

ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีซาร์จในของเหลวสำหรับผลิตไฮโดรเจน

นายกอบชัย จันทร์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN LIQUID FOR HYDROGEN PRODUCTION

Mr. Kopchai Jansee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไดโอดีทริกแบริเออร์ดิซซาร์จในของเหลวสำหรับผลิตไฮโดรเจน
โดย	นายกอบชัย จันทร์ศรี
สาขาวิชา	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ปวีณา เครืออนิล)

กอบชัย จันท์ศรี: ไดอิเล็กทริกแบร์เรียร์ดิสชาร์จในของเหลวสำหรับผลิตไฮโดรเจน.

(DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN LIQUID FOR HYDROGEN

PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์,

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิงจากไอเอทานอล โดยอาศัยความร้อนในการเปลี่ยนเอทานอลซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวภายใต้อุณหภูมิห้องให้กลายเป็นไอ และส่งผ่านบริเวณดิสชาร์จของชุดกำเนิดพลาสมาที่มีการจ่ายไฟฟ้าแรงสูงย่านความถี่ต่ำ ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่พัฒนาขึ้นให้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงสุดได้ 10 kV และ 2.5 mA ตามลำดับ และตอบสนองได้ดีในย่านความถี่ 300-500 Hz เมื่อเอทานอลในสถานะไอเคลื่อนผ่านบริเวณดิสชาร์จจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับก๊าซอื่น ๆ ในอากาศและให้ผลิตภัณฑ์หลัก ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสำหรับระบบที่ได้สร้างขึ้นแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือ 10 kV และ 350 Hz ตามลำดับ อัตราการผลิตเข้าสู่สถานะคงที่หลังจากเริ่มผลิต 80 นาที นอกจากนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน พบว่า ที่ความเข้มข้นของเอทานอล 25%, 50% และ 75% มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนใกล้เคียงกันอยู่ประมาณ $1 \mu\text{mol/ml/min}$ ซึ่งมากกว่าอัตราการผลิตเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ 99.8% โดยปริมาณอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น ปริมาณของไอน้ำที่ผสมกับเอทานอลจึงมีผลต่ออัตราการผลิตด้วยเช่นกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์..... ลายมือชื่อนิติศ.....

สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270214021: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY, HYDROGEN PRODUCTION,
PLASMA REFORMING, DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

KOPCHAI JANSEE: DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN LIQUID FOR
HYDROGEN PRODUCTION. ADVISOR: PHONGPHAETH PENGVANICH, Ph.D.,
CO-ADVISOR: ASST.PROF.SUVIT PUNNACHAIYA, 97 pp.

This research focuses on the development of a hydrogen production system based on the plasma reforming method of biological ethanol in gaseous state. Ethanol, which is in liquid state at room temperature, is changed into its gaseous states by heating, and subsequently flowed through the discharge area of a plasma reactor powered by a low-frequency high-voltage power supply in continuous mode. The power supply has been designed for the maximum voltage and current of 10 kV and 2.5 mA respectively, with the operated frequency ranged between 300 and 500 kHz. The gaseous ethanol is ionized, reacts with other gases in the air, and produces several gaseous products including H₂, CH₄ and CO. An applied voltage of 10 kV and an operated frequency of 350 Hz are found to be most suited for hydrogen production using our system. Steady rate of production is reached after 80 minutes. Effect of ethanol concentration on the hydrogen production was also investigated. At 25%, 50%, and 75% concentration by volume the rate of production was found to be very close to each other (1 μmol/ml/min), and considerably higher than at 99.8% concentration.

Department : Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study : Nuclear Technology

Advisor's Signature

Academic Year : 2012

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ทางด้านพลาสมาฟิสิกส์และทฤษฎีทางด้านพลาสมา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือทดลองจนหลักการพื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์และการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดงานวิจัยและ อ.เจด็จ เย็นใจ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่างๆ

ขอขอบคุณ ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบารุงรัตน์ และนายเจนวิทย์ พรหมประสิทธิ์ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคาตาไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC) ตลอดจนแนะนำการใช้เครื่องมืออย่างถูกต้อง

ขอขอบคุณ น.ส.ลีดดา มิตรายน นายพงศกร กองศักดิ์ นายเจตกรจันทร์ จันทร์นุ้ย น.ส.วริภรณ์ รัตน์สสัย คุณบัญชา อุณพานิช ตลอดจนบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์นิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อมกันนี้ ขอขอบคุณ คุณศุภศิลป์ ดาราสุรีย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเป่าแก้ว ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนการสร้างเครื่องมือวิจัยต่างๆ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต” (CU.GRADUATE SCHOOL THESIS GRANT) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชัน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชายที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านด้วยความรักและห่วงใย จนกระทั่งการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรนี้ได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	5
2.2 ทฤษฎีทางด้านพลาสมา.....	10
2.3 ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จในบรรยากาศ.....	14
2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก.....	16
2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเอทานอล.....	18
2.6 ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography).....	21
2.7 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี.....	26
3. การออกแบบเครื่องมือวิจัย.....	28
3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ.....	29
3.2 การออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ.....	34
4. วิธีดำเนินงานและผลการวิจัย.....	38
4.1 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ.....	38
4.1.1 ทดสอบการทำงานแบบเปิดวงจร.....	39

บทที่	หน้า
4.1.2 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวต้านทาน 10 MΩ ขนาด 10 W	39
4.1.3 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบแบรี เออร์คิสซาร์จที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นคู่ขนาน.....	40
4.1.4 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบแบรี เออร์คิสซาร์จที่มีโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอก.....	41
4.1.5 ทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท.....	44
4.2 การทดสอบการกำเนิดพลาสมา.....	45
4.3 การทดสอบการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	48
4.3.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.3.2 การเก็บก๊าซตัวอย่าง.....	51
4.3.3 การผลิตไฮโดรเจนด้วยพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะ ของเหลว.....	51
4.3.4 การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงของเอทานอลในสถานะ ก๊าซ.....	53
4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิง.....	55
4.4.1 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซ ไฮโดรเจน.....	55
4.4.2 ช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสม (Sampling time).....	60
4.4.3 ผลของความเข้มข้นโดยปริมาตรของเอทานอลที่เหมาะสม.....	63
5. สรุปวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. ก๊าซโครมาโทกราฟี.....	74
ภาคผนวก ข. ความดันไอและความหนาแน่นของสาร.....	76
ภาคผนวก ค. ส่วนประกอบของวงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้และอ่านความถี่.....	80
ภาคผนวก ง. วงจรขับสัญญาณย่านความถี่เสียง.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกประเภทของพลาสติก	13
2.2	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	17
2.3	ค่าสภาพทนต่อสนามไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกต่างๆ	18
2.4	คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงเคมีของเมทานอล เอทานอล และน้ำ	19
4.1	ผลการตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในภาวะโหลดชนิด ต่างๆ	44
4.2	เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทดลอง.....	60
4.3	ผลของความเข้มข้นเอทานอลที่มีต่ออัตราการผลิตไฮโดรเจน.....	65
4.4	เปรียบเทียบความเข้มข้นไฮโดรเจนที่ได้จาก น้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทา นอลบริสุทธิ์.....	66
4.5	เปรียบเทียบอัตราการผลิตของ H ₂ /CH ₄ และ H ₂ /CO.....	66
4.6	เปรียบเทียบ % Molar fraction ของ H ₂ , N ₂ , CH ₄ and CO.....	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สถานะของสสารและอนุภาคนิวทริโน	11
2.2	โครงสร้างภายนอก DBDs แบบแผ่นสี่เหลี่ยมคู่ขนาน (ก)-(ค) และแบบทรงกระบอก (ง)-(จ).....	14
2.3	แสดงลำดับขั้นของการเกิด Microdischarges ใน DBDs: (ก) การเกิดไอออไนเซชันของก๊าซ (ข) กลุ่มอิเล็กตรอนมาถึงวัสดุไดอิเล็กทริกที่ขั้วตรงข้าม (ค) อิเล็กตรอนแผ่ออกไปตามพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กทริก	15
2.4	แสดง Microdischarges ที่มีขนาด 6 ซม×6 ซม เป็นเวลา 20 ms	16
2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและอนุภาคนิวทริโนของสารแต่ละชนิด	20
2.6	หลักการแยกสารเนื้อเดียวด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี.....	22
2.7	องค์ประกอบหลักของก๊าซโครมาโทกราฟี.....	23
2.8	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (SHIMADZU Gas Chromatograph รุ่น GC-8A).....	24
2.9	ส่วนแสดงผลข้อมูล (C-R8A Chromatopac).....	25
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง % Abundance และ Retention time ในการวิเคราะห์ด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี.....	26
3.1	แผนภาพระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมาฟอร์มมิงแบบแบริเออร์คิสซาร์จ.....	28
3.2	แผนภาพโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่ออกแบบขึ้น.....	30
3.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำที่ออกแบบขึ้น.....	30
3.4	วงจรสำหรับตรวจวัดค่า V-I ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	31
3.5	วงจรถ่ายทอดความถี่ปรับค่าได้และวงจรร่านค่าความถี่ที่ออกแบบขึ้น.....	32
3.6	ส่วนประกอบภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ.....	33
3.7	แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	33
3.8	โครงสร้างชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน (ก) ภาคตัดขวางของชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน (ข) แผ่นทองแดงขนาด 8 ซม× 8 ซม ติดกับแผ่นกระจกด้านหนึ่ง (ค) แผ่นอะลูมิเนียมแบบกริดขนาด 8 ซม× 8 ซม ติดกับแผ่นกระจกด้านหนึ่ง.....	35

ภาพที่		หน้า
3.9	ชุดกำเนิดพลาสมา DBD แบบแผ่นคู่ขนานขนาด 12 ซม × 14 ซม.....	35
3.10	ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วทรงกระบอก.....	36
3.11	ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท.....	37
3.12	โครงสร้างชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอก (ก) ภาพตัดขวางของท่อแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 1.405 และ 1.84 เซนติเมตร ตามลำดับ (ข) ภาพตัดขวางของท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและ ภายนอกเท่ากับ 1.56 และ 1.81 เซนติเมตร ตามลำดับ (ค) ขนาดและโครงสร้าง ของชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้ว (ง) ขนาดและโครงสร้างของชุดกำเนิด พลาสมาแบบท่อแก้วคนโท.....	37
4.1	แผนภาพระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....	38
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่ต่อโหลด.....	39
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน....	40
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมา แบบแผ่นคู่ขนาน.....	41
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมา....	42
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมา แบบทรงกระบอกท่อแก้วคนโท.....	43
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่งของ ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท.....	44
4.8	การจัดระบบทดลองการกำเนิดพลาสมาแบริเออร์ดีสชาร์จแบบแผ่นคู่ขนาน.....	45
4.9	ลักษณะของพลาสมาจากชุดกำเนิดแบบแผ่นคู่ขนานที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่ ไฟฟ้าต่างๆ (ก) 200 Hz 30 kVpp (ข) 300 Hz 30 kVpp (ค) 400 Hz 24 kVpp (ง) 500 Hz 15 kVpp (จ) 600 Hz 10 kVpp (ฉ) 700 Hz 9 kVpp (ช) 800 Hz 6 kVpp (ซ) 900 Hz 5kVpp.....	46
4.10	สัญญาณรูปคลื่นชาชนี่ที่อ่านด้วยออสซิลโลสโคป (ก) กรณีไม่เกิดพลาสมา (ข) กรณีไม่เกิดพลาสมา.....	47
4.11	ลักษณะของพลาสมาจากชุดกำเนิดแบริเออร์ดีสชาร์จ (ก) แบบท่อแก้ว (ข) แบบ ท่อแก้วคนโท.....	48

ภาพที่	หน้า
4.12	49
4.13	49
4.14	50
4.15	50
4.16	52
4.17	53
4.18	54
4.19	55
4.20	56
4.21	57
4.22	58
4.23	59
4.24	61
4.25	62
4.26	63
4.27	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มมากขึ้นทุกปีตามการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจโลก ทำให้เกิดปัญหาความมั่นคงทางพลังงาน นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีผู้ให้ความสนใจเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมากขึ้น เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน ดังนั้นจึงมีการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น เช่น เป็นเชื้อเพลิงในจรวดขับเคลื่อนสำหรับส่งยานอวกาศ และเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนผสมเข้าไปในเชื้อเพลิงรถยนต์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ และช่วยลดปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

การผลิตไฮโดรเจนกำลังได้รับความสนใจในการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวาง ซึ่งการผลิตไฮโดรเจนนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของเอทานอลอุณหภูมิสูงในสถานะก๊าซและแยกไฮโดรเจนออกจากคาร์บอนอะตอมในเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในการเข้าทำปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น กระบวนการแยกไฮโดรเจนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในน้ำที่มีองค์ประกอบพื้นฐานของไฮโดรเจนและออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกเก็บที่แคโทดและก๊าซออกซิเจนถูกเก็บที่แอโนด และอีกวิธีหนึ่งคือกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรไลซิส (Photoelectrolysis) โดยใช้แสงอาทิตย์แยกโมเลกุลของน้ำ

นอกจากวิธีผลิตไฮโดรเจนดังกล่าวแล้ว วิธีพลาสมารีฟอร์มมิงก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเพิ่มขึ้น โดยหลักการเบื้องต้นของการกำเนิดพลาสมา คือ การใส่พลังงานเข้าไปในก๊าซที่เป็นกลางก่อให้เกิดการไอออไนซ์ (Ionize) เป็นพาหะประจุประกอบด้วย อิเล็กตรอน ไอออน และยังคงมีอะตอมของก๊าซเป็นกลางที่แตกตัวไม่หมดปะปนอยู่ ด้วยหลักการนี้เมื่อนำไปทำพลาสมารีฟอร์มมิงกับเอทานอล หลังการไอออไนซ์จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลกับน้ำในสถานะก๊าซ ซึ่งพลาสมาจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น วิธีการนี้มีข้อดี คือ มีสมรรถนะสูงและเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงเวลาอันสั้นๆ มีอัตราการเปลี่ยนของสารตั้งต้นที่สูง โดยไม่ต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ระบบมีขนาดเล็กกะทัดรัด

การออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเป็นแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) โดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

แบบต่อเนื่อง (Continuous AC) สามารถสร้าง Non-equilibrium plasma ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ และยังสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์และกำลังไฟฟ้าให้ได้ปริมาณของการทำปฏิกิริยาได้ตามต้องการอีกด้วย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในชุดกำเนิดพลาสมา นำไปสู่การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงไฮโดรคาร์บอนและแอลกอฮอล์ภายใน DBD ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Sarmiento และ Hu ได้มีการศึกษาผลของขนาดของศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซและความถี่ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน [1] [2] พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาอัตราการไหลของก๊าซแต่ละชนิดที่เหมาะสมก่อน การเพิ่มขนาดของศักย์ไฟฟ้าจะส่งผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของความถี่สนามไฟฟ้าที่ป้อนนั้นค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากจะมีค่าสูงเฉพาะบางความถี่เท่านั้น

ในทางปฏิบัติกระบวนการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซไฮโดรคาร์บอนหรือแอลกอฮอล์ต้องทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อไม่ให้สารกลับมารวมตัวเป็นของเหลวอีกครั้ง แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเกิดพลาสมารีฟอร์มมิงในเอทานอลที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ โดยพลาสมาจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การออกแบบอุปกรณ์และการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้เอทานอลในสถานะของเหลวหรือก๊าซเกิดการแตกตัวและก่อให้เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิง นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฮโดรเจน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge หรือ DBD) ภายในของเหลวสำหรับนำไปใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ DBD ในของเหลวที่ความดันบรรยากาศ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดพลาสมา เช่น ชนิดของก๊าซ ความถี่และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
3. ศึกษาผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับของเหลว ได้แก่ น้ำ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ DBD ในของเหลวที่ความดันบรรยากาศ
3. เลือกก๊าซและของเหลวที่ใช้ในการทดลอง
4. หาความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่สามารถผลิตพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง
5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้หลังทำปฏิกิริยากับพลาสมา
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและประเมินผลการทดลอง
7. สรุปผลงานทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตพลาสมาแบบ DBD ที่เกิดขึ้นภายในของเหลวที่ความดันบรรยากาศมากขึ้น
2. สามารถออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาที่สามารถปรับความถี่ได้
3. สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาระหว่างพลาสมาและของเหลวได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ในปี 1995 K. Okazaki, S. Hirai, T. Nozaki, K. Ogawa, and K. Hijikata ได้ทำการศึกษาเรื่อง Plasma Chemical Reaction at Atmospheric Pressure for High Efficiency Use of Hydrocarbon Fuels เป็นการนำพลาสมาใช้ในการผลิตเมทานอลด้วยปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างมีเทนและออกซิเจน สามารถผลิตเมทานอลได้ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่ำ อาศัยการกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับรูปสี่เหลี่ยมแบบพัลส์ที่มีความถี่ 250 Hz และแรงดันไฟฟ้าปรับได้ระหว่าง 3-17 kV ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตเมทานอลที่ประสิทธิภาพ 32.6% ของผลผลิตทั้งหมด เมื่อป้อนออกซิเจนที่มีความเข้มข้น 5%
2. ในปี 2007 Belen Sarmiento, J.Javier Brey, Inmaculada G. Viera, Agustin R. Gonzalez-Elipse, Jose Cotrino, Victor J. Rico ได้ทำการศึกษาเรื่อง Hydrogen Production by Reforming of Hydrocarbons and Alcohols in a Dielectric Barrier Discharge เป็นการนำพลาสมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของไฮโดรคาร์บอนหรือแอลกอฮอล์กับคาร์บอนไดออกไซด์หรือน้ำ สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ที่ความดันบรรยากาศและใช้อุณหภูมิที่ต่ำประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยพลาสมาที่ใช้เป็นแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) ซึ่งมีช่วงการทำงานที่กว้างและต้นทุนต่ำ ผลจากการทดลองพบว่า ได้ทำการรีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทนไปเป็น

- คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน 70% ส่วนรีฟอร์มมิงของเมทานอลและเอทานอลไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน 100% โดยไม่มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนตั้งต้นเหลืออยู่
3. ในปี 2008 H. Homma, H. Katayama, and K.Yasuoka ได้ทำการศึกษาเรื่อง Pulsed Dielectric Barrier Discharge of Argon Gas in Gas-Liquid Two-Phase Flow เป็นการศึกษาการกำเนิดพลาสมาในของเหลว ด้วยการป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าไปในน้ำทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) แบบแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนาน ซึ่งใช้แผ่นไดอิเล็กทริกบาง (แผ่นกระจก) มีขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ มีช่องว่างระหว่างแผ่นไดอิเล็กทริก 1 mm สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 3-20 kHz
 4. ในปี 2010 D.S. Levko, A.I. Shchedrin, V.Ya. Chernyak and S.V.OI'shevskii ได้ทำการศึกษาเรื่อง Efficiency of Ethanol Conversion in Equilibrium and Nonequilibrium Plasmas เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลในสถานะของเหลว โดยเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium and Nonequilibrium Plasmas ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 300 mA และป้อนอากาศเข้าไปในสารละลายเอทานอล ภายในขั้วไฟฟ้าเกิดการไอออไนซ์โมเลกุลเอทานอลและโมเลกุลน้ำเกิดแตกตัวเป็นอะตอมไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระ ผลการทดลองพบว่า ค่ายังผลการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen yield) จำนวนได้ 40 % แต่จากการทดลองจริงได้ 32 %
 5. ในปี 2010 Guillaume Petitpas, Jose Gonzalez-Aguilar, Adeline Darmon and Laurent Fulcheri ได้ทำการศึกษาเรื่อง Ethanol and E85 Reforming Assisted by a Non-thermal Arc Discharge เป็นการนำพลาสมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้กระแสไฟฟ้าในช่วง 200-660 mA และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 15 kV เมื่อป้อนอากาศเข้าไปในเอทานอลจะเกิดการดีสชาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการแยกสลายโมเลกุลเอทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
 6. ในปี 2012 Y.P. Hu, Gesheng Li, Yingduo Yang, Xiaohong Gao, Zhihong Lu ได้ทำการศึกษาเรื่อง Hydrogen generation from hydro-ethanol reforming by DBD-plasma เป็นการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลความเข้มข้น 75% โดยปริมาตรด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ โดยการให้ความร้อนแก่เอทานอลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทำให้อเอทานอลเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซและควบคุมด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ 11.2 kHz และแรงดันไฟฟ้า 18 kV ด้วยกำลังไฟฟ้า 100 W ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพของการรีฟอร์มมิงไฮโดรเจนสูงประมาณ 45%

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางไฟฟ้าและกระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิง ทฤษฎีทางด้านพลาสมา ประเภทของพลาสมา ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (DBD) ลักษณะเฉพาะของ DBD ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับ DBD คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก คุณสมบัติของเอทานอล ก๊าซโครมาโทกราฟี และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี

2.1 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแบ่งเป็นหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า การสลายโมเลกุลด้วยแสง และกระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิง สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังเป็นกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจุบันวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงนับว่าเป็นวิธีการใหม่ที่ได้รับ ความสนใจมากขึ้น [3]

2.1.1 กระบวนการทางความร้อน (Thermal Processes)

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยความร้อนเป็นการให้ความร้อนกับสารประกอบกลุ่มไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ น้ำมัน ถ่านหิน และเอทานอลเพื่อแยกไฮโดรเจนออกจากโมเลกุล แบ่งได้เป็นหลายประเภท คือ

1. กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming processes) เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการป้อนไอน้ำ (Steam) เข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนในสถานะก๊าซ เช่น ก๊าซมีเทน ก๊าซโพรเพน ก๊าซบิวเทน เมทานอล และเอทานอล กระบวนการนี้ต้องทำที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงและต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากต้องใช้พลังงานที่สูงมากในการดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลของไอน้ำและสารไฮโดรคาร์บอน ส่วนออกซิเจนที่เหลือจากไอน้ำและคาร์บอนที่เหลือจากไฮโดรคาร์บอนจะรวมตัวกันเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2. กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide reforming processes หรือ Dry reforming processes) เป็นกระบวนการที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยกว่า กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพเร็วกว่า เนื่องจากปริมาณ

คาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไปเกาะที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อายุการใช้งานสั้น อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการผลิต จะช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เป็นก๊าซเรือนกระจกกลงได้ [3] นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมระบบการทำงานได้ง่ายกว่าวิธีการแรก

3. กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) เป็นกระบวนการทางเคมีระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับก๊าซออกซิเจนที่ไม่ต้องใส่พลังงานจากภายนอกเข้าไป เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้เกิดพลังงานขึ้นภายในระบบ กระบวนการนี้มีข้อจำกัด คือ ปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่ระบบต้องมีปริมาณที่เหมาะสม และต้องมีระบบแยกก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศก่อนเพื่อไม่ให้ก๊าซออกซิเจนกลับเข้าไปรวมกับก๊าซไฮโดรเจนแล้วกลายเป็นน้ำ

4. กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับออกซิเดชันบางส่วน หรือเรียกว่า ออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง (Auto thermal reforming) เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการป้อนไอน้ำ (Stream) และก๊าซออกซิเจนรวมกันเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนที่มากกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ วิธีการนี้กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันและมีการใช้งานจริงในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น

2.1.2 กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrolytic Processes)

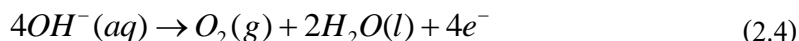
กระบวนการทางไฟฟ้าเป็นการแยกน้ำเพื่อที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนด้วยไฟฟ้า [4] โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดซึ่งจุ่มในน้ำ โดยที่ขั้วแคโทดต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่จะสร้างประจุไฟฟ้าลบขึ้น ซึ่งจะผลักริเล็กตรอนออกจากขั้วนี้ ส่วนที่ขั้วแอโนดต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่จะสร้างประจุไฟฟ้าบวกขึ้นทำหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอน ทำให้การไหลของอิเล็กตรอนครบวงจร ซึ่งโมเลกุลของน้ำที่อยู่ใกล้ขั้วแคโทดจะถูกแยกออกเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 2.1



ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะจับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดซึ่งจะกลายเป็นไฮโดรเจนอะตอม ดังสมการที่ 2.2 และไฮโดรเจนอะตอมนี้จะไปรวมกับไฮโดรเจนอะตอมตัวอื่นเป็นโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ 2.3



ส่วนที่ขั้วแอโนด ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะให้อิเล็กตรอนกับขั้วแอโนด และจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ตัวอื่นกลายเป็น โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนและน้ำดังสมการที่ 2.4



ในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในปฏิกิริยาได้มาจากแหล่งพลังงานตั้งต้นอื่น ถ้าจะนำก๊าซไฮโดรเจนนี้มาผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้ นั้นยังไม่คุ้มค่างบต้นทุนในการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า เพราะราคาต้นทุนเกือบทั้งหมดของกระบวนการนี้ขึ้นกับมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายน้ำ

2.1.3 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิง

วิธีพลาสมารีฟอร์มมิงสำหรับผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลมีลักษณะเด่นกว่าวิธีรีฟอร์มมิงแบบดั้งเดิม อาศัยคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของพลาสมาซึ่งประกอบด้วย พฤติกรรมร่วม พลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ อุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมา และความถี่พลาสมา

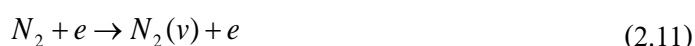
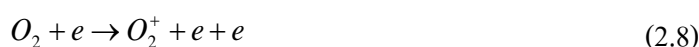
การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ อาศัยการไอออไนซ์ของก๊าซที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่คั่นกลางด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก เพื่อช่วยให้สามารถใช้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นโดยไม่เกิดการ Arcing ระหว่างขั้วไฟฟ้า พลาสมาที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นกระจายทั่วบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งจัดเป็น Non-equilibrium plasma ที่มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมากกว่าอุณหภูมิของไอออนหรือโมเลกุลก๊าซมาก โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 1-10 eV จากหลักการนี้ นำไปใช้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเอทานอล และเป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพในอนาคต

วิธีการพลาสมารีฟอร์มมิงเป็นหนึ่งในทางเลือกด้านการรีฟอร์มมิงไฮโดรคาร์บอนแบบดั้งเดิม [8] [9] เพราะสามารถทำปฏิกิริยาได้สูงที่อุณหภูมิต่ำ โดยพลาสมาทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีฟอร์มมิงแทนความร้อน

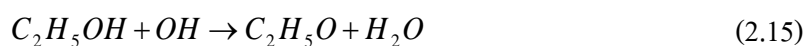
กระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิง จึงมุ่งเน้นไปที่ Non-equilibrium plasma การผลิตจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบกำเนิด ความดัน และแหล่งจ่ายไฟฟ้า ข้อดีของวิธีนี้ คือ มีสมรรถนะที่ดีและเกิดปฏิกิริยาได้สูงในช่วงการเปลี่ยนแปลงสั้น ๆ มีอัตราการเปลี่ยนของสารตั้งต้นที่สูง โดยไม่ต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดเล็กกะทัดรัด แต่ข้อเสียคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีราคาแพง

การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ จัดเป็นการผลิตพลาสมาแบบ Non-equilibrium plasma เริ่มจากให้พลังงานความร้อนกับเอทานอล จนระเหยกลายเป็นไอ (Vapor) แล้วเคลื่อนที่ไปปนกับอากาศที่ประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน และก๊าซ

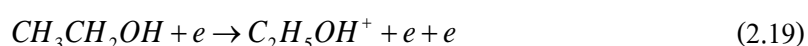
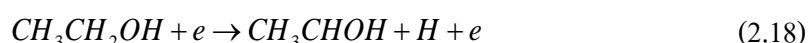
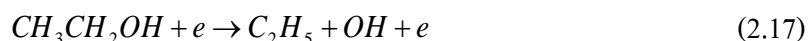
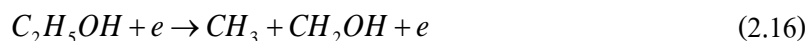
ไนโตรเจน เคลื่อนที่ผ่านบริเวณดิซซาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีผลต่อการไอออไนซ์ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้าชนโมเลกุลอากาศจะทำให้โมเลกุลออกซิเจนเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน ไอออนบวกของออกซิเจน อนุมูลและอะตอมของออกซิเจน เกิดพลาสมาเป็นเส้นสีตามชนิดของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านและยังมีโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนที่เป็นกลางเนื่องจากแตกตัวไม่หมด ดังสมการที่ 2.5-2.8 [8] ส่วนโมเลกุลไนโตรเจนเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน ไอออนบวกของไนโตรเจน อนุมูลและอะตอมของไนโตรเจน และยังมีโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่เป็นกลางดังสมการที่ 2.9-2.13 [8]



เมื่อปริมาณของเอทานอลในสถานะก๊าซเพิ่มขึ้น จะเคลื่อนที่ไปค้นอากาศที่สว่างอยู่ในระบบออกมา มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลกับอะตอมออกซิเจนและอนุมูลไฮดรอกซิลดังสมการที่ 2.14-2.15 [8] [9]



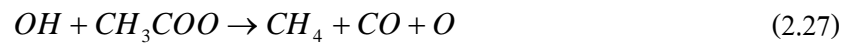
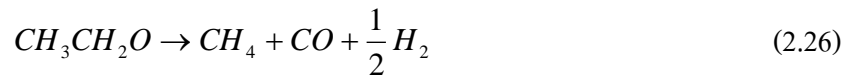
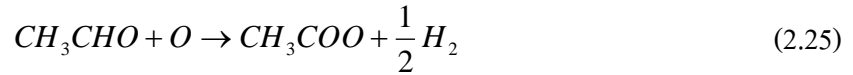
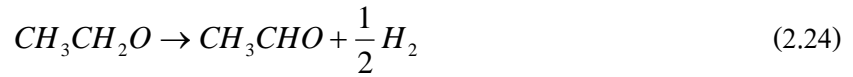
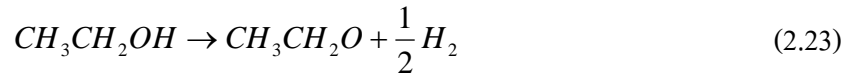
อิเล็กตรอนอิสระและอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์อากาศจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเอทานอลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน ไอออนบวกของเอทานอล อะตอมไฮโดรเจน อนุมูลไฮดรอกซิล และโมเลกุลของเอทานอลที่แตกตัวไม่หมดดังสมการที่ 2.16-2.19 [8] [9]



นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์อากาศหรือเอทานอลเข้าชนโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน ไอออนบวกของน้ำ อะตอมไฮโดรเจน อนุมูลไฮดรอกซิล และโมเลกุลของน้ำที่แตกตัวไม่หมดดังสมการที่ 2.20-2.22 [8] [9]



ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาหลักสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ที่ทำให้เอทานอลเกิดการสลายโมเลกุลด้วยกระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลัก ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น แสดงได้ดังสมการที่ 2.23-2.27 [8]

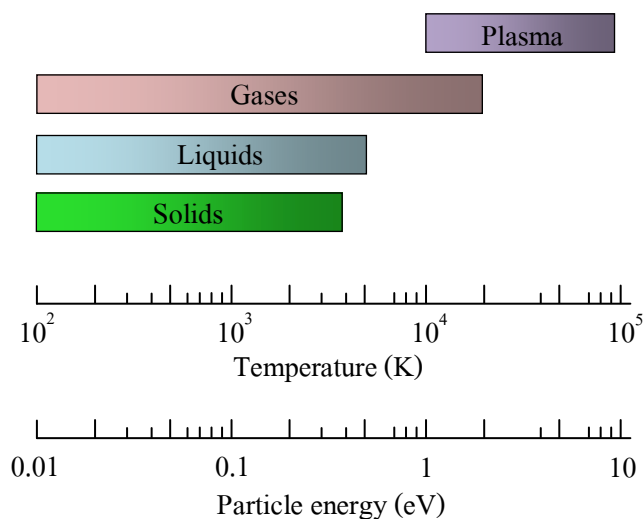


2.2 ทฤษฎีทางด้านพลาสมา

2.2.1 คำจำกัดความและคุณสมบัติที่สำคัญของพลาสมา

พลาสมา คือ สถานะที่สี่ของสสารที่แยกออกจากของแข็ง ของเหลว และก๊าซ [5] ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงช่วงอุณหภูมิหรือพลังงานของอนุภาค พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้ง ประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีความหนาแน่นเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective behavior) ออกมา

พฤติกรรมร่วมของพลาสมามีหลายรูปแบบ เช่น การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ซึ่งไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่ผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ซึ่งมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาคสองตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมเป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน



ภาพที่ 2.1 สถานะของสสารและอุณหภูมิ [3]

เมื่อก๊าซได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดการ ไอออไนซ์จะมีผลทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็น อิเล็กตรอน ไอออน และยังมีอะตอมของก๊าซบางตัวที่เป็นกลางเนื่องจากยังแตกตัวไม่หมดรวมอยู่ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและไอออนกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลางหรือ โมเลกุล (Recombination)

อิเล็กตรอนเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการถ่ายโอนพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกแล้วทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัว และเนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลที่เบาที่สุดในพลาสมา ดังนั้นจึงถูกรังและดูดกลืนพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกได้ง่ายที่สุด เป็นผลทำให้อิเล็กตรอนถ่ายโอนพลังงานให้กับโมเลกุลของก๊าซด้วยการชน เป็นสาเหตุทำให้ก๊าซเกิดการ ไอออไนซ์ การ ไอออไนซ์จะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นสามารถอธิบายด้วยระดับของ ไอออไนเซชัน

ระดับของไอออไนเซชัน

ตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจจากความหนาแน่นของอนุภาคมีประจุในพลาสมา คือ ระดับไอออไนเซชันของก๊าซ ซึ่งเป็นสัดส่วนของอนุภาคในสถานะก๊าซที่แตกตัวกับความหนาแน่นของก๊าซทั้งหมดดังสมการที่ 2.28

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad (2.28)$$

α คือ ระดับไอออไนเซชันของก๊าซ

n_i คือ ความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัว

n คือ ความหนาแน่นของก๊าซทั้งหมด

อุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมา

ก๊าซในเชิงสมดุลความร้อนมีอนุภาคที่มีความเร็วหลายค่า และการแจกแจงความเร็วเหล่านี้เรียกว่า Maxwellian velocity distribution เกี่ยวข้องกับพลังงานจลน์ของอนุภาคที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของพลาสมา ในฟิสิกส์พลาสมา อุณหภูมิของพลาสมามีหน่วยเดียวกับพลังงาน เช่น $KT = 1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J} \approx 11,600\text{ K}$ อุณหภูมิสูงนั้นมีได้หมายความว่าต้องร้อนมาก เช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอนในหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าสูงประมาณ 20,000 K แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่รู้สึกร้อนเพราะความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นน้อยกว่าความหนาแน่นของก๊าซที่ความดันบรรยากาศและปริมาณความร้อนในหลอดไฟถูกถ่ายโอนไปยังผนังของหลอดไฟ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมาสามารถบอกคุณสมบัติของพลาสมาได้หลายอย่างตามหัวข้อต่อไป

Debye Length

ตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญของพลาสมาคือ Debye Length เมื่อสนามไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นในพลาสมา อนุภาคมีประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอนซึ่งมีมวลเบาและเคลื่อนที่ได้ดีกว่าไอออน จะปรับตัวเพื่อตอบสนองต่ออิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยจะเคลื่อนที่เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าภายในขึ้นมาหักล้างสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Debye shielding ปรากฏการณ์นี้ทำให้ประจุที่อยู่ห่างจากบริเวณที่สนามไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นเป็นระยะทางหนึ่งไม่เห็นสนามไฟฟ้านั้น เสมือนว่าไม่มีสนามไฟฟ้านั้นอยู่ ระยะทางดังกล่าวเรียกว่า Debye Length ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.29

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (2.29)$$

ϵ_0 = ค่าสภาพยอมผ่านได้ของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

e = ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน = 1.602×10^{-19} คูลอมป์

ความถี่พลาสมา

ความถี่ของการสั่นของอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า ความถี่พลาสมา ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและมวลของอิเล็กตรอน เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนที่มีมวลเบาและวิ่งได้เร็วกว่าไอออนพยายามที่จะเคลื่อนที่เพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางของพลาสมาเอาไว้ โดยแรงเฉื่อยทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถหยุด ณ จุดสมดุลได้ แต่กลับมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาแทนด้วยความถี่ที่แสดงตามสมการที่ 2.30

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.30)$$

m_e = มวลของอิเล็กตรอน

n_e = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

2.2.2 ประเภทของพลาสมา [6]

การแบ่งประเภทของพลาสมามีหลายวิธี เช่น แบ่งตามระดับการเกิดไอออนไนเซชันหรือแบ่งตามอุณหภูมิของอนุภาค สำหรับการแบ่งตามระดับการไอออนไนเซชัน พลาสมาที่อยู่ในระดับไอออนไนเซชันต่ำมีความหนาแน่นของอนุภาคมีประจุที่แตกตัวน้อยกว่าความหนาแน่นของก๊าซ เราเรียกว่า Weakly-ionized gas แต่ถ้าก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุทั้งหมดหรือเกือบหมดซึ่งมีความหนาแน่นของอนุภาคมีประจุที่แตกตัวเกือบเท่ากับความหนาแน่นของก๊าซ เราเรียกว่า Fully-ionized gas สำหรับการแบ่งตามอุณหภูมิของพลาสมา หากอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมากกว่าอุณหภูมิของไอออนหรือโมเลกุลก๊าซมาก เราเรียกว่า Non-equilibrium plasma ซึ่งอุณหภูมิของอิเล็กตรอนอาจสูงถึง 10^4 - 10^5 K (1-10 eV) ขณะที่ก๊าซอยู่ในระดับอุณหภูมิต่ำคืออุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากับอุณหภูมิของไอออนหรือโมเลกุลก๊าซเราเรียกว่า Equilibrium plasma ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกประเภทของพลาสมา [6]

Plasma	State	Example
High temperature plasma (Equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g$, $T_g = 10^6 - 10^8$ K $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Laser fusion plasma
Thermal plasma (Quasi-equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g$, $T_g \leq 2 \times 10^4$ K $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Arc plasma, plasma torches, RF inductively coupled discharges
Non thermal plasma (Non-equilibrium plasma)	$T_e \gg T_i \approx T_g$, $T_g = 300 \dots 10^3$ K $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	Glow, Corona, APPJ, DBD, MHCD, OAUGDP, plasma needle etc

2.3 ไอเดียเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จในบรรยากาศ

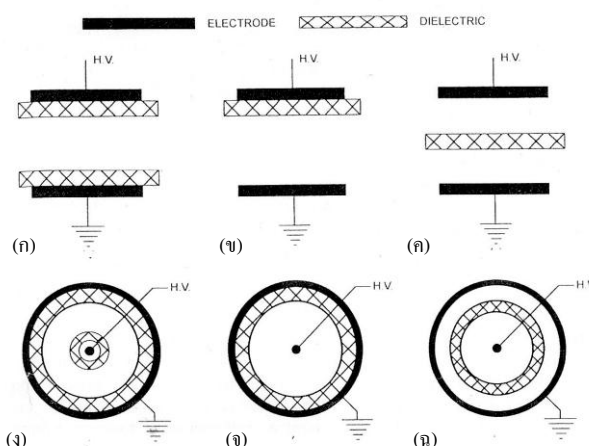
Atmospheric Dielectric barrier discharges (DBDs) สามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศ และมีประวัติศาสตร์อันยาวนานภายหลังปีคริสต์ศักราช 1860 โครงสร้างของ DBD ประกอบด้วย อิเล็กโทรด ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและกั้นด้วยฉนวนที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก สามารถป้อน แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งกระแสตรง (DC) กระแสสลับ (AC) หรือเป็นแบบพัลส์ผ่านขั้วอิเล็กโทรด

2.3.1 การใช้งานของ DBD

การใช้งาน DBD อย่างกว้างขวางครั้งแรก คือ การผลิตโอโซน สำหรับการทำน้ำประปา [11] สิทธิบัตรต่าง ๆ เหล่านี้ตีพิมพ์ในเยอรมนีในปีคริสต์ศักราช 1860 ในปัจจุบัน DBD ได้ถูกนำมาใช้งานเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ ฟิล์มบาง และพอลิเมอร์อย่างแพร่หลาย

2.3.2 ลักษณะเฉพาะของ DBD

โดยปกติแล้ว DBD อาจจะมีโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมคู่ขนานหรือทรงกระบอกดังภาพที่ 2.2 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมคู่ขนานมักใช้ในงานเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ ฟิล์มโลหะบาง หรือพอลิเมอร์ ส่วนแบบทรงกระบอกจะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศ เช่น การผลิตโอโซนเชิงอุตสาหกรรมที่ความดันบรรยากาศโดยใช้อากาศหรือออกซิเจนเป็นก๊าซในการทำปฏิกิริยา

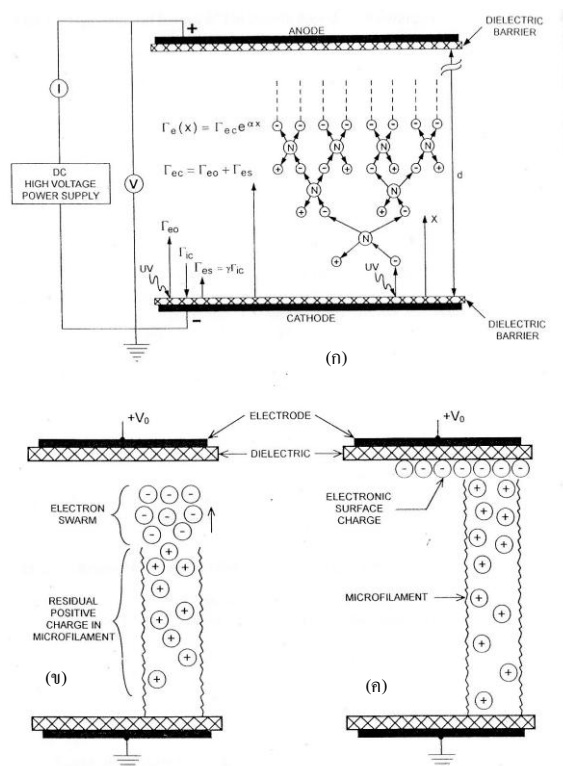


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างภายนอก DBDs แบบแผ่นสี่เหลี่ยมคู่ขนาน (ก)-(ค) และแบบทรงกระบอก (ง)-(ฉ) [11]

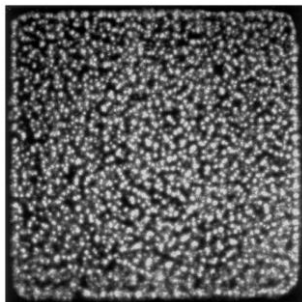
2.3.3 ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับ DBDs

การศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใน DBD นั้นอาจเริ่มจากการอธิบายลำดับขั้นของการเกิด Microdischarge ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกเมื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงระหว่างอิเล็กโทรดและมี

พลังงานเพียงพอที่จะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซตามภาพที่ 2.3 (ก) และก่อไอออไนซ์ต่อไปเรื่อย ๆ ตรวจจับที่ยังป้อนแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนั้นเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของไอออน ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างมาถึงอิเล็กโทรดขั้วแอโนดได้ในช่วงระดับนานโนวินาทีตามภาพที่ 2.3 (ข) และเมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนมาถึงอิเล็กโทรดขั้วแอโนด กลุ่มอิเล็กตรอนจะแผ่ขยายไปเหนือพื้นผิวและพบกับประจุบวกที่ขั้วแอโนดตามภาพที่ 2.3 (ค) ส่วนไอออนยังคงเคลื่อนที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในระหว่างอิเล็กตรอนที่ผิวไดอิเล็กทริกที่แอโนดกับกลุ่มของไอออนซ้ำ ปัจจุบันนี้เองที่มีผลต่อการลดลงของสนามไฟฟ้า [12] และพบว่าพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละแบบมีผลต่อการฟอร์มตัวของ Current filament หรือ Microdischarges การเริ่มต้นของจำนวน Current filament แสดงได้ตามลำดับชั้นในภาพที่ 2.4 และจากการทดลองกำเนิดพลาสมาในห้องมืด โดยเริ่มจับภาพของช่องว่างอากาศ 1 mm ผ่านอิเล็กโทรดแผ่นคู่ขนานโปร่งใส ใช้แก้วเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก หลังจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง และคาดว่าขนาด Filament Radius ประมาณ 0.1 mm ตามภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 แสดงลำดับชั้นของการเกิด Microdischarges ใน DBDs: (ก) การเกิดไอออไนเซชันของก๊าซ (ข) กลุ่มอิเล็กตรอนมาถึงมาถึงวัสดุไดอิเล็กทริกที่ขั้วตรงข้าม (ค) อิเล็กตรอนแผ่ออกไปตามพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กทริก [11]



ภาพที่ 2.4 แสดง Microdischarges ที่มีขนาด 6 ซม×6 ซม เป็นเวลา 20 ms [13]

2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก

ในการเลือกใช้วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบ DBD จะต้องคำนึงถึง ชนิดของวัสดุ สภาพความทนต่อสนามไฟฟ้าแรงสูง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ดังนี้

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

เมื่อพิจารณาแผ่น โลหะขนานกันสองแผ่นที่มีพื้นที่ A และวางห่างกันเป็นระยะ d ในกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่น โลหะเป็นอากาศ [14] เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้า V_0 ให้กับแผ่นโลหะโดยแผ่นโลหะด้านหนึ่งมีประจุ $+Q$ และอีกด้านหนึ่งมีประจุ $-Q$ จะสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าก่อนใส่วัสดุไดอิเล็กทริก C_0 ได้ดังสมการที่ 2.31

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} \quad (2.31)$$

C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าก่อนใส่วัสดุไดอิเล็กทริก (ฟารัด)

V_0 คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนใส่วัสดุไดอิเล็กทริก (โวลต์)

Q คือ ค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

เมื่อใส่แผ่นไดอิเล็กทริกในช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเป็นค่า V ซึ่งมีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.32

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.32)$$

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าหลังใส่วัสดุไดอิเล็กทริก (ฟารัด)

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังใส่วัสดุไดอิเล็กทริก (โวลต์)

Q คือ ค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

ดังนั้นหลังใส่วัสดุไดอิเล็กทริก ศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง ส่งผลทำให้ค่าประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือเก็บประจุได้มากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้า (C) ยังแปรผันโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) คือ วัสดุใดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงแสดงว่ามีความสามารถในการเก็บประจุได้ดี แต่วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำมีความสามารถในการเก็บประจุต่ำตามสมการที่ 2.33

$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.33)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามักจะมีวัสดุไดอิเล็กทริกกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดนั้นมี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [14]

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
สุญญากาศ	1	พอลิไวนิลคลอไรด์	3.18
อากาศ (1 atm)	1.00059	เพล็กซิกลาส	3.4
อากาศ (100 atm)	1.0548	ยาง	3
ก๊าซอาร์กอน	1.00051	ควอตซ์	4.3
ก๊าซออกซิเจน	1.00049	แก้ว	5-10
เทฟลอน	2.1	เอทานอล	24.3
พอลิเอทิลีน	2.25	น้ำ	80.4

ค่าความสามารถทนต่อสนามไฟฟ้า (Dielectric strength)

เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการที่จะเก็บพลังงานไว้ได้ที่ความต่างศักย์สูงๆหรือปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาความเป็นฉนวนไว้ได้ [15] ซึ่งแสดงในหน่วยของความต่างศักย์ต่อหน่วยความยาว ดังตารางที่ 2.3 หากวัสดุไดอิเล็กทริกถูกป้อนด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง อาจทำให้ความเค้นของอิเล็กตรอนหรือไอออนในการที่จะพยายามไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าเกินกว่าค่าสภาพทนต่อสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกถูกทำลาย ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น และทำให้เสียสมบัติความเป็นฉนวนของวัสดุ

การสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุเป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ และมีเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าเฟสของความต่างศักย์ไฟฟ้า 90° จะไม่มีการสูญเสียพลังงานระหว่างแผ่นโลหะ แต่ในความจริงแล้วเฟสกระแสไฟฟ้าจะนำหน้าเฟสความต่างศักย์อยู่ $90^\circ - \delta$ ซึ่งเป็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของตัวนำ เรียก δ ว่า dielectric loss angle และผลคูณของ $K \tan \delta$ คือ ปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนของตัวนำ ซึ่งค่า K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความสามารถทนต่อสนามไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกต่าง ๆ [15]

วัสดุ	(kV/mm)	วัสดุ	(kV/mm)
อากาศ	1.181-2.756	เพล็กซิกลาส	17.716-38.976
น้ำกลั่น	3.149	พอลิเอทิลีน	17.716-47.244
แก้ว	3.585	พอลิโพลีลีน	19.685
ควอตซ์	5.905-7.874	พอลิสไตรีน	19.685
พอลิคาร์บอเนต	14.960-37.992	พอลิไวนิลคลอไรด์	28.543
ไนลอน	15.748	เทฟลอน	39.370

2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน สามารถละลายทั้งน้ำและสารละลายอินทรีย์อื่น ๆ เอทานอลอาจอยู่ในรูปของ เอทานอลไร้ น้ำ (Anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์สูง และเอทานอลที่มีน้ำ (Hydrous ethanol) เอทานอลมีสูตรเคมี C_2H_5OH ลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีความไวไฟสูง มีน้ำหนักโมเลกุล 46.07 กรัม/โมล ความหนาแน่น 0.789 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -114.1 องศาเซลเซียส จุดเดือด 78.5 องศาเซลเซียส ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการของเมทานอล เอทานอล และน้ำ

2.5.1 คุณสมบัติที่สำคัญของเอทานอล [17]

1. การเดือดของเอทานอล

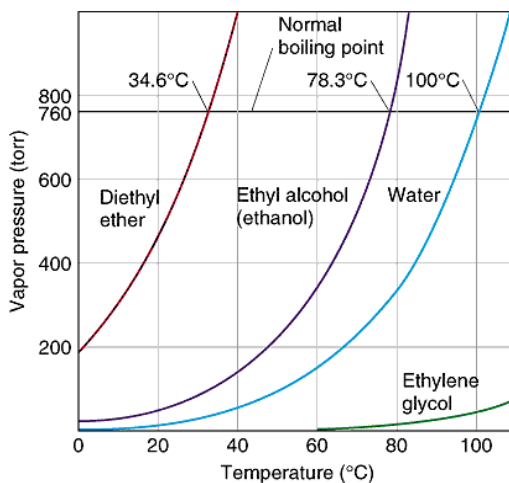
การเดือด คือ การเกิดฟองอากาศขึ้นภายในของเหลวที่พยายามดันขึ้นมาที่ผิวหน้าของเหลว ทำให้โมเลกุลของเหลวที่เคยอยู่บริเวณนั้นถูกฟองอากาศผลักไป ทำให้ระดับของเหลวขยายตัวขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ถูกกดด้วยความดันบรรยากาศ ดังนั้นการเดือดจะเกิดขึ้นได้เมื่อความดันไอของของเหลวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศซึ่งสำหรับเอทานอลจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 78 องศาเซลเซียส

2. ความดันไอของเอทานอล

ความดันไอของเอทานอลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่อเอทานอลมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอของเอทานอลจะสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในสาร เช่น แรงลอนดอน แรงดึงดูดระหว่างพันธะไฮโดรเจน เป็นต้น สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยสามารถระเหยเป็นไอได้ง่าย มีความดันไอสูง และมีจุดเดือดต่ำ เช่น เอทานอล เป็นต้น ส่วนสารที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากจะกลายเป็นไอได้ยาก มีความดันไอต่ำ และจุดเดือดสูง เช่น น้ำ เป็นต้น ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ของความดันไอกับอุณหภูมิของเอทานอลและน้ำแสดงดังภาพที่ 2.5 (ดูรายละเอียดของความดันไอ ความหนาแน่นที่อุณหภูมิใดๆ ของเอทานอลและน้ำในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงเคมีของเมทานอล เอทานอล และน้ำ [16]

คุณสมบัติ	เมทานอล	เอทานอล	น้ำ
สูตรเคมี	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	H ₂ O
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	32.04	46.67	18.02
ลักษณะ	ของเหลวไม่มีสี	ของเหลวไม่มีสี	ของเหลวไม่มีสี
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.7918	0.789	1
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	65	78	100
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	11-12	13-14	-
ความดันไอ (kPa) 20 องศาเซลเซียส	13.02	5.95	2.33



ภาพที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและอุณหภูมิของสารแต่ละชนิด

ที่มา : กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์. สารละลาย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

www.satit.nu.ac.th/nud/strand/science/File/c/สารละลาย1.ppt [17]

2.5.2 การเจือจางสารละลายเอทานอล [17]

วิธีเตรียมสารละลายเจือจาง ทำได้โดยเติมน้ำลงไปในสารละลายเข้มข้นมาตรฐานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรที่ต้องการก่อนนำไปกวนให้เข้ากัน ดังนั้นสารละลายก่อนและสารละลายที่ทำให้เจือจางจะมีเนื้อของตัวถูกละลายเท่ากัน นอกจากนี้ผลของการเจือจางสารละลายจะทำให้จำนวนอนุภาคของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในสารละลายนั้นลดลงและมีผลต่อจุดเดือดและความดันไอ ดังนี้

1. การลดต่ำลงของความดันไอ (Vapor pressure lowering)

ความดันไอของสารละลายต่ำกว่าความดันไอของเอทานอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน เพราะที่ผิวหน้าของสารละลายมีจำนวนโมเลกุลของตัวทำละลายน้อยลง เนื่องจากมีโมเลกุลของตัวถูกละลายปะปนอยู่บ้าง จึงทำให้กลายเป็นไอน้ำได้น้อยลงตามกฎของราอูลท์ ดังนี้

$$P_{\text{solution}} = X_1 P_1^0 \quad (2.34)$$

$$P_{\text{solution}} = \text{ความดันไอของสารละลาย}$$

$$X_1 = \text{เศษส่วนโมลของตัวทำละลาย}$$

$$P_1^0 = \text{ความดันไอของตัวทำละลายบริสุทธิ์}$$

$$X_1 = 1 - X_2 \quad (2.35)$$

$$X_2 = \text{เศษส่วนโมลของตัวถูกละลาย}$$

แทนค่า X_1 จากสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 1 จะได้

$$P_1^0 - P_{\text{solution}} = X_2 P_1^0 \quad (2.36)$$

2. การสูงขึ้นของจุดเดือด (Boiling point elevation)

การที่ความดันไอของสารละลายลดต่ำลง มีผลทำให้จุดเดือดสารละลายสูงกว่าจุดเดือดของเอทานอลบริสุทธิ์ และจุดเยือกแข็งของสารละลายต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของเอทานอลบริสุทธิ์ดังนี้

$$\text{จุดเดือดของสารละลายสูงขึ้น} = T_b^0 - T_b$$

$$T_b = \text{จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์}$$

$$T_b^0 = \text{จุดเดือดของสารละลาย}$$

ΔT_b เป็นค่าที่ขึ้นกับจำนวนอนุภาคของตัวทำละลายในสารละลายและชนิดของตัวทำละลาย แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของตัวถูกละลาย

$$\Delta T_b = K_b m \quad (2.37)$$

$$m = \text{โมแลลลิตีของสารละลาย}$$

$$K_b = \text{จุดเดือดของสารละลายที่เพิ่มขึ้นเมื่อตัวถูกละลาย 1 โมล}$$

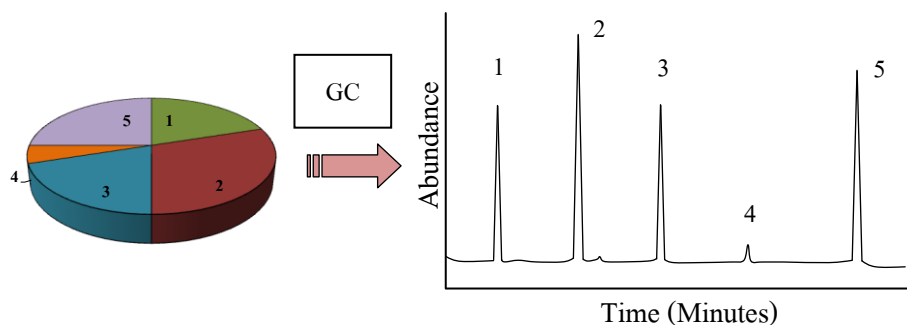
ละลายในตัวทำละลาย 1 kg

2.6 ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

ก๊าซโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคการแยกสารเนื้อเดียวออกจากกัน โดยอาศัยหลักการที่สารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายและถูกดูดซับต่างกัน จึงทำให้สารแต่ละชนิดแยกตัวออกจากกันได้

2.6.1 หลักการของก๊าซโครมาโทกราฟี

ก๊าซโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคการแยกสารเนื้อเดียวออกจากกัน โดยสารตัวอย่างที่จะนำเข้าสู่ระบบจะต้องสามารถระเหยกลายเป็นไอได้และมีความเสถียรเมื่อถูกความร้อน [18] [19] สารตัวอย่างที่เป็นไอจะถูกพาด้วยก๊าซพา (Mobile phase) ไปยังคอลัมน์ (Stationary phase) สารตัวอย่างจะกระจายอยู่ในก๊าซพาและคอลัมน์ ทำให้องค์ประกอบของสารผสมแยกตัวออกจากกัน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์เฟสคงที่ด้วยเวลาที่เข้าสู่เครื่องตรวจวัดสัญญาณที่ต่างกัน สัญญาณการตรวจวัดที่ได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณจะถูกบันทึกและแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 หลักการแยกสารเนื้อเดียวด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี

ที่มา : รุจิลักษณ์ รัตตะรมย์. เอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง “ ก๊าซโครมาโทกราฟี ”
[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.docstoc.com/docs/45375250/Gas-Chromatography-GC--squalane> [18]

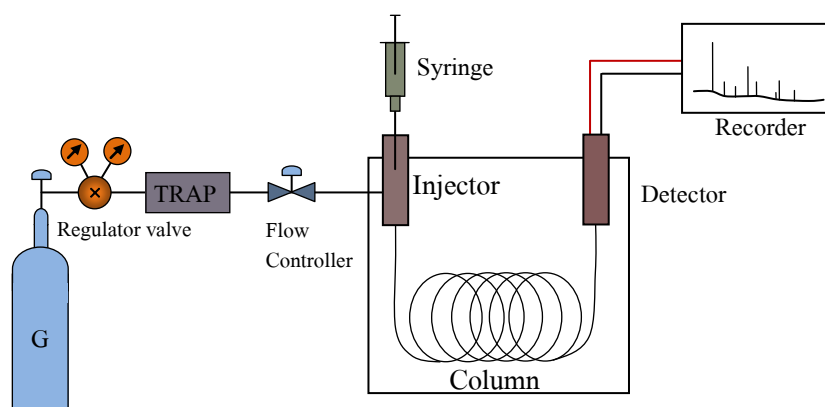
2.6.2 ชนิดของก๊าซโครมาโทกราฟี

สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามชนิดของ Stationary phase ดังนี้

1. Gas-Liquid: Stationary phase เป็นของเหลวที่ถูกดูดซับอยู่บนของแข็งซึ่งนำไปละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายแล้วเคลือบบน Solid supports ที่ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกสาร เมื่อสารตัวอย่างที่เป็นก๊าซของสารที่ผสมกันอยู่ สารตัวอย่างผ่านคอลัมน์จะแยกออกจากกันได้ด้วยการกระจายตัวที่ต่างกันระหว่างเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) กับเฟสคงที่ (Stationary phase) ถ้าก๊าซใดที่ละลายใน Liquid phase ได้ดีจะถูกจับไว้นานกว่าก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ก่อนเพราะถูกจับไม่ดี
2. Gas-Solid: Stationary phase เป็นของแข็ง มักใช้วิเคราะห์ Atmospheric gases (O_2 , N_2 , Ar, CO_2 , H_2S , CO) ดังนั้นใช้แยกสารที่เป็นก๊าซหรือสารที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ มักจะบรรจุด้วย Active solids เช่น Molecular sieves, silica gel และ Activated carbon เป็นต้น

2.6.3 องค์ประกอบหลักของก๊าซโครมาโทกราฟี

ส่วนสำคัญของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี คือ คอลัมน์ที่ทำหน้าที่แยกสารเนื้อเดียวออกจากกัน โดยสารตัวอย่างที่จะนำเข้าสู่ระบบจะถูกฉีดเข้าอินเจกเตอร์และผสมกับก๊าซพา (Carrier gas) ในเฟสเคลื่อนที่ เพื่อนำสารตัวอย่างไปยังคอลัมน์ (Stationary phase) แล้วตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดสัญญาณ สัญญาณการตรวจวัดที่ได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณจะถูกบันทึกและแสดงผลการวิเคราะห์ ดังแผนภาพที่ 2.7 ซึ่งส่วนประกอบหลักของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ได้แก่ อินเจกเตอร์, คอลัมน์โครมาโทกราฟี และ เตาอบ ประกอบอยู่ภายในตัวเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ดังภาพที่ 2.8 อีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนตรวจวัดสัญญาณและแสดงผลข้อมูล ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.7 องค์ประกอบหลักของก๊าซโครมาโทกราฟี

ที่มา : รุจิลักษณ์ รัตตะธรรมย์. เอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง “ ก๊าซโครมาโทกราฟี ”

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.docstoc.com/docs/45375250/Gas-Chromatography-GC--squalane> [18]

1. ก๊าซพา

ก๊าซพาที่ใช้เป็น Mobile phase นั้นต้องเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาสารตัวอย่างที่ทดสอบ ได้แก่ N_2 , He, Ar, CO_2 หน้าที่ของก๊าซพา คือ นำก๊าซตัวอย่างจากจุดฉีด (Sample injection port) ไปยังหัววัดสัญญาณ ซึ่งก๊าซพาต้องผ่าน Filter หรือ Gas Traps ก่อน และต้องควบคุมให้อัตราการไหลของก๊าซคงที่ สำหรับ Packed column อัตราการไหลของก๊าซพาอยู่ในช่วง 25-150 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วน Capillary column อัตราการไหลของก๊าซพาอยู่ในช่วง 1-25 มิลลิลิตรต่อนาที

2. อินเจคเตอร์

การนำสารเข้าสู่ระบบจะใช้การฉีด โดยเพิ่มอุณหภูมิภายในของอินเจคเตอร์ ให้สูงกว่าในเตาอบ ประมาณ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอและส่งเข้าสู่คอลัมน์ด้วยก๊าซพาในเฟสเคลื่อนที่

3. คอลัมน์โครมาโทกราฟี

ตัวอย่างที่กลายเป็นไอจะเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งเป็นเฟสคงที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

ก. Packed column ประกอบไปด้วย Solid material ที่เฉื่อย มีเนื้อละเอียดเคลือบด้วย Stationary phase ความยาวของ Packed column จะอยู่ประมาณ 1.5-10 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-4 มิลลิเมตร

ข. Capillary column เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.2 มิลลิเมตร ประกอบด้วย Wall coated open tubular เคลือบผนังภายในด้วย Liquid stationary phase และ Support coated tubular เคลือบผนังภายในด้วย Solid stationary phase

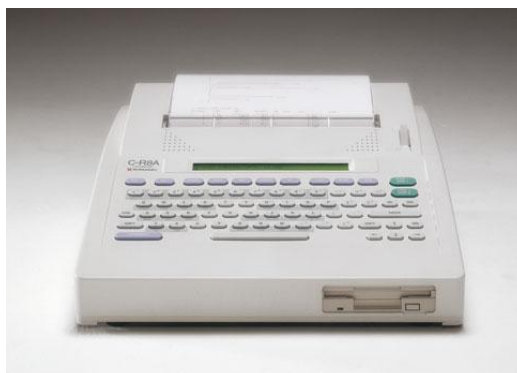
4. เตาอบ

เป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ การควบคุมอุณหภูมิมีความละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส การตั้งค่าอุณหภูมิขึ้นอยู่กับจุดเดือดของตัวอย่าง โดยปกติแล้วอุณหภูมิของคอลัมน์จะตั้งไว้สูงกว่าจุดเดือดของตัวอย่างขณะที่ตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน Stationary phase ถ้าสารประกอบแต่ละชนิดในตัวอย่างมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน จะตั้งค่าอุณหภูมิเพียงค่าเดียว แต่ถ้าสารประกอบแต่ละชนิดในตัวอย่างมีช่วงจุดเดือดช่วงกว้างจะใช้ค่าจุดเดือดของสารประกอบแต่ละตัวในการแยก กล่าวคือ อุณหภูมิของคอลัมน์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการแยกเสร็จสิ้น



ภาพที่ 2.8 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (SHIMADZU Gas Chromatograph รุ่น GC-8A) [20]

ที่มา : SHIMADZU. Accessories and Supplies for Shimadzu Gas Chromatographs [Online]. Available from: http://www.chemshow.cn/UploadFile/datum/1003/shjohntec_2008218115733800771.pdf



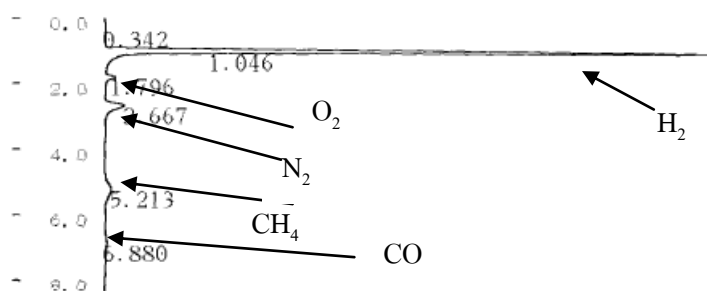
ภาพที่ 2.9 ส่วนแสดงผลข้อมูล (C-R8A Chromatopac)

ที่มา : SHIMADZU. Accessories and Supplies for Shimadzu Gas Chromatographs [Online]. Available from: http://www.chemshow.cn/UploadFile/datum/1003/shjohntec_2008218115733800771.pdf [20]

5. เครื่องตรวจวัดสัญญาณ

การเลือกใช้หัววัดสัญญาณในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความจำเพาะของตัวอย่าง คือ (1) Non-selective detector ใช้งานได้กว้างขวาง (2) Selective detector จะใช้กับสารประกอบต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติทางเคมีหรือทางฟิสิกส์เหมาะสมกับหัววัดนั้นๆ (3) Specific detector จะเหมาะสมกับสารประกอบที่สนใจเท่านั้น ซึ่งลักษณะการแสดงผลจะแสดงออกทางตัวแสดงผลข้อมูล (Recorder) ดังภาพที่ 2.9

เมื่อสารถูกแยกและทำการวิเคราะห์ หน่วยประมวลผลจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของโครมาโทแกรม ซึ่งจะแสดง % Abundance และ Retention time เครื่องจะสามารถวิเคราะห์หาความสูงของพีค และพื้นที่ใต้พีคได้ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณสารมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 2.10



C-R8A CHROMATOPAC CH=1 Report No.=4 DATA=1:@CHRM1.C00 12/08/03 14:17:1

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.342	3134	119			0.1202	
	2	1.046	2239454	340305	SV		85.9062	
	3	1.796	49243	5634	T		1.889	
	4	2.667	162450	10759	T		6.2317	
	5	5.213	111270	3685	T		4.2684	
	6	6.88	41308	992	TV		1.5846	
TOTAL			2606860	361493			100	

ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Abundance และ Retention time ในการวิเคราะห์ด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี

2.7 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี [19]

ก๊าซโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกสารตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อนำไปใช้เพื่อการตรวจสอบชนิดของสารหรือหาปริมาณสารได้ ซึ่งมีข้อมูล 3 ประการคือ

1. เวลาที่สารแต่ละชนิดเคลื่อนที่ด้วยก๊าซพาผ่านคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่า Retention time มาใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ
2. ขนาดของพีค คือ พื้นที่ใต้พีคและความสูงพีค สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ
3. ลักษณะของพีคที่ได้จากโครมาโทแกรมเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้

2.7.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี

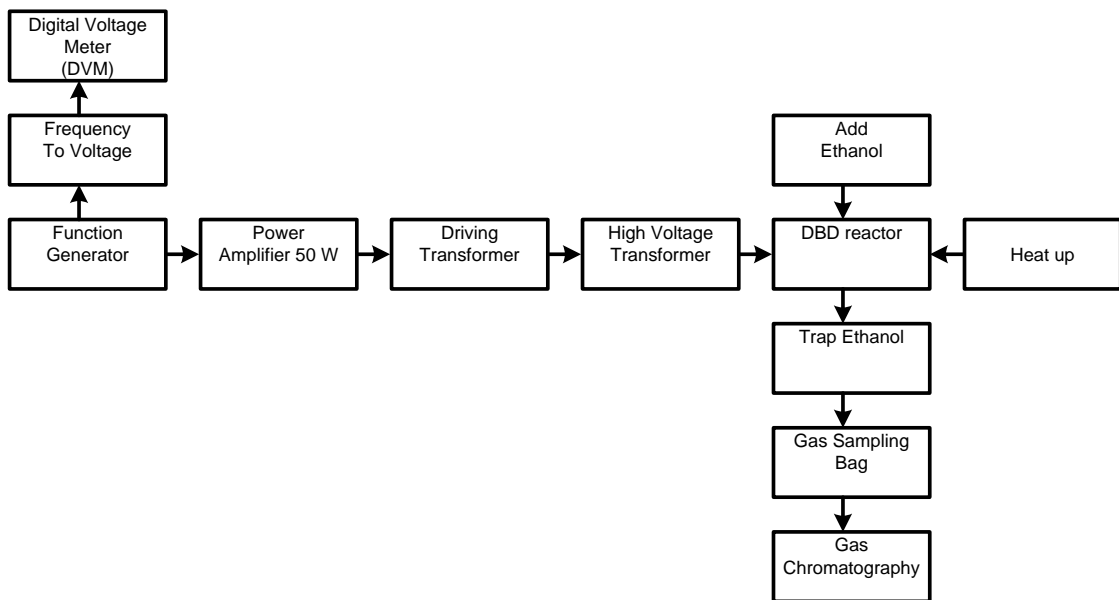
เป็นการตรวจสอบชนิดของสารในตัวอย่างโดยทำการวิเคราะห์พีคของตัวอย่างเปรียบเทียบกับค่า Retention time ของสารมาตรฐานที่ภาวะต่าง ๆ อย่างเดียวกันและสามารถระบุแต่ละพีคว่าเป็นพีคของสารใด การวัด Retention time ขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องที่ใช้ควบคุมภาวะต่าง ๆ ถ้ามีการควบคุมไม่คงที่ ทำให้ผลที่ได้เปลี่ยนแปลงไป เช่น การควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ ถ้าต้องการให้ Retention time อยู่ในช่วง $\pm 1\%$ อุณหภูมิของคอลัมน์ต้องควบคุมให้อยู่ในช่วง ± 0.3 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ขนาดของสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าเครื่อง มีความสำคัญมาก เพราะถ้าฉีดสารเข้าไปมาก ทำให้เกิด Column overloaded พีคที่ตรวจวัดเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่า Retention time ผิดไป

2.7.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยก๊าซโครมาโทกราฟี

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ได้มาจากการเตรียมสารมาตรฐานให้มีความเข้มข้นต่างกันและต้องทำการวิเคราะห์ภายใต้ภาวะเดียวกัน แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน ซึ่งจะได้สมการเส้นตรงแล้วนำพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างไปอ่านค่าในสมการเส้นตรงจะได้ความเข้มข้นของสารตัวอย่างออกมา แต่เทคนิคนี้มีข้อจำกัด คือ (1) ปริมาณของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ต้องอยู่ในช่วง Calibration curve (2) สารตัวอย่างที่วิเคราะห์ต้องไม่ฉีดเข้าไปมากจนเกิด Overloaded (3) สารมาตรฐานและสารตัวอย่างที่ใช้ต้องทราบปริมาณแน่นอน

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องมือวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาระบบกำเนิดพลาสมาสำหรับใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยแบ่งแผนงานวิจัยออกเป็นสี่ส่วนคือ การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ การออกแบบและสร้างชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำและการทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยมีแผนภาพของระบบดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมาฟอร์มมิงแบบแบริเออร์ดิสชาร์จ

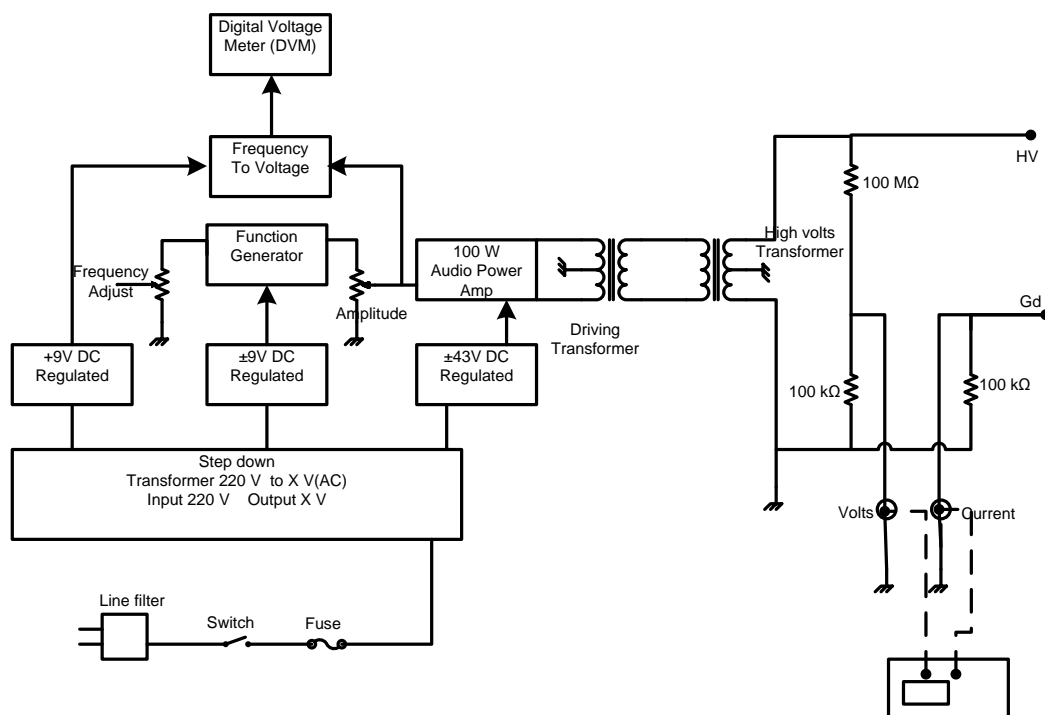
การออกแบบเครื่องมือสำหรับดำเนินงานวิจัยตามภาพที่ 3.1 เริ่มจากการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำที่สามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (DBD reactor) ทั้งแบบแผ่นคู่ขนานและแบบโคเอ็กซ์เชียล ซึ่งภายในบรรจุเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมาฟอร์มมิงจากเอทานอลในสถานะของเหลวและการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนเป็นไอระเหย โดยควบคุมอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งพร้อมทั้งแปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ในแต่ละเงื่อนไขจะเก็บก๊าซตัวอย่างที่ออกจากชุดกำเนิดพลาสมาด้วยเครื่องแก้วคักจับ

ก๊าซหนักและต่อเข้าถุงเก็บก๊าซ (Gas Sampling Bag) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) เพื่อหาขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูง

3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ

จากการศึกษาข้อมูลความต้องการด้านเทคนิคของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงได้นำมาออกแบบโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ดังแผนภาพในภาพที่ 3.2 ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ วงจรนับความถี่ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ และวงจรสำหรับตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของโหลด (Load)

การทำงานของระบบเริ่มจากวงจรถูกกำเนิดความถี่ผลิตสัญญาณที่มีความถี่และขนาดตามค่าซึ่งปรับไว้ ป้อนเข้าวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่เสียง (Audio power amplifier) เพื่อสร้างสัญญาณขับผ่านหม้อแปลงขับ (Driving Transformer) แบบแยกฉนวนทนแรงดันสูงระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ความถี่ที่ผลิตได้แสดงผลด้วยวงจรถับความถี่ สัญญาณขับนี้จะส่งเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามอัตรารอบของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนจ่ายให้แก่โหลดดังภาพที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงได้ออกแบบวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า ทำให้สามารถวัด (Monitor) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรลดทอนและวงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าได้ตามลำดับด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope)



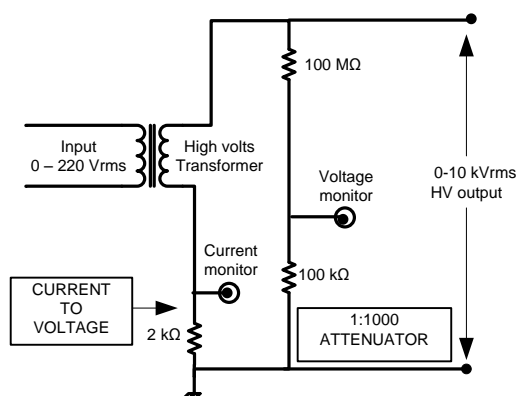
ภาพที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่ออกแบบขึ้น



ภาพที่ 3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำที่ออกแบบขึ้น

3.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

งานวิจัยนี้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจุดโหลดนีออนป้ายโฆษณาของบริษัท Senza Coltelli รุ่น 10.000/30CM เนื่องจากมีราคาประหยัด หม้อแปลงที่เลือกเป็นหม้อแปลงแกนเหล็กมีอัตรารอบ 1:45 สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 Vrms เป็น 10 kVrms หรือ คิดเป็น $2 \times \sqrt{2} \times 10 = 28 \text{ kVpp}$ จ่ายกระแสได้มากกว่า 15 mA (rms) ทางเข้าขดปฐมภูมิจะรับสัญญาณขับจากขดทุติยภูมิของหม้อแปลงขับ ส่วนขดทุติยภูมิจ่ายไฟฟ้าให้โหลดโดยมีวงจรสำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอ่านค่าด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ ได้แก่ วงจรลดทอน 1:1000 และวงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าที่สัดส่วน 0.5 mA /V ดังแสดงในภาพที่ 3.4 วงจรส่วนนี้ทั้งหมดจะประกอบในโครงบรรจุที่เป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้าและใช้สายไฟฟ้าที่ทนแรงดันสูง 30 kV เพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ วงจรอ่านค่าความถี่ และวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่อยู่ภายในตัวเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับดังภาพที่ 3.6

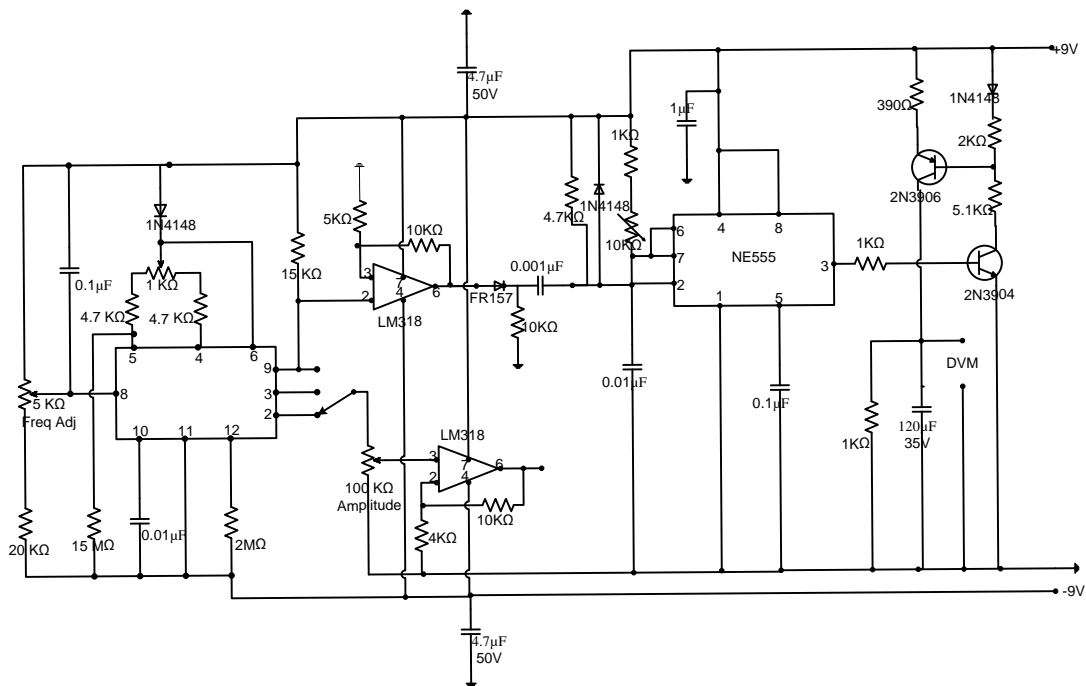


ภาพที่ 3.4 วงจรสำหรับตรวจวัดค่า V-I ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

3.1.2 วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้และวงจรอ่านค่าความถี่

วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ที่ออกแบบขึ้นแสดงในภาพที่ 3.5 เลือกใช้ไอซีเบอร์ ICL 8038 สามารถกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าได้ 3 รูปแบบ คือสัญญาณรูปคลื่นซายน์ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม แบ่งความถี่เป็น 2 ช่วง คือ 50 -1999 Hz และ 2 – 5 kHz ตัวต้านทานปรับค่าได้ 5 kΩ เป็นตัวต้านทานใช้ในการปรับค่าความถี่ ส่วนตัวต้านทานปรับค่าได้ 1 kΩ ใช้ในการปรับค่า Duty Cycle = 50% และสัญญาณขาออกของไอซี ICL 8038 สามารถเลือกกำเนิดสัญญาณได้ 3 รูปแบบคือสัญญาณรูปคลื่นซายน์ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยเลือกรูปสัญญาณที่ต้องการจากสวิตช์ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 kΩ ที่ขาเข้าของไอซี LM318 (A) ซึ่งเป็นออปแอมป์ขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส มี

กำลังขยาย 1.4 เท่า สัญญาณขาออกของออปแอมป์ส่งไปยังวงจรถ่ายกำลังย่านความถี่เสียงขนาดกำลัง 100 W ส่วนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขาออกของไอซี ICL 8038 ส่งไปยังออปแอมป์ไอซี LM318 (B) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณก่อนส่งไปยังไอซี NE555 ซึ่งเป็นวงจรโมโนสเตเบิลของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (Ratemeter) เพื่ออ่านค่าความถี่ด้วย Digital Voltage Meter ที่ได้พัฒนาขึ้นให้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้สองช่วง คือ 0-2 mV และ 0-20 V



ภาพที่ 3.5 วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้และวงจรรอ่านค่าความถี่ที่ออกแบบขึ้น

3.1.3 ระบบขับสัญญาณย่านความถี่เสียง

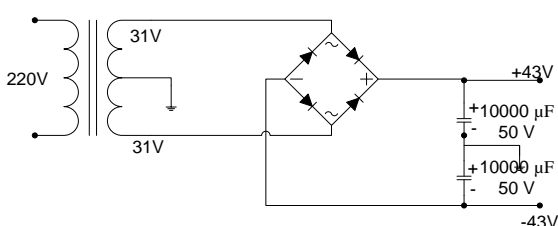
ระบบขับสัญญาณประกอบด้วย วงจรถ่ายกำลังย่านความถี่เสียงขนาดกำลัง 100 W (วงจรถ่ายแสดงในภาคผนวก ง) และหม้อแปลงขับขนาด 70 W การกำเนิดสัญญาณขับเริ่มจากการป้อนสัญญาณจากวงจรถ่ายความถี่เข้าวงจรถ่ายสัญญาณส่งให้หม้อแปลงไฟฟ้าขับที่ออกแบบแยกฉนวนขดปฐมภูมิและทุติยภูมิเฉพาะเพื่อป้องกันการอาร์ค จากการเหนี่ยวนำผ่านสภาวะตัวเก็บประจุ (Capacitance induce) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงขณะขับสัญญาณ หม้อแปลงขับนี้มีอัตรารอบ 1:9 สามารถรับแรงดันทางเข้า 24 Vrms และแปลงแรงดันไฟฟ้าทางออกเป็น 220 Vrms จากการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบขับสัญญาณให้โหลดที่เป็นหลอดไฟฟ้าชนิดจุดไส้ ขนาด 60 W, 220 V พบว่าสามารถขับโหลดได้ในย่านความถี่ระหว่าง 100 Hz -5 kHz ซึ่งเป็นย่านสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) จากหม้อแปลงขับไม่ผิดเพี้ยน



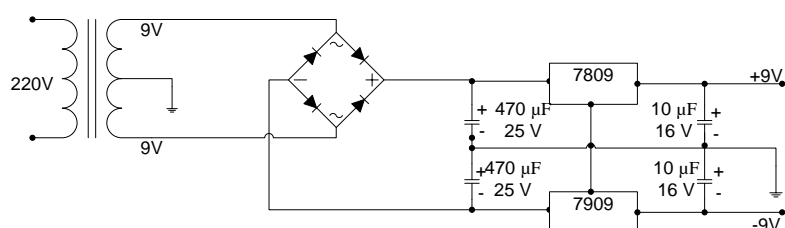
ภาพที่ 3.6 ส่วนประกอบภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

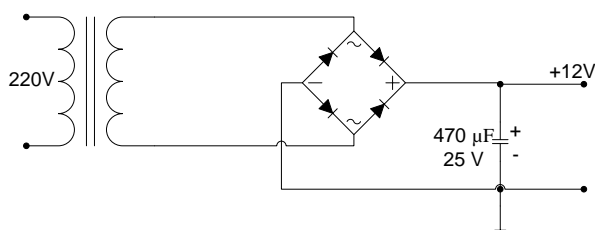
ได้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกับวงจรย่อยสองแบบคือ วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ขนาด ± 43 โวลต์ 3 แอมแปร์ สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ดังภาพที่ 3.7 (ก) และ ขนาด $+12$ โวลต์ สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับพัดลมดังภาพที่ 3.7 (ค) ซึ่งทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับระบบ อีกส่วนหนึ่งเป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ผ่านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ด้วยไอซีเรกูเลเตอร์ขนาดแรงดันไฟฟ้า ± 9 โวลต์สำหรับจ่ายวงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ และ ขนาด $+9$ โวลต์ สำหรับจ่ายวงจรรอ่านค่าความถี่ดังภาพที่ 3.7 (ข)



(ก) แหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด ± 43 โวลต์ สำหรับจ่ายเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์



(ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด ± 9 โวลต์ สำหรับวงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้และวงจรรอ่านค่าความถี่



(ค) แหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด +12 โวลต์ สำหรับพัดลมระบายความร้อน
ภาพที่ 3.7 แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

3.2 การออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

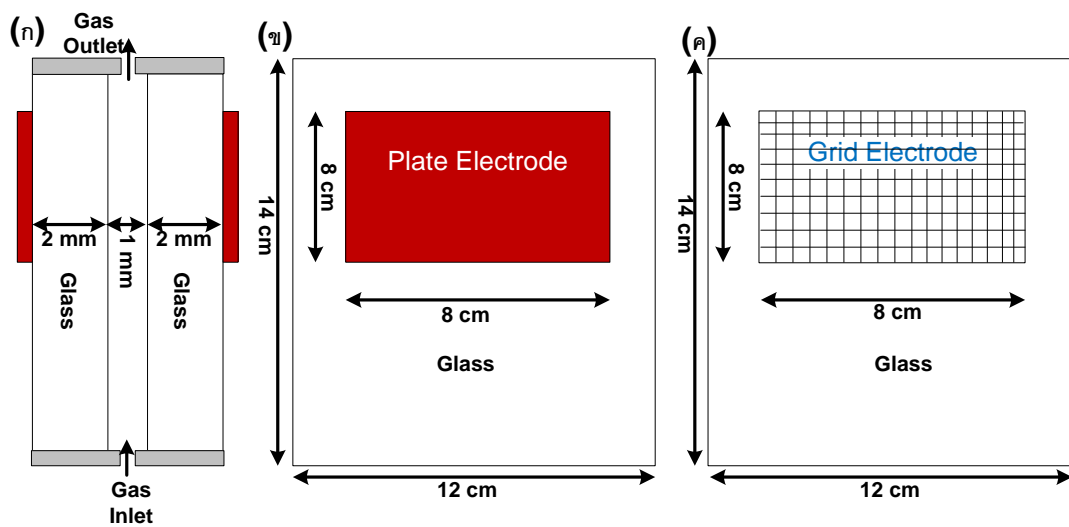
การออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาจะต้องคำนึงถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้า ช่วงกว้างของ ความถี่ที่สามารถปรับได้ ความสะดวกและความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ชุดกำเนิดพลาสมา แบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จที่พบเห็นบ่อยในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ แบบแผ่น คู่ขนานและแบบทรงกระบอก (โคเอ็กเซียล)

3.2.1 ชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน

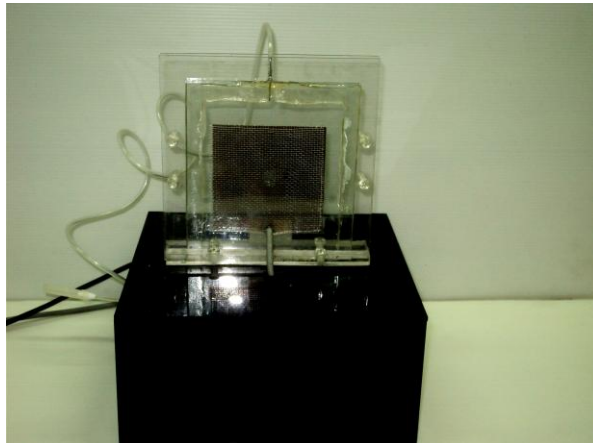
ในการออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ทำจากแก้ว ซึ่งการออกแบบได้คำนึงถึงสภาพความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ แผ่นทองแดงและแผ่นตะแกรงอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างแผ่น และชนิดของ วัสดุไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริกที่เลือกใช้เป็นแผ่นกระจก 2 แผ่น มีขนาดพื้นที่ 12 ซม × 14 ซม หนา 2 มิลลิเมตร มีช่องว่างระหว่างกัน 1 มิลลิเมตร ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยแผ่นทองแดงและ ตะแกรงอะลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 8 ซม × 8 ซม ดังภาพที่ 3.8 ยึดประกบกันด้วยแผ่นอะคลิลิกทั้งสอง ด้านพร้อมใส่สกรูเพื่อยึดขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองไว้ให้แน่นเป็นการทำให้สนามไฟฟ้าคงที่ ส่วนล่าง ของชุดกำเนิดพลาสมาเชื่อมต่อท่อ สำหรับป้อนก๊าซไหลเข้าเพื่อทำให้ของเหลวที่อยู่ในชุดกำเนิด พลาสมาเกิดฟองขึ้นภายใน ส่วนด้านบนต่อท่อให้ก๊าซออกสู่ระบบเก็บก๊าซ ดังภาพที่ 3.9

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา เปรียบเทียบชนิดของวัสดุไดอิเล็กทริก ความหนาของวัสดุไดอิเล็ก- ทริก ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด และขนาดพื้นที่ของแผ่นทองแดงและตะแกรงอะลูมิเนียม ที่มีผล ต่อความแรงของสนามไฟฟ้าสูงสุดและสภาพทนสนามไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุ



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน (ก) ภาคตัดขวางของชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน (ข) แผ่นทองแดงขนาด 8 ซม × 8 ซม ติดกับแผ่นกระจกด้านหนึ่ง (ค) แผ่นอะลูมิเนียมแบบกริดขนาด 8 ซม × 8 ซม ติดกับแผ่นกระจกด้านหนึ่ง



ภาพที่ 3.9 ชุดกำเนิดพลาสมา DBD แบบแผ่นคู่ขนานขนาด 12 ซม × 14 ซม

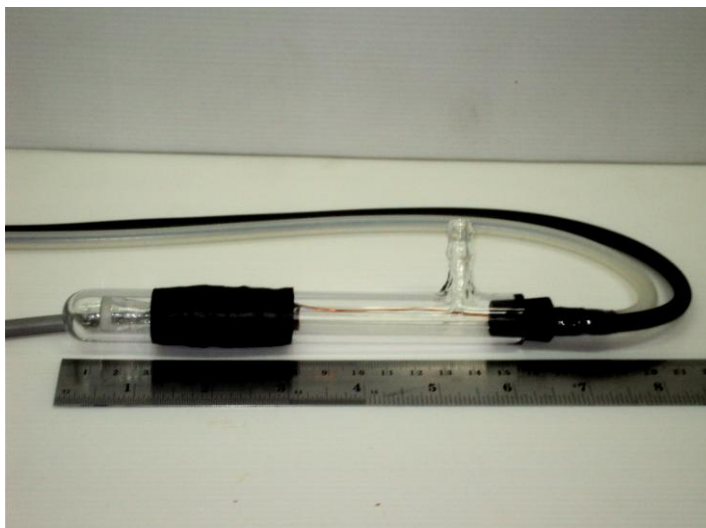
3.2.2 ชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอก

ในการออกแบบชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอกมีข้อได้เปรียบกว่าแบบแผ่นคู่ขนานซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่า และสภาพความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดงด้านในและท่อทองแดงด้านนอกซึ่งใช้เป็นอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก

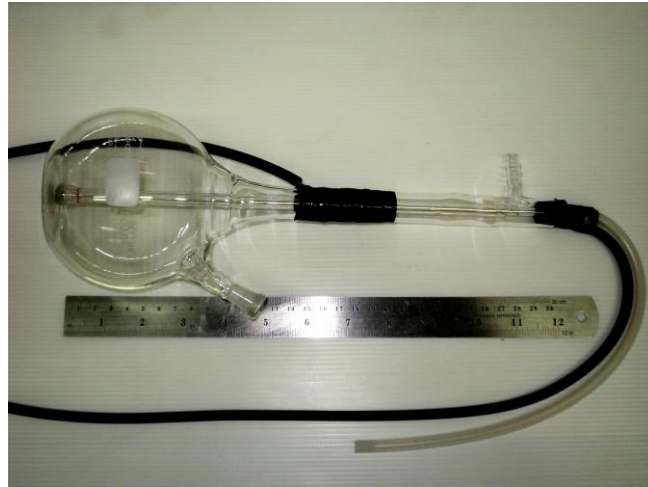
การออกแบบเลือกใช้ท่อแก้วหนา 2.2 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.84 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.405 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.12 (ก) โดยแก้วทำหน้าที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกและชุดอุปกรณ์ทดลอง ซึ่งช่องว่างระหว่างแก้วและแท่งอิเล็กโทรดภายในห่างกันประมาณ 2.2 มิลลิเมตร แท่งอิเล็กโทรดภายในทำมาจากท่อทองแดง ส่วนอิเล็กโทรดภายนอกใช้เทปทองแดงที่มีขนาดพื้นที่ 27.71 ตารางเซนติเมตร ดังแบบโครงสร้างในภาพที่ 3.12 (ค) และรูปอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในภาพที่ 3.10

3.2.3 ชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอกที่ใช้ความร้อน

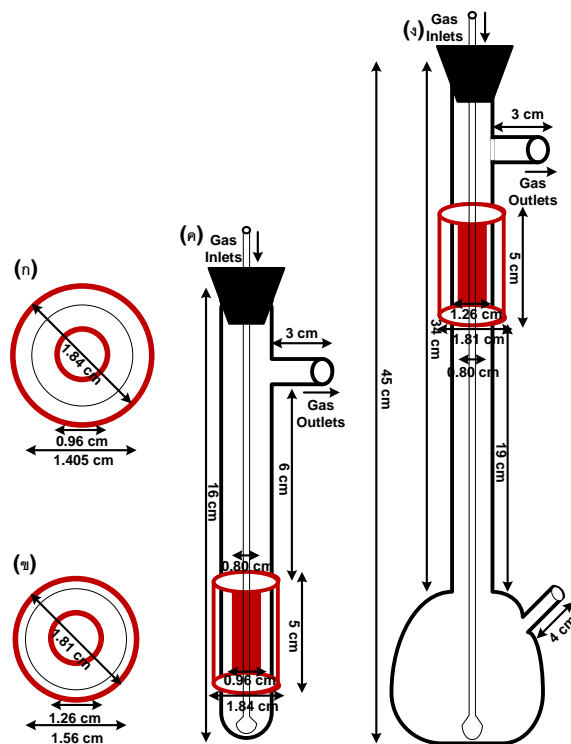
ใช้ท่อแก้วหนา 1.2 มิลลิเมตร เป่าเชื่อมกับแก้วคนโท เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.81 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.56 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.12 (ข) ใช้ท่อแก้วเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งช่องว่างระหว่างแก้วและแท่งอิเล็กโทรดภายในห่างกันประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แท่งอิเล็กโทรดภายในทำมาจากท่อทองแดง ทำหน้าที่เป็นท่อนำก๊าซจากภายนอกเข้าสู่ด้านล่างในตัวเพื่อสร้างพลาสมาปริมาณมาก ฟุ้งผ่านบริเวณที่เกิดพลาสมาของ ส่วนอิเล็กโทรดภายนอกใช้เทปทองแดงที่มีขนาดพื้นที่ 36.094 ตารางเซนติเมตร พันรอบท่อแก้วที่เป่าเชื่อมกับแก้วคนโท ดังแบบโครงสร้างในภาพที่ 3.12 (ง) ภายในแก้วคนโทบรรจุของเหลวปริมาตร 350 มิลลิลิตร ดังรูปอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.10 ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วทรงกระบอก



ภาพที่ 3.11 ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท



ภาพที่ 3.12 โครงสร้างชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอก (ก) ภาพตัดขวางของท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 1.405 และ 1.84 เซนติเมตร ตามลำดับ (ข) ภาพตัดขวางของท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 1.56 และ 1.81 เซนติเมตร ตามลำดับ (ค) ขนาดและ โครงสร้างของชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้ว (ง) ขนาดและ โครงสร้างของชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท

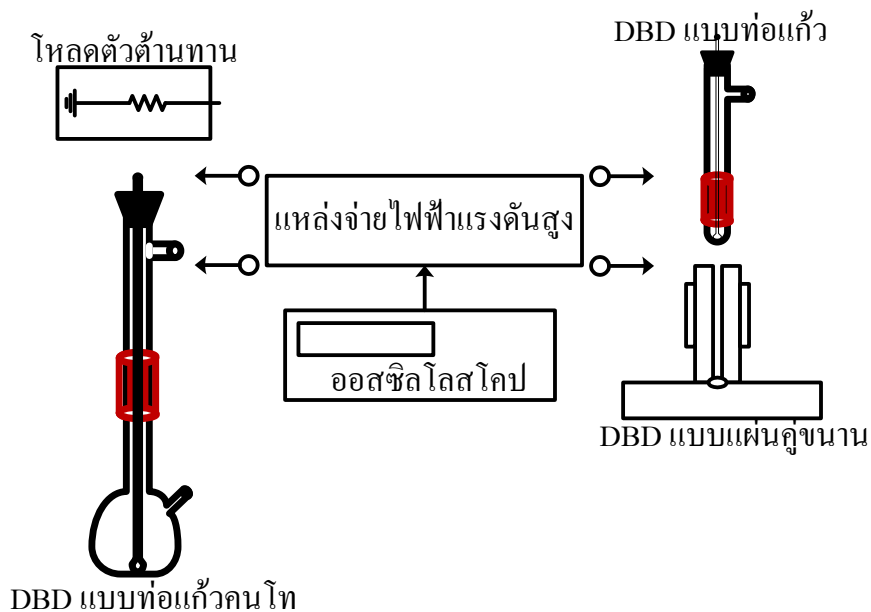
บทที่ 4

วิธีดำเนินงานและผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการพลาสมารีฟอร์มมิง ประกอบด้วยขั้นตอนการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำที่พัฒนาขึ้น การทดสอบการกำเนิดพลาสมาของชุดพลาสมาที่สร้างขึ้น ทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเอทานอล ในสถานะของเหลว และทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเอทานอลด้วยการเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็นไอระเหย มีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

4.1 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ

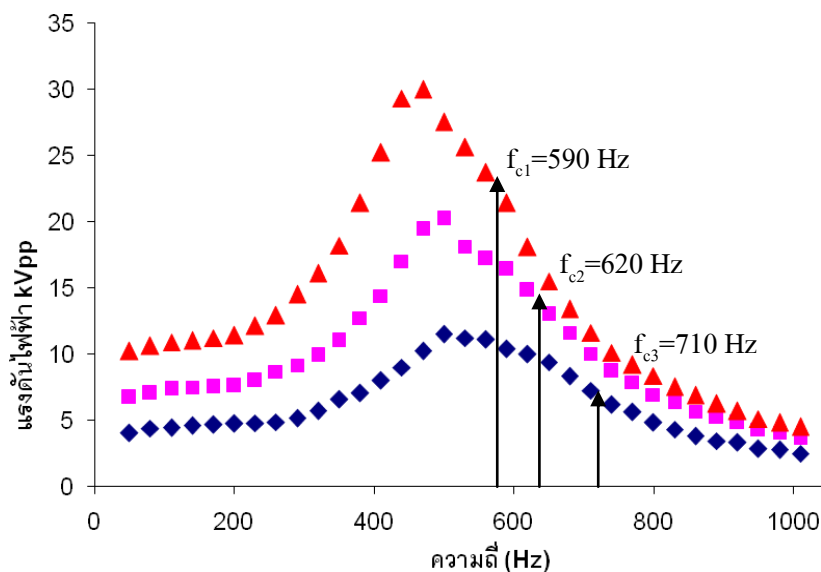
การทดสอบสมรรถนะแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยจัดระบบทดสอบดังแผนภาพในภาพที่ 4.1 แบ่งการทดสอบเป็น 5 กรณี คือ 1) การทำงานแบบเปิดวงจร 2) จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่โหลดตัวต้านทาน 10 M Ω ขนาด 10 W ในถังฉนวนน้ำมัน 3) จ่ายไฟฟ้าแก่ชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน 4) จ่ายไฟฟ้าแก่ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้ว 5) จ่ายไฟฟ้าแก่ชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท



ภาพที่ 4.1 แผนภาพระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

4.1.1 ทดสอบการทำงานแบบเปิดวงจร

การทดสอบเพื่อศึกษาย่านตอบสนองความถี่ (Frequency Bandwidth) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาในสถานะไม่มีโหลด ด้วยการแปรเปลี่ยนความถี่รูปคลื่นไซน์ในย่าน 50 Hz-1 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดที่ 10, 20 และ 30 kVpp ตามลำดับ แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า ผลทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามกราฟภาพที่ 4.2



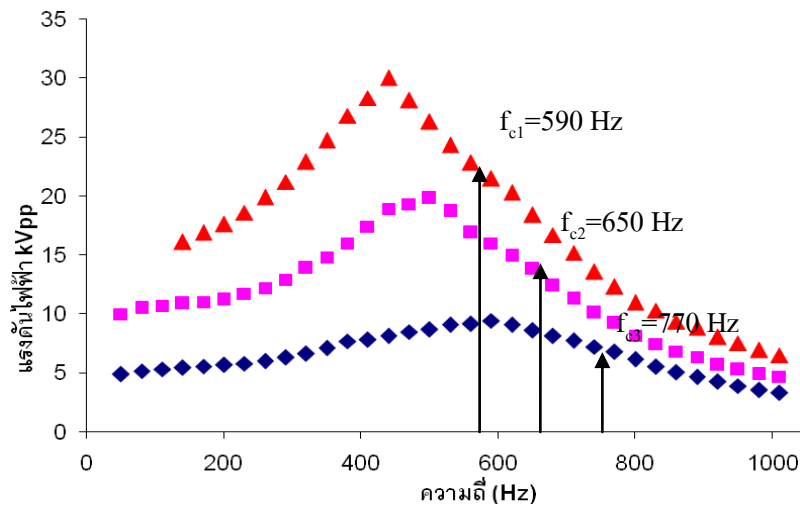
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่ต่อโหลด

จากผลทดสอบย่านตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อไม่ต่อโหลด พบว่าสามารถตอบสนองความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 kVpp ได้ดีในย่าน 380-590 Hz และความถี่ที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 470 Hz นอกจากนี้พบว่าที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 kVpp, 20 kVpp และ 30 kVpp มีความถี่จำกัดด้านสูง (Corner Frequency, f_c) ที่ 710 Hz, 620 Hz และ 590 Hz ตามลำดับ ชัดจำกัดนี้มีผลมาจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุระหว่างชั้นขดลวดทุติยภูมิ สร้างสภาพสมมูลเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (LC low pass filter) ส่งผลถึงการตอบความถี่ที่แคบลง

4.1.2 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวต้านทาน 10 M Ω ขนาด 10 W

การทดสอบเพื่อศึกษาย่านตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่พัฒนาในสถานะที่โหลดเป็นตัวต้านทาน 10 M Ω ขนาด 10 W บรรจุในถังฉนวนน้ำมัน ด้วยการแปรเปลี่ยนความถี่รูปคลื่นไซน์ในย่าน 50 Hz-1 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดที่ 10, 20 และ 30 kVpp

ตามลำดับ แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า ผลทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามกราฟภาพที่ 4.3

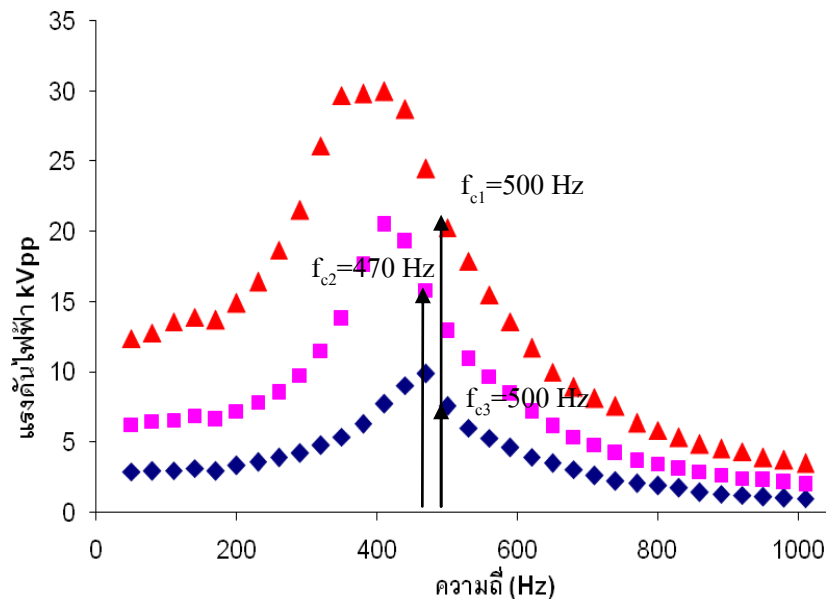


ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากผลทดสอบย่านตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อต่อโหลดตัวต้านทาน 10 MΩ พบว่าการตอบสนองของความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก สามารถตอบสนองความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 kVpp ได้ดีในช่วง 290-590 Hz และความถี่ที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 440 Hz ขณะที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 kVpp, 20 kVpp และ 30 kVpp มีความถี่จำกัดที่ 770 Hz, 650 Hz และ 590 Hz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดในบริเวณย่านตอบสนองความถี่สามารถขับสัญญาณทางเข้าให้เพิ่มขึ้นได้ แต่ต้องระมัดระวังแรงดันไฟฟ้าเกินค่าที่คาดหวังขณะปรับเปลี่ยนความถี่

4.1.3 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบแบริเออร์ดิซชาร์จที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นคู่ขนาน

การทดสอบทำโดยจัดชุดกำเนิดพลาสมาที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นคู่ขนานเป็นโหลดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและป้อนอากาศผ่านชุดกำเนิดพลาสมาที่อัตราการไหล 2.6 มิลลิตรต่อวินาที เพื่อศึกษาผลของย่านตอบสนองความถี่ขณะมีโหลด ด้วยการแปรเปลี่ยนความถี่รูปคลื่นซายน์ในย่าน 50 Hz-1 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดที่ 10, 20 และ 30 kVpp ตามลำดับ แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า ผลทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามกราฟภาพที่ 4.4



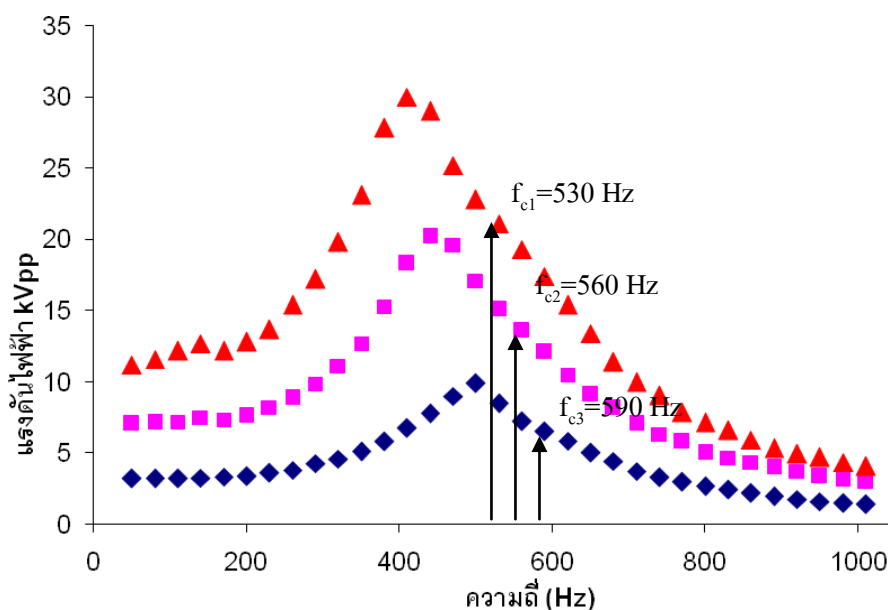
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน

จากผลทดสอบช่วงตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน พบว่ามีผลกระทบต่อย่านตอบสนองความถี่ แม้ว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ายังสามารถตอบสนองความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 kVpp ได้ดีในช่วง 290-500 Hz ความถี่ไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 410 Hz แต่ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 kVpp, 20 kVpp และ 30 kVpp พบว่ามีความถี่จำกัดที่เปลี่ยนไป คือ 500 Hz, 470 Hz และ 500 Hz ตามลำดับ จะเห็นว่าความถี่ที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่งความถี่ต่ำกว่า เนื่องจากการตอบสนองความถี่ในกรณีนี้นอกจากเป็นโหลดชนิดคาปาซิเตอร์แล้วยังขึ้นกับการไอออไนซ์ของก๊าซในแผ่นคู่ขนานด้วย

4.1.4 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบแบริเออร์ดิซาร์จที่มีโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอก

4.1.4.1 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้ว

การทดสอบทำโดยจัดชุดกำเนิดพลาสมาที่มีโครงสร้างแบบทรงกระบอกทำด้วยท่อแก้วเป็นโหลดให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าและป้อนอากาศผ่านชุดกำเนิดพลาสมาด้วยอัตราการไหล 2.6 มิลลิลิตรต่อวินาที เพื่อศึกษาผลของย่านตอบสนองความถี่ขณะมีโหลด ด้วยการแปรเปลี่ยนความถี่รูปคลื่นไซน์ในย่าน 50 Hz-1 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดที่ 10, 20 และ 30 kVpp ตามลำดับ แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า ผลทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามกราฟภาพที่ 4.5

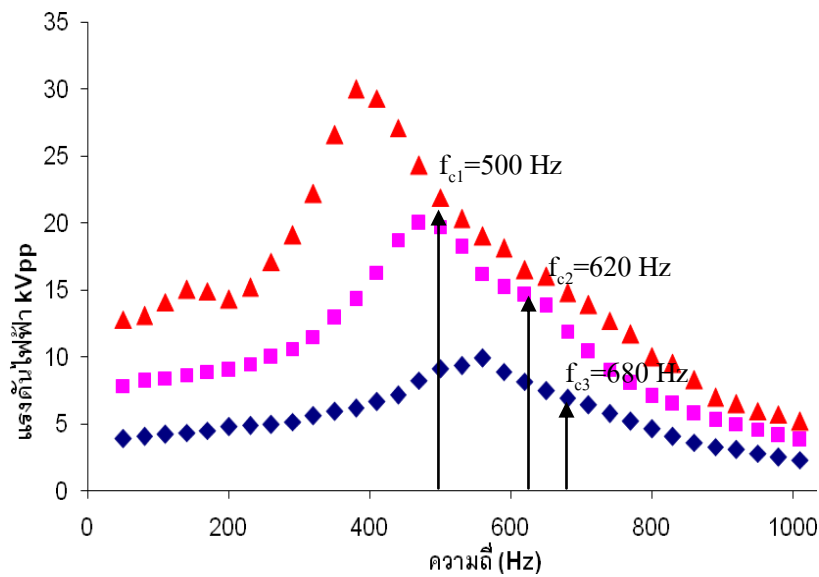


ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบทรงกระบอก

จากผลทดสอบการตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบทรงกระบอก พบว่ามีผลกระทบต่อย่านตอบสนองความถี่มาก โดยมีย่านตอบสนองความถี่ที่แรงดันสูงสุด 30 kVpp ได้ดีในช่วง 320-530 Hz ความถี่ไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 410 Hz และที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 kVpp, 20 kVpp และ 30 kVpp พบว่ามีความถี่จำกัดที่เปลี่ยนไป คือ 530 Hz, 560 Hz และ 590 Hz ตามลำดับ ในกรณีของโครงสร้างแบบทรงกระบอกจะให้อ่านตอบสนองความถี่ด้านสูงมากกว่า

4.1.4.2 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท

การทดสอบทำโดยจัดชุดกำเนิดพลาสมาที่มีโครงสร้างทรงกระบอกแบบท่อแก้วคนโทเป็น โหลดให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าและป้อนอากาศผ่านชุดกำเนิดพลาสมาด้วยอัตราการไหล 2.6 มิลลิเมตรต่อ นาที เพื่อศึกษาผลของย่านตอบสนองความถี่ขณะมีโหลด ด้วยการแปรเปลี่ยนความถี่รูปคลื่นไซน์ ในย่าน 50 Hz-1 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดที่ 10, 20 และ 30 kVpp ตามลำดับ แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกจากรวดทอนแรงดันไฟฟ้า ผลทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามกราฟภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบทรงกระบอกท่อแก้วคนโท

จากผลการทดสอบการตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นชุดพลาสมาแบบทรงกระบอกท่อแก้วคนโท พบว่ามีผลกระทบต่อย่านตอบสนองความถี่มาก โดยมีย่านตอบสนองความถี่ที่แรงดันสูงสุด 30 kVpp ได้ดีในช่วง 320-500 Hz ความถี่ไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 380 Hz และที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 kVpp, 20 kVpp และ 30 kVpp พบว่ามีความถี่จำกัดที่เปลี่ยนไป คือ 680 Hz, 620 Hz และ 500 Hz ตามลำดับ ในกรณีของโครงสร้างแบบทรงกระบอกจะให้อ่านตอบสนองความถี่ด้านสูงมากกว่าเช่นกัน

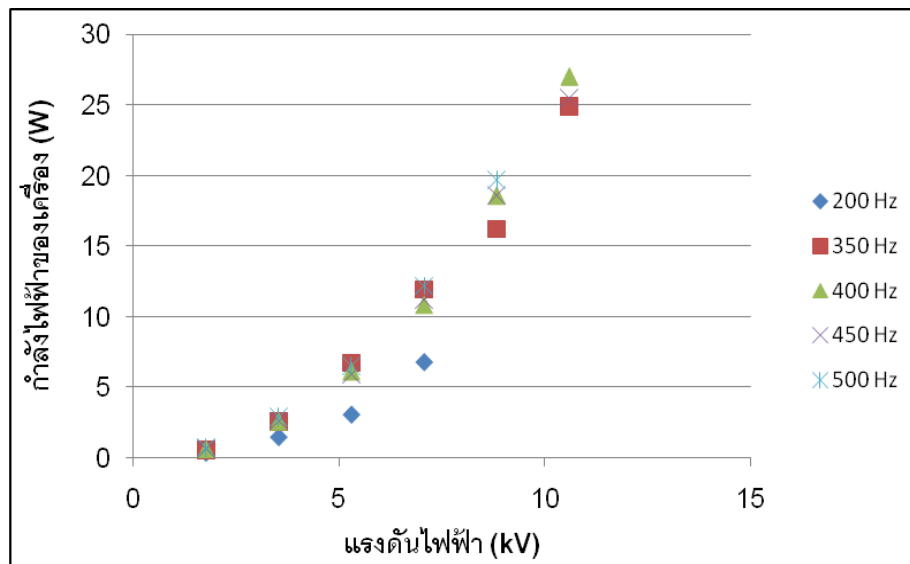
สรุปผลการตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับย่านความถี่ต่ำในภาวะโหลดชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งขณะใช้งานทดลองในตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่าสูงสุด บริเวณย่านตอบสนองความถี่สามารถขยับสัญญาณทางเข้าให้เพิ่มขึ้นได้ แต่ต้องระมัดระวังแรงดันไฟฟ้าเกินค่าที่ควบคุมขณะปรับเปลี่ยนความถี่

ตารางที่ 4.1 ผลการตอบสนองความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในภาวะโหลดชนิดต่างๆ

ชนิดของโหลด	ช่วงกว้างความถี่ (Hz)	ความถี่ที่ทำให้ได้แรงดันสูงสุด (Hz)			ความถี่จำกัด, f_c (Hz)		
		10 kVpp	20 kVpp	30 kVpp	10 kVpp	20 kVpp	30 kVpp
เปิดวงจร	380-590	500	490	470	590	620	710
ตัวต้านทาน	290-590	590	500	440	770	650	590
แผ่นคู่ขนาน	290-500	470	410	410	500	470	500
ท่อแก้ว	320-530	500	440	410	590	560	530
ท่อแก้วคนโท	320-500	560	470	380	680	620	500

4.1.5 ทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท

การทดสอบทำโดยจัดระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท จากนั้นให้ความร้อนเอทานอลเหลวความเข้มข้น 99.8% โดยปริมาตร ให้เปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียสและอาศัยแรงดันไอเคลื่อนก๊าซผ่านบริเวณกำเนิดพลาสมาแบบ DBD เพื่อศึกษาการใช้กำลังไฟฟ้าขณะกำเนิดพลาสมาที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้า 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 kVpp และแปรเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้าที่ 200, 350, 400, 450 และ 500 Hz ผลการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่งๆ ดังภาพที่ 4.7

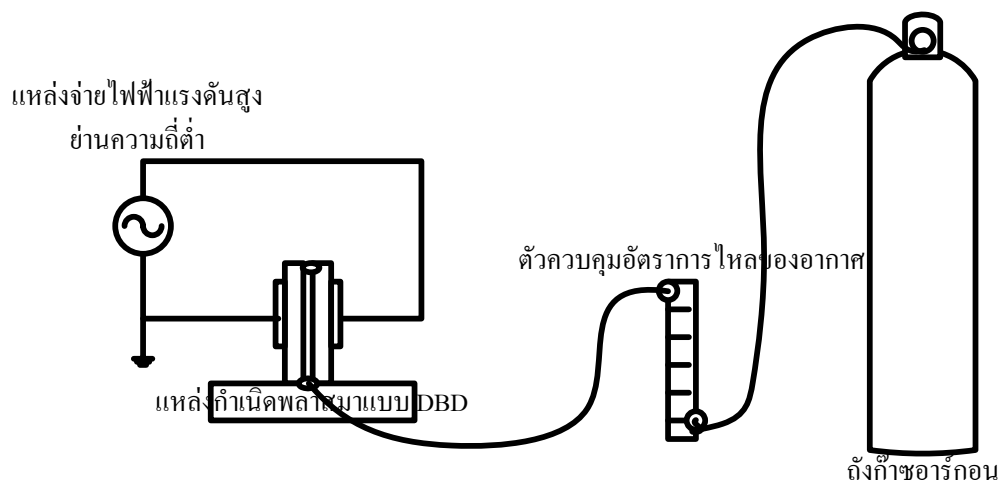


ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่งของชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้วคนโท

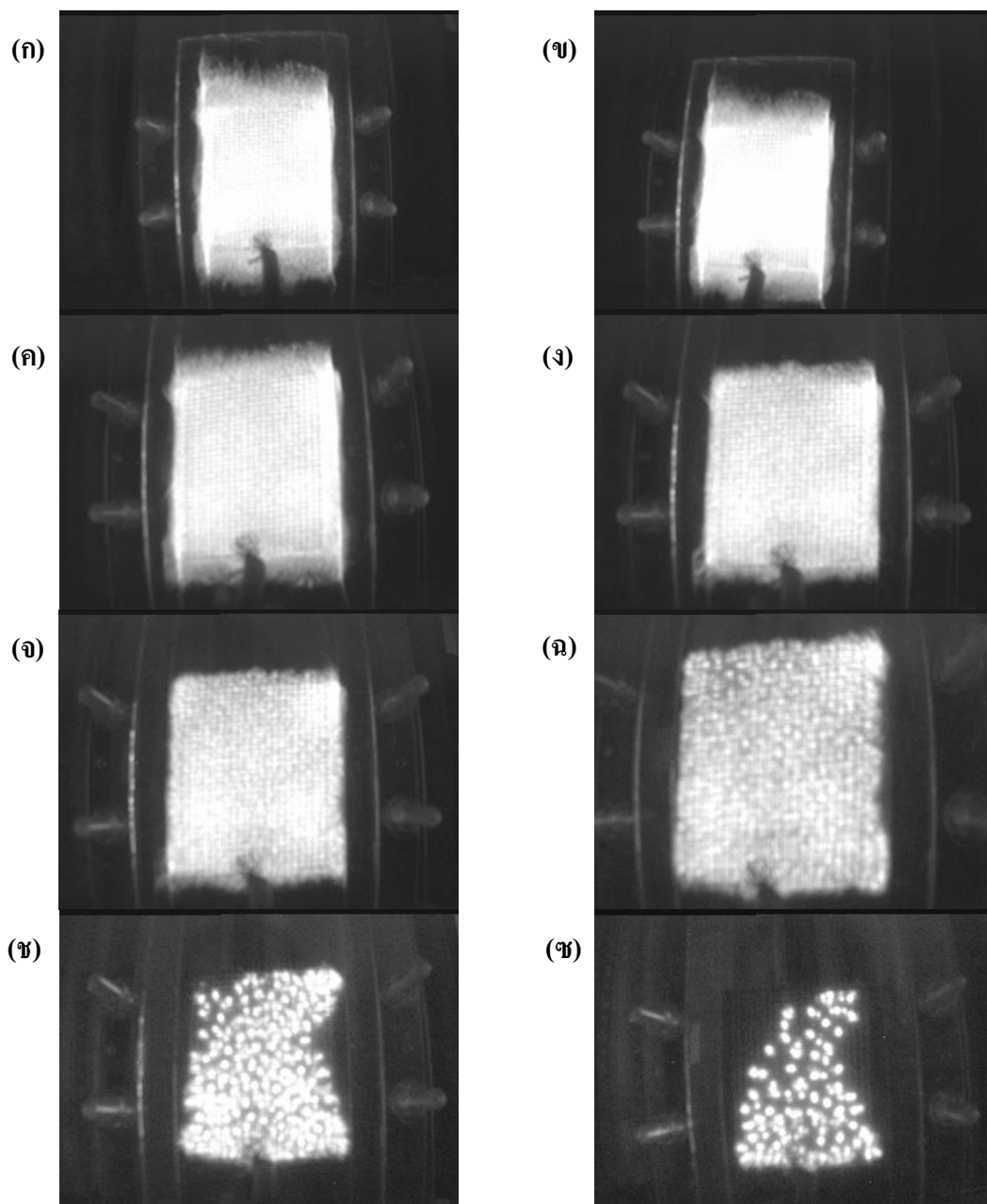
ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าที่ความถี่ 350, 400, 450 และ 500 Hz พบว่าการใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ต่างกันมากเพราะช่วงความถี่นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เฉพาะที่ความถี่ 200 Hz พบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถขับแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่านี้

4.2 การทดสอบการกำเนิดพลาสมา

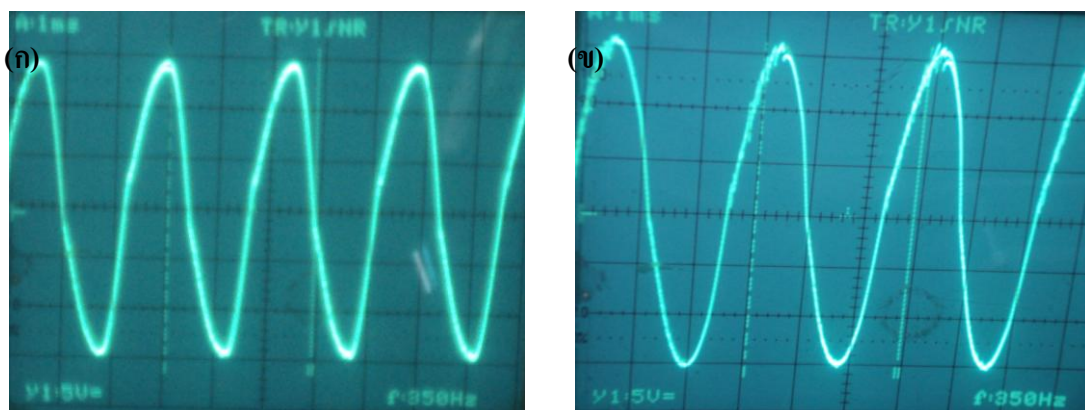
ในการทดสอบกำเนิดพลาสมาได้จัดระบบการทดสอบตามภาพที่ 4.8 โดยใช้ชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน ป้อนก๊าซอาร์กอนทางด้านล่างของชุดกำเนิดพลาสมาผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นแก้วไดอิเล็กทริกสองแผ่นด้วยอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาทีและจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบโดยแปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าจาก 10, 15, 20, 25 และ 30 kVpp ร่วมกับการทดลองแปรเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้าจาก 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 Hz ตามลำดับในแต่ละเงื่อนไขสังเกตลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่กั้นกลางด้วยแก้วพร้อมบันทึกรูปถ่าย ได้ผลทดลองดังภาพที่ 4.9 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะสัญญาณรูปคลื่นชาน์ที่อ่านด้วยออสซิลโลสโคป เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่เกิดพลาสมาและกรณีไม่เกิดพลาสมา ที่ความถี่ไฟฟ้า 350 Hz แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 kVpp ป้อนอากาศด้วยอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ได้ผลดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.8 การจัดระบบทดลองการกำเนิดพลาสมาแบริเออร์ดิสชาร์จแบบแผ่นคู่ขนาน



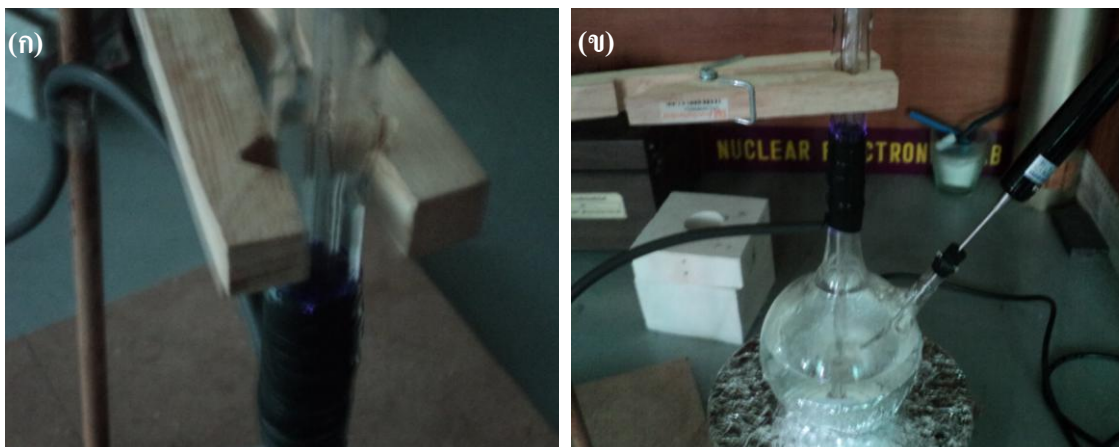
ภาพที่ 4.9 ลักษณะของพลาสมาจากชุดกำเนิดแบบแผ่นคู่ขนานที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้า
 ต่างๆ (ก) 200 Hz 30 kVpp (ข) 300 Hz 30 kVpp (ค) 400 Hz 24 kVpp (ง) 500 Hz 15
 kVpp (จ) 600 Hz 10 kVpp (ฉ) 700 Hz 9 kVpp (ช) 800 Hz 6 kVpp (ซ) 900 Hz 5kVpp



ภาพที่ 4.10 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่อ่านด้วยออสซิลโลสโคป (ก) กรณีไม่เกิดพลาสมา (ข) กรณีไม่เกิดพลาสมา

จากการทดลองในภาพที่ 4.9 การเกิดพลาสมาในชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนานจะเห็นลักษณะการไอออไนซ์และปลดปล่อยแสงสีน้ำเงินเป็นเส้นๆ ระหว่างช่องว่างอิเล็กโทรด ซึ่งความเข้มของกลุ่มพลาสมาขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ป้อนเข้าไป โดยแรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ไฟฟ้า 300 Hz จะเปล่งแสงสีน้ำเงินเข้มกว่าที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าอื่น เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าที่ 800 Hz แรงดันไฟฟ้า 6 kVpp การเกิดพลาสมาจะมีลักษณะเป็นเม็ด ๆ ซึ่งเรียกว่า ไมโครดิสชาร์จ และจากภาพที่ 4.10 เมื่อสังเกตสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่อ่านด้วยออสซิลโลสโคป พบว่ากรณีที่เกิดพลาสมาบนเส้นสัญญาณจะมีลักษณะขดพิคแตกเป็นเส้น ๆ ซึ่งบ่งบอกถึงเกิดการไอออไนซ์ก๊าซ

นอกจากนี้ได้ทดสอบชุดกำเนิดพลาสมาเป็นแบบท่อแก้วและท่อแก้วคนโท โดยดัดแปลงแอลกอฮอล์ให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นสถานะก๊าซ ระเหยผ่านบริเวณขั้วอิเล็กโทรดของชุดพลาสมาด้วยแรงดันไอ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 30 kVpp และความถี่ 350 Hz พบว่ามีลักษณะการเกิดพลาสมารอบแกนกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ลักษณะของพลาสมาจากชุดกำเนิดแบรีเออร์ดีสชาร์จ (ก) แบบท่อแก้ว (ข) แบบท่อแก้ว
คนโท

4.3 การทดสอบการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

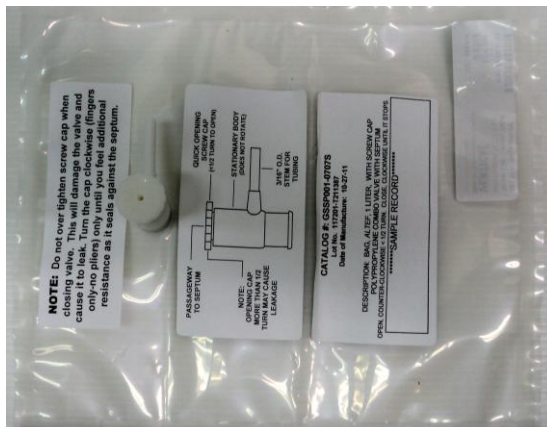
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิ่งกับเอทานอลที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งได้สูงที่อุณหภูมิต่ำ โดยพลาสมาทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูง ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง การเก็บก๊าซตัวอย่าง การทำพลาสมารีฟอร์มมิ่งเอทานอลในสถานะของเหลวหัวข้อที่ 4.3.3 และการทำพลาสมารีฟอร์มมิ่งเอทานอลในสถานะก๊าซหัวข้อที่ 4.3.4

4.3.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองนอกจากชุดกำเนิดพลาสมาและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแล้วชุดอุปกรณ์การเก็บก๊าซตัวอย่างหลังการกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ เป็นชุดอุปกรณ์ที่สำคัญในการนำผลิตภัณฑ์ก๊าซตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี ซึ่งชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บก๊าซประกอบด้วย

4.3.1.1 ถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร (Sampling bag)

ถุงเก็บก๊าซที่เลือกใช้มีขนาด 7 นิ้ว×7 นิ้ว ปริมาตร 1 ลิตร มีวาล์วเปิดปิดแบบ PP Screw Cap Combo Valve with Septum ดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร

4.3.1.2 เครื่องแก้วสำหรับดักจับก๊าซหนัก

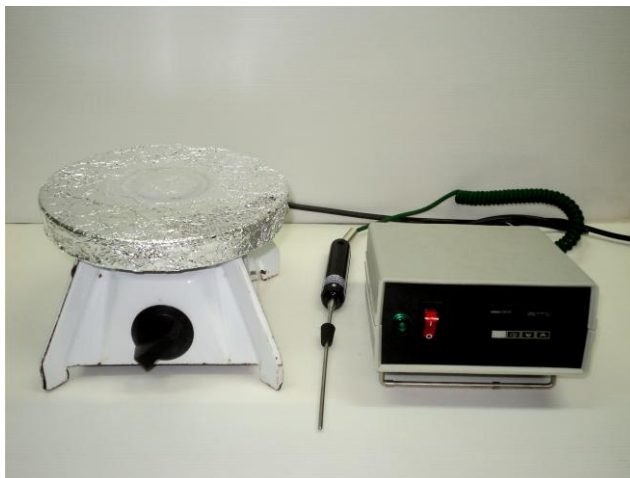
เครื่องแก้วสำหรับดักจับโมเลกุลของเอทานอลและน้ำในสถานะของเหลว มีโครงสร้างดังภาพที่ 4.13 มีความยาว 23 เซนติเมตร กระจะประกรองก๊าซมีความพรุนขนาด 100-160 mesh การดักจับโมเลกุลของเอทานอลและน้ำอาศัยความเย็นจากน้ำแข็งเพื่อควบแน่น ดังนั้นขณะใช้งานเครื่องแก้วดักจับโมเลกุลของเอทานอลและน้ำจะแช่อยู่ในน้ำแข็งที่บรรจุในกระติกเทอร์มอส



ภาพที่ 4.13 เครื่องแก้วสำหรับดักจับก๊าซหนัก

4.3.1.3 เตาไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิชนิดปรับค่าได้

เตาไฟฟ้าทำหน้าที่ต้มเอทานอลเหลวให้เปลี่ยนเป็นเอทานอลสถานะก๊าซ โดยสามารถปรับอุณหภูมิที่จุดเดือดและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ตามต้องการ ในภาวะที่เอทานอลเดือดจะมีแรงดันไอระเหยเอทานอลให้เคลื่อนผ่านระบบพลาสติกพอร์มิง เตาไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิชนิดปรับค่าได้ที่ออกแบบขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 เต้าไฟฟ้าสำหรับปรับอุณหภูมิของระบบ

4.3.1.4 เครื่องปั๊มอากาศขนาดเล็กและตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ

ชุดเครื่องปั๊มอากาศที่สร้างขึ้นทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบกำเนิดพลาสมาแบบใช้
อากาศเป็นตัวพา มีอัตราการไหลมากกว่า 2 ลิตรต่อนาที สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศและ
ควบคุมอัตราไหลให้คงที่ มีลักษณะดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 เครื่องปั๊มอากาศขนาดเล็กและตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบที่จำเป็นในการจัดระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารี
ฟอร์มมิง ได้แก่ ชุดเคลมปีอุปกรณ์ ข้อต่อท่อ เทปพันเกลียว สายยางซิลิโคน จุกยาง วาล์ว ปีกเกอร์
และเข็มฉีดยา เป็นต้น

4.3.2 การเก็บก๊าซตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างก๊าซในการทดลองเพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีขั้นตอนดังนี้

4.3.2.1 ก่อนการเก็บก๊าซตัวอย่างไปวิเคราะห์ต้องดูอากาศออกจากถุงเก็บก๊าซด้วยปั๊มสุญญากาศทุกครั้งเพื่อไม่ให้ภายในถุงเก็บก๊าซมีก๊าซใดหลงเหลืออยู่

4.3.2. 2 ปิดวาล์วถุงเก็บก๊าซก่อนนำไปเชื่อมต่อด้วยท่อสายยางซิลิโคนกับเครื่องแก้วสำหรับดักจับก๊าซหนักเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปปะปนในถุงเก็บก๊าซ เพราะอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน

4.3.2.3 เมื่อเริ่มเดินเครื่องกำเนิดพลาสมา ปิดวาล์วถุงเก็บก๊าซเพื่อเริ่มเก็บก๊าซตัวอย่าง เมื่อเก็บก๊าซตัวอย่างเสร็จปิดวาล์วถุงเก็บก๊าซ แล้วเปลี่ยนถุงเก็บก๊าซใหม่จนครบจำนวนที่ต้องการแล้วจึงนำถุงเก็บก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีเพื่อตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยไม่ทิ้งช่วงเวลานาน

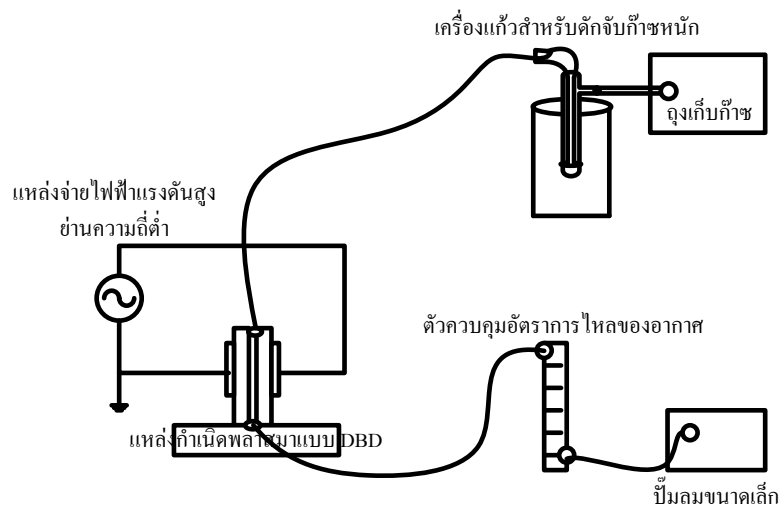
เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี จะนำข้อมูลพื้นที่ใต้พีคของแต่ละสเปกตรัมไปแทนค่าในสมการเส้นตรงของก๊าซมาตรฐานที่ได้ปรับค่ามาแล้วเพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซผลิตภัณฑ์ในหน่วยของโมลต่อมิลลิลิตร เปรียบเทียบช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่แตกต่างกันที่มีผลต่อความเข้มข้นของก๊าซผลิตภัณฑ์และทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองในการผลิตก๊าซ

4.3.3 การผลิตไฮโดรเจนด้วยพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะของเหลว

จัดระบบการทดลองตามภาพที่ 4.16 โดยใช้ชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน ป้อนอากาศด้วยปั๊มขนาดเล็กโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศคงที่ 2.6 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าสู่ด้านล่างของชุดกำเนิดพลาสมา เพื่อทำหน้าที่เป็นก๊าซพาให้ก๊าซผลิตภัณฑ์เข้าสู่ถุงเก็บตัวอย่างก๊าซเนื่องจากการทดลองเพื่อศึกษาระหว่างกรณีเติมเอทานอล 99.8% โดยปริมาตร ปริมาณ 15 ml ลงในช่องว่างระหว่างแก้วสองแผ่นและสร้างฟองอากาศด้วยก๊าซพา กับกรณีที่ใส่ก๊าซพาอย่างเดียวไม่เติมเอทานอล

ในการทดลองได้แปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 kVpp และปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วงความถี่ 50-500 Hz หลังกำเนิดพลาสมาเป็นเวลา 15 นาที เริ่มเก็บก๊าซถุงแรก โดยเก็บก๊าซถุงละ 5 นาทีอย่างต่อเนื่องจนครบ 30 นาที แล้วนำถุงเก็บก๊าซไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี บันทึกข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้

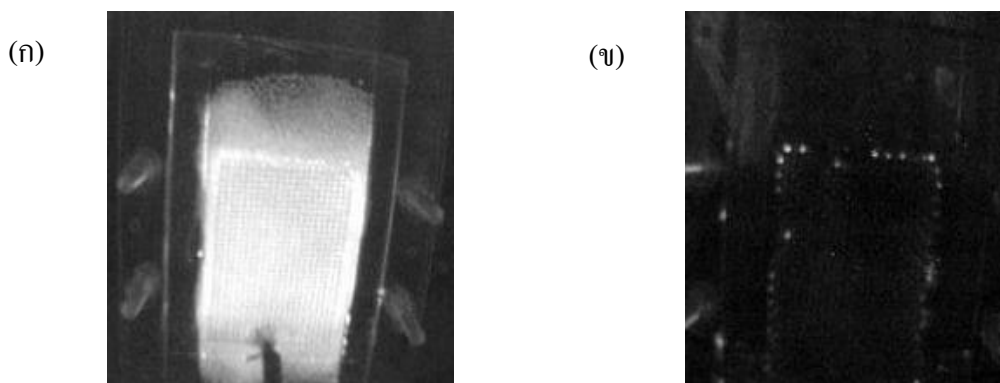
จากนั้นเปลี่ยนชุดกำเนิดพลาสมาแบบท่อแก้ว ใช้เงื่อนไขทดลองเช่นเดิมเพื่อเปรียบเทียบผลของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และสังเกตลักษณะการเกิดพลาสมาในทั้งสองระบบ



ภาพที่ 4.16 การจัดระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะของเหลว โดยอาศัยอากาศเป็นก๊าซพา

ผลของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนาน

ผลการทดลองพบว่ากรณีก๊าซพาอย่างเดียวไม่เติมเอทานอลลงในช่องว่างระหว่างแผ่นแก้วสองแผ่นจะเกิดพลาสมาสีน้ำเงินชัดเจน เนื่องจากการไอออไนซ์ของอากาศดังภาพที่ 4.17 (ก) แต่กรณีที่เติมเอทานอลลงไปจะไม่เกิดพลาสมาขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เอทานอลในสถานะของเหลวแตกตัวได้ และจะเกิดพลาสมาเฉพาะบริเวณผิวนอกของขั้วไฟฟ้าซึ่งสัมผัสกับอากาศเท่านั้นดังภาพที่ 4.17 (ข) ผลการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างที่ได้จากวิธีนี้ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนมีค่าประมาณ 2×10^{-5} โมลต่อมิลลิลิตร ซึ่งปริมาณดังกล่าวมีค่าเท่ากับปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนที่มีอยู่ในธรรมชาติ ส่วนปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดของเครื่องที่ตรวจวัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความเข้มข้นของมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วย



ภาพที่ 4.17 การเกิดพลาสมาในชุดกำเนิดแบบแผ่นคู่ขนาน (ก) กรณีก๊าซพลาสมาอย่างเดียวนิคมเอทานอลลงในช่องว่างแผ่นแก้ว (ข) กรณีที่นิคมเอทานอลลงในช่องว่างแผ่นแก้ว

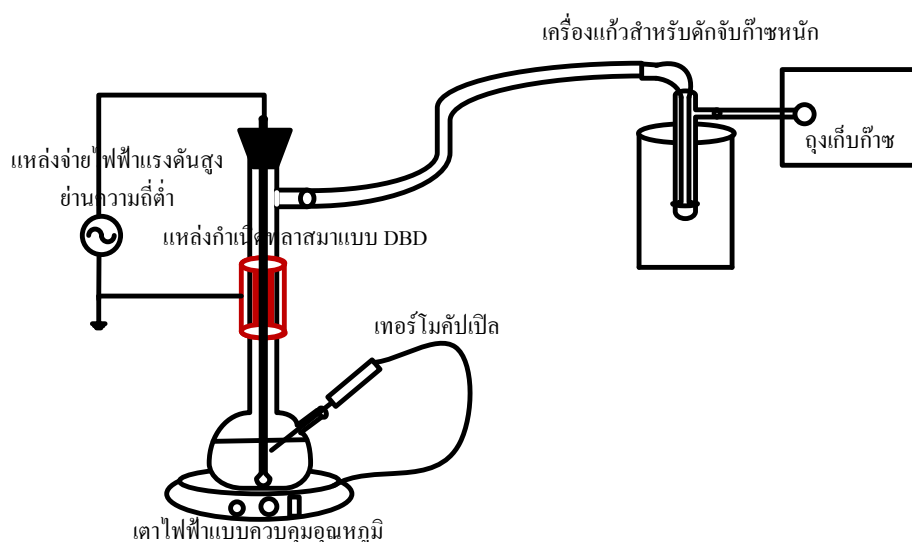
ผลของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอก

เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ได้จากชุดกำเนิดพลาสมาแบบแผ่นคู่ขนานมีค่าน้อยกว่าแบบทรงกระบอก และการตอบสนองความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบทรงกระบอกสูงกว่า จึงได้พัฒนาชุดกำเนิดพลาสมาแบบทรงกระบอกที่ทำจากท่อแก้วเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นไปอีก พบว่ากรณีก๊าซพลาสมาอย่างเดียวนิคมเอทานอลลงในช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของท่อแก้วจะเกิดพลาสมาเป็นสีน้ำเงินชัดเจน เนื่องจากเกิดการไอออไนซ์ของอากาศ และกรณีที่นิคมเอทานอลลงไปจะไม่เกิดพลาสมาขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้ายังไม่เพียงพอที่จะทำให้เอทานอลในสถานะของเหลวแตกตัวได้ และเกิดพลาสมาเฉพาะบริเวณผิวนอกของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับอากาศเช่นกัน แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นก็ยังไม่สามารถทำให้เอทานอลแตกตัวได้เนื่องจากของเหลวต้องใช้พลังงานสูงมากกว่านี้ ผลการเก็บก๊าซที่ได้จากวิธีนี้ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจน มีค่าประมาณ 2×10^{-5} โมลต่อมิลลิลิตรซึ่งปริมาณดังกล่าวมีค่าเท่ากับปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนที่มีอยู่ในธรรมชาติ ส่วนปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดของเครื่องที่ตรวจวัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความเข้มข้นของมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วย

4.3.4 การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงของเอทานอลในสถานะก๊าซ

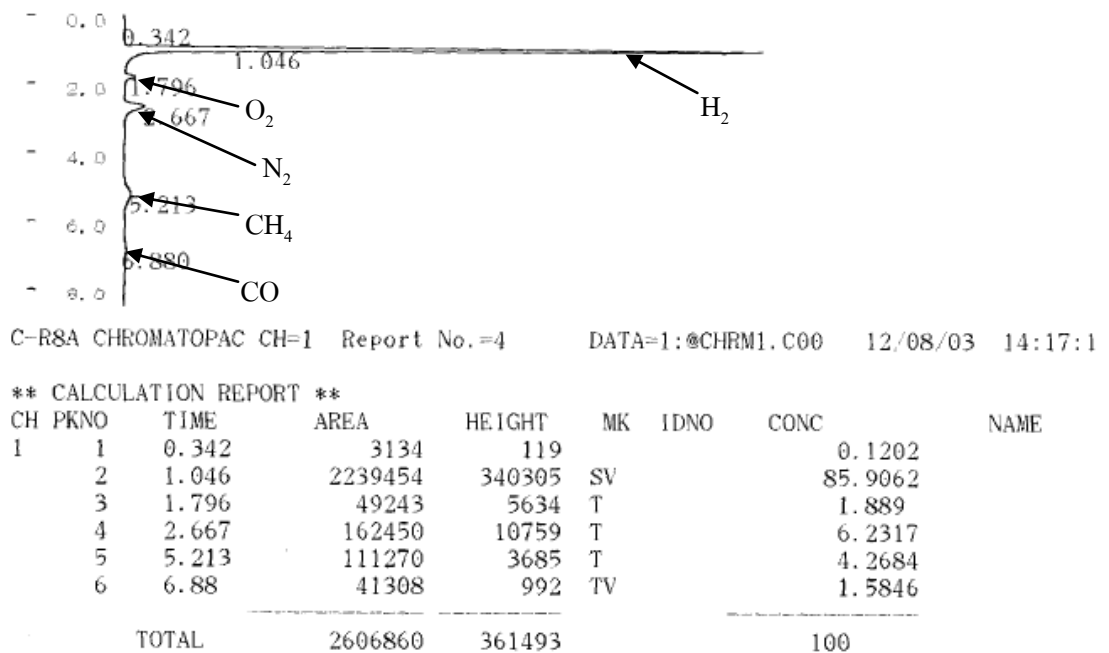
จากข้อจำกัดของการกำเนิดพลาสมาแบบ DBD ประกอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไม่สามารถสร้างกระบวนการดิสชาร์จได้เพียงพอที่จะทำให้เอทานอลในสถานะของเหลวแตกตัวได้ จึงปรับโครงสร้างชุดกำเนิดพลาสมาเป็นแบบท่อแก้วคนโทและอาศัยความร้อนในการเปลี่ยนสถานะเอทานอลจากของเหลวเป็นก๊าซ เพื่อช่วยให้โมเลกุลของเอทานอลและโมเลกุลไอน้ำเกิดการไอออไนซ์ได้ง่ายด้วยพลาสมาแบบ DBD ที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ

การทดลองนี้จัดระบบการทดลองตามภาพที่ 4.18 โดยใช้ชุดกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จแบบท่อแก้วคนโท บรรจุเอทานอล ปริมาตร 350 มิลลิลิตร และต้มเอทานอลด้วยเตาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ปรับอุณหภูมิของเอทานอลจนถึงจุดเดือด แรงดันไอระเหยจะเคลื่อนเอทานอลในสถานะก๊าซผ่านบริเวณอิเล็กโทรดของชุดกำเนิดพลาสมา ในการกำเนิดพลาสมาได้ทดลองแปรเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำในช่วงความถี่ 50-500 Hz ขนาดแรงดันไฟฟ้า 10, 15, 20, 25 และ 30 kVpp เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงหลังการเกิดพลาสมาให้ได้ปริมาณสูงที่สุดได้แก่ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสม ช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่ต่างกัน (Sampling time) และความเข้มข้น โดยปริมาตรของเอทานอลที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.18 ระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะก๊าซ

ในการศึกษาขั้นต้นพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ก๊าซผลิตภัณฑ์และอากาศผ่านเครื่องแก้วดักจับไปยังถุงเก็บก๊าซ รวมทั้งเอทานอลและอากาศที่ค้างในระบบเคลื่อนไปยังเครื่องแก้วดักจับ เช่น โมเลกุลของเอทานอลและน้ำ เมื่อนำก๊าซหลักไปวิเคราะห์ก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี แสดงผลออกมาด้วยโครมาโทแกรมดังภาพที่ 4.19 พบว่ามีก๊าซผลิตภัณฑ์ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ รวมทั้งก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนแยกออกจากกันด้วย Retention Time ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.19 โครมาโทแกรมของการวิเคราะห์ก๊าซด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี

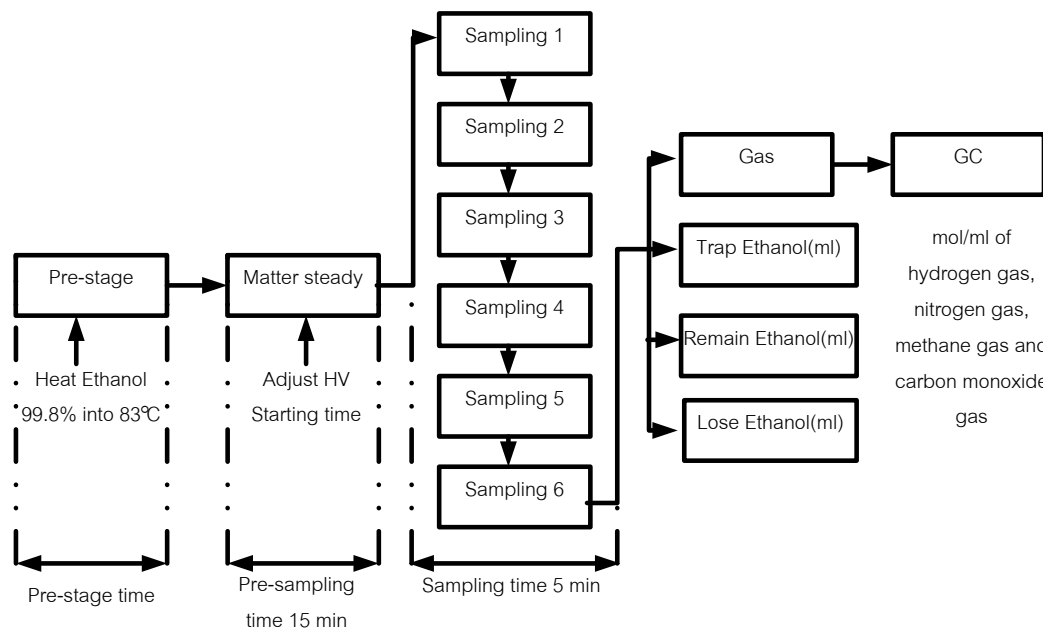
4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิง

จากผลการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะก๊าซในขั้นต้น นำไปสู่การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้า ช่วงเวลาในการเก็บก๊าซและความเข้มข้นโดยปริมาตรของเอทานอล ดังนี้

4.4.1 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ในการศึกษาขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ได้แปรเปลี่ยนที่ (ก) แรงดันไฟฟ้าคงที่ 30 kVpp แปรเปลี่ยนความถี่ที่ 50, 200 และ 350 Hz และ (ข) แรงดันไฟฟ้าคงที่ 24 kVpp แปรเปลี่ยนความถี่ที่ 200, 350 และ 500 Hz

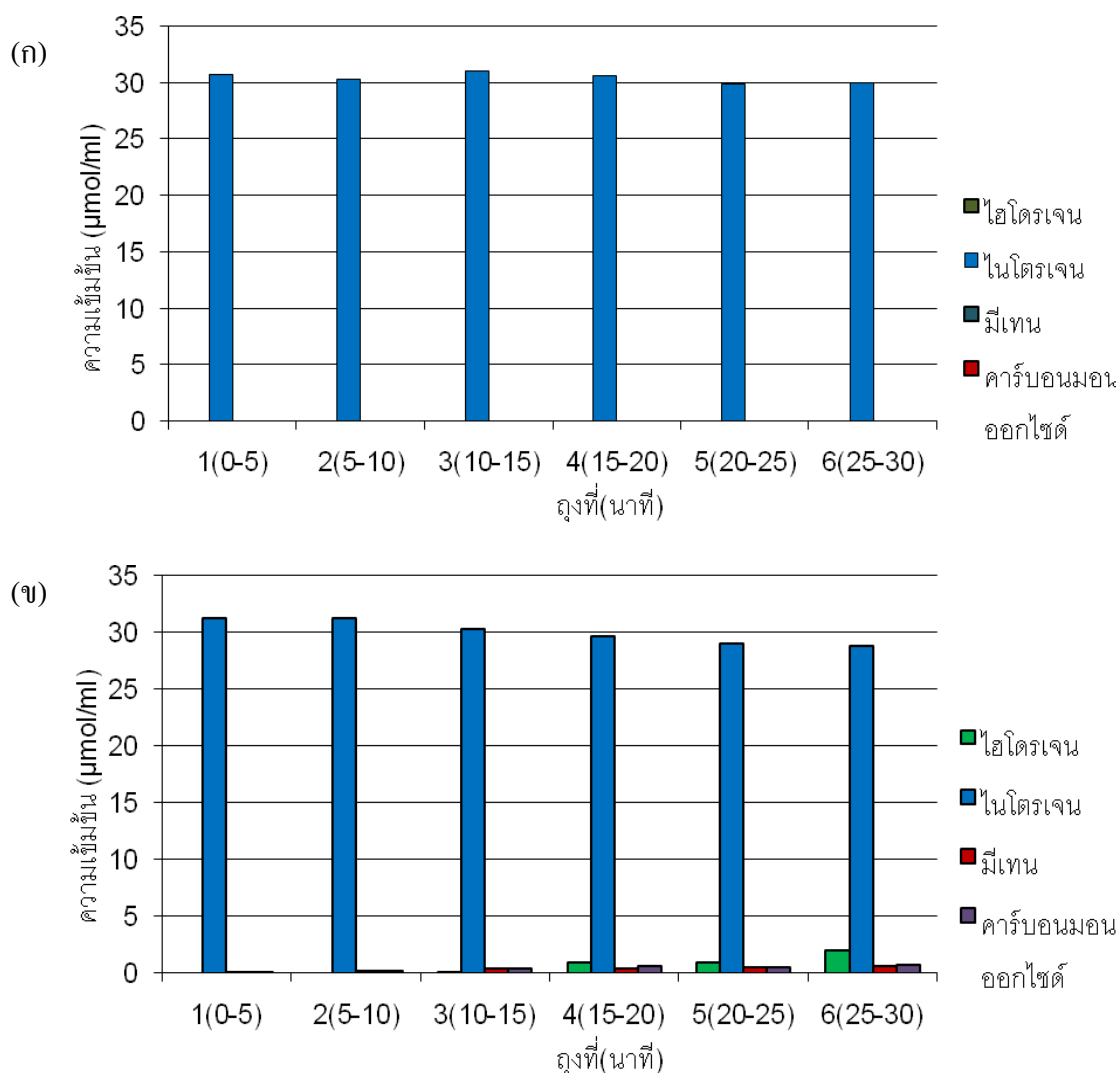
การทดลองเริ่มจากการต้มเอทานอล โดยจับเวลาในตั้งแต่เริ่มต้มจนอุณหภูมิได้อุณหภูมิคงที่ 83 องศาเซลเซียส (Pre-stage time) จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 30 kVpp ความถี่ 50 Hz ปล่อยให้ไอระเหยของเอทานอลไล่อากาศที่มีอยู่ในระบบออกเป็นเวลา 15 นาที (Pre-sampling time) จากนั้นเริ่มเก็บก๊าซทันทีเมื่อครบเวลาที่ 15 การเก็บก๊าซแต่ละจุด (Sampling time) จนครบ 30 นาที แล้วจึงเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ตามแผนผังในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 แผนผังการศึกษาขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

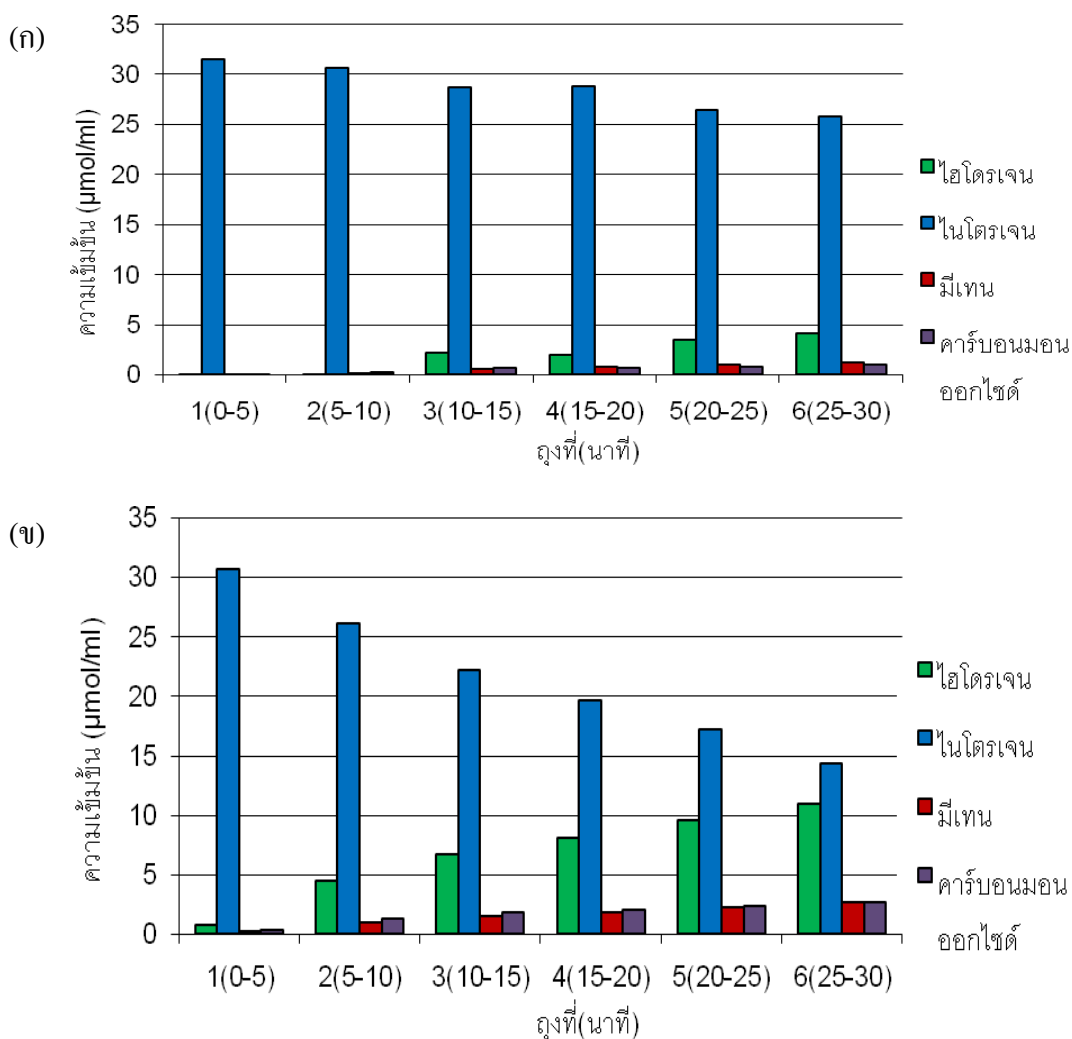
ระหว่างการทดลองพบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตไฮโดรเจน จึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าระดับต่าง ๆ ที่มีต่อปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้ โดยแบ่งช่วงเวลาในการเก็บก๊าซช่วงละ 5 นาที

ผลการศึกษาพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 kVpp ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนต่ำ ทำให้ก๊าซเข้าถุงเก็บช้าและมีปริมาณแอลกอฮอล์ที่ดักจับในปริมาณมาก ผลวิเคราะห์ก๊าซสังเกตได้ว่าฟิสิกของไฮโดรเจนเริ่มปรากฏในช่วงเวลา 15-20 นาที และเพิ่มขึ้นไม่มากนักดังภาพที่ 4.21 (ข) เปรียบเทียบกับกรณีต้มเอทานอลอย่างเดียวไม่ปรากฏฟิสิกของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังภาพที่ 4.21 (ก) แสดงว่าไม่เกิดการไอออไนซ์ของเอทานอล จะไม่มีผลาสมายที่ทำหน้าที่เสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิงได้



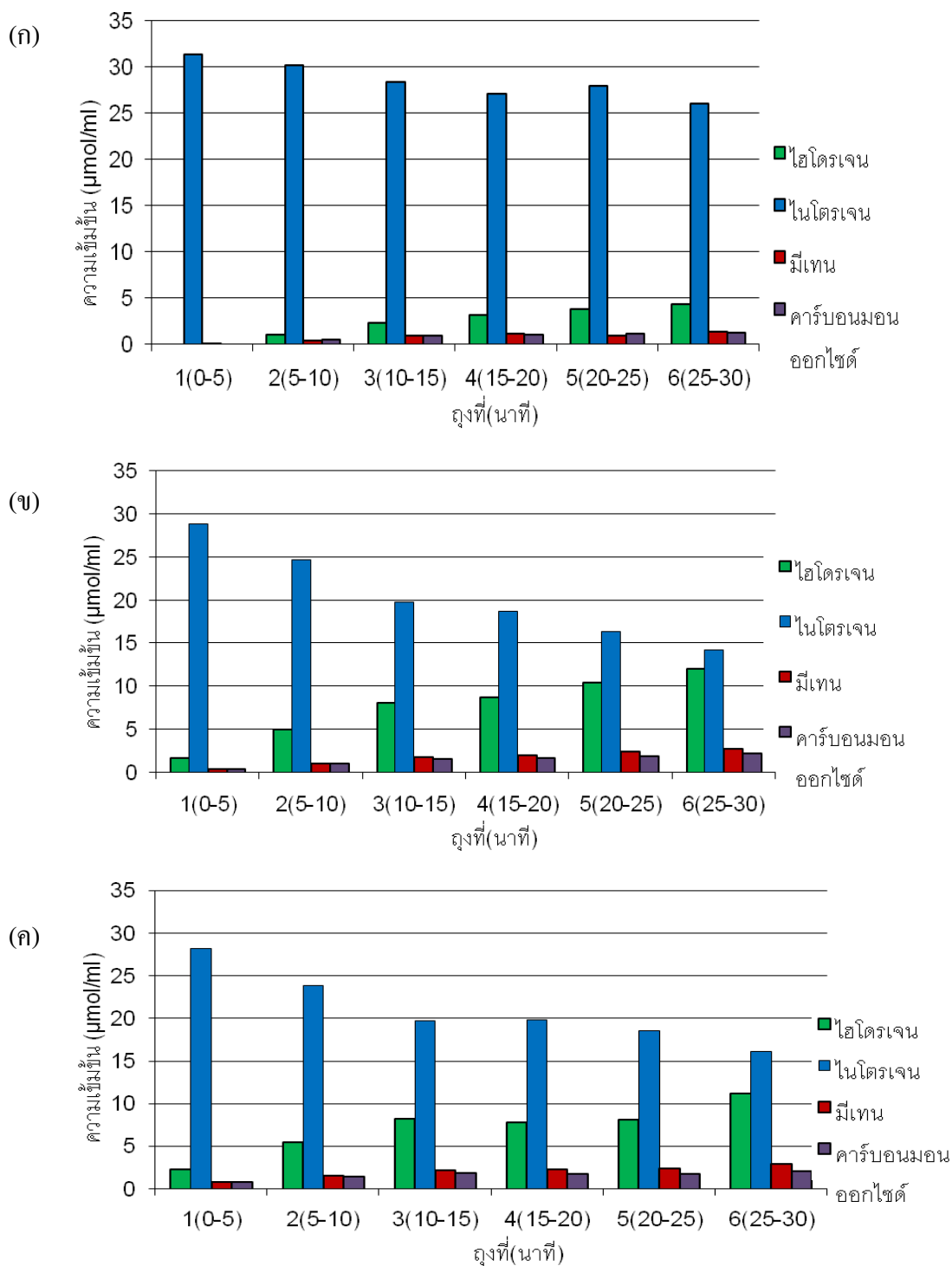
ภาพที่ 4.21 ผลของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ก) ไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้า (ข) ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp

เมื่อปรับความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 200 Hz แปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 24 kVpp และ 30 kVpp พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากกว่า ซึ่งมีผลทำให้ก๊าซเข้าถุงมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการที่ฟลักของไฮโดรเจนเริ่มปรากฏในช่วงเวลา 10-15 นาทีในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ 24 kVpp ดังกราฟแสดงปริมาณก๊าซในภาพที่ 4.22 (ก) และฟลักของไฮโดรเจนปรากฏช่วง 5 นาทีแรกในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ 30 kVpp ดังกราฟแสดงปริมาณก๊าซภาพที่ 4.22 (ข)



ภาพที่ 4.22 ผลของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ก) ความถี่ไฟฟ้า 200 Hz แรงดันไฟฟ้า 24 kVpp (ข) ความถี่ไฟฟ้า 200 Hz แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp

เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 350 Hz แปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 24 kVpp และ 30 kVpp พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากกว่า ซึ่งมีผลทำให้ก๊าซเข้าถุงมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการที่ฟลักของไฮโดรเจนเริ่มปรากฏในช่วงเวลา 5-10 นาทีในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ 24 kVpp ดังกราฟแสดงปริมาณก๊าซภาพที่ 4.23 (ก) และฟลักของไฮโดรเจนปรากฏช่วง 5 นาทีแรกในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ 30 kVpp ดังกราฟแสดงปริมาณก๊าซภาพที่ 4.23 (ข) และเมื่อเพิ่มความถี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 500 Hz พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 24 kVpp มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนน้อยกว่า ความถี่ 350 Hz เนื่องจากความหนาแน่นในการเกิดพลาสมาน้อยกว่าสังเกตจากการใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ดังกราฟแสดงปริมาณก๊าซในภาพที่ 4.23 (ค)



ภาพที่ 4.23 ผลของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ก) ความถี่ 350 Hz แรงดันไฟฟ้า 24 kVpp (ข) ความถี่ 350 Hz แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp (ค) ความถี่ 500 Hz แรงดันไฟฟ้า 24 kVpp

เมื่อเปรียบเทียบความถี่ไฟฟ้าเท่ากัน เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเข้าถู่เก็บก๊าซมากขึ้น แสดงว่าแรงดันไฟฟ้ามีผลต่ออัตราการผลิตไฮโดรเจนและสามารถสรุปเงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าและความถี่บางช่วงเวลาดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่เหมาะสมในการทดลอง

เงื่อนไขทดลอง	ความเข้มข้นของไฮโดรเจน ($\mu\text{ mol/ml}$)			
	กำลังไฟฟ้า (W)	0-5 นาที	15-20 นาที	25-30 นาที
ไม่จ่ายแรงดัน	-	-	-	-
50 Hz 30 kVpp	*	-	0.98	2.01
200 Hz 24 kVpp	*	-	2.00	4.11
200 Hz 30 kVpp	*	0.69	8.04	10.80
350 Hz 24 kVpp	16	-	3.13	4.33
350 Hz 30 kVpp	25	1.75	8.72	12.00
500 Hz 24 kVpp	20	2.24	7.84	11.10

* ไม่สามารถวัดขนาดของกระแสได้

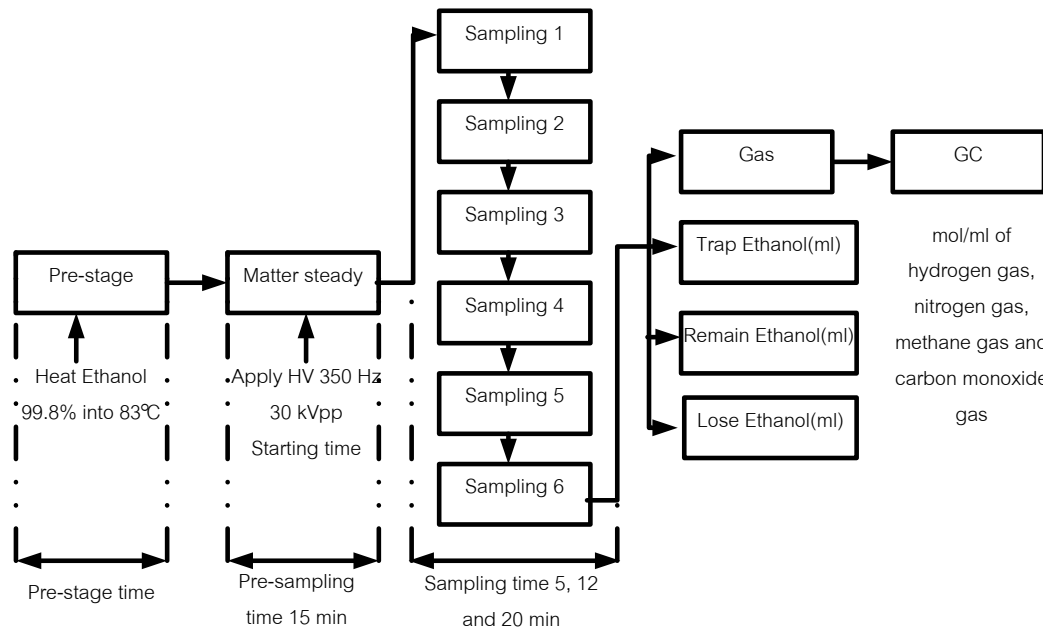
ผลการศึกษานขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนให้ได้ปริมาณสูงที่สุด พบว่า ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ 350 Hz และแรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ให้ผลดีที่สุด ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าในการกำเนิดพลาสมาความเข้มสูง ทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ประสิทธิภาพสูงและปริมาณก๊าซที่เข้าสู่ถู่เก็บก๊าซในปริมาณมากที่ช่วงเวลาเดียวกัน

4.4.2 ช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสม (Sampling time)

ในการศึกษาช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสมโดยใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด ด้วยการแปรเปลี่ยนช่วงเวลาในการเก็บก๊าซ (Sampling time) ที่ต่างกัน คือ 5, 12 และ 20 นาที เพื่อที่จะหาเวลาอิมตัวของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยสังเกตจากก๊าซไฮโดรเจนที่ลดลงมากจนไม่สามารถลดลงได้อีก และความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเริ่มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

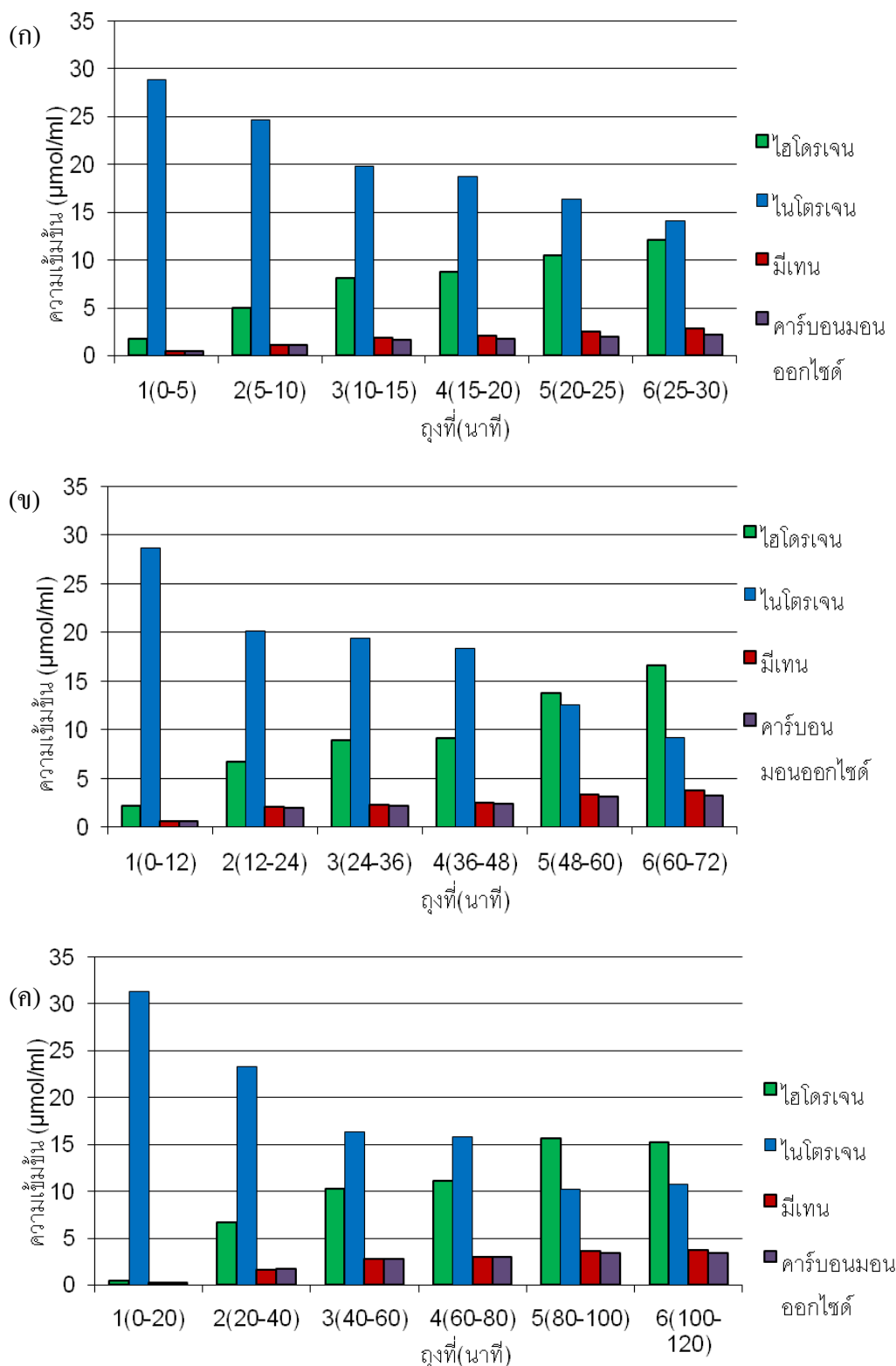
การทดลองเริ่มจากการต้มเอทานอล โดยจับเวลาตั้งแต่เริ่มต้มจนได้อุณหภูมิคงที่ 83 องศาเซลเซียส (Pre-stage time) ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้า 30 kVpp และความถี่ไฟฟ้า 350 Hz ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดตามหัวข้อที่ 4.4.1 ปล่อยให้ไอระเหยของเอทานอลไล่อากาศที่มีอยู่ในระบบออกทิ้งไว้ 15 นาที (Pre-sampling time) จากนั้นเริ่มเก็บก๊าซทันทีเมื่อครบนาทีที่ 15

ในการเก็บก๊าซแปรเปลี่ยนช่วงเวลาในการเก็บก๊าซครั้งละ 5, 12 และ 20 นาที ตามลำดับ ดังแผนผังในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 แผนผังการศึกษาช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสม (Sampling time) ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

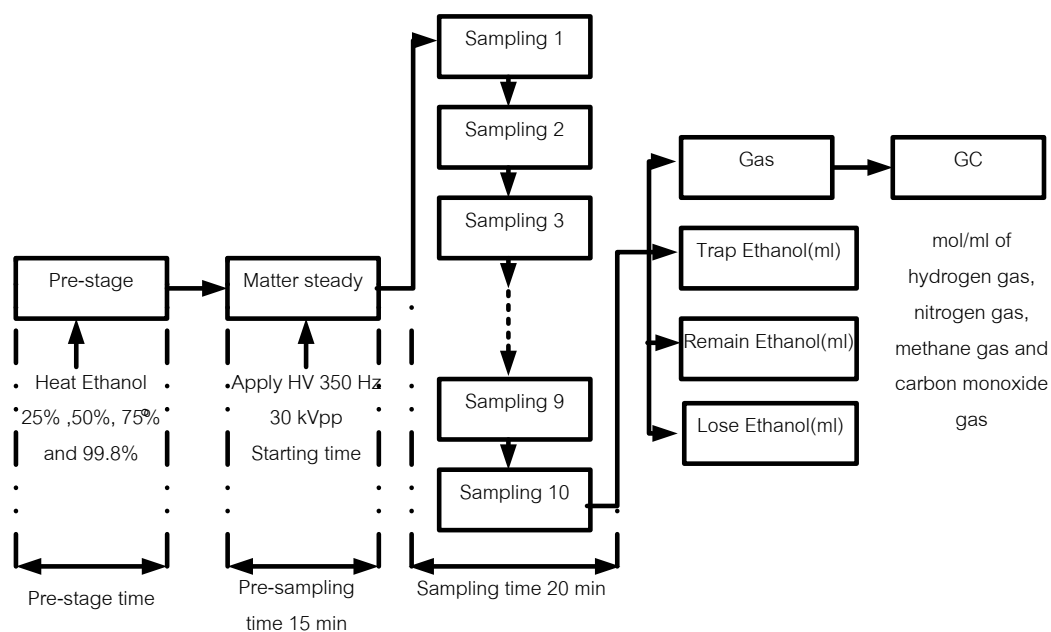
ผลการศึกษาช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสม (Sampling time) ที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ไฟฟ้า 350 Hz ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด พบว่าผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะสูงขึ้นตามช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เพิ่มขึ้น ถ้าช่วงเวลาในการเก็บก๊าซน้อย เช่น เก็บก๊าซครั้งละ 5 นาที จะยังไม่เห็นความแตกต่างของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเมื่อเพิ่มเวลาในการเก็บก๊าซครั้งละ 12 นาทีทำให้สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะคงที่เมื่อไร ดังนั้นจึงต้องเพิ่มช่วงการเก็บก๊าซให้นานขึ้นโดยเก็บก๊าซครั้งละ 20 นาที เพื่อให้ทราบอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่คงที่ได้แน่นอน จากการขยายเวลาในการเก็บก๊าซพบว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนเริ่มคงที่เวลา 80 นาที ดังกราฟแสดงปริมาณสัดส่วนผลิตภัณฑ์ก๊าซในภาพที่ 4.25 และนำเงื่อนไขที่ได้จากหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2 ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.25 กราฟช่วงเวลาในการเก็บก๊าซที่เหมาะสม (Sampling time) ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
(ก) เก็บก๊าซครั้งละ 5 นาที (ข) เก็บก๊าซครั้งละ 12 นาที (ค) เก็บก๊าซครั้งละ 20 นาที

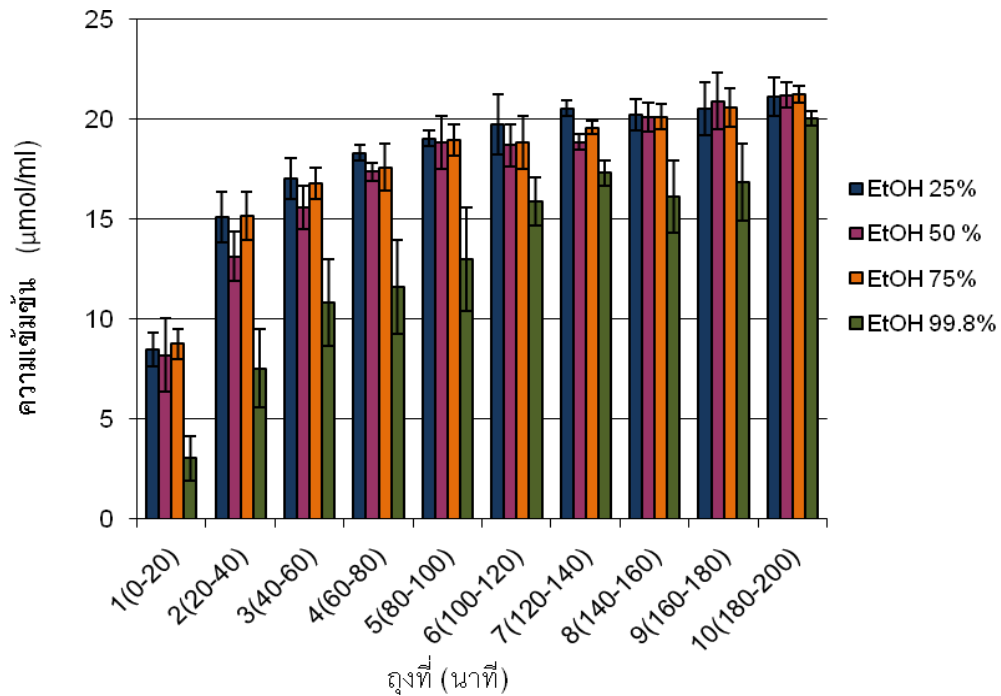
4.4.3 ความเข้มข้นโดยปริมาตรของเอทานอลที่เหมาะสม

ได้ศึกษาผลของความเข้มข้น โดยปริมาตรของเอทานอลที่มีต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดจากหัวข้อ 4.4.1 และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บก๊าซจากหัวข้อ 4.4.2 ความเข้มข้นโดยปริมาตรของเอทานอลที่ใช้ในการทดลอง คือ 25 %, 50 %, 75 % และ 99.8 % ในการทดลองแต่ละครั้งจะปรับอุณหภูมิโดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิของเอทานอลคงที่ที่จุดเดือดซึ่งแตกต่างกันตามความเข้มข้นของเอทานอล ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่ทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บก๊าซ ปล่อยให้ไอของเอทานอลไล่อากาศที่มีอยู่ในระบบออกทิ้งไว้ 15 นาที (Pre-sampling time) เริ่มเก็บก๊าซทันทีเมื่อครบนาทีที่ 15 เก็บก๊าซแต่ละถุง (Sampling time) โดยใช้ช่วงเวลาในการเก็บถุงละ 20 นาที จนครบ 200 นาที ดังแผนผังในภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 แผนผังการศึกษาความเข้มข้น โดยปริมาตรของเอทานอลในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ผลการทดลองผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นของเอทานอล 25%, 50%, 75% และ 99.8% โดยปริมาตรเป็นวัตถุดิบ ให้ผลผลิตไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังกราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนในภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.27 กราฟความเข้มข้นเอทานอลโดยปริมาตรที่มีผลต่อความเข้มข้นไฮโดรเจน

จากการทดลองยังพบว่า การให้ความร้อนแก่เอทานอลจนเดือดด้วยอุณหภูมิคงที่แล้วเริ่มจ่ายไฟฟ้าให้ชุดกำเนิดพลาสมาจะเห็นประกายไฟกระจายทั่วบริเวณคอดัมน์แก้วในช่วงแรกเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากการที่มีปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เหมาะสมในการติดไฟอยู่ แต่เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงทำให้ประกายไฟหายไป บริเวณการเกิดพลาสมาจะคงที่

จากกราฟในภาพที่ 4.27 พบว่า อัตราการผลิตไฮโดรเจนจะคงที่ ตั้งแต่ช่วงเวลา 80-100 นาที มีเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังจากช่วงเวลา 100-200 นาทีถัดไป หลังจากนั้นได้คำนวณหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนเฉลี่ย และหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด ดังตารางที่ 4.3 ตามเงื่อนไขของความเข้มข้นเอทานอลต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นเอทานอลที่มีต่ออัตราการผลิตไฮโดรเจน

ความเข้มข้น ของเอทานอล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณของเอทานอล(มิลลิลิตร)			อัตราการผลิตไฮโดรเจน ($\mu\text{ mol/ml/min}$)	
		ก่อนต้ม	หลังต้ม	ดักจับ	สูงสุด	เฉลี่ย
25%	92	350	343	4	1.05 ± 0.047	1.01 ± 0.051
50%	87	350	339	8	1.06 ± 0.048	0.98 ± 0.067
75%	85	350	344	2	1.06 ± 0.020	0.99 ± 0.056
99.8%	83	350	273	66	1.00 ± 0.357	0.82 ± 0.127

จากการคำนวณหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่าง ๆ พบว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ $1.05 \mu\text{ mol/ml/min}$ ซึ่งไม่ต่างกันมากเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้น แต่อัตราการผลิตไฮโดรเจนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ $1.01 \mu\text{ mol/ml/min}$ เมื่อใช้ความเข้มข้นเอทานอล 25% ที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของเอทานอลที่เหลือหลังต้มก็ลดลงไม่มาก (ประมาณ 2-3%) สำหรับความเข้มข้น 25, 50 และ 75% ซึ่งแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับกรณีของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ปริมาณลดลงถึง 22% ซึ่งเอทานอลบริสุทธิ์มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ $0.82 \mu\text{ mol/ml/min}$ โดยมีเอทานอลหลงเหลืออยู่ในเครื่องแก้วดักจับประมาณ 66 มิลลิลิตร แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตน้อยกว่าเอทานอลความเข้มข้นต่ำ ซึ่งคาดว่าเป็นเพราะปริมาณความเข้มข้นเอทานอลบริสุทธิ์ที่สูง มีการระเหยรวดเร็วมาก กระแสไฟฟ้าจาก DBD ไม่เพียงพอที่จะทำให้เอทานอลในสถานะไอแตกตัวได้หมด จึงทำให้เอทานอลไปอยู่ที่เครื่องแก้วดักจับมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตลดลง

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองกับน้ำกลั่น โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับเอทานอล แต่ใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเพื่อให้น้ำเดือดไปไอ พบว่า ก๊าซผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเข้าไปในถุงเก็บก๊าซด้วยอัตราการไหลที่ต่ำ ทำให้ปริมาณอยู่ในถุงเก็บก๊าซปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเอทานอลดังตารางที่ 4.4 ดังนั้นสัดส่วนเอทานอลในน้ำมีส่วนสำคัญมากในการเกิดไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นไฮโดรเจนที่ได้จาก น้ำกลั่น เอทานอล 50% และเอทานอลบริสุทธิ์

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจน (μ mol/ml)			
		0-20 นาที	60-80 นาที	140-160 นาที	180-200 นาที
น้ำกลั่น	105	-	5.13 ± 1.09	9.17 ± 3.03	12.20 ± 2.08
เอทานอล 50%	87	8.19 ± 1.26	17.30 ± 0.045	20.00 ± 0.073	21.10 ± 0.062
เอทานอลบริสุทธิ์	83	3.03 ± 1.94	11.60 ± 2.32	16.10 ± 1.87	20.00 ± 0.036

นอกจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาพลาสมารีฟอร์มมิ่งแล้วยังพบ ก๊าซมีเทน และ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งแสดงอัตราการผลิตของไฮโดรเจนต่อมีเทน และอัตราการผลิตของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังตารางที่ 4.5 พบว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนต่อมีเทน ประมาณ 4.5 เท่า และอัตราการผลิตไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 5.5 เท่าของเอทานอลเข้มข้น 25%, 50% และ 75% ดังนั้นอัตราการเกิดไฮโดรเจนจึงถือว่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราการผลิตของ H_2/CH_4 และ H_2/CO

ความเข้มข้น ของเอทานอล	อัตราการผลิต (μ mol/ml/min)				
	H_2	CH_4	CO	H_2/CH_4	H_2/CO
เอทานอล 25%	1.01 ± 0.051	0.21 ± 0.017	0.18 ± 0.033	4.81	5.61
เอทานอล 50%	0.98 ± 0.067	0.22 ± 0.019	0.16 ± 0.034	4.45	6.12
เอทานอล 75%	0.99 ± 0.056	0.21 ± 0.014	0.20 ± 0.025	4.71	4.95
เอทานอลบริสุทธิ์	0.85 ± 0.127	0.22 ± 0.050	0.17 ± 0.050	3.86	5.00

จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซที่เก็บได้จากถุงเก็บก๊าซมาคำนวณ % Molar fraction ของ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่า % Molar fraction ของก๊าซไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเอทานอล 25 %, 50 % และ 75 % มีค่าประมาณ 60 % ของก๊าซทั้งหมดในถุงเก็บก๊าซ ส่วน % Molar fraction ของก๊าซไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 99.8 % มีค่าประมาณ 50 % ของก๊าซทั้งหมดในถุงเก็บก๊าซ เนื่องจากการเกิดดีคาร์บอนจากชุดกำเนิดพลาสมาไม่เพียงพอที่จะทำให้ความเข้มข้นเอทานอลบริสุทธิ์แตกตัวได้ทัน และสัดส่วนของน้ำอาจมีส่วนช่วยทำให้เกิดการไอออไนซ์ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นองค์ประกอบของพลาสมาจะไปกระตุ้นการสลายของโมเลกุลเอทานอล และน้ำ ไปเป็นอะตอมของไฮโดรเจน และอนุมูล เช่น CH_3 และ OH จะเห็นได้ว่าอะตอมของไฮโดรเจนส่วนหนึ่งมาจากน้ำ และอีกส่วนมาจากเอทานอล จึงมี

ผลทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเอทานอลที่เจือจางมีประสิทธิภาพดีกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ นอกจากนี้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า % Molar fraction ของก๊าซมีเทนที่ความเข้มข้นเอทานอล 25 %, 50 %, 75 % และ 99.8% มีค่าประมาณ 13 % ของก๊าซทั้งหมดในถุงเก็บก๊าซ และ % Molar fraction ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเอทานอล 25 %, 50 %, 75 % และ 99.8 % มีค่าประมาณ 10 % ของก๊าซทั้งหมดในถุงเก็บก๊าซ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบ % Molar fraction ของ H_2 , N_2 , CH_4 and CO

ความเข้มข้น ของเอทานอล	H_2 % Molar fraction	N_2 % Molar fraction	CH_4 % Molar fraction	CO % Molar fraction
เอทานอล 25%	61.33	14.63	13.11	10.92
เอทานอล 50%	59.55	17.10	13.35	10.00
เอทานอล 75%	62.20	13.80	13.61	10.38
เอทานอลบริสุทธิ์	50.38	26.46	12.37	10.78

หมายเหตุ ไม่รวมความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเนื่องจากไม่ได้ทำการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

การพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอันเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำ ส่วนการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโคอีเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ และ ส่วนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ในส่วนของการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำได้นำหม้อแปลงจุดหลอดนีออนมาประยุกต์ในงานวิจัย ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะเพียงพอในการกำเนิดพลาสมาแบบแบริเออร์ดิสชาร์จ สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0- 30 kVpp กระแสไฟฟ้าใช้งาน 2.5 mA กำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง คือ 27 W สามารถปรับความถี่ไฟฟ้าในช่วง 50-850 Hz อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงความถี่ไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดี คือ 300-500 Hz เนื่องจากโครงสร้างของขดลวดทูลูมิของหม้อแปลงจุดหลอดนีออนมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจูลระหว่างชั้นขดลวดสูง ทำให้มีสภาพสมมูลเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (LC low pass filter) ส่งผลถึงการตอบสนองความถี่ที่แคบลง

5.1.2 ในส่วนของการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโคอีเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ และส่วนของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดเพื่อใช้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉพาะ และได้ทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้น ซึ่งพบว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะของเหลวโดยอาศัยอากาศเป็นก๊าซพา ไม่สามารถผลิตได้เนื่องจากการทำให้เอทานอลในสถานะของเหลวจะเกิดการไออ้อนไนซ์ได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงมาก [11] ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้มีกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เอทานอลแตกตัวได้

เนื่องจากข้อจำกัดด้วยวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะของเหลวที่ไม่สามารถทำได้จึงต้องเปลี่ยนเป็นวิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะก๊าซโดยอาศัยความร้อนเปลี่ยนสถานะเอทานอลเหลวให้มีสถานะเป็นก๊าซ อาศัยแรงดันไอเคลื่อนเอทานอลในสถานะก๊าซผ่านบริเวณก่อกพลาสมาแบบแบริเออร์ดิสชาร์จทรงกระบอกและได้ทำการปรับขนาดท่อแก้วเพื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า

5.1.3 เงื่อนไขของวิธีการพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลแบบแบริเออร์ดิสชาร์จทรงกระบอก ที่ออกแบบขึ้นและทำให้ได้ผลผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด คือ แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ไฟฟ้า 350 Hz และกำลังไฟฟ้าในการผลิต 25 W โดยพบว่า อัตราการผลิตไฮโดรเจนเริ่มคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 80 นาที และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเอทานอลที่ต่างกัน พบว่า อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเอทานอล 25 %, 50 % และ 75 % โดยปริมาตร มีค่าเฉลี่ยประมาณ $1.00 \mu\text{ mol/ml/min}$ ซึ่งมากกว่าอัตราที่วัดได้เมื่อใช้ความเข้มข้นเอทานอล 99.8 % โดยปริมาตร เนื่องจากปริมาณของไอน้ำที่ผสมกับเอทานอลมีผลต่ออัตราการผลิต ทำให้เกิดการไอออไนซ์เป็นอะตอมของไฮโดรเจนและอนุมูล เช่น CH_3 และ OH ได้ง่ายขึ้น และยังไม่สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเอทานอลปริมาณเท่าไรที่เหมาะสมที่จะได้ปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนด้วยวิธีการพลาสมารีฟอร์มมิงด้วยเอทานอล อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาและพัฒนาต่อไป เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตให้มากขึ้น และเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการผลิต โดยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.2.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำมีกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้อเอทานอลในสถานะของเหลวแตกตัวได้ จึงควรพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถตอบสนองย่านความถี่ที่กว้างขึ้นในระดับความถี่เสียงอยู่ในช่วง 50 Hz-20 kHz ซึ่งเป็นการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้มีศักยภาพเทียบเท่าเชิงพาณิชย์

5.2.2 สำหรับงานวิจัยทางด้านพลาสมาในเอทานอลเพื่อนำไปใช้ในการผลิตไฮโดรเจนนั้นมีน้อยมาก เพราะเป็นการยากที่จะทำให้อเอทานอลในสถานะของเหลวเปลี่ยนเป็นก๊าซและเป็นพลาสมาหรือเอทานอลในสถานะของเหลวให้กลายเป็นพลาสมาในขั้นเดียว เนื่องจากต้องอาศัยแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ DC discharge, Rf discharge และ Microwave discharge ซึ่งการกำเนิดพลาสมาแบบนี้มีกำลังไฟฟ้าสูงในระดับ kW ซึ่งมีความเหมาะสมในการประยุกต์ด้านพลาสมารีฟอร์มมิงในเอทานอลสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

5.2.3 วิธีพลาสมารีฟอร์มมิงเอทานอลในสถานะก๊าซโดยอาศัยความร้อนเป็นตัวพาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเป็นวิธีที่ดี แต่ควรมีการปรับปรุงระบบที่สามารถวัดความเข้มข้นเอทานอลขาเข้า ความเข้มข้นเอทานอลขาออก เพื่อนำไปสู่การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนค่าสารตั้งต้น (% Conversion) และระบบกำเนิดพลาสมาที่ขาออกควรนำไปต่อกับเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

โดยตรงจะทำให้แน่ใจว่าไม่มีความผิดพลาดจากการเก็บก๊าซ อันจะนำไปสู่การคำนวณค่ายังผลไฮโดรเจน (% Hydrogen yield) เพื่อที่จะได้ทราบถึงประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนของวิธีนี้ อย่างถูกต้องและนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน ต่อไปในอนาคตของประเทศชาติ

รายการอ้างอิง

- [1] Belen Sarmiento et al. Hydrogen production by reforming of hydrocarbons and alcohols in a dielectric barrier discharge. Journal of Power Source 169(2007) : 140-143.
- [2] Y.P. Hu, Gesheng Li, Yingduo Yang, Xiaohong Gao, Zhihong Lu. Hydrogen generation from hydro-ethanol reforming by DBD-plasma. International Journal of Hydrogen Energy 37(2012) : 1044-1047.
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. เชื้อเพลิงไฮโดรเจน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://202.44.52.249/thaienergynews/EnNewsDetail.aspx?id=15> [22 สิงหาคม 2555]
- [4] New Mexico Solar Energy Association. Electrolysis [Online]. Available from : http://www.nmsea.org/Curriculum/7_12/electrolysis/electrolysis.htm [2012, August 22]
- [5] Alfred Grill. Cold Plasma in Materials Fabrication. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York : IEEE Press, 1994.
- [6] Vijay Nehra, Ashok Kumar and HK Dwivedi. Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. International Journal of Engineering 2(2005) : 53-68
- [7] Part 2: On-board fuel reforming for a natural gas engine. Plasma reforming [Online]. Available from : http://students.chem.tue.nl/ifp23/final_report/report2.pdf [2012, August 22]
- [8] Levko, D.S. Shchedrin, A.I. Chernyak, V.Ya. and Ol'shevskii, S.V. Efficiency of Ethanol Conversion in Equilibrium and Nonequilibrium Plasmas. Technical Physics 55 (2010) : 1699-1702.
- [9] Changming Du., et al. Hydrogen production by steam-oxidative reforming of bio-ethanol assisted by Laval nozzle arc discharge. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 37 (2012) : 8318-8329.
- [10] Guillaume Petitpas, Jose Gonzalez-Aguilar, Adeline Darmon and Laurent Fulcheri. Ethanol and E85 Reforming Assisted by a Non-thermal Arc Discharge. Energy Fuels 24 (2010) : 2607-2613.
- [11] Roth, J.R. Industrial Plasma Engineering: Principles. Bristol, U.K.: IOP, 1995.
- [12] Kogelschatz, U. Eliasson, B. and Egli, W. Dielectric-Barrier Discharge. Principle and Applications. JOURNAL DE PHYSIQUE IV: 1997

- [13] Ulrich Kogelschatz. Dielectric-barrier Discharge: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 23(2003) : 1-46.
- [14] Young & Freedman. ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อิน โคไชน่า, 2005.
- [15] CRC Handbook of Chemistry & Physics. Dielectric strength of Insulating Materials [Online]. Available from : http://psyhosting.info/Ionium/Rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf [2012, August 25]
- [16] PSU ไบโอดีเซล26. แอลกอฮอล์ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://share.psu.ac.th/blog/eng-biodiesel/21450> [24 สิงหาคม 2555]
- [17] กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์. สารละลาย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.satit.nu.ac.th/nud/strand/science/File/c/สารละลาย1.ppt [29 สิงหาคม 2555]
- [18] รุจิตักษณ์ รัตธรรมย์. เอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง “ ก๊าซโครมาโทกราฟี ” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.docstoc.com/docs/45375250/Gas-Chromatography-GC--squalane> [29 สิงหาคม 2555]
- [19] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สิทธีพรแอสโซซิเอต, 2003.
- [20] SHIMADZU. Accessories and Supplies for Shimadzu Gas Chromatographs [Online]. Available from: http://www.chemshow.cn/UploadFile/datum/1003/shjohntec_2008218115733800771.pdf [29 สิงหาคม 2555]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ก๊าซโครมาโทกราฟี

การปรับภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

ภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงในตารางที่ ก-1 และความเข้มข้นของเอทานอลที่เป็นสารตั้งต้นแสดงในตารางที่ ก-2

ตาราง ก-1 ภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา
พลาสมารีฟอร์มมิงของเอทานอล

ก๊าซพา	อาร์กอน 99.99%
อุณหภูมิอินเจกเตอร์	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ เริ่มต้น	50 องศาเซลเซียส
	สิ้นสุด
ชนิดของดีเทคเตอร์	Thermal conductivity detector
ชนิดของคอลัมน์	Molecular sieve 5A
อัตราการไหลของก๊าซพา	40 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก-2 ภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลที่เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาพลาสมารีฟอร์มมิง

ก๊าซพา	ก๊าซไนโตรเจน
อุณหภูมิอินเจกเตอร์	220 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ เริ่มต้น	170 องศาเซลเซียส (Isothermal)
ชนิดของดีเทคเตอร์	Thermal conductivity detector
ชนิดของคอลัมน์	PQ
อัตราการไหลของก๊าซพา	50 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ข
ความดันไอและความหนาแน่นของสาร

TABLE 3-3 Vapor Pressure of Water Ice from -15 to 0°C*
mmHg

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-14	1.361	1.348	1.336	1.324	1.312	1.300	1.288	1.276	1.264	1.253
-13	1.490	1.477	1.464	1.450	1.437	1.424	1.411	1.399	1.386	1.373
-12	1.632	1.617	1.602	1.588	1.574	1.559	1.546	1.532	1.518	1.504
-11	1.785	1.769	1.753	1.737	1.722	1.707	1.691	1.676	1.661	1.646
-10	1.950	1.934	1.916	1.899	1.883	1.866	1.849	1.833	1.817	1.800
-9	2.131	2.112	2.093	2.075	2.057	2.039	2.021	2.003	1.985	1.968
-8	2.326	2.306	2.285	2.266	2.246	2.226	2.207	2.187	2.168	2.149
-7	2.537	2.515	2.493	2.472	2.450	2.429	2.408	2.387	2.367	2.346
-6	2.765	2.742	2.718	2.695	2.672	2.649	2.626	2.603	2.581	2.559
-5	3.013	2.987	2.962	2.937	2.912	2.887	2.862	2.838	2.813	2.790
-4	3.280	3.252	3.225	3.198	3.171	3.144	3.117	3.091	3.065	3.039
-3	3.568	3.539	3.509	3.480	3.451	3.422	3.393	3.364	3.336	3.308
-2	3.880	3.848	3.816	3.785	3.753	3.722	3.691	3.660	3.630	3.599
-1	4.217	4.182	4.147	4.113	4.079	4.045	4.012	3.979	3.946	3.913
0	4.579	4.542	4.504	4.467	4.431	4.395	4.359	4.323	4.287	4.252

* For data at 0(0.2)-30(2)-98°C, see p. 2324, "Handbook of Chemistry and Physics," 40th ed., Chemical Rubber Publishing Co.

TABLE 3-4 Vapor Pressure of Liquid Water from -16 to 0°C*
mmHg

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-15	1.436	1.425	1.414	1.402	1.390	1.379	1.368	1.356	1.345	1.334
-14	1.560	1.547	1.534	1.522	1.511	1.497	1.485	1.472	1.460	1.449
-13	1.691	1.678	1.665	1.651	1.637	1.624	1.611	1.599	1.585	1.572
-12	1.834	1.819	1.804	1.790	1.776	1.761	1.748	1.734	1.720	1.705
-11	1.987	1.971	1.955	1.939	1.924	1.909	1.893	1.878	1.863	1.848
-10	2.149	2.134	2.118	2.099	2.084	2.067	2.050	2.034	2.018	2.001
-9	2.326	2.307	2.289	2.271	2.254	2.236	2.219	2.201	2.184	2.167
-8	2.514	2.495	2.475	2.456	2.437	2.418	2.399	2.380	2.362	2.343
-7	2.715	2.695	2.674	2.654	2.633	2.613	2.593	2.572	2.553	2.533
-6	2.931	2.909	2.887	2.866	2.843	2.822	2.800	2.778	2.757	2.736
-5	3.163	3.139	3.115	3.092	3.069	3.046	3.022	3.000	2.976	2.955
-4	3.410	3.384	3.359	3.334	3.309	3.284	3.259	3.235	3.211	3.187
-3	3.673	3.647	3.620	3.593	3.567	3.540	3.514	3.487	3.461	3.436
-2	3.956	3.927	3.898	3.871	3.843	3.815	3.788	3.759	3.730	3.702
-1	4.258	4.227	4.196	4.165	4.135	4.105	4.075	4.045	4.016	3.986
0	4.579	4.546	4.513	4.480	4.448	4.416	4.385	4.353	4.320	4.289

* Computed from the above table with the aid of the thermodynamic equation

$$\log_{10} \frac{p_w}{p_s} = \frac{-1.1489t}{273.1+t} - 1.330 \times 10^{-4}t^2 + 9.084 \times 10^{-6}t^3$$

TABLE 3-5 Vapor Pressure of Liquid Water from 0 to 100°C*
mmHg

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	4.579	4.613	4.647	4.681	4.715	4.750	4.785	4.820	4.855	4.890
1	4.926	4.962	4.998	5.034	5.070	5.107	5.144	5.181	5.219	5.256
2	5.294	5.332	5.370	5.408	5.447	5.486	5.525	5.565	5.605	5.645
3	5.685	5.725	5.766	5.807	5.848	5.889	5.931	5.973	6.015	6.058
4	6.101	6.144	6.187	6.230	6.274	6.318	6.363	6.408	6.453	6.498
5	6.543	6.589	6.635	6.681	6.728	6.775	6.822	6.869	6.917	6.965
6	7.013	7.062	7.111	7.160	7.209	7.259	7.309	7.360	7.411	7.462
7	7.513	7.565	7.617	7.669	7.722	7.775	7.828	7.882	7.936	7.990
8	8.045	8.100	8.155	8.211	8.267	8.323	8.380	8.437	8.494	8.551
9	8.609	8.668	8.727	8.786	8.845	8.905	8.965	9.025	9.086	9.147

TABLE 3-5 Vapor Pressure of Liquid Water from 0 to 100°C*
(Concluded)

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	9.209	9.21	9.333	9.395	9.458	9.521	9.585	9.649	9.714	9.779
11	9.844	9.910	9.976	10.042	10.109	10.176	10.244	10.312	10.380	10.449
12	10.518	10.588	10.658	10.728	10.799	10.870	10.941	11.013	11.085	11.158
13	11.231	11.305	11.379	11.453	11.528	11.604	11.680	11.756	11.833	11.910
14	11.987	12.065	12.144	12.223	12.302	12.382	12.462	12.543	12.624	12.706
15	12.788	12.870	12.953	13.037	13.121	13.205	13.290	13.375	13.461	13.547
16	13.634	13.721	13.809	13.898	13.987	14.076	14.166	14.256	14.347	14.438
17	14.530	14.622	14.715	14.809	14.903	14.997	15.092	15.188	15.284	15.380
18	15.477	15.575	15.673	15.772	15.871	15.971	16.071	16.171	16.272	16.374
19	16.477	16.581	16.685	16.789	16.894	16.999	17.105	17.212	17.319	17.427
20	17.535	17.644	17.753	17.863	17.974	18.085	18.197	18.309	18.422	18.536
21	18.650	18.765	18.880	18.996	19.113	19.231	19.349	19.468	19.587	19.707
22	19.827	19.948	20.070	20.193	20.316	20.440	20.565	20.690	20.815	20.941
23	21.068	21.196	21.324	21.453	21.583	21.714	21.845	21.977	22.110	22.243
24	22.377	22.512	22.648	22.785	22.922	23.060	23.198	23.337	23.476	23.616
25	23.756	23.897	24.039	24.182	24.326	24.471	24.617	24.764	24.912	25.060
26	25.209	25.359	25.509	25.660	25.812	25.964	26.117	26.271	26.426	26.582
27	26.739	26.897	27.055	27.214	27.374	27.535	27.696	27.858	28.021	28.185
28	28.349	28.514	28.680	28.847	29.015	29.184	29.354	29.525	29.697	29.870
29	30.043	30.217	30.392	30.568	30.745	30.923	31.102	31.281	31.461	31.642
30	31.824	32.007	32.191	32.376	32.561	32.747	32.934	33.122	33.312	33.503
31	33.695	33.888	34.082	34.276	34.471	34.667	34.864	35.062	35.261	35.462
32	35.663	35.865	36.068	36.272	36.477	36.683	36.891	37.099	37.308	37.518
33	37.729	37.942	38.155	38.369	38.583	38.801	39.018	39.237	39.457	39.677
34	39.898	40.121	40.344	40.569	40.796	41.023	41.251	41.480	41.710	41.942
35	42.175	42.409	42.644	42.880	43.117	43.355	43.595	43.836	44.078	44.320
36	44.563	44.808	45.054	45.301	45.549	45.799	46.050	46.302	46.556	46.811
37	47.067	47.324	47.582	47.841	48.102	48.364	48.627	48.891	49.157	49.424
38	49.692	49.961	50.231	50.502	50.774	51.048	51.323	51.600	51.879	52.160
39	52.442	52.725	53.009	53.294	53.580	53.867	54.156	54.446	54.737	55.030
40	55.324	55.61	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91
44	68.26	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26
46	75.65	76.04	76.43	76.82	77.21	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20
47	79.60	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29
48	83.71	84.13	84.56	84.99	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60
60	149.38	156.43	163.77	171.38	179.31	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.6	450.9	468.7	487.1	506.1
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00
91	546.05	548.11	550.18	552.26	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87
92	566.99	569.12	571.26	573.40	575.55	577.71	579.87	582.04	584.22	586.41
93	588.60	590.80	593.00	595.21	597.43	599.66	601.89	604.13	606.38	608.64
94	610.90	613.17	615.44	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57
95	633.90	636.24	638.59	640.94	643.30	645.67	648.05	650.43	652.82	655.22
96	657.62	660.03	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.66	677.12	679.69
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78
101	787.57	790.37	793.18	796.00	798.82	801.66				

%	10°C.	15°C.	20°C.	25°C.	30°C.	35°C.	40°C.	%	10°C.	15°C.	20°C.	25°C.	30°C.	35°C.	40°C.
0	0.99973	0.99913	0.99823	0.99708	0.99568	0.99406	0.99225	50	0.92126	0.91776	0.91384	0.90985	0.90580	0.90168	0.89750
1	785	725	636	520	379	217	034	51	.91943	555	160	760	353	.89940	519
2	602	542	453	336	194	031	.98846	52	723	333	.90936	534	125	710	288
3	426	365	275	157	014	.98849	663	53	502	110	307	.89896	479	056	056
4	258	195	103	.98984	.98839	672	485	54	279	.90885	485	079	667	248	.88823
5	098	032	.98938	817	670	501	311	55	055	659	258	.89850	437	016	589
6	.98946	.98877	780	656	507	335	142	56	.90831	433	031	621	206	.88784	356
7	801	729	627	500	347	172	.97975	57	607	207	.89803	392	.88975	552	122
8	660	584	478	346	189	009	808	58	381	.89980	574	162	744	319	.87888
9	524	442	331	193	031	.97846	641	59	154	752	344	.88931	512	085	653
10	393	304	187	043	.97875	685	475	60	.89927	523	113	699	278	.87851	417
11	267	171	047	.97897	723	527	312	61	698	293	.88882	446	044	615	180
12	145	041	.97910	753	573	371	150	62	468	062	650	233	.87809	379	.86943
13	026	.97914	775	611	424	216	.96989	63	237	.88830	417	.87998	574	142	705
14	.97911	790	643	472	278	063	829	64	006	597	183	763	337	.86905	466
15	800	669	514	334	133	.96911	670	65	.88774	364	.87948	527	100	667	227
16	692	552	387	199	.96990	760	512	66	541	130	713	291	.86863	429	.85987
17	583	433	259	062	844	607	352	67	308	.87895	477	054	625	190	747
18	473	313	129	.96923	697	452	189	68	074	660	241	.86817	387	.85950	407
19	363	191	.96997	782	547	294	023	69	.87839	424	004	579	148	710	266
20	252	068	864	639	395	134	.95856	70	602	187	.86766	340	.85908	470	025
21	139	.96944	729	495	242	.95973	687	71	365	.86949	527	100	667	228	.84783
22	024	818	592	348	087	809	516	72	127	710	287	.85859	426	.84986	540
23	.96907	689	453	199	.95929	643	343	73	.86888	470	047	618	184	743	297
24	787	558	312	048	769	476	168	74	648	229	.85806	376	.84941	500	053
25	665	424	168	.95895	607	306	.94991	75	408	.85988	564	134	698	257	.83809
26	539	287	020	738	442	133	810	76	168	747	322	.84891	455	013	564
27	406	144	.95867	576	272	.94955	625	77	.85927	505	079	647	211	.83768	319
28	268	.95996	710	410	098	774	438	78	685	262	.84835	403	.83966	523	074
29	125	844	548	241	.94922	590	248	79	442	018	590	158	720	277	.82827
30	.95977	686	382	067	741	403	055	80	197	.84772	344	.83911	473	029	578
31	823	524	212	.94890	557	214	.93860	81	.84950	525	096	664	224	.82780	329
32	665	357	038	709	370	021	662	82	702	277	.83848	415	.82974	530	079
33	502	186	.94860	525	180	.93825	461	83	453	028	599	164	724	279	.81828
34	334	011	679	337	.93986	626	257	84	203	.83777	348	.82913	473	027	576
35	162	.94832	494	146	790	425	051	85	.83951	525	095	660	220	.81774	322
36	.94986	650	306	.93952	591	221	.92843	86	697	271	.82840	405	.81965	519	067
37	805	464	114	756	390	016	634	87	441	014	583	148	708	262	.80811
38	620	273	.93919	556	186	.92808	422	88	181	.82754	323	.81888	448	003	552
39	431	079	720	353	.92979	597	208	89	.82919	492	062	626	186	.80742	291
40	238	.93882	518	148	770	385	.91992	90	654	227	.81797	362	.80922	478	028
41	042	682	314	.92940	558	170	774	91	386	.81959	529	094	655	211	.79761
42	.93842	478	107	729	344	.91952	554	92	114	688	257	.80823	384	.79941	491
43	639	271	.92897	516	128	733	332	93	.81839	413	.80983	549	111	669	220
44	433	062	685	301	.91910	513	108	94	561	134	705	272	.79835	393	.78947
45	226	.92852	472	085	692	291	.90884	95	278	.80852	424	.79991	555	114	670
46	017	640	257	.91868	472	069	660	96	.80991	566	138	706	271	.78831	388
47	.92806	426	041	649	250	.90845	434	97	698	274	.79846	415	.78981	542	100
48	593	211	.91823	429	028	621	207	98	399	.79975	547	117	684	247	.77806
49	379	.91995	604	208	.90805	396	.89979	99	094	670	243	.78814	382	.77946	507
								100	.79784	360	.78934	506	075	641	203

ภาพที่ ข-3 ความหนาแน่นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

% alcohol by weight	Tenths of %									% alcohol by weight	Tenths of %									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		9	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.99823	804	785	766	748	729	710	692	673	655	0.91384	361	339	317	295	272	250	228	206	183
1	636	618	599	581	562	544	525	507	489	471	160	138	116	093	071	049	026	004	*981	*959
2	453	435	417	399	381	363	345	327	310	292	.90936	914	891	869	846	824	801	779	756	734
3	275	257	240	222	205	188	171	154	137	120	711	689	666	644	621	598	576	553	531	508
4	103	087	070	053	037	020	003	*987	*971	*954	485	463	440	417	395	372	349	327	304	281
5	.98938	922	906	890	874	859	843	827	811	796	258	236	213	190	167	145	122	099	076	054
6	780	765	749	734	718	703	688	673	658	642	031	008	*985	*962	*939	*917	*894	*871	*848	*825
7	627	612	597	582	567	553	538	523	508	493	.89803	780	757	734	711	688	665	643	620	597
8	478	463	449	434	419	404	389	374	360	345	574	551	528	505	482	459	436	413	390	367
9	331	316	301	287	273	258	244	229	215	201	344	321	298	275	252	229	206	183	160	137
10	187	172	158	144	130	117	103	089	075	061	113	090	067	044	021	*998	*975	*951	*928	*905
11	047	033	019	006	*992	*978	*964	*951	*937	*923	.88882	859	836	812	789	766	743	720	698	673
12	.97910	896	883	869	855	842	828	815	801	788	650	626	603	580	557	533	510	487	463	440
13	775	761	748	735	722	709	696	683	670	657	417	393	370	347	323	300	277	253	230	206
14	643	630	617	604	591	578	565	552	539	526	183	160	136	113	089	066	042	019	*995	*972
15	514	501	488	475	462	450	438	425	412	400	.87948	925	901	878	854	831	807	784	760	737
16	387	374	361	349	336	323	310	297	284	272	713	689	666	642	619	595	572	548	524	501
17	259	246	233	220	207	194	181	168	155	142	477	454	430	406	383	359	336	312	288	265
18	129	116	103	089	076	063	050	037	024	010	241	218	194	170	147	123	099	075	052	028
19	.96997	984	971	957	944	931	917	904	891	877	004	*981	*957	*933	*909	*885	*862	*838	*814	*790
20	864	850	837	823	810	796	783	769	756	742	.86766	742	718	694	671	647	623	599	575	551
21	729	716	702	688	675	661	647	634	620	606	527	503	479	455	431	407	383	359	335	311
22	592	578	564	551	537	523	509	495	481	467	287	263	239	215	191	167	143	119	095	071
23	453	439	425	411	396	382	368	354	340	326	047	022	*998	*974	*950	*926	*902	*878	*854	*830
24	312	297	283	269	254	240	225	211	196	182	.85806	781	757	733	709	685	661	636	612	588
25	168	153	139	124	109	094	080	065	050	035	564	540	515	491	467	443	419	394	370	346
26	020	005	*990	*975	*959	*944	*929	*914	*898	*883	322	297	273	249	225	200	176	152	128	103
27	.95867	851	836	820	805	789	773	757	742	726	079	055	031	006	*982	*958	*933	*909	*884	*860
28	710	694	678	662	646	630	613	597	581	565	.84835	811	787	762	738	713	689	664	640	615
29	548	532	516	499	483	466	450	433	416	400	590	566	541	517	492	467	443	418	393	369
30	382	365	349	332	315	298	281	264	247	230	344	319	294	270	245	220	196	171	146	121
31	212	195	178	161	143	126	108	091	074	056	096	072	047	022	*997	*972	*947	*923	*898	*873
32	038	020	003	*985	*967	*950	*932	*914	*896	*878	.83848	823	798	773	748	723	698	674	649	624
33	.94860	842	824	806	788	770	752	734	715	697	599	574	549	523	498	473	448	423	398	373
34	679	660	642	624	605	587	568	550	531	512	348	323	297	272	247	222	196	171	146	120
35	494	475	456	438	419	400	382	363	344	325	095	070	044	019	*994	*968	*943	*917	*892	*866
36	306	287	268	249	230	211	192	172	153	134	.82840	815	789	763	738	712	686	660	635	609
37	114	095	075	056	036	017	*997	*978	*958	*939	583	557	531	505	479	453	427	401	375	349
38	.93919	899	879	859	840	820	800	780	760	740	323	297	271	245	219	193	167	140	114	088
39	720	700	680	660	640	620	599	579	559	539	062	035	009	*983	*956	*930	*903	*877	*850	*824
40	518	498	478	458	437	417	396	376	356	335	.81797	770	744	717	690	664	637	610	583	556
41	314	294	273	253	232	212	191	170	149	129	529	502	475	448	421	394	366	339	312	285
42	107	086	065	044	023	002	*981	*960	*939	*918	257	230	203	175	148	120	093	066	038	010
43	.92897	876	855	834	812	791	770	749	728	707	.80983	955	928	900	872	844	817	789	761	733
44	685	664	642	621	600	579	557	536	515	493	705	677	649	621	593	565	537	509	480	452
45	472	450	429	408	386	365	343	322	300	279	424	395	367	338	310	281	253	224	195	166
46	257	236	214	193	171	150	128	106	085	063	138	109	080	051	022	*993	*963	*934	*905	*875
47	041	019	*997	*976	*954	*932	*910	*889	*867	*845	.79846	816	787	757	727	698	668	638	608	578
48	.91823	801	780	758	736	714	692	670	648	626	547	517	487	456	426	396	365	335	305	274
49	604	582	560	538	516	494	472	450	428	406	243	213	182	151	120	089	059	028	*997	*966
100											.78934									

ภาพที่ ข-4 ความหนาแน่นของเอทานอลปนกับน้ำ (g/ml) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ภาคผนวก ค

ส่วนประกอบของวงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้และอ่านความถี่



ICL8038

**OBSOLETE PRODUCT
NO RECOMMENDED REPLACEMENT**
contact our Technical Support Center at
1-888-INTERSIL or www.intersil.com/tsc

April 2001 File Number 2864.4

Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator

The ICL8038 waveform generator is a monolithic integrated circuit capable of producing high accuracy sine, square, triangular, sawtooth and pulse waveforms with a minimum of external components. The frequency (or repetition rate) can be selected externally from 0.001Hz to more than 300kHz using either resistors or capacitors, and frequency modulation and sweeping can be accomplished with an external voltage. The ICL8038 is fabricated with advanced monolithic technology, using Schottky barrier diodes and thin film resistors, and the output is stable over a wide range of temperature and supply variations. These devices may be interfaced with phase locked loop circuitry to reduce temperature drift to less than 250ppm/°C.

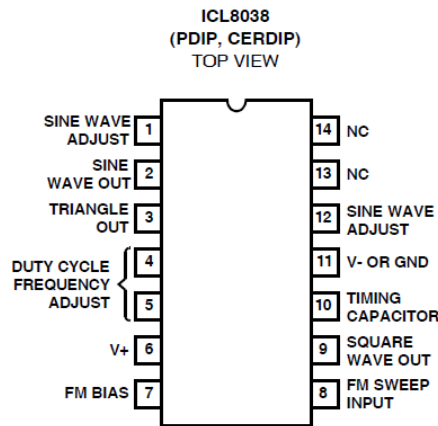
Features

- Low Frequency Drift with Temperature 250ppm/°C
- Low Distortion 1% (Sine Wave Output)
- High Linearity 0.1% (Triangle Wave Output)
- Wide Frequency Range 0.001Hz to 300kHz
- Variable Duty Cycle 2% to 98%
- High Level Outputs. TTL to 28V
- Simultaneous Sine, Square, and Triangle Wave Outputs
- Easy to Use - Just a Handful of External Components Required

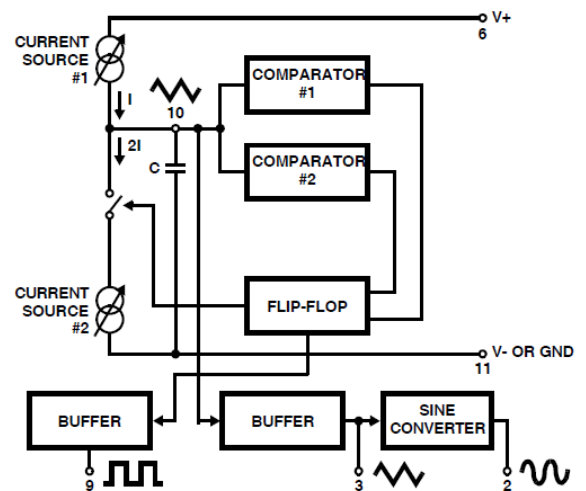
Ordering Information

PART NUMBER	STABILITY	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. NO.
ICL8038CCPD	250ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
ICL8038CCJD	250ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038BCJD	180ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038ACJD	120ppm/°C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3

Pinout



Functional Diagram



ICL8038

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V- to V+)	36V
Input Voltage (Any Pin)	V- to V+
Input Current (Pins 4 and 5)	25mA
Output Sink Current (Pins 3 and 9)	25mA

Operating Conditions

Temperature Range	0°C to 70°C
ICL8038AC, ICL8038BC, ICL8038CC	0°C to 70°C

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (°C/W)	θ_{JC} (°C/W)
CERDIP Package	75	20
PDIP Package	115	N/A
Maximum Junction Temperature (Ceramic Package)	175°C	
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C	
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C	
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C	

Die Characteristics

Back Side Potential	V-
---------------------	----

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

- θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications $V_{SUPPLY} = \pm 10V$ or $+20V$, $T_A = 25^\circ C$, $R_L = 10k\Omega$, Test Circuit Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC			ICL8038AC			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage Operating Range	V_{SUPPLY}											
	V+	Single Supply	+10	-	+30	+10	-	+30	+10	-	+30	V
	V+, V-	Dual Supplies	± 5	-	± 15	± 5	-	± 15	± 5	-	± 15	V
Supply Current	I_{SUPPLY}	$V_{SUPPLY} = \pm 10V$ (Note 2)		12	20	-	12	20	-	12	20	mA
FREQUENCY CHARACTERISTICS (All Waveforms)												
Max. Frequency of Oscillation	f_{MAX}		100	-	-	100	-	-	100	-	-	kHz
Sweep Frequency of FM Input	f_{SWEEP}		-	10	-	-	10	-	-	10	-	kHz
Sweep FM Range		(Note 3)	-	35:1	-	-	35:1	-	-	35:1	-	
FM Linearity		10:1 Ratio	-	0.5	-	-	0.2	-	-	0.2	-	%
Frequency Drift with Temperature (Note 5)	$\Delta f/\Delta T$	0°C to 70°C	-	250	-	-	180	-	-	120	-	ppm/°C
Frequency Drift with Supply Voltage	$\Delta f/\Delta V$	Over Supply Voltage Range	-	0.05	-	-	0.05	-	-	0.05	-	%/V
OUTPUT CHARACTERISTICS												
Square Wave												
Leakage Current	I_{OLK}	$V_g = 30V$	-	-	1	-	-	1	-	-	1	μA
Saturation Voltage	V_{SAT}	$I_{SINK} = 2mA$	-	0.2	0.5	-	0.2	0.4	-	0.2	0.4	V
Rise Time	t_R	$R_L = 4.7k\Omega$	-	180	-	-	180	-	-	180	-	ns
Fall Time	t_F	$R_L = 4.7k\Omega$	-	40	-	-	40	-	-	40	-	ns
Typical Duty Cycle Adjust (Note 6)	ΔD		2		98	2	-	98	2	-	98	%
Triangle/Sawtooth/Ramp												
Amplitude	$V_{TRIANGLE}$	$R_{TRI} = 100k\Omega$	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	$\times V_{SUPPLY}$
Linearity			-	0.1	-	-	0.05	-	-	0.05	-	%
Output Impedance	Z_{OUT}	$I_{OUT} = 5mA$	-	200	-	-	200	-	-	200	-	Ω

ICL8038

Electrical Specifications $V_{SUPPLY} = \pm 10V$ or $+20V$, $T_A = 25^\circ C$, $R_L = 10k\Omega$, Test Circuit Unless Otherwise Specified (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC			ICL8038AC			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Sine Wave												
Amplitude	V_{SINE}	$R_{SINE} = 100k\Omega$	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	$\times V_{SUPPLY}$
THD	THD	$R_S = 1M\Omega$ (Note 4)	-	2.0	5	-	1.5	3	-	1.0	1.5	%
THD Adjusted	THD	Use Figure 4	-	1.5	-	-	1.0	-	-	0.8	-	%

NOTES:

2. R_A and R_B currents not included.
3. $V_{SUPPLY} = 20V$; R_A and $R_B = 10k\Omega$, $f \cong 10kHz$ nominal; can be extended 1000 to 1. See Figures 5A and 5B.
4. $82k\Omega$ connected between pins 11 and 12, Triangle Duty Cycle set at 50%. (Use R_A and R_B .)
5. Figure 1, pins 7 and 8 connected, $V_{SUPPLY} = \pm 10V$. See Typical Curves for T.C. vs V_{SUPPLY} .
6. Not tested, typical value for design purposes only.

Test Conditions

PARAMETER	R_A	R_B	R_L	C	SW_1	MEASURE
Supply Current	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Current Into Pin 6
Sweep FM Range (Note 7)	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Open	Frequency at Pin 9
Frequency Drift with Temperature	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Frequency at Pin 3
Frequency Drift with Supply Voltage (Note 8)	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Frequency at Pin 9
Output Amplitude (Note 10)						
Sine	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Pk-Pk Output at Pin 2
Triangle	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Pk-Pk Output at Pin 3
Leakage Current (Off) (Note 9)	$10k\Omega$	$10k\Omega$		$3.3nF$	Closed	Current into Pin 9
Saturation Voltage (On) (Note 9)	$10k\Omega$	$10k\Omega$		$3.3nF$	Closed	Output (Low) at Pin 9
Rise and Fall Times (Note 11)	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$4.7k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Waveform at Pin 9
Duty Cycle Adjust (Note 11)						
Max	$50k\Omega$	$\sim 1.6k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Waveform at Pin 9
Min	$\sim 25k\Omega$	$50k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Waveform at Pin 9
Triangle Waveform Linearity	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Waveform at Pin 3
Total Harmonic Distortion	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$3.3nF$	Closed	Waveform at Pin 2

NOTES:

7. The hi and lo frequencies can be obtained by connecting pin 8 to pin 7 (f_{HI}) and then connecting pin 8 to pin 6 (f_{LO}). Otherwise apply Sweep Voltage at pin 8 ($\frac{2}{3} V_{SUPPLY} + 2V$) $\leq V_{SWEEP} \leq V_{SUPPLY}$ where V_{SUPPLY} is the total supply voltage. In Figure 5B, pin 8 should vary between 5.3V and 10V with respect to ground.
8. $10V \leq V_+ \leq 30V$, or $\pm 5V \leq V_{SUPPLY} \leq \pm 15V$.
9. Oscillation can be halted by forcing pin 10 to +5V or -5V.
10. Output Amplitude is tested under static conditions by forcing pin 10 to 5V then to -5V.
11. Not tested; for design purposes only.

ICL8038

Test Circuit

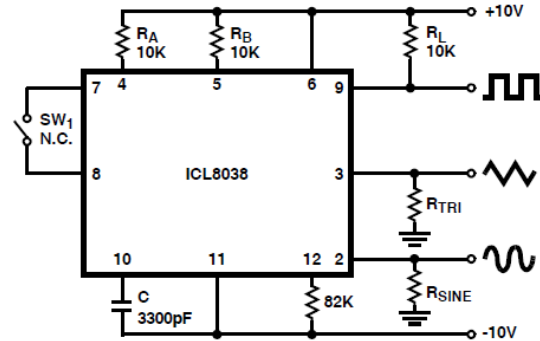
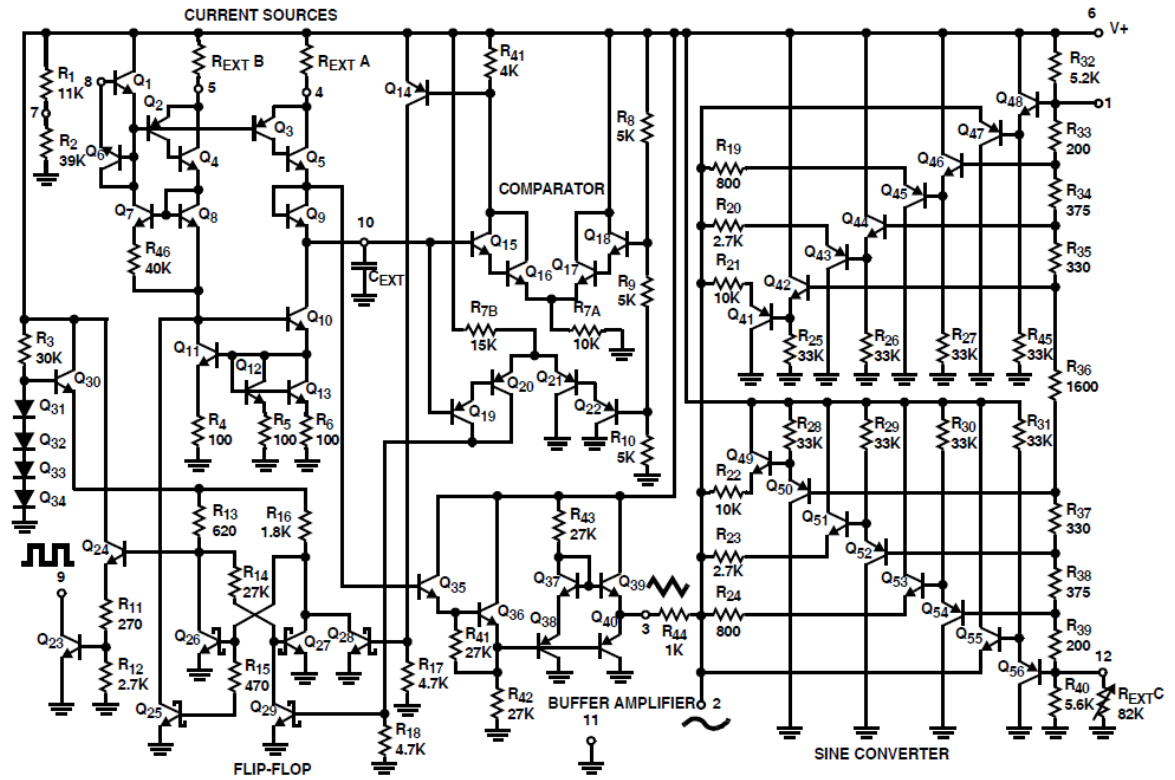


FIGURE 1. TEST CIRCUIT

Detailed Schematic

**Application Information** (See Functional Diagram)

An external capacitor C is charged and discharged by two current sources #2 is switched on and off by a flip-flop, while current source #1 is on continuously. Assuming that the flip-flop is in a state such that current source #2 is off, and the capacitor is charged with a current I , the voltage across the capacitor rises linearly with time. When this voltage reaches the level of comparator #1 (set at $2/3$ of the supply voltage), the flip-flop is triggered, changes states, and releases current source #2. This current source normally carries a current $2I$, thus the capacitor is discharged with a

net-current I and the voltage across it drops linearly with time. When it has reached the level of comparator #2 (set at $1/3$ of the supply voltage), the flip-flop is triggered into its original state and the cycle starts again.

Four waveforms are readily obtainable from this basic generator circuit. With the current sources set at I and $2I$ respectively, the charge and discharge times are equal. Thus a triangle waveform is created across the capacitor and the flip-flop produces a square wave. Both waveforms are fed to buffer stages and are available at pins 3 and 9.

ICL8038

The levels of the current sources can, however, be selected over a wide range with two external resistors. Therefore, with the two currents set at values different from 1 and 2I, an asymmetrical sawtooth appears at Terminal 3 and pulses with a duty cycle from less than 1% to greater than 99% are available at Terminal 9.

The sine wave is created by feeding the triangle wave into a nonlinear network (sine converter). This network provides a decreasing shunt impedance as the potential of the triangle moves toward the two extremes.

Waveform Timing

The *symmetry* of all waveforms can be adjusted with the external timing resistors. Two possible ways to accomplish this are shown in Figure 3. Best results are obtained by keeping the timing resistors R_A and R_B separate (A). R_A controls the rising portion of the triangle and sine wave and the 1 state of the square wave.

The magnitude of the triangle waveform is set at $\frac{1}{3} V_{SUPPLY}$; therefore the rising portion of the triangle is,

$$t_1 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times 1/3 \times V_{SUPPLY} \times R_A}{0.22 \times V_{SUPPLY}} = \frac{R_A \times C}{0.66}$$

The falling portion of the triangle and sine wave and the 0 state of the square wave is:

$$t_2 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times 1/3 V_{SUPPLY}}{2(0.22) \frac{V_{SUPPLY}}{R_B} - 0.22 \frac{V_{SUPPLY}}{R_A}} = \frac{R_A R_B C}{0.66(2R_A - R_B)}$$

Thus a 50% duty cycle is achieved when $R_A = R_B$.

If the duty cycle is to be varied over a small range about 50% only, the connection shown in Figure 3B is slightly more convenient. A 1kΩ potentiometer may not allow the duty cycle to be adjusted through 50% on all devices. If a 50% duty cycle is required, a 2kΩ or 5kΩ potentiometer should be used.

With two separate timing resistors, the frequency is given by:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

or, if $R_A = R_B = R$

$$f = \frac{0.33}{RC} \text{ (for Figure 3A)}$$

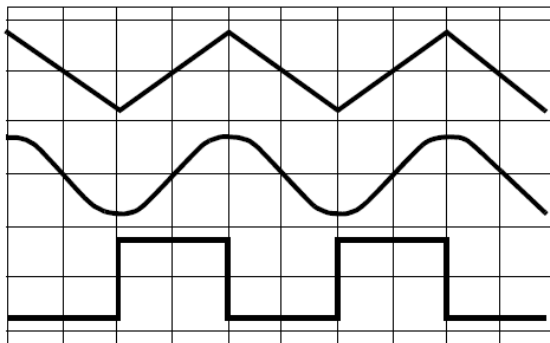


FIGURE 2A. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 50%

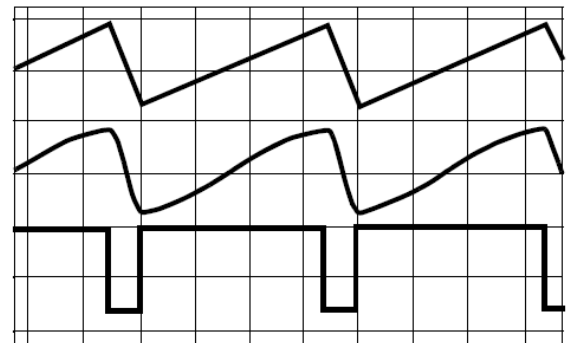


FIGURE 2B. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 80%

FIGURE 2. PHASE RELATIONSHIP OF WAVEFORMS

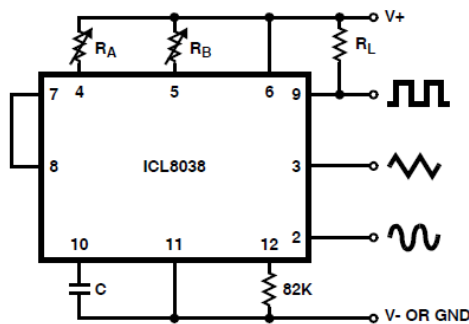


FIGURE 3A.

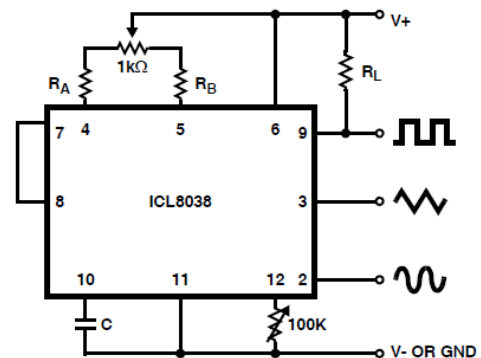


FIGURE 3B.

FIGURE 3. POSSIBLE CONNECTIONS FOR THE EXTERNAL TIMING RESISTORS

ICL8038

Neither time nor frequency are dependent on supply voltage, even though none of the voltages are regulated inside the integrated circuit. This is due to the fact that both currents and thresholds are direct, linear functions of the supply voltage and thus their effects cancel.

Reducing Distortion

To minimize sine wave distortion the 82kΩ resistor between pins 11 and 12 is best made variable. With this arrangement distortion of less than 1% is achievable. To reduce this even further, two potentiometers can be connected as shown in Figure 4; this configuration allows a typical reduction of sine wave distortion close to 0.5%.

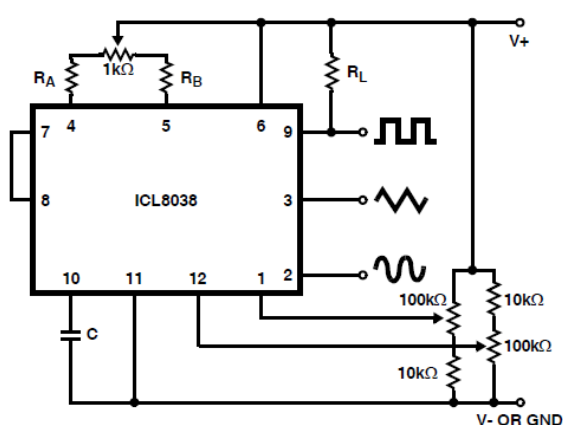


FIGURE 4. CONNECTION TO ACHIEVE MINIMUM SINE WAVE DISTORTION

Selecting R_A , R_B and C

For any given output frequency, there is a wide range of RC combinations that will work, however certain constraints are placed upon the magnitude of the charging current for optimum performance. At the low end, currents of less than 1μA are undesirable because circuit leakages will contribute significant errors at high temperatures. At higher currents ($I > 5\text{mA}$), transistor betas and saturation voltages will contribute increasingly larger errors. Optimum performance will, therefore, be obtained with charging currents of 10μA to 1mA. If pins 7 and 8 are shorted together, the magnitude of the charging current due to R_A can be calculated from:

$$I = \frac{R_1 \times (V_+ - V_-)}{(R_1 + R_2)} \times \frac{1}{R_A} = \frac{0.22(V_+ - V_-)}{R_A}$$

R_1 and R_2 are shown in the Detailed Schematic.

A similar calculation holds for R_B .

The capacitor value should be chosen at the upper end of its possible range.

Waveform Out Level Control and Power Supplies

The waveform generator can be operated either from a single power supply (10V to 30V) or a dual power supply ($\pm 5\text{V}$ to $\pm 15\text{V}$). With a single power supply the average levels of the triangle and sine wave are at exactly one-half of the supply voltage, while the square wave alternates between V_+ and ground. A split power supply has the advantage that all waveforms move symmetrically about ground.

The square wave output is not committed. A load resistor can be connected to a different power supply, as long as the applied voltage remains within the breakdown capability of the waveform generator (30V). In this way, the square wave output can be made TTL compatible (load resistor connected to +5V) while the waveform generator itself is powered from a much higher voltage.

Frequency Modulation and Sweeping

The frequency of the waveform generator is a direct function of the DC voltage at Terminal 8 (measured from V_+). By altering this voltage, frequency modulation is performed. For small deviations (e.g. $\pm 10\%$) the modulating signal can be applied directly to pin 8, merely providing DC decoupling with a capacitor as shown in Figure 5A. An external resistor between pins 7 and 8 is not necessary, but it can be used to increase input impedance from about 8kΩ (pins 7 and 8 connected together), to about $(R + 8\text{k}\Omega)$.

For larger FM deviations or for frequency sweeping, the modulating signal is applied between the positive supply voltage and pin 8 (Figure 5B). In this way the entire bias for the current sources is created by the modulating signal, and a very large (e.g. 1000:1) sweep range is created ($f = \text{Minimum at } V_{\text{SWEEP}} = 0$, i.e., Pin 8 = V_+). Care must be taken, however, to regulate the supply voltage; in this configuration the charge current is no longer a function of the supply voltage (yet the trigger thresholds still are) and thus the frequency becomes dependent on the supply voltage. The potential on Pin 8 may be swept down from V_+ by $(\frac{1}{3} V_{\text{SUPPLY}} - 2V)$.

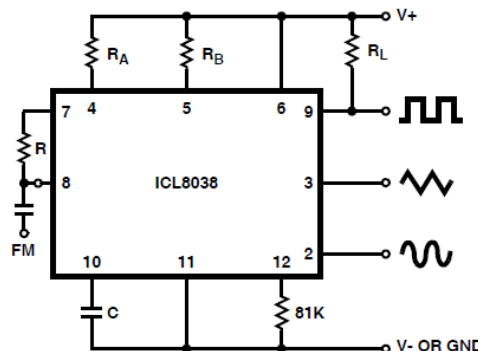


FIGURE 5A. CONNECTIONS FOR FREQUENCY MODULATION



August 2000

LM118/LM218/LM318 Operational Amplifiers

General Description

The LM118 series are precision high speed operational amplifiers designed for applications requiring wide bandwidth and high slew rate. They feature a factor of ten increase in speed over general purpose devices without sacrificing DC performance.

The LM118 series has internal unity gain frequency compensation. This considerably simplifies its application since no external components are necessary for operation. However, unlike most internally compensated amplifiers, external frequency compensation may be added for optimum performance. For inverting applications, feedforward compensation will boost the slew rate to over 150V/ μ s and almost double the bandwidth. Overcompensation can be used with the amplifier for greater stability when maximum bandwidth is not needed. Further, a single capacitor can be added to reduce the 0.1% settling time to under 1 μ s.

The high speed and fast settling time of these op amps make them useful in A/D converters, oscillators, active filters,

sample and hold circuits, or general purpose amplifiers. These devices are easy to apply and offer an order of magnitude better AC performance than industry standards such as the LM709.

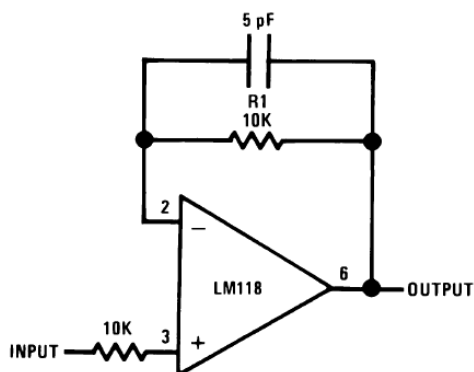
The LM218 is identical to the LM118 except that the LM218 has its performance specified over a -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range. The LM318 is specified from 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$.

Features

- 15 MHz small signal bandwidth
- Guaranteed 50V/ μ s slew rate
- Maximum bias current of 250 nA
- Operates from supplies of $\pm 5\text{V}$ to $\pm 20\text{V}$
- Internal frequency compensation
- Input and output overload protected
- Pin compatible with general purpose op amps

Fast Voltage Follower

(Note 1)



Note 1: Do not hard-wire as voltage follower ($R1 \geq 5 \text{ k}\Omega$)

00776613

Absolute Maximum Ratings (Note 7)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	±20V
Power Dissipation (Note 2)	500 mW
Differential Input Current (Note 3)	±10 mA
Input Voltage (Note 4)	±15V
Output Short-Circuit Duration	Continuous
Operating Temperature Range	
LM118	-55°C to +125°C
LM218	-25°C to +85°C
LM318	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)

Hermetic Package	300°C
Plastic Package	260°C

Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec.)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD Tolerance (Note 8) 2000V

Electrical Characteristics (Note 5)

Parameter	Conditions	LM118/LM218			LM318			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2	4		4	10	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		6	50		30	200	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		120	250		150	500	nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	1	3		0.5	3		MΩ
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5	8		5	10	mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$ $V_{OUT} = \pm 10\text{V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	50	200		25	200		V/mV
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $A_V = 1$ (Note 6)	50	70		50	70		V/μs
Small Signal Bandwidth	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$		15			15		MHz
Input Offset Voltage				6			15	mV
Input Offset Current				100			300	nA
Input Bias Current				500			750	nA
Supply Current	$T_A = 125^\circ\text{C}$		4.5	7				mA
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}$, $V_{OUT} = \pm 10\text{V}$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25			20			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$	±12	±13		±12	±13		V
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	±11.5			±11.5			V
Common-Mode Rejection Ratio		80	100		70	100		dB
Supply Voltage Rejection Ratio		70	80		65	80		dB

Note 2: The maximum junction temperature of the LM118 is 150°C, the LM218 is 110°C, and the LM318 is 110°C. For operating at elevated temperatures, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 160°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W, junction to ambient.

Note 3: The inputs are shunted with back-to-back diodes for overvoltage protection. Therefore, excessive current will flow if a differential input voltage in excess of 1V is applied between the inputs unless some limiting resistance is used.

Note 4: For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 5: These specifications apply for $\pm 5\text{V} \leq V_S \leq \pm 20\text{V}$ and $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ (LM118), $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ (LM218), and $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ (LM318). Also, power supplies must be bypassed with 0.1 μF disc capacitors.

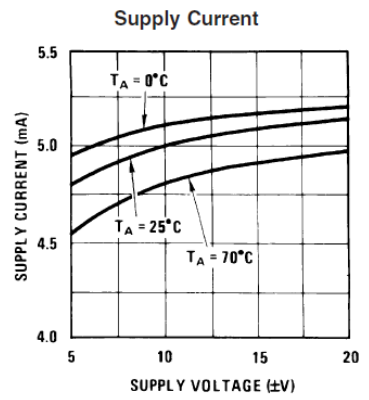
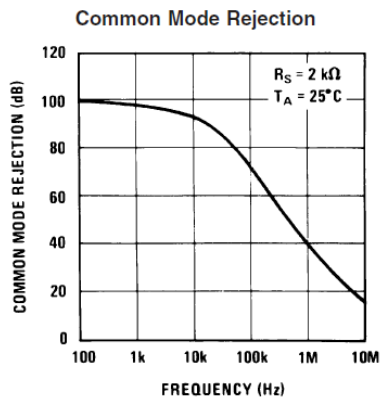
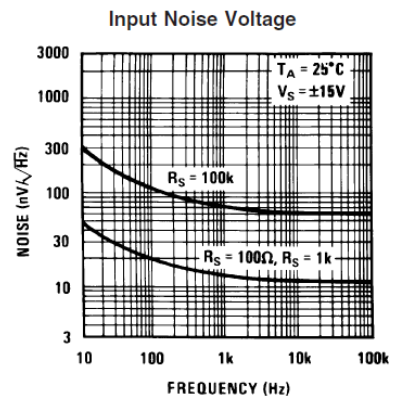
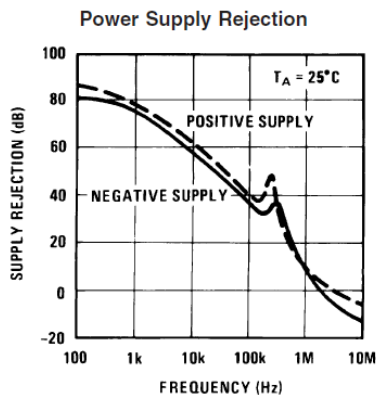
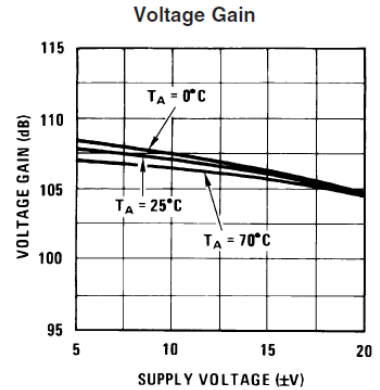
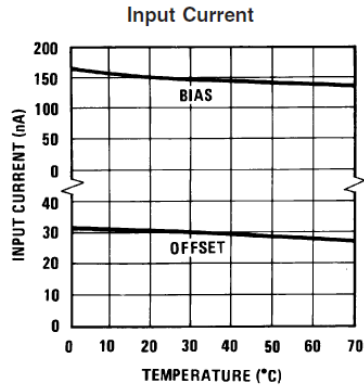
Note 6: Slew rate is tested with $V_S = \pm 15\text{V}$. The LM118 is in a unity-gain non-inverting configuration. V_{IN} is stepped from -7.5V to +7.5V and vice versa. The slew rates between -5.0V and +5.0V and vice versa are tested and guaranteed to exceed 50V/μs.

Note 7: Refer to RETS118X for LM118H and LM118J military specifications.

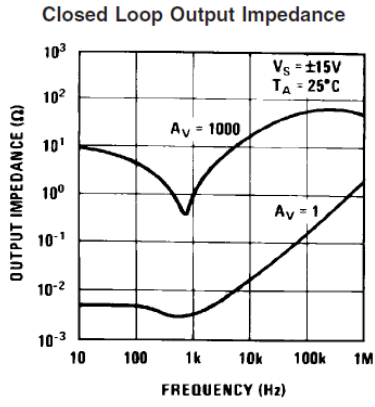
Note 8: Human body model, 1.5 kΩ in series with 100 pF.

Typical Performance Characteristics

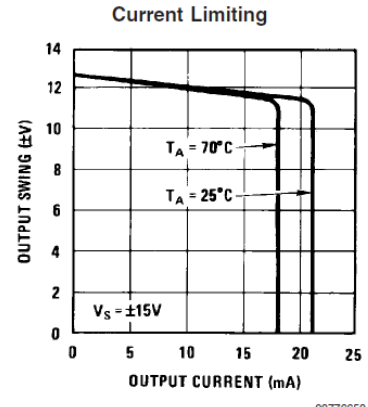
LM318



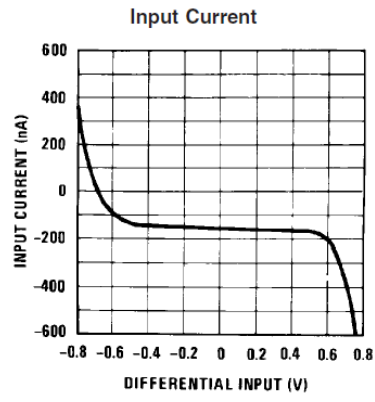
Typical Performance Characteristics LM318 (Continued)



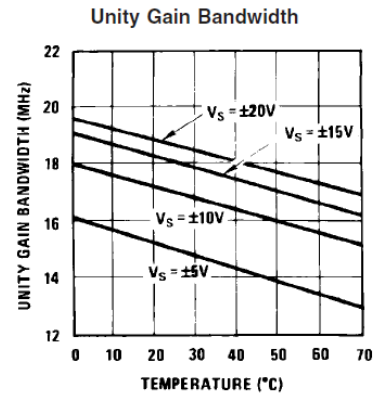
00776649



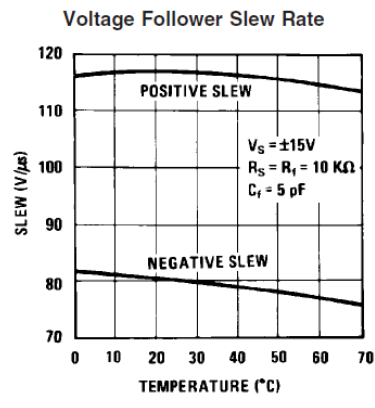
00776650



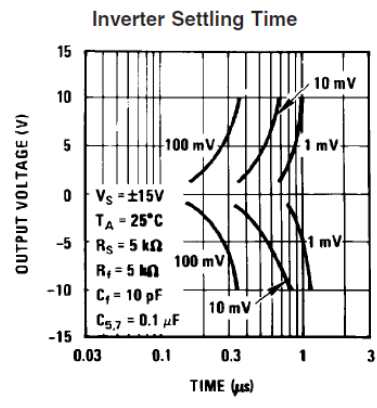
00776651



00776652



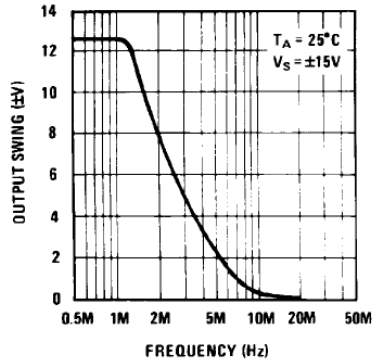
00776653



00776654

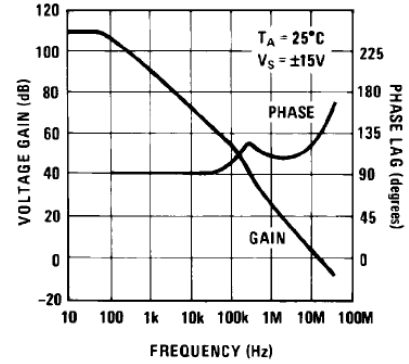
Typical Performance Characteristics LM318 (Continued)

Large Signal Frequency Response



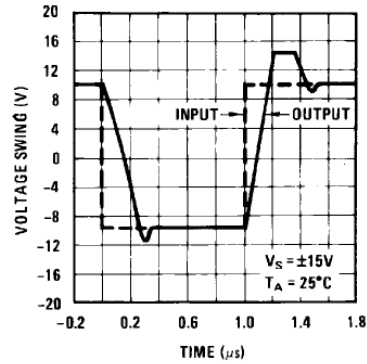
00776655

Open Loop Frequency Response



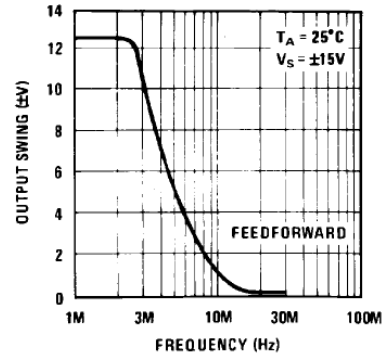
00776656

Voltage Follower Pulse Response



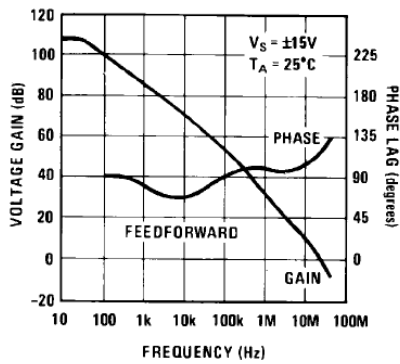
00776657

Large Signal Frequency Response



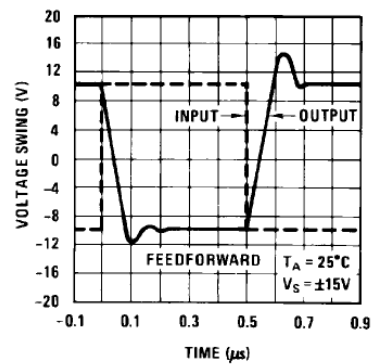
00776658

Open Loop Frequency Response



00776659

Inverter Pulse Response



00776660

LM555/NE555/SA555

Single Timer

Features

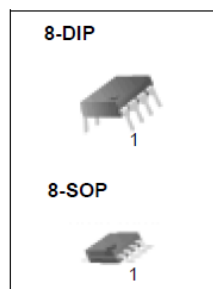
- High Current Drive Capability (200mA)
- Adjustable Duty Cycle
- Temperature Stability of 0.005%/°C
- Timing From μSec to Hours
- Turn off Time Less Than $2\mu\text{Sec}$

Applications

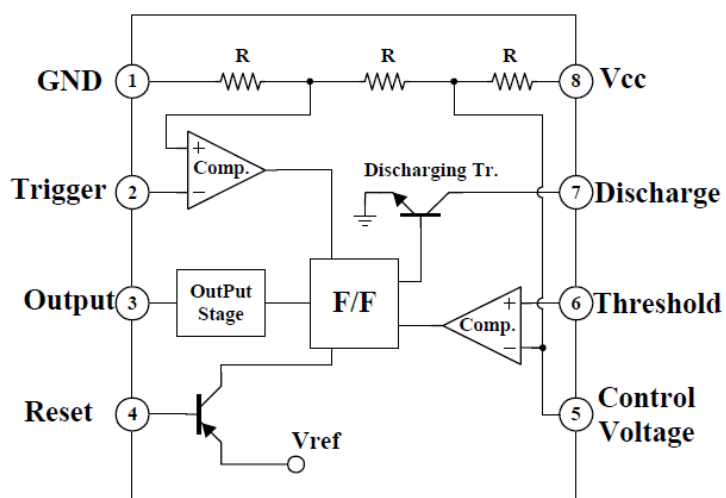
- Precision Timing
- Pulse Generation
- Time Delay Generation
- Sequential Timing

Description

The LM555/NE555/SA555 is a highly stable controller capable of producing accurate timing pulses. With monostable operation, the time delay is controlled by one external resistor and one capacitor. With astable operation, the frequency and duty cycle are accurately controlled with two external resistors and one capacitor.



Internal Block Diagram



LM555/NE555/SA555

Absolute Maximum Ratings (TA = 25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	16	V
Lead Temperature (Soldering 10sec)	T _{LEAD}	300	°C
Power Dissipation	P _D	600	mW
Operating Temperature Range LM555/NE555 SA555	T _{OPR}	0 ~ +70 -40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-65 ~ +150	°C

Electrical Characteristics

(TA = 25°C, VCC = 5 ~ 15V, unless otherwise specified)

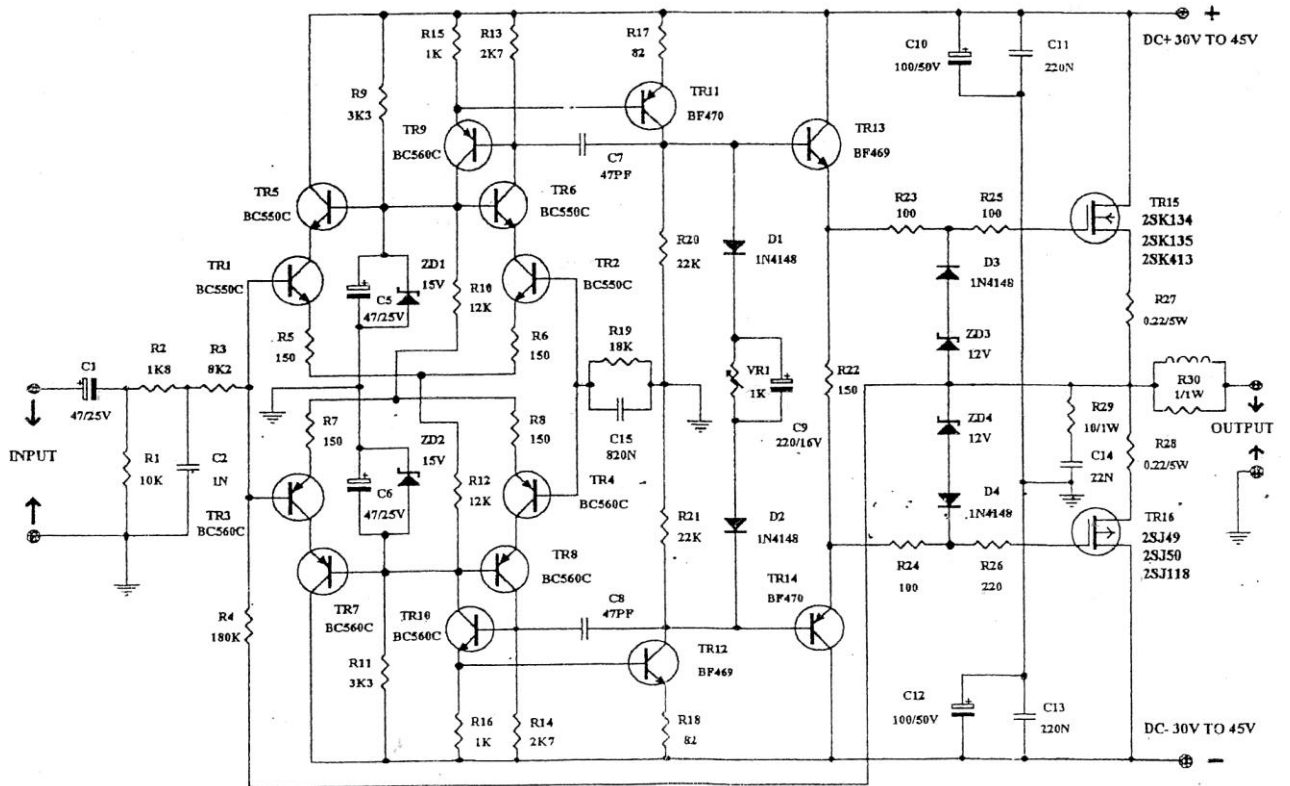
Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply Voltage	VCC	-	4.5	-	16	V
Supply Current *1(Low Stable)	ICC	VCC = 5V, RL = ∞	-	3	6	mA
		VCC = 15V, RL = ∞	-	7.5	15	mA
Timing Error *2 (Monostable) Initial Accuracy Drift with Temperature Drift with Supply Voltage	ACCUR Δt/ΔT Δt/ΔVCC	RA = 1kΩ to 100kΩ C = 0.1μF	-	1.0 50 0.1	3.0 - 0.5	% ppm/°C %/V
Timing Error *2(Astable) Initial Accuracy Drift with Temperature Drift with Supply Voltage	ACCUR Δt/ΔT Δt/ΔVCC	RA = 1kΩ to 100kΩ C = 0.1μF	-	2.25 150 0.3	-	% ppm/°C %/V
Control Voltage	VC	VCC = 15V	9.0	10.0	11.0	V
		VCC = 5V	2.6	3.33	4.0	V
Threshold Voltage	VTH	VCC = 15V	-	10.0	-	V
		VCC = 5V	-	3.33	-	V
Threshold Current *3	ITH	-	-	0.1	0.25	μA
Trigger Voltage	VTR	VCC = 5V	1.1	1.67	2.2	V
		VCC = 15V	4.5	5	5.6	V
Trigger Current	ITR	VTR = 0V	-	0.01	2.0	μA
Reset Voltage	VRST	-	0.4	0.7	1.0	V
Reset Current	IRST	-	-	0.1	0.4	mA
Low Output Voltage	VOL	VCC = 15V ISINK = 10mA ISINK = 50mA	-	0.06 0.3	0.25 0.75	V V
		VCC = 5V ISINK = 5mA	-	0.05	0.35	V
High Output Voltage	VOH	VCC = 15V ISOURCE = 200mA ISOURCE = 100mA	12.75	12.5 13.3	-	V V
		VCC = 5V ISOURCE = 100mA	2.75	3.3	-	V
Rise Time of Output	tR	-	-	100	-	ns
Fall Time of Output	tF	-	-	100	-	ns
Discharge Leakage Current	ILKG	-	-	20	100	nA

Notes:

- Supply current when output is high is typically 1mA less at VCC = 5V
- Tested at VCC = 5.0V and VCC = 15V
- This will determine maximum value of RA + RB for 15V operation, the max. total R = 20MΩ, and for 5V operation the max. total R = 6.7MΩ

ภาคผนวก ง
วงจรรับสัญญาณย่านความถี่เดียว

วงจรระบบขับสัญญาณย่านความถี่เสียงขนาดกำลัง 100 W



วงจรขยายกำลังเสียง รุ่น EPS 322 ขนาดกำลังขยาย 100 W ขับสัญญาณทางออกด้วย MOSFET แบบ OCL Push-Pull Class AB ที่อิมพีแดนซ์ทางออก 4 Ω ตอบสนองย่านความถี่เสียง (20 Hz-20 kHz) มีความเพี้ยนต่ำกว่า 0.2% ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 30-45 V แบบ Dual supply

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกอบชัย จันทร์ศรี เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2529 จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิตเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง (ฟิลิสิกส์) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552