายถึงความเข้มสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างพื้นผิวของอิเล็กโทรด การกระจายแรงดันไฟฟ้าในสนามนี้จะแตกต่างกันเล็กน้อยตามตำแหน่ง โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมสามารถคำนวณได้จากสมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*} \qquad 2.2$$

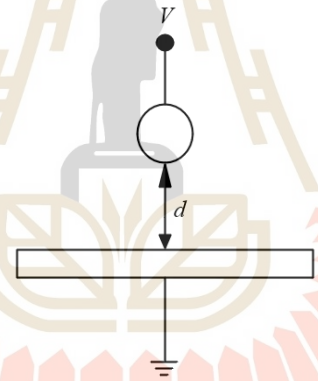
$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \qquad 0 \le \eta^* \le 1 \qquad 2.3$$

เมื่อ η^* คือตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (filed utilization factor)

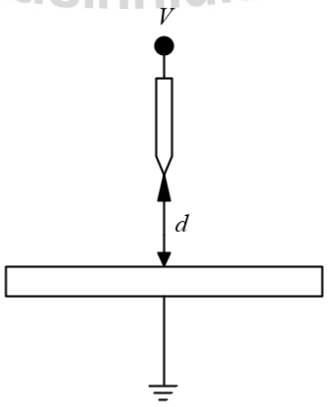
E_{av} คือค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า

d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

ค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ V/d สำหรับกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณผิวของอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น บริเวณปลายแหลมของขั้วอิเล็กโทรด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



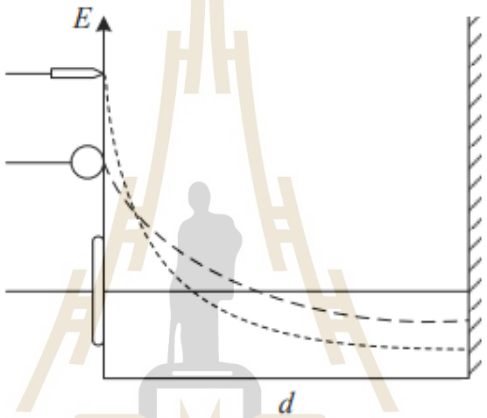
รูปที่ 2.3 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย



รูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นในแนวระนาบ ความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แม้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะถึงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าวิกฤต แต่ยังไม่เกิดการเบรกดาวน์ (breakdown) จะเกิดการคายประจุแบบโคโรนา (corona discharge) บริเวณผิวของอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนในบริเวณที่อยู่ห่างจากผิวอิเล็กโทรด ความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลงและไม่เกิดการคายประจุแบบโคโรนา ส่งผลให้เกิดการดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเรียกว่า "ดิสชาร์จบางส่วน" (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นเป็นระยะ ๆ และทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่จ่ายแรงดันให้กับอิเล็กโทรด โดยกระแสที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาวน์เรียกว่า "กระแสโคโรนา" (corona current) หรือ "กระแสพรีดิสชาร์จ" (pre-discharge current)



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

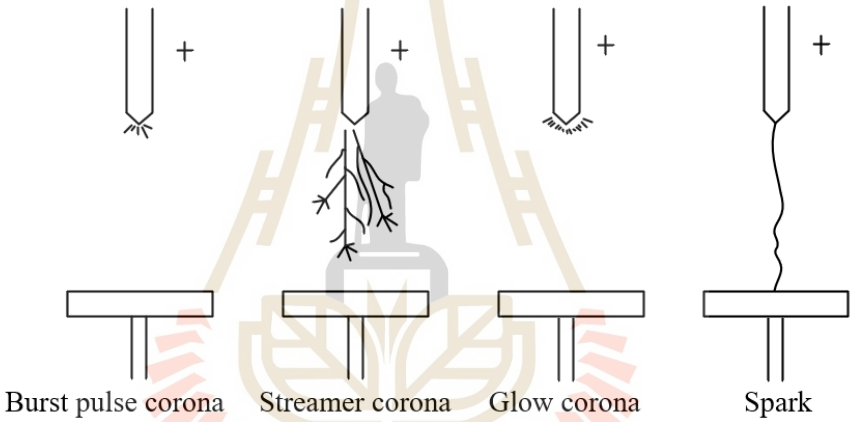
2.6 ทฤษฎีการปล่อยประจุโคโรนา

การคายประจุแบบโคโรนา (corona discharge) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างไอออน (ionization) ซึ่งใช้ในการทำให้อนุภาคมีประจุ (particle electrification) จำนวนประจุที่อนุภาคได้รับ (number of charge per particle) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของอนุภาค (particle size) ความหนาแน่นของไอออน (ion density) และระยะเวลาการชาร์จประจุ (charging time) โดยปกติแล้ว การคายประจุแบบโคโรนาจะแสดงลักษณะในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (voltage-current characteristics) ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายกระบวนการเกิดโคโรนาดิสชาร์จและคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของโคโรนาดิสชาร์จแบบเข็มปลายแหลมกับแผ่นราบ ซึ่งจะมีรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนถัดไป

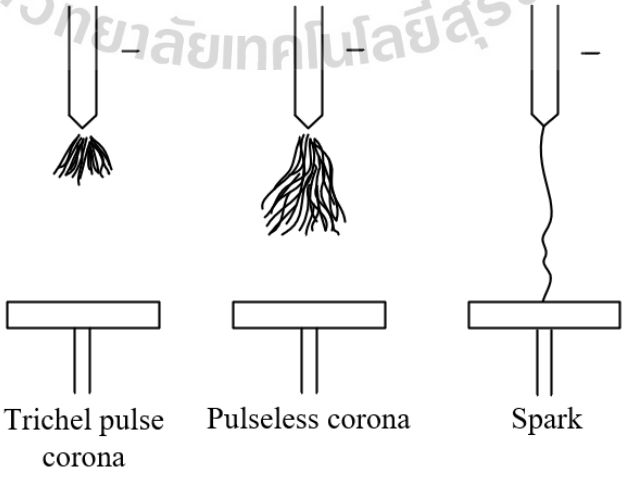
2.6.1 กลไกการเกิดการคายประจุแบบโคโรนา

การคายประจุแบบโคโรนา (corona discharge) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาวน์ โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไปยังอากาศที่มีศักย์เป็นกลาง กระบวนการนี้เกิดจากการแตกตัวของไอออนในอากาศรอบขั้วอิเล็กโทรด โดยทั่วไปจะมี

กระแสไฟฟ้าขนาดระดับไมโครแอมป์ รูปแบบของโคโรนาดิสชาร์จขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอิเล็กโทรด รวมถึงระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้วยสำหรับโคโรนาบวก (positive corona) ที่เกิดในระบบอิเล็กโทรดเข็มแผ่นราบ (needle-plate electrodes) กระบวนการจะเริ่มจากการเกิดโคโรนาแบบเบิร์สต์พัลส์ (burst pulse corona) ที่แผ่เส้นโค้งออกไปเป็นจำนวนมาก จากนั้นจึงเกิดโคโรนาแบบสตรีมเมอร์ (streamer corona) และโคโรนาแบบรุ่งแสง (glow corona) บริเวณปลายอิเล็กโทรด เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากขึ้น จะนำไปสู่การเกิดสปาร์ก (spark)ในกรณีของโคโรนาลบ (negative corona) ซึ่งเกิดในระบบอิเล็กโทรดที่มีรูปร่างเรขาคณิตเดียวกัน กระบวนการเริ่มจากการเกิดโคโรนาแบบ Trichel pulse ตามด้วยโคโรนาแบบ Pulseless และเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะนำไปสู่การเกิดอาร์ค (spark discharge) เช่นกัน ดังนั้น รูปแบบการเกิดโคโรนาดิสชาร์จและสปาร์กจะแตกต่างกันระหว่างโคโรนาบวกและโคโรนาลบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 (สำหรับโคโรนาบวก) และรูปที่ 2.7 (สำหรับโคโรนาลบ)

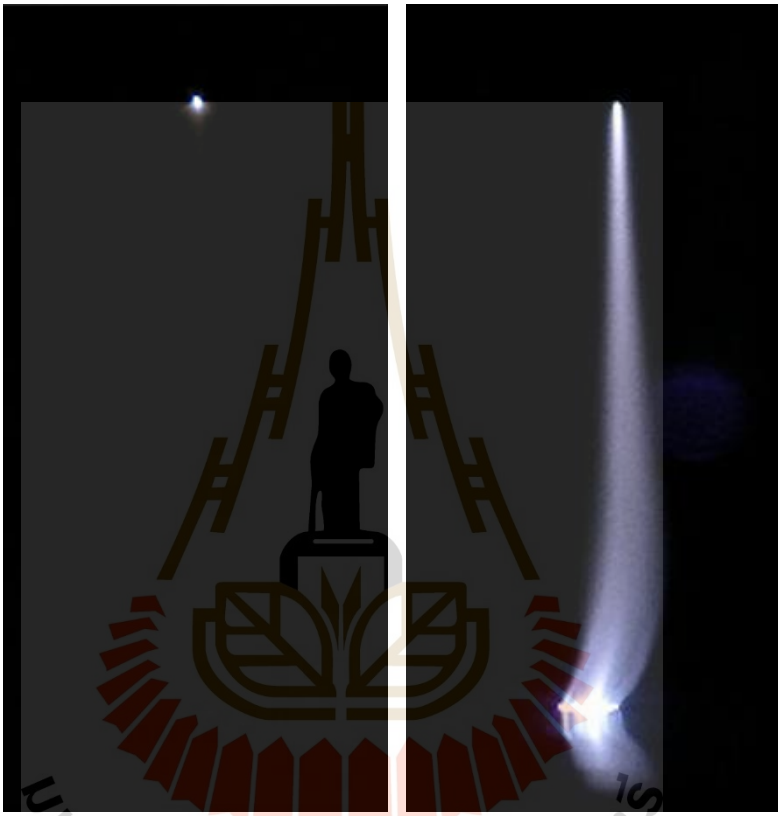


รูปที่ 2.6 ลักษณะของการคายประจุโคโรนาบวก



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดโคโรนาดิสชาร์จลบ

ในอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดและแผ่นราบ โคโรนาบวกจะเกิดขึ้นบริเวณเส้นลวด ทำให้เกิดปลอกตึง (tight sheath) รอบเส้นลวดหรือเกิดสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่ออกจากเส้นลวด ในขณะที่โคโรนาลบจะเกิดขึ้นที่เส้นลวดในรูปของการรุ่งแสง (glow) ทั่วไป ซึ่งมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว หรือหากความเข้มต่ำ อาจปรากฏเป็นจุดหรือกระจุก (tufts) ดังที่แสดงในรูปภาพที่ 2.8 (ก) และรูปภาพที่ 2.8 (ข) ซึ่งแสดงการเกิดโคโรนาดิสชาร์จในอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดและแผ่นราบ รวมถึงการเกิดสปาร์ก ข้าม (sparkover)

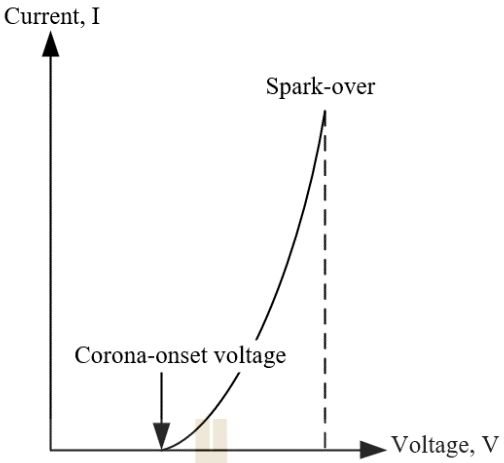


ก) ข)

รูปที่ 2.8 ภาพถ่าย ก) การคายประจุโคโรนา ข) การเกิดอาร์ค

2.6.2 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของการคายประจุแบบโคโรนารูปแบบอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท

การคายประจุแบบโคโรนาโดยปกติแล้วจะแสดงในรูปของคุณลักษณะกระแสกับแรงดัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าจุดเริ่มต้นของโคโรนา (corona onset voltage) กระแสโคโรนา (corona current) จะเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่าสูงสุด จะเกิดโคโรนาประกายข้าม (spark-over corona)



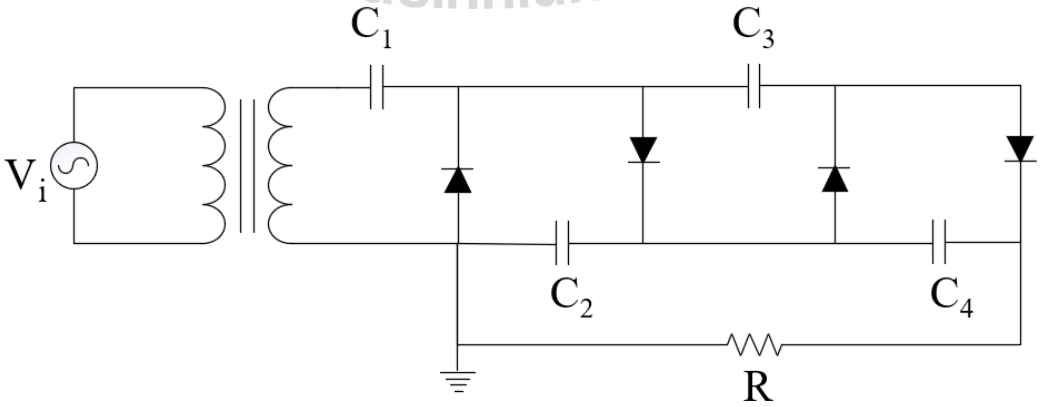
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของการคายประจุแบบโคโรนา

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรทวีแรงดัน

ในการสร้างวงจรทวีแรงดัน โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ประกอบด้วยการสร้างแรงดันสูงกระแสสลับ การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง และการสร้างแรงดันสูงแบบพัลส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะออกแบบเป็นการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง จึงอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมเฉพาะส่วนนี้

2.7.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

ในส่วนนี้จะอธิบายการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง ซึ่งหลักๆจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier) และเต็มคลื่น (full-wave rectifier) วงจรเรียงกระแสแบบแรงดัน 2 เท่า วงจรขั้นบันไดแบบ Cockcroft-Walton และวงจรสวิตช์แบบฟลายแบกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะออกแบบเป็นวงจรขั้นบันไดแบบ Cockcroft-Walton ซึ่งเป็นวงจรทวีแรงดัน (voltage multiplier circuit) ที่เป็นที่นิยมใช้เป็นเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงที่มีค่าแรงดันสูง ๆ โดยให้กระแสโหลดที่มีค่าต่ำ ๆ และไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตกับกระแสโหลดมากนัก รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมวงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง Cockcroft–Walton

จากรูปที่ 2.10 แสดงไดอะแกรมวงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรงแบบ Cockcroft-Walton หรือที่เรียกว่า n-stage Cockcroft-Walton ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันสูงได้ถึง 2n เท่าของขนาดแรงดันอินพุตสูงสุด โดยในสภาวะที่ไม่มีโหลด แรงดันเอาต์พุตของวงจร Cockcroft-Walton นี้สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{rms} = 2NV_p \tag{2.4}$$

เมื่อ N คือจำนวนขั้น (stage) ของวงจร และค่าสูงสุดของแรงดันสามารถหาได้จาก

$$V_p = 0.707V_i \tag{2.5}$$

เมื่อ V_i คือแรงดันกระแสสลับอินพุต (input AC voltage) และแรงดันระลอกคลื่นของวงจรนี้สามารถหาได้จาก

$$\delta v = I_m \frac{N\left(N+1\right)}{4fC} \tag{2.6}$$

เมื่อ I_m คือกระแสโหลดเฉลี่ย (average load current) โดยปกติแล้วค่าตัวประกอบระลอกคลื่น จะมีค่าประมาณ 5% สำหรับสภาวะมีโหลด สามารถหาแรงดันตกคร่อม (voltage drop) โหลด ΔV ได้ดังนี้

$$\Delta V = \frac{2I_m}{3fC}\left(N^3 + \frac{3N^2}{8} + \frac{N}{8}\right) \tag{2.7}$$

2.8 หลักการแตกตัวของ CO_2 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา

พลาสมาเป็นก๊าซที่มีการแตกตัวเป็นไอออนบางส่วน ซึ่งสามารถสร้างได้โดยการใช้อิเล็กโทรดสองขั้วในภาชนะที่มีก๊าซไหลผ่าน เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงระหว่างอิเล็กโทรด ก๊าซจะถูกแตกตัวเป็นไอออนและเกิดพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมาจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและถ่ายโอนพลังงานไปยังอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ทำให้เกิดการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนและการสั่นสะเทือน กระบวนการนี้สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะปกติ เช่น การแยก CO_2 เป็น CO, O และ O_2 ดังนั้น พลาสมาจึงเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานโมเลกุลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

2.8.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่ติดไฟ ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศ โดยมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างเสถียรและไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็

ตาม CO_2 จะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อสร้างกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ CO_2 เล็กจึงแพร่กระจายผ่านเยื่อชีวภาพได้ง่ายและละลายในสารละลายน้ำได้ดี รวมถึงของเหลวในร่างกายมนุษย์ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของ CO_2 สรุปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ CO_2

คุณสมบัติ	ค่า
สูตรทางโมเลกุล	CO_2 โครงสร้างทางเคมี $O=C=O$
น้ำหนักโมเลกุล	44.01 g/mol
ความหนาแน่น	1.976 กรัม/ลิตร ที่ 0 °C และ 760 mm Hg
การละลายในน้ำ	ผสมได้ในน้ำ (2,000 mg/L) เช่นเดียวกับในไฮโดรคาร์บอนและของเหลวอินทรีย์ส่วนใหญ่
จุดเดือด	-78.464 °C ที่ 101.3 kPa (ระเหิด)
ชื่อที่พบทั่วไป	ก๊าซกรดคาร์บอนิก (Carbonic acid gas), dry ice
ปัจจัยการแปลง	1 ppm = 1.8 mg/m^3, 1 mg/m^3 = 0.56 ppm, 0.1% = 1,000 ppm

2.8.2 กลไกการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา

กระบวนการแปลง CO_2 ในพลาสมาเริ่มต้นด้วยการแยก CO_2 (CO_2 splitting) ตามสมการ

$$2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2 \qquad 2.8$$

กระบวนการนี้ทำให้เกิดสถานะที่เสถียรโดยการรวมตัวของอะตอม O ให้เป็น O_2 หรือปฏิกิริยาของอะตอม O กับตัวทำปฏิกิริยาอื่น เพื่อสร้างโมเลกุลที่เสถียร โดยสามารถแบ่งการแยก CO_2 ในพลาสมา ได้ดังนี้

1) การแตกตัว CO_2 โดยการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนโดยตรง

สมการของกระบวนการนี้คือ

$$e + CO_2 \rightarrow e + CO_2{}^*\left({}^1\textstyle\sum_u{}^+\right) \rightarrow e + CO\left({}^1\textstyle\sum{}^+\right) + O(1S) \qquad 2.9$$

กระบวนการนี้เกิดจากการชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกับโมเลกุล CO_2 ทำให้โมเลกุล CO_2 ถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นฐานไปยังสถานะการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอน โดยมีพลังงานที่เกินกว่าพลังงานเอนทาลปีของการแยกตัว (5.5 eV) พลังงานเอนทาลปีของการแยกตัวคือพลังงานที่จำเป็นในการทำให้พันธะเคมีระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออกและกลายเป็นอะตอมอิสระ เมื่อโมเลกุล CO_2 ถูกกระตุ้น โมเลกุลจะปลดปล่อยพลังงานโดยการถ่ายโอนพลังงานไปยังพันธะ OC=O ทำให้พันธะเคมีแตกออกและเกิดการแยกตัวของโมเลกุลเป็น CO และ O ผลลัพธ์นี้ทำให้โมเลกุล CO_2 แยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียรใหม่

ระดับพลังงานการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนต่ำสุดของ CO_2 จะถูกกระตุ้นโดยใช้พลังงานมากกว่า 7 eV ในบริเวณ Franck–Condon ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงต้องการพลังงานมากกว่า 7 eV เพื่อกระตุ้นโมเลกุล CO_2 ไปยังสถานะกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งมากกว่าพลังงานเอนทาลปีของการแยกตัว (5.5 eV) และทำให้กระบวนการนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เนื่องจากพลังงานส่วนเกินจากการกระตุ้นจะถูกถ่ายโอนไปยังการเคลื่อนที่ของอะตอมออกซิเจนที่ถูกกระตุ้นหรือถูกนำไปใช้ในการกระจายพลังงานอิเล็กตรอนในระดับสูง ทำให้พลังงานเหล่านี้ไม่ได้ถูกใช้ในการแยกพันธะของ CO_2 อย่างมีประสิทธิภาพ และสำหรับการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนโดยตรงนี้มักเกิดในพลาสมาเย็นที่มีค่า E/P สูง

2) การแตกตัว CO_2 โดยการกระตุ้นแบบสั่น

สมการของกระบวนการนี้คือ

$$
\begin{aligned}
&e + CO_2 \rightarrow e + CO_2^*(v_i) \\
&e + CO_2 \rightarrow e + CO_2^*(v_j) \\
&CO_2^*(v_i) + CO_2^*(v_j) \rightarrow CO_2^*(^3B_2) + CO_2 \\
&CO_2^*(^3B_2) \rightarrow CO(^1\textstyle\sum^+) + O(^3P)
\end{aligned}
\qquad 2.10
$$

กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการสั่นสะเทือนของโมเลกุล CO_2 ทีละขั้นตอน โดยเริ่มจากโมเลกุล CO_2 ในสถานะการสั่นสะเทือนพื้นฐานที่ถูกกระตุ้นไปยังระดับการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นด้วยการชนของอิเล็กตรอน โมเลกุล CO_2 ที่ถูกกระตุ้นจะถ่ายโอนพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างกันในกระบวนการคลายการสั่นสะเทือน (V-V relaxation process) ตามทฤษฎีแล้วบางส่วนของโมเลกุลเหล่านี้มีโอกาสที่จะถูกกระตุ้นไปยังระดับพลังงานการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น โดยการถ่ายโอนพลังงานการสั่นสะเทือนให้กับโมเลกุล CO_2 อื่น

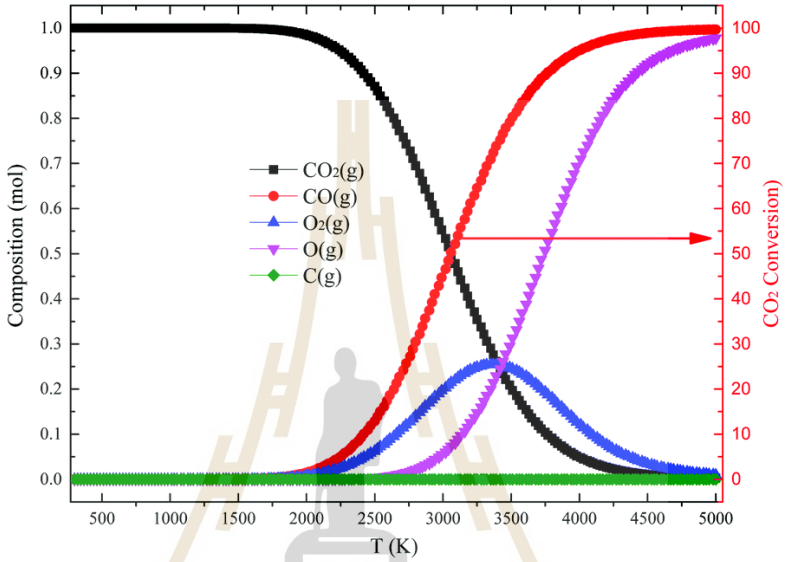
เมื่อการกระตุ้นการสั่นสะเทือนของโมเลกุล CO_2 ถึงระดับที่สามารถแยกพันธะได้ (5.5 eV) โมเลกุล CO_2 จะแตกตัวเป็น CO และ O ในสถานะพื้นฐาน กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการแยก CO_2 อย่างไรก็ตาม มีเงื่อนไขสองประการที่ต้องปฏิบัติเพื่อให้การถ่ายโอนพลังงานการสั่นสะเทือน (V-V relaxation) มีประสิทธิภาพ ประการแรกอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Te) ของพลาสมาต้องอยู่ที่ประมาณ 1 eV เพื่อให้เกิดการกระตุ้นการสั่นสะเทือนของโมเลกุล CO_2 จำนวนมากผ่านการชนกับอิเล็กตรอน ประการที่สองอุณหภูมิการแปลงของก๊าซ (Tg) ต้องต่ำกว่าอุณหภูมิการสั่นสะเทือน เพื่อหลีกเลี่ยงการคลายจากการแปลงเป็นการสั่นสะเทือน ซึ่งจะทำให้ระดับการสั่นสะเทือนของ CO_2 ลดลง เกิดการร้อนของก๊าซ และเพิ่มอุณหภูมิการแปลง

3) การแตกตัว CO_2 โดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิพลาสมาสูง

สมการของกระบวนการนี้คือ

$$
CO_2 + M \rightarrow CO + O + M \qquad E_a = 5.5\ eV\ per\ molecule \qquad 2.11
$$

กระบวนการแยก CO_2 โดยการไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ดูดความร้อนสูงและถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง ตามที่แสดงในสมการที่ 2.25 การแยก CO_2 จะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 2000 K ขึ้นไป โดยระดับการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ อัตราการแปลง CO_2 สามารถสูงถึง 75% ที่อุณหภูมิสมดุล 3400 K ผลิตภัณฑ์ของการไพโรไลซิสคือ CO และ O_2 ในช่วงอุณหภูมิทั้งหมดจนถึง 4500 K แทบไม่มีการเกิด C ขึ้นเลย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลือกผลิตภัณฑ์เป็น CO ในกระบวนการไพโรไลซิสเชิงความร้อนที่มีประสิทธิภาพ 100% เฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงมากเท่านั้นที่ CO จะถูกไพโรไลซิสด้วย



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบสมดุลของการไพโรไลซิส CO_2 และการแปลง CO_2 คำนวณโดยใช้หลักอุณหพลศาสตร์ภายใความดันปกติ

จากรูปที่ 2.11 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการแปลง CO_2 จะเพิ่มขึ้นตามจนถึงอุณหภูมิประมาณ 4500 K โดยมีอัตราการแปลงสูงสุดที่ 75% ที่อุณหภูมิสมดุล 3400 K

พลาสมาที่ถูกกระตุ้นด้วยการปล่อยประจุแบบอาร์ก (arc discharge) ไมโครเวฟ (microwave, MW) หรือคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency, RF) ที่ความดันบรรยากาศสามารถสร้างสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยก CO_2 ได้ง่าย โดยอุณหภูมิของก๊าซในพลาสมานี้สามารถรักษาได้ที่มากกว่า 4500 K การแยก CO_2 ในพลาสมานี้สามารถทำได้ไม่เพียงแค่โดยการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนและการกระตุ้นแบบการสั่นสะเทือนเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการไพโรไลซิสด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาหลักในกระบวนการนี้คือการหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาออกจากบริเวณอุณหภูมิสูงของเตาปฏิกรณ์พลาสมา

กลไกสามประการของการแยก CO_2 ในพลาสมา ที่อธิบายไว้ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางเคมีในพลาสมา ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่ทำให้เคมีพลาสมาแตกต่างจากเคมีแบบดั้งเดิม ในพลาสมาเย็นและพลาสมาอุ่น การแยก CO_2 เกิดขึ้นได้ผ่านการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนหรือการกระตุ้นแบบการสั่นสะเทือน ซึ่งทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับการชนกันของอิเล็กตรอนโดยตรง สำหรับพลาสมาร้อน การแยก CO_2 เกิดขึ้นได้จากทั้งการชนกันของ

อิเล็กตรอนและการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง สำหรับอุณหภูมิสูงของก๊าซสามารถเกิดขึ้นได้จากการชนกันและการยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา ดังนั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการชนกันมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการแปลง CO_2 สูงขึ้น ซึ่งได้รับการยืนยันจากการทดลองหลายครั้งกับพลาสมาเย็น อุ่น และร้อนสำหรับการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมาด้วยวิธีการกระตุ้นแบบต่าง ๆ หรือแบบไพโรไลซิส พลาสมาจะสลาย CO_2 เป็น CO และ O

2.8.3 การนำคาร์บอนมอนนอกไซด์ไปใช้ประโยชน์

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของ CO_2 นั้นเป็นสารที่มีประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม เช่น การถลุงโลหะ การผลิตเมทานอล และเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อย่างไรก็ตาม CO ก็เป็นก๊าซพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายต่อไป

1) การใช้ในกระบวนการโลหกรรม (Metallurgical Processes)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ CO ถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการถลุงโลหะจากแร่ เช่น การถลุงเหล็กจากแร่เหล็ก (Fe_2O_3) ในกระบวนการผลิตเหล็ก โดย CO จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อขจัดออกซิเจนออกจากแร่และเปลี่ยนเป็นเหล็กบริสุทธิ์ได้

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 \qquad 2.12$$

และการใช้ CO เป็นตัวรีดิวซ์ทำให้การถลุงเหล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานมากขึ้น

2) การใช้ในการสังเคราะห์เคมี (Chemical Synthesis):

การผลิตเมทานอล (Methanol Production) CO ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล (CH_3OH) โดยผ่านปฏิกิริยากับไฮโดรเจน (H_2) ภายใต้แรงดันสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตเมทานอลมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากเมทานอลเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิง

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \qquad 2.13$$

Fischer-Tropsch Synthesis CO ถูกใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากแก๊ส (gas-to-liquid) เช่น น้ำมันดีเซลหรือเชื้อเพลิงเจ็ท โดยผ่านกระบวนการ Fischer-Tropsch ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมพลังงานที่ใช้ CO และไฮโดรเจนในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงสังเคราะห์

3) การใช้ในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Production):

สามารถนำ CO ไปใช้ในปฏิกิริยา Water-Gas Shift Reaction เพื่อผลิตไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด โดย CO จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เพื่อผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad 2.14$$

ไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยานี้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน

4) การใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารและเครื่องดื่ม (Food and Beverage Industry):

คาร์บอนมอนอกไซด์ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการเก็บรักษาอาหารบางประเภท เช่น การบรรจุเนื้อสัตว์ เนื่องจาก CO สามารถช่วยรักษาสีของเนื้อสัตว์ให้สดใหม่ และช่วยลดการเกิดออกซิเดชันในอาหารบางชนิด

สำหรับการใช้ CO ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีประโยชน์มากมาย อย่างไรก็ตามการใช้ CO ก็มีข้อเสียที่สำคัญเช่นกันในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงข้อดีข้อเสียของ CO ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายต่อไป

ข้อดีของการใช้ CO

1) เป็นตัวรีดิวซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง CO มีความสามารถในการขจัดออกซิเจนจากสารประกอบออกไซด์ได้ดี ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการใช้ในกระบวนการโลหกรรมและการผลิตโลหะบริสุทธิ์
2) ใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี CO สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารเคมี เช่น เมทานอล เชื้อเพลิงสังเคราะห์ และไฮโดรเจน ซึ่งมีความสำคัญในอุตสาหกรรมพลังงานและเคมี

ข้อเสียของการใช้ CO

1) ความเป็นพิษสูง คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซพิษร้ายแรง เมื่อมนุษย์สูดดมเข้าไป CO จะจับกับฮีโมโกลบินในเลือดได้ดีกว่าออกซิเจน ส่งผลให้ร่างกายไม่สามารถนำออกซิเจนไปใช้ได้ และอาจทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจน (hypoxia) ซึ่งอาจนำไปสู่การหมดสติหรือเสียชีวิตได้หากได้รับในปริมาณที่มาก และการทำงานกับ CO ต้องใช้ความระมัดระวังสูง โดยต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีและมีเครื่องตรวจจับ CO เพื่อป้องกันการรั่วไหลที่อาจเป็นอันตรายต่อชีวิต
2) การเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม การปล่อย CO สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมากสามารถสร้างมลพิษทางอากาศได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างไม่สมบูรณ์ เช่น ในยานพาหนะหรือเครื่องยนต์ นอกจากนี้ CO ยังมีส่วนในการเกิดหมอกควันและมลพิษในเมืองใหญ่ และการผลิต CO ในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิง: แม้ว่าจะมีการใช้ CO ในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิงสังเคราะห์ แต่ในกระบวนการเหล่านี้ยังคงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น CO_2 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีของ CO ซึ่งอาจส่งผลต่อภาวะโลกร้อน
3) ความซับซ้อนของกระบวนการจัดเก็บและขนส่ง CO เป็นก๊าซที่ต้องการการจัดเก็บและขนส่งในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยและมีการควบคุม เนื่องจากมี

4) ความเป็นพิษสูงและมีความเสี่ยงต่อการระเบิดเมื่อผสมกับอากาศในสภาวะที่เหมาะสม

2.8.4 การเกิดสารประกอบขึ้นระหว่างการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา

ในการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้จะใช้การคายประจุแบบโคโรนาในการแตกตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน จะทำให้เกิดสารประกอบเกิดขึ้นในระหว่างการปล่อยประจุได้ ซึ่งสารประกอบที่จะเกิดขึ้นประกอบไปด้วยสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์และโอโซน ซึ่งเกิดจากกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง โดยโมเลกุลอากาศ (N_2 และ O_2) และพลังงานจากประจุไฟฟ้า ซึ่งในการการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน (O_2) อิเล็กตรอนสูงพลังที่ปลดปล่อยจากการปลดปล่อยประจุแบบโคโรนา แสดงดังสมการที่ 2.15 และโมเลกุลออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะรวมกับโมเลกุลออกซิเจนอีกตัวเพื่อสร้างโอโซน แสดงสมการที่ 2.16

$$O_2 + e^- \rightarrow 2O \qquad 2.15$$

$$O_2 + O \rightarrow O_3 \qquad 2.16$$

และการแตกตัวของโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) ในอากาศเป็นอะตอมเดี่ยว ๆ ด้วยอิเล็กตรอนสูง แสดงดังสมการที่ 2.17 - 2.18 อะตอมไนโตรเจนและออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะรวมกันเพื่อสร้างไนโตรเจนมอนออกไซด์ (NO) แสดงดังสมการที่ 2.19

$$N_2 + e^- \rightarrow 2N \qquad 2.17$$

$$O_2 + e^- \rightarrow 2O \qquad 2.18$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \qquad 2.19$$

และหลังจากนั้นไนโตรเจนมอนออกไซด์ (NO) สามารถตอบสนองกับออกซิเจนเพิ่มเติมในอากาศเพื่อสร้างไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) แสดงดังสมการที่ 2.20

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 \qquad 2.20$$

การมีคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการปล่อยกระแสไฟฟ้าโคโรนาเพิ่มความซับซ้อนให้กับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ผลกระทบต่อโอโซน

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถดูดซับพลังงานบางส่วนจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าชนิดโคโรนา ลดปริมาณพลังงานที่มีอยู่สำหรับการไอออนของ O_2 และการก่อตัวของ O_3 แสดงดังสมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ 2.21 และสามารถดูดซับพลังงานบางส่วนจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าชนิดโคโรนา ลดปริมาณพลังงานที่มีอยู่สำหรับการไอออนของ O_2 และการก่อตัวของ O_3 แสดงดังสมการที่ 2.22 และ 2.23 ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำให้ความเข้มข้นของโอโซนลดลงในสภาพแวดล้อมที่มี CO_2 เมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมที่ไม่มี CO_2

$$CO_2 + e^- \rightarrow CO_2^* + e^- \quad 2.21$$

$$O + CO_2 \rightarrow CO_3 \quad 2.22$$

$$O^* + CO_2 \rightarrow O_2 + CO_2^* \quad 2.23$$

2) ผลกระทบต่อไนโตรเจนออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถมีอิทธิพลต่อการก่อตัวของสปีชีส์ไนโตรเจนที่มีปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น CO_2 สามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมของไนโตรเจน (N) และโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) ที่เกิดขึ้นในกระแสไฟฟ้า นำไปสู่เส้นทางปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน แสดงดังสมการที่ 2.24 และ CO_2 สามารถแข่งขันกับ O_2 สำหรับปฏิกิริยากับสปีชีส์ไนโตรเจน อาจลดการก่อตัวของ NO และ NO_2 การแข่งขันนี้สามารถเปลี่ยนสมดุล ทำให้มีความเข้มข้นของ NO_x ต่ำลงในสภาพแวดล้อมที่มี CO_2 ระดับสูง แสดงดังสมการที่ 2.25

$$N + CO_2 \rightarrow NO + CO \quad 2.24$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad 2.25$$

เมื่อมีความเข้มข้นของ CO_2 ในสภาพแวดล้อมของการปล่อยกระแสไฟฟ้าชนิดโคโรนาเพิ่มขึ้น จะนำไปสู่การลดลงของการเกิดโอโซนเนื่องจากการดูดซับพลังงานและการลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของสปีชีส์ออกซิเจนที่มีปฏิกิริยา รวมถึงเส้นทางปฏิกิริยาทางเลือกที่เกี่ยวข้องกับ CO_2 ส่วนในกรณีของไนโตรเจนออกไซด์ระดับ CO_2 ที่สูงขึ้นทำให้การเกิด NO_x ลดลง เนื่องจากการแข่งขันสำหรับสปีชีส์ไนโตรเจนที่มีปฏิกิริยาและอิทธิพลของปฏิกิริยาเสริมที่ลดความเข้มข้นของ NO

2.8.5 การใช้พลังงานสำหรับการแตกตัว CO_2

ในการอธิบายสมการแตกตัวของ CO_2 และประสิทธิภาพพลังงานจำเป็นต้องเข้าใจการตั้งค่าและกระบวนการทำงานของเครื่องซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อการแตกตัว CO_2 ซึ่ง กำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ CO_2 ที่แตกตัว CO และ O_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26

$$X_{CO_2}(\%) = \frac{CO_{2(inlet)} - CO_{2(outlet)}}{CO_{2(inlet)}} \times 100\% \quad 2.26$$

ในส่วนของประสิทธิภาพของพลังงาน กำหนดโดยอัตราส่วนของการแปลง CO_2 ต่อพลังงานจำเพาะ (SEI) ปรับด้วยการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) แสดงดังสมการที่ 2.27

$$\eta(\%) = \frac{X_{CO_2}(\%) \times \Delta H(kJ/mol)}{SEI(kJ/L) \times 22.4(L/mol)} \times 100\% \qquad 2.27$$

และพลังงานจำเพาะ (SEI) สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าและอัตราการไหลที่ใช้ แสดงดังสมการที่ 2.28

$$SEI(kJ/L) = \frac{Power(kW) \times 60(s/\min)}{Flow\ rate(L/\min)} \qquad 2.28$$

เมื่อ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสำหรับการสลายตัวของ CO_2 ให้ค่าเป็น 279.8 kJ/mol

2.9 สรุป

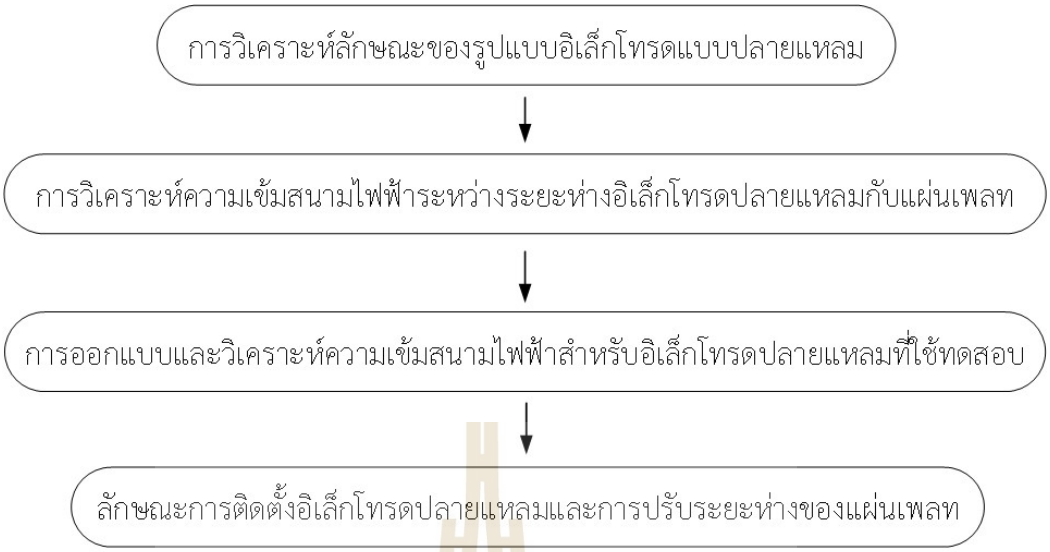
สำหรับการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าในการย่อยสลายคาร์บอนไดออกไซด์ จำเป็นต้องเข้าใจถึงหลักการย่อยสลายของคาร์บอนไดออกไซด์และทฤษฎีการเกิดความเข้มของสนามไฟฟ้าซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของพลาสมา หลักการแตกตัวของ CO_2 ด้วยพลาสมา คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะพื้นฐานของพลาสมาที่ใช้ในการแตกตัว CO_2 กลไกการแตกตัวของ CO_2 ในพลาสมา และการใช้พลังงาน ซึ่งจะอธิบายถึง การหายไปของคาร์บอนไดออกไซด์แล้วเกิดเป็นสารประกอบอื่นและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างความเข้มสนามไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงสภาวะของการเกิดต่างๆ โดยจะกล่าวถึง ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า ทฤษฎีการปล่อยประจุโคโรนา กลไกการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ และทฤษฎีพื้นฐานวงจรทวีแรงดัน ทั้งนี้เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์หารูปแบบที่เหมาะสมและทดสอบให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การวิเคราะห์และการออกแบบระบบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา

3.1 กล่าวนำ

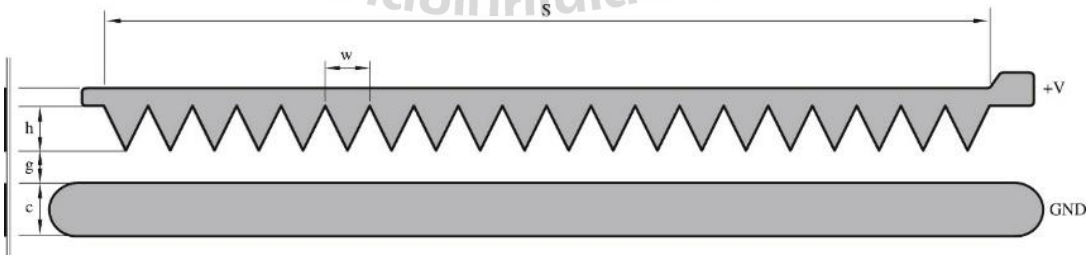
สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะของอิเล็กโทรดที่มีปลายแหลม ซึ่งรูปแบบดังกล่าวมีเสถียรภาพในการสร้างความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ดีกว่ารูปแบบที่เป็นเส้นลวด เนื่องจากค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ รูปแบบปลายแหลมจึงถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์และออกแบบลักษณะอิเล็กโทรดที่เป็นแบบปลายแหลมจะศึกษาโดยอ้างอิงจากปริทัศน์และวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอิเล็กโทรดปลายแหลมขนาดต่าง ๆ เพื่อหาค่ารูปแบบที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการสร้างความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงสุด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและใช้งานจริง ทั้งนี้การวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าต้องการทดสอบ จะอยู่ในช่วงของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนา ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาวน์ โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไปยังอากาศที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง การคายประจุแบบโคโรนา เกิดจากการแตกตัวของไอออนอากาศรอบขั้วอิเล็กโทรด และมักมีกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ รูปแบบของการประจุแบบโคโรนาขึ้นอยู่กับขั้วและรูปร่างของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น จะประกอบไปด้วยสภาวะของการเกิด Glow , Streamer และ Arc ซึ่งทั้ง 3 สภาวะนี้จะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากการศึกษาจะทราบถึงช่วงต่าง ๆ ของสภาวะการเกิดต่างๆ ได้นั้นจะต้องทราบถึงค่ามิเตอร์ที่มีปัจจัยต่อการเกิดสภาวะต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบถึง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด ขนาดของอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ เมื่อทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ก็สามารถนำค่าต่าง ๆ ไปคำนวณ เพื่อให้ทราบถึงช่วงของสภาวะการเกิดในรูปแบบของค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งในการคำนวณนั้นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด เนื่องจากจะต้องทราบถึงลักษณะของสนามไฟฟ้า เมื่อทราบถึงลักษณะของอิเล็กโทรดและช่วงของความเข้มสนามไฟฟ้าแล้ว ในส่วนของระบบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการคายประจุโคโรนานั้นจะถูกทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการออกแบบระบบจะออกแบบให้อิเล็กโทรดปลายแหลมและแผ่นเพลทสามารถปรับได้ รวมถึงออกแบบระบบการไหลของอากาศให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการทดสอบต่อไป โดยรูปแบบและกระบวนการของขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบระบบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าของการคายประจุแบบโคโรนา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

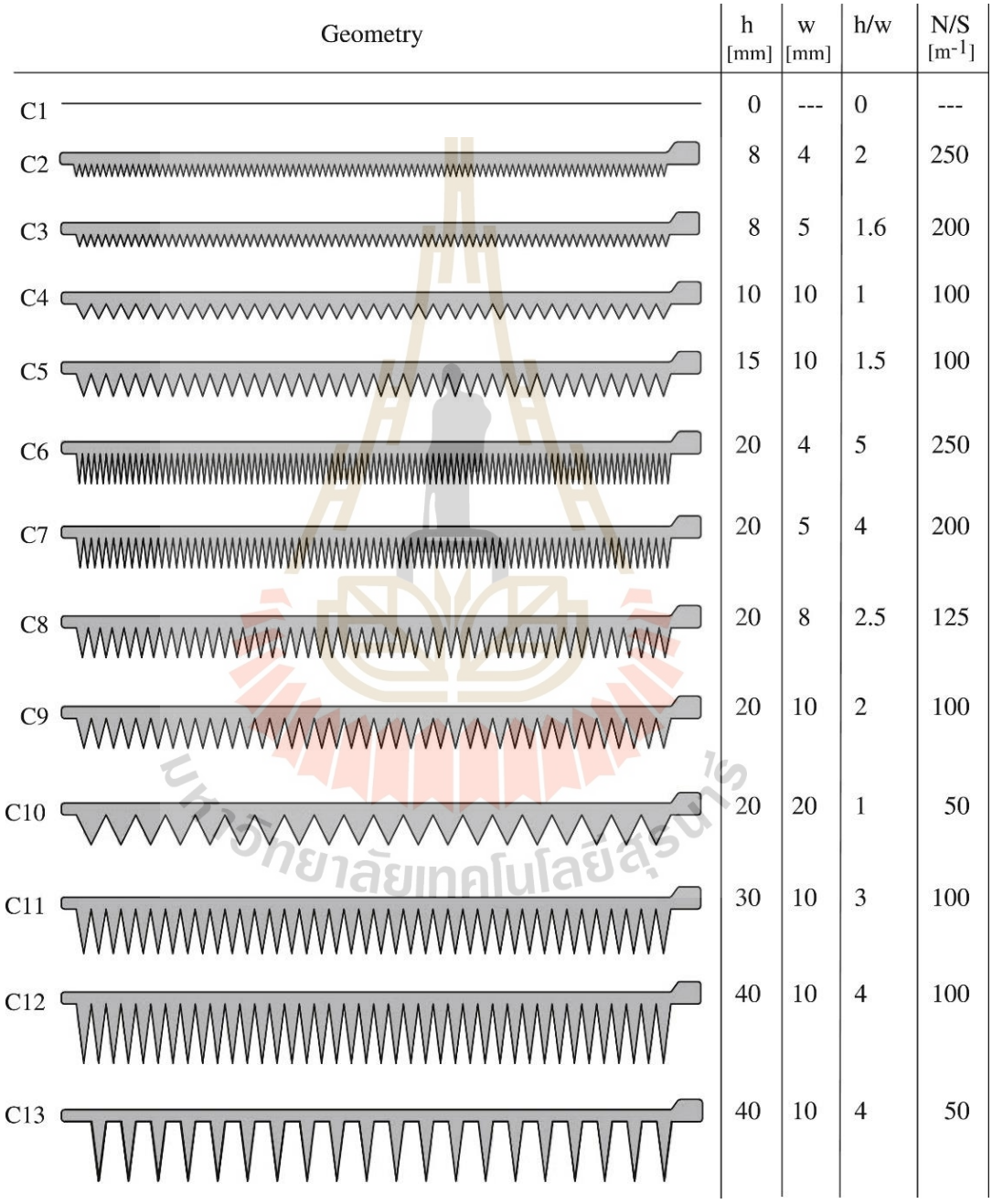
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะของรูปแบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

ในการวิเคราะห์รูปแบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม จะศึกษาจากงานวิจัยของ Belen and Messanelli, 2015 เป็นการเปรียบเทียบการวัดลมไอออนิกสำหรับการคายประจุแบบโคโรนาและ DBD ซึ่งรูปแบบอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแบบปลายแหลม ในการศึกษางานวิจัยดังกล่าวจะมุ่งเน้นไปที่อิเล็กโทรดปลายแหลมที่ออกแบบมาสำหรับการคายประจุแบบโคโรนา เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งลักษณะของรูปแบบปลายแหลมที่ใช้เป็นรูปแบบปลายแหลมด้านเดียว ออกแบบโดยใช้วัสดุเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาด 0.12 มิลลิเมตร มีความยาวของอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ 400 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ใช้ทดสอบอยู่ที่ 15 มิลลิเมตร และขนาดแผ่นเพลทที่ใช้กราวด์มีขนาด 24 มิลลิเมตร และกำหนดขนาดความสูงและความกว้างของปลายแหลมที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



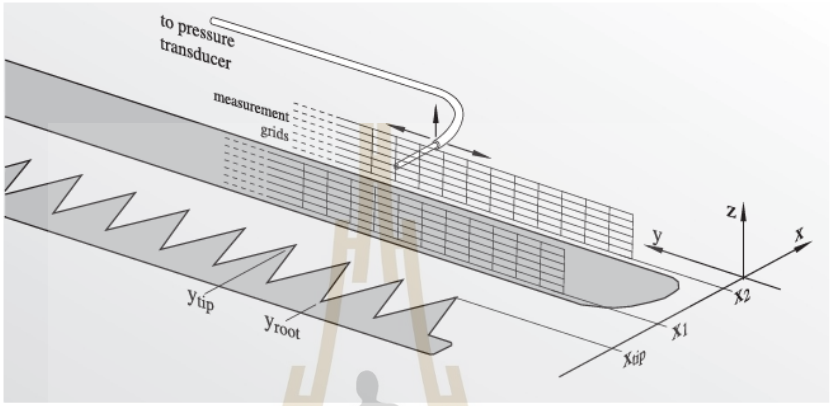
รูปที่ 3.2 การกำหนดพารามิเตอร์ของรูปแบบปลายแหลม

ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงรูปแบบอิเล็กโทรดปลายแหลมที่แตกต่างกัน โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย h คือความสูงของปลายแหลม w คือความกว้างของปลายแหลม และ h/w อัตราส่วนความคมของปลายแหลม ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำไปคำนวณหารูปแบบต่าง ๆ ได้จากสมการในบทที่ 2 จากการศึกษางานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบปลายแหลมทั้งหมด 13 รูปแบบรวมกับอิเล็กโทรดที่เป็นเส้นลวดทองแดงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3

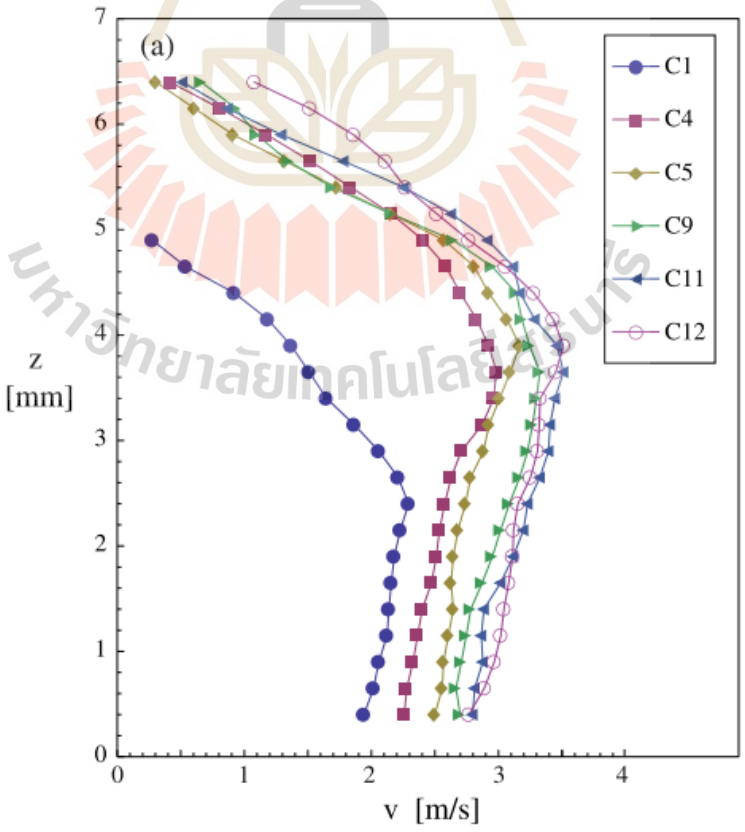


รูปที่ 3.3 รูปแบบปลายแหลมที่ได้จากการกำหนดพารามิเตอร์

ในการทดสอบของงานวิจัยนี้รูปแบบการวัดผลของลมไอออนิกที่ถูกปล่อยออกจากปลายแหลมจะถูกตั้งค่าดังแสดงในรูปที่ 3.4 และผลการทดสอบที่ได้ของรูปแบบปลายแหลมแต่ละรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งรูปแบบของอิเล็กโทรดที่แสดงผลจะกำหนดพารามิเตอร์ที่ความกว้างของปลายแหลมที่เท่ากัน และมีอัตราส่วนจำนวนปลายแหลมต่อความยาวทั้งหมดของอิเล็กโทรดปลายแหลมที่เท่ากัน



รูปที่ 3.4 รูปแบบการวัดผลลมไอออนิก



รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบการวัดลมไอออนิกของรูปแบบปลายแหลมแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.5 รูปแบบที่นำมาทดสอบประกอบไปด้วยรูปแบบ C1 ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดเป็นแบบเส้นลวด และรูปแบบ C4 , C5, C9, C11 และ C12 เป็นรูปแบบที่เป็นอิเล็กโทรดปลายแหลมที่มีขนาดความกว้างปลายแหลมที่เท่ากันแต่ความยาวปลายแหลมที่ต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบที่เป็นปลายแหลมมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงวิเคราะห์ผลโดยหาค่าเฉลี่ยแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

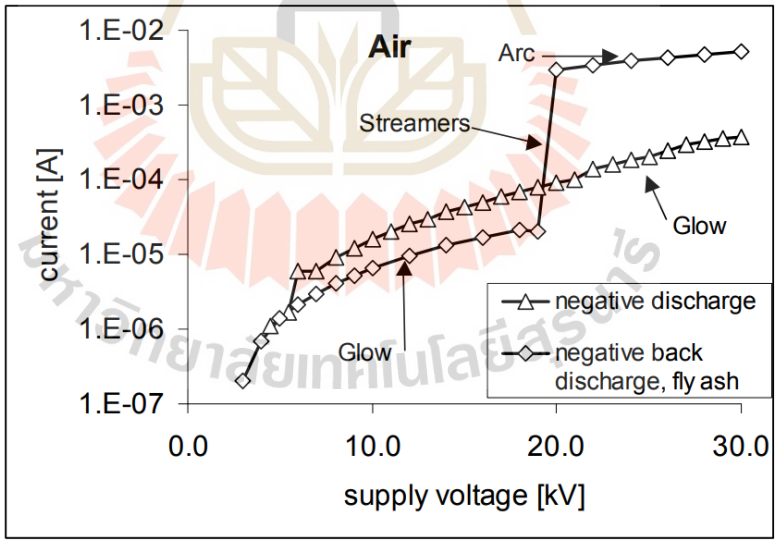
ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดลมไอออนิกของแต่ละรูปแบบ

ระยะแนวแกน	**รูปแบบของอิเล็กโทรด V/m**					
Z (mm)	**C1**	**C4**	**C5**	**C9**	**C11**	**C12**
0.5	2.00	2.30	2.50	2.70	2.80	2.80
1.0	2.10	2.35	2.60	2.70	2.90	3.00
1.5	2.15	2.40	2.65	2.80	2.95	3.10
2.0	2.20	2.50	2.65	3.00	3.15	3.10
2.5	2.25	2.60	2.75	3.10	3.30	3.20
3.0	2.00	2.80	2.90	3.25	3.45	3.35
3.5	1.60	3.00	3.05	3.30	3.50	3.40
4.0	1.30	2.90	3.10	3.25	3.40	3.50
4.5	0.80	2.65	2.90	3.05	3.15	3.20
5.0	0.30	2.30	2.50	2.50	2.90	2.70
5.5	0.00	1.70	1.60	1.60	2.10	2.20
6.0	0.00	1.00	0.80	1.00	1.15	1.75
6.5	0.00	0.40	0.30	0.65	0.50	1.10
ค่าเฉลี่ย	1.284615	2.223077	2.330769	2.530769	2.711538	2.80
เปอร์เซ็นต์	45.87912	79.3956	83.24176	90.38462	96.84066	100
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	54.12088	20.6044	16.75824	9.615385	3.159341	0

จากผลการวิเคราะห์ตารางที่ 3.1 การหาค่าเฉลี่ยของการวัดลมไอออนิกของแต่ละรูปแบบ พบว่ารูปแบบอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมมีค่าความแรงของลมไอออนิกที่สูงกว่ากว่ารูปแบบที่เป็นเส้นลวด ซึ่งรูปแบบของปลายแหลมที่ดีที่สุดคือ C12 มีค่าความแรงอยู่ที่ 2.80 V/m เมื่อเทียบกับรูปแบบเส้นลวดค่าความแรงอยู่ที่ 1.28 V/m เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ที่แตกต่างอยู่ที่ 54.12 เปอร์เซ็นต์ และรูปแบบปลายแหลมที่ดีรองลงมาคือ C11, C9, C5 และ C4 ตามลำดับ โดยมีค่าความแรงของลมไอออนิกอยู่ที่ 2.71, 2.53, 2.33 และ 2.22 V/m ซึ่งเมื่อคำนวณออกเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เทียบกับรูปแบบที่ดีที่สุดแตกต่างที่ 3.16, 9.61, 16.76 และ 20.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างระยะห่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท

ในการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของการคายประจุแบบโคโรนา สามารถหาได้จากพารามิเตอร์ระหว่างระยะห่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ในการวิเคราะห์นี้จะอ้างอิงจากการศึกษาปริทัศน์และวรรณกรรมของงานวิจัย Jaworek et al.2008 ในงานวิจัยดังกล่าวจะเป็นการทดสอบช่วงของการเกิดสภาวะต่างๆของการคายประจุแบบโคโรนา เริ่มจากช่วงของการเกิดแสง (Glow) จนถึงการอาร์ค (Arc) ในอากาศ ซึ่งจากการศึกษาจะทราบถึงช่วงต่างๆของสภาวะการเกิดต่าง ๆ ได้นั้นจะต้องทราบถึงค่ามิเตอร์ที่มีปัจจัยต่อการเกิดสภาวะต่างๆจำเป็นต้องทราบถึง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด ขนาดของอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลท เมื่อทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ก็สามารถนำค่าต่างๆไปคำนวณ เพื่อให้ทราบถึงช่วงของสภาวะการเกิดในรูปแบบของค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้ ในการคำนวณนั้นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด ซึ่งในงานวิจัยที่ศึกษามีลักษณะรูปร่างเป็นปลายแหลม ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 สำหรับพารามิเตอร์ที่กำหนดในงานวิจัยนี้ ใช้แท่งเข็มทำจากลวดทังสเตน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm เป็นอิเล็กโทรด แผ่นเพลทที่ใช้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 67 mm และ 90 mm ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 21 mm และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 2kV – 30kV ผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ช่วงของการเกิดแสง (Glow) จนถึงการอาร์ค (Arc) ในอากาศ

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กำหนดมาในเบื้องต้นและผลการทดสอบจากรูปที่ 3.6 สามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าได้ทุกช่วงของการเกิดแสงจนไปถึงการอาร์คได้ ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยต้องการทราบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของช่วงเริ่มเกิดแสง (Glow) ซึ่งช่วงดังกล่าวใช้แรงดันไฟฟ้าที่

5kV - 20kV ดังนั้นสามารถคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าได้ และอิเล็กโทรดที่ใช้จัดอยู่ในกลุ่มสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จึงสามารถคำนวณได้จากสมการในบทที่ 2

จากสมการ $$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \qquad 0 \le \eta^* \le 1$$

โดยที่ η^* คือตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (filed utilization factor)

E_{ev} คือค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า

d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

จากสมการ $E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*}$ ต้องการทราบค่า η^* ซึ่งหาได้จากค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าส่วนด้วยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}}$$

สำหรับการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า E_{av} หาได้จากแท่งเข็มอิเล็กโทรดปลายแหลมซึ่งมีขนาด 1.5 mm ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 21 mm ดังนั้นต้องการหาค่าเฉลี่ย 10 จุดตั้งแต่ที่ d = 21.01 ถึง 21.74 mm จะได้

$$E_{av} = \frac{V}{d_1} + \frac{V}{d_2} + ... + \frac{V}{d_{10}}$$

แทนค่าจะได้

$$E_{av} = 2.34 \times 10^5 V/m$$

สำหรับการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ หาได้จาก ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 21 mm จะได้

$$E_{\max} = \frac{V}{d_0}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แทนค่าจะได้

$$E_{\max} = 2.38\times10^{5} V/m$$

ดังนั้น

$$\eta^{*} = \frac{2.34\times10^{5} V/m}{2.38\times10^{5} V/m}$$

$$\eta^{*} = 0.98$$

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการแล้วจะได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของช่วงเริ่มเกิดแสง (Glow) จะได้

$$E_{\max} = \frac{5000V}{\left(21\times10^{3} m\right)\left(0.98\right)}$$

$$E_{\max} = 2.42\times10^{5} V/m$$

ดังนั้นค่าความเข้มสูงสุดของการเกิดแสงอยู่ที่ $2.42\times10^{5} V/m$

จากการคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณที่จุดเดียวเป็นจุดของการเริ่มเกิดแสง (Glow) ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 5kV - 20kV ช่วงของการเกิดลำแสง (Streamer) ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 13kV - 23kV และช่วงของการเกิดการอาร์ค ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 23kV – 30kV โดยใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เท่ากัน ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของแต่ละช่วงของการสภาวะต่าง ๆ สามารถดูข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ช่วงของ Glow - Arc

ช่วงการเกิด	แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
Glow	5	$0.24\text{x}10^{6}$
	6	$0.29\text{x}10^{6}$
	7	$0.34\text{x}10^{6}$
	8	$0.39\text{x}10^{6}$
	9	$0.44\text{x}10^{6}$
	10	$0.49\text{x}10^{6}$
	11	$0.53\text{x}10^{6}$
	12	$0.58\text{x}10^{6}$

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ช่วง Glow – Arc (ต่อ)

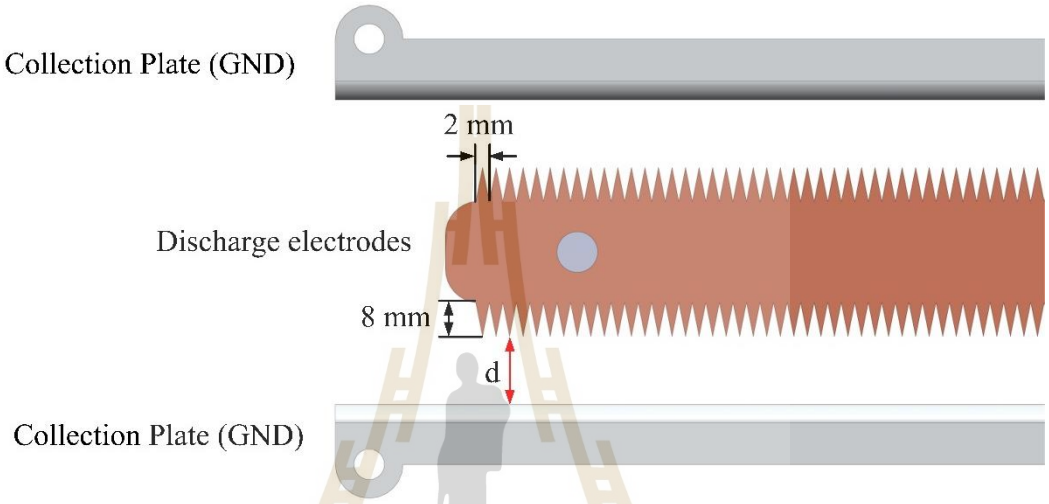
ช่วงการเกิด	แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
Streamers	13	0.63×10^6
	14	0.68×10^6
	15	0.73×10^6
	16	0.78×10^6
	17	0.83×10^6
	18	0.87×10^6
	19	0.92×10^6
	20	0.97×10^6
	21	1.02×10^6
	22	1.07×10^6
	23	1.12×10^6
Arc	24	1.16×10^6
	25	1.21×10^6
	26	1.26×10^6
	27	1.27×10^6
	28	1.36×10^6
	29	1.41×10^6
	30	1.46×10^6

จากตารางที่ 3.2 เป็นการสรุปค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในแต่ละช่วง โดยเริ่มคำนวณจากช่วงเริ่มต้นของการเกิดแสง (Glow) ซึ่งมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ $0.24 \times 10^6 – 0.58 \times 10^6$ V/m ช่วงของการเกิดลำแสง (Streamers) จะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ $0.63 \times 10^6 – 1.12 \times 10^6$ V/m และในช่วงของการอาร์ค (Arc) มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1.16×10^6 ขึ้นไป

3.4 การออกแบบและวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ทดสอบ

ในส่วนนี้จะอธิบายแนวความคิดในการวิเคราะห์การออกแบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมสำหรับใช้ทดสอบ จากการวิเคราะห์การออกแบบอิเล็กโทรดจากหัวข้อก่อนหน้า ผู้วิจัยสนใจที่จะออกแบบรูปแบบปลายแหลมตามรูปแบบที่ได้ศึกษามาข้างต้น โดยมีขนาดความกว้างและความสูงของปลายแหลมเท่ากับ 10 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w) อยู่ที่ 4 และมีอัตราส่วนจำนวนปลายแหลมต่อความยาวทั้งหมดของอิเล็กโทรดปลายแหลม (N/S) เท่ากับ

100 แต่ด้วยข้อจำกัดบางอย่างของการสร้างอิเล็กโทรดให้เหมาะสมสำหรับใช้งานจริงใช้งานจริง ทางผู้วิจัยมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวแปรบางอย่าง เพื่อให้สามารถสร้างได้ จึงออกแบบอิเล็กโทรดปลายแหลม มีขนาดความกว้างและความสูงของปลายแหลมเท่ากับ 2 และ 8 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w) และอัตราส่วนจำนวนปลายแหลมต่อความยาวทั้งหมดของอิเล็กโทรดปลายแหลม (N/S) ที่เท่าเดิม โดยใช้วัสดุเป็นทองแดงที่มีค่าความนำไฟฟ้า 59.6×10^6 S/m และออกแบบให้มีปลายแหลมทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 3.7



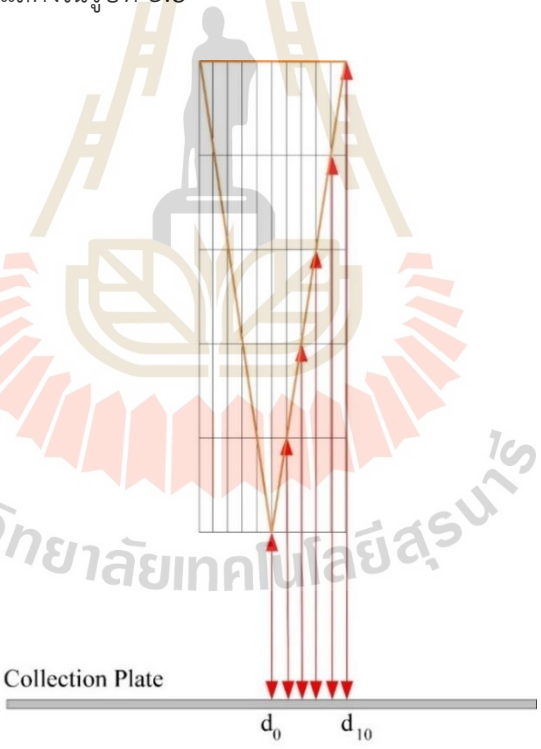
รูปที่ 3.7 ลักษณะของรูปแบบปลายแหลมที่ออกแบบและการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยทั่วไปแล้วช่วงของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนานั้น จะแบ่งการเกิด 3 ระดับด้วยกัน ประกอบไปด้วยสภาวะการเกิดรูปแบบเริ่มต้นจะเป็นช่วงของการเกิดโคโรนาที่เรียกว่า Glow ตามด้วย Streamer และเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดปลายแหลมเพิ่มขึ้น ก็จะเกิดการสปาร์กดิสชาร์จ หรือ Arc ซึ่งผู้วิจัยไม่ต้องการศึกษาช่วงของการ Arc เนื่องจากเป็นช่วงของการเบรคดาวน์ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจอยากทดสอบอีกสภาวะหนึ่งของการเกิดโคโรนาซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างการเกิดสภาวะ Streamer กับ Arc ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงของ Streamer ที่มีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงมาก ๆ ก่อนถึงช่วงของการเกิดการ Arc เราจึงเรียกสภาวะของการเกิดนี้ว่าเป็นช่วงของ Electric Field Strength ซึ่งจะเป็นอีกหนึ่งสภาวะที่ต้องการทดสอบ จากรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น จะประกอบไปด้วยสภาวะของการเกิด Glow , Streamer และ Electric Field Strength ซึ่งทั้ง 3 สภาวะนี้จะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งในการกำหนดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของแต่ละระยะนั้น สามารถกำหนดได้จากการคำนวณช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ จากตารางที่ 3.2 ในหัวข้อก่อนหน้า โดยจะกำหนดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดสภาวะนั้น ๆ เริ่มจาก Glow, Streamer และ Electric Field Strength จะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 0.24×10^6 0.68×10^6 และ 1.12×10^6 V/m

เมื่อกำหนดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของแต่ละช่วงการเกิดแล้ว ในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ สามารถใช้สมการในบทที่ 2 คำนวณหาระยะห่างได้เลย แต่เนื่องจากอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ได้ออกแบบมาใหม่ขนาดความสูงและความกว้างของปลายเปลี่ยน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าของตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (filed utilization factor) ดังนั้นภายใต้รูปแบบนี้สามารถคำนวณหาค่าของตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (filed utilization factor) ได้จาก

$$\eta^{*} = \frac{E_{av}}{E_{\max}}$$

ในการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า E_{av} หาได้จากขนาดความสูงของปลายแหลม 8 mm และความกว้างของปลายแหลมที่มีขนาด 2 mm และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะอ้างอิงจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาข้างต้นมีขนาดเท่ากับ 21 mm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 20kV โดยต้องการหาค่าเฉลี่ย 10 จุด ที่จุด d1 - d10 ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

จะได้สมการเป็น

$$E_{av} = \frac{V}{d_1} + \frac{V}{d_2} + ... + \frac{V}{d_{10}}$$

แทนค่าจะได้

$$E_{av} = 7.94 \times 10^5 V / m$$

ในการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ หาได้จาก ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 21 mm จะได้

$$E_{\max} = \frac{V}{d_0}$$

แทนค่าจะได้

$$E_{\max} = 9.52 \times 10^5 V / m$$

ดังนั้น $$\eta^* = \frac{7.94 \times 10^5 V / m}{9.52 \times 10^5 V / m}$$

$$\eta^* = 0.83$$

จากการคำนวณรูปแบบของปลายแหลมที่ต้องการออกแบบจะต้องใช้ค่าของตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (filed utilization factor) เท่ากับ 0.83 กรณีที่ต้องเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณาของตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้าก็มีค่าเท่าเดิม เนื่องจากใช้ขนาดอิเล็กโทรดปลายแหลมที่เท่ากัน

ดังนั้นเมื่อทราบค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ออกแบบสำหรับทดสอบแล้ว สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ (d) ได้จากค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในแต่ละช่วงของการเกิด ซึ่งในการคำนวณจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบจริง 10kV สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

จากสมการ $$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*}$$

จะได้ $$d = \frac{V}{E_{\max}\eta^*}$$

ในช่วงของการเกิดสภาวะที่เรียกว่า Glow จะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 0.24×10^6 V/m แทนค่าในสมการจะได้

$$d = \frac{10kV}{\left(0.24\times10^{6}V/m\right)0.83}$$

$$d = 0.050m$$

$$d = 50mm$$

ในช่วงของการเกิดสภาวะที่เรียกว่า Streamer จะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 0.68×10^{6} V/m แทนค่าในสมการจะได้

$$d = \frac{10kV}{\left(0.68\times10^{6}V/m\right)0.83}$$

$$d = 0.018m$$

$$d = 18mm$$

ในช่วงของการเกิดสภาวะที่เรียกว่า Electric Field Strength จะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 1.12×10^{6} V/m แทนค่าในสมการจะได้

$$d = \frac{10kV}{\left(1.12\times10^{6}V/m\right)0.83}$$

$$d = 0.011m$$

$$d = 11mm$$

ดังนั้นจากการคำนวณหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ที่ช่วงความเข้มสนามไฟฟ้า Glow, Streamer และ Electric Field Strength มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 50, 18 และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ

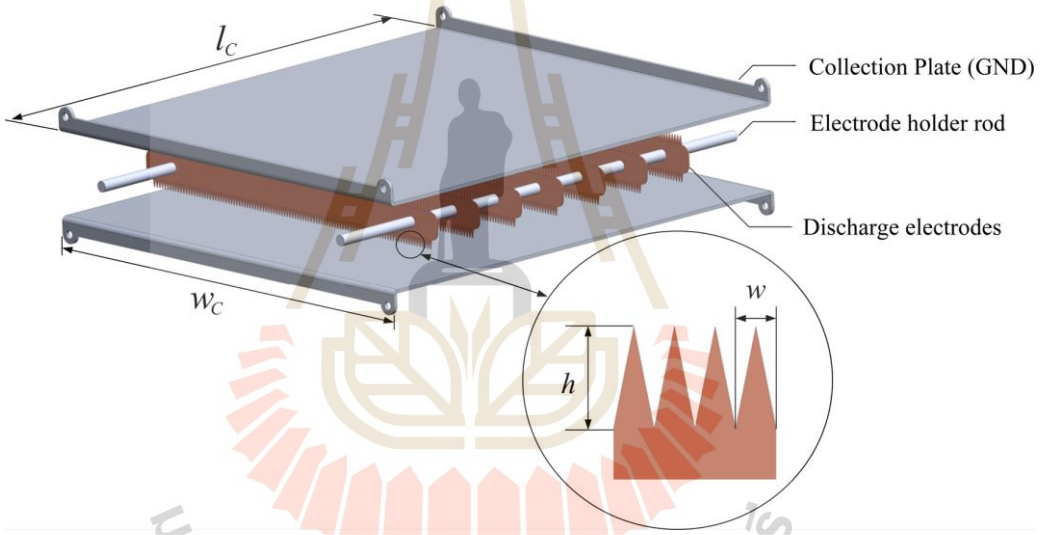
3.5 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมและการปรับระยะห่างของแผ่นเพลท

จากการวิเคราะห์การออกแบบอิเล็กโทรดและหาระยะห่างของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลมและการปรับระยะห่างของแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ให้อยู่ในช่วงของการเกิดสภาวะโคโรนาต่าง ๆ ซึ่งเครื่องต้นแบบถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับตัวปล่อยอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ออกแบบจะถูกติดตั้งไว้กับที่ไม่สามารถปรับได้ จะถูกติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลมนั้นจะติดตั้งที่ 7 ชุด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับอิเล็กโทรดปลายแหลมอยู่ที่ 30 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปล่อยสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยขนาดของอิเล็กโทรดปลายแหลม มีขนาดความกว้าง (W) เท่ากับ

25 มิลลิเมตร ความยาว (S) เท่ากับ 220 มิลลิเมตร และความหนา (T) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุเป็นทองแดง และขนาดของแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ มีขนาดความกว้าง (Wc) เท่ากับ 270 มิลลิเมตร ความยาว (Lc) เท่ากับ 250 มิลลิเมตร และความหนา (Tc) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมเพลท

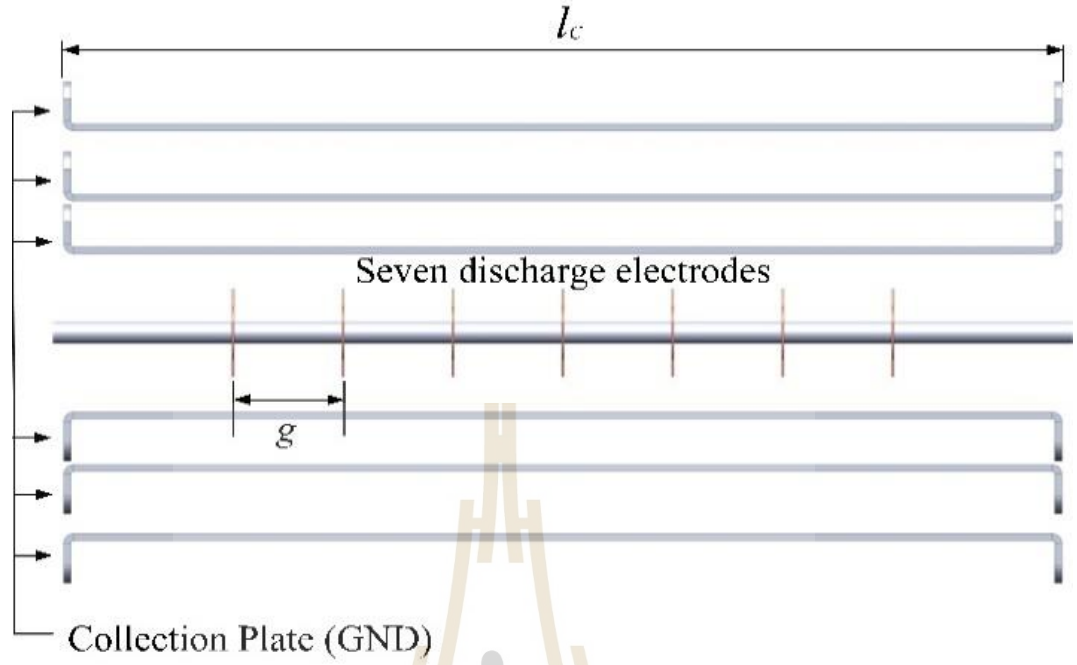
ในส่วนของการทดสอบจะถูกทดสอบที่สามระดับ เริ่มต้นด้วยระยะเริ่มต้นที่เรียกว่า Glow ตามด้วย Streamer และ Electric Field Strength ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนาที่สภาวะต่างๆ ซึ่งในการกำหนดช่วงของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ช่วงต่างๆ สามารถกำหนดได้จากการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 การติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลมและแผ่นเพลท จะถูกติดตั้งบนโครงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 300 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 หลังจากนั้นก็ประกอบลงโครงเครื่องสำหรับทดสอบต่อไป



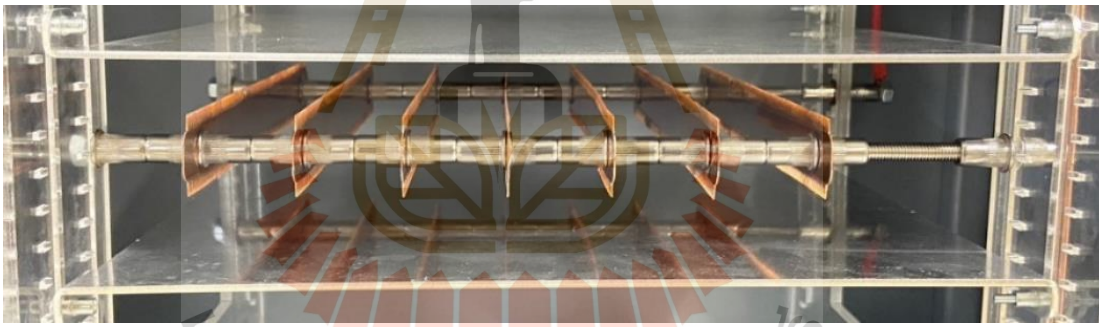
ก)

ข)

รูปที่ 3.9 การติดตั้งอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ก) อิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างการติดตั้งใช้งานจริง

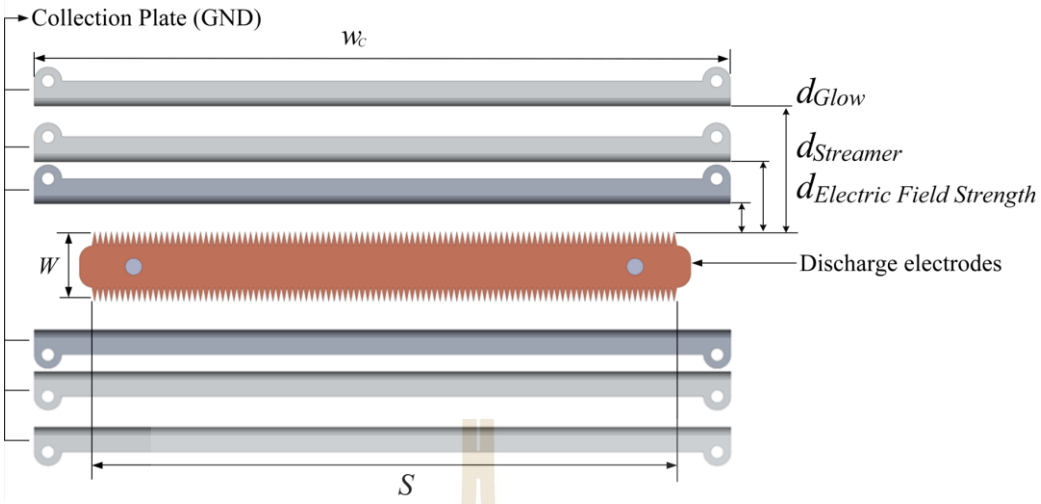


ก)

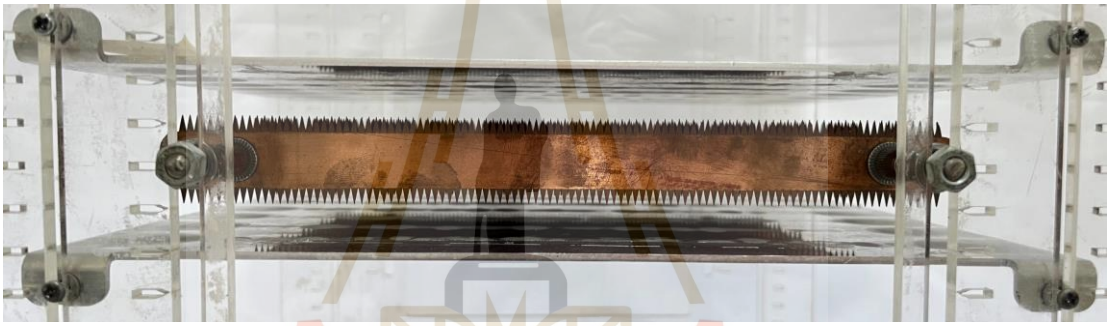


ข)

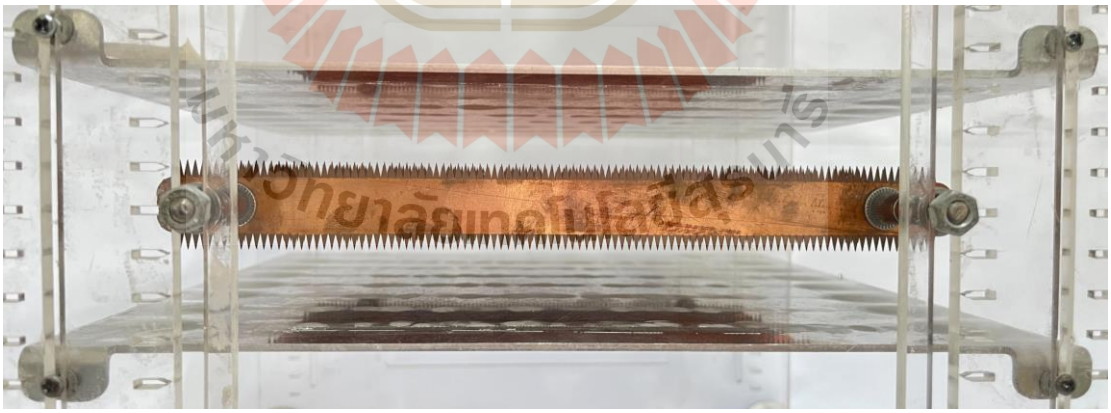
รูปที่ 3.10 การจัดเรียงอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ ก) การจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างการติดตั้งใช้งานจริง



ก)

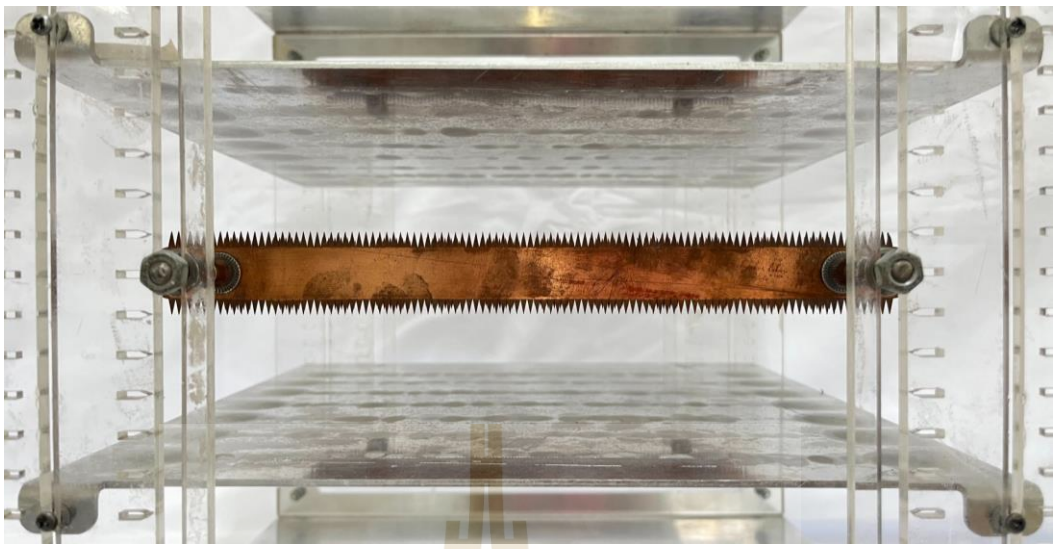


ข)



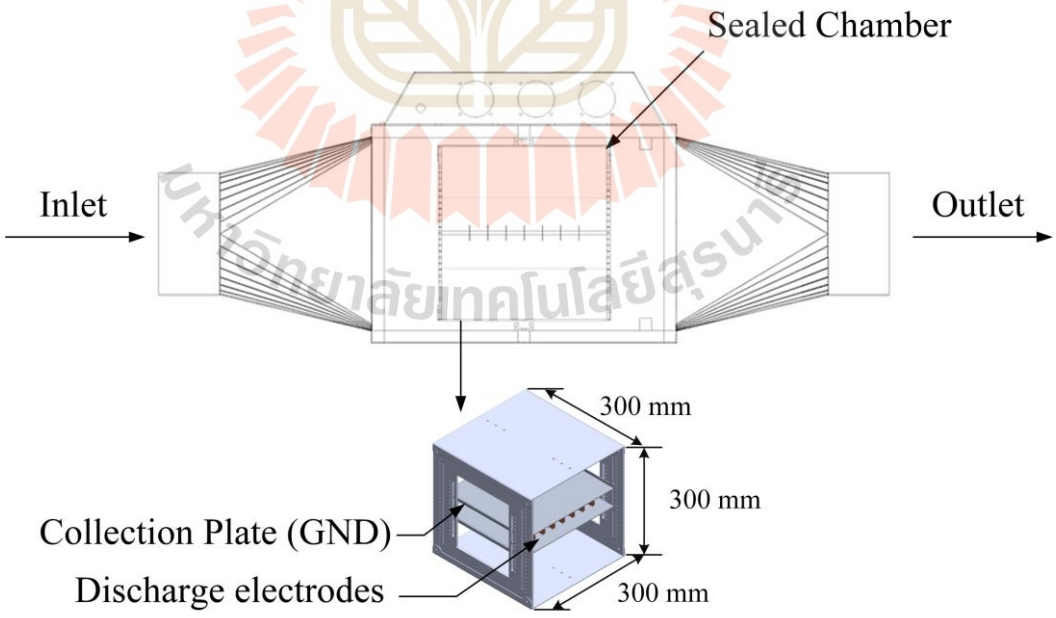
ค)

รูปที่ 3.11 การปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ เพื่อกำหนดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ต้องการ มุมมองด้านหน้า ก) รูปแบบที่ต้องการปรับ ข) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength ค) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Streamer และ ง) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Glow



ง)

รูปที่ 3.11 การปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์ เพื่อกำหนดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ต้องการ มุมมองด้านหน้า ก) รูปแบบที่ต้องการปรับ ข) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength ค) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Streamer และ ง) การปรับระยะใช้งานจริงที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Glow (ต่อ)

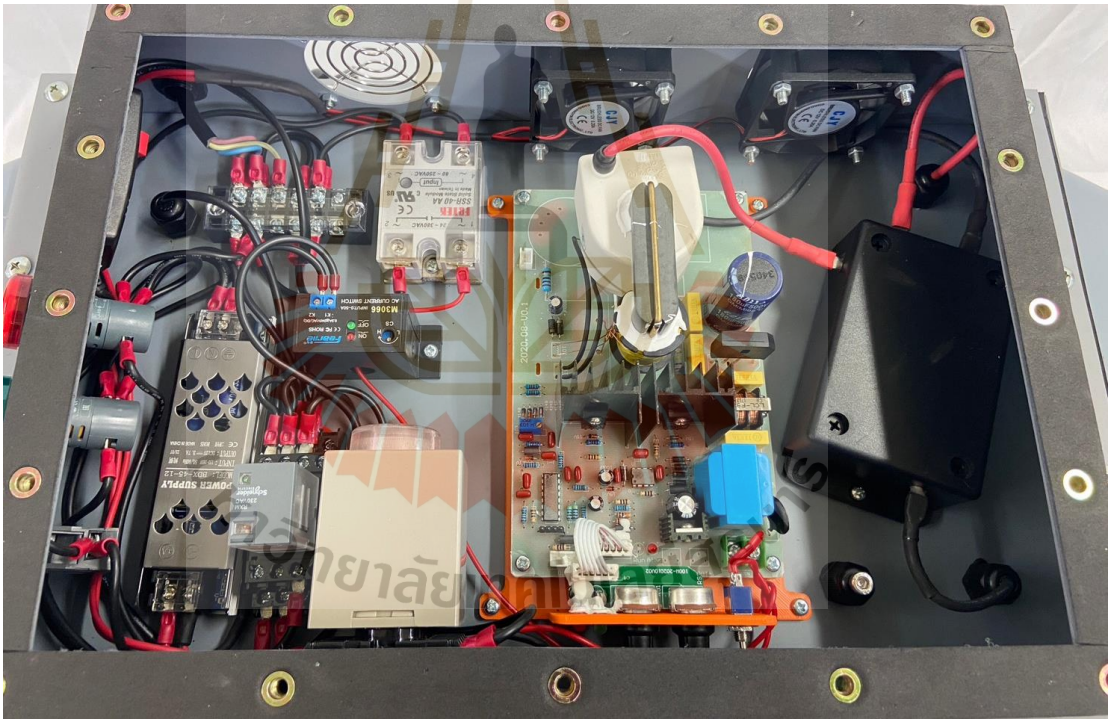


ก)

รูปที่ 3.12 ลักษณะของตัวเครื่องของการคายประจุโคโรนา ก) ลักษณะของตัวเครื่องที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างของตัวเครื่องที่ใช้งานจริง

ข)

รูปที่ 3.12 ลักษณะของตัวเครื่องของการคายประจุโคโรนา ก) ลักษณะของตัวเครื่องที่ออกแบบ ข) ตัวอย่างของตัวเครื่องที่ใช้งานจริง (ต่อ)



รูปที่ 3.13 ชุดควบคุมการทำงานของระบบการปล่อยโคโรนา

รูปที่ 3.14 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.3 สรุปพารามิเตอร์ของอิเล็กโทรดรูปแบบปลายแหลมกับแผ่นเพลทที่ใช้เป็นกราวด์

การตั้งค่าอิเล็กโทรด	**พารามิเตอร์ (mm)**
ความยาวของอิเล็กโทรดปลายแหลม (S)	220
ความกว้างของอิเล็กโทรดปลายแหลม (W)	25
ความหนาของอิเล็กโทรดปลายแหลม (T)	0.5
ความสูงของปลายแหลม (h)	8
ความกว้างของปลายแหลม (w)	2
ความยาวของ *Collection plate* (*GND*) (lc)	250
ความกว้างของ *Collection plate* (*GND*) (wc)	270
ความหนาของ *Collection plate* (*GND*) (tc)	2
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรด (g)	30
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ช่วงของ Glow	40
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ช่วงของ Streamer	20
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทที่ช่วงของ Electric Field Strength	10

3.6 สรุป

การวิเคราะห์และออกแบบลักษณะของรูปแบบอิเล็กโทรด เป็นการวิเคราะห์หารูปแบบของปลายแหลมที่มีความเหมาะสมที่สามารถปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รูปแบบอิเล็กโทรดปลายแหลม มีขนาดความกว้างและความสูงของปลายแหลมเท่ากับ 2 และ 8 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w) และอัตราส่วนจำนวนปลายแหลมต่อความยาวทั้งหมดของอิเล็กโทรดปลายแหลม (N/S) ที่เท่าเดิม โดยใช้วัสดุเป็นทองแดง เนื่องจากคุณสมบัติทองแดงสามารถสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าได้มากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าความนำทางไฟฟ้ามากกว่าวัสดุชนิดอื่น สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างระยะห่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับแผ่นเพลท จะทดสอบที่สภาวะของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนาในช่วงของ Glow, Streamer และ Electric Field Strength ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 0.24×10^6, 0.68×10^6 และ 1.12×10^6 V/m ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะได้ที่ 50, 18 และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ และในส่วนของระบบการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ จะทดสอบเป็นแบบระบบปิด ซึ่งรายละเอียดผลการทดสอบจะได้อธิบายในบทถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

4.1. กล่าวนำ

จากการวิเคราะห์และออกแบบอิเล็กโทรดสำหรับการปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าในสภาวะการคายประจุแบบโคโรนาเพื่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ โดยใช้การคำนวณทางหลักของคณิตศาสตร์ พบว่าลักษณะของอิเล็กโทรดที่เป็นแบบปลายแหลมที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w) เท่ากับ 4 มีการปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเลือกออกแบบอิเล็กโทรดที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 8 มิลลิเมตร และนอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของการคายประจุแบบโคโรนาที่มีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

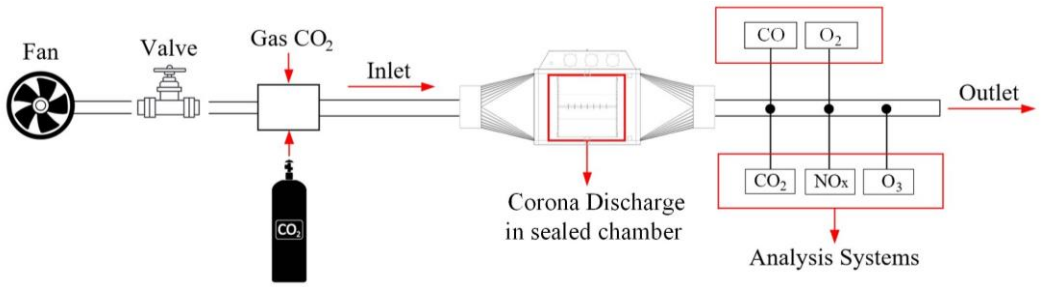
ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะได้ทำการทดสอบเพื่อวัดผลกระทบจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับรูปแบบของการทดสอบจะกำหนดเงื่อนไขการทดสอบอยู่ด้วยกัน 2 เงื่อนไข ประกอบไปด้วยเงื่อนไขระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแบ่งเป็นช่วงของการเกิดสภาวะ Glow, Streamer และ Electric Field Strength แต่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจะทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min โดยการเลือกระดับการไหลของอากาศทั้งสามระดับนี้ เป็นการเลือกตามขีดจำกัดการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งในการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอัตราการไหลต่ำกว่า 40 L/min ทำให้การไหลของอากาศไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่อัตราการไหลสูงกว่า 160 L/min ทำให้ได้ผลที่ไม่แม่นยำในระบบการทดสอบ งานวิจัยนี้จึงใช้อัตราการไหลในช่วงนี้เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ สำหรับในการทดลองแต่ละครั้ง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ 420 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะบรรยากาศปกติ และที่ความเข้มข้น 1200 ppm ซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์ ระยะเวลาในการทดสอบกำหนดไว้ที่ 15 นาที ระบบมีการใช้กำลังงานที่ 20 วัตต์ ในส่วนของการวัดผลการทดสอบ การสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม (ไม่เปิดแหล่งจ่าย) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในส่วนของการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์แบบไม่เปิดแหล่งจ่าย พบว่ามีการลดลงของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 6.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 15 นาที ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากการรั่วของก๊าซเนื่องจากการปิดผนึกที่ไม่สมบูรณ์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ อัตราการรั่วไหลนี้ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบ สำหรับในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอผลลัพธ์และข้อมูลเชิงลึกที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้ เพื่อให้เข้าใจอย่างครอบคลุมถึงผลกระทบของความเข้มของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มเวลา เพิ่มกำลังงานในการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และการก่อตัวของโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ การเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

กับความเร็วที่ใช้ และการเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ในพลาสมาแบบต่างๆ ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายต่อไป

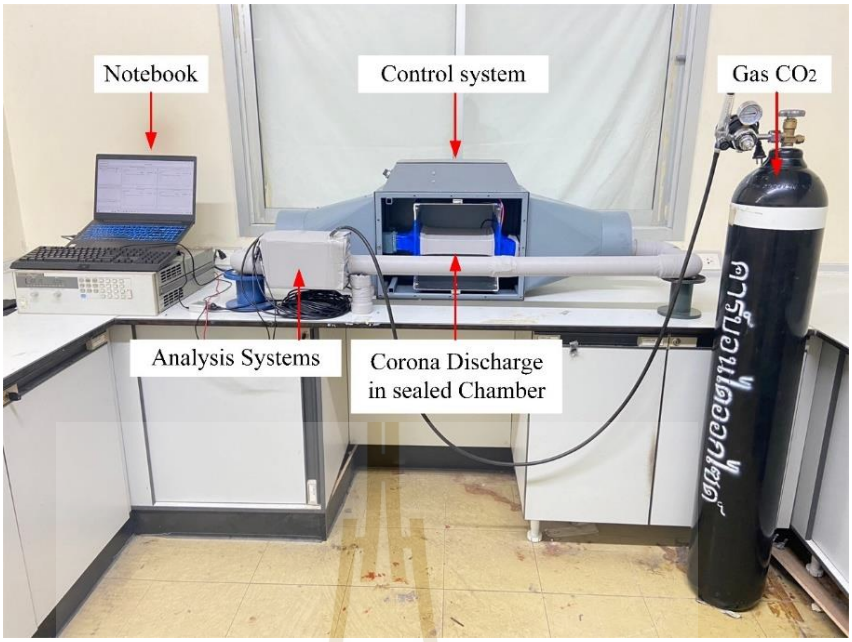
4.2 ระบบทดสอบการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุแบบโคโรนา

สำหรับระบบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ จะใช้การคายประจุแบบโคโรนาดิสชาร์จเชิงลบ ในการปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบจะเป็นแบบระบบปิด ซึ่งระบบปิดดังกล่าว จะมีไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่ในระบบปิดจากอากาศที่ถูกปิดอยู่ในระบบก่อนการทดสอบด้วย โดยการทดสอบเริ่มจากปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เข้าไปในระบบของการทดสอบ แล้วทำการเปิดวาวล์ เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ โดยใช้พัดลมในการอัดอากาศเข้าไปในระบบ ซึ่งแก๊สก็จะไหลผ่านท่อไปที่ระบบการปล่อยโคโรนาเชิงลบ เวียนเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งระบบการคายประจุแบบโคโรนาสามารถปรับช่วงของสภาวะการเกิดได้ ซึ่งสามารถปรับได้ 3 ระดับ และใช้เครื่องมือที่ถูกติดตั้งไว้ทางออกของระบบ วิเคราะห์องค์ประกอบและค่าความเข้มของของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

ในระบบการทดสอบการคายประจุแบบโคโรนาดิสชาร์จที่มีไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่ในระบบปิดจากอากาศจะส่งผลต่อการการเกิด NO_x และโอโซน O_3 ในระบบปิด เนื่องจาก Corona Discharge สามารถให้พลังงานเพียงพอในการทำให้ N_2 และ O_2 แตกตัวและทำปฏิกิริยากันตามสมการที่กล่าวมาในบทที่ 2 ซึ่งในการหาความสัมพันธ์ของระบบปิดนี้ ยกตัวอย่างค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดดอกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 420 PPM ซึ่งคือจำนวนส่วนในล้านส่วน ดังนั้น 420 PPM ของ CO_2 หมายถึง 420 ส่วนของ CO_2 ในล้านส่วนของอากาศทั้งหมด ในการแปลง PPM เป็นเปอร์เซ็นต์สามารถทำได้โดยการแบ่ง PPM ด้วย 10,000 เปอร์เซ็นต์ของ CO_2 จะได้ 420/10000 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.042 เปอร์เซ็นต์ และในอากาศปกติประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 78% และออกซิเจนประมาณ 21% เมื่อมีการเพิ่ม CO_2 ในระบบ จะต้องหักเปอร์เซ็นต์ของ CO_2 ออกจากเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนและออกซิเจนในอากาศปกติ โดยสัดส่วนของไนโตรเจนและออกซิเจนจะยังคงอยู่ในอัตราส่วนเดิม จะได้ปริมาณ N_2 = 78% x (1-0.00042) = 77.96 % และปริมาณ O_2 = 21% x (1-0.00042) = 20.99 % ดังนั้นระบบปิดนี้จะประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 77.96%, ออกซิเจนประมาณ 20.99%, และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.042%



รูปที่ 4.1 ระบบการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุโคโรนาเชิงลบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 ระบบการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการคายประจุโคโรนาที่ใช้ทดสอบจริง

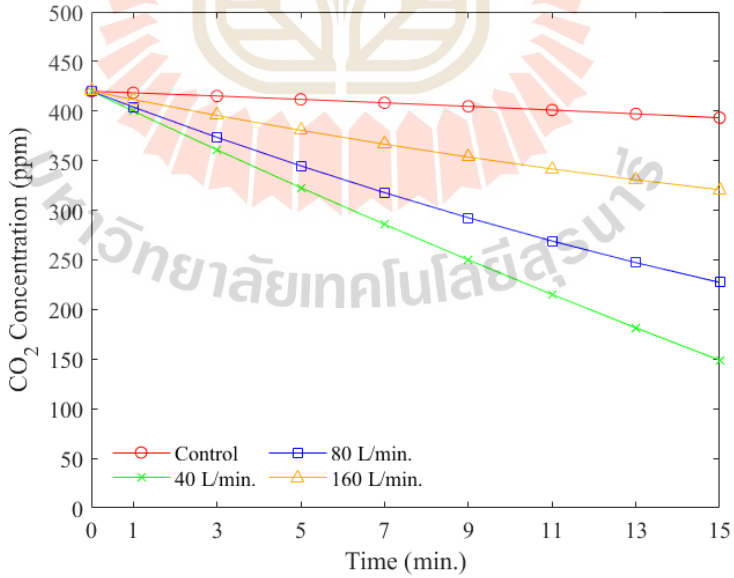
ในการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซที่เกิดขึ้น จะทำการวัดผลที่ได้ 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ถูกปล่อยเข้าในระบบเพื่อสลายตัว ส่วนก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และโอโซน เป็นผลพลอยได้จากระบบการคายประจุแบบโคโรนา สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลจะประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย testo 350 ใช้สำหรับวัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ และเครื่องตรวจวัดก๊าซโอโซน (Ozone Gas Detector) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.4

รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย testo 350

รูปที่ 4.4 เครื่องตรวจวัดก๊าซโอโซน (Ozone Gas Detector)

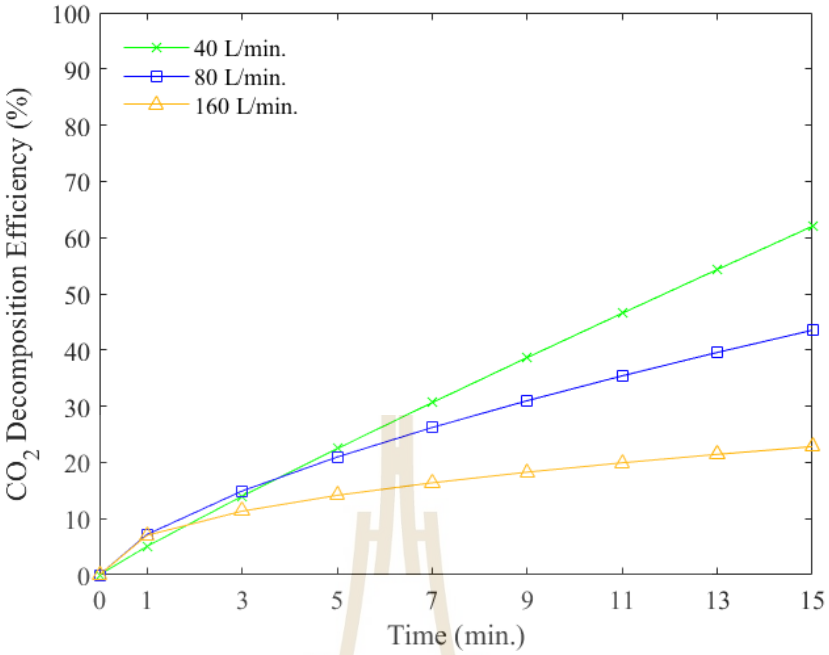
4.3 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Glow

สำหรับผลในการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow ที่อัตราการไหลต่างๆ เป็นขั้นตอนเฉพาะของการปล่อยโคโรนาที่มีลักษณะของพลาสมาที่ค่อนข้างเสถียรและสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยให้เข้าใจสภาวะที่คงที่ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ได้ ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.5

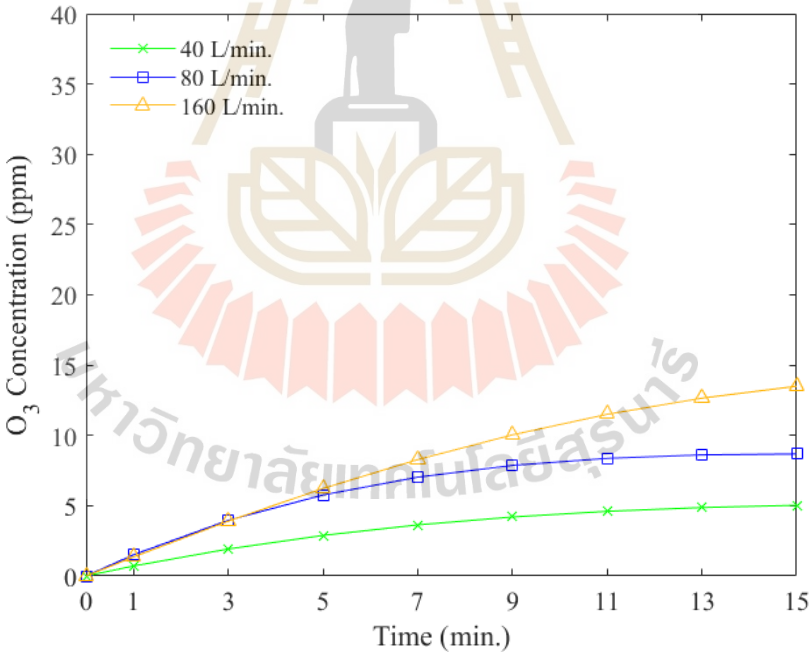


(a)

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow a) ผลการสลายตัว CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น

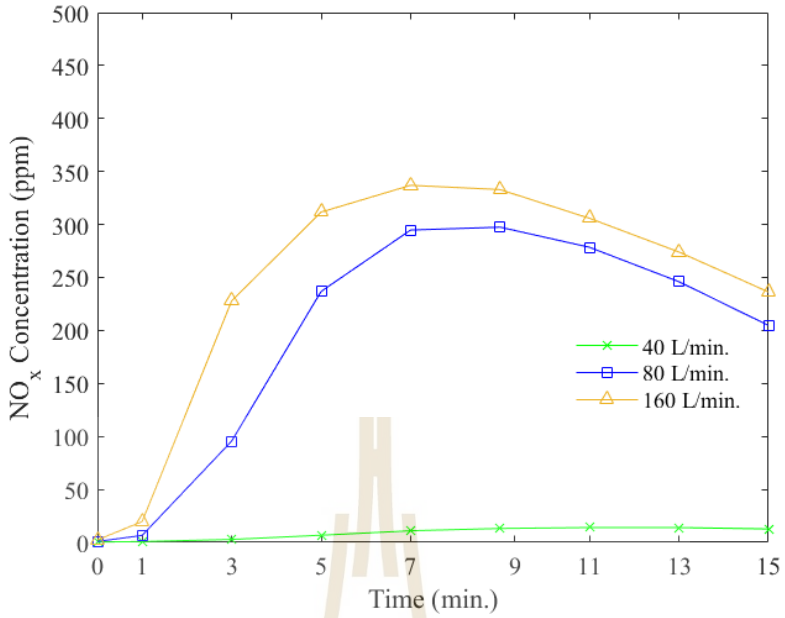


(b)



(c)

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow a) ผลการสลายตัว CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)



(d)

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow a) ผลการสลายตัว CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow เมื่อทำการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบที่ค่าความเข้มข้นด้านเข้า 420 ppm เพื่อสลายตัว พบว่าระดับความเข้มข้นที่ด้านออก มีแนวโน้มที่เริ่มลดลงเมื่อทำการเปิดใช้งานเครื่องสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า เปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม (แบบปิดเครื่อง) ดังแสดงรูปที่ 4.5(a) โดยผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ได้ทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min โดยแต่ละการทดสอบมีระยะเวลา 15 นาที การวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันช่วยให้เข้าใจผลกระทบของตัวแปรนี้ต่อประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 หลังการทดสอบ ค่าความเข้มข้นของ CO_2 ลดลงอยู่ที่ 148, 227 และ 320 ppm ตามลำดับของอัตราการไหล ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการสลายตัวสูงสุดที่ 62.34%, 42.24% และ 18.58% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการสลายตัวของ CO_2 ลดลง ในขณะที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่ามีประสิทธิภาพในการสลายตัวของ CO_2 ที่มากขึ้น ซึ่งเกิดจากพลศาสตร์การไหลของแก๊สและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ที่อัตราการไหลต่ำโมเลกุลของ CO_2 จะอยู่ในบริเวณการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้การมีปฏิกิริยากับสปีชีส์ที่ทำปฏิกิริยาจากการปล่อยประจุที่สภาวะการเกิด Glow มากขึ้น ซึ่งจะเพิ่มการสลายตัวของ CO_2 ในทางกลับกัน อัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของ CO_2 ผ่านบริเวณการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลาในการมีปฏิกิริยาต่อการสลายตัวลดลง

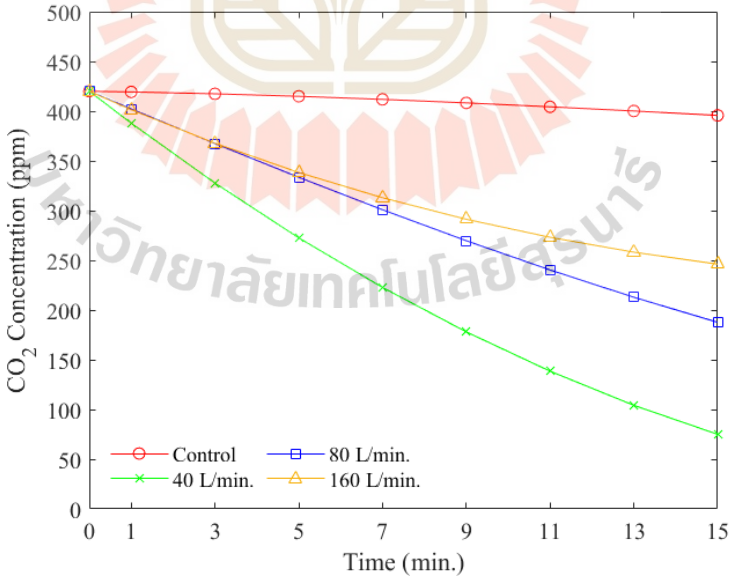
จากรูปที่ 4.5(c) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ O_3 เพิ่มขึ้นตามเวลาในทุกอัตราการไหลของอากาศ โดยอัตราการไหลที่สูงกว่าส่งผลให้ระดับ O_3 สูงขึ้น ที่อัตราการไหล 40 L/min มีค่าสูงสุด

ประมาณ 5.0 ppm ที่เวลา 15 นาที ในขณะที่ 80 L/min มีค่าสูงสุดประมาณ 8.6 ppm และที่ 160 L/min มีค่าสูงสุดประมาณ 13.5 ppm ซึ่งอัตราการไหลที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มการผลิต O_3 เนื่องจากมีออกซิเจนและการทำปฏิกิริยากับสปีชีส์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่าจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการสลายตัวของ CO_2 เนื่องจากมีระยะเวลาในทำปฏิกิริยานานขึ้น แสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยนระหว่างการปรับการสลายตัวของ CO_2 ให้เหมาะสมและการควบคุมการเกิด O_3

จากรูปที่ 4.5(d) แสดงความเข้มข้นของ NO_x ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาเริ่มทดสอบ สำหรับอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้นที่ 80 L/min และ 160 L/min มีค่าสูงสุดอยู่ที่เวลาประมาณ 7 นาทีก่อนที่ค่าความเข้มข้นจะลดลง โดยที่ 160 L/min มีค่าอยู่ที่ประมาณ 337 ppm และ 80 L/min ประมาณ 285 ppm และอัตราการไหล 40 L/min ช่วยรักษาระดับความเข้มข้น NO_x ให้ต่ำอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มการก่อตัวของ NO_x เนื่องจากการมีปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง แต่ความเข้มข้นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายตัว ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มการผลิต NO_x ในขณะที่อัตราต่ำสุดจะลดการผลิตให้เหลือน้อยที่สุด โดยเน้นถึงข้อดีข้อเสียในการปรับการไหลเวียนของอากาศให้เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพของกระบวนการที่แตกต่างกัน

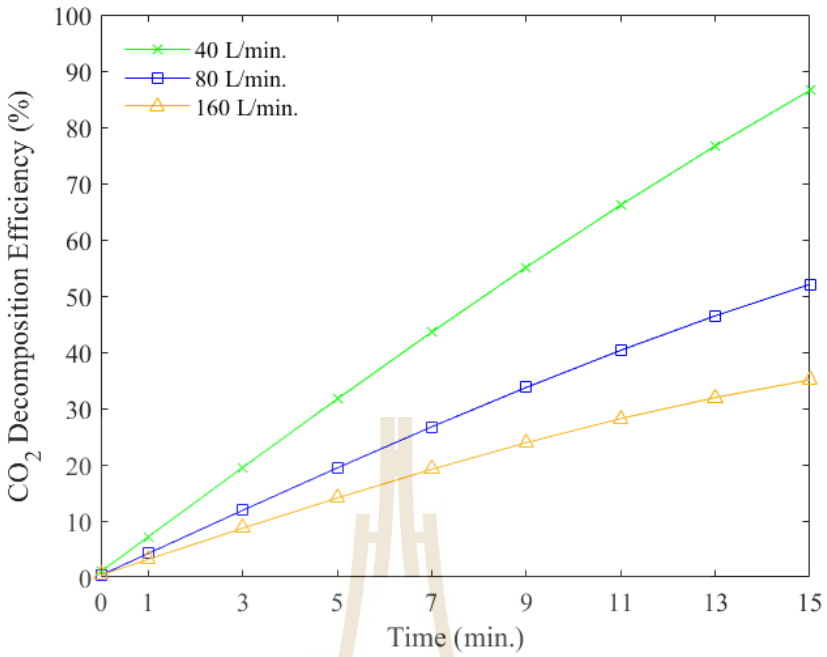
4.4 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Streamer

สำหรับผลในการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer ที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าช่วงของการเกิด Glow

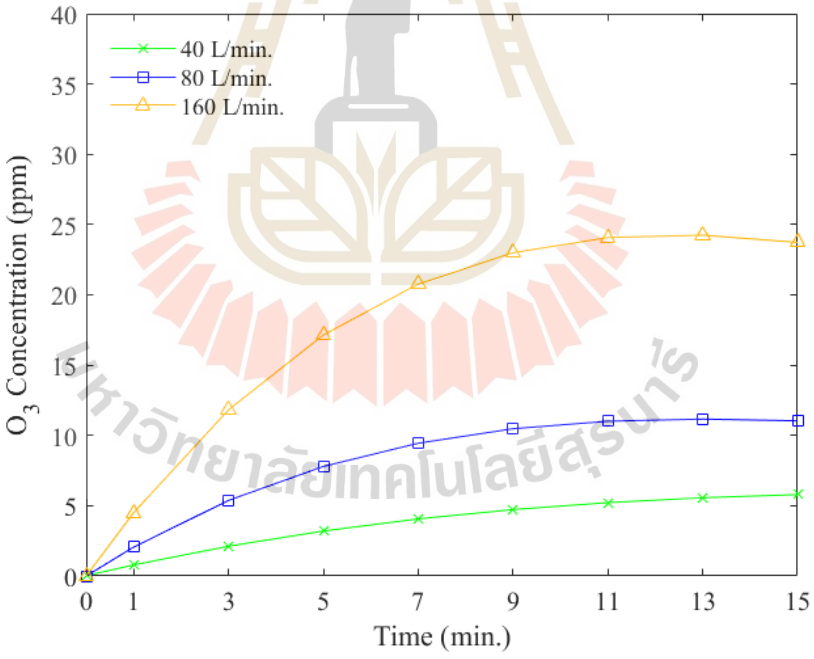


(a)

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น

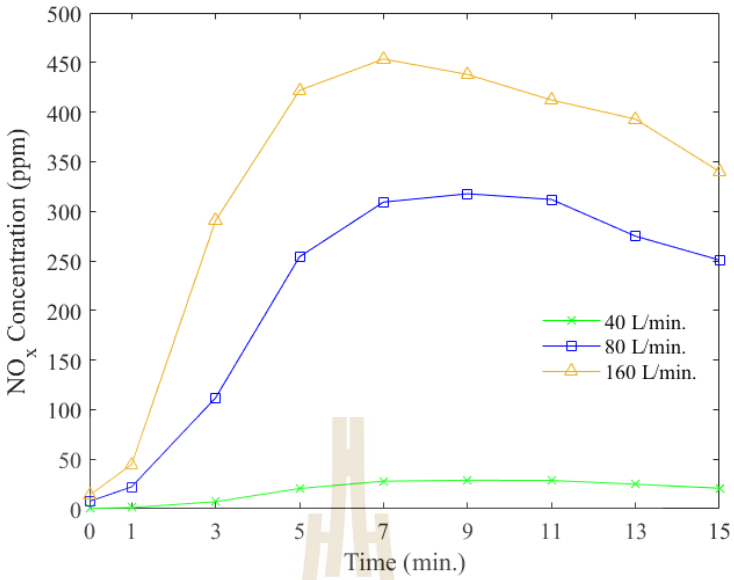


(b)



(c)

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)



(d)

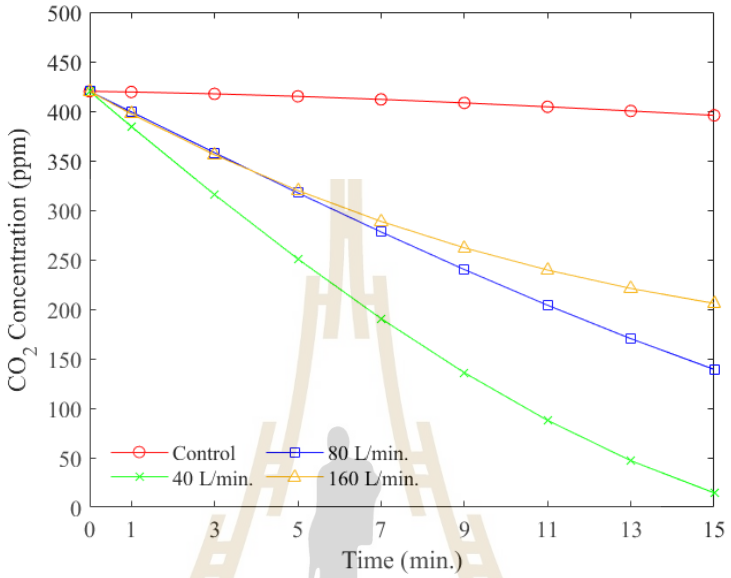
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

จากรูปที่ 4.6 เป็นผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะถูกวิเคราะห์ตามรูปแบบของอัตราการไหลของอากาศที่ต่างกัน เริ่มจากผลการทดสอบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min ค่าความเข้มข้นลดลงอยู่ที่ 75, 187 และ 246 ppm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(a) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการสลายตัวสูงสุดของแต่ละอัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 80.92%, 52.42%, และ 37.40% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

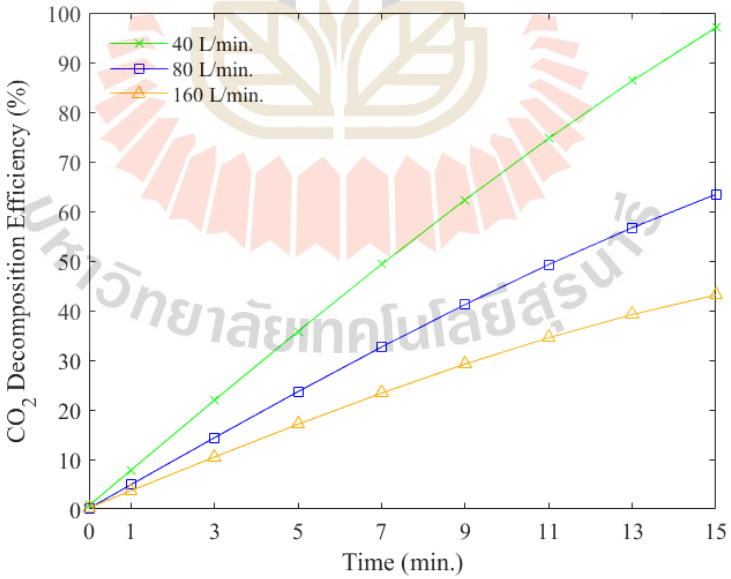
ในส่วนผลการทดสอบของสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบ สารประกอบของโอโซน O_3 ค่าความเข้มข้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งค่าความเข้มข้นที่เกิดในระบบอยู่ที่ 5.8, 11.0 และ 23.7 ppm สำหรับอัตราการไหลของอากาศตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(c) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ O_3 กับอัตราการไหลที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้จากการชนกันของปฏิกิริยาที่บ่อยขึ้นระหว่างโมเลกุลออกซิเจนและอิเล็กตรอนพลังงานสูง ซึ่งพบมากขึ้นที่อัตราการไหลที่สูงขึ้น และในส่วนของสารประกอบ NO_x แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ NO_x เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบก่อนที่จะลดลง เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาการทดสอบ 15 นาที ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 26, 242 และ 323 ppm ตามลำดับของอัตราการไหล แสดงดังรูปที่ 4.6(d) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบ NO_x ในระบบเพิ่มขึ้น ในช่วงแรก NO_x จะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่หลังจากนั้นความเข้มข้นของ NO_x จะลดลง เนื่องจากในช่วงแรกมีการก่อตัวของ NO_x มาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป NO_x จะกระจายและเจือจางออกไปในระบบเนื่องจากการไหลของอากาศที่ต่อเนื่อง

4.5 ผลการทดสอบความเข้มสนามไฟฟ้าที่สภาวะการเกิด Electric Field Strength

สำหรับผลในการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดของงานวิจัยนี้และมากกว่าช่วงของการเกิด Streamer และ Glow

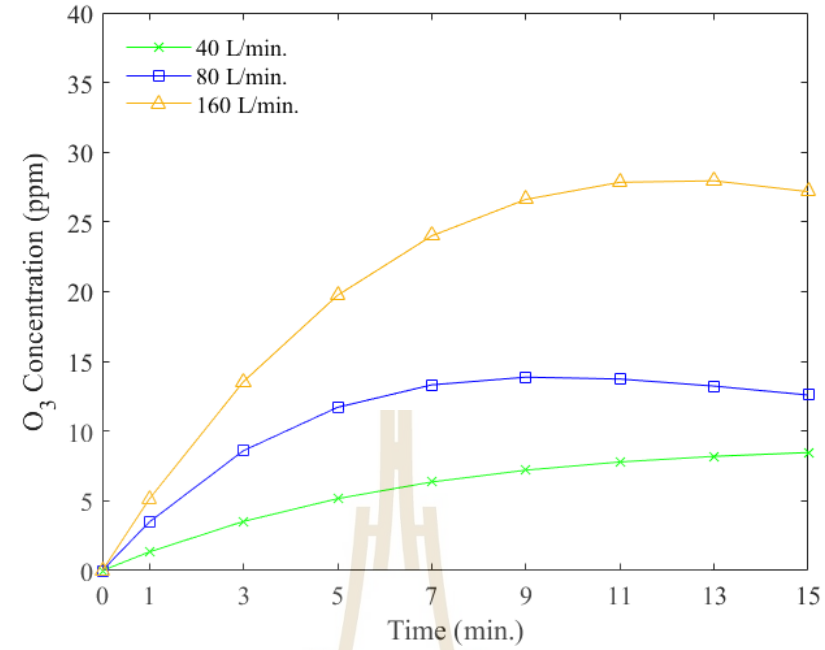


(a)

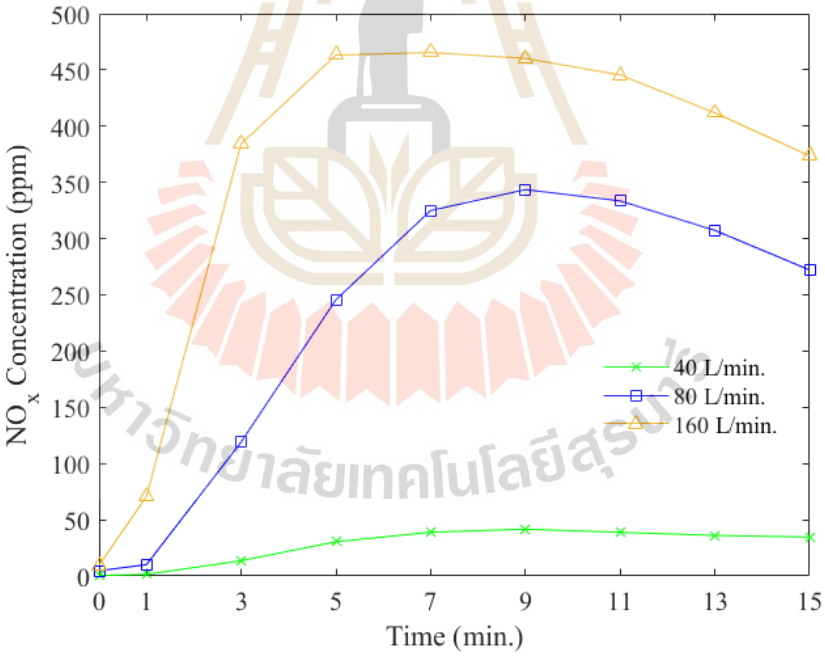


(b)

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น



(c)



(d)

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

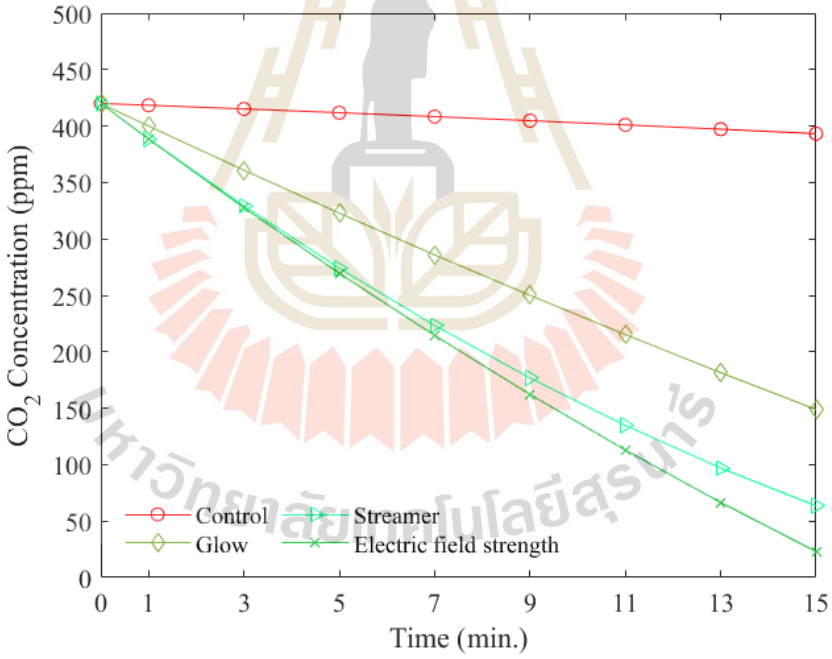
จากรูปที่ 4.7 เป็นผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดสนามไฟฟ้าที่เข้มมากกว่าระดับอื่น เป็นระดับก่อนการเกิดการอาร์ค ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะถูกวิเคราะห์ตามรูปแบบของอัตราการไหลของอากาศที่ต่างกัน เช่นเดียวกับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าก่อนหน้า ซึ่งผลการทดสอบสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลจาก 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min ค่าความเข้มข้นลดลงอยู่ที่ 14, 139 และ 206 ppm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(a) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการสลายตัวสูงสุดของแต่ละอัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 96.44%, 64.63% และ 47.58% ตามลำดับ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(b) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงสุดได้ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูง โดยเฉพาะที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min เป็นอัตราการไหลที่ต่ำ แก๊สจะมีเวลาอยู่กับสนามไฟฟ้านานขึ้น เพิ่มโอกาสที่โมเลกุล CO_2 จะปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนพลังงานสูงซึ่งช่วยในการสลายตัว ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะสร้างอิเล็กตรอนพลังงานสูงมากขึ้น ซึ่งมีความสำคัญในการเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมีที่จำเป็นในการสลายโมเลกุล CO_2

ในระบบการปล่อยโคโรนา เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซ O_3 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งค่าความเข้มข้นที่เกิดในระบบอยู่ที่ 8.4, 12.6 และ 27.2 ppm ตามลำดับการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(c) เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะมีอิเล็กตรอนพลังงานสูงมากขึ้นที่จะเริ่มต้นการแยกโมเลกุลออกซิเจน ทำให้ความเข้มข้นของ O_3 สูงขึ้น

สำหรับสารประกอบก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ผลการทดสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นของ NO_x เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะลดลงตามเวลา การเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของความเข้มข้นของ NO_x เกิดจากการมีอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจนจากการแยกตัวด้วยอิเล็กตรอนพลังงานสูงในช่วงแรกของกระบวนการปล่อยประจุ เมื่อการปล่อยประจุถึงจุดสูงสุด ความเข้มข้นของสารประกอบที่ทำปฏิกิริยาสูงสุด ทำให้เกิดการสร้าง NO_x อย่างรวดเร็ว หลังจากการเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ความเข้มข้นของ NO_x จะลดลงเนื่องจากการลดลงของอะตอมไนโตรเจนและออกซิเจนที่ถูกใช้ในการสร้าง NO_x และผลพลอยได้อื่น ๆ ในช่วงทดสอบ 15 นาที ความเข้มข้นของ NO_x ที่วัดได้คือ 34, 270 และ 363 ppm ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(d) ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลที่เร็วขึ้นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสารประกอบ NO_x ในระบบสูงขึ้น

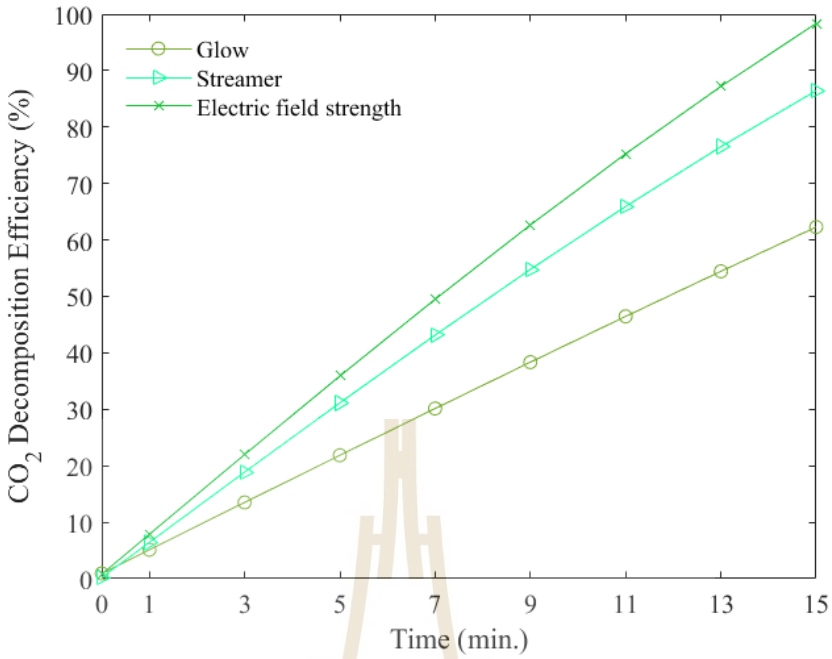
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ช่วงของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 – 4.7 เทียบกับอัตราการไหลที่ระดับต่าง ๆ ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Glow ซึ่งเป็นระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยกว่าระดับที่ทดสอบทั้งหมด พบว่าที่อัตราการไหลที่ต่ำจะมีประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมีผลต่อการสลายตัวเป็นอย่างมาก และในส่วนของผลพลอยได้หรือสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบทั้งสองสารประกอบ จะมีค่าความเข้มข้นมากขึ้นตามอัตราการไหล กล่าวคือ เมื่อมีอัตราการไหลที่มากขึ้นความเข้มข้นของสารประกอบก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ในส่วนของผลการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Streamer และ Electric Field Strength ซึ่งเป็นระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากกว่า Glow และระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Streamer จะมีความ

เข้มที่น้อยกว่า Electric Field Strength ซึ่งจากผลการทดสอบของระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Streamer พบว่าในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์แต่ละอัตราการไหลที่แตกต่างกัน จากอัตราการไหลต่ำไปสูง ประสิทธิภาพในการสลายตัวก็จะมีค่ามากไปหาน้อยตามลำดับ และในส่วนของสารประกอบก็จะมีค่าความเข้มข้นที่มากขึ้นตามเช่นกัน และในส่วนของระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength ซึ่งเป็นระดับความเข้มที่มากที่สุดในการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าที่อัตราการไหลที่ต่ำที่สุดในการทดสอบมีประสิทธิภาพในการสลายตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการไหลอื่น เหมือนกันกับระยะความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทดสอบมาทั้งสองระดับ แต่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้านี้มีประสิทธิภาพในการสลายตัวที่ดีที่สุด เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่เข้มมากขึ้น และในส่วนของสารประกอบก็จะมีค่าความเข้มข้นมากขึ้นตามเช่นกัน ตามอัตราการไหลของอากาศและความเข้มสนามไฟฟ้า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลที่ต่ำ อัตราการไหลที่ 40 L/min จะมีประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับเงื่อนไขต่างๆที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบที่อัตราการไหลดังกล่าวเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow, Streamer และ Electric Field Strength ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.8

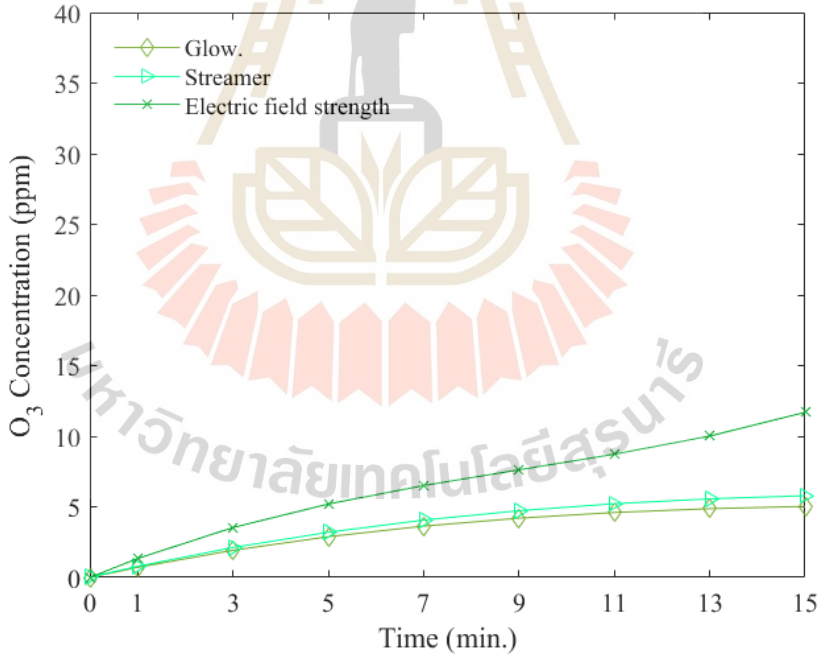


(a)

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดสภาวะต่างๆ a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น

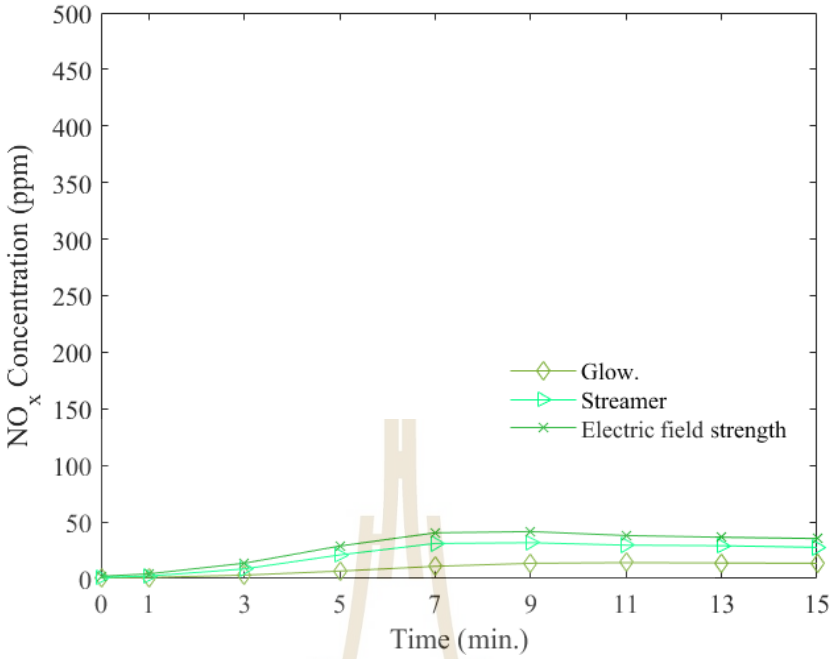


(b)



(c)

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)



(d)

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดสภาวะต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

จากรูปที่ 4.8 เป็นการนำผลการทดสอบที่อัตราการไหลที่ 40 L/min มาเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่ 40 L/min เป็นอัตราที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ภายใต้สภาวะการทดสอบนี้ ซึ่งผลการทดสอบเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ที่ 40 L/min ในระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าทั้งสามระดับ Glow, Streamer และ Electric Field Strength ถูกวิเคราะห์เทียบกับการตั้งค่าควบคุมที่ไม่มีการใช้สนามไฟฟ้า ในระบบควบคุมโดยเริ่มต้นที่ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ 420 ppm และระยะเวลาทดสอบ 15 นาที การใช้สนามไฟฟ้าทำให้ความเข้มข้นของ CO_2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า โดยที่ 148 ppm สำหรับ Glow, 75 ppm สำหรับ Streamer และ 14 ppm สำหรับ Electric Field Strength ดังแสดงรูปที่ 4.8(a) โดยมีประสิทธิภาพการสลายตัวที่สอดคล้องกันคือ 62.34%, 80.92% และ 96.44% ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 4.8(b) โดยถือว่ามีประสิทธิภาพ 100% เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 ลดลงจาก 420 ppm เป็นศูนย์ ผลลัพธ์เหล่านี้เน้นให้เห็นถึงผลกระทบที่สำคัญของความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 โดยสภาพการทดสอบแต่ละสภาพจะแสดงความแตกต่างที่ไม่เหมือนกัน แต่ในทางกลับกันสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบก็จะมีค่าความเข้มข้นแปรผันตามระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 4.8(c) เป็นผลของสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบของโอโซน ซึ่งมีค่าความเข้มข้นที่เวลาเท่ากันอยู่ที่ 5, 5.8 และ 8.4

ppm และสารประกอบ NO_x มีค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 13, 26 และ 34 ppm ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 4.8(d) ดังนั้นในส่วนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัวเป็นระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength ที่อัตราการไหลดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดสอบต่างๆเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่สำคัญของความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 โดยการทดสอบแต่ละเงื่อนไขจะแสดงความแตกต่างที่ไม่เหมือนกัน ผลการทดสอบเหล่านี้ถูกสรุปในตารางที่ 4.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบที่อัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ และช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow, Streamer, และ Electric Field Strength

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	ก๊าซที่วัดผล	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
			0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
Control	CO_2		420	418	415	411	408	404	401	397	393
Glow	CO_2	40	420	400	360	322	285	250	215	181	148
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	4.31%	13.20%	21.60%	30.10%	38.10%	46.30%	54.40%	62.30%
		80	420	404	373	344	317	292	269	247	227
		$80(X_{CO_2})$	0.00%	3.35%	10.12%	16.30%	22.30%	27.72%	32.92%	37.78%	42.24%
		160	420	411	395	380	366	353	341	330	320
		$160(X_{CO_2})$	0.00%	1.67%	4.819%	7.543%	10.29%	12.62%	14.96%	16.88%	18.58%
	O_3	40	0	0.7	1.9	2.8	3.6	4.1	4.5	4.8	5.0
		80	0	1.5	3.9	5.7	7.0	7.8	8.3	8.6	8.6
		160	0	1.3	4.1	6.2	8.2	10.0	11.5	12.6	13.5
	NO_x	40	0	1	3	7	10	13	14	13	13
		80	0	13	113	217	285	302	282	246	208
		160	0	48	196	295	337	334	305	266	228

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบที่อัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ และช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow, Streamer, และ Electric Field Strength (ต่อ)

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	ก๊าซที่วัดผล	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
			0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
Control	CO_2		420	418	415	411	408	404	401	397	393
Streamer	CO_2	40	420	388	327	272	223	178	138	104	75
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	7.18%	21.20%	33.82%	45.34%	55.94%	65.59%	73.8%	80.92%
		80	420	401	367	333	301	269	240	213	187
		$80(X_{CO_2})$	0.00%	4.07%	11.57%	18.98%	26.23%	33.42%	40.15%	46.35%	52.42%
		160	420	401	367	338	313	291	273	258	246
		$160(X_{CO_2})$	0.00%	4.07%	11.57%	17.76%	23.28%	27.97%	31.92%	35.01%	37.40%
	O_3	40	0	0.7	2.1	3.1	4.1	4.7	5.2	5.6	5.8
		80	0	2.0	5.3	7.8	9.4	10.4	11.0	11.2	11.0
		160	0	4.5	11.8	17.1	20.7	23.0	24.1	24.2	23.7
	NO_x	40	0	1	9	21	29	32	31	28	26
		80	0	15	131	237	303	324	309	278	242
		160	0	63	266	397	452	451	417	372	323

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

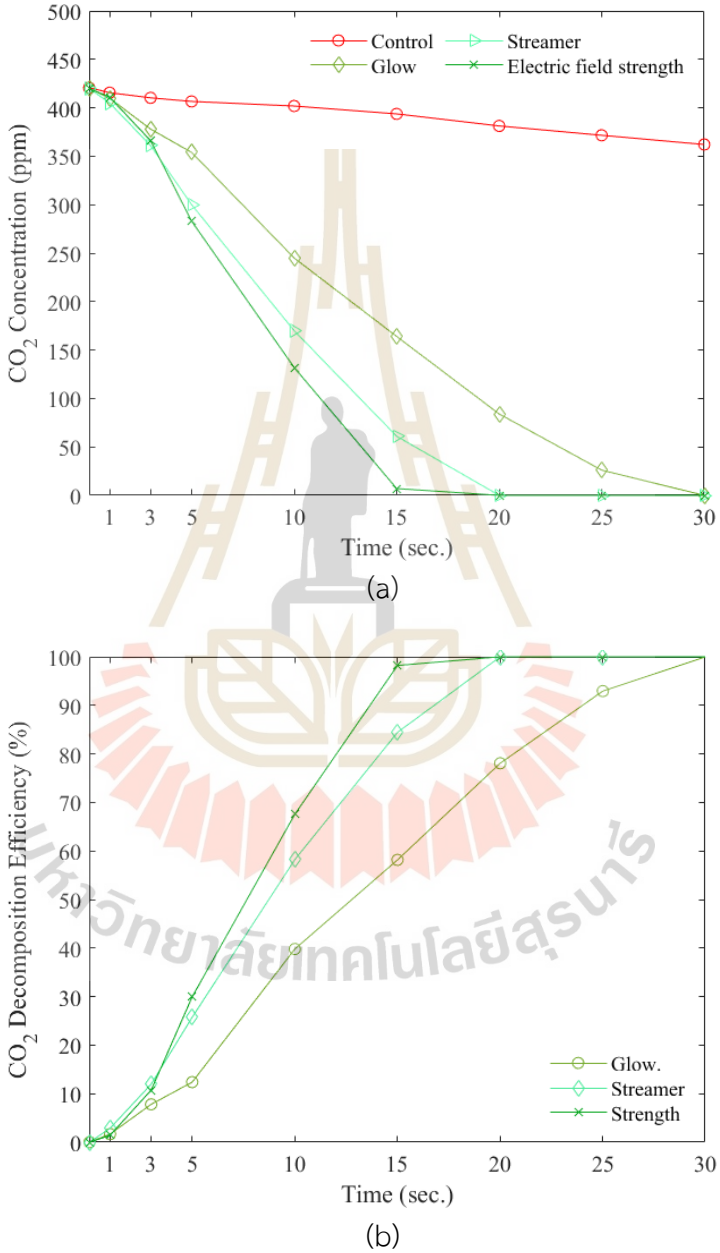
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบที่อัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ และช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow, Streamer, และ Electric Field Strength (ต่อ)

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	ก๊าซที่วัดผล	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
			0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
Control	CO_2		420	418	415	411	408	404	401	397	393
Electric Field Strength	CO_2	40	420	384	316	251	190	136	87	47	14
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	8.13%	23.86%	38.93%	53.43%	66.34%	78.3%	88.16%	96.44%
		80	420	397	356	320	278	240	204	170	139
		$80(X_{CO_2})$	0.00%	5.02%	14.22%	22.14%	31.86%	40.59%	49.13%	57.18%	64.63%
		160	420	397	356	320	288	262	239	221	206
		$160(X_{CO_2})$	0.00%	5.02%	14.22%	22.14%	29.41%	35.15%	40.4%	44.33%	47.58%
	O_3	40	0	1.3	3.5	5.2	6.3	7.2	7.8	8.2	8.4
		80	0	3.5	8.6	11.7	13.3	13.9	13.7	13.2	12.6
		160	0	5.1	13.5	19.7	24.0	26.6	27.8	27.9	27.2
	NO_x	40	0	2	15	29	38	41	39	26	34
		80	0	18	137	244	315	343	335	306	270
		160	0	105	325	427	471	462	435	401	363

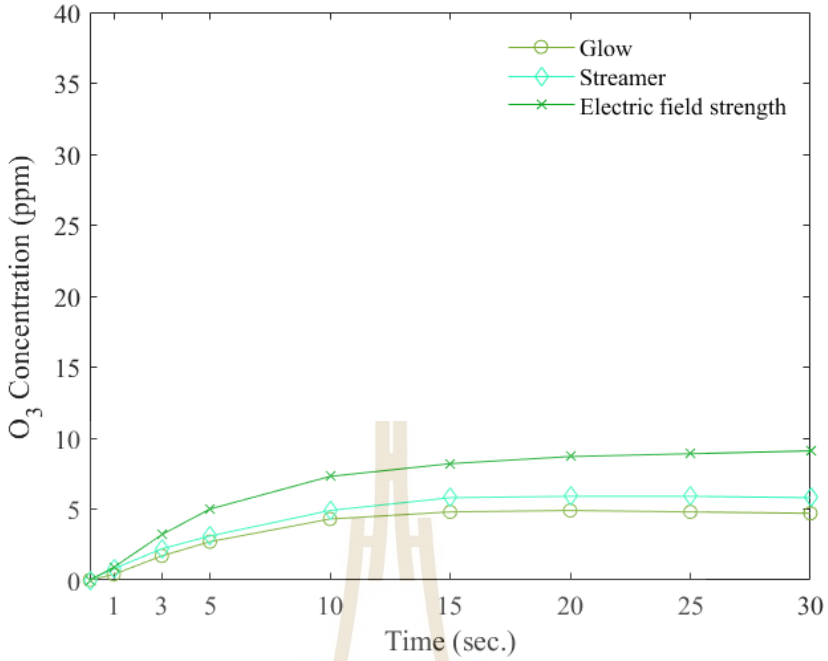
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6 ผลการทดสอบแต่ละความเข้มสนามไฟฟ้าที่เวลาเพิ่มขึ้น

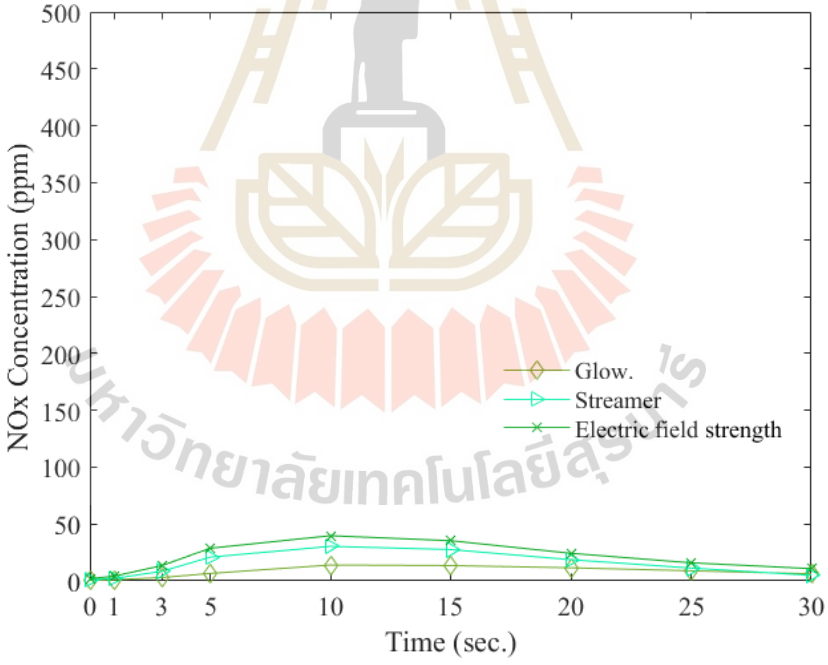
สำหรับผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้า จะเพิ่มเวลาในการทดสอบเป็น 30 นาที เพื่อต้องการทราบถึงประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงค่าคงที่ของปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบการทดสอบด้วย โดยในการทดสอบจะทดสอบที่อัตราการไหลที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 40 L/min ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้า ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น



(c)



(d)

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้า ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

จากรูปที่ 4.9 เป็นการนำผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่อัตราการไหลที่ 40 L/min มาเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และเพื่อทราบถึงค่าของสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบการทดสอบ ซึ่งจากผลการทดสอบสลายตัว CO_2 ที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็นเวลา 30 นาที พบว่า ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Glow มีประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ที่ 100% โดยใช้เวลาที่ 27 นาที ในขณะที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Streamer ใช้เวลาที่ 19 นาที และที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength ใช้เวลาที่ประมาณ 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a) และ (b) ซึ่งจากผลการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 ของสนามไฟฟ้าในช่วงต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเร็วในการสลายตัวของ CO_2 ซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจะทำให้การแตกตัวเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่า ในขณะเดียวกันอัตราการไหลของแก๊สที่คงที่ช่วยให้กระบวนการนี้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบจะมีค่าความเข้มข้นแปรผันตามระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าเช่นกัน ดังแสดงรูปที่ 4.9(c) เป็นผลของสารประกอบของโอโซนที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อมีความเข้มสนามไฟฟ้าแรงมากความเข้มข้นก็จะมาด้วย และเมื่อเวลาการทดสอบมากขึ้นค่าความเข้มข้นของโอโซนจะเริ่มคงที่ สารประกอบ NO_x ก็แปรผันตามความเข้มสนามไฟฟ้าเช่นกัน และเมื่อเวลาการทดสอบมากขึ้นค่าความเข้มข้นจะลดลงดังแสดงรูปที่ 4.9 (d)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

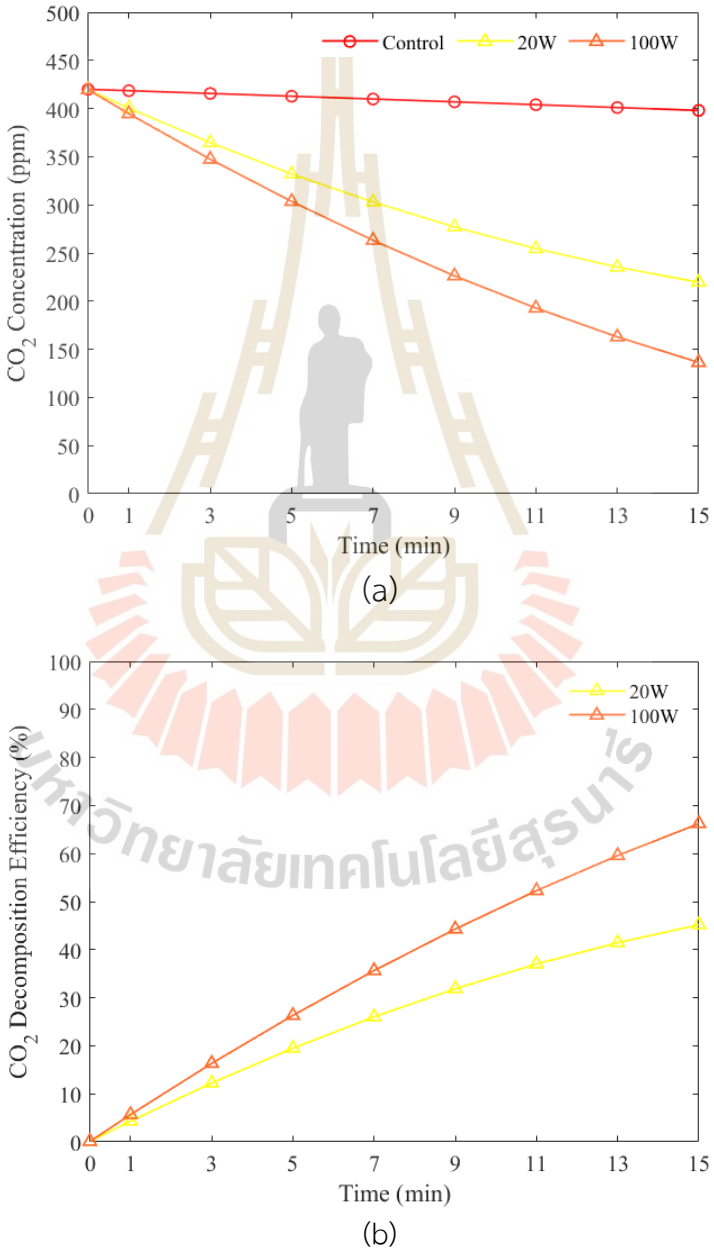
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นของแต่ละระดับความเข้มสนามไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	ก๊าซที่วัดผล	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
			0 min	1 min	3 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Control	CO_2		420	418	415	411	407	393	383	368	362
Glow	CO_2	40	420	400	360	322	245	148	84	26	0
		40 (X_{CO_2})	0.00%	4.31%	13.20%	21.60%	39.80%	62.30%	78.07%	92.93%	100%
	O_3	40	0	0.7	1.9	2.8	4.3	5.0	4.9	4.8	4.7
	NO_x	40	0	1	3	7	14	13	12	9	6
Streamer	CO_2	40	420	388	327	272	170	75	0	0	0
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	7.18%	21.20%	33.82%	58.23%	80.92%	100%	100%	100%
	O_3	40	0	0.7	2.1	3.1	4.9	5.8	5.9	5.9	5.8
	NO_x	40	0	1	9	21	31	26	19	11	7
Electric Field Strength	CO_2	40	420	384	316	251	132	14	0	0	0
		40 (X_{CO_2})	0.00%	8.13%	23.86%	38.93%	67.57%	96.44%	100%	100%	100%
	O_3	40	0	1.3	3.5	5.2	7.3	8.4	8.7	8.9	9
	NO_x	40	0	2	15	29	40	34	25	15	12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.7 ผลการทดสอบที่กำลังงานเพิ่มขึ้นในช่วงของการเกิด Electric Field Strength

ในส่วนของผลการทดสอบกำลังที่เพิ่มขึ้น ในระบบที่ทำการออกแบบ แรงดันที่ใช้ได้สูงสุดอยู่ที่ 20 Kv ดังนั้นในส่วนนี้จะจ่ายแรงดันที่สูงสุด โดยใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับความเข้มในช่วงของการเกิด Electric Field strength โดยมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 1.12×10^6 V/m เมื่อนำไปคำนวณแล้วจะได้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตอยู่ที่ 21 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดสอบที่อัตราการไหลสูงสุด 160 L/min เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 เมื่อมีกำลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

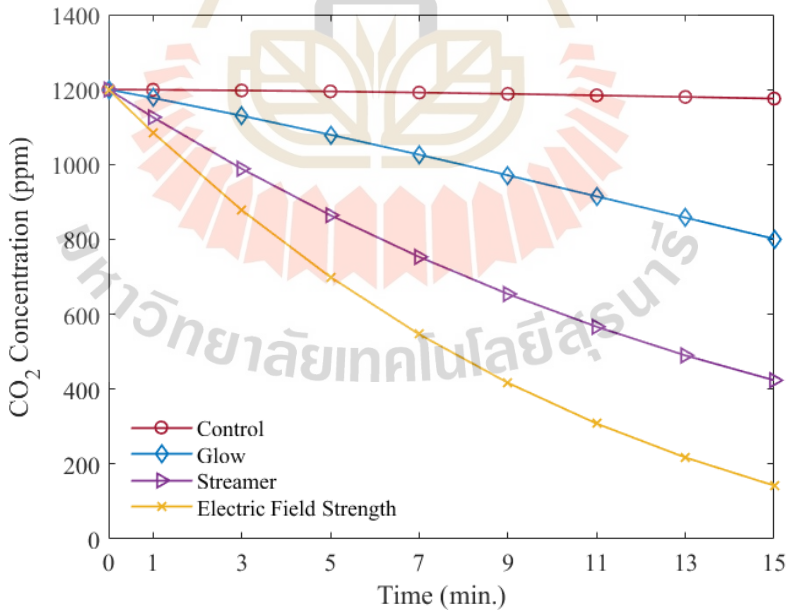


รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบที่กำลังงานเพิ่มขึ้น ในช่วงของการเกิด Electric Field Strength ที่อัตราการไหล 160 L/min a) ผลการสลายตัวของ CO_2 b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบการสลายตัวของ CO_2 ที่อัตราการไหล 160 L/min ภายใต้สองเงื่อนไขของกำลังงานที่แตกต่างกัน คือ 20 วัตต์ และ 100 วัตต์ ในช่วงที่เกิด Electric Field Strength เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 เมื่อเพิ่มกำลังงาน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้กำลังงาน 20 วัตต์ ประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัวของ CO_2 อยู่ที่ 47.58% ในขณะที่การเพิ่มกำลังงานเป็น 100 วัตต์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดขึ้นเป็น 66.24% ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพการสลายตัวเพิ่มขึ้น 18.66% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังงานมีผลเชิงบวกต่อการสลายตัวของ CO_2 ทำให้กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้กำลังงานสูงกว่า การเพิ่มกำลังงานจะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดในระบบจะได้รับพลังงานสูงขึ้น ทำให้สามารถชนและกระตุ้นโมเลกุลของ CO_2 ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การแตกตัวของ CO_2 เกิดขึ้นบ่อยและรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มกำลังงานยังเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซได้ดีขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงขึ้น

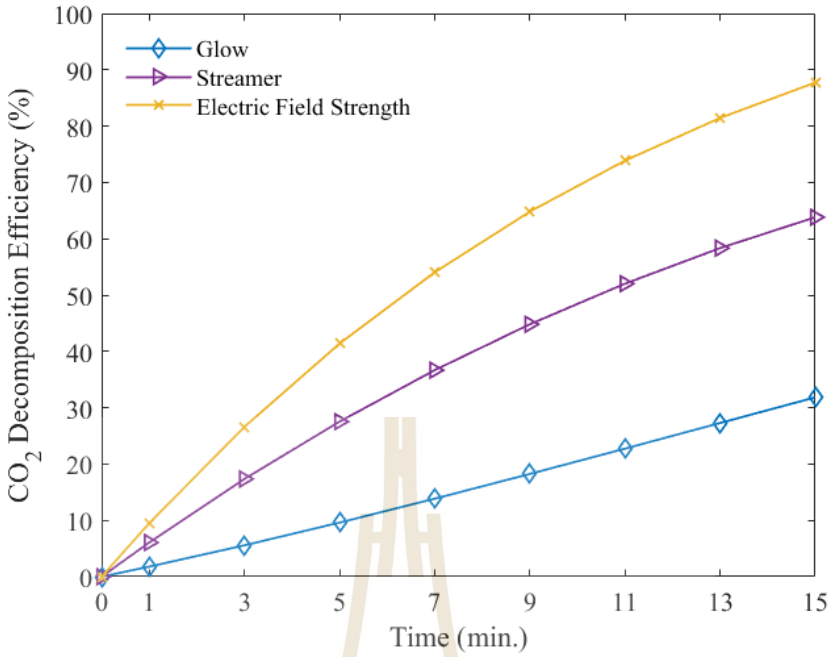
4.8 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับผลในการทดสอบที่ระดับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1200 ppm เปรียบเทียบกันที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ ซึ่งจะทดสอบที่อัตราการไหลที่เท่ากัน 40 L/min ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.11

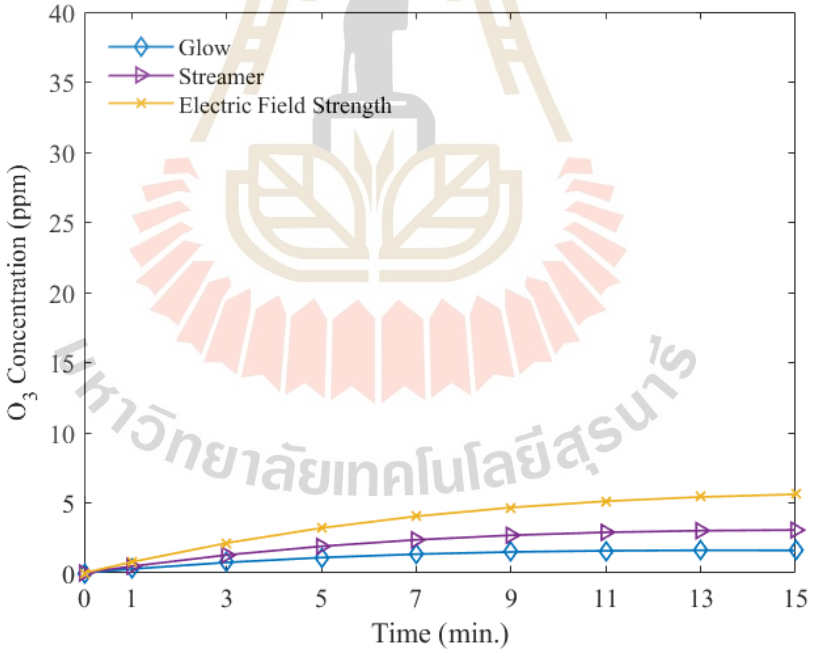


(a)

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น



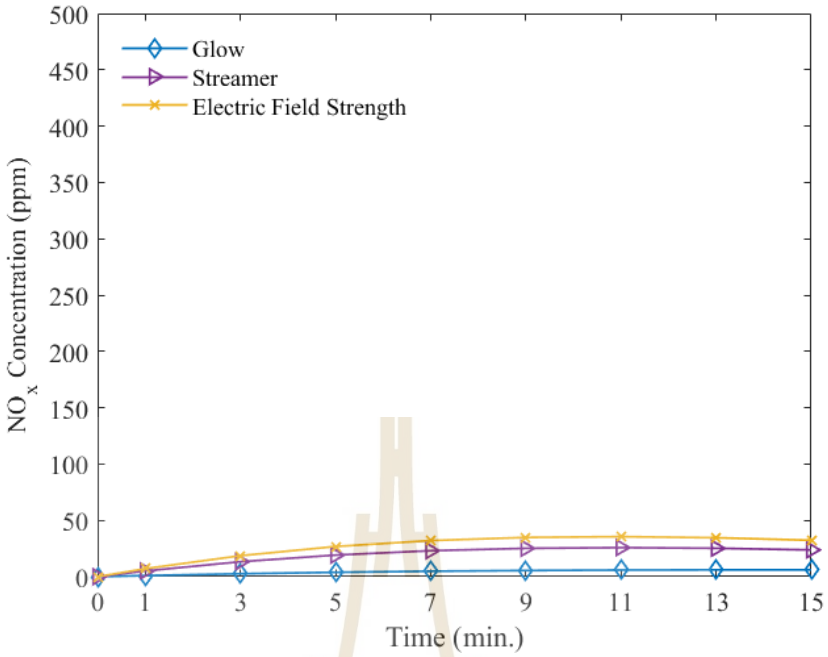
(b)



(c)

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(d)

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลที่ 40 L/min กับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดต่าง ๆ a) ผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ b) ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ c) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น d) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น (ต่อ)

จากรูปที่ 4.11 เป็นผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลที่เท่ากัน ซึ่งในการทดสอบจะทำการทดสอบเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าของช่วงการเกิดต่าง ๆ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแต่ละระดับ จะเทียบกับแบบไม่มีความเข้มสนามไฟฟ้า กล่าวคือไม่ได้เปิดแหล่งจ่ายให้ระบบ (Control) ซึ่งในระบบจะมีค่าความเข้มข้นด้านเข้าที่ 1200 ppm และทดสอบที่เวลาเท่ากัน 15 นาที ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Glow, Streamer และ Electric Field Strength ความเข้มข้นลดลงอยู่ที่ 801, 243 และ 142 ppm ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 4.11(a) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ 31.84, 63.82 และ 87.33 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงรูปที่ 4.11(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมากเหมือนกันกับที่การทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า แต่ในทางกลับกันสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบก็จะมีค่าความเข้มข้นแปรผันตามระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 4.11(c) เป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบของโอโซน ซึ่งมีค่าความเข้มข้นที่เวลาเท่ากันอยู่ที่ 1.6, 3.1 และ 5.6 ppm และผลพลอยได้ของไนโตรเจนออกไซด์มีค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 6, 23 และ 32 ppm ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 4.11(d) ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 4.3

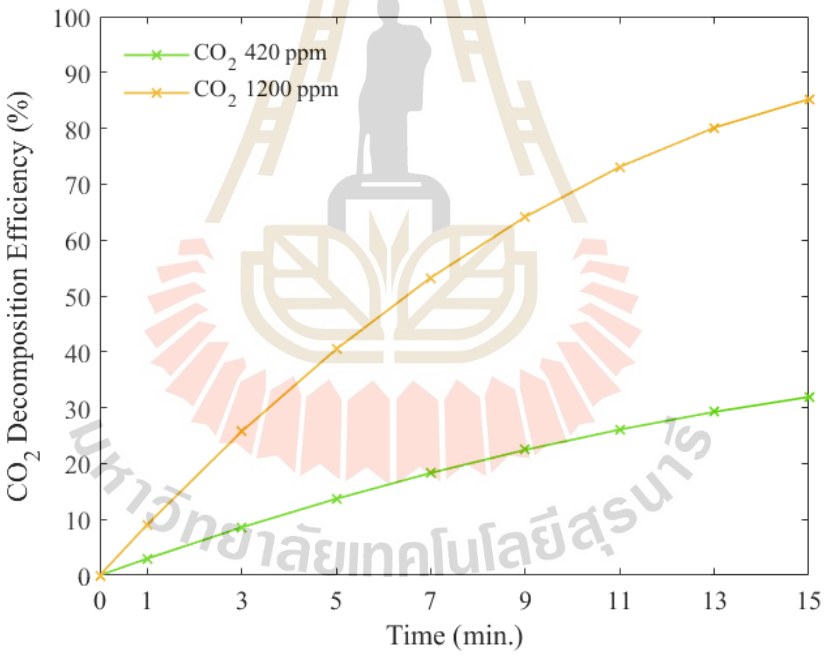
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1200 ppm และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบ ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min ระดับ และช่วงของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับ Glow, Streamer, และ Electric Field Strength

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	ก๊าซที่วัดผล	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
			0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
Control	CO_2		1200	1199	1197	1194	1191	1188	1184	1180	1175
Glow	CO_2	40	1200	1177	1129	1079	1025	970	914	857	801
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	1.78%	5.56%	9.59%	13.84%	18.24%	22.73%	27.29%	31.84%
	O_3	40	0	0.3	0.8	1.1	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6
	NO_x	40	0	1	3	4	5	5	6	6	6
Streamer	CO_2	40	1200	1125	988	864	753	654	566	489	423
		$40\ (X_{CO_2})$	0.00%	6.06%	17.34%	27.52%	36.67%	44.81%	52.02%	58.34%	63.82%
	O_3	40	0	0.5	1.3	2.0	2.4	2.7	2.9	3.0	3.1
	NO_x	40	0	5	13	19	23	25	26	25	23
Electric Field Strength	CO_2	40	1200	1085	878	699	546	416	307	217	142
		$40(X_{CO_2})$	0.00%	9.49%	26.59%	41.37%	54.04%	64.80%	73.87%	81.45%	87.73%
	O_3	40	0	0.8	2.1	3.2	4.0	4.7	5.1	5.4	5.6
	NO_x	40	0	7	19	27	32	35	36	35	32

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.9 ผลการทดสอบความเข้มข้นของ CO_2 ต่อประสิทธิภาพการสลายตัวและการเกิดผลพลอยได้ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า Electric Field Strength

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายตัว และการเกิดผลพลายได้ของโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า Electric Field Strength และอัตราการไหลของอากาศ 40 L/min สำหรับการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ppm เป็นการทดสอบที่ระดับสภาวะปกติในอากาศปัจจุบัน ที่มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ และที่ความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1200 ppm ซึ่งที่ค่าความเข้มข้นดังกล่าวมีผลต่อมนุษย์ทำให้เกิดการระคายเคืองได้ จากผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1200 ppm มีค่าเท่ากับ 86.08% ที่เวลาการทดสอบ 15 นาที ในขณะที่ 420 ppm มีประสิทธิภาพที่ 31.58% ซึ่งที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1200 ppm มีประสิทธิภาพการสลายตัว เพิ่มขึ้น 54.5% ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.12 เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นที่สูงขึ้นมักนำไปสู่การชนกับสปีชีส์ที่ทำปฏิกิริยาจากการปล่อยโคโรนา ทำให้อัตราการสลายตัวสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ppm และ 1200 ppm

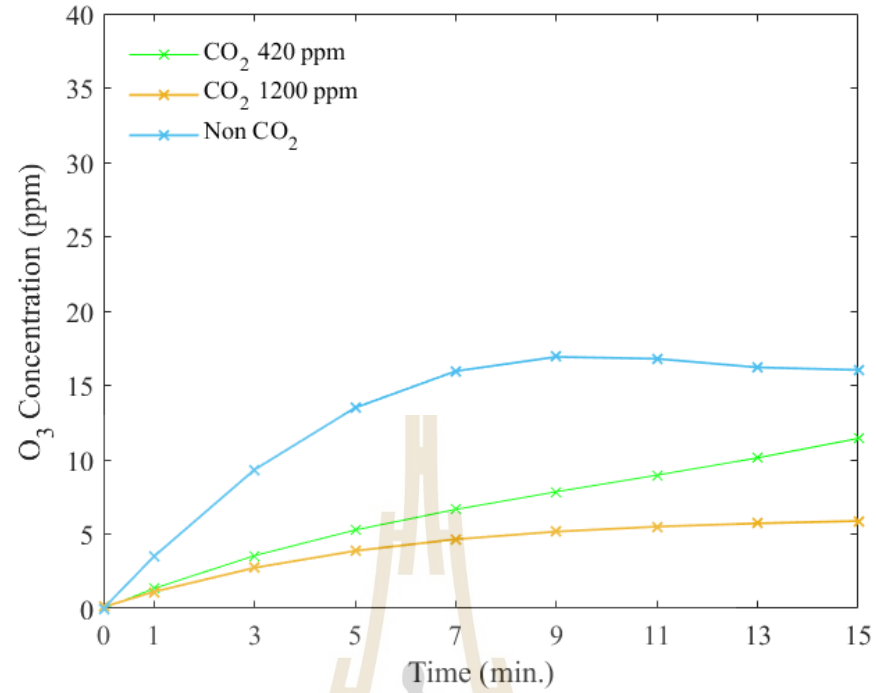
จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการสลายตัวเมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เปลี่ยนแปลง ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการสลายตัวของ CO_2 ที่ความเข้มข้น 420 ppm และ 1200 ppm ภายใต้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าในทุกระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าประสิทธิภาพการสลายตัวจะสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดที่ความเข้มข้น 1200 ppm เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 420 ppm นอกจากนี้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดยังแสดงอัตราการสลายตัวสูงสุด

ซึ่งแนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ CO_2 ที่สูงขึ้นนำไปสู่อัตราการสลายตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโมเลกุล CO_2 มากขึ้นสำหรับการปฏิสัมพันธ์กับสปีชีส์ที่ทำปฏิกิริยา

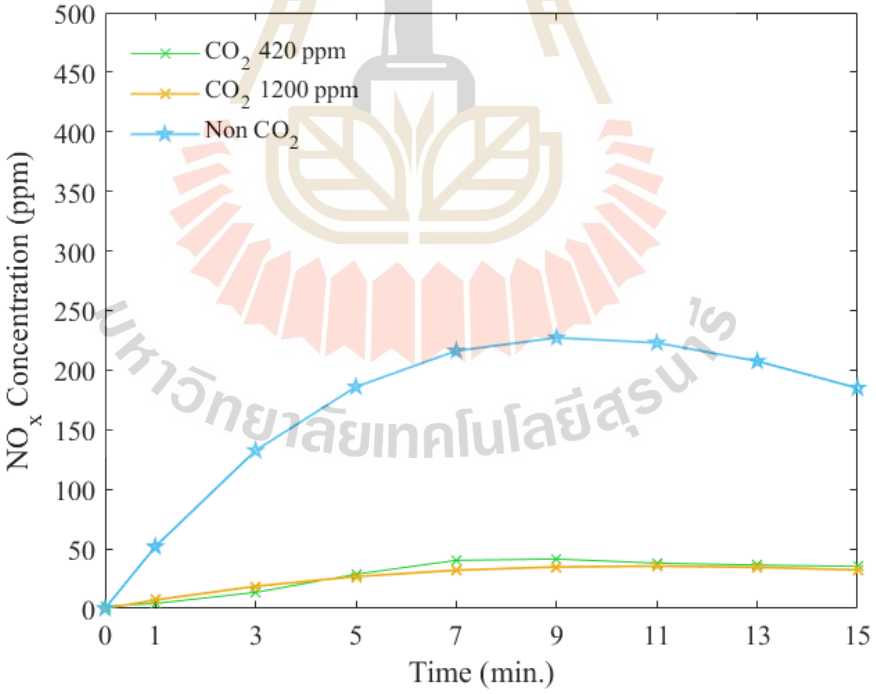
ตารางที่ 4.4 การแสดงอัตราส่วนการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ต่อ 1200 ppm ที่ช่วงของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ

ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	**อัตราส่วนของการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420:1200 ppm**								
	0 min	**1 min**	**3 min**	**5 min**	**7 min**	**9 min**	**11 min**	**13 min**	**15 min**
Glow	0	1:1.22	1:1.24	1:1.29	1:1.35	1:1.42	1:1.45	1:1.50	1:1.53
Streamer	0	1:2.47	1:2.38	1:2.37	1:2.37	1:2.36	1:2.35	1:2.36	1:2.36
Electric Field Strength	0	1:3.35	1:3.22	1:3.09	1:2.96	1:2.88	1:2.79	1:2.75	1:2.73

ในส่วนของการเปรียบเทียบผลพลอยได้หรือสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเน้นการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างในระบบโคโรนาดิจชาร์จที่ไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ (Non CO_2) และในระบบที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แบ่งเป็นความเข้มข้น 420 ppm และ 1200 ppm เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ O_3 ในกรณีที่ไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.13(a) ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดขึ้นเพราะการสร้าง O_3 ในอากาศง่ายกว่าเนื่องจากมีโมเลกุลออกซิเจนอิสระมากกว่า อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ปล่อยออกมาระหว่างการปล่อยโคโรนาจะแยกโมเลกุลออกซิเจนเป็นอะตอมเดี่ยว ซึ่งสามารถรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนอื่น ๆ เพื่อสร้าง O_3 เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ระบบที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ว่าอะตอมออกซิเจนจะเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุล CO_2 แต่ความเสถียรของโมเลกุลและการขาดของโมเลกุลออกซิเจนอิสระทำให้การสร้าง O_3 โดยตรงเกิดขึ้นได้น้อยลง และเมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ O_3 จะลดลง เนื่องจาก CO_2 ที่มีความเข้มข้นสูงจะดูดซับพลังงานที่เกิดจากการปล่อยโคโรนา การดูดซับพลังงานนี้ทำให้พลังงานที่มีอยู่สำหรับการแยกโมเลกุล O_2 เป็นอะตอมอิสระลดลง ซึ่งกระบวนการนี้จำเป็นสำหรับการสร้างโอโซน ส่งผลให้การสร้างโอโซนในระบบลดลง ในทำนองเดียวกัน ไนโตรเจนออกไดไซด์ (NO_2) แสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (b) ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมี อากาศที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนและออกซิเจน เอื้อให้เกิดการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ที่มากกว่า และเมื่อเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มขึ้นในระบบช่วยลดการสร้าง NO_x ได้โดยทำให้ CO_2 ไปแข่งขันกับสปีชีส์ไนโตรเจนที่จำเป็นสำหรับการสร้าง NO_x และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีทางเลือกที่ลดปริมาณ NO ที่ถูกสร้างขึ้น



(a)

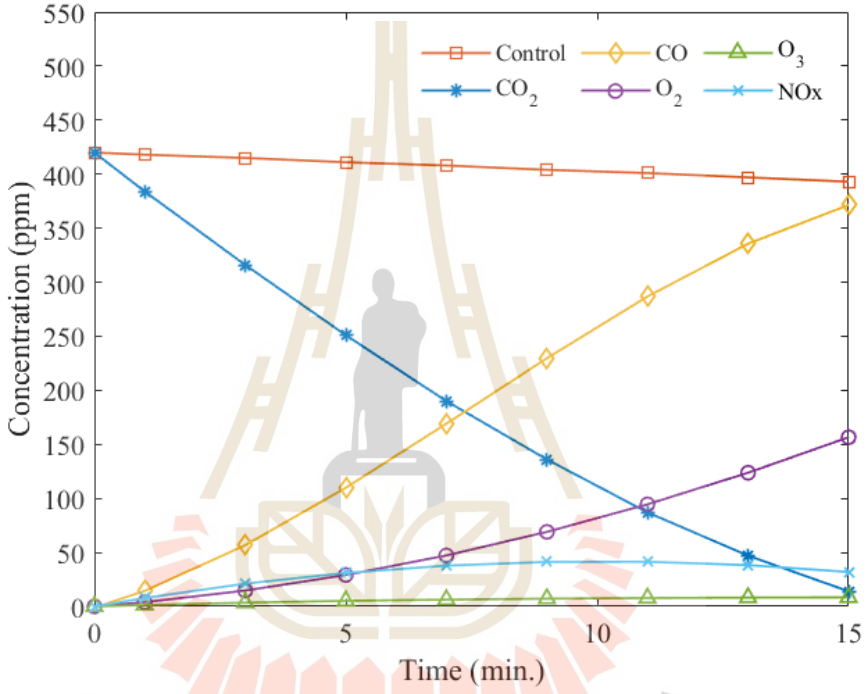


(b)

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบโคโรนาดิจชาร์จ ระหว่างระบบที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ a) ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น b) ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น

4.10 ผลการทดสอบการแตกตัวของ CO_2 ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง

จากผลการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength และอัตราการไหลที่ 40 L/min ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาการนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับทดสอบวัดผลการแตกตัวของ CO_2 เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ในกระบวนการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการในบทที่ 2 โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.5 การแสดงความสัมพันธ์ในกระบวนการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 420 ppm ที่ช่วงของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength

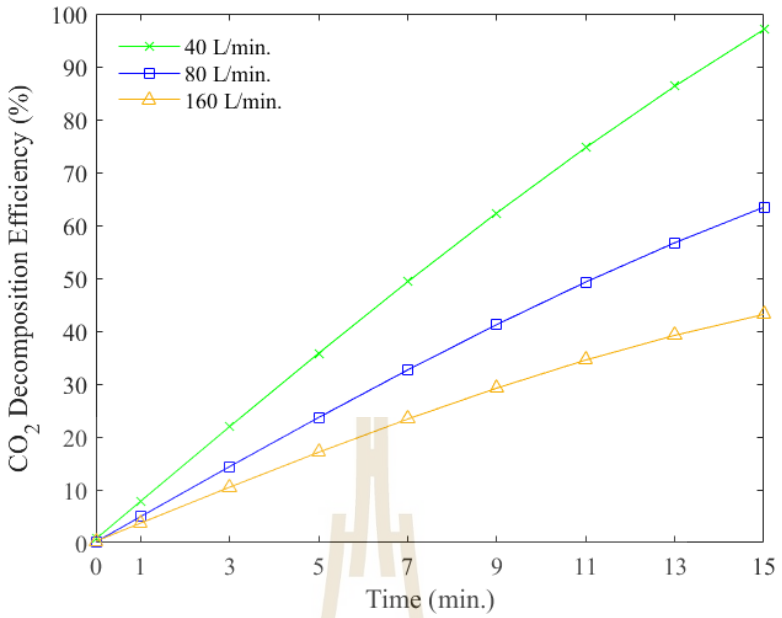
ก๊าซที่วัดผล	ความเข้มข้นของก๊าซ (ppm)								
	0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
CO_2	420	384	316	251	190	136	87	47	14
CO	0	9	69	96	175	232	281	340	370
O_2	0	1.2	16	13.8	43.2	67.8	93.7	135.8	142.6
O_3	0	1.3	3.5	5.2	6.3	7.2	7.8	8.2	8.4
NO_x	0	2	15	29	38	41	39	26	34

จากรูปที่ 4.14 เป็นการวัดผลการแตกตัวของ CO_2 โดยการปล่อยประจุแบบโคโรนาจะสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ทำให้โมเลกุลของ CO_2 ถูกกระตุ้นและแตกตัวออกมาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกซิเจน (O) ซึ่งออกซิเจนที่ถูกปล่อยออกมาอาจรวมตัวกันกลายเป็นออกซิเจนโมเลกุล (O_2) ซึ่งจากสมการในบทที่ 2 ค่าของ CO_2 จะแตกตัวให้ CO และ O_2 ในสัดส่วนโมลาร์ที่แน่นอน ซึ่งโมลของ CO ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับโมลของ CO_2 ที่แตกตัว และโมลของ O_2 ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของโมลของ CO_2 ที่แตกตัว ซึ่งจากผลการวัดทดสอบค่าของ CO มีค่าการแตกตัวที่ใกล้เคียงกับสมการของการแตกตัว CO_2 แต่ค่าของ O2 มีค่าแตกต่างจากสมการเล็กน้อย เนื่องจากในระบบการทดสอบการคายประจุแบบโคโรนาไม่เพียงแต่แตกตัวของ CO_2 ให้เป็น CO และ O_2 เท่านั้น แต่ยังเกิดปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่สร้างโอโซน (O_3) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วย ซึ่งการปล่อยประจุแบบทำให้ออกซิเจนโมเลกุล O_2 แตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน O แล้วอะตอมออกซิเจนที่เกิดขึ้นสามารถรวมตัวกับ O_2 ที่มีอยู่ในระบบเพื่อสร้าง O_3 ได้ ปริมาณของ O_3 ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณ O_2 ที่มีอยู่และพลังงานในระบบ เนื่องจาก O_3 เกิดจากการรวมตัวของอะตอม O กับ O_2 ดังนั้นเมื่อมี O_3 เกิดขึ้น O_2 ในระบบก็จะลดลงตามด้วย และในส่วนของการเกิด NO_x โดยปกติแล้วในบรรยากาศที่มีไนโตรเจน N_2 และออกซิเจน O_2 ทำปฏิกิริยากันภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงจากการปล่อยประจุแบบโคโรทำให้เกิดไนตริกออกไซด์ (NO) แล้วไนตริกออกไซด์ (NO) สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปในบรรยากาศเพื่อสร้างไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซึ่งเมื่อในระบบมีการเกิด NOx ขึ้น จะส่งผลให้ออกซิเจนในระบบลดลงเนื่องจาก O_2 ถูกใช้ในการสร้าง NO และ NO_2

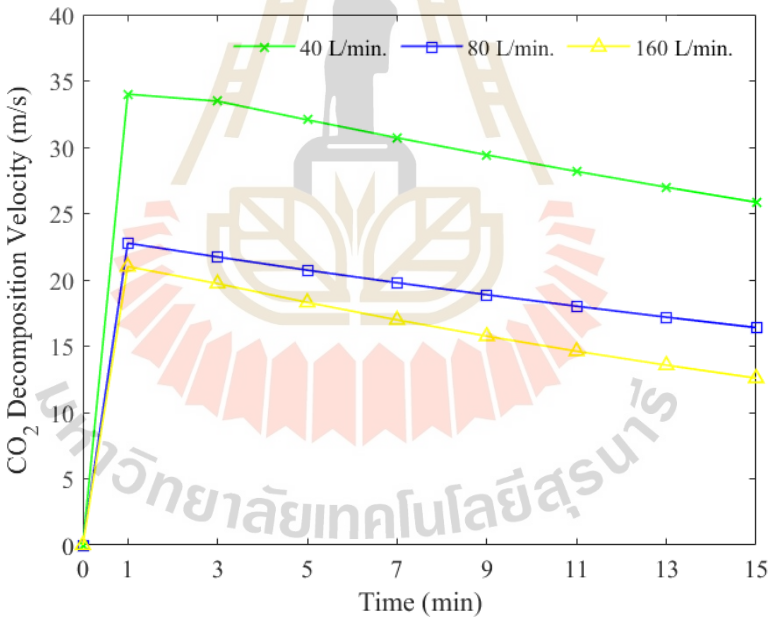
4.11 ผลการเปรียบเทียบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้

ในส่วนของการเปรียบเทียบผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้ จะนำข้อมูลช่วงของการทดสอบของการเกิดความเข้มสนามไฟฟ้า Electric field strength มาวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีที่ดีที่สุดในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการทดสอบเหล่านี้จะช่วยให้เราทราบถึงการทำงานของกระบวนการสลายตัวเมื่อใช้ความเร็วแตกต่างกัน ซึ่งจะช่วยเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาการทดสอบในอนาคตได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(a)



(b)

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับความเร็วที่ใช้ a) ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิด Electric Field Strength b) ความเร็วที่ใช้ในการสลายตัว

จากรูปที่ 4.15 เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวของ CO_2 กับเวลาที่ใช้ ที่อัตราการไหล 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min ที่ตำแหน่งเวลาการไหลที่เท่ากัน อัตราการไหล 40 L/min จะมีความเร็วที่มากกว่า 80 L/min อยู่ 2 เท่า และ 4 เท่าของ 160 L/min ซึ่งเมื่อ

เทียบเป็นประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 จะแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วมาก ๆ จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ที่ความเร็วน้อย ๆ ดังนั้นความเร็วที่มากขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการสลายตัวของ CO_2 ที่ดีขึ้น ซึ่งที่อัตราการไหลที่น้อยกว่า 40 L/min ก็จะมีแนวโน้มการสลายตัวที่ดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามผลการสลายตัวของ CO_2 อาจขึ้นอยู่กับระบบที่ทำการออกแบบ เช่น กำลังงานที่ใช้ การไหลของอากาศ ระบบการดูดอากาศ และในส่วนของความเร็วที่น้อยลง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพลดลงไปด้วย

4.12 การเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO_2 ในพลาสมาแบบต่างๆ

ในส่วนนี้จะนำผลการทดสอบประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ของการใช้พลาสมา โดยมีการเปรียบเทียบประเภทของพลาสมารูปแบบต่างๆ เทียบกับงานวิจัยนี้ กำลังไฟฟ้า อัตราการไหล รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งรายละเอียดจะได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบการสลายตัวของ CO2 ในพลาสมาประเภทต่างๆ: งานวิจัยก่อนหน้าเทียบกับงานวิจัยที่เสนอ

Ref.	Plasma Type	Power (W)	Total flow rate (ml/min)	catalyst	CO_2 Decomposition (%)
D. Mansfeld et al. 2020	MW	5,000	30,000	None	31.3
J. Li et al. 2017	Thermal plasma	15,000	25,000	None	48.0
T. Nunnally et al. 2011	Gliding arc	1,500	14,000	None	9.0
Y. P. Zhang et al. 2003	DBD	100	60	None	43.1
An-Jie Zhang et al. 2010	DBD	60	60	16%Cu-12%Ni/ γ-Al_2O_3	75.0
Ming-wei Li et al. 2004	Corona	45	60	None	70.0
This work	Corona	20	40,000	None	96.44

ในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงสุดอยู่ที่ 96.44 % ที่อัตราการไหลและความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 40 L/min ผลการวิจัยถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น Microwave plasma, Thermal plasma, Gliding arc, DBD และ Corona โดยการเปรียบเทียบมุ่งเน้นไปที่ค่าสูงสุดของประสิทธิภาพของการสลายตัวของ CO_2 การใช้พลังงาน อัตราการไหล รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาด้วย

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบโดยใช้ Corona ของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงสุดที่ 96.44% โดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่ำและอัตราการไหลสูง ประสิทธิภาพนี้เหนือกว่าวิธีการอื่นๆ ที่ระบุไว้ ในขณะที่งานวิจัยที่ใช้ Microwave plasma, Thermal plasma และ Gliding arc มีการทดสอบที่ใช้อัตราการไหลสูงเช่นกันและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีการใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงและประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ที่ได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ DBD (Dielectric Barrier Discharge) ที่มีประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 สูงถึง 75% โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงน้อยกว่างานวิจัยนี้ นอกจากนี้ งานวิจัยที่ใช้ Corona แบบเดียวกันก็แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง แต่ต่ำกว่างานวิจัยนี้ใช้อัตราการไหลต่ำกว่า ผลการเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 นอกจากนี้ การเลือกประเภทพลาสมาและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยายังเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของ CO_2 ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคตได้

4.13 สรุป

จากการทอสอบผลการสลายตัวของ CO_2 ด้วยวิธีการใช้พลาสมาที่ไม่ใช่ความร้อน แบบการคายประจุโคโรนา ซึ่งในรูปแบบการทดสอบนี้มุ่งเน้นไปที่การใช้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแบ่งเป็นช่วงของการเกิดสภาวะ Glow, Streamer และ Electric Field Strength แต่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจะทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ 40 L/min มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดในทุกระดับของความเข้มสนามไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพสูงสุดในระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength อย่างไรก็ตามที่ระดับความเข้มดังกล่าวมีผลพลอยได้ของโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ที่ปริมาณสูงขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มเวลาการทดสอบมากขึ้น การสลายตัวของ CO_2 ของสนามไฟฟ้าในช่วงต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเร็วในการสลายตัวของ CO_2 ซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจะทำให้การแตกตัวเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่า และในส่วนของการเพิ่มกำลังงานมีผลเชิงบวกต่อการสลายตัวของ CO_2 ทำให้กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้กำลังงานสูงกว่า และนอกจากได้ทำการทดสอบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และการเกิดผลพลอยได้ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength โดยมีอัตราการไหลของอากาศที่ 40 L/min ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวและลดระดับความเข้มข้นของผลพลอยได้ รวมถึงได้ทราบถึงผลการแตกตัวของ CO_2 ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ค่าของ CO_2 จะแตกตัวให้ CO และ O_2 ในสัดส่วนโมลาร์ที่แน่นอน ซึ่งโมลของ CO ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับโมลของ CO_2 ที่แตกตัว และโมลของ O_2 ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของโมลของ CO_2 ที่แตกตัว และได้ทราบถึงรูปแบบการสลายตัวของ CO_2 ในพลาสมาแบบต่างๆด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการวิเคราะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้จากการคำนวณ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด ขนาดของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่าอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลต รวมถึงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ในส่วนการพิจารณาลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด จะเลือกใช้ลักษณะอิเล็กโทรดที่เป็นแบบปลายแหลม ซึ่งมีเสถียรภาพในการสร้างความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ดีกว่ารูปแบบที่เป็นเส้นลวด และขนาดของอิเล็กโทรดที่ใช้ มีขนาดความกว้างและความสูงของปลายแหลมเท่ากับ 2 และ 8 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w) มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งมีการปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากนั้นจึงสามารถพิจารณาถึงระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ โดยสามารถพิจารณาได้จากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลต และแรงดันที่ใช้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนา ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาวน์ โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไปยังอากาศที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง ทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนอากาศรอบขั้วอิเล็กโทรด และมักมีกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งกำหนดสภาวะของการเกิดการคายประจุแบบโคโรนาที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วงของ Glow, Streamer และ Electric Field Strength ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 0.24×10^6, 0.68×10^6 และ 1.12×10^6 V/m ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะได้ที่ 50, 18 และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ และในส่วนของระบบการทดสอบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ จะทดสอบเป็นแบบระบบปิด ซึ่งในการวัดผลการทดสอบจะกำหนดเงื่อนไขการทดสอบอยู่ด้วยกัน 2 เงื่อนไข ประกอบไปด้วยเงื่อนไขระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแบ่งเป็นช่วงของการเกิดสภาวะ Glow, Streamer และ Electric Field Strength แต่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจะทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 40 L/min, 80 L/min และ 160 L/min สำหรับในการทดลองแต่ละครั้ง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ 420 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะบรรยากาศปกติ และที่ความเข้มข้น 1200 ppm ซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์ ระยะเวลาในการทดสอบกำหนดไว้ที่ 15 นาที จากผลการทดสอบพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ 40 L/min มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดในทุกระดับของความเข้มสนามไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพสูงสุดในระดับความเข้มสนามไฟฟ้า Electric Field Strength อย่างไรก็ตามที่ระดับความเข้มดังกล่าวมีผลพลอยได้ของโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ที่ปริมาณสูงขึ้นด้วย และที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวและลดระดับความเข้มข้นของผลพลอยได้

5.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาที่พบในการดำเนินการวิจัย คือ การกำหนดช่วงของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะใช้วิธีการคำนวณ เนื่องจากเครื่องมือไม่สามารถวัดที่แรงดันไฟฟ้าที่สูงได้ทำให้สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้ และการป้อนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง ให้มีปริมาณที่เท่ากันเป็นเรื่องยาก เนื่องจากจากเครื่องมือวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีความละเอียดไม่มากพอ อาจมีความคลาดเคลื่อนของปริมาณที่ป้อนเข้าไปได้ และปัญหาด้านเครื่องมือวัดต่างๆที่มีข้อจำกัด อาจจะส่งผลต่อความผิดพลาดระหว่างการคำนวณและผลการทดสองได้ ในส่วนของข้อเสนอแนะ วิทยานิพนธ์ยังสามารถเพิ่มกำลังงานในการทดสอบได้ และการเพิ่มจำนวนอิเล็กปลายแปลมได้ เพื่อประสิทธิภาพในการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการทดสอบเร็วขึ้น และนอกจากนี้อาจจะเพิ่มเติมเงื่อนไขอื่นๆ เช่น การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นเพลทด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดข้อผิดพลาดจากการทดลอง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลกระทบจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงต่อการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ซึ่งได้นำเสนอการวิเคราะห์ลักษณะของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ โดยรูปแบบและโครงสร้างของการนำเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ได้มุ่งเน้นไปที่การสร้างความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นแบบปลายแหลม ในทดสอบสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในอากาศปัจจุบัน และที่ปริมาณความเข้มข้นที่เริ่มมีผลต่อมนุษย์ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่สนใจนำไปเป็นแนวทางการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานจริง รวมถึงการพัฒนาสำหรับการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับความเข้มข้นระดับอุตสาหกรรมได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

พานิช อินต๊ะ (2560). เทคโนโลยีการอัดประจุละอองลอยด้วยสนามไฟฟ้า : ทฤษฎีและนวัตกรรม. จัดพิมพโดยหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม

J. Huang, H. Zhang, Q. Tan, L. Li, R. Xu, Z. Xu, and X. Li, “Enhanced conversion of CO_2 into O_2-free fuel gas via the Boudouard reaction with biochar in an atmospheric plasmatron,” Journal of CO_2 Utilization, vol. 45, pp. 101429, Mar. 2021.

The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2014," WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 479, pp. 1-10, Nov. 2015.

R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ and J. P. van Y. pserle, “Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” IPCC, pp. 151, 2014.

D. W. Lea, “Climate sensitivity in a warmer world,” Nature, vol. 518, no. 7537, pp. 46-47, Feb. 2015.

D. Mei and X. Tu, “Conversion of CO_2 in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor: Effects of plasma processing parameters and reactor design,” in Journal of CO_2 Utilization, vol. 19, pp. 68-78, May 2017.

M. Ghahramani and F. Pilla, “Analysis of Carbon Dioxide Emissions from Road Transport Using Taxi Trips,” in IEEE Access, vol. 9, pp. 98573-98580, July 2021.

M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, ... G. Viegi, “School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children,” European Respiratory Journal, vol. 35, no. 4, pp. 742-749, Jan. 2010.

U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert, W. J. Fisk, “Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO_2 concentrations on human decision-making performance,” Environ Health Perspect, vol. 120, pp. 1671-1677, Dec. 2012.

N. Seddon, A. Chausson, P. Berry, C. A. Girardin, A. Smith, and B. Turner, “Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges,” Phil. Trans. R. Soc. B, vol. 375, no. 1794, Art. no. 20190120, Jan. 2020.

S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, “Strategies for mitigation of climate change: a review,” Environmental Chemistry Letters, vol. 18, pp. 2069-2094, Jul. 2020.

J. Gibbins and H. Chalmers, “Carbon capture and storage,” Energy Policy, vol. 36, no. 12, pp. 4317-4322, Oct. 2008.

S. Bachu, “CO_2 storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment,” Progress in Energy and Combustion Science, vol. 34, no. 2, pp. 254-273, Apr. 2008.

X. Liu et al., “Low-Carbon Economic Dispatch of Integrated Electricity-Gas Energy System Considering Carbon Capture, Utilization and Storage,” in IEEE Access, vol. 11, pp. 25077-25089, Mar. 2023.

L. Li, H. Zhang, X. Li, X. Kong, R. Xu, K. Tay, and X. Tu, “Plasma-assisted CO_2 conversion in a gliding arc discharge: Improving performance by optimizing the reactor design,” Journal of CO_2 Utilization, vol. 29, pp. 296-303, Jan. 2019.

B. Smit, A. H. A. Park, and G. Gadikota, “The grand challenges in carbon capture, utilization, and storage,” Front. Energy Res., vol. 2, p. 55, Nov. 2014.

E. V. Kondratenko, G. Mul, J. Baltrusaitis, G. O. Larrazábal, and J. Pérez-Ramírez, “Status and perspectives of CO_2 conversion into fuels and chemicals by catalytic, photocatalytic and electrocatalytic processes,” Energy & Environmental Science, vol. 6, no. 11, pp. 3112-3135, Aug. 2013.

M. Mikkelsen, M. Jørgensen, and F. C. Krebs, “The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide,” Energy & Environmental Science, vol. 3, no. 1, pp. 43-81, Nov. 2010.

D. Mei, X. Zhu, Y. L. He, J. D. Yan, and X. Tu, “Plasma-assisted conversion of CO_2 in a dielectric barrier discharge reactor: understanding the effect of packing materials,” Plasma Sources Science and Technology, vol. 24, no. 1, p. 015011, Dec. 2014.

B. Ashford and X. Tu, “Non-thermal plasma technology for the conversion of CO_2,” Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, vol. 3, pp. 45-49, Feb. 2017.

S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, K. Tachibana, P. Bruggeman, G. Kroesen, and N. Mason, “The 2012 plasma roadmap,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 45, no. 25, Art. no. 253001, Jun. 2012.

A. Fridman, Plasma Chemistry. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2008.

R. Snoeckx, and A. Bogaerts, “Plasma technology–a novel solution for CO_2 conversion,” Chemical Society Reviews, vol. 46, no. 19, pp. 5805-5863, Aug. 2017.

D. Mei, “Plasma-catalytic conversion of greenhouse gas into value-added fuels and chemicals,” Ph.D. dissertation, Univ. of Liverpool, Liverpool, U.K., 2016.

H. Zhang, X. Li, F. Zhu, K. Cen, C. Du, and X. Tu, “Plasma assisted dry reforming of methanol for clean syngas production and high-efficiency CO_2 conversion,” Chem. Eng. J., vol. 310, pp. 114-119, Nov. 2017.

M. Okubo, T. Kuroki, K. Yoshida, H. Yamada, and T. Kuwahara, “CO_2 concentration using adsorption and nonthermal plasma desorption,” IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 2432 - 2439, Feb. 2017.

M. Okubo, K. Takahashi, S. Kamiya, and T. Kuroki, “High-efficiency carbon dioxide reduction using nonthermal plasma desorption,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 6, pp. 6422-6429, July 2018.

A. George, B. Shen, M. Craven, Y. Wang, D. Kang, C. Wu, and X. Tu, “A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A novel solution for CO_2 conversion and utilization,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 135, Jan. 2021.

H. Zhang, F. Zhu, X. Li, K. Cen, C. Du, and X. Tu, “Enhanced hydrogen production by methanol decomposition using a novel rotating gliding arc discharge plasma,” RSC Advances, vol. 6, no. 16, pp. 12770-12781, Jan. 2016.

X. Tu and J. C. Whitehead, “Plasma-catalytic dry reforming of methane in an atmospheric dielectric barrier discharge: Understanding the synergistic effect at low temperature,” Applied Catalysis B: Environmental, vol. 125, pp. 439-448, Aug. 2012.

H. Zhang, W. Wang, X. Li, L. Han, M. Yan, Y. Zhong, and X. Tu, “Plasma activation of methane for hydrogen production in a N_2 rotating gliding arc warm plasma: a chemical kinetics study,” Chem. Eng. J., vol. 345, pp. 67-78, Aug. 2018.

S. Davoodi, M. Al-Shargabi, D. A. Wood, V. S. Rukavishnikov, and K. M. Minaev, “Review of technological progress in carbon dioxide capture, storage, and utilization,” Gas Science and Engineering, vol. 205070, Sepr. 2023.

K. Li, S. Yan, H. Liu, M. Li, and M. Wang, “Advances in CCUS Engineering Technologies: Processes, Systems and Applications,” Frontiers in Energy Research, vol. 10, 938721, July. 2022.

A. J. Zhang, A. M. Zhu, J. Guo, Y. Xu, and C. Shi, "Conversion of greenhouse gases into syngas via combined effects of discharge activation and catalysis," Chem. Eng. J., vol. 156, no. 3, pp. 601-606, Feb. 2010.

J. A. Andersen, J. M. Christensen, M. Østberg, A. Bogaerts, A. D. Jensen, "Plasma-catalytic dry reforming of methane: Screening of catalytic materials in a coaxial packed-bed DBD reactor," Chemical Engineering Journal, vol. 397, pp. 125519, Oct. 2020.

B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, and K. Andersson, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment," Fuel, vol. 342, no. 127776, May 2023.

G. Chen, R. Snyders, and N. Britun, "CO_2 conversion using catalyst-free and catalyst-assisted plasma-processes: Recent progress and understanding," Journal of CO_2 Utilization, vol. 49, p. 101557, Feb. 2021.

M. W. Li, G. H. Xu, Y. L. Tian, L. Chen, and H. F. Fu, "Carbon dioxide reforming of methane using DC corona discharge plasma reaction," The Journal of Physical Chemistry A, vol. 108, no. 10, pp. 1687-1693, Feb. 2004.

K. Pornmai, W. Ngamkala, T. Rirksomboon, P. Ouraipryvan, and S. Chavadej, "Re-forming of CO_2-containing natural gas with steam and partial oxidation over Ni catalysts in corona discharge for synthesis gas production," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 58, no. 16, pp. 6203-6217, Mar. 2019.

H. H. Nguyen, A. Nasonova, I. W. Nah, and K. S. Kim, "Analysis on CO_2 reforming of CH_4 by corona discharge process for various process variables," in Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 32, pp. 58-62, Dec. 2015.

M. Belan and F. Messanelli, "Compared ionic wind measurements on multi-tip corona and DBD plasma actuators," Journal of Electrostatics, vol. 76, pp. 278-287, Aug. 2015.

R. Wang, Y. Zhang, Z. Jiang, T. Zhang, J. Ouyang and Y. Sun, "New Design of Ion Blower Based on Needle-Dielectric-Needle Bipolar Corona Discharge," in IEEE Access, vol. 7, pp. 129192-129199, Sep. 2019.

F. Lv, J. Song, P. Wang, H. Ruan, and J. Geng, "Influencing Factors of Flow Field of Ionic Wind Induced by Corona Discharge in a Multi-Needle-to-Net Electrode Structure Under Direct-Current Voltage," IEEE Access, vol. 7, pp. 123671-123678, Aug. 2019.

M. Ohring, Engineering Materials Science. New York: Academic Press, 1995.

J. S. Kim, H. J. Kim, B. Han, C. G. Woo, Y. J. Kim, S. Lee, and S. Moon, “Particle removal characteristics of high-velocity electrostatic mist eliminator,” Particle and aerosol research, vol. 14, no. 4, pp. 121-133, Apr. 2020.

A. Jaworek, A. T. Sobczyk, and E. Rajch, “Investigations of dc corona and back discharge characteristics in various gases,” in Journal of Physics, Conference Series, vol. 142, no. 1, p. 012010, Mar. 2008.

K. L. Pan, W. C. Chung, and M. B. Chang, “Dry Reforming of CH_4 With CO_2 to Generate Syngas by Combined Plasma Catalysis,” in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 12, pp. 3809-3818, Oct. 2014.

Q. Fu, Y. Wang, and Z. Chang, “Study on the conversion mechanism of CO_2 to O_2 in pulse voltage dielectric barrier discharge at Martian pressure,” in Journal of CO_2 Utilization, vol. 70, p. 102430, Apr. 2023.

H. Yamasaki, S. Kamei, T. Kuroki, and M. Okubo, “Adsorbed CO_2 Dissociation Using Argon and Helium Nonthermal Plasma Flows,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.56, no. 6, pp. 6983 - 6989, Nov.-Dec. 2020.

M. Rahman, V. Cooray, R. Montaño, P. Liyanage, and M. Becerra, “NO_X production by impulse sparks in air,” in Journal of Electrostatics, vol. 69, no. 6, pp. 494-500, Dec. 2011.

V. Cooray and M. Rahman, “Efficiencies for production of NO_x and O_3 by streamer discharges in air at atmospheric pressure,” Journal of Electrostatics, vol. 63, no. 6-10, pp. 977-983, June 2005.

X. Li, L. Yang, Y. Lei, J. Wang, and Y. Lu, “A method for removal of CO from exhaust gas using pulsed corona discharge,” Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 50, no. 10, pp. 1734-1738, Dec. 2011.

W. Lu, Y. Abbas, M. F. Mustafa, C. Pan, H. Wang, “A review on application of dielectric barrier discharge plasma technology on the abatement of volatile organic compounds,” Frontiers of Environmental Science & Engineering, vol. 13, no. 2, p. 30, Apr. 2019.

M. A. Malik, “Nitric oxide production by high voltage electrical discharges for medical uses: a review,” Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 36, pp. 737-766, Mar. 2016.

M. Okubo, H. Yamada, K. Yoshida, and T. Kuroki, “Simultaneous Reduction of Diesel Particulate and NO_x Using a Catalysis-Combined Nonthermal Plasma Reactor,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 6, pp. 5875-5882, Sep. 2017.

S. R. Sun, H. X. Wang, D. H. Mei, X. Tu, and A. Bogaerts, "CO_2 conversion in a gliding arc plasma: Performance improvement based on chemical reaction modeling," Journal of CO_2 Utilization, vol. 17, pp. 220-234, Jan. 2017.

A. Barkhordari, S. Karimian, A. Rodero, D. A. Krawczyk, S. I. Mirzaei, and A. Falahat, "Carbon dioxide decomposition by a parallel-plate plasma reactor: Experiments and 2-D modelling," Applied Sciences, vol. 11, no. 21, pp. 10047, Oct. 2021.

L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, "Reverse manufacturing enables perovskite photovoltaics to reach the carbon footprint limit of a glass substrate," Joule, vol. 4, pp. 882-901, Apr. 2020.

D. H. Tsai, J. S. Lin and C. C. Chan, "Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations," J Occup Environ Hyg, vol. 9, no. 5, pp. 345-351, Apr. 2012.

P. V. Dorizas, M. N. Assimakopoulos and M. Santamouris, "A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools," Environmental Monitoring and Assessment, vol. 187, no. 5, Apr. 2015.

J. Chen, J. H. Davidson, "Electron density and energy distributions in the positive DC corona: Interpretation for corona-enhanced chemical reactions," Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 22, pp. 199-224, June 2002.

W. Siriprom, K. Teanchai, N. Jitchot, N. Chamchoi, "The comparison of ozone production with oxygen concentration and feed gas flow rate at atmospheric pressure," Materials Today: Proceedings, vol. 65, pp. 2336-2339, May 2022.

H. Lin, X. Gao, Z. Luo, K. Cen, Z. Huang, "Removal of NO_x with radical injection caused by corona discharge," Fuel, vol. 83, no. 10, pp. 1349-1355, July. 2004

J. Li, X. Zhai, C. Ma, S. Zhu, F. Yu, B. Dai, D. Yang, "DBD plasma combined with different foam metal electrodes for CO_2 decomposition: experimental results and DFT validations," Nanomaterials, vol. 9, no. 11, p. 1595, Nov. 2019.

D. Mei, Y. L. He, S. Liu, J. Yan, X. Tu, "Optimization of CO_2 conversion in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor using design of experiments," Plasma Processes and Polymers, vol. 13, no. 5, pp. 544-556, Sep. 2015.

J. D. Skalný, J. Országh, Š. Matejčík, N. J. Mason, "Ozone generation in positive and negative corona discharge fed by humid oxygen and carbon dioxide," Physica Scripta, vol. 2008, no. T131, p. 014012, Dec. 2008.

D. Mansfeld, S. Sintsov, N. Chekmarev, and A. Vodopyanov, “Conversion of carbon dioxide in microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at frequency of 24 GHz at atmospheric pressure,” Journal of CO_2 Utilization, vol. 40, pp. 101197, Sep. 2020.

J. Li, X. Zhang, J. Shen, T. Ran, P. Chen, and Y. Yin, “Dissociation of CO_2 by thermal plasma with contracting nozzle quenching,” Journal of CO_2 Utilization, vol. 21, pp. 72–76, Oct. 2017.

T. Nunnally, K. Gutsol, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Gutsol, and A. Kemoun, “Dissociation of CO_2 in a low current gliding arc plasmatron,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 44, no. 27, pp. 274009, Jun. 2011.

Y. P. Zhang, Y. Li, Y. Wang, C. J. Liu, and B. Eliasson, “Plasma methane conversion in the presence of carbon dioxide using dielectric-barrier discharges,” Fuel Processing Technology, vol. 83, no. 1-3, pp. 101–109, Sep. 2003.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

วารสารวิชาการ

S. SAMROENG, J. PAKPROM, W. CHAROENSIRI, C. THONGSOPA, T. THOSDEEKORAPHAT, P. JANPANGNGERN, N. SANTALUNAI, and S. SANTALUNAI, "Carbon Capture Utilization and Storage: Exploring the Efficacy of Negative Corona Discharge in CO_2 Decomposition," IEEE Access, vol.12, pp. 129376-129389, Sep. 2024.

Samroeng Santalunai, Jariya Pakprom, Weerawat Charoensiri, Chanchai Thongsopa, Thanaset Thosdeekoraphat, Pisit Janpangngern, Teerapon Yodrot, Nuchanart Santalunai, Samran Santalunai, Determination of dielectric properties of lead-contaminated soils: Potential application to soil remediation, Heliyon, Volume 10, Issue 16, 2024, e35787.

Thanakrit Chaiwandee, **Samroeng Santalunai**, Samran Santalunai, Chanchai Thongsopa, Weerawat Charoensiri, Jariya Pakprom, Thanaset thosdeekoraphat, Nuchanart Santalunai,and Pichaya Chaipanya, (2024) Optimizing Rice Heating Efficiency: A Comparative Study of Zigzag Rail Design and Hybrid Induction Heating in a Novel Rice Heating System, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. (Accepted 13 June 13, 2024)

Naphat Saothong, **Samroeng Santalunai**, Samran Santalunai*, Chanchai Thongsopa, Weerawat Charoensiri, Jariya Pakprom, Thanaset thosdeekoraphat, Nuchanart Santalunai,and Pichaya Chaipanya, (2024) Optimizing Particulate Matter Filtration: Evaluating the Efficacy of Electrode Spacing in Corona Discharge Dust Removal Systems, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. (Accepted 17 Mar, 2024)

Nuchanart SANTALUNAI, **Samroeng SANTALUNAI**, Samran SANTALUNAI*, Chanchai THONGSOPA, Weerawat CHAROENSIRI, Jariya PAKPROM, Thanaset THOSDEEKORAPHAT, Pichaya CHAIPANYA (2024). " Effect of Electric field on Dielectric Loads by Using the Electrode Plates for Exterminating Pests Applications, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. Vol 100, Nr 4, PP. 156-164.

Nuchanart Santalunai, Samran Santalunai, Piyaporn Meesawad, Chanchai Tongsopa, **Samroeng Santalunai**, (2021). Plus-Shape of Mushroom-Like EBG with Square Microstrip Emitter to Expand the Working Space in Dielectric Heating Applications. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.14, No.3, PP., 189-200.

บทความวิชาการ

S. Yamadul, S. Santalunai, **S. Samreong**, J. Pakprom, W. Charoensiri, P. Janpangngern, T. Thosdeekoraphat, N. Santalunai, S. Santalunai, C. Thongsopa. “High-efficiency cylindrical induction coils using induction heating for food industry applications” ICEAA-IEEE APWC24, 2-6 September 2024, Lisboa PORTUGAL

K. Punyatip, **S. Samreong**, J. Pakprom, W. Charoensiri, P. Janpangngern, T. Thosdeekoraphat, N. Santalunai, S. Santhalunai, C. Thongsopa. “Optimal Piezoelectric Transducer Placement for High Efficiency in Ultrasonic Cleaning Systems” IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia 2024, 9 – 12 July 2024 Pattaya, THAILAND

Jariya Pakprom, Weerawat Charoensiri, **Samroeng Santalunai**, Samran Santalunai, Chanchai Thongsopa, Thanaset Thosdeekoraphat and Nuchanat Santalunai. “Effects of Dielectric Heating System on Reduction of Lead Contamination in Potting Soil” The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023 23 – 24 February 2023 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

IEEE Access
Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Received 16 July 2024, accepted 31 August 2024, date of publication 9 September 2024, date of current version 20 September 2024.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.3456180

RESEARCH ARTICLE

Carbon Capture Utilization and Storage: Exploring the Efficacy of Negative Corona Discharge in CO_2 Decomposition

S. SAMROENG[1], J. PAKPROM[1], W. CHAROENSIRI[1], C. THONGSOPA[1], T. THOSDEEKORAPHAT[1], P. JANPANGNGERN[1], N. SANTALUNAI[2], AND S. SANTALUNAI[1]

[1]School of Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
[2]Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Corresponding authors: S. Santalunai (samran.sa@sut.ac.th) and N. Santalunai (Nuchanart.fa@rmuti.ac.th)

This work was supported by the Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development.

ABSTRACT This research investigates the use of cold plasma technology, specifically negative corona discharge, for the efficient and cost-effective decomposition of carbon dioxide (CO_2) to reduce air pollution. Using specially designed copper electrodes with pointed triangular tips and an aluminum ground plate, the study evaluates CO_2 decomposition under varied states of electric field intensities (Glow, Streamer, and Electric Field Strength) and airflow rates. The experimental achieved a maximum CO_2 decomposition efficiency of 96.44% at the Electric Field Strength level with a 40 L/min airflow rate. However, this process also generated significant byproducts, notably ozone (O_3) at 8.4 ppm and nitrogen oxides (NO_x) at 34 ppm, illustrating the relationship between electric field intensity, CO_2 decomposition efficiency, and byproduct generation. Additionally, the study examines the impact of varying CO_2 concentrations on decomposition efficiency and byproduct formation at the Electric Field Strength state, finding that higher CO_2 concentrations increase decomposition efficiency and decrease byproduct levels. This research demonstrates the potential of corona discharge plasma, with its low-temperature operation and scalability, as a promising tool for advancing Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technologies and mitigating air pollution.

INDEX TERMS DC corona discharge, negative corona discharge, non-thermal plasma, electric field intensity, carbon dioxide (CO_2).

I. INTRODUCTION

The emission of greenhouse gases (GHGs), significantly driven by modern society's increased fossil fuel consumption, creates a major environmental challenge [1]. This rapid rise in GHG emissions, notably CO_2, has led to a record high concentration of 420 ppm in the atmosphere, marking a 42% increase from pre-industrial times [2], [3], [4]. The consequences include severe climate change impacts, such as global warming, rising sea levels, and altered ecosystems, threatening both current and future societies. Therefore, reducing CO_2 emissions is essential to mitigate long-term global temperature increases [5], [6]. Additionally, indoor CO_2 concentrations more than 1000 ppm can have various health impacts, further emphasizing the need to control CO_2 levels [7], [8].

Throughout history and into the present day, there have been numerous approaches to addressing the issue of CO_2 gas, including natural solutions such as afforestation and reforestation, ocean and coastal management, and soil carbon sequestration [9], [10]. Furthermore, there are technological solutions, namely Carbon Capture and Storage (CCS). This

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Wencong Su.

© 2024 The Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 License.
For more information, see https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

technology captures CO_2 emissions at their source (e.g., power plants, industrial processes) before they are released into the atmosphere [5], [11]. Although these methods are technically feasible, they are not a permanent solution to carbon emissions due to several limitations, such as high operational costs and risks associated with gas leakage [12].

Other sustainable alternatives with minimal environmental impact have been developed to address the CO_2 issue, such as Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) [13], [14]. This approach involves capturing CO_2 emissions from sources like power plants and industrial facilities, or directly from the atmosphere, for beneficial use or underground storage [15]. CCUS can convert CO_2 into valuable raw materials like methanol, methane, formaldehyde, dimethyl ether, and CO [16], [17], [18], [19]. However, CO_2 is a highly stable molecule, and stimulating its molecular structure transformation to break the double bonds (O=C=O) [20] requires significant energy to achieve dissociation. Thus, these methods still face challenges in efficiency and often require catalysts to enhance CO_2 decomposition efficiency, presenting several issues in their practical application.

Consequently, plasma-based technologies represent an innovative approach to CCUS processes, particularly for CO_2 decomposition. Plasma types are categorized as cold or thermal, each with distinct properties [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]. Cold plasma is design flexibility, lower cost potential, favored for its energy efficiency and selectivity, and appropriate application, often energizes CO_2 with high-energy electrons (1–10 eV) through ionization and electric field strength for molecular structure dissociation under low-energy conditions [28], [29], [30], [31]. while hot plasma is chosen for its ability to drive reactions that are not possible at lower temperatures. Plasma is a state of matter like gas, where some particles are ionized, making it conductive and responsive to electromagnetic fields [32], [33], [34]. These unique properties allow plasma to initiate and accelerate chemical reactions, capturing and converting CO_2 into useful products [35].

There are several types of plasma technology, each with distinct advantages and disadvantages. To confirm these characteristics, Table 1 compares the decomposition efficiency of various plasma technologies for CO_2 decomposition, highlighting the trade-offs between power consumption, flow rates, and the use of catalysts. Dielectric Barrier Discharge (DBD) shows varied efficiency based on the catalyst used [34], [35], with 12% Ni/γ-Al_2O_3 demonstrating superior performance [35]. Conversely, gliding arc technology exhibits low efficiency (8.40%) despite high power and flow rate [36]. Thermal plasma achieves the highest decomposition efficiency (88%) but at the cost of significantly higher power consumption (3400 W) [37]. Notably, corona discharge technology offers high efficiency (70%) with low power consumption (45 W) and without the need for a catalyst [38].

TABLE 1. CO_2 decomposition efficiency with plasma technology.

Ref.	Type	Power (W)	Total flow rate (ml/min)	catalyst	CO_2 Decomposition (%)
[34]	DBD	45	50	Cu/Al_2O_3	16.1
[35]	DBD	60	60	$12\%Ni/\gamma-Al_2O_3$	24.0
[36]	Gliding arc	165	7500	None	8.4
[37]	Thermal plasma	3,400	16,000	None	88.0
[38]	Corona	45	60	None	70

Corona discharge plasma emerges as a promising option for CO_2 decomposition due to its low-temperature operation, which ensures compatibility with existing processes and facilitates easy integration without significant modifications [39], [40]. Operating at lower temperatures reduces the need for extensive cooling systems and minimizes thermal stress on materials, thereby prolonging equipment lifespan and lowering maintenance costs [37]. Its capability for selective decomposition further enhances the economic feasibility of transforming CO_2 into valuable products by targeting specific reactions and minimizing unwanted byproducts, depending on the specific implementation and optimization of the corona discharge plasma system. This leads to more efficient resource utilization and higher product purity [16], [17].

This research significantly contributes to advancing the understanding of the corona discharge process for CO_2 decomposition by addressing key objectives:

1. Develop and implement an innovative electrode design with pointed tips to enhance the efficiency and stability of the corona discharge process for CO_2 decomposition.
2. The study systematically varies electric field intensities and airflow rates, identifying optimal conditions for maximizing CO_2 reduction and providing insights for developing efficient CO_2 reduction technologies.
3. Investigate the byproducts, specifically O3 and NO_x, that occur simultaneously with the CO_2 decomposition process at all levels of electric field intensity.
4. Study the impact of varying CO_2 concentrations on CO_2 decomposition and the formation of (O_3) and (NO_x) to understand efficiency and byproduct formation, informing better control strategies.

The organization of this paper is as follows: Section I presents the introduction. Section II details the materials and methods. Section III describes the experimental results and discussion. Finally, Section IV provides the concluding.

II. MATERIALS AND METHODS

In this section, we discuss the design of the electrode structure and the methodologies used to investigate the effectiveness of negative corona discharge in the decomposition of CO_2. The study employs a precisely designed system featuring specially fabricated electrodes and a controlled environment to examine the impact of various electric field intensities and airflow rates on CO_2 decomposition.

TABLE 2. Parameters of electrode patches.

Parameters	Size (mm)
Length of tip electrode patch (S)	220.0
Width of tip electrode patch(W)	25.0
Tip electrode thickness (T)	0.5
Height of pointed tip (h)	8.0
Width of the tip (w)	2.0
Collection plate length (l_c)	250.0
Width of collection plate (w_c)	270.0
Collection plate thickness (t_c)	2.0
Electrode-to-electrode distance (g)	30.0
Distance between electrode and GND (d_{Glow})	40.0
Distance between electrode and GND ($d_{Streamer}$)	20.0
Distance between electrode and GND ($d_{Electric\ Field\ Strength}$)	10.0

A. ELECTRODE DESIGN

The characteristics of the electrode design and the adjustment of plate distance at various corona conditions are depicted in Fig. 1. To investigate the size and shape of the electrode, a design featuring a long copper plate with a pointed tip shape was chosen. This design offers higher efficiency and more stable control of corona discharge compared to a wire-to-plate configuration [41], [42], [43]. The prototype was created for testing and comparing the efficiency of CO_2 decomposition. Pointed tip electrodes were incorporated on both sides of the copper sheet line, with dimensions of width (W), length (S), and thickness (T). Copper was selected as the material for the electrode due to its superior electrical conductivity (5.96×10^7 S/m) [44], which facilitates a stable and efficient corona discharge process. For the collection plate (GND), aluminum was chosen owing to its comparable electrical conductivity (3.5×10^7 S/m), combined with its advantageous properties of low weight and cost-effectiveness. This selection optimizes both the performance and economic feasibility of the experimental setup.

To determine the appropriate size of the pointed tip for the proposed electrode, an analysis was conducted on parameters such as height (h), width (w), and the number of tips (N). The number N, which represents the most effective ratio for corona discharge [41], was determined through detailed examination as shown in Fig. 1(a). Various characteristics and styles of the electrodes were studied to ensure suitability for the required task. The size of the pointed tip can be calculated using Equation 1.

$$n, r = \left(\frac{N}{S}, \frac{h}{w}\right) \tag{1}$$

where h/w is the sharpness ratio of the tip and N/S is the number of pointed tips per unit length.

The designed pointed tip electrode emitter is a fixed design intended to be installed at the center between the ground plates (GND). A total of seven electrode patches will be installed, with a designated gap (g) of 30 mm between each pointed electrode set, as depicted in Fig. 1(b). This distance has been determined to be the most suitable and effective for emitting an electric field [45]. The dimensions the grounding plate (also referred to as the collection plate) include width (w_c), length (l_c), thickness (t_c) of the proposed electrode such as and etc., as outlined in Table 2. Aluminum is the chosen material for the grounding plate.

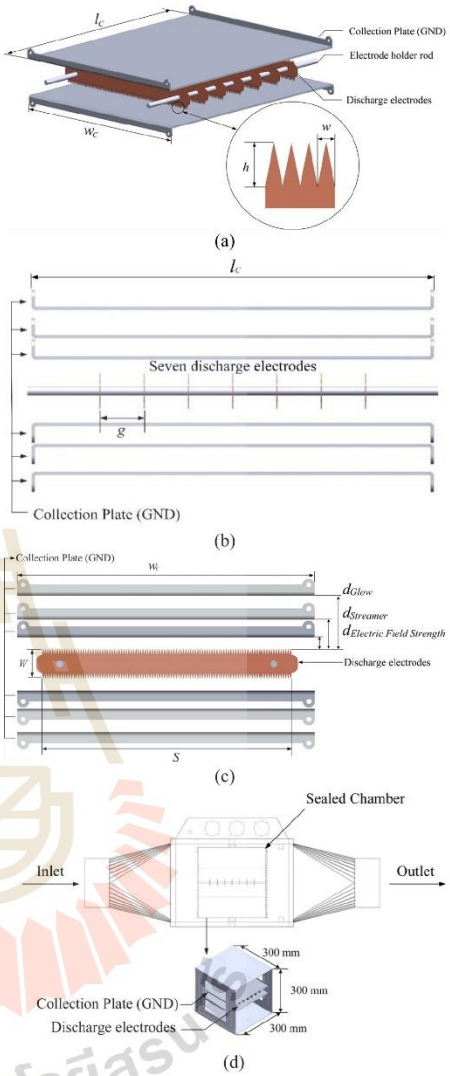


FIGURE 1. Characteristics of the designed pointed electrode and adjustment of plate distance at various corona conditions of (a) electrode installation to the ground plate, 3D views (b) right side view of electrode arrangement (c) adjusting the electrode-plate distance for desired electric field intensity, front view and (d) corona discharge geometry inside the sealed chamber.

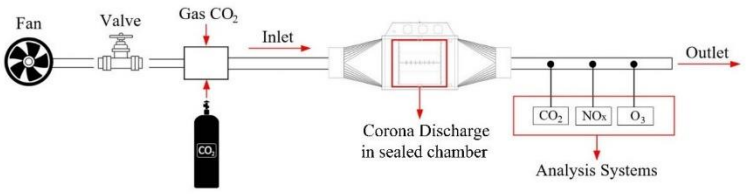


FIGURE 2. Carbon dioxide decomposition system with negative corona discharge and analyzing results with various tools.

TABLE 3. Details of gas composition and concentration analysis tools.

Item	Instrument/Model	Detection Range	Resolution
CO_2	GAS 3100R Syngas Analyzer	0 to 50 %	0.001 %
O_3 Gas Detector	SKZ1050 O_3 Gas Detector	Range: 0 - 1000 ppm,	1 ppm
NO_x	Testo 350	0 - 4000 ppm	1 ppm

Generally, the occurrence can be divided into three levels. It begins with the initial phase called Glow, followed by Streamer. When the voltage applied to the sharp-tipped electrode increases, spark discharge or Arc occurs. This research focuses on testing another state of corona discharge between Streamer and Arc. This phase is a period of Streamer with very high electric field intensity, just before the Arc occurs. This state is referred to as the Electric Field Strength phase, which defines the intensity of the electric field. Regarding the negative corona discharge pattern, the researcher aims to investigate three distance adjustments between the pointed electrode and the ground plate as d_{Glow}, $d_{Streamer}$ and $d_{Electric\ Field\ Strength}$, illustrated in Fig. 1(c).

The state delineated above comprises the Glow, Streamer, and Electric Field Strength level, each associated with distinct electric field intensity values, as studied by [46]. Each resulting in a different electric field intensity within the range of corona discharge, Therefore, the electric field intensity can be calculated by using Equations 2 and 3, resulting in 240 kV/m for *d_Glow*, 680 kV/m for *d_Streamer*, and 1120 kV/m for *d_Electric Field Strength*. These intensities correspond to distances (d) of 40 mm, 20 mm, and 10 mm for d_{Glow}, $d_{Streamer}$ and $d_{Electric\ Field\ Strength}$, respectively.

$$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*} \tag{2}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 \le \eta^* \le 1 \tag{3}$$

where $E_{\max}$ is the maximum electric field intensity, η^* is the filed utilization factor, is the average value of the electric field intensity, d is the distance between the electrodes.

This discharge process occurs prior to CO_2 breakdown, wherein electric current flows from the higher potential electrode to the neutral air. The sealed chamber used in the experiments, with a volume of 27 liters and dimensions of 300 mm × 300 mm × 300 mm, is shown in Fig. 1(d). The sealed chamber was maintained at a constant temperature of 27°C and a humidity level of 54%. An increase in temperature facilitates the decomposition of CO_2, thereby enhancing the overall efficiency of the process. Regarding humidity, maintaining an optimal level can further improve the efficiency of CO_2 decomposition. Regarding humidity levels, an optimal humidity level can enhance the efficiency of the CO_2 decomposition process. However, significantly elevated humidity levels (much greater than 54%) can lead to increased production of ozone (O_3), which may reduce the decomposition efficiency and compromise the stability of the corona discharge system. Throughout the experiments, the temperature, humidity, and dimensions of the sealed test chamber were carefully controlled and kept constant.

B. CARBON DIOXIDE (CO_2) DECOMPOSITION SYSTEM WITH CORONA DISCHARGE

This section focused on three types of gases: CO_2, nitrogen oxides (NO_x), and O_3. CO_2 was specifically introduced into the system for decomposition, with the byproducts primarily resulting from the corona discharge process. The experimental setup, detailed in Table 3, involves a closed system test for decomposing CO_2. The test begins by introducing CO_2 at concentrations into the system, as shown in Fig. 2. The valve is then opened to adjust the desired airflow rate, using a fan to push air into the system. The gas flows through a pipe to the negative corona discharge system, circulating for 15 minutes.

The decomposition of CO_2 through corona discharge involves numerous complex chemical reactions, which are influenced by various process conditions including pressure, temperature, and the type of electrode used. Corona discharge can generate a non-thermal plasma that contains high-energy species such as electrons, ions, and various radicals, all of which contribute to the acceleration of energy within the system. These high-energy systems play a pivotal role in initiating the breakdown of CO_2 into other chemical products.

A notable reaction resulting from corona discharge is the decomposition of CO_2 into carbon monoxide (CO) and oxygen (O_2), a process documented in references [47], [48], [49]. This transformation can be represented by the simple

chemical equation provided in Equation 4

$$2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2 \quad (4)$$

Furthermore, the application of negative corona discharge in CO_2 decomposition leads to the formation of additional gaseous byproducts within the system. Specifically, this process results in the production of NO_x and O_3, as detailed in references [50] and [51]. This phenomenon is the culmination of complex chemical and physical interactions involving energetic electrons, atmospheric molecules (N_2 and O_2), and the energy derived from electrical charges. The dissociation of oxygen molecules (O_2) [52], [53] by high-energy electrons emitted from the corona charge in Equation 5 facilitates the formation of O_3. This process is further elucidated in Equation 6, demonstrating how the liberated oxygen atoms combine with O_2 molecules to produce O_3.

$$O_2 + e^- \rightarrow 2O \quad (5)$$
$$O_2 + O \rightarrow O_3 \quad (6)$$

The decomposition process of nitrogen (N_2) and oxygen (O_2) molecules into their respective atoms, facilitated by the action of highly energetic electrons, is a pivotal step in the formation of nitrogen oxides. This process is delineated through Equations 7 and 8, which describe the initial splitting of N_2 and O_2 molecules. The atoms thus generated subsequently recombine to form nitrogen monoxide (NO), as illustrated in Equation 9, with references [54] and [55] providing further details on this reaction.

$$N_2 + e^- \rightarrow 2N \quad (7)$$
$$O_2 + e^- \rightarrow 2O \quad (8)$$
$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (9)$$

Following its formation, nitrogen monoxide (NO) undergoes an additional reaction with oxygen present in the air, leading to the creation of nitrogen dioxide (NO_2). This subsequent reaction is represented in Equation 10.

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 \quad (10)$$

From the CO_2 decomposition processes above, the real time measurement of gas concentrations, both at the initial point ($CO_{2,in}$) and following decomposition ($CO_{2,out}$), over a 15-minute interval. This procedure was repeated three times to ensure reliability, and the average difference between the initial and final concentrations ($CO_{2,in}$ and $CO_{2,out}$) was calculated to determine the CO_2 decomposition efficiency, as cited in references [56] and [57], as illustrated in Equation 11.

$$X_{CO_2}(\%) = \frac{CO_{2,in} - CO_{2,out}}{CO_{2,in}} \times 100 \quad (11)$$

where $CO_{2,in}$ is the initial concentration of CO_2 and $CO_{2,out}$ is the concentration after decomposition.

The analysis of test results pertaining to each electric field intensity level during the corona discharge identified as *d_Glow*, *d_Streamer* and *d_Electric Field Strength* will be discussed in detail in the next section.

III. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The experimental setup consists of two main variables: electric field intensity levels and airflow rates. The electric field intensity levels are categorized as Glow, Streamer, and Electric Field Strength, which are evaluated at airflow rates of 40 L/min, 80 L/min, and 160 L/min. The three flow rate levels were chosen based on the equipment's operational limits. During preliminary tests, it was found that flow rates below 40 L/min resulted in uneven flow, while rates above 160 L/min caused inaccurate reactions in the test system. Therefore, this research utilized flow rates within this range to ensure accurate and reliable experimental results. For each trial, the CO_2 concentration is maintained at 420 ppm, representing the concentration of CO_2 in normal atmospheric conditions [58], and 1200 ppm, which affects humans [59], [60]. The test duration is set at 15 minutes. The system has a power consumption of approximately 20 W with a voltage of 24 V_{dc} and a current of 0.83 A. Efficiency is measured by comparing the CO_2 decomposition results with the control condition (no power). Additionally, the experiment aims to evaluate the formation of byproducts, particularly O_3 and NO_x [53].

Before evaluating CO_2 decomposition efficiency, the system is tested without corona discharge. In this experiment, with the DC power supply off, a 6.9% reduction in CO_2 is observed after 15 minutes, likely due to gas leakage from incomplete seals in various parts of the system. This leakage rate is deemed acceptable for subsequent testing. When the CO_2 decomposition system with negative corona discharge is activated, the 6.9% leakage is used as the baseline for gas degradation in the control experiment. The control condition provides baseline data for natural decomposition rates, allowing for clear comparisons of the electric fields' effectiveness. Evaluating the byproducts is essential for understanding the environmental and safety impacts.

The following subsections present the results and insights derived from these experiments, providing a comprehensive understanding of the influence of electric field intensities and airflow rates on CO_2 decomposition, the variation of CO_2 concentration, and the formation of O_3 and NO_x.

A. GLOW DISCHARGE CONDITIONS

Glow discharge is a particular phase of corona discharge characterized by a relatively stable and uniform plasma. Studying this phase helps in understanding the consistent conditions under which CO_2 decomposition can be optimized. Fig. 3 presents the outcomes of CO_2 decomposition under the influence of electric field intensity during the Glow discharge phase. These results were obtained by introducing CO_2 into the system at a baseline concentration of 420 ppm. A notable observation is the decrease in CO_2 concentration at the output side once the electric field intensity generator was activated, compared to its control state, as detailed in Fig. 3(a). Specifically, the decomposition of CO_2 was analyzed at airflow rates of 40 L/min, 80 L/min, and 160 L/min, with each test

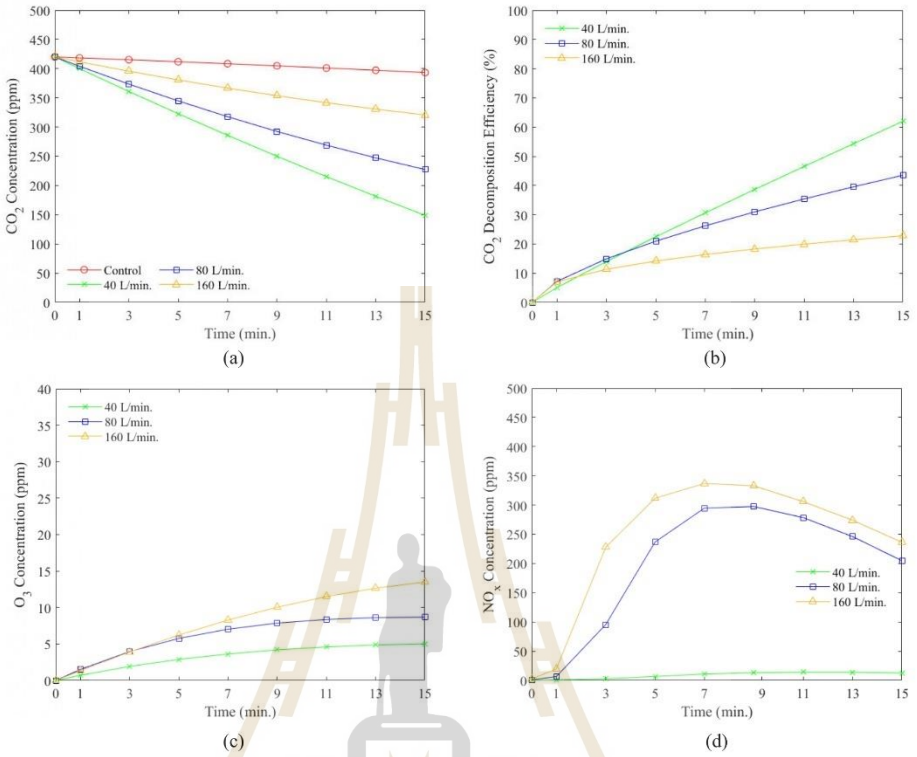


FIGURE 3. Measurement results at electric field intensity levels during Glow: a) Results of the decomposition of carbon dioxide CO_2, b) Efficiency of the decomposition of carbon dioxide CO_2, c) Value of the concentration of O_3 that occurs, d) The NO_x concentration value that occurs.

lasting 15 minutes. Analyzing different airflow rates allows for understanding the effect of this variable on CO_2 decomposition efficiency. Post-experiment, CO_2 concentrations were measured at 148, 227, and 320 ppm for the respective airflow rates. Fig. 3(b) further explores these findings, revealing the maximum decomposition efficiencies to be 62.34%, 42.24%, and 18.58%, respectively. The observation that higher airflow rates result in less pronounced concentration decreases, while lower rates facilitate greater reductions in CO_2 levels, can be attributed to gas flow dynamics and reaction kinetics [61]. At lower airflow rates, CO_2 molecules stay longer in the reaction zone, allowing for more interactions with reactive species from the glow discharge, enhancing decomposition. Conversely, higher airflow rates cause CO_2 molecules to pass through the reaction zone quickly, reducing interaction time and decomposition. Additionally, higher airflow rates may make weaker reactive species, decreasing overall decomposition efficiency.

Fig. 3(c) shows that O_3 concentration increases over time at all airflow rates (40, 80, and 160 L/min), with higher rates resulting in higher O_3 levels. At 40 L/min, O_3 reaches about 5.0 ppm in 15 minutes, while at 80 L/min it reaches around 8.6 ppm, and at 160 L/min it nearly hits 13.5 ppm. Higher airflow rates enhance O_3 production due to increased oxygen availability and interactions with reactive species [62]. However, lower airflow rates are more effective for CO_2 decomposition due to longer residence times. This demonstrates a trade-off between optimizing CO_2 decomposition and controlling O_3 production.

Fig. 3(d) presents NO_x concentrations rapidly increase within the first few minutes for higher airflow rates of 80 L/min and 160 L/min, peaking around 7 minutes before declining, with 160 L/min reaching about 337 ppm and 80 L/min about 285 ppm. The 40 L/min rate maintains consistently low NO_x levels. Higher airflow rates enhance NO_x formation due to increased interactions with

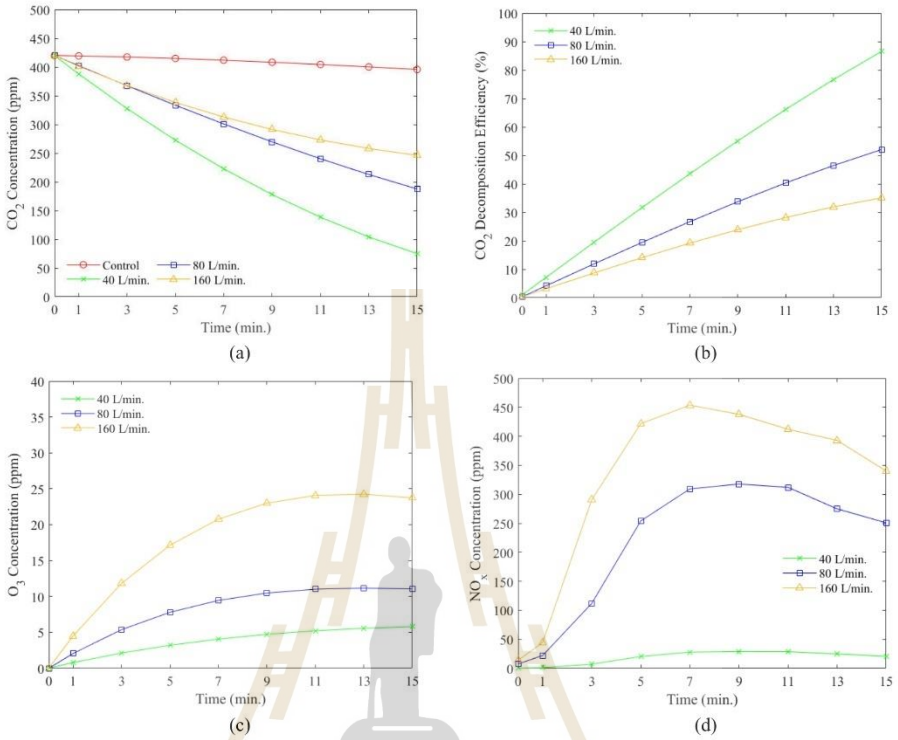


FIGURE 4. Experiment results at electric field intensity levels during Streamer: a) results of the decomposition of carbon dioxide CO_2, b) efficiency of the decomposition of carbon dioxide CO_2, c) value of the concentration of O_3 that occurs, d) the NO_x concentration value that occurs.

high-energy electrons, but concentrations decline over time, indicating consumption or dispersion. Thus, higher airflow rates boost initial NO_x production [63], while the lowest rate minimizes it, highlighting a trade-off in optimizing airflow for different process efficiencies.

B. STREAMER DISCHARGE CONDITION

This subsection presents a detailed analysis of CO_2 decomposition and byproduct formation (O_3 and NO_x) during the streamer generation phase, focusing on the effects of varying airflow rates. In Fig. 4, the outcomes of electric field intensity measurements are examined across airflow rates of 40 L/min, 80 L/min, and 160 L/min. The CO_2 concentration reductions observed were 75, 187, and 246 ppm, respectively, as indicated in Fig. 4(a). The corresponding highest decomposition efficiencies for these rates were 80.92%, 52.42%, and 37.40%, showcased in Fig. 4(b). These results demonstrate that lower airflow rates contribute to more effective CO_2 decomposition.

Regarding the formation of O_3, a gradual increase in concentration with higher airflow rates was noted. Specifically, the O_3 concentrations recorded in the system were 5.8, 11.0, and 23.7 ppm for the respective airflow rates, as detailed in Fig. 4(c). The increase in O_3 concentration with higher airflow rates can be attributed to more frequent collisions and reactions between oxygen molecules and high-energy electrons, which are more prevalent at higher flow rates [62].

This trend suggests a positive the pattern of NO_x formation initially showed high values that increased at the start of the test before eventually declining. By the end of the 15-minute test period, the NO_x concentrations were 26, 242, and 323 ppm, in ascending order of airflow rates, as presented in Fig. 4(d). This illustrates that higher airflow rates lead to increased concentrations of NO_x compounds in the system. This pattern indicates that higher airflow rates result in greater NO_x production, followed by a decrease. This could be due to the initial rapid formation of NO_x compounds as the electric field intensity increases, and the subsequent reduction could

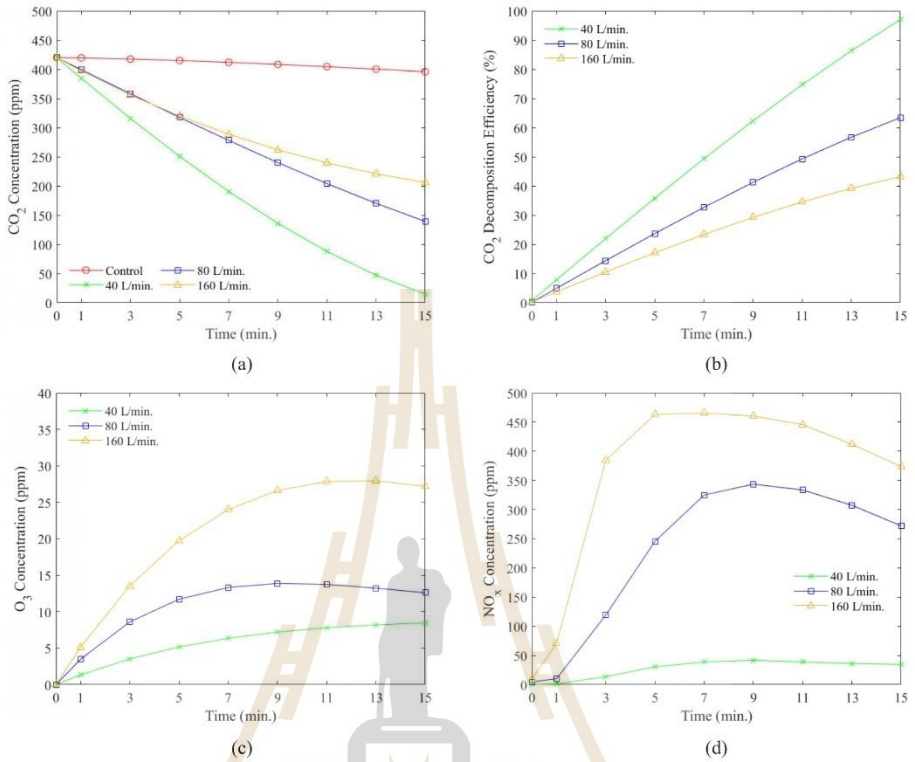


FIGURE 5. Experiment results at electric field intensity levels during Electric Field Strength: a) results of the decomposition of carbon dioxide CO_2, b) efficiency of the decomposition of carbon dioxide CO_2, c) value of the concentration of O_3 that occurs, d) the NO_x concentration value that occurs.

be attributed to the dispersion and dilution of NO_x within the system over time due to the continuous airflow [63].

C. ELECTRIC FIELD STRENGHT DISCHARGE CONDITION

From the measurement results, the electric field intensity levels within the 'Electric Field Strength' range at various airflow rates are depicted in Fig. 5. These intensity levels are shown to be higher than those recorded during both the Streamer and Glow periods. The electric field intensity was calculated by using equations 2 and 3 that is the highest electric field intensity level in this research.

Fig. 5 shows the measurement results for CO_2 decomposition at the electric field intensity in the Electric Field Strength state, a phase where the electric field is more intense than in other levels, preceding the arc state. The analysis encompasses diverse airflow rates specifically 40 L/min, 80 L/min, and 160 L/min alongside comparisons with electric field intensities observed during the Glow and Streamer states. The CO_2 dissipation test results, at these airflow rates, revealed concentration reductions to 14, 139, and 206 ppm, respectively, as illustrated in Fig. 5(a). The peak decomposition efficiencies achieved for each airflow rate were 96.44%, 64.63%, and 47.58%, correspondingly. Fig. 5(b) demonstrates that the highest CO_2 decomposition efficiency is attained at significantly high electric field strengths, particularly at an airflow rate of 40 L/min. This is because at lower airflow rates, the gas has more extended exposure to the electric field, increasing the likelihood of CO_2 molecules interacting with high-energy electrons, which facilitates decomposition. The Higher electric field strengths generate more energetic electrons, which are crucial for initiating the chemical reactions needed to break down the CO_2 molecules [64].

In the corona discharge system, as the electric field intensity increases, the concentration of the O_3 gas compound correspondingly rises. Furthermore, this concentration

incrementally escalates with the airflow rate. Specifically, the O_3 gas concentrations observed were 8.4, 12.6, and 27.2 ppm for increasing rates of airflow, as depicted in Fig. 5(c). As the electric field intensity increases, more high-energy electrons are available to initiate the dissociation of oxygen molecules, leading to higher concentrations of O_3 [62]. Regarding the nitrogen oxide (NO_x) gas compounds, initial test results indicated a surge in NO_x values, followed by a gradual decline, forming an inverted bell curve in the measurement results graph. The initial surge in NO_x concentrations is due to the immediate availability of atomic nitrogen and oxygen from high-energy electron dissociation early in the discharge process. As the discharge peaks, the concentration of reactive species is highest, leading to rapid NO_x formation [63]. After the initial surge, NO_x concentrations decline because the supply of reactive nitrogen and oxygen atoms diminishes as they are consumed in forming NO_x and other byproducts. The 15-minute testing period a consistent duration across various scenarios the NO_x concentrations measured were 34, 270, and 363 ppm, respectively, as shown in Fig. 5(d). These results reveal that both a faster airflow rate and a higher electric field intensity contribute to elevated concentrations of NO_x compounds within the system.

The results from the three electric field intensity levels indicate that an airflow rate of 40 L/min is most conducive to optimizing CO_2 decomposition efficiency under the tested conditions. This analysis conclusively demonstrates the profound influence of airflow rate and electric field intensity on the efficiency of CO_2 decomposition and the concentration of resultant gas compounds. The 40 L/min airflow rate is particularly suitable because it maximizes the opportunities for interactions between gas molecules and negative ions within the system, thereby enhancing the decomposition process's efficiency. Comparative results of CO_2 decomposition at a consistent airflow rate of 40 L/min across all three electric field intensity levels Glow, Streamer, and Electric Field Strength were analyzed against a control setup with no electric field applied. In the control system, starting with an initial CO_2 concentration of 420 ppm and a test duration of 15 minutes, the presence of an electric field led to significant reductions in CO_2 concentration at each electric field intensity level, registering at 148, 75, and 14 ppm for Glow, Streamer, and Electric Field Strength, respectively. The corresponding decomposition efficiencies were 62.34%, 80.92%, and 96.44%, assuming 100% efficiency when the CO_2 concentration decreases from 420 ppm to zero. These results highlight the significant impact of electric field strength on the efficiency of CO_2 decomposition. Each test condition exhibits unique differences. The test results, compiled in Table 4.

D. IMPACT OF CO_2 CONCENTRATION ON DECOMPOSITION EFFICIENCY AND BYPRODUCT FORMATION AT ELECTRIC FIELD STRENGTH LEVEL

In this subsection, the influence of varying CO_2 concentrations on the efficiency of CO_2 decomposition and the formation of byproducts, specifically O_3 and NO_x, at electric field strength level is explored. At 1200 ppm of CO_2, a concentration that adversely affects the human body [59], [60]. the decomposition efficiency of CO_2 is enhanced by 54.5% compared to 420 ppm of CO_2 in 15 minutes, as shown in Fig. 6(a). This improvement is due to the increased probability of collisions with reactive species from the corona discharge, leading to a higher decomposition rate [65].

The outcomes of measuring gas compounds within the corona discharge system at electric field strength level, focusing on scenarios with and without CO_2. The system tests CO_2 concentrations are divided based on of 420 ppm and 1200 ppm to analyze the variations in compound gases generated by the system. The findings reveal that the concentration of O_3 in the absence of CO_2 exceeds that in its presence as shown in Fig. 6(b). This disparity arises because O_3 formation is more straightforward in air, facilitated by the abundance of free oxygen molecules. The high-energy electrons emitted during the corona discharge split oxygen molecules into individual atoms, which then recombine with other oxygen molecules to produce more O_3. In contrast, in environments containing CO_2, despite oxygen atoms being part of the CO_2 molecule, the molecule's stability and the scarcity of free oxygen molecules render direct O_3 formation less probable. Similarly, nitrogen dioxide (NO_2) exhibits a trend akin to that of O_3 as illustrated in Fig. 6(c), influenced by the air's chemical composition a mix of nitrogen and oxygen, which promotes the generation of NO_x.

From the variation of CO_2 concentration, it was found that O_3 and NO_x concentrations at 1200 ppm CO_2 are lower than at 420 ppm. The decrease in O_3 and NO_x concentrations is due to specific chemical processes. Higher concentrations of CO_2 in a corona discharge environment led to a reduction in O_3 formation because CO_2 absorbs energy, quenches reactive oxygen species, and creates alternative reaction pathways [66]. Similarly, higher CO_2 levels reduce NO_x formation by competing for reactive nitrogen species and facilitating secondary reactions that lower NO concentrations [48].

To confirm the efficiency of decomposition when the CO_2 concentration is varied, Table 5 shows the decomposition ratio of CO_2 at concentrations of 420 ppm and 1200 ppm under various electric field intensity levels.

The data indicates that across all three electric field intensities, the decomposition efficiency is notably higher at 1200 ppm compared to 420 ppm. Moreover, the electric field strength exhibits the highest ratio. This trend suggests that higher CO_2 concentrations lead to increased decomposition rates due to the greater availability of CO_2 molecules for interaction with reactive species.

In this paper, the highest CO_2 decomposition efficiency achieved was 96.44% at a power input of 20 W and a flow rate of 40,000 ml/min. The results were compared with previous research on various plasma types, including microwave plasma, thermal plasma, gliding arc, DBD, and corona discharge [18], [67], [68], [69], [71], [72]. The

TABLE 4. Results of measuring the decomposition of carbon dioxide and compounds that occur in the system at all 3 air flow rates and the range of electric field intensity at the glow, streamer, and electric field strength levels.

E-Filed	Tested gas	Flow rate (L/min)	Concentration (ppm) 0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	15 min
Control	CO_2		420	418	415	411	408	404	401	397	393
Glow	CO_2	40	420	400	360	322	285	250	215	181	148
		40 (X_{co_2})	0.00%	4.31%	13.20%	21.60%	30.10%	38.10%	46.30%	54.40%	62.30%
		80	420	404	373	344	317	292	269	247	227
		80 (X_{co_2})	0.00%	3.35%	10.12%	16.30%	22.30%	27.72%	32.92%	37.78%	42.24%
		160	420	411	395	380	366	353	341	330	320
		160 (X_{co_2})	0.00%	1.67%	4.819%	7.543%	10.29%	12.62%	14.96%	16.88%	18.58%
	O_3	40	0	0.7	1.9	2.8	3.6	4.1	4.5	4.8	5.0
		80	0	1.5	3.9	5.7	7.0	7.8	8.3	8.6	8.6
		160	0	1.3	4.1	6.2	8.2	10.0	11.5	12.6	13.5
	NO_x	40	0	1	3	7	10	13	14	13	13
		80	0	13	113	217	285	302	282	246	208
		160	0	48	196	295	337	334	305	266	228
Streamer	CO_2	40	420	388	327	272	223	178	138	104	75
		40 (X_{co_2})	0.00%	7.18%	21.20%	33.82%	45.34%	55.94%	65.59%	73.8%	80.92%
		80	420	401	367	333	301	269	240	213	187
		80 (X_{co_2})	0.00%	4.07%	11.57%	18.98%	26.23%	33.42%	40.15%	46.35%	52.42%
		160	420	401	367	338	313	291	273	258	246
		160 (X_{co_2})	0.00%	4.07%	11.57%	17.76%	23.28%	27.97%	31.92%	35.01%	37.40%
	O_3	40	0	0.7	2.1	3.1	4.1	4.7	5.2	5.6	5.8
		80	0	2.0	5.3	7.8	9.4	10.4	11.0	11.2	11.0
		160	0	4.5	11.8	17.1	20.7	23.0	24.1	24.2	23.7
	NO_x	40	0	1	9	21	29	32	31	28	26
		80	0	15	131	237	303	324	309	278	242
		160	0	63	266	397	452	451	417	372	323
Electric Field Strength	CO_2	40	420	384	316	251	190	136	87	47	14
		40 (X_{co_2})	0.00%	8.13%	23.86%	38.93%	53.43%	66.34%	78.3%	88.16%	96.44%
		80	420	397	356	320	278	240	204	170	139
		80 (X_{co_2})	0.00%	5.02%	14.22%	22.14%	31.86%	40.59%	49.13%	57.18%	64.63%
		160	420	397	356	320	288	262	239	221	206
		160 (X_{co_2})	0.00%	5.02%	14.22%	22.14%	29.41%	35.15%	40.4%	44.33%	47.58%
	O_3	40	0	1.3	3.5	5.2	6.3	7.2	7.8	8.2	8.4
		80	0	3.5	8.6	11.7	13.3	13.9	13.7	13.2	12.6
		160	0	5.1	13.5	19.7	24.0	26.6	27.8	27.9	27.2
	NO_x	40	0	2	15	29	38	41	39	26	34
		80	0	18	137	244	315	343	335	306	270
		160	0	105	325	427	471	462	435	401	363

TABLE 5. The decomposition ratio of CO_2 at concentrations of 420 and 1200 ppm across a range of electric field intensities a t testing time of 15 Min.

Electric Filed Level	Ratio (420 PPM: 1200 PPM)
Glow	1:1.53
Streamer	1:2.36
Electric Field Strength	1:2.73

comparison focused on several key parameters: the highest CO_2 decomposition efficiency, low power consumption, high flow rate, and the absence of a chemical catalyst requirement.

Table 6 presents a comparative analysis of CO_2 decomposition across different plasma types, showcasing both previous research and the proposed research. The table provides essential data on power consumption, total flow rates, catalyst use, and CO_2 decomposition efficiencies for each method. The proposed research using Corona plasma stands out with a notable CO_2 decomposition efficiency of 96.44%, achieved with a relatively low power input of 20 W and a high total flow rate of 40,000 ml/min, without the use of a catalyst.

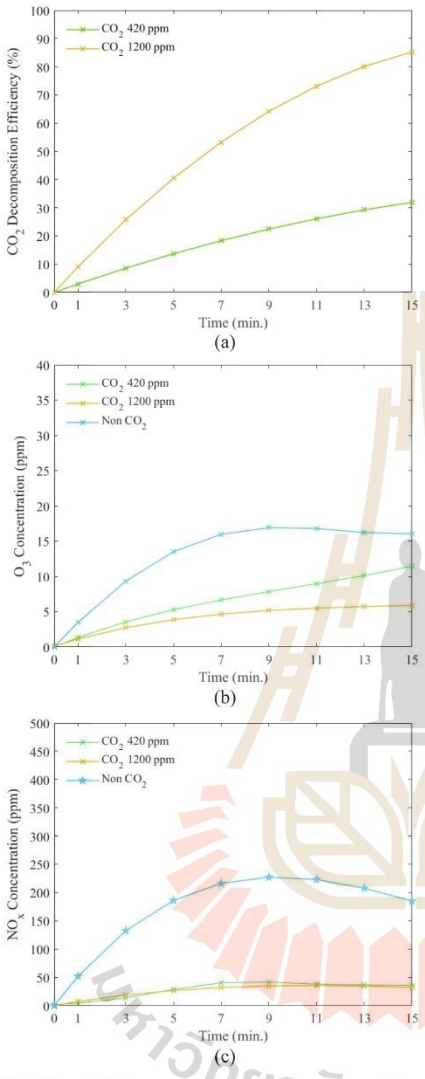


FIGURE 6. Impact of CO_2 concentration on (a) decomposition efficiency CO_2, (b) O_3 concentration and (c) NO_x concentration.

This efficiency surpasses other methods listed, including MW (Microwave) plasma at 31.3%, thermal plasma at 48.0%, gliding arc at 9.0%, and various DBD (Dielectric Barrier Discharge) plasmas, which range from 43.1% to 75.0%.

TABLE 6. Comparison of CO_2 decomposition in different types of plasma: Previous research vs. proposed research.

Ref.	Plasma Type	Power (W)	Total flow rate (ml/min)	catalyst	CO_2 Decomposition (%)
[67]	MW	5,000	30,000	None	31.3
[68]	Thermal plasma	15,000	25,000	None	48.0
[18]	Gliding arc	1,500	14,000	None	9.0
[69]	DBD	100	60	None	43.1
[35]	DBD	60	60	16%Cu-12%Ni/γ-Al_2O_3	75.0
[38]	Corona	45	60	None	70.0
This work	Corona	**20**	**40,000**	None	**96.44**

The high efficiency of the Corona plasma method, especially at lower power levels and higher flow rates, highlights the effectiveness of optimizing plasma conditions for CO_2 decomposition. The absence of catalysts in achieving such high efficiency suggests that the specific parameters used in the Corona plasma approach are highly effective. In comparison, other methods with higher power inputs and flow rates, such as MW and thermal plasma, did not achieve similar efficiencies, indicating the importance of optimizing both the power and flow rate parameters. This table underscores the potential of the proposed research in advancing plasma technology for environmental applications, particularly in improving CO_2 reduction processes.

IV. CONCLUSION

This paper investigates the decomposition of CO_2 using cold plasma via corona discharge, focusing on electric field intensities (Glow, Streamer, and Electric Field Strength) and airflow rates (40 L/min, 80 L/min, and 160 L/min). The findings show that a 40 L/min airflow rate resulted in the most significant CO_2 reduction across all electric field intensities, with the highest efficiency at the Electric Field Strength state. However, this phase also produced higher concentrations of O_3 and NO_x. The study also examines the impact of higher CO_2 concentrations on decomposition efficiency and byproduct formation at the Electric Field Strength level with a 40 L/min airflow rate. Results indicate that higher CO_2 concentrations increase decomposition efficiency and decrease byproduct levels with 1200 ppm CO_2 yielding higher decomposition rates and byproduct concentrations below those observed at a 420 ppm CO_2 concentration. The results of this study demonstrate that the technology achieves a high efficiency in CO_2 decomposition, reaching up to 96.44% with a power consumption of just 20 W and without the need for a catalyst, thereby lowering operational costs compared to alternative technologies. Moreover, its ease of integration into future industrial applications further minimizes costs and enhances the potential for widespread adoption. In addition, this technology significantly reduces greenhouse gas

emissions and mitigates the effects of climate change, providing substantial long-term environmental benefits.

In the future, further research is needed to enhance the efficiency and scalability of this technology and minimize undesirable by products, with a focus on investigating the potential for higher concentrations of CO_2 to be effectively utilized in the industrial sector.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development Fund, the School of Electronic Engineering, Institute of Engineering, and the Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), for their invaluable support in making this work successful.

REFERENCES

[1] J. Huang, H. Zhang, Q. Tan, L. Li, R. Xu, Z. Xu, and X. Li, "Enhanced conversion of CO_2 into O_2-free fuel gas via the boudouard reaction with biochar in an atmospheric plasmatron," *J. CO_2 Utilization*, vol. 45, Mar. 2021, Art. no. 101429.

[2] *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2014*, WMO Greenhouse Gas Bull., Geneva, Switzerland, Nov. 2015, pp. 1–10.

[3] R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ and J. P. van Y. pserle, "Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change," in *Proc. IPCC*, 2014, p. 151.

[4] D. W. Lea, "Climate sensitivity in a warmer world," *Nature*, vol. 518, no. 7537, pp. 46–47, Feb. 2015.

[5] D. Mei and X. Tu, "Conversion of CO_2 in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor: Effects of plasma processing parameters and reactor design," *J. CO_2 Utilization*, vol. 19, pp. 68–78, May 2017.

[6] M. Ghahramani and F. Pilla, "Analysis of carbon dioxide emissions from road transport using taxi trips," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 98573–98580, 2021.

[7] M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Canciani, P. Sestini, and G. Viegi, "School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children," *Eur. Respiratory J.*, vol. 35, no. 4, pp. 742–749, Jan. 2010.

[8] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert, and W. J. Fisk, "Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO_2 concentrations on human decision-making performance," *Environ. Health Perspect.*, vol. 120, no. 12, pp. 1671–1677, Dec. 2012.

[9] N. Seddon, A. Chausson, P. Berry, C. A. J. Girardin, A. Smith, and B. Turner, "Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges," *Phil. Trans. Roy. Soc. B, sBiol. Sci.*, vol. 375, no. 1794, Jan. 2020, Art. no. 20190120.

[10] S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, "Strategies for mitigation of climate change: A review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 18, pp. 2069–2094, Jul. 2020.

[11] J. Gibbins and H. Chalmers, "Carbon capture and storage," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4317–4322, Oct. 2008.

[12] S. Bachu, "CO_2 storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment," *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 254–273, Apr. 2008.

[13] X. Liu, X. Li, J. Tian, G. Yang, H. Wu, R. Ha, and P. Wang, "Low-carbon economic dispatch of integrated electricity-gas energy system considering carbon capture, utilization and storage," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 25077–25089, 2023.

[14] L. Li, H. Zhang, X. Li, X. Kong, R. Xu, K. Tay, and X. Tu, "Plasma-assisted CO_2 conversion in a gliding arc discharge: Improving performance by optimizing the reactor design," *J. CO_2 Utilization*, vol. 29, pp. 296–303, Jan. 2019.

[15] B. Smit, A.-H.-A. Park, and G. Gadikota, "The grand challenges in carbon capture, utilization, and storage," *Frontiers Energy Res.*, vol. 2, p. 55, Nov. 2014.

[16] E. V. Kondratenko, G. Mul, J. Baltrusaitis, G. O. Larrazábal, and J. Pérez-Ramírez, "Status and perspectives of CO_2 conversion into fuels and chemicals by catalytic, photocatalytic and electrocatalytic processes," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 11, p. 3112, 2013.

[17] M. Mikkelsen, M. Jørgensen, and F. C. Krebs, "The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide," *Energy Environ. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 43–81, 2010.

[18] T. Nunnally, K. Gutsol, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Gutsol, and A. Kemoun, "Dissociation of CO_2 in a low current gliding arc plasmatron," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 44, no. 27, Jun. 2011, Art. no. 274009.

[19] D. Mei, X. Zhu, Y.-L. He, J. D. Yan, and X. Tu, "Plasma-assisted conversion of CO_2in a dielectric barrier discharge reactor: Understanding the effect of packing materials," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, Dec. 2014, Art. no. 015011.

[20] B. Ashford and X. Tu, "Non-thermal plasma technology for the conversion of CO_2," *Current Opinion Green Sustain. Chem.*, vol. 3, pp. 45–49, Feb. 2017.

[21] S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, K. Tachibana, P. Bruggeman, G. Kroesen, and N. Mason, "The 2012 plasma roadmap," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 45, no. 25, Jun. 2012, Art. no. 253001.

[22] A. Fridman, *Plasma Chemistry*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2008.

[23] R. Snoeckx and A. Bogaerts, "Plasma technology-a novel solution for CO_2 conversion," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 46, no. 19, pp. 5805–5863, Aug. 2017.

[24] D. Mei, "Plasma-catalytic conversion of greenhouse gas into value-added fuels and chemicals," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Electron., Univ. Liverpool, Liverpool, U.K., 2016.

[25] H. Zhang, X. Li, F. Zhu, K. Cen, C. Du, and X. Tu, "Plasma assisted dry reforming of methanol for clean syngas production and high-efficiency CO_2 conversion," *Chem. Eng. J.*, vol. 310, pp. 114–119, Feb. 2017.

[26] M. Okubo, T. Kuroki, H. Yamada, K. Yoshida, and T. Kuwahara, "CO_2 concentration using adsorption and nonthermal plasma desorption," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 2432–2439, May 2017.

[27] M. Okubo, K. Takahashi, S. Kamiya, and T. Kuroki, "High-efficiency carbon dioxide reduction using nonthermal plasma desorption," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 6422–6429, Nov. 2018.

[28] A. George, B. Shen, M. Craven, Y. Wang, D. Kang, C. Wu, and X. Tu, "A review of non-thermal plasma technology: A novel solution for CO_2 conversion and utilization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, Jan. 2021, Art. no. 109702.

[29] H. Zhang, F. Zhu, X. Li, K. Cen, C. Du, and X. Tu, "Enhanced hydrogen production by methanol decomposition using a novel rotating gliding arc discharge plasma," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 16, pp. 12770–12781, 2016.

[30] X. Tu and J. C. Whitehead, "Plasma-catalytic dry reforming of methane in an atmospheric dielectric barrier discharge: Understanding the synergistic effect at low temperature," *Appl. Catalysis B, Environ.*, vol. 125, pp. 439–448, Aug. 2012.

[31] H. Zhang, W. Wang, X. Li, L. Han, M. Yan, Y. Zhong, and X. Tu, "Plasma activation of methane for hydrogen production in a N_2 rotating gliding arc warm plasma: A chemical kinetics study," *Chem. Eng. J.*, vol. 345, pp. 67–78, Aug. 2018.

[32] S. Davoodi, M. Al-Shargabi, D. A. Wood, V. S. Rukavishnikov, and K. M. Minaev, "Review of technological progress in carbon dioxide capture, storage, and utilization," *Gas Sci. Eng.*, vol. 117, Sep. 2023, Art. no. 205070.

[33] K. Li, S. Yan, H. Liu, M. Li, and M. Wang, "Editorial: Advances in CCUS engineering technologies: Processes, systems and applications," *Frontiers Energy Res.*, vol. 10, Jul. 2022, Art. no. 938721.

[34] J. A. Andersen, J. M. Christensen, M. Østberg, A. Bogaerts, and A. D. Jensen, "Plasma-catalytic dry reforming of methane: Screening of catalytic materials in a coaxial packed-bed DBD reactor," *Chem. Eng. J.*, vol. 397, Oct. 2020, Art. no. 125519.

[35] A.-J. Zhang, A.-M. Zhu, J. Guo, Y. Xu, and C. Shi, "Conversion of greenhouse gases into syngas via combined effects of discharge activation and catalysis," *Chem. Eng. J.*, vol. 156, no. 3, pp. 601–606, Feb. 2010.

[36] B. Dziejarski, R. Krzyuynska, and K. Andersson, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment," *Fuel*, vol. 342, Jun. 2023, Art. no. 127776.

[37] G. Chen, R. Snyders, and N. Britun, "CO_2 conversion using catalyst-free and catalyst-assisted plasma-processes: Recent progress and understanding," *J. CO_2 Utilization*, vol. 49, Jul. 2021, Art. no. 101557.

[38] M.-W. Li, G.-H. Xu, Y.-L. Tian, L. Chen, and H.-F. Fu, "Carbon dioxide reforming of methane using DC corona discharge plasma reaction," *J. Phys. Chem. A*, vol. 108, no. 10, pp. 1687–1693, Feb. 2004.

[39] K. Pornmai, W. Ngamkala, T. Rirksomboon, P. Ouraipryvan, and S. Chavadej, "Re-forming of CO_2-containing natural gas with steam and partial oxidation over Ni catalysts in corona discharge for synthesis gas production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 16, pp. 6203–6217, Mar. 2019.

[40] H. H. Nguyen, A. Nasonova, I. W. Nah, and K.-S. Kim, "Analysis on CO_2 reforming of CH4 by corona discharge process for various process variables," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, pp. 58–62, Dec. 2015.

[41] M. Belan and F. Messanelli, "Compared ionic wind measurements on multi-tip corona and DBD plasma actuators," *J. Electrostatics*, vol. 76, pp. 278–287, Aug. 2015.

[42] R. Wang, Y. Zhang, Z. Jiang, T. Zhang, J. Ouyang, and Y. Sun, "New design of ion blower based on needle-dielectric-needle bipolar corona discharge," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129192–129199, 2019.

[43] F. Lv, J. Song, P. Wang, H. Ruan, and J. Geng, "Influencing factors of flow field of ionic wind induced by corona discharge in a multi-needle-to-net electrode structure under direct-current voltage," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 123671–123678, 2019.

[44] M. Ohring, *Engineering Materials Science*. New York, NY, USA: Academic, 1995.

[45] J.-S. Kim, H.-J. Kim, B. Han, S. Lee, J. Lee, S. Moon, and Y.-J. Kim, "Particle removal characteristics of a high-velocity electrostatic mist eliminator," *Aerosol Air Quality Res.*, vol. 14, pp. 121–133, Apr. 2020.

[46] A. Jaworek, A. T. Sobczyk, and E. Rajch, "Investigations of DC corona and back discharge characteristics in various gases," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 142, Dec. 2008, Art. no. 012010.

[47] K. L. Pan, W. C. Chung, and M. B. Chang, "Dry reforming of CH_4 with CO_2 to generate syngas by combined plasma catalysis," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 12, pp. 3809–3818, Dec. 2014.

[48] Q. Fu, Y. Wang, and Z. Chang, "Study on the conversion mechanism of CO_2 to O_2 in pulse voltage dielectric barrier discharge at Martian pressure," *J. CO_2 Utilization*, vol. 70, Apr. 2023, Art. no. 102430.

[49] H. Yamasaki, S. Kamei, T. Kuroki, and M. Okubo, "Adsorbed CO_2 dissociation using argon and helium nonthermal plasma flows," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, pp. 6983–6989, Nov. 2020.

[50] M. Rahman, V. Cooray, R. Montaño, P. Liyanage, and M. Becerra, "NOX production by impulse sparks in air," *J. Electrostatics*, vol. 69, no. 6, pp. 494–500, Dec. 2011.

[51] V. Cooray and M. Rahman, "Efficiencies for production of NO, and O_3 by streamer discharges in air at atmospheric pressure," *J. Electrostatics*, vol. 63, nos. 6–10, pp. 977–983, Jun. 2005.

[52] X. Li, L. Yang, Y. Lei, J. Wang, and Y. Lu, "A method for removal of CO from exhaust gas using pulsed corona discharge," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 50, no. 10, pp. 1734–1738, Dec. 2011.

[53] W. Lu, Y. Abbas, M. F. Mustafa, C. Pan, and H. Wang, "A review on application of dielectric barrier discharge plasma technology on the abatement of volatile organic compounds," *Frontiers Environ. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. 30, Apr. 2019.

[54] M. A. Malik, "Nitric oxide production by high voltage electrical discharges for medical uses: A review," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 36, no. 3, pp. 737–766, Mar. 2016.

[55] M. Okubo, H. Yamada, K. Yoshida, and T. Kuroki, "Simultaneous reduction of diesel particulate and NO_x using a catalysis-combined nonthermal plasma reactor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5875–5882, Nov. 2017.

[56] S. R. Sun, H. X. Wang, D. H. Mei, X. Tu, and A. Bogaerts, "CO_2 conversion in a gliding arc plasma: Performance improvement based on chemical reaction modeling," *J. CO_2 Utilization*, vol. 17, pp. 220–234, Jan. 2017.

[57] A. Barkhordari, S. Karimian, A. Rodero, D. A. Krawczyk, S. I. Mirzaei, and A. Falahat, "Carbon dioxide decomposition by a parallel-plate plasma reactor: Experiments and 2-D modelling," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, p. 10047, Oct. 2021.

[58] L. Wagner, S. Mastroianni, and A. Hinsch, "Reverse manufacturing enables perovskite photovoltaics to reach the carbon footprint limit of a glass substrate," *Joule*, vol. 4, no. 4, pp. 882–901, Apr. 2020.

[59] D.-H. Tsai, J.-S. Lin, and C.-C. Chan, "Office Workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations," *J. Occupational Environ. Hygiene*, vol. 9, no. 5, pp. 345–351, May 2012.

[60] P. V. Dorizas, M.-N. Assimakopoulos, and M. Santamouris, "A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools," *Environ. Monitor. Assessment*, vol. 187, no. 5, pp. 1–18, Apr. 2015.

[61] J. Chen and J. H. Davidson, "Electron density and energy distributions in the positive DC corona: Interpretation for corona-enhanced chemical reactions," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 22, pp. 199–224, Jun. 2002.

[62] W. Siriprom, K. Teanchai, N. Jitchot, and N. Chamchoi, "The comparison of ozone production with oxygen concentration and feed gas flow rate at atmospheric pressure," *Mater. Today, Proc.*, vol. 65, pp. 2336–2339, May 2022.

[63] H. Lin, X. Gao, Z. Luo, K. Cen, and Z. Huang, "Removal of NO_x with radical injection caused by corona discharge," *Fuel*, vol. 83, no. 10, pp. 1349–1355, Jul. 2004.

[64] J. Li, X. Zhai, C. Ma, S. Zhu, F. Yu, B. Dai, G. Ge, and D. Yang, "DBD plasma combined with different foam metal electrodes for CO_2 decomposition: Experimental results and DFT validations," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 11, p. 1595, Nov. 2019.

[65] D. Mei, Y.-L. He, S. Liu, J. Yan, and X. Tu, "Optimization of CO_2 conversion in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor using design of experiments," *Plasma Processes Polym.*, vol. 13, no. 5, pp. 544–556, Sep. 2015.

[66] J. D. Skalný, J. Országh, Š. Matejcík, and N. J. Mason, "Ozone generation in positive and negative corona discharge fed by humid oxygen and carbon dioxide," *Phys. Scripta*, vol. 131, Dec. 2008, Art. no. 014012.

[67] D. Mansfeld, S. Sintsov, N. Chekmarev, and A. Vodopyanov, "Conversion of carbon dioxide in microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at frequency of 24 GHz at atmospheric pressure," *J. CO_2 Utilization*, vol. 40, Sep. 2020, Art. no. 101197.

[68] J. Li, X. Zhang, J. Shen, T. Ran, P. Chen, and Y. Yin, "Dissociation of CO_2 by thermal plasma with contracting nozzle quenching," *J. CO_2 Utilization*, vol. 21, pp. 72–76, Oct. 2017.

[69] Y.-P. Zhang, Y. Li, Y. Wang, C.-J. Liu, and B. Eliasson, "Plasma methane conversion in the presence of carbon dioxide using dielectric-barrier discharges," *Fuel Process. Technol.*, vol. 83, nos. 1–3, pp. 101–109, Sep. 2003.

S. SAMROENG received the B.E. and M.E. degrees in 2018 and 2020, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree in electronic engineering with the Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. His current interests include heavy metals, RF heating, microwave heating, and air pollution.

J. PAKPROM received the B.E. degree in 2019. She is currently pursuing the master's degree in electronic engineering with the Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. Her current interests include heavy metals, RF, and microwave heating.

W. CHAROENSIRI received the B.E. and M.E. degrees in 2017 and 2020, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree in electronic engineering with the Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. His current interests include reduction of contaminants heavy metals, RF, and microwave heating.

P. JANPANGNGERN was born in Lampang, Thailand, in 1991. He received the bachelor's degree in telecommunication engineering from the Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, in 2015, and the master's degree in telecommunication engineering and Doctor of Engineering (D.Eng.) degree from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 2017 and 2023, respectively. Since 2024, he has been a Researcher with the School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology. His research interests include wide range of topics, including omnidirectional circularly polarized antennas (OCPAs), multiple-input multiple-output (MIMO) antennas, wideband antennas, metasurface antennas, radar systems, ultrasonic cleaning, RF heating, and electric automated guided vehicles (EAGV).

C. THONGSOPA received the B.Eng. degree (Hons.) in electronics engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, the M.Eng. degree in electrical and communications engineering from Kasetsart University, Thailand, and the D.Eng. degree in electrical engineering from KMITL, in 1992, 1996, and 2002, respectively. He has experiences expert in RF circuit design, active antenna, and microwave heating application.

N. SANTALUNAI received the B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees in telecommunication engineering from the Suranaree University of Technology, in 2007, 2010, and 2014, respectively. Since 2015, she has been with the Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan. She has experiences expert in metamaterial design, electromagnetic field and wave, dielectric heating applicator, and antenna engineering.

T. THOSDEEKORAPHAT received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in telecommunication engineering from the Suranaree University of Technology, Thailand, in 2006, 2008, and 2013, respectively. He is currently working as a Lecturer with the School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology. His research interests include hyperthermia inductive heating, magnetic shielding system, RF and microwave circuit design, and microwave heating.

S. SANTALUNAI was born in Thailand, in April 1985. He received the B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees in telecommunication engineering from the Suranaree University of Technology, in 2007, 2009, and 2014, respectively. He is currently working as a Lecturer with the School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. His research interests include heating applications, wireless power transfer, RF, microwave circuit design, and antenna design.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายสำเริง สันทาลุนัย เกิดเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ.2539 ที่อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนบ้านหนองหว้าโพธิ์ไทร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสำโรงทาบวิทยาคม อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อ พ.ศ 2562 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2564 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี