



รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง
ด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง

**Conversion of CO₂ and CH₄ to Chemicals and Fuel
by Plasma Technique under Catalytic Reaction**

ฉลาด ยืนยาว และคณะ

สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณทุนอุดหนุนงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์

วิจัยและนวัตกรรม ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ภายใต้แผนยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง
ด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง

Conversion of CO₂ and CH₄ to Chemicals and Fuel
by Plasma Technique under Catalytic Reaction

ฉลาด ยืนยาว

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

นิคม รัตนโรจนกุล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

โกวิท เลิศวิทยานนท์

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณทุนอุดหนุนงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย
และนวัตกรรม ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ภายใต้แผน
ยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

ชื่องานวิจัย	การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง Conversion of CO ₂ and CH ₄ to Chemicals and Fuel by Plasma Technique under Catalytic Reaction.
ชื่อผู้วิจัย	ฉลาด ยืนยาว
ผู้ร่วมวิจัย	นิคม รัตนโรจนกุล โกวิท เลิศวิทยานนท์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี และ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ปีเสร็จวิจัย 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงและสารเคมีในกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง เทคนิคพลาสมาที่ใช้คือ ไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จ โดยกำหนดอัตราการไหลสูงสุดของก๊าซในระบบคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการศึกษาเงื่อนไขการปรับอัตราส่วนของก๊าซมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาเงื่อนไขการปรับความเข้มข้นของฮีเลียมซึ่งเป็นก๊าซผสมร่วมกับก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า เมื่อปล่อยให้ก๊าซเกิดการดิสชาร์จจนถึงจุดที่พลาสมาอยู่ในสภาวะเสถียรใช้เวลาประมาณ 40 นาที ซึ่งจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่เฉลี่ย 135.57 วัตต์ และอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 125.47 องศาเซลเซียส การปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 5:1, 4:2, 3:3, 2:4 และ 1:5 ตามลำดับ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมคงที่ที่ 40 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า การแปลงผันของก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่การแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเพียงเล็กน้อย โอกาสในการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (ก๊าซเชื้อเพลิง) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (วัสดุตั้งต้นในการผลิตสารเคมี) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามโอกาสเกิดก๊าซอีเทนและก๊าซโพรเพนกลับมีค่าลดลง ซึ่งโอกาสเกิดก๊าซอีเทนและก๊าซโพรเพนจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 5:1 ในขณะที่โอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 1:5 ในกรณีที่อัตราส่วนของก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่และปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่ 0 10 20 30 40 และ 50 % ตามลำดับ พบว่า การแปลงผันของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่โอกาสเกิดก๊าซอีเทนและก๊าซโพรเพนมีแนวโน้มคงที่ โดยที่เงื่อนไขอัตราส่วน 1:5 สามารถทำ

ให้ก๊าซมีเทนเกิดการแปลงผันได้มากถึง 75 % ในขณะที่โอกาสเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 60 % และ 92 % ตามลำดับ กรณีของการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีสารตัวเร่ง พบว่า แม้ปริมาณการแปลงผันของ CO_2 และ CH_4 จะไม่เพิ่มขึ้นอีก แต่โอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

คำสำคัญ : คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, สารเคมีและเชื้อเพลิง, การเปลี่ยน, พลาสมาและตัวเร่ง

RESEARCH TITLE: Conversion of CO₂ and CH₄ to Chemicals and Fuel by Plasma Technique under Catalytic Reaction.

RESEARCHERS: Chalad Yuenyao

Co-Researchers: Nikom Rattanarajanukul
Kowit Lertwittayanon

UNIVERSITY: Phetchabun Rajabhat University, Rambhai Barni Rajabhat University and Prince of Songkla University (Hatyai Campus).

ACADEMIC YEAR: 2022

ABSTRACT

This research aims to study the conversion of CO₂ and CH₄ to fuel gas and chemicals in hydrocarbon groups by plasma technique under catalytic reaction. The plasma technique used in this research is a Dielectric Barrier Discharge (DBD). In the research, the maximum total gas flow rate was controlled at 100 ml/min. Effects of CH₄:CO₂ ratio and the concentration of helium gas (He) in the gas mixture on the conversion of reactant gases were investigated. Experimental results showed that after the plasma system was operated and the discharge state reached a stable state, which takes a time of 40 minutes, the electric power and reactor temperature were about 135.57 W and 125.47 °C, respectively. The results showed that when the CH₄:CO₂ ratio was adjusted at 5:1, 4:2, 3:3, 2:4, and 1:5, and the flow rate of He was fixed at 40 ml/min, CH₄ conversion increased, whereas CO₂ conversion slightly decrease. However, CO and H₂ selectivities are clearly increased. In contrast, ethane (C₂H₆) and propane (C₃H₈) selectivities are decreased. The maximum selectivity of C₂H₆ and C₃H₈ appeared as the ratio of CH₄:CO₂ is 5:1. While the selectivity of H₂ and CO is maximized at the CH₄:CO₂ ratio of 1:5. In the case of CH₄:CO₂ constant and concentration of He is varied for 0, 10, 20, 30, 40, and 50 mol%, the conversion of CH₄ and CO₂ slightly increased. However, the trend of C₂H₆ and C₃H₈ selectivities is mostly constant. For the CH₄:CO₂ ratio of 1:5, CH₄ conversion can reach up to 75 %, while H₂ and CO selectivities were

60 % and 92 %, respectively. Though the chemicals are not created directly from the reaction free from the catalyst, some of the products can be used as starting materials for chemical production. In the case of the conversion of CO_2 and CH_4 by plasma under catalytic substance, though the percent conversion of reactant gases not further increases, H_2 selectivity significantly increases.

Key Words: Carbon dioxide, methane, chemical and fuel, conversion, plasma and catalyst

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ภายใต้แผนยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ได้ให้การสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐานและอำนวยความสะดวกด้านข้อมูลการวิจัย ผ่านทางสถาบันวิจัยและพัฒนา รวมทั้งความเอื้อเฟื้อและการอำนวยความสะดวกในการจัดซื้อครุภัณฑ์ในโครงการวิจัย มาโดยตลอด

ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ห้องปฏิบัติการสำหรับทำการวิจัยและพัฒนา

ขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนด้านบุคลากร วัสดุและอุปกรณ์วิจัย รวมทั้งเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ สถาบันวิจัยวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในด้านการบริหารจัดการงบประมาณโครงการวิจัย และการจัดการเอกสารทางด้านการเงิน ให้สามารถใช้จ่ายสำหรับดำเนินโครงการ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ นิสิตนักศึกษาที่น่ารักที่คอยช่วยงาน และมีส่วนอย่างสำคัญในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณสุภาพร ยืนยาว ที่ได้ช่วยดูแลครอบครัวเล็ก ๆ ที่น่ารัก ทำให้สามารถทุ่มเทเวลาในการทำงานวิจัยได้อย่างเต็มที่ จนสำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณพ่อและคุณแม่ ในฐานะผู้อบรมเลี้ยงดู ที่ได้ให้โอกาสได้มาอยู่ ณ ที่แห่งนี้ ได้มีโอกาสทำในสิ่งที่ประสงค์จะทำ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพยิ่ง

และสุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บริหารบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และเจ้าหน้าที่หน่วยวิเคราะห์ก๊าซ โรงแยกก๊าซธรรมชาติ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) สาขาระยอง ที่ได้เอื้อเฟื้อสนับสนุนการตรวจวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของก๊าซ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ฉลาด ยืนยาว และคณะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
กิตติกรรมประกาศ	v
สารบัญ	vi
สารบัญตาราง	ix
สารบัญรูป	x
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 คำสำคัญ	5
บทที่ 2 การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 พลาสมา	7
2.1.1 ความหมายของพลาสมา	7
2.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา	9
2.1.3 ประเภทของพลาสมา	9
2.1.4 กระบวนการเกิดพลาสมา	10
2.1.5 ชนิดของพลาสมาแบบไม่สมดุล	12
2.2 ระบบผลิตพลาสมา	14
2.2.1 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบร์รีเออร์	14
2.2.2 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบลำพลาสมา	15
2.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบร์รีเออร์ดิสชาร์จ	15
2.4 ไดอิเล็กทริก	17
2.5 กระบวนการดิสชาร์จ	20
2.6 ก๊าซในกระบวนการแปลงผันมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์	21
2.6.1 มีเทน (Methane)	21
2.6.2 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	22

2.6.3 ฮีเลียม (Helium)	22
2.6.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen)	23
2.6.5 ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons)	24
2.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	26
2.8 สมการสำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	27
2.9 ทบทวนวรรณกรรม	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัย	30
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์	30
3.1.2 สถานที่ในการวิจัย	30
3.1.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบร์รีเออร์ดิสชาร์จและอุปกรณ์ประกอบ	31
3.1.4 องค์ประกอบและหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	37
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	39
3.2.1 โครงสร้างและวัสดุของต้นแบบระบบพลาสมา	39
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	42
3.3.1 ขั้นตอนการวิจัยและทดลองแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมา	42
3.3.2 อัตราการไหลของก๊าซที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กตริกแบร์รีเออร์ดิสชาร์จ	43
3.3.3 การวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ออกจากปฏิกรณ์พลาสมา	43
3.3.4 การทดลองแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง	44
บทที่ 4 ผลการวิจัย	46
4.1 ผลการศึกษากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของระบบพลาสมา	46
4.2 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนของอัตราส่วนของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ ที่มีต่อการแปลงผัน	47
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การแปลงผันของก๊าซ CH_4 และ CO_2	47
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (H_2 และ CO)	48
4.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของ He ต่อการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2	50
4.3.1 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การแปลงผันของ CH_4 และ CO_2	51
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โอกาสในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ	52
4.4 ผลของสารตัวเร่งที่มีต่อปริมาณการแปลงผันและโอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผล	57
5.2 อภิปรายผล	58
5.3 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก	63
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	69
ประวัติผู้วิจัย	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการวิจัย	32
3.2	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างพลาสมา	41
3.3	ชื่อตัวอย่างและสัดส่วนของอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 และ CH_4	43
3.4	ชื่อตัวอย่างและสัดส่วนของอัตราการไหลที่เท่ากันของ CO_2 และ CH_4	43
4.1	แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยขณะการทดลอง	46

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซที่มีต่อการแปลงผันของก๊าซให้เป็นก๊าซหรือสารอื่น เมื่อแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมาแบบ AC gliding arc discharge (ที่มา: Tu และ Whitehead, 2014)	7
2.2	สถานะพลาสมาและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบกับของแข็ง ของเหลวและก๊าซ	7
2.3	สถานะทั้ง 4 สถานะของสสาร	8
2.4	หลักการผลิตพลาสมาแบบ DBD (ที่มา : Tendero et al. (2006))	14
2.5	หลักการผลิตพลาสมาแบบ APPJ (ที่มา : Tendero et al. (2006))	15
2.6	แสดงโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จ ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คั่นกลางด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก (Dielectric) อย่างน้อย 1 ชั้น (ที่มา: ทิพวิมล ไตรกุล (2014))	16
2.7	ตัวอย่างส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จในแบบที่แตกต่างกัน (ที่มา: U. Kogelschatz et al. 1997)	16
2.8	การเรียงตัวของโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้ว (ก) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก (ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะเกิดการโพลาไรซ์ (Polarization) (ที่มา: ทิพวิมล ไตรกุล (2014))	18
2.9	เปรียบเทียบตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 แบบ (ก) ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก และ (ข) มีวัสดุไดอิเล็กทริก คั่นระหว่างอิเล็กโทรด (ที่มา: ทิพวิมล ไตรกุล 2014)	18
2.10	แสดงสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (ก) ไม่มีไดอิเล็กทริก (ข) มีไดอิเล็กทริก (ที่มา: ฐิติมา เอ็งเจริญ, 2010)	19
2.11	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatography, GC)	27
3.1	ตัวเร่ง Ru/Al ₂ O ₃ และ Ni/SiO ₂ -Al ₂ O ₃ สำหรับเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพลาสมา	30
3.2	ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน	31
3.3	ปฏิกิริยาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จ	32
3.4	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	32
3.5	ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Keysight รุ่น InfiniiVision DSOX1204A (200 MHz)	33
3.6	โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงยี่ห้อ Cal Test รุ่น CT4028	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มาพร้อมออสซิลโลสโคป	34
3.8	อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลแบบลูกกลอยยี่ห้อ Aalborg รุ่น Influx Flow Tubes	34
3.9	ตัวควบคุมอัตราการไหลแบบดิจิทัลยี่ห้อ Aalborg รุ่น DPC17S-VOL6-AA3	35
3.10	เทอร์โมมิเตอร์แบบเทอร์โมคัปเปิล รุ่น HT-9815	35
3.11	วัตต์มิเตอร์ รุ่น KP-835 KEPLER	36
3.12	ตัวต้านทานขนาด 115 โอห์ม	36
3.13	ถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซยี่ห้อ Hedetech รุ่น TDL21_0.5L และ 1.0L	37
3.14	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatograph : GC) (ยี่ห้อ Varian รุ่น 450 GC)	39
3.15	ลักษณะทางกายภาพภายนอกของปฏิกรณ์สำหรับกำเนิดพลาสมา	40
3.16	ภาคตัดขวางของปฏิกรณ์เครื่องกำเนิดพลาสมา	40
3.17	แผนผังการติดตั้งระบบพลาสมาและอุปกรณ์ประกอบ	42
3.18	การวัดอัตราการไหลของก๊าซด้วยฟองสบู่ (Soap bubble flowmeter)	44
4.1	แสดงสัญญาณพลาสมาที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป, สัญญาณของแรงดันไฟฟ้า (ซ้าย) และสัญญาณของกระแสดีสชาร์จ (ขวา)	47
4.2	ผลของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ ที่มีต่อการแปลงผันของก๊าซ CH_4 และ CO_2	48
4.3	อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลต่อโอกาสการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์	48
4.4	อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	49
4.5	อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์	49
4.6	อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อผลของคาร์บอนอะตอม	50
4.7	ความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่มีต่อการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2	51
4.8	ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่อโอกาสการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์	52
4.9	ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์	52
4.10	ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่ออัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์	52
4.11	ความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่มีต่อผลของคาร์บอนอะตอม	53
4.12	ผลของปริมาณ $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อปริมาณการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	ผลของปริมาณ Ru/Al ₂ O ₃ ต่อโอกาสในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (H ₂ , CO, C ₂ H ₆ และ C ₃ H ₈)	54
4.14	ผลของปริมาณ Ru/Al ₂ O ₃ ต่อปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ (H ₂ และ CO)	55
4.15	ผลของปริมาณ Ru/Al ₂ O ₃ ต่ออัตราส่วนโดยโมลของผลิตภัณฑ์ (H ₂ /CO molar ratio)	55
4.16	ผลของปริมาณ Ru/Al ₂ O ₃ ต่อดุลของคาร์บอน (C-balance (%))	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

นับวันปัญหาโลกร้อนจะทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นที่ทราบดีว่าต้นเหตุที่สำคัญคือ การปล่อยก๊าซก่อเรือนกระจกในปริมาณมาก อันเนื่องมาจากกิจกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์ และจากธรรมชาติเอง ซึ่งแน่นอนว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) และมีเทน (Methane, CH_4) ถือว่าเป็นก๊าซก่อเรือนกระจกหลักที่สำคัญที่ถูกปล่อยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก วิธีการแก้ไขปัญหาก็กำลังมีผู้พยายามมุ่งแก้ไขประกอบด้วย การลดความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองชนิดนี้ และการนำก๊าซทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้มาใช้ประโยชน์ด้วยการใช้ในอุตสาหกรรมพลังงานและเคมี อย่างไรก็ตาม การเก็บ CO_2 เป็นเวลานานยังเป็นปัญหาที่ต้องมีการพัฒนา กล่าวคือ ยังต้องใช้ต้นทุนที่ค่อนข้างสูงในการขนส่งและความไม่แน่นอนในการเก็บไว้นาน ๆ ทางออกหนึ่งที่สำคัญยิ่งของปัญหานี้คือ การแปลงผันหรือการเปลี่ยน (Conversion) ให้ CO_2 และ CH_4 เป็นสารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่มหรือเป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีการแปลงผันโดยตรงและโดยอ้อม สำหรับกรณีของการแปลงผันโดยอ้อม ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยมาหลายสิบปีแล้ว ก๊าซผสมของ CO_2 และ CH_4 จะถูกแปลงผันในขั้นแรกให้เป็น Syngas ก่อนจะเข้าสู่การเปลี่ยน Syngas ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือสารเคมีตัวอื่น ๆ ด้วยกระบวนการ Fischer-Tropsch Synthesis หรือ FTS ขณะที่การแปลงผันโดยตรงนั้น พบว่ายังมีการวิจัยและพัฒนาอยู่และมีหลายประเด็นที่ยังต้องการการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เป็นที่ทราบดีว่า CO_2 เป็นก๊าซที่มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ค่อนข้างสูง กล่าวคือ การกระตุ้น CO_2 จำเป็นต้องใช้พลังงานค่อนข้างมาก นั่นทำให้การกระตุ้นและการแปลงผัน CO_2 อย่างมีประสิทธิภาพเป็นเรื่องที่มีความท้าทายเป็นอย่างยิ่ง วิธีการเคมีเชิงความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional thermochemical methods) จำเป็นต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของวิธีการดังกล่าว เมื่อไม่นานนี้ได้มีการศึกษาวิจัยพบว่า พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma, NTP) หรือพลาสมาเย็น (Cold-plasma) สามารถใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีที่อุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคและอนุกรมที่มีพลังงานค่อนข้างสูงและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปอุณหภูมิหรือพลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมาเย็นจะอยู่ในช่วงประมาณ 1-10 eV ซึ่งเพียงพอที่จะกระตุ้นโมเลกุล CO_2 และ CH_4 ที่มีพลังงานพันธะประมาณ 5.5 และ 4.5 eV ตามลำดับ ให้ได้อนุมูลที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ให้ไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น ให้ได้อะตอม และไอออน ที่มีพลังงานเพียงพอสำหรับการก่อเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO_2 และ CH_4 ยิ่งไปกว่านั้น การกำเนิดพลาสมาสามารถทำได้ง่ายด้วยการใช้แรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ ซึ่งช่วยให้ประหยัดพลังงานได้อย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีเคมี

ความร้อนแบบดั้งเดิม ในการแปลงผัน CO_2 และ CH_4 ไปเป็นสารเคมีหรือเชื้อเพลิงเหลวนั้น ประสิทธิภาพการแปลงเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยมีพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพการแปลงผันหลายตัว เช่น เปอร์เซ็นต์การแปลงผัน (Conversion rate) , โอกาสในการเกิดสารที่ต้องการ (Selectivity) และผลผลิตที่ได้ (Yields) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงผันสารหรือก๊าซตั้งต้น สารตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ถูกนำมาใช้ในปฏิกิริยา ซึ่งงานวิจัยหลายชิ้นชี้ว่า การใช้สารตัวเร่งจำพวกอนุภาคโลหะนาโนหรือ ออกไซด์ของโลหะนาโน เช่น Ni, SiO_2 , $\text{Ni/SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$, $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$, และ $\text{Ru/Al}_2\text{O}_3$ เป็นต้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงเห็นว่า การศึกษาวิจัยในเรื่องของการเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ CH_4 ไปเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำในสถานะที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ เพิ่มเติมเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น โดยเชื่อว่า ความสำเร็จจากโครงการวิจัยนี้ จะเป็นการเปิดทางเลือกที่สำคัญในการช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้เป็นอย่างดี และจะเป็นช่องทางในการสร้างความร่วมมือต่อยอดวิจัยสู่การใช้งานกระบวนการแปลงผันโดยตรงด้วยพลาสมา ภายใต้สถานะที่มีตัวเร่งกับหน่วยงานราชการและเอกชนที่มีความสนใจในอนาคต

เป็นที่ทราบดีว่าในทุกพื้นที่ของประเทศไทยและทั่วโลกกำลังประสบปัญหาสภาวะโลกร้อนอันเนื่องจากการใช้พลังงานจากฟอสซิลและการเผาไหม้ชีวมวล ที่มีการปล่อยก๊าซ CO_2 ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เฉพาะในจังหวัดเพชรบูรณ์เองซึ่งประชาชนส่วนมากประกอบอาชีพเกษตรกรรม และมีเศษวัสดุชีวมวลเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร เช่น โรงงานน้ำตาล ที่มีการผลิตไฟฟ้าโดยการเผาเศษวัสดุชีวมวล มีฟาร์มเลี้ยงสัตว์หลายฟาร์มที่ก่อให้เกิดการหมักของชีวมวลและเกิดก๊าซมีเทนออกสู่ชั้นบรรยากาศ คำถามคือ ถ้ายังปล่อยให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสองชนิดนี้ในปริมาณมากต่อไป โดยไม่มีวิธีการบริหารจัดการหรือวิธีการลดหรือการนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง สิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศจะเป็นอย่างไรในอนาคตอันใกล้นี้ ทีมวิจัยคาดหวังว่า ความสำเร็จจากโครงการวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มทางเลือกในการบริหารจัดการ การลด และการใช้ประโยชน์ก๊าซเรือนกระจกทั้งสองชนิดนี้ ประเด็นที่ผู้วิจัยมุ่งดำเนินการในการวิจัยนี้ประกอบด้วย การศึกษาผลของกำลังพลาสมา อัตราส่วนระหว่าง CO_2 กับ CH_4 ชนิดและความเข้มข้นของสารตัวเร่ง และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ที่มีต่อประสิทธิภาพการแปลง CO_2 และ CH_4 ไปเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง ผลจากความสำเร็จของการวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงให้เพิ่มขึ้น ในส่วนของการแปลงผันภายใต้สถานะที่มีตัวเร่ง เนื่องชนิดสารตัวเร่งเป็นหัวใจที่สำคัญของงานวิจัยนี้ ทีมวิจัยจึงขอรายงานเฉพาะผลในเบื้องต้นเท่านั้น รายละเอียดเชิงลึกของผลการวิจัยในส่วนที่มีการใช้สารตัวเร่ง ทีมวิจัยจะได้นำไปรายงานในการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำสำหรับการเปลี่ยนหรือการแปลงผัน (Conversion) ก๊าซ CO_2 และ CH_4 ให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง ที่ได้มาตรฐานระดับสากล
2. เพื่อหาเงื่อนไขหรือกระบวนการที่เหมาะสมในการเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ CH_4 ให้เป็นสารที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง
3. เพื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลง CO_2 และ CH_4 ไปเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

สืบเนื่องจากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อหาเงื่อนไขหรือกระบวนการที่เหมาะสมในการเปลี่ยนก๊าซทั้งสองชนิดไปเป็นสารที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจด้วยเทคนิคพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง วิธีการดำเนินงานของโครงการวิจัยจะเริ่มตั้งแต่การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง จัดหาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัยที่จำเป็น ได้แก่ ชุดพลาสมาและระบบป้อนก๊าซ รวมไปถึงระบบความปลอดภัยในการทำงานอันเนื่องมาจากก๊าซและสารเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยา การทดลองแปลงผันก๊าซ CO_2 และ CH_4 ที่เงื่อนไขและตัวเร่งชนิดต่าง ๆ ด้วยระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (ใช้ระบบพลาสมาชนิด Dielectric barrier discharge, DBD) การส่งตัวอย่างสารเคมีที่ได้ทดสอบด้วยเทคนิคทางเคมีวิเคราะห์ต่าง ๆ รวบรวมผลการทดลอง อภิปรายผล และรายงานผลการวิจัย การวิจัยนี้จะสิ้นสุด เมื่อได้กระบวนการและเงื่อนไขที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนก๊าซทั้งสองชนิดไปเป็นสารเคมีและสารเชื้อเพลิงได้มากที่สุด และเมื่อได้ต้นฉบับสำหรับส่งขอตีพิมพ์ผลการวิจัยตามที่กำหนดแล้ว เพราะฉะนั้น กลยุทธ์และขั้นตอนดำเนินงานของโครงการ คือ

1. ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียด เพื่อการวางแผนการทดลอง การสร้างระบบพลาสมา และการจัดหาสารตัวเร่งประสิทธิภาพสูง
2. ออกแบบสร้าง และทดสอบระบบพลาสมา และจัดหาสารตัวเร่ง
3. ทดลองแปลงผันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ในสภาวะที่ไม่มีและมีสารตัวเร่ง วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น
4. ทดสอบตัวอย่างสารเคมีและเชื้อเพลิงที่เกิดจากปฏิกิริยา
5. ปรับปรุงเงื่อนไขในการทดลองทั้งเงื่อนไขที่เกี่ยวกับพลาสมาและสารตัวเร่งและดำเนินการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการแปลงสภาพก๊าซเป้าหมายไปเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง
6. รวบรวมผล อภิปรายและวิเคราะห์ สรุป และรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โดยสรุป โครงการวิจัยนี้จะมุ่งสร้างระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศเพื่อใช้ในการเปลี่ยนหรือการแปลงผันก๊าซ CO_2 และ CH_4 ให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง โดยจะมีการตรวจวิเคราะห์ชนิดของก๊าซหรือผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ หลังจากสร้างระบบพลาสมาแล้ว ระบบจะถูกใช้ในการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขหรือกระบวนการที่เหมาะสมในการเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ CH_4 ให้เป็นสารที่มีมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจด้วยปฏิกิริยาที่มีและไม่มีสารตัวเร่ง ในช่วงปีที่ 1 ของการวิจัย จะมุ่งเน้นให้เกิดผลผลิตคือ ระบบพลาสมาและเงื่อนไขการเปลี่ยนก๊าซเบื้องต้น และในช่วงปีที่ 2 จะมุ่งเน้นการเปลี่ยนก๊าซด้วยเงื่อนไขหรือกระบวนการที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว และการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ ในฐาน Scopus อย่างน้อย 1 เรื่อง และการรายงานผลการวิจัย รวมทั้งการแสวงหาแนวร่วมในการวิจัยต่อยอดกับหน่วยงานหรือเอกชนที่สนใจ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากสิ้นสุดโครงการ ในปีที่ 1 จะเกิดผลผลิตที่สำคัญคือ (1) ระบบสำหรับการเปลี่ยน CO_2 และ CH_4 ให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าเพิ่มด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีสารตัวเร่ง ที่ผ่านการทดสอบเบื้องต้น และ (2) ได้เงื่อนไขการเปลี่ยนก๊าซเบื้องต้น และในปีที่ 2 คาดว่าจะเกิดผลผลิตที่สำคัญคือ (1) ได้เงื่อนไขการเปลี่ยนก๊าซที่ผ่านการปรับแก้ให้เหมาะสมแล้ว และ (2) ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ในฐาน Scopus อย่างน้อย 1 เรื่อง สำหรับผลลัพธ์ที่จะได้จากความสำเร็จของโครงการประกอบด้วย (1) สังคมมีทางเลือกในการบริหารจัดการ CO_2 และ CH_4 โดยการเปลี่ยนก๊าซทั้งสองให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ และ (2) ผลงานวิจัยได้รับการอ้างอิง ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้จะส่งผลให้เกิดผลกระทบคือ เอกชนเห็นช่องทางในการนำเทคโนโลยีพลาสมาไปใช้ในการผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิงในรูปของการต่อยอดทางธุรกิจ และนักวิจัยที่มีความสนใจงานทางด้านนี้นำไปต่อยอดพัฒนาให้ระบบและกระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

นอกจากนี้ ผลสำเร็จจากโครงการวิจัยนี้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อเนื่อง โดยขยายขอบเขตการวิจัยให้มีขนาดหรือสเกลของการวิจัยที่ใหญ่ขึ้น การวิจัยพัฒนาเพื่อการปรับปรุงระบบและกระบวนการให้มีความกะทัดรัด การออกแบบระบบการจัดการผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนก๊าซทั้งสองชนิด และยังสามารถดำเนินการสร้างแนวร่วมเพื่อร่วมวิจัยพัฒนา ต่อยอดการวิจัยกับหน่วยงานภายนอก ผู้ใช้ประโยชน์หรือเอกชนที่มีการดำเนินธุรกิจที่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ เช่น บริษัท ปตท. (ประเทศไทย) จำกัด

1.5 คำสำคัญ

คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, สารเคมีและเชื้อเพลิง, การเปลี่ยน (การแปลงผัน), พลาสมาและตัวเร่ง

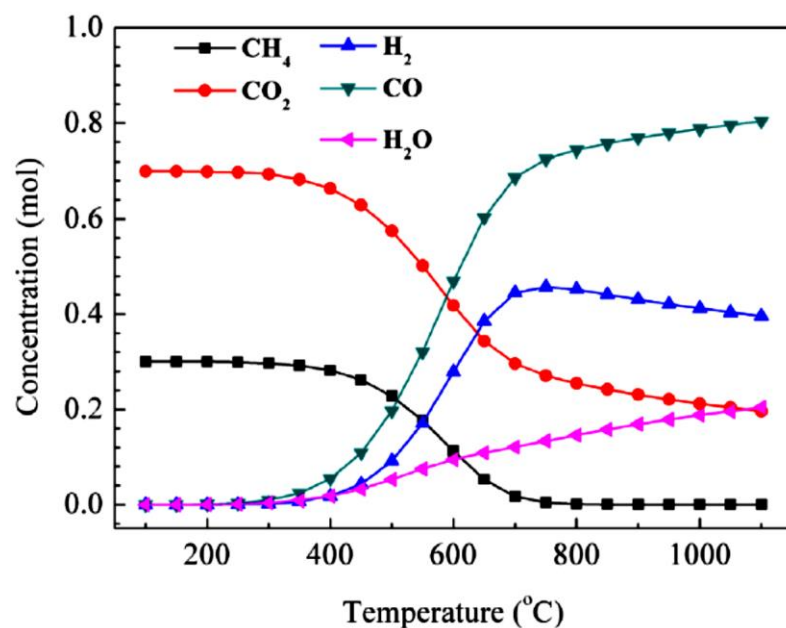
Carbon dioxide, Methane, Chemicals and fuel, Conversion, Plasma and catalyst

บทที่ 2

การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการดำเนินโครงการให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ เอกสารที่สำคัญที่ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารหรือก๊าซอื่น รวมทั้งการเปลี่ยนหรือการแปลงผันคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนด้วยพลาสมา ซึ่งโดยทั่วไปพลาสมามีหลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่ผู้วิจัยให้ความสนใจคือ พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่เรียกว่า “ไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จ” (Dielectric Barrier Discharge, DBD) ซึ่งเป็นการกำเนิดพลาสมาโดยมีวัสดุไดอิเล็กทริกกั้นระหว่างอิเล็กโทรด นอกจากพลาสมา ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารเคมีหรือเชื้อเพลิงอื่นด้วยการทำให้เกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีสารตัวเร่ง ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่า การเกิดปฏิกิริยาแปลงผันก๊าซภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการแปลงผันได้ ขึ้นกับชนิดของตัวเร่งและเงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล อัตราส่วนของก๊าซในปฏิกิริยา ความยาวของปฏิกรณ์พลาสมาหรือเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction or residence time) และกำลังพลาสมา (Plasma power) เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสมา DBD ที่ความดันบรรยากาศ โดยมีการปรับปรุงเงื่อนไขการทดลองให้เหมาะสม วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพื่อให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนไปเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด อาจมีคำถามว่า ทำไมจึงเลือกใช้พลาสมาแบบ DBD คำตอบของคำถามคือ พลาสมาแบบ DBD นี้มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพลาสมาเย็น (Cold plasma) แม้ว่าสมรรถนะในการแปลงผันหรือในการเลือกเปลี่ยนจะค่อนข้างต่ำกว่าพลาสมาแบบอื่น แต่พลาสมาอื่นเช่น โคโรนาดิสชาร์จ และ alternating-current (AC) gliding arc discharge โดยเฉพาะ AC gliding arc discharge ที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) เกิดการแปลงผัน (Conversion) ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง (ประมาณ 500-700 °C) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Tu และ Whitehead, 2014) นอกจากนี้การแปลงผันหรือการเปลี่ยนก๊าซด้วยระบบ AC gliding arc discharge ยังขยายขนาดค่อนข้างยาก ขณะที่การแปลงผันด้วยพลาสมา DBD เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอย่างชัดเจนซึ่งหมายความว่า พลาสมา DBD เป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานน้อยกว่าอย่างชัดเจน และสามารถขยายขนาดระบบได้ค่อนข้างง่าย สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบระบบคือ การสร้างระบบที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของความดัน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการสร้างระบบเพิ่มขึ้น

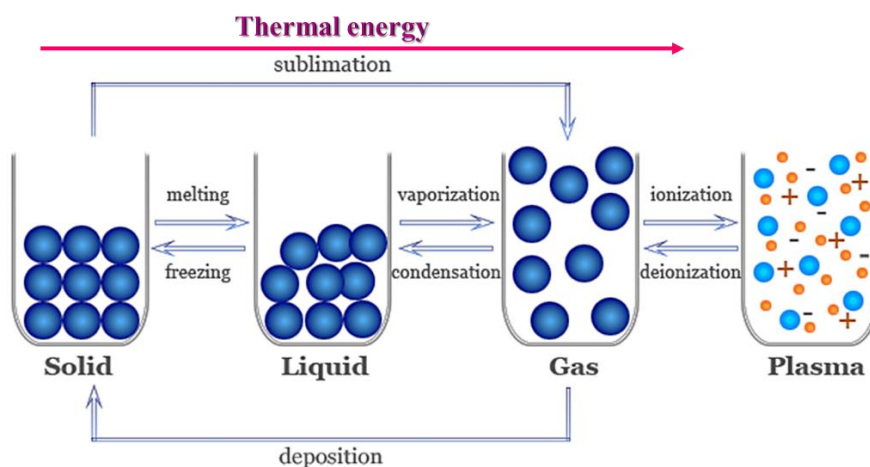


รูปที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซที่มีต่อการแปลงผันของก๊าซให้เป็นก๊าซหรือสารอื่น เมื่อแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมาแบบ AC gliding arc discharge (ที่มา: Tu และ Whitehead, 2014)

2.1 พลาสมา

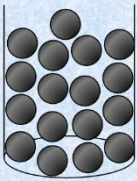
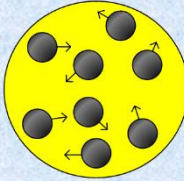
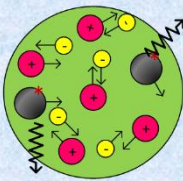
2.1.1 ความหมายของพลาสมา

พลาสมา คือ สภาวะที่ก๊าซเกิดการแตกตัว (ionized) ประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคของก๊าซดังรูปที่ 2.2 ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้โดยรวมแล้วพลาสมายังคงสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งคำนี้ถูกบัญญัติโดย แลงมัวร์ (Irving Langmuir) ในปี 1928 ใช้เพื่อบรรยายสภาพก๊าซที่ถูกทำเป็นไอออนในการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า (Chen, 1984)



รูปที่ 2.2 สถานะพลาสมาและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบกับของแข็ง ของเหลวและก๊าซ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน หากพิจารณาช่วงเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ (solid-liquid-gas) ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิ (คือ การให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคของก๊าซ) ให้แก่อำนาจต่อไปเรื่อยๆ เช่น ถึง 20,000 เคลวิน (K) จะได้พลาสมาของก๊าซนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (อุณหภูมิอาจต่ำกว่าที่แสดงในรูปก็ได้ ขึ้นอยู่กับกลไกหรือระบบในการทำให้เป็นไอออนของก๊าซ)

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^- + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ ($> 10 \text{ eVs}$)
			
Molecules fixed in lattice	Molecules free to move	Molecules free to move, large spacing	Ions and electrons move independently, large spacing

รูปที่ 2.3 สถานะทั้ง 4 สถานะของสสาร

พลาสมามีลักษณะพิเศษที่น่าสนใจเพราะว่าแรงทางไฟฟ้าถือเป็นแรงชนิดไกล (long-range force) และอนุภาคของพลาสมาทุกตัวกระทำต่ออนุภาคข้างเคียงกันและกัน เรียกว่า เป็นพฤติกรรมร่วม (collective behavior) พฤติกรรมร่วมนี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ซึ่งไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัว ที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า พฤติกรรมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่อำนาจที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม กระบวนการนี้ เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization process) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อิเล็กตรอนที่

หลุดออกมาเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัว และกลายเป็นพลาสมาที่มีความเสถียร ในที่สุด (ธีรวรรณ บุญวรรณ, 2003)

2.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา

พลาสมาเป็นส่วนผสมของก๊าซที่มีทั้งอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นลบ บวก และกลาง อนุภาคที่มีประจุเป็นบวกคือ cations แต่อนุภาคที่เป็นลบอาจเป็นได้ทั้ง anions และอิเล็กตรอน ส่วนอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นกลางอาจเป็นส่วนผสมของอนุภาคอิสระหรือก๊าซที่อยู่ในสภาวะปกติต่าง ๆ คุณสมบัติสำคัญของพลาสมาคือ

ก. คุณสมบัติเป็นกลาง (Quasi-Neutral) ความหนาแน่นทั้งหมดของอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นลบจะต้องเท่ากับ ความหนาแน่นทั้งหมดของอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นบวก

ข. อันตรกิริยาด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพลาสมาสามารถมีอันตรกิริยาภายใต้สภาวะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เนื่องจากพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุ

โดยทั่วไปพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้ทุกสภาวะ พลาสมาที่อยู่ในสภาวะของแข็งจะถูกเรียกว่า solid state plasma ในขณะที่พลาสมาที่เกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซจะไม่มีชื่อเรียกเฉพาะ พลาสมาไม่เหมือนก๊าซโดยทั่วไปกล่าวคือพลาสมาจะมีลักษณะแตกต่างไปขึ้นกับความดันความหนาแน่นของประจุ ปริมาตร และอุณหภูมิ เป็นต้น

2.1.3 ประเภทของพลาสมา

พลาสมาสามารถแบ่งออกเป็นพลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (nature plasmas) เช่น พลาสมาบนดาว (interstellar matters) และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory plasmas) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาฟิวชัน (fusion plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) โดยทั่วไปนิยมแบ่งก๊าซดิสชาร์จออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาร้อน (hot plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาเย็น (cold plasma) ดังนี้

2.1.3.1 พลาสมาร้อน (hot plasma)

พลาสมาร้อน คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมา LTE มีลักษณะการปล่อยประจุแบบอาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งจากการเกิดกระบวนการดิสชาร์จนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงมากพอ จนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบและเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยความถี่สูงและรุนแรงเกิดการปล่อยประจุในลักษณะของสปาร์ค (spark) ของประจุเป็นเส้น

เล็ก ๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้น ใช้ในการผลิตพลาสมาสเปรย์ หรือใช้ในการหลอมเชื่อมและตัดโลหะ

2.1.3.2 พลาสมาเย็น (cold plasma)

พลาสมาเย็น คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมา Non – LTE (Non-local thermal equilibrium plasma) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharges) เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อน เป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลง โดยเกิดที่ประมาณ $10^{-3} - 10$ ทอร์ โดยอุณหภูมิของอนุภาคหนึ่งจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมาก เพราะมีอุณหภูมิน้อยจึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่าย การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจากกระบวนการดิสชาร์จเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนให้แตกตัวและกลายเป็นประจุบวก และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดแสงสว่างหรือเกิดการเรืองแสง นิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (etching) หรือการทำฟิล์มบาง (thin film) เป็นต้น

2.1.4 กระบวนการเกิดพลาสมา

กระบวนการเกิดพลาสมาโดยเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับอนุภาคของก๊าซ ในที่นี้ได้ทำการยกตัวอย่าง ก๊าซอะเซทิลีนประกอบเพื่อให้เข้าใจถึงสภาวะการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจนดังต่อไปนี้

2.1.4.1 กระบวนการการแตกตัวของไอออน (ionization)

ในการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาในห้องสุญญากาศซึ่งมีก๊าซไหลผ่านในระดับคงที่และความดันต่ำมาก ๆ โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซในสุญญากาศอาศัยการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลหรืออะตอมเป็นสำคัญ โดยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) หรือคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจนไปชนกับโมเลกุลหรืออะตอม ดังสมการ 2.1 เป็นตัวอย่าง สมการของอะตอมของอะเซทิลีนซึ่งในกรณีนี้แสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนนั้นมีค่ามากกว่า Ionization Energy



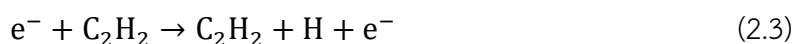
2.1.4.2 กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

พลังงานที่ถูกส่งผ่านเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า ทำให้อะตอมนั้น ไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization energy) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 โดย $C_2H_2^*$ คืออะตอมของอะเซทิลีนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น

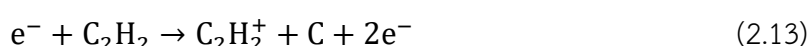
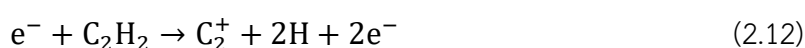
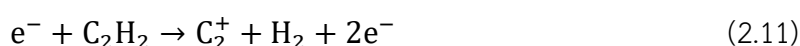
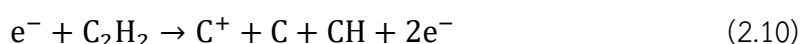
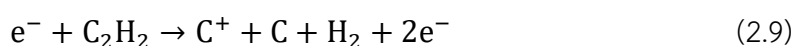
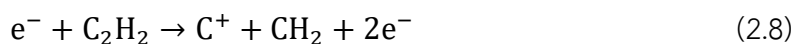


2.1.4.3 กระบวนการการแตกตัวของโมเลกุล (Molecular dissociation)

กระบวนการสุดท้ายที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยโมเลกุลเกิดการแตกตัว ซึ่งโมเลกุลของอะเซทิลีนสามารถเกิดการแตกตัวดังแสดงในสมการ 2.3-2.7



ผลของการแตกตัวจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือผลผลิตที่ได้ จะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าตอนที่อะตอมยังไม่แตกตัว การแตกตัว (Dissociation) อาจ เกิดแยกหรือเกิดควบคู่กับ Ionization หรือไม่ก็ได้ ถ้าเกิดคู่กันจะเรียกว่า (Dissociative Ionization) ซึ่งโมเลกุลของอะเซทิลีนสามารถเกิดการ Dissociative Ionization ได้ดังสมการ 2.8-2.13



เมื่อก๊าซได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency : RF) หรือคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ความดันต่ำ เราจะมองเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงออกมาเนื่องมาจากพลังงานภายนอก

ทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น โดยธรรมชาติ อิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะกระตุ้นได้เพียงประมาณ 10-18 วินาทีหลังจากนั้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนจะกลับคืนสู่สถานะพื้น (Ground state) พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ตาสามารถเห็นได้ (Visible light) การเปล่งแสงของพลาสมาสามารถบ่งถึงคุณลักษณะ (Characteristics) ของก๊าซที่แตกตัวได้เช่น ก๊าซอาร์กอน (Argon: Ar) จะเปล่งแสงสีม่วง และก๊าซไนโตรเจน (N_2) จะเปล่งแสงเป็นสีชมพู ซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน

2.1.4.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Charge exchange)

เป็นการถ่ายเทประจุกับอะตอมจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากหากเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับอะตอมของธาตุเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.14 และ 2.15



ในทำนองเดียวกันจะยากขึ้น แต่ก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้ กรณีเป็นธาตุต่างชนิดกัน ดังแสดง ในสมการที่ 2.16



2.1.4.5 การถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum transfer)

เป็นกลไกเบื้องต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของแรงจากการชนของอะตอมกรณีก๊าซที่เป็นกลาง การถ่ายเทโมเมนตัมของอิเล็กตรอนไม่ได้มีความสำคัญมากนักในการเรืองแสง แต่เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดพลาสมาได้ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.17 และ 2.18



2.1.5 ชนิดของพลาสมาแบบไม่สมดุล

2.1.5.1 ดิสชาร์จด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency discharge)

คลื่นความถี่สูงระดับคลื่นวิทยุนี้ใช้ผลิตพลาสมาสำหรับการวัดการปลดปล่อยของแสงที่มองเห็นได้ โดยขั้วไฟฟ้าจะอยู่ภายนอกของส่วนที่จะเกิดพลาสมา (นอกแชมเบอร์) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและการปะปนของพลาสมา สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่นสูงมากกว่าขนาดของ

หลอดทดลองทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous plasma) เทคนิคนี้จะใช้ได้ดีที่ความดันต่ำและบางครั้งสามารถใช้ได้กับความดันบรรยากาศในการทำพลาสมาแบบสมดุล

2.1.5.2 ดิสชาร์จคลื่นไมโครเวฟ (Microwave discharge)

เทคนิคนี้ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ประมาณ 0.3-10 GHz ผ่านลงไปในหลอดทดลองโดยตรงโดยใช้ส่วนประกอบที่เรียกว่า โพลิงเรโซแนนซ์ (resonant cavity) มีการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของมีเทนโดยตรงภายใต้อิทธิพลของเทคนิคนี้โดย Zerger et al, 1992

2.1.5.3 ดิสชาร์จเรืองแสง (Glow discharge)

พลาสมาชนิดนี้เกิดที่ความดันต่ำประมาณ 1-10 มิลลิบาร์ระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโตรด ซึ่งเคลือบอยู่ในหลอดทดลองสามารถใช้เทคนิคนี้ได้กับไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ เทคนิคนี้พบเห็นโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดนีออน แต่ไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี

2.1.5.4 ดิสชาร์จโคโรนา (Corona discharge)

สืบเนื่องจากเทคนิคดิสชาร์จเรืองแสง เมื่อทำที่ความดันสูงขึ้นพลาสมาจะไม่เสถียร และกลายเป็นประจุไฟฟ้าแรงสูงซึ่งยากที่จะควบคุม การใช้ขั้วโลหะ 2 แผ่นหรือ 2 ชุดวางในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้พลาสมาในความดันสูง ๆ มีความเสถียรขึ้น วิธีนี้ คือ ดิสชาร์จโคโรนา ลักษณะของพลาสมาจะแตกต่างตามชนิดของขั้ว แต่เนื่องจากส่วนเกิดปฏิกิริยารอบ ๆ ตัวขั้วมีขนาดเล็กมากทำให้เทคนิคนี้ไม่เหมาะสมสำหรับผลิตสารเคมีที่เป็นก๊าซจำนวนมากในอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในการตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้าได้

2.1.5.5 ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge, DBD)

หลักการคือประจุไฟฟ้าจะเกิดในช่องว่างสำหรับทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นขั้วโลหะที่สมมาตรกัน 2 แผ่นหรืออาจเป็นช่องว่างวงแหวนซึ่งอยู่ระหว่างขั้วทรงกระบอก 2 ขนาดซ้อนกันขั้วแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นหรือแผ่นใดแผ่นหนึ่งจะมีชั้นของไดอิเล็กทริก (dielectric layer) คลุมอยู่ซึ่งโดยปกติมักใช้กระจกแก้วใส เทคนิคนี้อาจรู้จักกันในชื่อ silent electric discharge ซึ่งมีงานทดลองมากมายเกี่ยวกับพลาสมาแบบนี้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (Nasser, 1971) เทคนิคนี้สามารถใช้ได้ทั้งที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันไม่สูงมากนักโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz พลาสมาจะถูกผลิตออกมามากมายในสถานะก๊าซและถูกเรียกว่า ไมโครดิสชาร์จ (micro discharge) ซึ่งกระจายอยู่ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น

เมื่อการแตกตัวเป็นประจุของก๊าซ (ionization) เกิดขึ้น ประจุจะเคลื่อนย้ายและสะสมอยู่ที่ผิวของกระจกแก้วซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าขาเข้าไม่ก็

วินาที สนามไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดการสมดุลกันและหักล้างกันไปและเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้สูงขึ้น ไมโครดิสชาร์จจะเกิดขึ้นมาใหม่อีกครั้งทันทีที่สนามไฟฟ้าพอเหมาะในช่องว่างนั้น

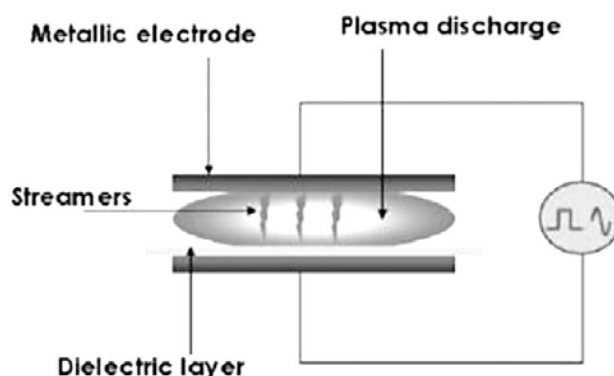
โดยสรุปแล้วไดอิเล็กตริกมีหน้าที่ 2 ประการคือ จำกัดการเคลื่อนย้ายของประจุไปยังขั้วไม่ให้มากจนเกินไปซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจร อีกประการหนึ่งคือ ช่วยกระจายไมโครดิสชาร์จให้ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้นเพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนำสัมผัสกับอนุภาคของก๊าซให้ได้มากที่สุดเทคนิคนี้ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโอโซนและการกำจัดสารพิษออกจากก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ เป็นต้น

2.2 ระบบผลิตพลาสมา

การผลิตพลาสมาในปัจจุบันยังถูกจำกัดอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นหลักทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านระบบสุญญากาศและระบบการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูง การผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศจึงก้าวข้ามข้อจำกัดเรื่องสภาวะสุญญากาศออกไปได้ และคาดว่าจะมีส่วนสำคัญที่ช่วยทวีบทบาทของพลาสมาในระดับอุตสาหกรรมได้มากขึ้น (สมศักดิ์ แดงดีบ, 2003) ซึ่งการผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศมี 2 ระบบ คือ

2.2.1 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ (Dielectric barrier discharge: DBD)

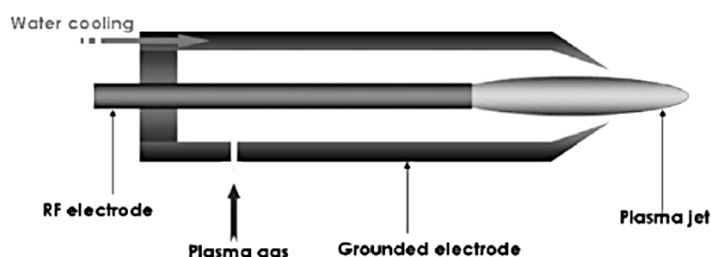
การสร้างพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์นั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนใหญ่ ๆ นั้นคือ 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงความถี่ปานกลาง 2) ห้องกำเนิดพลาสมา มีข้อได้เปรียบกว่าระบบผลิตพลาสมาทั่วไป นั่นคือ สามารถจุดพลาสมาในความดันบรรยากาศได้และไม่ต้องการปั๊มสุญญากาศซึ่งมีราคาแพง จากข้อได้เปรียบที่กล่าวมานั้นทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยหลักการเบื้องต้นของพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ที่ความดันบรรยากาศ คือใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าในการจุดพลาสมา โดยขั้วไฟฟ้าจะถูกคั่นหรือปิดคลุม ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อป้องกันการอาร์คของพลาสมาซึ่งจะทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกถูกทำลาย ส่วนประกอบสำคัญของระบบผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์นั้นถูกแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการผลิตพลาสมาแบบ DBD (ที่มา : Tendero et al. (2006))

2.2.2 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบลำพลาสมา (Atmospheric pressure plasma jet: APPJ)

การสร้างพลาสมาแบบพลาสมาเจ็ทจะใช้แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นความถี่วิทยุ การสร้างพลาสมาแบบนี้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ($L < 20$ เซนติเมตร) คลื่นวิทยุใช้พลังงานต่ำ จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบสำคัญของระบบกำเนิดพลาสมาชนิดนี้คือ อิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วน คือ อิเล็กโทรดส่วนแรกต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF electrode) และอีกส่วนหนึ่งต่อเข้ากับสายดิน (Grounded electrode) คลื่นวิทยุที่ใช้มีความต่างศักย์ระหว่าง 100 – 150 โวลต์ ก๊าซที่จะถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะวิ่งผ่านหัวฉีด โดยความเร็วการไหลของแก๊สมีค่าประมาณ 12 เมตรต่อวินาที ซึ่งพลังงานหัวฉีดที่ต่ำแบบนี้จะช่วยให้ประจุพลาสมาที่ได้ มีความเสถียรและป้องกันการเกิดอาร์คพลาสมา (Lim et al., 2015) ได้



รูปที่ 2.5 หลักการผลิตพลาสมาแบบ APPJ

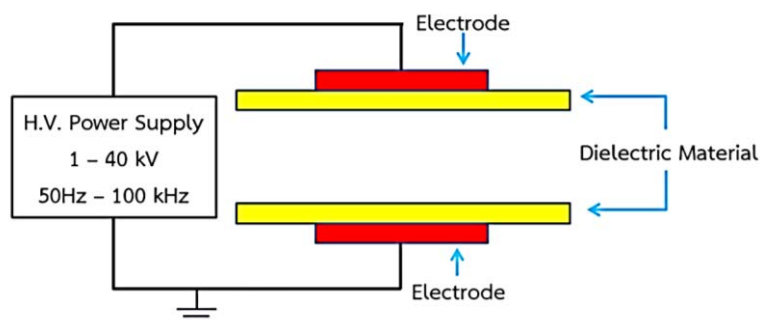
ที่มา : Tendero et al. (2006)

ก๊าซที่สามารถนำมาจุดหรือกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศนั้นมีได้หลายชนิด โดยมักใช้ก๊าซอาร์กอน หรือฮีเลียมเป็นก๊าซหลัก เพื่อทำหน้าที่เป็นก๊าซนำพา (Carrier gas) เพื่อช่วยในการจุดพลาสมาและทำให้พลาสมานั้นมีความสม่ำเสมอ โดยก๊าซแต่ละชนิดจะถูกควบคุมด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายและผสมก๊าซก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่ห้องกำเนิดพลาสมา (Plasma chamber)

2.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge, DBD)

เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge, DBD) ถูกใช้ครั้งแรกโดย Ernst Werner Von Siemens ในปี 1857 โดยใช้หลักการสะสม (Charge) และคายประจุ (Discharge) บนไดอิเล็กทริกด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่ความต่างศักย์สูง โดยทั่วไปโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ จะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด แผ่นไดอิเล็กทริกและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง โดยนำขั้วอิเล็กโทรดทั้ง

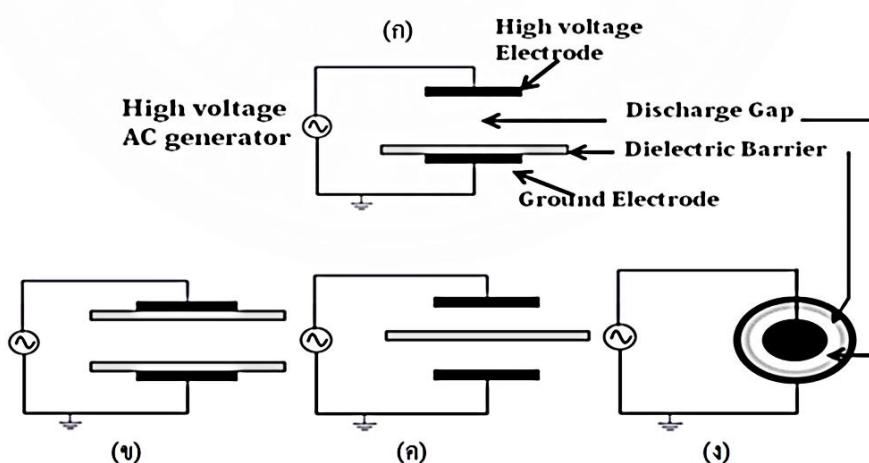
สองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงและนำแผ่นไดอิเล็กทริกอย่างน้อยหนึ่งแผ่นวางคั่นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จ ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คั่นกลางด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก (Dielectric) อย่างน้อย 1 ชั้น

ที่มา : ทิพวิมล ไตรกุล (2014)

รูปทรงของขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นไดอิเล็กทริกมีได้หลายรูปแบบทั้งแบบระนาบและแบบทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.7 โดยที่รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างหลักของเครื่องประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก 1 แผ่น วางชิดติดกับขั้วอิเล็กโทรด ส่วนในรูปที่ 2.7 (ข) โครงสร้างหลักของเครื่องประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก 2 แผ่น คั่นอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่วนในรูปที่ 2.7 (ค) โครงสร้างหลักของเครื่องประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก 1 แผ่น คั่นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว และรูปที่ 2.7 (ง) โครงสร้างหลักของเครื่องเป็นแบบทรงกระบอกประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก 1 แผ่นคั่นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จในแบบที่แตกต่างกัน (ที่มา: U. Kogelschatz et al. 1997)

ชนิดของแผ่นไดอิเล็กทริกที่ใช้ ได้แก่ แก้ว ควอตซ์ เซรามิก หรือการเคลือบโพลีเมอร์ลงบนขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น ซึ่งเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จทำงานโดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับกับขั้วอิเล็กโทรดและปล่อยก๊าซตัวกลางผ่านตรงกลางระหว่างแผ่นไดอิเล็กทริกคู่ขนานทั้งสอง ซึ่งแผ่นไดอิเล็กทริกจะทำหน้าที่ส่งผ่านสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดไปยังก๊าซตัวกลาง เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของช่องว่างระหว่างแผ่นคู่ขนานมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้ก๊าซตัวกลางแตกตัว (Breakdown voltage) ซึ่งประจุอิสระที่อยู่ระหว่างแผ่นไดอิเล็กทริกเคลื่อนที่ชนก๊าซตัวกลางแล้วอิเล็กตรอนของก๊าซตัวกลางหลุดออกมา โดยจำนวนอิเล็กตรอนอิสระทวีคูณขึ้นอย่างต่อเนื่อง และก๊าซตัวกลางกลายเป็นพลาสมาในที่สุด ลักษณะของการดีสชาร์จที่เกิดขึ้นอาจเป็นเส้น (Filament discharge) หรือเกิดแบบเรืองแสง (Glow discharge) ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลอง เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความถี่ ชนิดของแผ่นไดอิเล็กทริก ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน ชนิดของก๊าซ ความดัน เป็นต้น

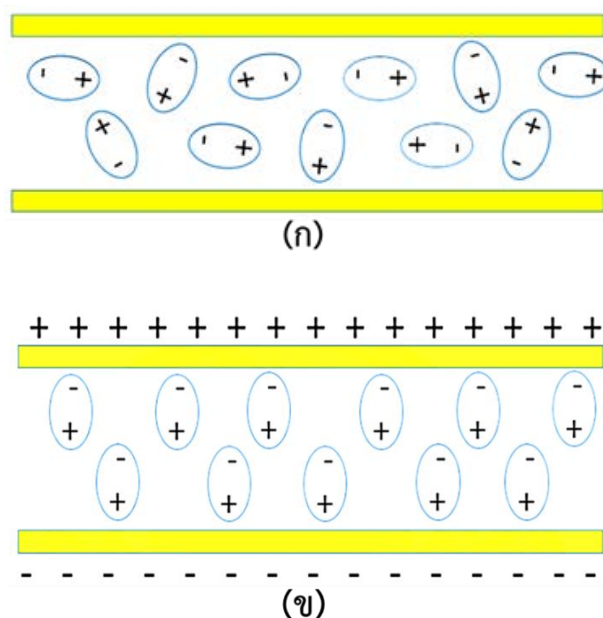
2.4 ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

ไดอิเล็กทริก (Dielectric) คือ วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า นั่นคือ อิเล็กตรอนของอะตอมของวัสดุเหล่านี้เป็นอิเล็กตรอนที่ไม่สามารถหลุดเป็นอิสระได้ง่าย เช่น ยาง แก้ว กระจกใส พาราฟิน และ เทฟลอน เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1837 ไมเคิล ฟาราเดย์ เป็นบุคคลแรกที่ศึกษาผลของการใส่วัสดุไดอิเล็กทริกระหว่างตัวนำทั้งสองของตัวเก็บประจุ ฟาราเดย์ได้สร้างตัวเก็บประจุที่เหมือนกันทั้ง 2 ตัว และให้ตัวหนึ่งไม่มีวัสดุใดๆ (นอกจากอากาศ) ระหว่างตัวนำ แต่อีกตัวหนึ่งใส่วัสดุไดอิเล็กทริกไว้ เมื่อต่อตัวเก็บประจุทั้งสองกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ฟาราเดย์พบว่า ประจุบนตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ถ้าเริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ระยะระหว่างแผ่นขนานเป็นอากาศหรือที่ว่าง ซึ่งมีค่าสภาพยอมหรือเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) เป็น ϵ_0 และมีค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเป็น C_0 เมื่อใส่วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าเพอร์มิตติวิตีเป็น ϵ เข้าไปแทนที่ว่างดังกล่าว จะทำให้ตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกนั้นมีค่าความจุเพิ่มขึ้นเป็น C และเรียกอัตราส่วนของค่าความจุใหม่ขณะมีวัสดุไดอิเล็กทริกเทียบกับค่าความจุเดิมขณะไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก” (K) นั่นคือ

$$K = \frac{C}{C_0} \quad (2.19)$$

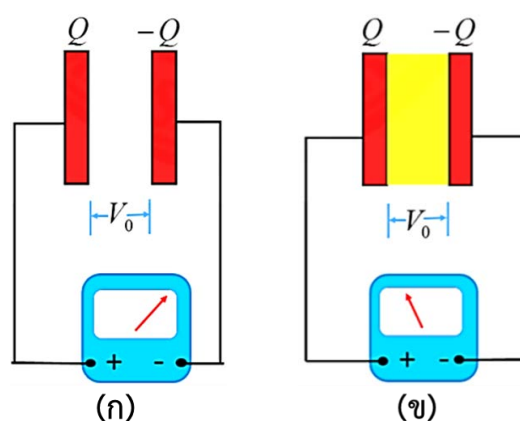
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เป็นสมบัติไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าสถิต (Dielectric in static electric fields) กล่าวคือ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริกในอุดมคติ

(Ideal dielectric materials) จะมีเพียงการจัดเรียงประจุกันใหม่อย่างเป็นระเบียบในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า จึงต้องอาศัยโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) และเรียกว่า การเกิดขั้วหรือการโพลาไรเซชัน (Polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเรียงตัวของโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้ว (ก) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก (ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะเกิดการโพลาไรซ์ (Polarization) (ที่มา : ทิพนิมล ไตรกุล (2014))

เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานในขณะมีวัสดุไดอิเล็กทริก และในขณะที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นกลาง ดังรูปที่ 2.9



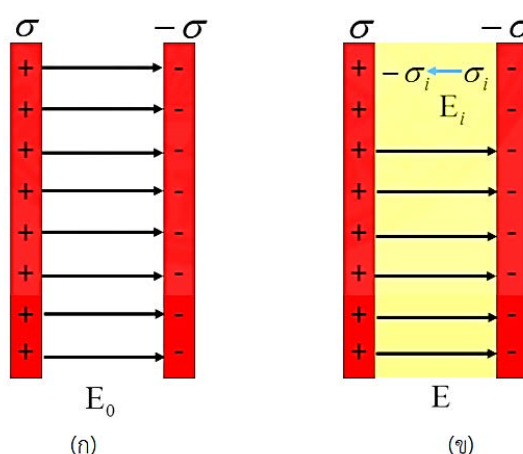
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 แบบ (ก) ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก และ (ข) มีวัสดุไดอิเล็กทริก คั่นระหว่างอิเล็กโทรด (ที่มา : ทิพนิมล ไตรกุล 2014)

กำหนดให้	A	คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำขนาน
	d	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน
	Q	คือ ประจุบนแผ่นตัวนำทั้งสอง
	E_0	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเมื่อไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก
	E	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริก
	V_0	คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานเมื่อไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก
	V	คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริก

เมื่อใส่วัสดุไดอิเล็กทริกเข้าไประหว่างแผ่นตัวนำขนาน จะพบว่า ความจุของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ($C > C_0$) ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานจะมีค่าลดลง ($V < V_0$) ในขณะที่ประจุไฟฟ้า Q นั้นคงที่ และสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำขนานทั้งสองมีค่าลดลง ($E < E_0$) จากสมการ (2.19) จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$K = \frac{C}{C_0} = \frac{Q/V}{Q/V_0} = \frac{V_0}{V} = \frac{E_0 d}{E d} = \frac{E_0}{E} \quad (2.20)$$

การที่ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำขนานของตัวเก็บประจุลดลงจากเดิม แสดงว่าความหนาแน่นของประจุที่ผิว (Surface charge) ลดลง แต่เนื่องจากประจุบนผิวของตัวนำแต่ละแผ่นไม่เปลี่ยน เป็นการชี้ว่าจะต้องมีประจุเหนี่ยวนำ (Induced charge) อยู่บนผิวของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยประจุเหนี่ยวนำจะเป็นประจุชนิดที่ตรงข้ามกับประจุบนผิว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โพลาริเซชัน (Polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (ก) ไม่มีไดอิเล็กทริก (ข) มีไดอิเล็กทริก
(ที่มา : จุติมา เอ่งเจริญ, 2010)

กำหนดให้	σ	คือ ความหนาแน่นประจุที่ผิวของแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ
	σ_i	คือ ความหนาแน่นประจุเหนี่ยวนำบนผิวของไดอิเล็กทริก
	E_i	คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุเหนี่ยวนำ

ความหนาแน่นประจุสุทธิเชิงผิวของตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กทริกบรรจุอยู่ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{net}} &= \sigma - \sigma_i \\ \text{โดยที่} \quad E_0 &= \frac{\sigma}{\epsilon_0} \\ \text{และ} \quad E &= \frac{\sigma_{\text{net}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.2) จะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในเทอมของความหนาแน่นประจุได้ดังนี้

$$K = \frac{E_0}{E} = \frac{\sigma}{\sigma - \sigma_i} \quad (2.22)$$

$$\text{หรือ} \quad \sigma_i = \sigma \left[1 - \frac{1}{K} \right] \quad (2.23)$$

เมื่อ $\epsilon = K\epsilon_0$ เป็นสภาพยอมของสารไดอิเล็กทริก จะพบว่า

$$K = \frac{\sigma_{\text{net}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{K\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.24)$$

$$\text{และ} \quad C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.25)$$

2.5 กระบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas discharge process)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage) ให้กับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วที่วางห่างกัน อิเล็กตรอนจะถูกกวาดด้วยสนามไฟฟ้าให้วิ่งเข้าหาขั้วบวก (anode) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แต่กระแสที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมาก ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

2.5.1 สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าทะลายจะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงพอที่จะไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซ เมื่อเกิดการชนกันจะทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นและถูกเร่งเข้าสู่ขั้วบวก ส่วนอนุภาคไอออนจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซจะวิ่งเข้าสู่ขั้วลบ (cathode)

2.5.2 อนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนช้าลงจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา และถูกแรงกายไต้สนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวกทำให้เกิดการไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซ อย่างต่อเนื่อง และรักษาสภาวะโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้พร้อมกันนี้ อะตอมของช้าลงที่ถูกชนจะหลุดออกมาและฟุ้งกระจายพร้อมที่จะเคลื่อนที่ภายไต้สนามไฟฟ้าตกลงบนแผ่นรองรับอะตอมที่หลุดออกมาส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาวะอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า

2.5.3 หลังการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับอิเล็กตรอนจนเกิดการไอออนไนเซชัน ไอออนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเล็กตรอนมากทำให้ใกล้ช้าลงมีโพสิทีฟสเปซชาร์จ (positive space charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนถูกกวาดด้วยสนามไฟฟ้าสู่ขั้วบวกอย่างรวดเร็ว ศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด พ้นจากบริเวณนี้สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ อิเล็กตรอนหลังการไอออนไนซ์ซึ่งสูญเสียพลังงานไปมากไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้ตัวเองได้ ภายไต้สนามไฟฟ้าต่ำนี้จึงไม่มีพลังงานสูงพอที่จะไอออนไนซ์ก๊าซในการชนครั้งต่อไปได้ โอกาสที่เป็นไปได้คือผลจากการชนจะทำให้เกิดก๊าซในสภาวะกระตุ้น (excited particle) เป็นส่วนใหญ่

2.2.4 อนุภาคไอออนเมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วจะกลายเป็นกลางทางไฟฟ้า และกลับสู่สถานะพื้น หรือการตกจากสภาวะกระตุ้นของอะตอมสู่สถานะพื้น จะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความถี่แสงทำให้บริเวณนั้นเกิดการเรืองแสง “โกลว์ดิสชาร์จ” ส่วนบริเวณระหว่างช้าลงกับโพสิทีฟสเปซชาร์จเป็นการรวมตัวกันของไอออนกับอิเล็กตรอนและคายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะให้ความถี่ในช่วงอุลตราไวโอเลต ซึ่งมีพลังงานค่อนข้างสูงและเกิดได้ยากกว่า ทำให้ช่วงบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่มืด (dark space region)

2.6 ก๊าซในกระบวนการแปลงผันมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

2.6.1 มีเทน (Methane)

ก๊าซมีเทน เป็นสารประกอบคาร์บอน สูตรทางเคมี CH_4 ที่อุณหภูมิห้องและความดันมาตรฐานก๊าซมีเทนมีสถานะเป็นก๊าซ ที่ไม่มีกลิ่น มีเทนเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมใต้พื้นโลกมาเป็นเวลานาน มีเทนมีความเสถียรสูงในทางเทอร์โมไดนามิก ที่อุณหภูมิห้องและความดันห้อง และมีจุดเดือดที่ -162 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ และสามารถติดไฟได้

ก๊าซธรรมชาติที่ได้จากการย่อยสลายจะประกอบด้วยก๊าซไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด เช่น มีเทน โพรเพน บิวเทน โดยทั่วไปจะประกอบด้วยมีเทนถึงร้อยละ 70 และยังประกอบด้วยก๊าซอื่นๆ อีก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และน้ำ เมื่อนำก๊าซธรรมชาติไปผ่านกระบวนการแยกก๊าซ จะได้ก๊าซแต่ละตัวที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์

ก๊าซมีเทนที่แยกได้จากกระบวนการแยกก๊าซสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และเมื่อนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูง จะเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed

Natural Gas - CNG) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ ก๊าซธรรมชาติสำหรับใช้ในยานยนต์ (Natural Gas Vehicles - NGV) ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้

นอกจากนี้ ก๊าซมีเทนยังเกิดขึ้นได้จากการทำการเกษตร พบมากในการทำนาข้าว โดยจุลินทรีย์ในน้ำจะย่อยสลายตอซังข้าวและซากพืชในน้ำ ทำให้เกิดก๊าซมีเทนในปริมาณมากลอยขึ้นมาในอากาศ ผลการศึกษาพบว่าภาคการเกษตรปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงถึงร้อยละ 74 ของปริมาณการปลดปล่อยทั้งหมด ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.6.2 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)

คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ CO_2 เป็นก๊าซไม่มีสี ซึ่งหากหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในปริมาณมาก ๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือกในอวัยวะ ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 1.98 kg/m^3 ซึ่งสูงกว่าอากาศแห้งประมาณ 1.5 เท่า โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) หรือ CO_2 น้ำหนักโมเลกุล 44.01 ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยา คาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็ง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง หรือ solid carbon dioxide เตรียมได้จากการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาผ่านกระบวนการอัดและทำให้เย็นลงภายใต้ความดันสูง กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว แล้วลดความดันลงอย่างรวดเร็วโดยการพ่นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวสู่ความดันบรรยากาศ ผลที่ได้คือเกล็ดน้ำแข็งคล้ายเกล็ดหิมะแล้วจึงนำมาอัดเป็นรูป คาร์บอนไดออกไซด์จะกลายเป็นของแข็งที่มีสีขาวอุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลวก่อน หากต้องการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลว ต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 5.1 บรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ 1 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายนั้นจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในภายหลัง การทดสอบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

2.6.2.1 นำรูปที่ติดไฟอยู่เข้าไปในหลอดทดลองที่มีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ ไฟจะดับ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ช่วยในการติดไฟของสาร จึงนำมาใช้เป็นก๊าซดับเพลิงได้

2.6.2.2 ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปในน้ำปูนใส (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) น้ำปูนใสจะขุ่น เนื่องจากเกิดแคลเซียมคาบอเนตเกิดขึ้น

2.6.3 ฮีเลียม (Helium)

ฮีเลียม เป็นธาตุเคมีที่มีสัญลักษณ์ว่า He และมีเลขอะตอมเท่ากับ 2 ฮีเลียมเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ เฉื่อย มีอะตอมเดี่ยวซึ่งถูกจัดให้อยู่ในหมู่ก๊าซมีตระกูลบนตารางธาตุ จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของฮีเลียม มีค่าต่ำสุดกว่าบรรดาธาตุทั้งหมดในตารางธาตุ และมันจะปรากฏในอยู่รูปของก๊าซเท่านั้น ยกเว้นในสภาวะที่เย็นยิ่งยวด

มีการค้นพบฮีเลียม เมื่อปี ค.ศ. 1868 ในบรรยากาศรอบดวงอาทิตย์ โดย โจเซฟ นอร์มัน ล็อกเยอร์ เขาได้ทำการทดลองโดยการส่องดวงอาทิตย์สังเกตเห็นเส้นสีเหลืองในสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับธาตุใด ๆ ที่รู้จักกันบนโลก ล็อกเยอร์ ใช้คำศัพท์ภาษากรีกที่เรียกดวงอาทิตย์ (เฮลิออส : Helios) มาตั้งชื่อธาตุนี้ ว่า ฮีเลียม (Helium) นอกจากนี้ เซอร์ วิลเลียม แรมเซย์ ได้ค้นพบฮีเลียมบนโลก (ค.ศ. 1895) โดยเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในแร่ยูเรไนท์ ซึ่งมีเส้นสเปกตรัมตรงกับที่สังเกตจากดวงอาทิตย์

การนำไปใช้ประโยชน์

- ก๊าซฮีเลียมมีความหนาแน่นที่ต่ำมาก จึงนำไปใช้บรรจุในบอลลูนและเรือเหาะแทนก๊าซไฮโดรเจนซึ่งติดไฟได้ ภายหลังจากการระเบิดของเรือเหาะอินเดนบวร์กของเยอรมนี และทราบสาเหตุว่ามาจากการระเบิดของก๊าซไฮโดรเจน
- มีการนำก๊าซฮีเลียมไปผสมในอากาศสำหรับนักดำน้ำ เพื่อป้องกันการเกิดโรคเบนด์ (Bends) หรือการเกิดฟองอากาศในเลือดและเนื้อเยื่อ เพราะความไม่สมดุลของความกดดันอากาศภายในและภายนอกร่างกาย
- ฮีเลียมเหลว (ซึ่งมีอุณหภูมิ -269 องศาเซลเซียส) นำไปใช้เกี่ยวกับตัวนำยิ่งยวด (Superconductor)

2.6.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ไฮโดรเจน เป็นธาตุเคมีที่มีเลขอะตอม 1 สัญลักษณ์ธาตุคือ H มีน้ำหนักอะตอมเฉลี่ย 1.00794 u (1.007825 u สำหรับไฮโดรเจน-1) ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและพบมากที่สุดในเอกภพ ซึ่งคิดเป็นมวลธาตุเคมีประมาณร้อยละ 75 ของเอกภพ ดาวฤกษ์ในลำดับหลักส่วนใหญ่ประกอบด้วยไฮโดรเจน ในสถานะพลาสมา ธาตุไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหาได้ค่อนข้างยากบนโลก

ไอโซโทปที่พบมากที่สุดของไฮโดรเจน คือ โปรเทียม (ชื่อพบใช้น้อย สัญลักษณ์ ^1H) ซึ่งมีโปรตอนหนึ่งตัวแต่ไม่มีนิวตรอน ในสารประกอบไอออนิก โปรเทียมสามารถรับประจุลบ (แอนไอออนซึ่งมีชื่อว่า ไฮไดรด์ และเขียนสัญลักษณ์ได้เป็น H^-) หรือกลายเป็นสปีซีประจุบวก H^+ ก็ได้ แคตไอออนหลังนี้เสมือนว่ามีเพียงโปรตอนหนึ่งตัวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริง แคตไอออนไฮโดรเจนในสารประกอบไอออนิกเกิดขึ้นเป็นสปีซีที่ซับซ้อนกว่าเสมอ ไฮโดรเจนเกิดเป็นสารประกอบกับธาตุส่วนใหญ่และพบในน้ำและสารประกอบอินทรีย์ส่วนมาก ไฮโดรเจนเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาเคมีกรด-เบส โดยมีหลายปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนระหว่างโมเลกุลละลายได้ เพราะเป็นอะตอมที่เรียบง่ายที่สุดเท่าที่ทราบ อะตอมไฮโดรเจนจึงได้ใช้ในทางทฤษฎี ตัวอย่างเช่น เนื่องจากเป็นอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเพียงชนิดเดียวที่มีผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสมการชเรอดิงเงอร์ การศึกษาการพลังงานและพันธะของอะตอมไฮโดรเจนได้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนากลศาสตร์ควอนตัม

มีการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนขึ้นเป็นครั้งแรกในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 16 โดยการผสมโลหะกับกรดแก่ระหว่าง ค.ศ. 1766-81 เฮนรี คาเวนดิชเป็นคนแรกที่สังเกตพบว่า ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารชนิดหนึ่งต่างหาก และจะให้น้ำเมื่อนำไปเผาไหม้ ซึ่งคุณสมบัตินี้เองที่ได้กลายมาเป็นชื่อของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นภาษากรีก หมายถึง "ตัวก่อให้เกิดน้ำ" ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ไฮโดรเจนไร้สี ไร้กลิ่น เป็นอโลหะ ไร้รส ไม่มีพิษ และเป็นก๊าซไดอะตอมที่ไวไฟสูง มีสูตรโมเลกุลว่า H_2

การผลิตไฮโดรเจนในเชิงอุตสาหกรรมมาจากการนำก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) เป็นหลัก และจากวิธีการผลิตไฮโดรเจนที่ต้องใช้พลังงานสูงกว่า เช่น การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ไฮโดรเจนส่วนใหญ่ใช้สอยกันใกล้จุดผลิต กระบวนการเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (นั่นคือไฮโดรแครกกิง) และการผลิตแอมโมเนีย ซึ่งส่วนใหญ่สำหรับตลาดปุ๋ย เป็นภาคที่มีการใช้ไฮโดรเจนมากที่สุด

ไฮโดรเจนเป็นความกังวลหนึ่งในโลหะวิทยา เพราะไฮโดรเจนสามารถทำให้โลหะหลายชนิดเปราะได้ ซึ่งทำให้เป็นการยากขึ้นในการออกแบบสายท่อและถังเก็บ

การนำไปใช้ประโยชน์

- การใช้กับรถยนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้
- ใช้ในกระบวนการ ไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เพื่อสังเคราะห์น้ำมันพืชและน้ำมันจากสัตว์
- ใช้ร่วมกับ คลอรีน เพื่อผลิตไฮโดรเจนคลอไรด์
- ใช้ร่วมกับออกซิเจน ในการตัดชิ้นงานใต้น้ำ
- ไฮโดรเจนเหลวใช้เป็นเชื้อเพลิงของจรวดและเป็นส่วนผสมสำคัญในการสร้างปฏิกิริยานิวเคลียร์

2.6.5 ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon)

ไฮโดรคาร์บอน เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบขึ้นจากไฮโดรเจนและคาร์บอนทั้งหมด ไฮโดรคาร์บอนที่อะตอมไฮโดรเจนหนึ่งอะตอมถูกนำออกเป็นหมู่ฟังก์ชัน เรียก ไฮโดรคาร์บิล ไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เช่น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (อะรีน) อัลเคน อัลคีน ไซโคลอัลเคน และอัลไคน์

ไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่ที่พบบนโลกเกิดตามธรรมชาติในน้ำมันดิบ ซึ่งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายให้คาร์บอนและไฮโดรเจนปริมาณมากซึ่งเมื่อสร้างพันธะสามารถเรียงต่อกันเพื่อสร้างสายที่ดูไม่มีที่สิ้นสุด

2.6.5.1 ประเภทของไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอนมีอยู่ 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

1. อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติกอย่างน้อยหนึ่งวง
2. ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) หรือแอลเคน (alkane) ไม่มีพันธะคู่, พันธะคู่สาม หรือพันธะอะโรมาติก
3. ไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) ประกอบไปด้วยพันธะคู่หรือพันธะคู่สามอย่างน้อยหนึ่งพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอน แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.6.5.2 จำนวนอะตอมไฮโดรเจน

จำนวนของอะตอมไฮโดรเจนสามารถถูกกำหนดได้ ถ้าทราบจำนวนอะตอมคาร์บอน โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

- อัลเคน : C_nH_{2n+2}
- อัลคีน : C_nH_{2n} (โดยมีพันธะคู่หนึ่งพันธะเท่านั้น)
- อัลไคน์ : C_nH_{2n-2} (โดยมีพันธะคู่สามหนึ่งพันธะเท่านั้น)

โดย n แทนจำนวนอะตอมของธาตุ เช่น CH_4 เป็นอัลเคน ส่วน C_2H_4 เป็นอัลคีน ไฮโดรคาร์บอนสามารถทำงานได้ภายใต้กฎออกเตต (กล่าวคืออะตอมคาร์บอนจะต้องรับอะตอมไฮโดรเจนมา 4 อะตอม เพื่อให้เป็นไปตามกฎออกเตตที่ต้องมีอิเล็กตรอน 8 ตัว ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนหนึ่งๆ จะมีอิเล็กตรอน 1 ตัว) ซึ่งถ้าไม่ได้เป็นไปตามกฎออกเตตแล้ว จะทำให้ไฮโดรคาร์บอนเกิดความเฉื่อย

2.6.5.3 การเรียกชื่อสารประกอบ

การเรียกชื่อไฮโดรคาร์บอนแต่ละตัวจะเรียกตามจำนวนอะตอมคาร์บอน ตามด้วยคำลงท้ายเสียงของชนิดไฮโดรคาร์บอน เช่น CH_4 เรียกว่ามีเทน (methane) เนื่องจากมีเทนมีจำนวนอะตอมคาร์บอนเพียงตัวเดียว และเป็นอัลเคนซึ่งเสียงลงท้ายเป็น เอน เหมือนกันตามเลขอะตอมคาร์บอน (ขึ้นต้น)

- C_1 : มีท, เมท (Meth)
- C_2 : อีท, เอท (Eth)
- C_3 : โพรพ (Prop)
- C_4 : บิวท์ (But)
- C_5 : เพนท์ (Pent)
- C_6 : เฮกซ์ (Hex)
- C_7 : เฮปท์ หรือ เซปท์ (Hept, Sept)
- C_8 : ออกต์ (Oct)

- C₉: โนน (Non)
- C₁₀: เดค (Dec)

ตามชนิดของไฮโดรคาร์บอน (ลงท้าย)

- แอลเคน: เอน (-ane)
- แอลคีน: อีน (-ene)
- แอลไคน์: ไอน์ (-yne)

2.6.5.4 ปีโตรเลียม

ไฮโดรคาร์บอนเหลวที่ถูกดึงขึ้นมาจากใต้ผิวดินเรียกว่าปีโตรเลียม หรือน้ำมันแร่ ชาติ ในขณะที่ไฮโดรคาร์บอนในสถานะก๊าซจะถูกเรียกว่าก๊าซธรรมชาติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นแหล่งที่สำคัญของเชื้อเพลิงและเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ในอินทรีย์เคมีภัณฑ์ (organic chemical) และพบอยู่ทั่วไปภายในเปลือกโลกชั้นในของโลก ที่สามารถดึงปีโตรเลียมและก๊าซเหล่านี้มาได้จากการขุดเจาะโดยใช้เครื่องมือทางภูมิศาสตร์ปีโตรเลียม (petroleum geology) โดยเฉพาะ

แหล่งสำรองน้ำมันที่ได้น้ำมันมาจากหินตะกอน หินตะกอนเหล่านี้ก็เป็นแหล่งไฮโดรคาร์บอนหลักๆ ที่ใช้เป็นพลังงานได้ อีกทั้งในด้านการคมนาคมและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเหลวจากชั้นหินตะกอนในขณะนี้ถือเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการพัฒนาการพลังงานให้ทันสมัย

ไฮโดรคาร์บอนมีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันมาก เพราะว่ามันเป็นแหล่งรวมของเชื้อเพลิงฟอสซิลส่วนใหญ่ เช่น ถ่านหิน, ปีโตรเลียม, ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ) และเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) เช่นเดียวกับวัสดุพลาสติก, ซีเมนต์, สารละลายต่างๆ และน้ำมัน แต่ปิโตรเลียมก็ทำให้เกิดมลพิษในเมือง ซึ่งเมื่อรวมกับสารไนโตรเจนมอนอกไซด์, สารไนโตรเจนไดออกไซด์ และแสงแดดแล้ว ซึ่งนำไปสู่การกระจายของชั้นโอโซน

2.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatography: GC)

เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph : GC) ดังรูปที่ 2.11 ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง อาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ Stationary phase และ Mobile phase

เทคนิคนี้สารที่ต้องการแยกจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสถานะก๊าซ แล้วผ่านเข้าคอลัมน์เพื่อเกิดการแยกโดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ที่เป็นก๊าซ ก๊าซที่เป็นเฟสเคลื่อนที่จะเป็นแก๊สเฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยากับสาร ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารให้ผ่านคอลัมน์ไปอย่างเดียว ดังนั้น ในเทคนิคการ

วิเคราะห์ก๊าซ จึงนิยมเรียกก๊าซที่เป็นเฟสเคลื่อนที่นี้ว่า ก๊าซพา (carrier gas) องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

2.8.1 Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่คอลัมน์ คุณสมบัติที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว

2.8.2 Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่ง การควบคุมอุณหภูมิของ Oven นั้นมี 2 แบบ คือ

- Isocratic Temperature
- Gradient Temperature

2.8.3 Detector คือ ส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่เราสนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด



รูปที่ 2.11 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatography, GC)

ที่มา : <https://www.speckandburke.co.uk/products/reconditioned-instruments/gas-chromatography/gas-chromatographs/varian-450bruker-450-gas-chromatograph/>

2.8 สมการสำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (GC)

สำหรับก๊าซที่ตรวจสอบแล้วบน GC มีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโมลาร์ในส่วนประกอบของก๊าซกับพื้นที่สูงสุดในเทคนิคโครมาโตกราฟีของส่วนประกอบนั้น ความเข้มข้นโมลาร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สูงสุดของโครมาโตกราฟี ความสัมพันธ์นี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้น การเปลี่ยนตัวทำปฏิกิริยาเองจึงสามารถคำนวณได้ง่ายจากการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ที่เป็นจุดสูงสุดของสารตั้งต้นเนื่องจากปฏิกิริยาพลาสมา การคำนวณการสลายตัวของก๊าซที่ทำปฏิกิริยาและโอกาสการเกิดผลิตภัณฑ์ถูกกำหนดเป็น **เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซ (Conversion)** ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{CH_4} (\%) = \frac{\text{moles of } CH_4 \text{ Converted}}{\text{moles of } CH_4 \text{ Input}} \times 100 \quad (2.26)$$

$$C_{CO_2} (\%) = \frac{\text{moles of } CO_2 \text{ Converted}}{\text{moles of } CO_2 \text{ Input}} \times 100 \quad (2.27)$$

โอกาสการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (Selectivities)

$$S_{H_2} (\%) = \frac{\text{moles of } H_2 \text{ produced}}{2 \times \text{moles of } CH_4 \text{ converted}} \times 100 \quad (2.28)$$

$$S_{CO} (\%) = \frac{\text{moles of CO produced}}{\text{moles of } CH_4 \text{ converted} + \text{moles of } CO_2 \text{ converted}} \times 100 \quad (2.29)$$

$$S_{C_m H_n} (\%) = \frac{m \times \text{moles of } C_m H_n \text{ produced}}{\text{moles of } CH_4 \text{ converted} + \text{moles of } CO_2 \text{ converted}} \times 100 \quad (2.30)$$

เปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (Yields)

$$Y_{H_2} (\%) = \frac{\text{moles of } H_2 \text{ produced}}{2 \times \text{moles of } CH_4 \text{ input}} \times 100 \quad (2.31)$$

$$Y_{CO} (\%) = \frac{\text{moles of CO produced}}{\text{moles of } CH_4 \text{ input} + \text{moles of } CO_2 \text{ input}} \times 100 \quad (2.32)$$

อัตราส่วนโมลาร์ (Molar Ratio)

$$\frac{H_2}{CO} = \frac{\text{moles of } H_2 \text{ produced}}{\text{moles of CO produced}} \quad (2.33)$$

การดุลอะตอมคาร์บอน (Carbon Balance)

$$B_{\text{carbon}} (\%) = \frac{[CH_4]_{out} + [CO_2]_{out} + [CO]_{out} + 2 \times [C_2]_{out} + 3 \times [C_3]_{out}}{[CH_4]_{in} + [CO_2]_{in}} \times 100 \quad (2.34)$$

2.9 ทบทวนวรรณกรรม

Annemie Bogaerts et al. (2001) กล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลให้พลาสมาอยู่ในสภาวะสมดุล อันได้แก่ สารเคมีที่ป้อน, ความดัน (ตั้งแต่ประมาณ 0.1 Pa ถึงความดันบรรยากาศ), โครงสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, การกำหนดค่าการคายประจุ (เช่น มีหรือไม่มีอิเล็กโทรด ปริมาณการคายประจุ) และการกระตุ้นของพลาสมา

Claire Tendero et al. (2005) อธิบายถึงการสร้างพลาสมาว่า พลาสมาถูกสร้างขึ้นโดยใช้พลังงานกับก๊าซ เพื่อจัดระเบียบโครงสร้างของอะตอมโมเลกุล และเพื่อผลผลิตชนิดใหม่และไอออนที่ถูกกระตุ้น โดยพลังงานนี้สามารถเป็นความร้อนหรือนำพาโดยกระแสไฟฟ้าหรือแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าได้

Huali Long et al. (2008) ได้ศึกษาการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ของมีเทนไปเป็นก๊าซสังเคราะห์ด้วยวิธี Cold plasma jet (CPJ) โดยการรวมตัวของ cold plasma jet กับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/V-Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองพบว่า สำหรับพลาสมาการเปลี่ยนก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 46 และร้อยละ 34 โอกาสเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 85 และร้อยละ 78 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 2.9 มิลลิโมลต่อกิโลจูล ตามลำดับ สำหรับการรวมกันของ CPJ กับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/V-Al}_2\text{O}_3$ การเปลี่ยนก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 14 และร้อยละ 6 โอกาสเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ร้อยละ 18 และร้อยละ 11 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าถึง 3.7 มิลลิโมลต่อกิโลจูล ตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีความร้อนเสริม วิธี CPJ มีข้อได้เปรียบของการประมวลผลแบบธรรมดาและง่ายต่อการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

X. Tu1, J.C. Whitehead. (2012) ได้ทำการทดลองการเปลี่ยนมีเทนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศ โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/V-Al}_2\text{O}_3$ บางส่วนในแนวแกนเข้าไปในช่องว่างการคายประจุซึ่งแสดงเส้นใยที่แข็งแรง การคายประจุจะช่วยให้เพิ่มปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพและทางเคมีระหว่างพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ สเปกตรัมการแผ่รังสีแสงของการคายประจุแสดงให้เห็นถึงชนิดของปฏิกิริยา (CO , CH , C_2 , CO_2^+ และ N_2^+) นอกจากนี้ ยังพบว่าการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/V-Al}_2\text{O}_3$ ในพลาสมามีผลอ่อนต่ออุณหภูมิของก๊าซ โดยผลการทดลองแสดงทั้งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนมีเทน (ร้อยละ 56.4) และโอกาสเกิดไฮโดรเจน (ร้อยละ 17.5) เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า

DanhuaMei et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) บริสุทธิ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ออกซิเจน (O_2) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จที่อุณหภูมิต่ำ ($<150^\circ\text{C}$) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในพลาสมา ผลการทดลองพบว่า ผลของความหนาแน่นพลังงานจำเพาะ (SED) ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาได้รับการตรวจสอบในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในพลาสมา ค่าการสลายตัวของ CO_2 สูงถึงร้อยละ 21.7 โดยที่ SED อยู่ที่ 80 กิโลจูลต่อลิตร การรวมกันของพลาสมา กับ BaTiO_3 และ TiO_2 อุณหภูมิของก๊าซในสถานะพลาสมาจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย $6-11^\circ\text{C}$ เมื่อเปรียบเทียบกับ การปล่อย CO_2 ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ SED 28 กิโลจูลต่อลิตร ผลการรวมกันของพลาสมา กับโพโตคะตาไลติก (BaTiO_3 และ TiO_2) ที่อุณหภูมิต่ำมีส่วนทำให้ทั้งการสลายตัวของ CO_2 และประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ มากถึงร้อยละ 250 ความเข้มของรังสี UV ที่เกิดจากการปล่อย CO_2 นั้นต่ำกว่าที่ปล่อยออกมาจากหลอด UV อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในปฏิกิริยาโพโตคะตาไลติกทั่วไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปล่อยรังสี UV ที่เกิดจาก CO_2 เครื่องปฏิกรณ์มีบทบาทเพียงเล็กน้อยในการกระตุ้น BaTiO_3 และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการสลายตัวของ CO_2

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนการออกแบบ การสร้างและหลักการทำงานของระบบพลาสมาแบบ DBD ที่ได้สร้างขึ้น นอกจากนี้ยังได้อธิบายขั้นตอนและเงื่อนไขในการทดลองด้วย ดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 3.1.1.1 ก๊าซมีเทน (Methane, CH_4)
- 3.1.1.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2)
- 3.1.1.3 ก๊าซฮีเลียม (Helium, He)
- 3.1.1.4 สารตัวเร่ง $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Ni}/\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Ni on Silica-alumina) (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ตัวเร่ง $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Ni}/\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ สำหรับเร่งปฏิกิริยาในปฏิกรณ์พลาสมา

3.1.2 สถานที่ในการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน

ห้องปฏิบัติการที่ใช้สำหรับการทำวิจัยด้านเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน แสดงดังรูปที่ 3.2 ห้องปฏิบัติการนี้ตั้งอยู่ที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อ.เมือง จ.จันทบุรี มี อาจารย์นิคม รัตนโรจนกุล เป็นผู้กำกับดูแล โดยระบบที่สร้างขึ้นจะเป็นระบบ

กำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge: DBD)



รูปที่ 3.2 ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน

3.1.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จและอุปกรณ์ประกอบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จกำลังสูง (High Power Dielectric Barrier Discharge, H-DBD) สำหรับใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนหรือการแปลงผันก๊าซ CO_2 และ CH_4 ไปเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมี ชุดเครื่องกำเนิดพลาสมานี้จะรวมถึงชุดอุปกรณ์สำหรับการควบคุมการไหลและความดันของก๊าซและชุดอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสมา และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

3.1.3.1 ปฏิกรณ์พลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าประกอบด้วยท่อสแตนเลสขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (outside diameter : OD) 25 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าภายในชั้นไดอิเล็กทริกทำจากแก้วควอทซ์ที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (inside diameter : ID) 27 มิลลิเมตร และยาว 22.7 เซนติเมตร วางตัวอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าภายในและขั้วไฟฟ้าภายนอก ช่องว่างสำหรับการสร้างพลาสมากว้าง 1 มิลลิเมตร รายละเอียดของคุณสมบัติของระบบแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 ปฏิกิริยาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการวิจัย

รายการคุณสมบัติ	รายละเอียด
แรงดันไฟฟ้า	12 kV
กำลังไฟฟ้า	1,000 W
รูปแบบสัญญาณขาออก	Sine wave
ความถี่	1-20 kHz

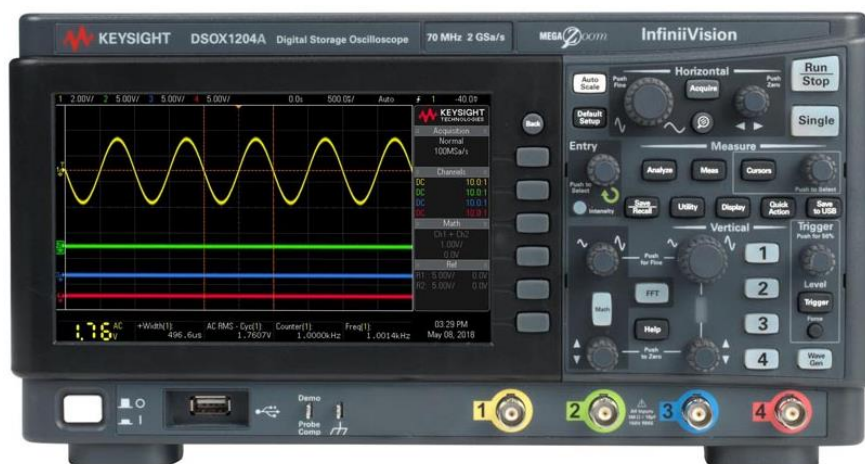
3.1.3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นต้องมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซได้ที่มีความดันบรรยากาศ และได้เลือกใช้แหล่งจ่ายความถี่สูงในระดับ 1-20 kHz ซึ่งการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขึ้นจะช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าแตกตัวของก๊าซได้ ทำให้ก๊าซสามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยคุณลักษณะและองค์ประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

3.1.3.3 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบหนึ่งของระบบพลาสมาที่สร้างขึ้น ทำหน้าที่แสดงผลสัญญาณและบันทึกข้อมูลสัญญาณต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เช่น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวปฏิกรณ์พลาสมา และสัญญาณกระแสดิซชาร์จ เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะการเกิดพลาสมาได้ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Keysight รุ่น InfiniiVision DSOX1204A (200 MHz)

3.1.3.4 โพรบวัดค่าทางไฟฟ้า

(1) โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Probe)

โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Probe) ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้น้อยลง เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปแสดงผลบนออสซิลโลสโคป โดยออสซิลโลสโคปทำหน้าที่ในการคุณค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ตามสัดส่วนการลดระดับแรงดันของโพรบที่ใช้ สามารถเชื่อมต่อกับออสซิลโลสโคปได้ทั้งแบบอนาล็อกและแบบดิจิทัล โดยโพรบที่ใช้เป็นของยี่ห้อ Cal Test รุ่น CT4028 แสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นโพรบที่มีสัดส่วนการลดระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1:1000 สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 20,000 โวลต์ เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง และ 40,000 โวลต์ สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง 55 °C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 85% ความคาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% เมื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0-35 kV และความถี่ 1 kHz ในกรณีใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ช่วงสัญญาณที่สามารถใช้ได้ตั้งแต่ DC ถึง 220 MHz ความต้านทานและค่าความจุขาเข้าเท่ากับ 900 M Ω และ 2.0 pF ตามลำดับ อัตราส่วน Signal/Noise เท่ากับ > 60 dB @ 1 kHz และ > 50 dB @ 1 MHz



รูปที่ 3.6 โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงยี่ห้อ Cal Test รุ่น CT4028

(2) โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Passive Voltage Probe)

โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Passive Voltage Probe) โดย Passive probe จะประกอบขึ้นจากสายไฟ คอนเน็คเตอร์และวงจรลดทอนสัญญาณ (จะเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ) โดยจะไม่มีอุปกรณ์ประเภท active (ทรานซิสเตอร์หรือวงจรรขยายสัญญาณ) อยู่ภายในโพรบ และไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟในการทำงานของโพรบ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มาพร้อมออสซิลโลสโคป

3.1.3.5 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแบบลูกลอย (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลแบบลูกลอยยี่ห้อ Aalborg รุ่น Influx Flow Tubes

3.1.3.6 อุปกรณ์ควบคุมและวัดอัตราการไหลของก๊าซ (แบบดิจิทัลที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้) ดังรูปที่ 3.9 เป็นผลิตภัณฑ์ยี่ห้อ Aalborg รุ่น DPC17S-VOL6-AA3.



รูปที่ 3.9 ตัวควบคุมอัตราการไหลแบบดิจิทัลยี่ห้อ Aalborg รุ่น DPC17S-VOL6-AA3

3.1.3.7 เทอร์โมมิเตอร์แบบเทอร์โมคัปเปิล

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รูปที่ 3.10) เพื่อใช้สำหรับวัดค่าอุณหภูมิของตัวปฏิกิริยา พลาสมาขณะกำลังสร้างพลาสมา ในกระบวนการวิจัยการเปลี่ยนก๊าซ



รูปที่ 3.10 เทอร์โมมิเตอร์แบบเทอร์โมคัปเปิล รุ่น HT-9815

3.1.3.8 มิเตอร์สำหรับอ่านค่าทางไฟฟ้า

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงผลได้ทั้งในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า โดยเป็นผลิตภัณฑ์ยี่ห้อ Kepler รุ่น KP-835 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วัดมิเตอร์ รุ่น KP-835 KEPLER

3.1.3.9 ตัวต้านทานทางไฟฟ้า

ตัวต้านทาน ดังรูปที่ 3.12 เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการต้านการไหลผ่านของ กระแสไฟฟ้า ทำด้วยลวดต้านทานหรือถ่านคาร์บอน โดยในการวิจัยนี้จะใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดีและไม่ให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทานมากเกินไป เพื่อทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้ามากเกินไปในขณะที่ตัวอุปกรณ์พลาสมากำลังทำงาน ค่าความต้านทานที่ได้เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้คือ 115 โอห์ม (Ω)



รูปที่ 3.12 ตัวต้านทานขนาด 115 โอห์ม

3.1.3.10 ถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซ ดังรูปที่ 3.13 เป็นถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซยี่ห้อ Hedetech รุ่น TDL21_0.5L และ 1.0L



รูปที่ 3.13 ถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซยี่ห้อ Hedetech รุ่น TDL21_0.5L และ 1.0L

3.1.4 องค์ประกอบและหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

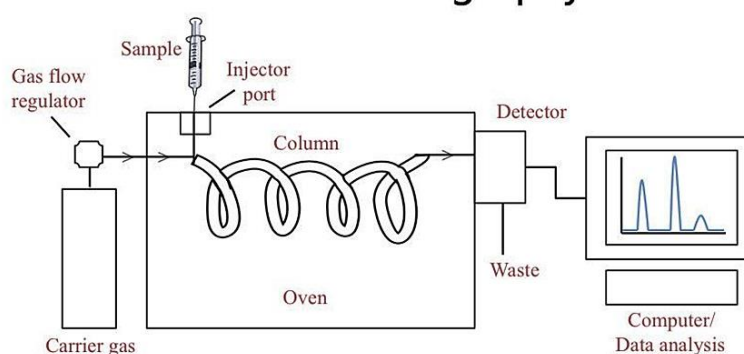
เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatograph : GC) (Varian (รุ่น 450) GC) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ประกอบด้วยคอลัมน์ 3 ตัวและตัวตรวจวัด 3 ตัว (ตัวตรวจวัดการนำความร้อน (Thermal Conductivity Detectors : TCDs) 2 ตัว และตัวตรวจวัดการเผาไหม้ (Flame Ionization Detector : FID) 1 ตัว) สำหรับการตรวจจับก๊าซไฮโดรคาร์บอน และออกซิเจน

ในการวิจัยนี้ จะใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซในการตรวจสอบก๊าซผลผลิตที่ได้จากการแปลงผันก๊าซ CO₂ และ CH₄ ด้วยพลาสติกในสถานะที่มีและไม่มีสารตัวเร่ง หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซอาศัยหลักการแยกระหว่าง 2 เฟส ประกอบด้วยเฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) สำหรับเฟสที่อยู่กับที่ จะเป็นสารที่เคลือบผิวหรือบรรจุอยู่ในคอลัมน์ และเฟสเคลื่อนที่ คือ ก๊าซตัวพา (Carrier gas) ซึ่งนิยมใช้ก๊าซเฉื่อยเช่น ฮีเลียม (He) และอาร์กอน (Ar) ในกรณีที่สารที่ต้องการทดสอบอยู่ในสถานะของเหลว เมื่อสารผสมถูกฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ตรงบริเวณหัวฉีด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้สารผสมเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ จากนั้น ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์โดยอาศัยก๊าซตัวพา และมีการให้ความร้อนแก่คอลัมน์ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากองค์ประกอบของก๊าซผสมใดทำอันตรกิริยากับเฟสอยู่กับที่มากกว่า จะเคลื่อนที่ไปได้ช้ากว่า ทำให้เกิดการแยกขึ้น หลังจากนั้นสารหรือก๊าซผสมในคอลัมน์จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวตรวจวัดและผลที่ได้จะถูกแสดงในรูปแบบของโครมาโทแกรม จากหลักการทำงานดังกล่าวนี้ ทำให้ส่วนประกอบหลักของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ จึงประกอบด้วย (1) Carrier gases หรือก๊าซพา ทำหน้าที่พากล๊าซตัวอย่างจากจุดฉีด (Injection port) เข้าสู่คอลัมน์และไป

ยังตัวตรวจวัด (Detector) ก๊าซที่ถูกใช้เป็นก๊าซตัวพาในเครื่องวิเคราะห์ก๊าซหรือ GC จะเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตัวอย่าง, (2) Injector port เป็นส่วนที่ใช้ในการฉีดสารตัวอย่างเข้าคอลัมน์ โดยทั่วไปในส่วนนี้จะมีชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ติดตั้งอยู่ด้วย เพื่อให้สารตัวอย่างกลายเป็นไอหรือก๊าซ, (3) Column เป็นส่วนที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปจะมี 2 แบบ คือ Packed column และ capillary column การเลือกใช้จะขึ้นกับคุณสมบัติของสารผสม ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน แต่สามารถพิจารณาเลือกจากแคตตาล็อก (Catalog) ที่บริษัทผู้ผลิตคอลัมน์ออกจำหน่าย หรืออาจค้นคว้าจากงานวิจัยในวารสารด้านโครมาโท กราฟิ ภายในคอลัมน์นี้จะบรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่ในการแยก ซึ่งจะเรียกสารดังกล่าวนี้ว่า เฟสคงที่ การแยกออกจากกันของแต่ละส่วนประกอบที่อยู่ในสารตัวอย่างเกิดจากความแตกต่างของสมบัติทางเคมีโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุลหรืออันตรกิริยาที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของตัวอย่างกับเฟสคงที่, (4) Detector หรือตัวตรวจวัด เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดสารเชิงเดี่ยวที่ถูกแยกด้วยคอลัมน์ แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผล ทำให้สามารถทราบองค์ประกอบหรือเทียบปริมาณของสารตัวอย่างได้ คือสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตัวตรวจวัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ Flame photometric detector (FID) (ใช้ตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะ C-C, C-H) และ Electron capture detector (ECD) (ใช้ตรวจวัดสารประกอบที่มีฮาโลเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ เช่น ยาฆ่าแมลงและยาปราบวัชพืช เป็นต้น), (5) Data system หรือระบบประมวลผลข้อมูล ที่ได้จากการตรวจวัด เป็นส่วนที่ถูกใช้ในการประมวลผลและข้อมูลต่าง ๆ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งจะคำนวณและรายงานผลเป็นเวลาหน่วง (Retention time) ซึ่งเป็นเวลาที่สารแต่ละชนิด (หรือแต่ละองค์ประกอบ) ใช้ในการเดินทางผ่านคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดของพีคที่ได้จากโครมาโทแกรม เวลาหน่วงนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อระบุชนิดของสารองค์ประกอบด้วยวิธีการเทียบกับสารมาตรฐานได้ ขณะที่ลักษณะและขนาดของพีคที่ได้สามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ โดยทั่วไป เครื่อง GC จะถูกประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ก๊าซ วิเคราะห์สารประกอบต่าง ๆ (สารประกอบของไนโตรเจน สารประกอบของซัลเฟอร์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น) วิเคราะห์สารปราบวัชพืชและปราบศัตรูพืช (ยาฆ่าแมลง) วิเคราะห์อากาศหรือก๊าซมลพิษในสิ่งแวดล้อม วิเคราะห์สารมลพิษในน้ำและในดิน ขั้นตอนสำคัญในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่อง GC คือ การเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างขึ้นกับความซับซ้อนของสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ และระดับความเข้มข้นที่สามารถตรวจวัดได้ (ขึ้นกับความสามารถของแต่ละเครื่องและมาตรฐานที่ยอมรับ)



Gas Chromatography



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatograph : GC) (ยี่ห้อ Varian รุ่น 450 GC)

(ที่มา: <https://microbenotes.com/gas-chromatography/>)

3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

3.2.1 โครงสร้างและวัสดุของต้นแบบระบบพลาสมา

วิธีการที่จะกำเนิดพลาสมาขึ้นมาได้นั้น เกิดจากการกระตุ้นก๊าซให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการเบรกดาวน์ (break down) โดยสิ่งที่ใช้กระตุ้นก๊าซให้เกิดกระบวนการเบรกดาวน์ (breakdown) คือ สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้โดยการใช้แหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

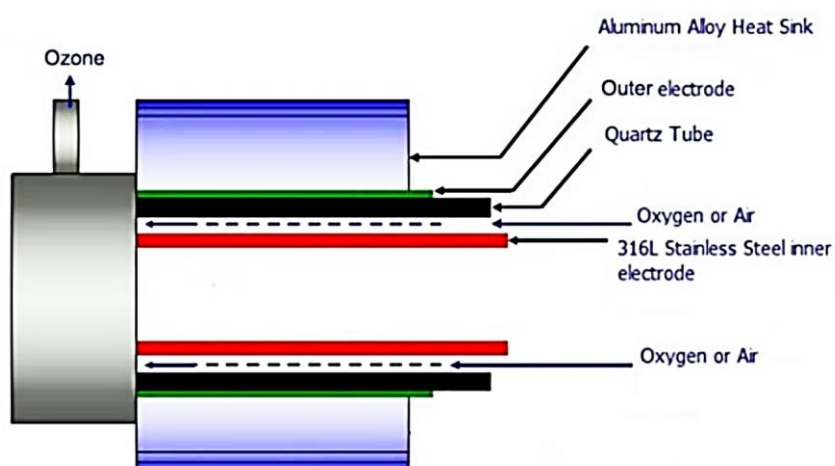
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของ การทดลองกำเนิดพลาสมาสามารถใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 12,000 โวลต์กำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์ ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้เพียงพอต่อการทดลอง ในส่วนของแบบจำลองวัสดุนำไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดที่ใช้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี มีค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อย เช่น สแตนเลส และเหล็ก เป็นต้น

การออกแบบปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ใช้ตัวนำไฟฟ้าสแตนเลสความหนา 1 มิลลิเมตร โดยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองแยกผ่านผนังแก้วควอทซ์ของปฏิกรณ์ ขั้วไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นแท่ง

สแตนเลส ขั้วไฟฟ้าแรงต่ำหรือขั้วไฟฟ้าภายนอกจะเป็นแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดทับด้วยแผ่นครีบอลูมิเนียมสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อน



รูปที่ 3.15 ลักษณะทางกายภาพภายนอกของปฏิกรณ์สำหรับกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 3.16 ภาคตัดขวางของปฏิกรณ์เครื่องกำเนิดพลาสมา

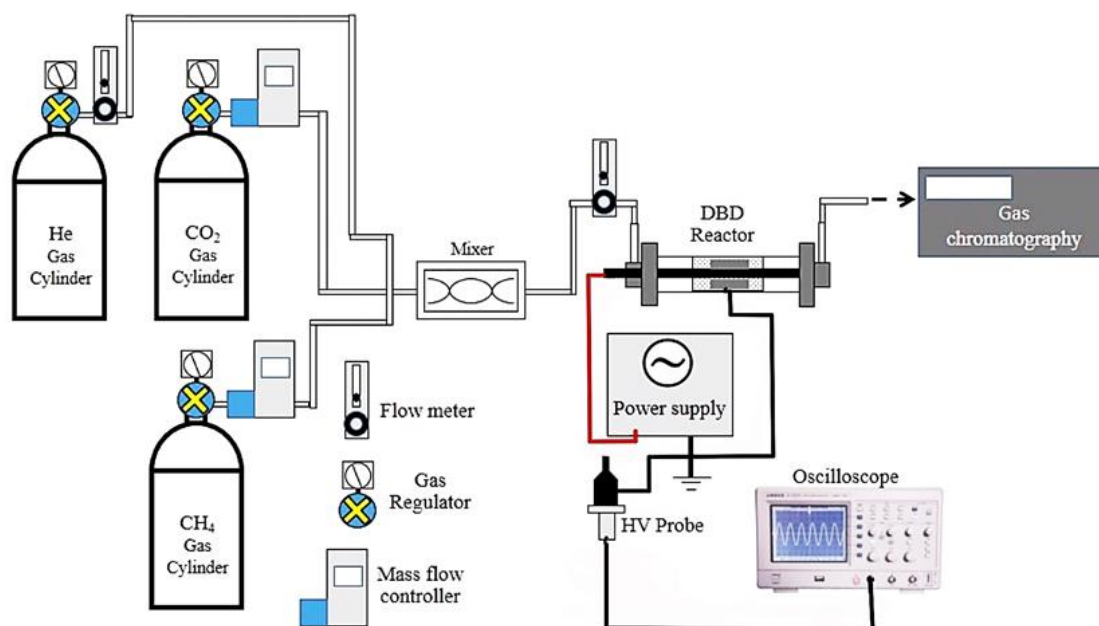
ในการสร้างต้นแบบระบบพลาสมาสำหรับการวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดให้ผู้รับเหมาเลือกวัสดุที่หาได้ง่ายแต่ต้องได้มาตรฐาน และต้องมีความปลอดภัย ทั้งนี้เพื่อเป็นระบบต้นแบบในการวิจัยและพัฒนาในระยะต่อไป สำหรับอุปกรณ์ที่ได้เลือกใช้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่สำคัญคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุด 12,000 โวลต์ (หรือ 12 kV) ที่ระดับความถี่ตั้งแต่ 1-20 กิโลเฮิร์ตซ (kHz) ซึ่งแรงดันระดับนี้สามารถทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาได้ สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ ได้เลือกใช้สแตนเลสความหนา 1 มิลลิเมตร (mm.) โดยต่อกับสายไฟฟ้าแรงดันสูงยาว 25 เซนติเมตร (cm.) ทั้งนี้เนื่องจากโลหะสแตนเลสมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและมีการสูญเสียกำลังค่อนข้างน้อย

ตารางที่ 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างพลาสมา

วัสดุอุปกรณ์	คุณลักษณะเฉพาะ	คุณสมบัติ
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (AC Power Supply)	High voltage power supply (0-12,000 โวลต์, 1-20 กิโลเฮิร์ตซ์)	สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับได้สูง
ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)	สแตนเลส ความหนา 1 มิลลิเมตร สายไฟยาว 25 เซนติเมตร	เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี มีการ สูญเสียน้อย
ไดอิเล็กทริก	แก้วควอทซ์ ความหนา 1 มิลลิเมตร	เป็นฉนวนตัวนำไฟฟ้าทน ความร้อนได้ดี
แผ่นอะคริลิก	ความหนา 0.3 เซนติเมตร ความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร	ใช้เป็นฐานรองตัวนำไฟฟ้า
น็อตเกลียว	ขนาดครึ่งมี 0.2 เซนติเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร	เป็นเสายึดกับฐานและแผ่น อะคริลิก
แผ่นไม้	ความหนา 1 เซนติเมตร ความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร	เป็นฐานรองระบบของเครื่อง กำเนิดพลาสมา
เบรกเกอร์	CHANG BCL-210 (10 แอมป์)	เป็นสวิตช์เปิด-ปิด และ ป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร

ในส่วน of วัสดุไดอิเล็กทริก ได้เลือกใช้ท่อแก้วควอทซ์ หนา 1 mm. และใช้แผ่นอะคริลิก ขนาดกว้าง 10 cm ยาว 20 cm หนา 3 mm. เป็นฐานรองอิเล็กโตรด (ตัวนำไฟฟ้า) ขณะที่ปฏิกิริยา ระบบกำเนิดพลาสมาจะถูกลอยบนแผ่นไม้ขนาดความหนา ความกว้างและความยาวเท่ากับ 10 mm, 50 และ 50 cm ตามลำดับ และส่วนประกอบที่ทีมผู้วิจัยให้ความสำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ เบรกเกอร์ ซึ่ง จะทำหน้าที่ตัด-ต่อกระแสไฟฟ้า รวมทั้งป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าลัดวงจร

ในการวิจัยนี้ ทีมผู้วิจัยได้เตรียมวัสดุอุปกรณ์และได้สร้างระบบพลาสมาสำหรับการผลิต พลาสมา ซึ่งในการทดลองได้จัดวางอุปกรณ์ระบบพลาสมารวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนผังการติดตั้งระบบพลาสมาและอุปกรณ์ประกอบ

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการวิจัยและทดลองแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมา

3.3.1.1 เตรียมอุปกรณ์พร้อมทั้ง ออกแบบ สร้าง ทดสอบและติดตั้งระบบพลาสมา

3.3.1.2 เปิดถังก๊าซโดยควบคุมความดันไว้ที่ 3 บาร์ ก๊าซจะไหลผ่านตัวควบคุมอัตราการไหล และถูกป้อนเข้าในเครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ โดยจะให้ก๊าซไหลผ่านปฏิกรณ์ก่อนประมาณ 20 นาที เพื่อไล่อากาศออก ก่อนเก็บตัวอย่างก๊าซก่อนการดีสชาร์จ

3.3.1.3 ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซก่อนการดีสชาร์จ โดยบรรจุก๊าซลงในถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซที่ปริมาตร 0.4 ลิตร

3.3.1.4 เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับระบบ โดยมีเวลาการทำงาน 40 นาที แล้วทำการสังเกตพลังงานของระบบจนมีค่าคงที่และอ่านค่าอุณหภูมิให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดในแต่ละเงื่อนไข จากนั้นเก็บก๊าซที่ได้จากการดีสชาร์จลงในถุงบรรจุตัวอย่างก๊าซ ที่ปริมาตร 0.4 ลิตร

3.3.1.5 นำก๊าซตัวอย่างก๊าซที่เก็บได้ทั้งหมดส่งไปวิเคราะห์ผ่านเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (GC) โดยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิเคราะห์ก๊าซ โรงงานแยกก๊าซธรรมชาติ จังหวัดระยอง (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน))

3.3.2 อัตราการไหลของก๊าซที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้อัตราการไหลของฮีเลียมคงที่อยู่ที่ 40 mL/min และเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของ CO₂ และ CH₄ ดังตารางที่ 3.3 นี้

ตารางที่ 3.3 ชื่อตัวอย่างและสัดส่วนของอัตราการไหลของก๊าซ CO₂ และ CH₄

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนอัตราการไหล CH ₄ (mL/min) : CO ₂ (mL/min)
S ₁	50 : 10
S ₂	40 : 20
S ₃	30 : 30
S ₄	20 : 40
S ₅	10 : 50

หมายเหตุ: อัตราการไหลรวมของก๊าซ 100 mL/min.

เงื่อนไขที่ 2 ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของฮีเลียมในระบบด้วยการปรับอัตราการไหลเป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 mL/min ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อฮีเลียมจะมีค่าเท่ากันดังตารางที่ 3.4 นี้

ตารางที่ 3.4 ชื่อตัวอย่างและสัดส่วนของอัตราการไหลที่เท่ากันของ CO₂ และ CH₄

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนอัตราการไหล CH ₄ (mL/min) : CO ₂ (mL/min)
S ₆	50 : 50
S ₇	45 : 45
S ₈	40 : 40
S ₉	35 : 35
S ₁₀	30 : 30
S ₁₁	25 : 25

หมายเหตุ: อัตราการไหลรวมของก๊าซ 100 mL/min.

3.3.3 การวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ออกจากปฏิกรณ์พลาสมา อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดอัตราการไหลด้วยฟองสบู่ (Soap bubble flowmeter) ดังรูปที่ 3.18 ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้

ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซผลผลิต ซึ่งการเตรียมและการใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าว ทำตามขั้นตอนดังนี้

3.3.3.1 นำขวดฉีดน้ำกลั่นที่บรรจุน้ำยาล้างจานบีบฟองเข้าใส่ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร

3.3.3.2 นำสายยางจากเครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จต่อกับปิเปต

3.3.3.3 เปิดเครื่องปั๊มอากาศให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ถึงขีดที่กำหนด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

คำนวณหาเวลาเฉลี่ยที่ฟองอากาศเคลื่อนที่

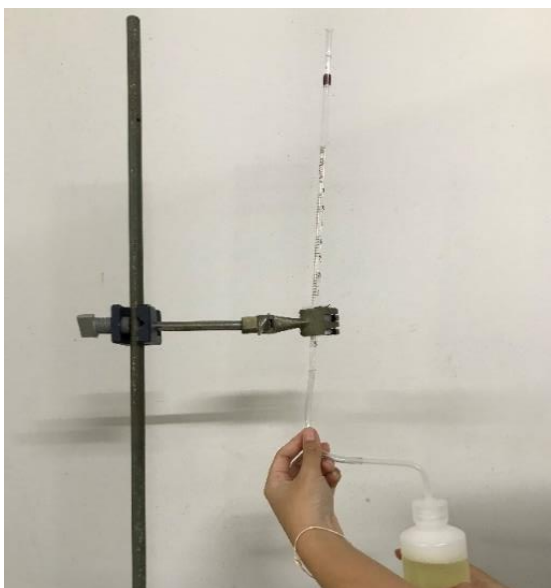
3.3.3.4 คำนวณอัตราการไหลจากสมการ

การคำนวณอัตราการไหล (หน่วย ml/min) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

โดย อัตราการไหล = ปริมาตรอากาศ/เวลาที่ฟองใช้ในการเคลื่อนที่

อัตราการไหล = $\left(\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดหลอดพลาสติก} \times \text{ระยะการเคลื่อนที่ของฟอง}}{\text{เวลาที่ฟองน้ำยาล้างจานใช้ในการเคลื่อนที่}} \right)$

$$\text{อัตราการไหล} = \frac{\pi r^2 h}{t} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.18 การวัดอัตราการไหลของก๊าซด้วยฟองสบู่ (Soap bubble flowmeter)

3.3.4 การทดลองแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง

งานวิจัยนี้ได้ใช้ Ru/Al₂O₃ และ Ni/SiO₂-Al₂O₃ (Ni on silica-alumina) ที่มีลักษณะเป็นผง (Powder) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง ในการทดลองแปลงผันก๊าซด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง ทีมผู้วิจัยได้เติมสารตัวเร่งในปริมาณ (Loading) 0, 0.2 และ 0.4 กรัม (g) โดยควบคุมอัตราการไหลของ

CO₂ และ CH₄ ในอัตรา 50 ml/min และอัตราการไหลรวมเท่ากับ 100 ml/min. อย่างไรก็ตาม ในรายงานวิจัยนี้ทีมผู้วิจัยเลือกที่จะรายงานเฉพาะผลของการใช้ Ru/Al₂O₃ เท่านั้น ส่วนผลจากสารตัวเร่ง Ni/SiO₂-Al₂O₃ จะได้รายงานในเอกสารต้นฉบับบทความวิจัยที่จะส่งขอตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

หลังจากได้จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์ รวมทั้งแหล่งที่จะดำเนินการส่งตัวอย่างก๊าซเพื่อตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบแล้ว ทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลอง โดยได้กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น ซึ่งผลการทดลอง/วิจัยปรากฏดังนี้

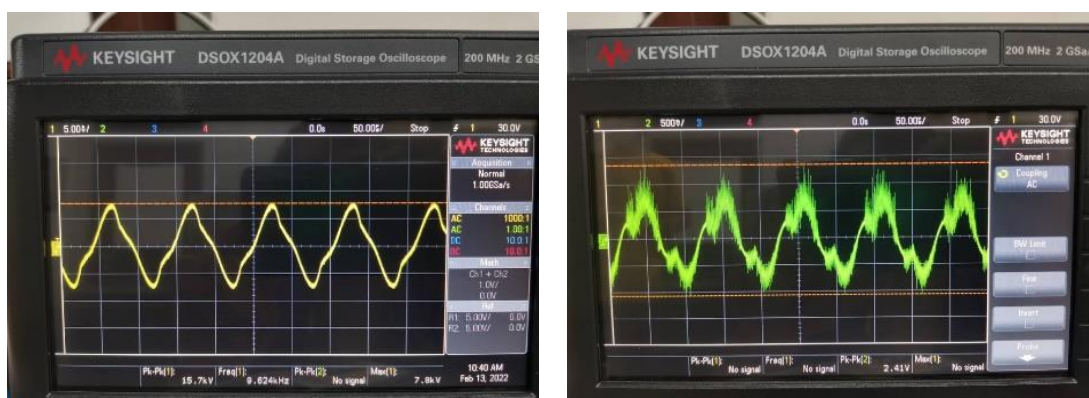
4.1 ผลการศึกษากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของระบบพลาสมา

งานวิจัยนี้ ได้พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าจากออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ 8 kV ในการทดลองนี้ได้แบ่งเงื่อนไขการทดลองเป็น 2 กรณี คือ เงื่อนไขการทดลองในกรณีที่ 1 กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมคงที่เป็น 40 ml/min และอัตราส่วน $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ เป็น 10:50, 20:40, 30:30, 40:20 และ 50:10 ตามลำดับ เงื่อนไขการทดลองในกรณีที่ 2 ได้เปลี่ยนความเข้มข้นของฮีเลียมด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเข้าปฏิกิริมาตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ml/min ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราส่วนของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ เท่ากับ 50:50 45:45 40:40 35:35 30:30 และ 25:25 ตามลำดับ และผลการศึกษาปรากฏผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยขณะการทดลอง

Sample ($\text{CH}_4 : \text{CO}_2$)	อัตราการไหล (ml/min)	อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (W)
S ₁	102	125.67	137.00
S ₂	106	127.33	132.33
S ₃	109	125.00	135.00
S ₄	114	123.67	135.00
S ₅	113	125.40	134.00
S ₆	107	124.30	136.00
S ₇	106	126.90	137.00
S ₈	106	125.77	137.00
S ₉	106	125.97	136.00
S ₁₀	109	125.00	135.00
S ₁₁	112	125.13	137.00
ค่าเฉลี่ย		125.47	135.57

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า เมื่อก๊าซเกิดการดิสชาร์จเป็นเวลา 40 นาที จนถึงจุดที่พลาสมาเสถียร พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าของทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าคงที่ ประมาณ 135.57 วัตต์ และอุณหภูมิภายในระบบในช่วงของการดิสชาร์จมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 127.33 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบอยู่ที่ประมาณ 125.47 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่า ทั้งกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิจะมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันเสมอ



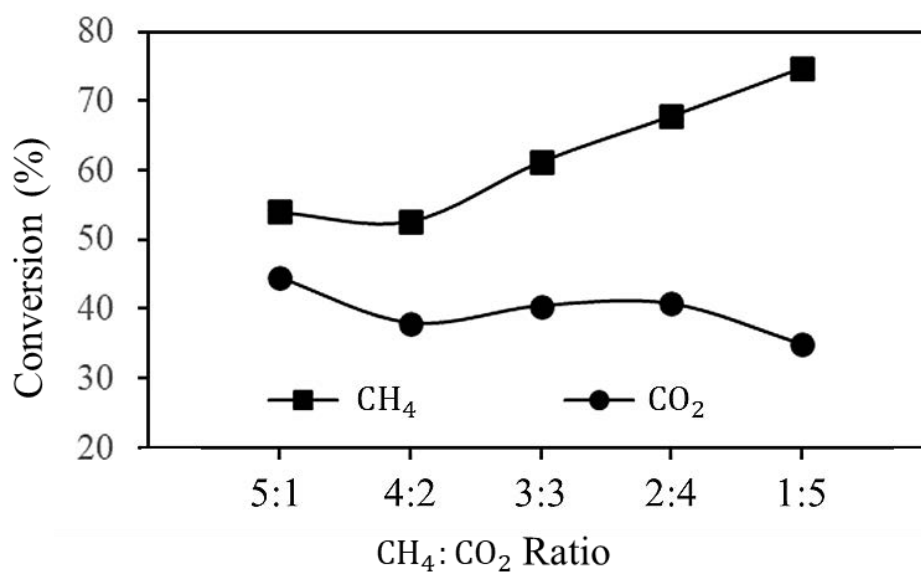
รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณพลาสมาที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
สัญญาณของแรงดันไฟฟ้า (ซ้าย) และสัญญาณของกระแสดิสชาร์จ (ขวา)

4.2 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ ที่มีต่อการแปลงผัน

ศึกษาผลกระทบของการปรับอัตราส่วนของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ ที่มีต่อการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2 เป็นก๊าซผลผลิต โดยกำหนดเงื่อนไขการศึกษาด้วยการใช้อัตราการไหลรวมของก๊าซในระบบคงที่เท่ากับ 100 ml/min ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมคงที่เท่ากับ 40 ml/min และปรับอัตราส่วนการไหลของ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ ที่อัตรา 50:10, 40:20 30:30, 20:40 และ 10:50 (หรือในอัตรา 5:1, 4:2, 3:3, 2:4 และ 1:5) ตามลำดับ

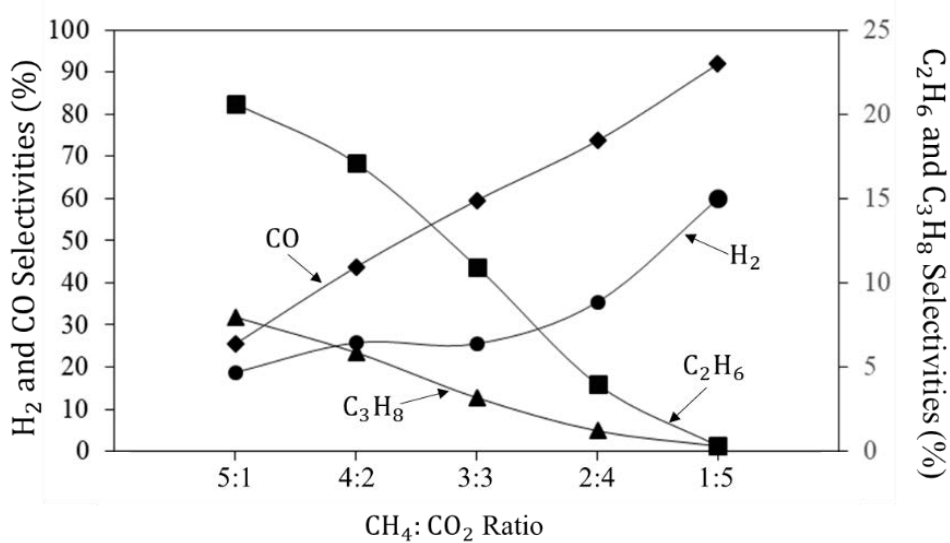
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การแปลงผันของก๊าซ CH_4 และ CO_2

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เมื่อมีการปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ค่าการแปลงผันของมีเทนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 74.71 แต่ในทางกลับกัน การแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงจากเดิม โดยค่าการสลายตัวต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 34.84

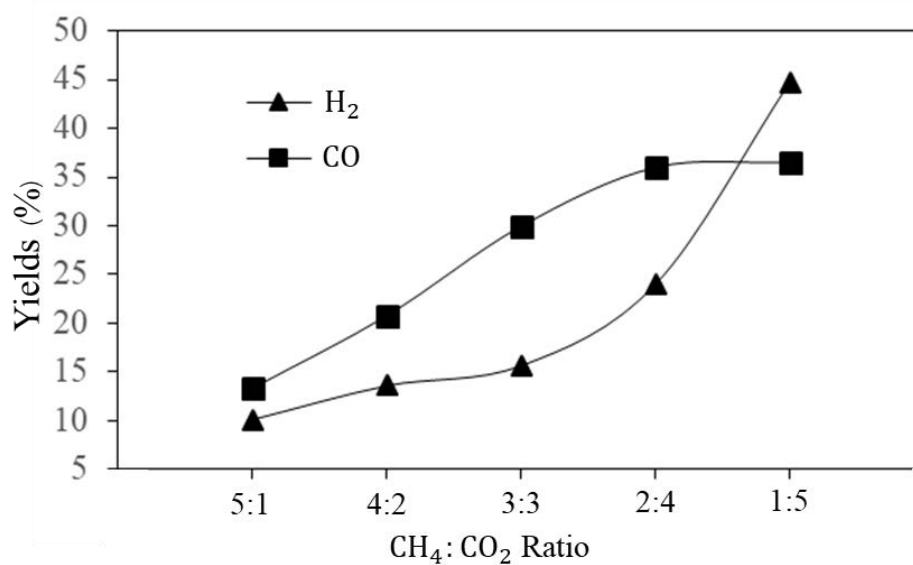


รูปที่ 4.2 ผลของ CH₄:CO₂ ที่มีต่อการแปลงผันของก๊าซ CH₄ และ CO₂

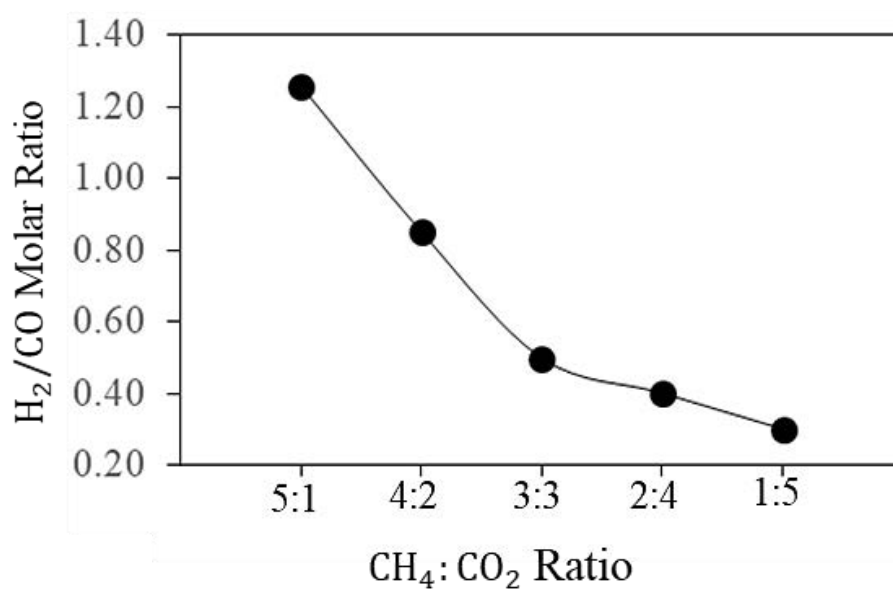
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (H₂ และ CO)



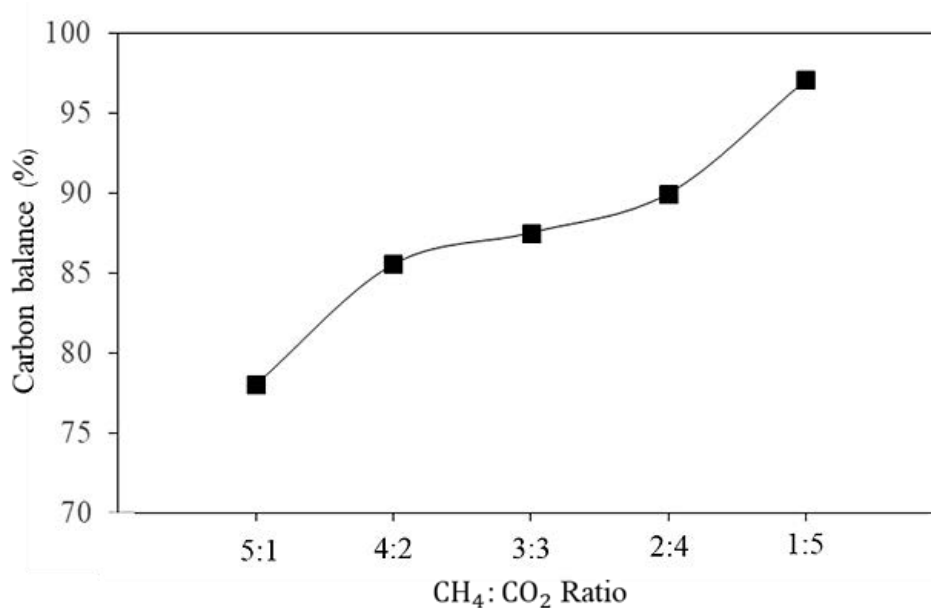
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลต่อโอกาสการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 4.6 อัตราส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อดุลของคาร์บอนอะตอม

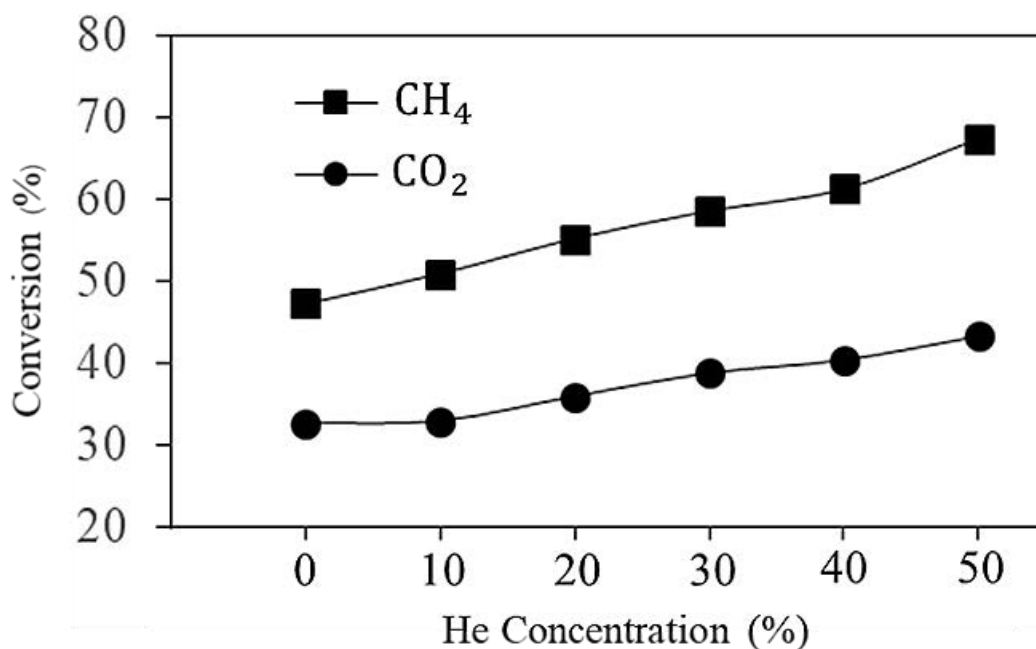
จากการวิเคราะห์การเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขการปรับอัตราส่วนของก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า โอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยโอกาสการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 91.87 ซึ่งมากกว่าโอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (ร้อยละ 59.91) คิดเป็นร้อยละ 34.79 ส่วนโอกาสการเกิดอีเทน (Ethane) และโพรเพน (Propane) มีแนวโน้มลดลง โดยที่โอกาสการเกิดอีเทนมีค่ามากกว่าโอกาสการเกิดโพรเพน ซึ่งโอกาสการเกิดก๊าซทั้งสองจะมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 0.31 จากรูปที่ 4.4 พบว่า เปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 44.76 และ 36.51 ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วน CH₄:CO₂ ลดลง จาก 5:1, 4:2, 3:3, 2:4 ถึง 1:5 และจากรูปที่ 4.5 อัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H₂/CO) มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณ CH₄ ลดลง ขณะที่ CO₂ เพิ่มขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องปกติโดยตรง เพราะการลดลงของปริมาณ CH₄ ทำให้แหล่งที่มาของ H₂ ลดลง นั่นเอง จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ดุลของคาร์บอนอะตอมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 97.08 ตามอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

4.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของ He ต่อการแปลงผันของ CH₄ และ CO₂

ได้ศึกษาผลกระทบของการปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่มีต่อการสลายตัวของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยกำหนดเงื่อนไขการศึกษาด้วยการควบคุมอัตราการไหลรวมของก๊าซในระบบคงที่เท่ากับ 100 ml/min ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วน

ระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากันคือ 50:50 45:45 40:40 35:35 30:30 และ 25:25 ตามลำดับ และความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม (He) เป็น 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

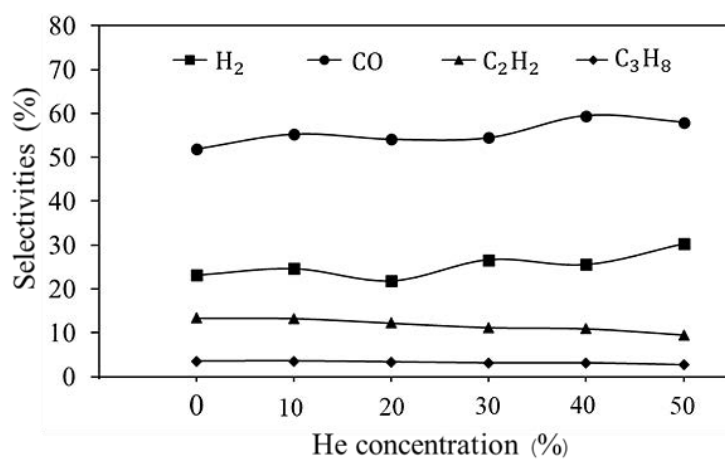
4.3.1 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การแปลงผันของ CH_4 และ CO_2



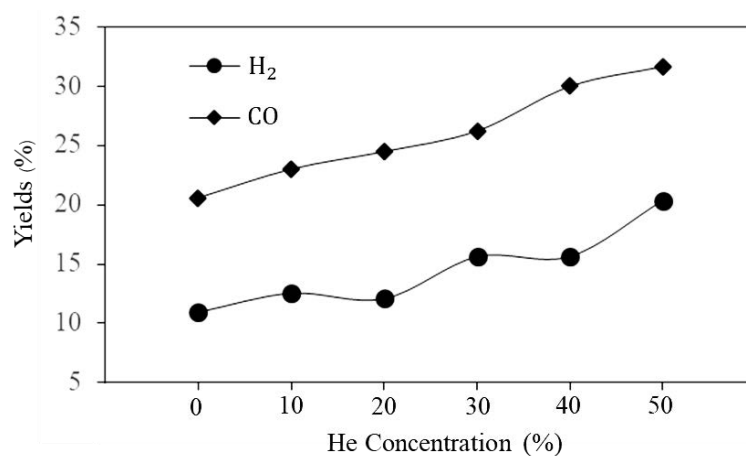
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่มีต่อการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและแสดงตามรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อมีการปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมจาก 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การแปลงผันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทน จะเห็นชัดว่าค่าการแปลงผันตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 67.37 ซึ่งมากกว่าค่าการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 43.32) คิดเป็นร้อยละ 35.70 ผลการทดลองนี้ชี้ว่า ความเข้มข้นของฮีเลียมมีผลเชิงบวกต่อปริมาณการแปลงผันของก๊าซตั้งต้น เป็นไปได้ว่า ก๊าซตั้งต้นที่ถูกเจือจางด้วยฮีเลียมเกิดปฏิกิริยาแปลงผันในพลาสมาได้ดีกว่าในกรณีก๊าซตั้งต้นมีความเข้มข้นมากกว่า รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของการแปลงผันก๊าซตั้งต้นเกือบเป็นเชิงเส้นเมื่อความเข้มข้นของ He เพิ่มขึ้นจาก 0 ไปเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์

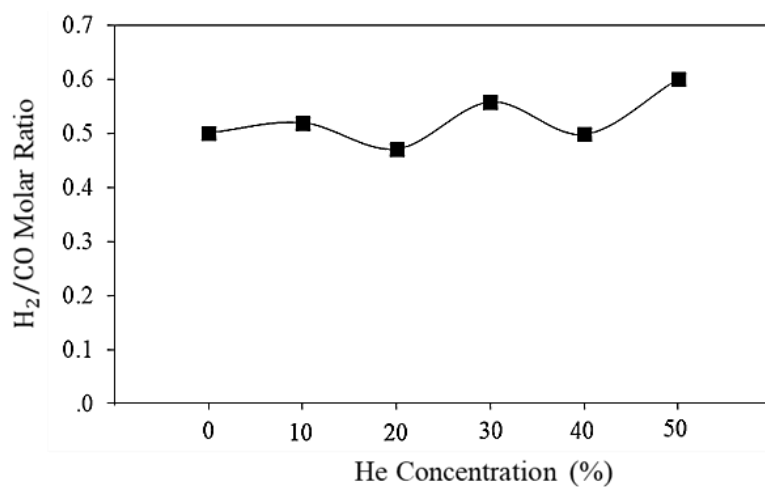
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โอกาสในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ



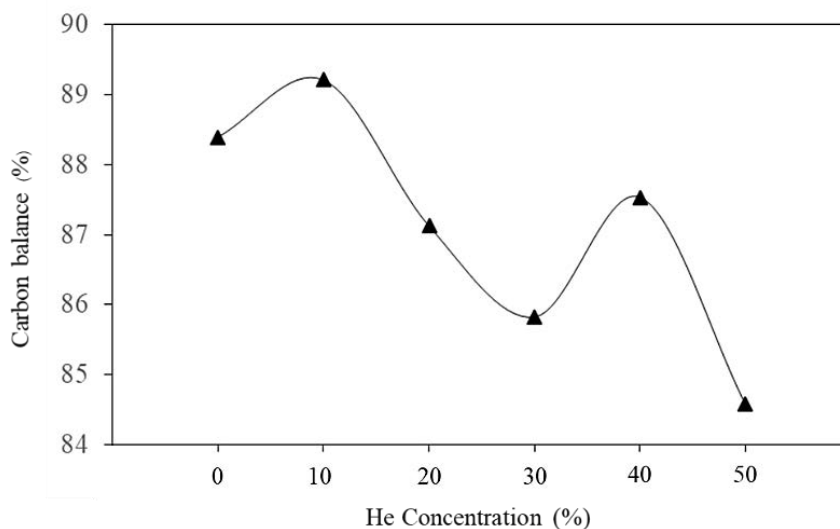
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่อโอกาสการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของฮีเลียมที่มีต่ออัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์



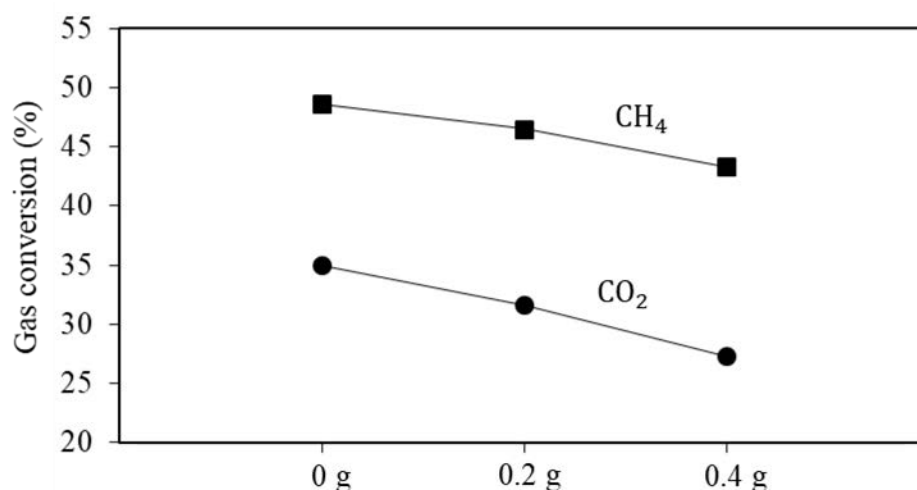
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมที่มีต่อดุลของคาร์บอนอะตอม

จากการวิเคราะห์การเกิด (โอกาสในการเกิด) ผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขการปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม จะเห็นได้ว่า โอกาสเกิดอีเทนและโพรเพนมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในช่วงร้อยละ 9-13 และร้อยละ 2-3 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 แต่โอกาสเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม โดยโอกาสการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 58.01 ซึ่งมากกว่าโอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (ร้อยละ 30.25) คิดเป็นร้อยละ 47.85 จากรูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การเกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตามการเพิ่มของความเข้มข้นของฮีเลียมหรือตามปริมาณการเจือจางก๊าซตั้งต้น ซึ่งค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 20.38 และ 31.65 ตามลำดับ แต่อัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อย และรูปที่ 4.11 ดุลของคาร์บอนอะตอมมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 84-89

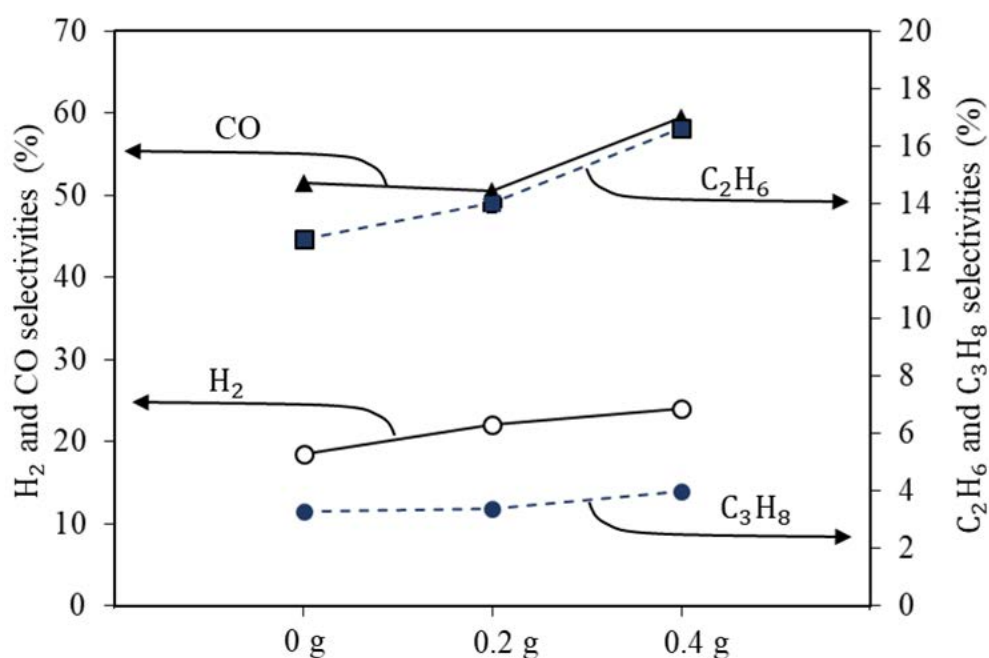
4.4 ผลของสารตัวเร่งที่มีต่อปริมาณการแปลงผันและโอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์

ในการวิจัยนี้ ทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการแปลงผัน CH_4 และ CO_2 ด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีสารตัวเร่ง $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารตัวเร่งในระบบเท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 g และกำหนดให้ $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ และ He เท่ากับ 50 (mL/min) : 50 mL/min และ 40 mL/min และอัตราการไหลรวมของก๊าซ (Total gas flow rate) เท่ากับ 100 mL/min ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 โดยการเปรียบเทียบกับกรณีการแปลงผันในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่ง พบว่า ปริมาณของตัวเร่ง $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อแยกพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งต่อการเกิดปฏิกิริยาจะพบว่า เมื่อปริมาณตัวเร่งเพิ่มขึ้นปริมาณการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2 กลับลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 กล่าวคือ

$\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลเชิงลบต่อปริมาณการแปลงผันของก๊าซ CH_4 และ CO_2 และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อโอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์ (H_2 และ CO) ดังรูปที่ 4.13 จะพบว่า โอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์ (H_2 , CO , C_2H_6 และ C_3H_8) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นดังกล่าวชัดเจนมากขึ้นเมื่อปริมาณ $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 0.4 g

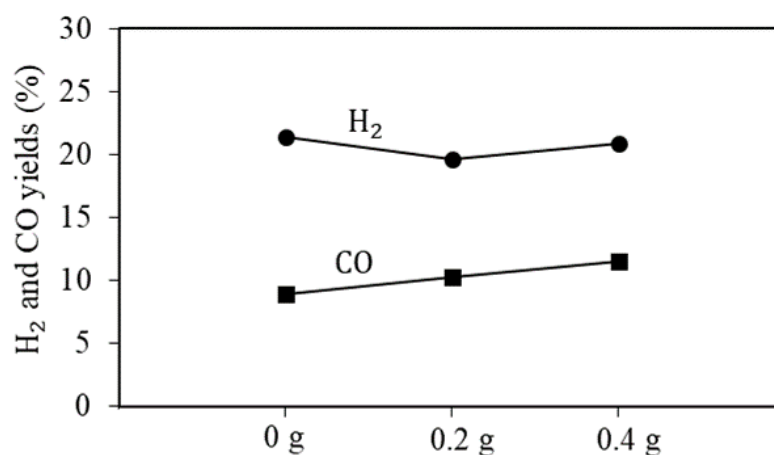


รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณ $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อปริมาณการแปลงผันของ CH_4 และ CO_2

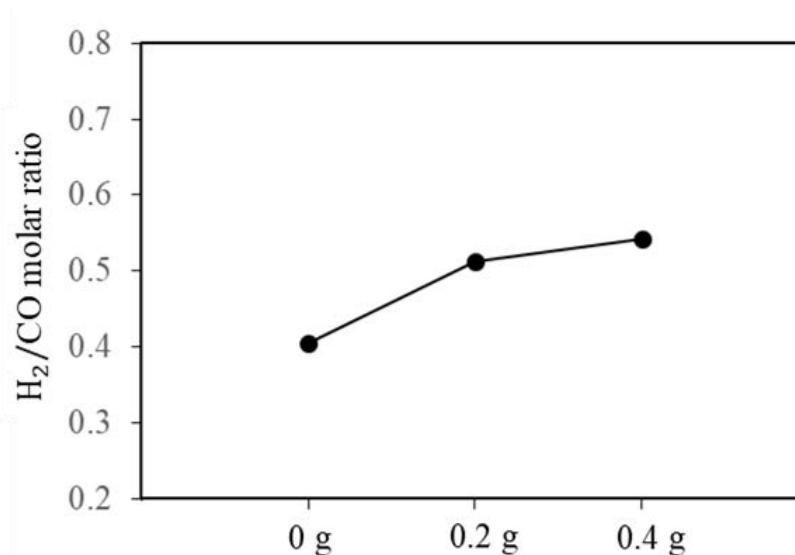


รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณ $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อโอกาสในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ (H_2 , CO , C_2H_6 และ C_3H_8)

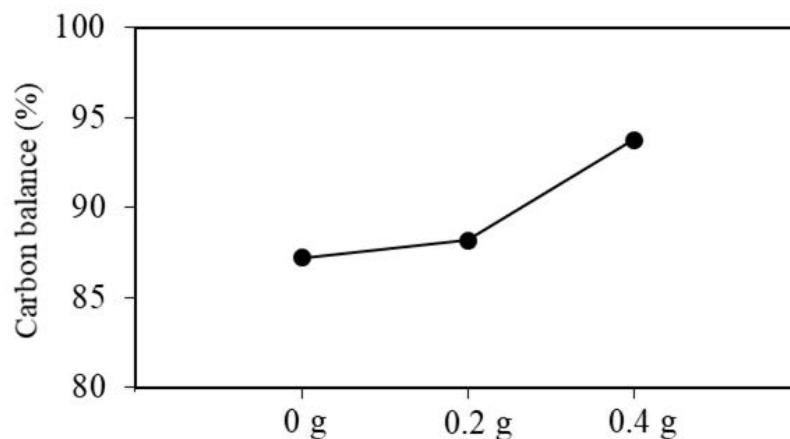
สำหรับผลของปริมาณ Ru/Al₂O₃ ต่อปริมาณการเกิดผลิตภัณฑ์ (Yields) ก๊าซ H₂ และ CO ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เราพบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าปริมาณ H₂ และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อปริมาณ Ru/Al₂O₃ เท่ากับ 0.4 g นอกจากนี้เรายังพบว่าปริมาณ Ru/Al₂O₃ มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลของ H₂ และ CO (H₂/CO molar ratio) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ Ru/Al₂O₃ ค่า H₂/CO molar ratio จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณ Ru/Al₂O₃ ต่อปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ (H₂ และ CO)



รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณ Ru/Al₂O₃ ต่ออัตราส่วนโดยโมลของผลิตภัณฑ์ (H₂/CO molar ratio)



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณ Ru/Al₂O₃ ต่อดุลของคาร์บอน (C-balance (%))

และผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Ru/Al₂O₃ (Ru/Al₂O₃ loading) ที่มีต่อ Carbon balance หรือปริมาณคาร์บอนในสารผลิตภัณฑ์เราพบว่า ร้อยละของ Carbon balance เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของสารตัวเร่ง

แม้สารตัวเร่ง Ru/Al₂O₃ จะไม่ส่งผลเชิงบวกต่อพารามิเตอร์ของการเกิดปฏิกิริยาการแปลงผัน แต่เกือบทุกพารามิเตอร์ (เฉพาะปริมาณการแปลงผันของ CO₂ และ CH₄ เท่านั้นที่ลดลงขณะที่ปริมาณ Ru/Al₂O₃ เพิ่มขึ้น) ต่างก็ได้รับผลจากการเติมสารตัวเร่ง Ru/Al₂O₃ ในปฏิกิริยาการแปลงผันของ CO₂ และ CH₄ จากผลที่ได้ สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า สารตัวเร่งที่ใช้มีผลต่อการแปลงผันของ CO₂ และ CH₄

สำหรับผลของปริมาณสารตัวเร่ง Ni/SiO₂-Al₂O₃ ที่มีต่อปฏิกิริยาการแปลงผัน CO₂ และ CH₄ นั้นเราพบในเบื้องต้นว่า สารตัวเร่งนี้มีผลต่อปฏิกิริยาดีกว่า Ru/Al₂O₃ ซึ่งทีมผู้วิจัยสรุปว่า ผลจากสารตัวเร่งนี้จะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการได้ จึงขออนุญาตนำไปรายงานในบทความวิจัยที่จะส่งขอตีพิมพ์เผยแพร่ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของปฏิกรณ์พลาสมา และการเปลี่ยนหรือแปลงผันคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงดังกล่าวนี้อยู่ในรูปของก๊าซ นั่นคือ ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ด้วยวิธีไดอิเล็กตริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา งานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขจำนวน 2 เงื่อนไขหลักคือ (1) การศึกษาด้วยการใช้อัตราการไหลของก๊าซในระบบคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขการปรับอัตราส่วนก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ปรับจากอัตราการไหล) โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมคงที่เท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ร่วมกับการปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 50:10 40:20 30:30 20:40 และ 10:50 ตามลำดับ และ (2) ศึกษาภายใต้เงื่อนไขการปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากันคือ 50:50 45:45 40:40 35:35 30:30 และ 25:25 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมตั้งแต่ 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเร่ง $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีต่อปฏิกิริยาการแปลงผันด้วย ผลจากการวิจัย สรุปได้ว่า

1. เมื่อก๊าซเกิดการดิสชาร์จจนถึงจุดที่พลาสมามีความเสถียร พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าของทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 135.57 วัตต์ และอุณหภูมิเฉลี่ยของตัวปฏิกรณ์พลาสมาประมาณ 125.47 องศาเซลเซียส
2. การปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ค่าการสลายตัวหรือการแปลงผันของก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงจากเดิม โอกาสการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (สารเคมี) มีค่ามากกว่าโอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (เชื้อเพลิง) ซึ่งมีผลต่างคิดเป็นร้อยละ 34.79 ส่วนโอกาสการเกิดอีเทน (C_2H_6) และโพรเพน (C_3H_8) มีแนวโน้มลดลง เปอร์เซ็นต์ของการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Yields) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อัตราส่วนโดยโมล (Molar ratio) ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง และดุลของคาร์บอนอะตอมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ
3. การปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม พบว่า การแปลงผันของก๊าซมีเทน จะมีค่ามากกว่าการแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยร้อยละการแปลงผันของมีเทนจะมากกว่าของคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 35.70 โดยที่โอกาสเกิด (Selectivity) อีเทนและโพรเพนมี

แนวโน้มน้อยกว่าครึ่งที่ แต่โอกาสการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากกว่าโอกาสการเกิดก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็นส่วนต่างร้อยละ 47.85 เปอร์เซ็นต์ การเกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าค่อนข้างคงที่ และดุลของคาร์บอนอะตอมมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงร้อยละ 84-89

4. การเกิดปฏิกิริยาแปลงผันด้วยพลาสมาภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่ง พบว่า ปริมาณสารตัวเร่ง Ru/Al₂O₃ มีผลเชิงลบต่อปริมาณการแปลงผันของ CH₄ และ CO₂ แต่โอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์ (H₂, CO, C₂H₆ และ C₃H₈) ปริมาณผลิตภัณฑ์ (H₂ และ CO) อัตราส่วนโดยโมลของ H₂/CO และดุลอะตอมของคาร์บอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารตัวเร่งในปฏิกิริยาการแปลงผันด้วยพลาสมา DBD

จากข้อสรุปข้างต้นนี้ ทำให้สามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า ไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา (DBD plasma) สามารถแปลงผัน CO₂ และ CH₄ เป็นก๊าซเชื้อเพลิงและสารเคมีได้ โดยก๊าซตัวกลางมีผลอย่างสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่สำคัญคือ สารตัวเร่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการแปลงผันได้ และปฏิกิริยาการแปลงผันดังกล่าวทั้งหมดนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ (แตกต่างจากปฏิกิริยาการแปลงผันด้วยความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง)

5.2 อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า เงื่อนไขที่ได้ทำการศึกษาทั้งสองเงื่อนไขมีค่าการแปลงผันของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม โดยก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซอีเทน และก๊าซโพรเพน ซึ่งระบบนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างสูงทั้งสองเงื่อนไข โอกาสเกิดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียมเพิ่มขึ้น โอกาสเกิดก๊าซอีเทน ก๊าซโพรเพน และอัตราส่วนโมลาร์มีแนวโน้มคงที่ แต่ดุลคาร์บอนอะตอมที่ได้จากการปรับอัตราส่วนของก๊าซมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าการปรับความเข้มข้นของก๊าซฮีเลียม ในกรณีของอัตราส่วนโดยโมล เมื่อมีการเติมสารตัวเร่งในปฏิกิริยาพบว่า สามารถเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ H₂/CO ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนที่หลากหลายและละเอียดมากขึ้น เช่น การปรับอัตราส่วนให้ละเอียดมากขึ้น การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่ต่างกันไป การปรับเปลี่ยนตัวเร่งเพื่อหาตัวเร่งที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาการแปลงผันของ

มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนชนิดของก๊าซผสม และการปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วน
ก๊าซตัวกลาง เป็นต้น

5.3.2 ควรศึกษาการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนด้วยวิธีการหลากหลาย
เช่น การเปลี่ยนก๊าซด้วยวิธี Cold plasma jet (CPJ) และแบบลำพลาสมา เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Annemie Bogaerts Erik Neyts Renaat Gijbels and Joost van der Mullen. Gas discharge plasmas and their applications. 12 December, 2001.
- Arlee Tamman. Desige of Hige Voltage Power Supply at Medium Frequency for Dielectric Barrier Discharge, 2011.
- Claire Tendero Christelle Tixier Pascal Tristant Jean Desmaison and Philippe Leprince. Atmospheric pressure plasmas: A review. 5 October, 2005.
- Dae Hoon Lee Kwan-Tae Kim Young-Hoon Song Woo Suk Kang and Sungkwon Jo. Mapping Plasma Chemistry in Hydrocarbon Fuel Processing Processes. 23 August, 2012.
- DanhuaMei Xinbo Zhu ChunfeiWu Bryony Ashford Paul T Williamsb and XinTu. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: Understanding the synergistic effect of plasma-catalysis, 2015.
- Danhua Mei Xinbo Zhu Ya-Ling He Joseph D Yan and Xin Tu. Plasma-assisted conversion of CO₂ in a dielectric barrier discharge reactor: understanding the effect of packing materials. 21 October, 2014.
- Helen J. Gallon Xin Tu Martyn V. Twigg J. and Christopher Whitehead. Plasma-assisted methane reduction of a NiO catalyst-Low temperature activation of methane and formation of carbon nanofibers, 2011.
- H.-E. Wagner R. Brandenburga K.V. Kozlov A.Sonnenfeld P. Michel and J.F. Behnke. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. 18 November, 2002.
- Huali Long Shuyong Shang Xumei Tao Yongxiang Yin and Xiaoyan Dai. CO₂ reforming of CH₄ by combination of cold plasma jet and Ni/ γ -Al₂O₃ catalyst. Sichuan University, 2008.
- Jan Sentek Krzysztof Krawczyk Michal Młotek Małgorzata Kalczewska Thorsten Kroker Torsten Kolb Andreas Schenk Karl-Heinz Gericke Krzysztof Schmidt-Szałowski. Plasma-catalytic methane conversion with carbon dioxide in dielectric barrier discharges. 17 October, 2009.
- Lin Chen Xingwang Zhang Liang Huang and Lecheng Lei Application of in-plasma

- catalysis and post-plasma catalysis for methane partial oxidation to methanol over a $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-(CuO/}\gamma\text{)-Al}_2\text{O}_3$ catalyst. 1 August, 2010.
- Qinqin Yu Meng Kong Tong Liu Jinhua Fei and Xiaoming Zheng. Characteristics of the Decomposition of CO_2 in a Dielectric Packed-Bed Plasma Reactor. 22 November, 2011.
- Shaojun Xu Pericles I Khalaf Philip A Martin and J Christopher Whitehead. CO_2 dissociation in a packed-bed plasma reactor: effects of operating conditions. 19 June, 2018.
- Shuang Wang Yong Zhang Xiaolin Liu and Xiangrong Wang. Enhancement of CO_2 Conversion Rate and Conversion Efficiency by Homogeneous Discharges. 13 May, 2012.
- Thorsten Kroker Torsten Kolb Andreas Schenk Krzysztof Krawczyk Michal Młotek and Karl-Heinz Gericke. Catalytic Conversion of Simulated Biogas Mixtures to Synthesis Gas in a Fluidized Bed Reactor Supported by a DBD. 17 February, 2012.
- WANG Kangjun LI Xiaosong WANG Hui SHI Chuan XU Yong and ZHU Aimin. Oxygen-Free Conversion of Methane to Ethylene in a Plasma-Followed-by-Catalyst (PFC) Reactor, 2008.
- 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, 2012.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การออกแบบ สร้าง ทดสอบและติดตั้งระบบพลาสมา



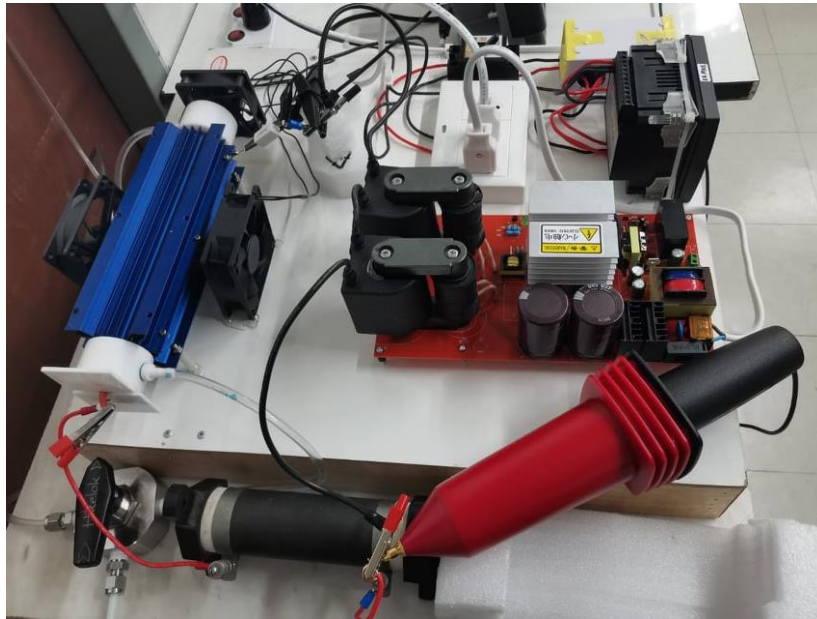
รูปที่ ก.1 ก๊าซสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบพลาสมาที่มีการติดตั้งเกจวัดแรงดันและวาล์วระบายแรงดัน



รูปที่ ก.2 แผงควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ



รูปที่ ก.3 ท่อผสมก๊าซ (Mixer unit)



รูปที่ ก.4 ระบบของเครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา



รูปที่ ก.5 ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

ภาคผนวก ข

สร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ



รูปที่ ข.1 ตรวจสอบอัตราการไหลของระบบด้วยปิเปต

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการตรวจสอบหาอัตราการใช้ของระบบ

กำหนดให้อัตราการใช้ของ He เป็น 40 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนเป็น 1:5 2:4 3:3 4:2 และ 5:1 ตามลำดับ

Sample CO ₂ :CH ₄	ครั้งที่	เวลา (s)	วัดและคำนวณจากปิเปต (mL/min)	ค่าเฉลี่ย (mL/min)	อ่านค่าจากมัลติ มิเตอร์ (mL/min)
S ₁	1	1.99	90.45	94.67 ± 3.81	101
	2	1.88	95.74		
	3	1.84	97.83		
S ₂	1	1.93	93.26	98.13 ± 4.21	106
	2	1.79	100.56		
	3	1.79	100.56		
S ₃	1	1.83	98.36	97.18 ± 5.77	110
	2	1.76	102.27		
	3	1.98	90.91		
S ₄	1	1.94	92.78	98.98 ± 6.24	114
	2	1.71	105.26		
	3	1.82	98.90		
S ₅	1	1.93	93.26	95.95 ± 2.33	116
	2	1.85	97.30		
	3	1.85	97.30		

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสลายตัว (conversion (%)) ของมีเทน

Sample	CH ₄ (mol)		Conversion (%)
	input	output	
S ₁	50.48	23.21	54.02
S ₂	38.74	18.32	52.71
S ₃	29.75	11.53	61.24
S ₄	19.13	6.16	67.80
S ₅	7.83	1.98	74.71
S ₆	44.57	23.50	47.27
S ₇	41.61	20.41	50.95
S ₈	38.64	17.30	55.23
S ₉	33.00	13.67	58.57
S ₁₀	24.46	7.98	67.37

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสลายตัว (conversion (%)) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	CO ₂ (mol)		Conversion (%)
	input	output	
S ₁	10.40	5.77	44.52
S ₂	20.79	12.90	37.95
S ₃	32.57	19.40	40.43
S ₄	44.57	26.42	40.72
S ₅	55.94	36.45	34.84
S ₆	50.01	33.63	32.75
S ₇	45.64	30.56	33.04
S ₈	42.28	27.05	36.02
S ₉	37.41	22.88	38.84
S ₁₀	27.93	15.83	43.32

ตารางที่ ค.3 แสดงผลการคำนวณหาโอกาสการเกิด (selectivities (%)) ของก๊าซไฮโดรเจน

Sample	H ₂ (mol)	CH ₄ (mol)		Selectivitie (%)
	produce	input	output	
S ₁	10.22	50.48	23.21	18.74
S ₂	10.53	38.74	18.32	25.78
S ₃	9.31	29.75	11.53	25.55
S ₄	9.19	19.13	6.16	35.43
S ₅	7.01	7.83	1.98	59.91
S ₆	9.76	44.57	23.5	23.16
S ₇	10.44	41.61	20.41	24.62
S ₈	9.34	38.64	17.3	21.88
S ₉	10.31	33.00	13.67	26.67
S ₁₀	9.97	24.46	7.98	30.25

ตารางที่ ค.4 แสดงผลการคำนวณหาโอกาสการเกิด selectivitie (%) ของคาร์บอนมอนอกไซด์

Sample	CO (mol)	CH ₄ (mol)		CO ₂ (mol)		Selectivitie (%)
	produce	input	output	input	output	
S ₁	8.13	50.48	23.21	10.40	5.77	25.48
S ₂	12.38	38.74	18.32	20.79	12.90	43.73
S ₃	18.68	29.75	11.53	32.57	19.40	59.51
S ₄	22.93	19.13	6.16	44.57	26.42	73.68
S ₅	23.28	7.83	1.98	55.94	36.45	91.87
S ₆	19.47	44.57	23.5	50.01	33.63	51.99
S ₇	20.07	41.61	20.41	45.64	30.56	55.32
S ₈	19.81	38.64	17.30	42.28	27.05	54.17
S ₉	18.46	33.00	13.67	37.41	22.88	54.52
S ₁₀	16.58	24.46	7.98	27.93	15.83	58.01

ตารางที่ ค.5 แสดงผลการคำนวณหาโอกาสการเกิด (selectivitie (%)) ของอีเทน

Sample	C ₂ H ₆ (mol)	CH ₄ (mol)		CO ₂ (mol)		Selectivitie (%)
	produce	input	output	input	output	
S ₁	3.29	50.48	23.21	10.4	5.77	20.63
S ₂	2.42	38.74	18.32	20.79	12.90	17.10
S ₃	1.72	29.75	11.53	32.57	19.40	10.96
S ₄	0.62	19.13	6.16	44.57	26.42	3.98
S ₅	0.04	7.83	1.98	55.94	36.45	0.31
S ₆	2.51	44.57	23.5	50.01	33.63	13.40
S ₇	2.42	41.61	20.41	45.64	30.56	13.34
S ₈	2.24	38.64	17.30	42.28	27.05	12.25
S ₉	1.90	33.00	13.67	37.41	22.88	11.22
S ₁₀	1.36	24.46	7.98	27.93	15.83	9.52

ตารางที่ ค.6 แสดงผลการคำนวณหาโอกาสการเกิด (selectivitie (%)) ของโพรเพน

Sample	C ₃ H ₈ (mol)	CH ₄ (mol)		CO ₂ (mol)		Selectivitie (%)
	produce	input	output	input	output	
S ₁	1.27	50.48	23.21	10.4	5.77	7.96
S ₂	0.83	38.74	18.32	20.79	12.90	5.86
S ₃	0.50	29.75	11.53	32.57	19.40	3.18
S ₄	0.19	19.13	6.16	44.57	26.42	1.22
S ₅	0.04	7.83	1.98	55.94	36.45	0.31
S ₆	0.66	44.57	23.5	50.01	33.63	3.52
S ₇	0.65	41.61	20.41	45.64	30.56	3.58
S ₈	0.62	38.64	17.30	42.28	27.05	3.39
S ₉	0.54	33.00	13.67	37.41	22.88	3.19
S ₁₀	0.40	24.46	7.98	27.93	15.83	2.80

ตารางที่ ค.7 แสดงผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการเกิด (Yields (%)) ก๊าซไฮโดรเจน

Sample	H ₂ (mol)	CH ₄ (mol)	Yields (%)
	produce	input	
S ₁	10.22	50.48	10.12
S ₂	10.53	38.74	13.59
S ₃	9.31	29.75	15.65
S ₄	9.19	19.13	24.02
S ₅	7.01	7.83	44.76
S ₆	9.76	44.57	10.95
S ₇	10.44	41.61	12.54
S ₈	9.34	38.64	12.08
S ₉	10.31	33.00	15.62
S ₁₀	9.97	24.46	20.38

ตารางที่ ค.8 แสดงผลการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการเกิด (Yields (%)) คาร์บอนมอนอกไซด์

Sample	CO (mol)	CH ₄ (mol)	CO ₂ (mol)	Yields (%)
	produce	input	input	
S ₁	8.13	50.48	10.40	13.35
S ₂	12.38	38.74	20.79	20.80
S ₃	18.68	29.75	32.57	29.97
S ₄	22.93	19.13	44.57	35.99
S ₅	23.28	7.83	55.94	36.51
S ₆	19.47	44.57	50.01	20.58
S ₇	20.07	41.61	45.64	23.00
S ₈	19.81	38.64	42.28	24.48
S ₉	18.46	33.00	37.41	26.22
S ₁₀	16.58	24.46	27.93	31.65

ตารางที่ ค.9 แสดงผลการคำนวณหาอัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

Sample	H ₂ (mol)	CO (mol)	H ₂ /CO
S ₁	10.22	8.13	1.26
S ₂	10.53	12.38	0.85
S ₃	9.31	18.68	0.50
S ₄	9.19	22.93	0.40
S ₅	7.01	23.28	0.30
S ₆	9.76	19.47	0.50
S ₇	10.44	20.07	0.52
S ₈	9.34	19.81	0.47
S ₉	10.31	18.46	0.56
S ₁₀	9.97	16.58	0.60

ตารางที่ ค.10 แสดงผลการคำนวณหาดุลของคาร์บอะตอม

Sample	CO (mol)	C ₂ H ₆ (mol)	C ₃ H ₈ (mol)	CH ₄ (mol)		CO ₂ (mol)		Carbon Balance (%)
	produce	produce	produce	input	output	input	output	
S ₁	8.13	3.29	1.27	50.48	23.21	10.4	5.77	78.02
S ₂	12.38	2.42	0.83	38.74	18.32	20.79	12.90	85.55
S ₃	18.68	1.72	0.50	29.75	11.53	32.57	19.40	87.53
S ₄	22.93	0.62	0.19	19.13	6.16	44.57	26.42	89.98
S ₅	23.28	0.04	0.04	7.83	1.98	55.94	36.45	97.08
S ₆	19.47	2.51	0.66	44.57	23.5	50.01	33.63	88.39
S ₇	20.07	2.42	0.65	41.61	20.41	45.64	30.56	89.20
S ₈	19.81	2.24	0.62	38.64	17.30	42.28	27.05	87.12
S ₉	18.46	1.90	0.54	33.00	13.67	37.41	22.88	85.82
S ₁₀	16.58	1.36	0.40	24.46	7.98	27.93	15.83	84.58



ภาพที่ ค.1 ตรวจสอบอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าของระบบขณะดีสชาร์จ



ภาพที่ ค.2 ก๊าซตัวอย่างทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยาที่นำไปวิเคราะห์

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล นายฉลาด ยืนยาว
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3-4209-00363-15-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. ตำแหน่งทางวิชาการ -
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
6. ประวัติการศึกษา



ปริญญา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2541
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

7. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

เมมเบรนพอลิเมอร์ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน เทคโนโลยีพลาสมา

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

- ปีงบประมาณ 2562 โครงการ คุณลักษณะของเมมเบรนคอมโพสิตที่เติมแต่งด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาและไททาเนียมแบบมีรูพรุนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีอย่างง่าย ทุนเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ (หัวหน้าโครงการ)
- ปีงบประมาณ 2562 โครงการ การใช้อนุภาคนาโนแบบมีรูพรุนควบคุมเชื้อราในมะขามหวาน ทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.) (หัวหน้าโครงการ)

9. ทุนการศึกษาที่ได้รับ

ทุนผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาเอก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ปี 2552 - 2553

ทุนเฟลโลวชิพระดับปริญญาเอก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ปี 2553 - 2557

10. รางวัลที่ได้รับ

รางวัลวิทยานิพนธ์ (ระดับปริญญาเอก) ดีเด่น ระดับชมเชย ปี 2558

รางวัลการนำเสนอดีเด่น ในการประชุมวิชาการ SPC2015 (Oral Presentation)

1. ชื่อ-นามสกุล นายนิคม รัตนโรจนกุล
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3-4209-01192-19-9
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. ตำแหน่งทางวิชาการ -
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก



ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
โทร. 08-722-5450 E-mail: nikom.p@rbu.ac.th

6. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย	2548
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

7. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีพลังงาน แหล่งพลังงานทดแทน พลังงานหมุนเวียน
- การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- พลาสมาเทคโนโลยี สำหรับการปรับปรุงผิววัสดุ การฆ่าเชื้อโรค การกำจัดสิ่งปนเปื้อน การกำจัดสารเคมีตกค้าง การกำจัดก๊าซพิษ และการทำปฏิกิริยาก๊าซ

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

- ปีงบประมาณ 2563 โครงการ การศึกษาการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ
ทุนสนับสนุนการวิจัย (งบประมาณแผ่นดิน) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี (หัวหน้าโครงการ)

1. ชื่อ-นามสกุล นายโกวิท เลิศวิทยานนท์
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3-8097-00203-67-8
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90120
โทร. 086-532-9531 E-mail: kowit.l@psu.ac.th
6. ประวัติการศึกษา



ปริญญา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2542
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2549
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2554

7. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ
 - Rapid forming of ceramics
 - Hydrogen production and separation
 - Agar-based direct ink writing
8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - ปี 2542 Development and quality control of raw materials for ceramic glazes and glaze binder
9. สิทธิบัตร
 - Formula and manufacturing of catalysts for hydrogen production by steam methane reforming, patent pending 2010, Thailand, 1001000486.
 - Formula and forming of alumina ceramic by agar gelcasting, patent pending, 2014, Thailand, 1401000809.
 - Processing of multi-layer ceramics with co-sintering, patent pending 2022, Thailand, 2201001552.