

---

ผลการควบคุมกำลังของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และการปรับเปลี่ยนความหนาแน่น  
ของพัลส์ที่ความดันบรรยากาศ

Effect of Plasma Power Control by Varied-Voltage, Frequency and Pulse Density Modulation  
at Atmospheric Pressure

อาหลี ต่ำหมั่น ประจักษ์ แซ่อึ้ง\* และ ยุทธนา ฐิระวณิชกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Arlee Tamman, Prajak Saeung\* and Yutthana Tirawanichakul

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University.

---

บทคัดย่อ

พลาสมาดีอิเล็กทริกจันิตซ์ความดันบรรยากาศสามารถสร้างได้โดยจ่ายสนามไฟฟ้าแก่ห้องพลาสมา การควบคุมกำลังของพลาสมาสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงความถี่ อีกวิธีที่สามารถทำได้คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา วิธีนี้เรียกว่า การปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ การควบคุมกำลังโดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ คือการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับและสัญญาณแรงดันศูนย์ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสัญญาณขาออก สำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อใช้การควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า สามารถควบคุมกำลังของพลาสมาได้ตั้งแต่ 1 ถึง 33 วัตต์ โดยพิจารณาที่แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าเดียวกันคือ 15 กิโลโวลต์ แต่พลาสมาจะเกิดไม่สม่ำเสมอที่กำลังของพลาสมาต่ำ เมื่อใช้การควบคุมด้วยความถี่จะได้กำลังของพลาสมา ตั้งแต่ 20-42 วัตต์ และสามารถสร้างพลาสมาที่สม่ำเสมอได้แต่เปลี่ยนแปลงช่วงกำลังของพลาสมาได้สั้น เทคนิคการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาตั้งแต่ 1 ถึง 33 วัตต์

**คำสำคัญ :** พลาสมาดีอิเล็กทริกที่ความดันบรรยากาศ การดีอิเล็กทริกจันิตซ์ความดันบรรยากาศ การปรับความหนาแน่นของพัลส์ การควบคุมกำลังของพลาสมา พลาสมาแบบแผ่นขนาน

Abstract

Atmospheric Dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure was generated by applying an electric field to a reactor. The plasma discharge power was controlled with various formations of the signal input, thus changing potential and frequency. Another way to control the plasma power can be done by varying the number of pulse signal that applied to parallel electrodes in unit time, which is called pulse-density-modulation (PDM). The PDM technique creates an ac-voltage state and a zero state to control the average output voltage. In this research, the plasma discharge power of 1 to 33 watts was used by adjusting the voltage from 10 kV<sub>p</sub> to 15 kV<sub>p</sub> but the plasma was unstable at low power. In the power range of 20 to 42 watts the steady state plasma discharge can be achieved by adjusting frequency with a peak voltage of 15 kV<sub>p</sub> but the steady state can be created only in a short range of the power control. However, PDM can be used to control the steady state plasma with a wide range of the plasma discharge power from 1 to 33 watts.

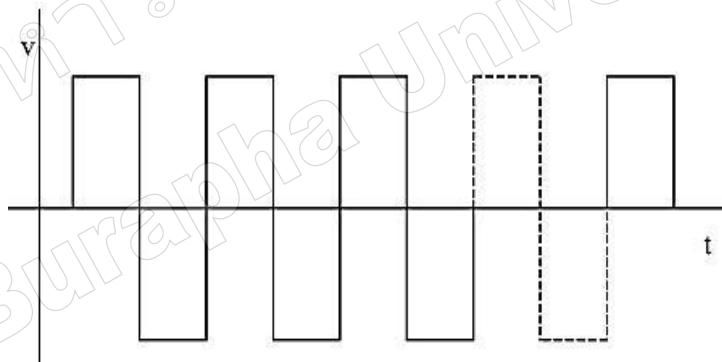
**Keywords :** Atmospheric plasma discharge, Dielectric barrier discharges, Pulse Density Modulation, Plasma Power Control, Bipolar Plate Plasma

\*Corresponding author. E-mail: prajak.s@psu.ac.th

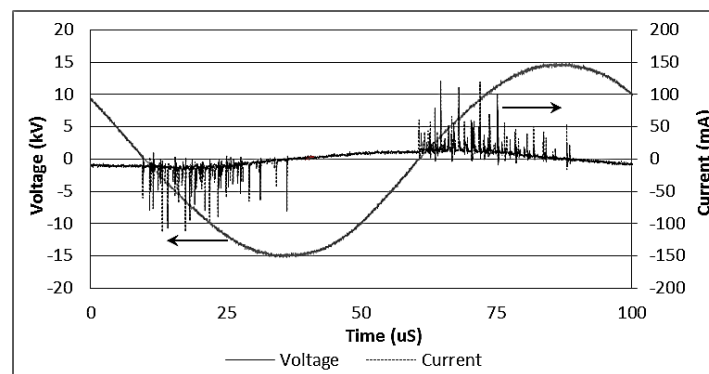
## บทนำ

ปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านต่างๆ อย่างรวดเร็ว ควบคู่กับการรณรงค์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมและลดผลกระทบต่อธรรมชาติจากการพัฒนาทางด้านกระบวนการผลิตและอุตสาหกรรม องค์ความรู้ทางด้านฟิสิกส์พลาสมาสามารถตอบสนองความต้องการทั้งสอง นั่นคือการแทนที่กระบวนการผลิตบางอย่าง ด้วยเทคนิคทางด้านฟิสิกส์พลาสมา เช่น การทำความสะอาดผิวเส้นลวดด้วยพลาสมาในอุตสาหกรรมผลิตแม่เหล็ก แทนการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด (1, 1, 1, -ไตรคลอโรอีเทน) ซึ่งเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Choi *et al.* 2001) การควบคุมกำลังของพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้า หรือช่วงเวลาด้านบวกของสัญญาณไฟฟ้า (Sugimoto *et al.* 2001) เป็นต้น R.-F. Horng และคณะ (Horng *et al.* 2007) ได้ศึกษาปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากระบบพลาสมาของมีเทน โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจาก 57-250 เฮิร์ตซ์ พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น นั่นคือในช่วงความถี่ 100-250 เฮิร์ตซ์ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงความถี่ต่ำ

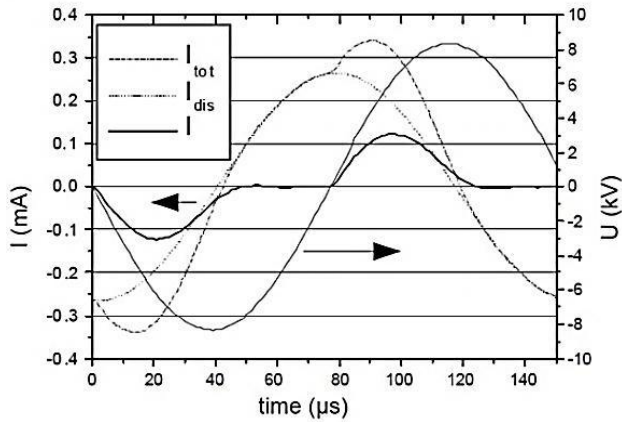
เมื่อพิจารณากำลังของพลาสมาพบว่า กำลังของพลาสมาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่าย และมีกำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ความถี่ 125 เฮิร์ตซ์ ที่ความถี่สูงกว่านี้กำลังไฟฟ้าจะลดลง แต่ลดลงอย่างช้าๆ Z. Li และคณะ (Li *et al.* 2011) ได้ใช้เทคนิคกราฟท์-ฟิลลิง (Graft-Filling) ของพลาสมาดีซาร์จชนิดข้ามฉนวนเพื่อปรับปรุงเยื่อเลือกผ่านสำหรับแยกก๊าซ โดยใช้แหล่งจ่ายความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ และควบคุมคุณสมบัติของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและเวลา จากการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าทำให้อัตราการไหล (Permeation Flux) ลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีค่า 70 โวลต์ นั่นคือระดับการกราฟท์ (Degree of Grafting) ภายในช่องของเยื่อเลือกผ่านมีค่าคงตัว อีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมกำลังของพลาสมาได้คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนคลื่นของสัญญาณที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา วิธีนี้เรียกว่า การปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ (Pulse Density Modulation) (Fujita & Akagi 1999; Yong & Xiangning 2005) นั่นคือการเปลี่ยนจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงในหนึ่งหน่วยเวลา ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาได้ ในขณะที่ความถี่และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าเท่าเดิม



ภาพที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความหนาแน่นของพัลส์ 3/4



ภาพที่ 2 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการดีซาร์จแบบเส้น (Jidenko *et al.* 2006)



ภาพที่ 3 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการดิสชาร์จแบบแพร่กระจาย (Wagner et al. 2003)

ภาพที่ 1 แสดงสัญญาณขาเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อใช้ค่าความหนาแน่นของฟิล์ม 3/4 สัญญาณทั้งหมด 4 ลูกคลื่นจะมีสัญญาณบวก - ลบ 3 ลูก และอีกหนึ่งลูกเป็นสัญญาณศูนย์ซึ่งจะอยู่บริเวณที่มีเส้นประในภาพที่ 1

การดิสชาร์จผ่านฉนวน (DBD) สามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือการดิสชาร์จแบบเส้น (Filamentary Mode) ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายอีกรูปแบบหนึ่งคือการดิสชาร์จแบบแพร่กระจาย (Diffuse Mode) (Wagner et al. 2003; Chirokov et al. 2005) กรณีการเกิดดิสชาร์จแบบเส้น จะเกิดเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างช่องว่างของอากาศมีค่ามากพอจนก๊าซสามารถแตกตัวได้ การแตกตัวของก๊าซเกิดขึ้นโดยเริ่มจากจุดเล็กๆ หลายๆ จุดบนขั้วไฟฟ้าและพัฒนาไปเป็นเส้นของการแตกตัว ซึ่งเรียกว่าไมโครดิสชาร์จ การดิสชาร์จทั้งสองแบบสามารถแยกได้โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาซึ่งสามารถวัดได้ผ่านตัวต้านทานที่ต่อกับห้องพลาสมาลงกราวด์ (Wagner et al. 2003) สัญญาณกระแสที่เกิดจากการดิสชาร์จของพลาสมาเรียกว่า กระแสดิสชาร์จ (I) ลักษณะกระแสดิสชาร์จของการดิสชาร์จแบบเส้นอยู่ในช่วงเวลาสั้นระดับนาโนวินาที (Jidenko et al. 2006) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2 แต่กรณีของการดิสชาร์จแบบแพร่กระจายนั้น ความกว้างของกระแสดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อกระแสแทนที่ (Displacement Current,  $I_{dis}$ ) คือกระแสที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นของแผ่นฉนวนจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคล่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้ารวม ( $I_{tot}$ ) คือผลรวมของกระแสดิสชาร์จกับกระแสแทนที่ (Massines et al. 1998; Wagner et al. 2003)

กำลังของพลาสมาสามารถวัดได้ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคล่อมตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายกับขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดคล่อมตัวเก็บประจุสามารถนำไปคำนวณค่าประจุที่เกิดจากการดิสชาร์จได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่าแผนภาพลิสซัจว์ส์ (Lissajous Figure) พื้นที่ใต้แผนภาพลิสซัจว์ส์แสดงถึงพลังงานที่ส่งผ่านช่องว่างของอากาศโดยพลาสมาที่เกิดขึ้นในหนึ่งลูกคลื่น ( $E_{el}$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1 และกำลังไฟฟ้าคือพลังงานในหนึ่งลูกคลื่นคูณด้วยความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายดังสมการที่ 2 (Wagner et al. 2003).

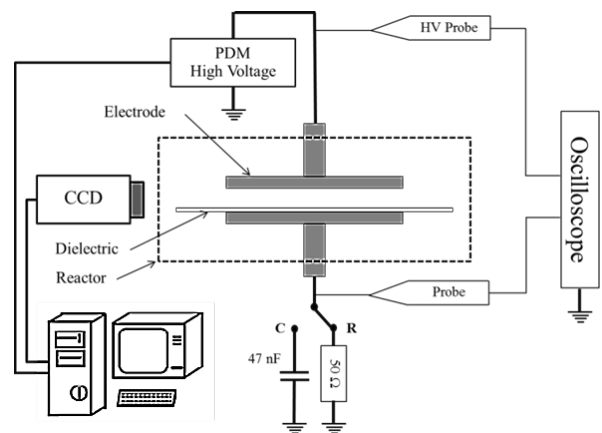
$$E_{el} = \int_t^{t+T} V(t)dQ$$

$$= C_{meas} \int_t^{t+T} V(t)dQ_{meas} \quad (1)$$

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{T} = E_{elf} \quad (2)$$

เมื่อ

- V(t) คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า
- $V_{meas}$  คือแรงดันไฟฟ้าคล่อมตัวเก็บประจุ  $C_{meas}$
- t คือเวลา
- T คือคาบของแรงดันไฟฟ้า
- f คือความถี่ของแหล่งจ่าย
- Q คือประจุที่ถูกส่งผ่านโดยพลาสมา



ภาพที่ 4 อุปกรณ์การทดลองเพื่อสร้างพลาสมาวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและประจุไฟฟ้า

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

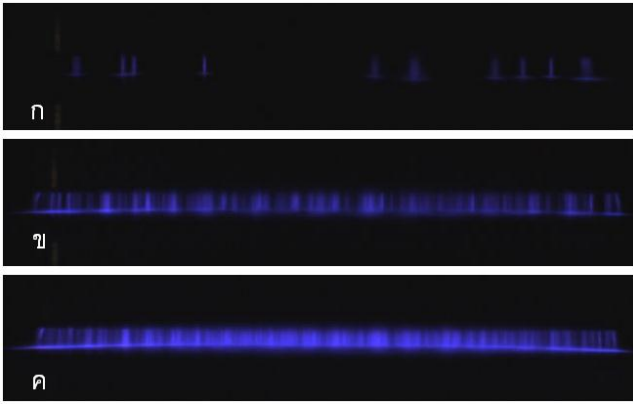
รูปแบบการจัดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งดัดแปลงจากระบบที่ Wagner และคณะได้รายงานไว้ (Wagner *et al.* 2003) ประกอบด้วยห้องพลาสมาแบบแผ่นขนาน แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้หลักการควบคุมแบบปรับความถี่ แรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นของพลาสมา คอมพิวเตอร์ใช้ในการควบคุมความถี่และความหนาแน่นของพลาสมาของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กล้องซีซีดี (SONY XCD-V60CR) สำหรับจับภาพพลาสมาที่เกิดขึ้นและออสซิลโลสโคป (Tektronix TDS3014B Bandwidth 100 เมกะเฮิร์ตซ์) สำหรับแสดงและบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าของพลาสมา โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรมวัดไฟฟ้าแรงดันสูงที่สามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 1000 เท่า (Tektronix P6015A 1000x) และโปรแกรมที่สามารถเปลี่ยนสัดส่วนการลดแรงดันไฟฟ้าได้ 10 เท่าและ 1 เท่า (IWATSU SS-0110) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัฒนาขึ้นโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (full bridge inverter) และนำสัญญาณที่ได้จ่ายเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ทำให้ก๊าซสามารถแตกตัวได้ ห้องพลาสมาประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง ซึ่งเป็นสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.50 เซนติเมตร หนา 0.40 เซนติเมตร และแผ่นฉนวนซึ่งทำจากเทฟลอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.20 เซนติเมตร หนา 0.02 เซนติเมตร วางอยู่บนขั้วไฟฟ้าด้านล่างโดยขั้วไฟฟ้าด้านบนต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และขั้วไฟฟ้าด้านล่างต่อผ่านตัวต้านทาน 50 โอห์มลงกราวด์เพื่อวัดกระแสดิซชาร์จ หรือต่อผ่านตัวเก็บประจุ 47 นาโนฟารัด เพื่อวัดประจุไฟฟ้าพลาสมาถูกสร้างที่ความดันบรรยากาศ (760 มิลลิเมตรปรอท) ในบรรยากาศของออกซิเจนร้อยละ 20.5 ไนโตรเจนและก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 79.5 ซึ่งวัดโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ (Geotech รุ่น Biogas Check Rev.0) โดยไม่มีการเพิ่มเติมก๊าซชนิดอื่นๆ และช่องว่างของอากาศระหว่างขั้วไฟฟ้ากับแผ่นฉนวนมีขนาด 0.02 เซนติเมตร

การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาเมื่อใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยศึกษาในช่วงความถี่ของแหล่งจ่ายตั้งแต่ 6-12 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ การศึกษากำลังของพลาสมาผ่านการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา โดยเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10-15 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ การควบคุมกำลังพลาสมาโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพลาสมาทำการทดลองโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพลาสมาจาก 1/20-20/20 ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์

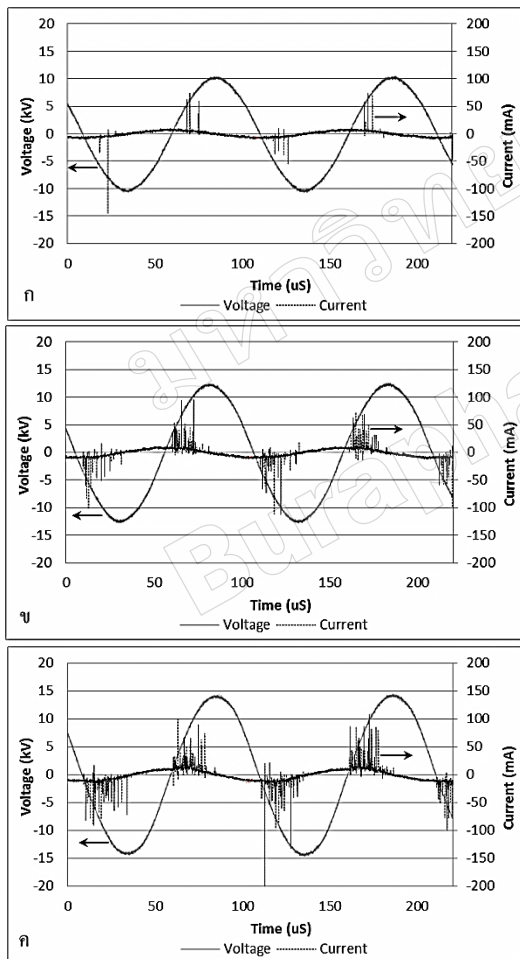
การศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมานั้นสามารถทำได้โดยการวัดกระแสดิซชาร์จที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถวัดสัญญาณที่ตกคล่อมตัวต้านทาน 50 โอห์ม ที่ต่ออยู่กับขั้วไฟฟ้าด้านล่างเพื่อใช้จำแนกรูปแบบของการดิซชาร์จ กำลังของพลาสมาสามารถวัดได้โดยการต่อสัญญาณจากขั้วไฟฟ้าด้านล่างผ่านตัวเก็บประจุ 47 นาโนฟารัด และนำข้อมูลที่ได้ออกไปเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดันไฟฟ้า หรือเรียกว่าแผนภาพลิซซาร์จเพื่อคำนวณกำลังของพลาสมา

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สร้างพลาสมา ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ พลาสมาเกิดไม่ทั่วขั้วไฟฟ้าแต่เกิดบางส่วนเท่านั้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5 (ก) โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างของอากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านบนและแผ่นฉนวนซึ่งวางอยู่บนขั้วไฟฟ้าด้านล่าง ตำแหน่งดังกล่าวอยู่ภายในเส้นประของภาพที่ 4 แต่เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ พลาสมาเกิดขึ้นทั่วทั้งขั้วไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 5 (ข) และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 14 กิโลโวลต์ พลาสมาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 5 (ค) ซึ่งมีความเข้มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แรงดันไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสดิซชาร์จแสดงดังภาพที่ 6 ลักษณะของกระแสดิซชาร์จที่ได้แสดงถึงการเกิดพลาสมาแบบเส้น (Filamentary Discharge) นั่นคือกระแสดิซชาร์จมีลักษณะเป็นพัลส์สั้นๆ และความหนาแน่นของกระแสดิซชาร์จซึ่งพิจารณาจากจำนวนพัลส์ของกระแสดิซชาร์จที่เกิดขึ้นในหนึ่งลูกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าแสดงถึงความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกันดังภาพที่ 6 (ก-ค) (ก) แรงดันไฟฟ้ามีค่า 10 กิโลโวลต์ จำนวนกระแสดิซชาร์จมีค่าเฉลี่ย 8 พัลส์ต่อหนึ่งลูกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (ข) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 12 กิโลโวลต์ จำนวนกระแสดิซชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย คือ 52 พัลส์ต่อหนึ่งลูกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า และ (ค) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 14 กิโลโวลต์ จำนวนกระแสดิซชาร์จมีค่า 103 พัลส์ต่อหนึ่งลูกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า จำนวนกระแสดิซชาร์จที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับภาพจากกล้องซีซีดีและกำลังของพลาสมาที่ได้ ซึ่งที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น กำลังของพลาสมาที่สูงขึ้นด้วย โดยกำลังของพลาสมาต่ำสุดคือ 1 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ และสูงสุดคือ 33 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์



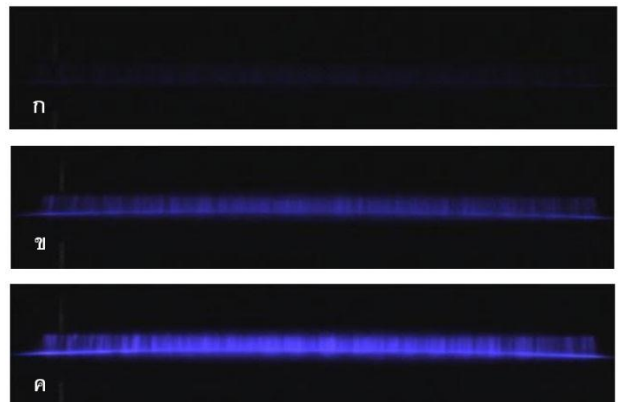
ภาพที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้องซีซีดีของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันจาก 10 12 และ 14 กิโลโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพ ก ถึง ค ตามลำดับ



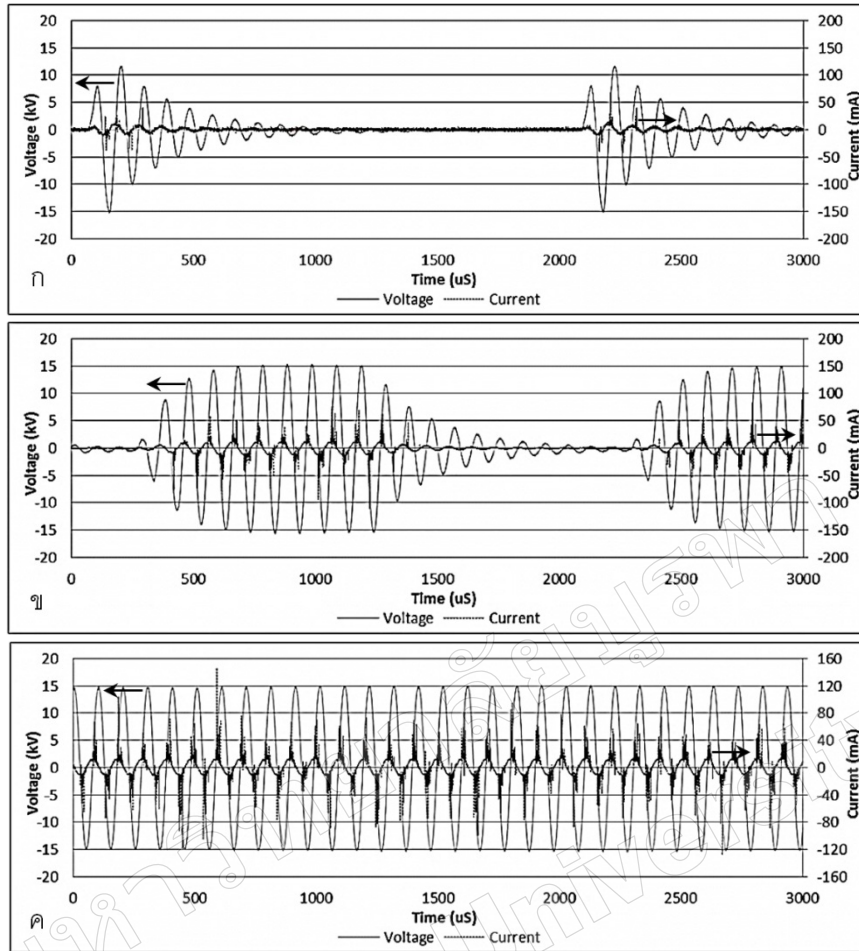
ภาพที่ 6 ภาพ ก ถึง ค แสดงกระแสดิซชาร์จเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าซึ่งมีค่า 10 12 และ 14 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า โดยเปลี่ยนความถี่จาก 6-12 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้มของพลาสมาที่ความถี่น้อยจะมีค่าน้อย และเมื่อเพิ่มความถี่ ความเข้มของพลาสมาจะสูงขึ้นด้วย พิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ความถี่ 6 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังของพลาสมา มีค่า 20 วัตต์ เมื่อเพิ่มความถี่กำลังของพลาสมาสูงขึ้นด้วย จนมีค่าสูงสุดคือ 42 วัตต์ ที่ความถี่ 12 กิโลเฮิร์ตซ์ ลักษณะของกระแสดิซชาร์จที่ได้แสดงถึงการเกิดดิซชาร์จแบบเส้นเช่นกัน

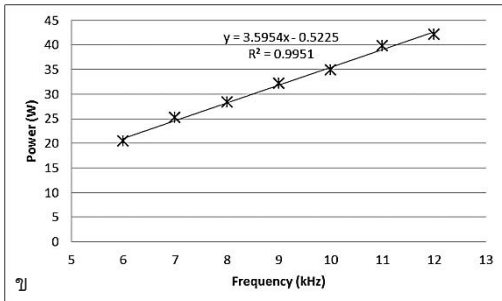
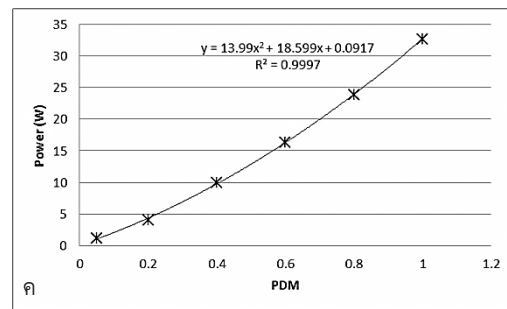
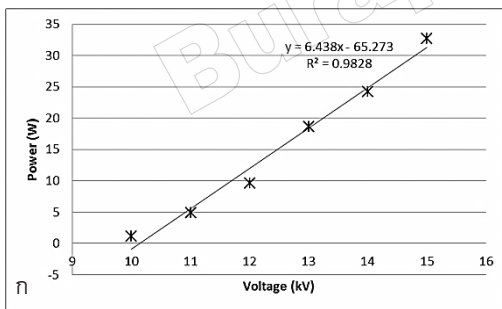
การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาโดยใช้เทคนิคการปรับ เปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์เพื่อควบคุมกำลังของพลาสมา ภาพที่ 7 (ก-ค) แสดงภาพพลาสมาที่เกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า 1/20 10/20 และ 20/20 ตามลำดับ พลาสมาที่ได้มีความเข้มต่างกัน และเกิดสม่ำเสมอทั่วทั้งขั้วไฟฟ้า โดยภาพที่ 7 (ก) แสดงภาพพลาสมา เมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า 1/20 กำลังของพลาสมามีค่าน้อยที่สุดคือ 1 วัตต์ ลักษณะของสัญญาณที่จ่ายแก่ห้องพลาสมาแสดงดัง ภาพที่ 8 (ก) นั่นคือในช่วงแรงดันไฟฟ้า 20 ลูก จะมีแรงดันไฟฟ้า 1 ลูก หลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะลดลงจนมีค่าเป็น 0 โวลต์ โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวของก๊าซเท่านั้น ซึ่งสังเกตได้จากสัญญาณพัลส์ของ กระแสดิซชาร์จที่เกิดขึ้น ภาพที่ 7 (ข) เมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า 10/20 กำลังของพลาสมามีค่า 11 วัตต์ โดยลักษณะของสัญญาณที่จ่ายแก่ห้องพลาสมาแสดงดังภาพที่ 8 (ข) นั่นคือในช่วงแรงดันไฟฟ้า 20 ลูก จะมีแรงดันไฟฟ้า 10 ลูก พลาสมาจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวเช่นกัน และภาพที่ 7 (ค) ความหนาแน่นของพัลส์มีค่า 20/20 ซึ่งกำลังของพลาสมามีค่า



ภาพที่ 7 ภาพจากกล้องซีซีดีของพลาสมาซึ่งควบคุมโดยการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ ที่มีค่า (ก) 1/20 (ข) 10/20 และ (ค) 20/20



ภาพที่ 8 กระแสตีสชาร์จและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้การควบคุมกำลังแบบการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ ที่มีค่า (ก) 1/20 (ข) 10/20 และ (ค) 20/20



ภาพที่ 9 กำลังของพลาสมาเมื่อใช้การควบคุมด้วย (ก) ความถี่ (ข) แรงดันไฟฟ้า (ค) ความหนาแน่นของพัลส์

มากที่สุดคือ 33 วัตต์ สัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมาแสดงดังภาพที่ 8 (ค) โดยสัญญาณไฟฟ้ามีความต่อเนื่องนั้นคือพลาสมาจะเกิดขึ้นทุกช่วงของแรงดันไฟฟ้า

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ความถี่ของสัญญาณที่จ่าย และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของฟิล์ม พบว่า การควบคุมกำลังของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ผลแสดงดังภาพที่ 9 (ก) สามารถใช้ควบคุมกำลังของพลาสมาได้กรณีที่ไม่ต้องการใช้พลาสมาที่มีกำลังต่ำ เนื่องจากที่กำลังต่ำพลาสมาเกิดไม่สม่ำเสมอ วิธีนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาได้ตั้งแต่ 1-33 วัตต์ การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่แสดงดังภาพที่ 9 (ข) สามารถควบคุมกำลังพลาสมาได้ในช่วงแคบๆ ตั้งแต่ 20-42 วัตต์ สาเหตุหนึ่งมาจากแหล่งจ่ายไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ในช่วงที่กว้าง การควบคุมกำลังโดยใช้การปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของฟิล์ม แสดงดังภาพที่ 9 (ค) สามารถนำไปใช้ในการควบคุมกำลังของพลาสมาได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1-33 วัตต์และพลาสมาเกิดสม่ำเสมอทั่วทั้งขั้วไฟฟ้า

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

### เอกสารอ้างอิง

Chirokov, A., Gutsol, A. & Fridman, A. (2005). Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges. *Pure and Applied Chemistry*, 77, 487-495

Choi, I. S., Hwang, S. W. & Park, J. C. (2001). Application of medium frequency atmospheric plasma on continuous aluminum wire cleaning for magnet wire manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, (142-144), 300-305.

Fujita, H. & Akagi, H. (1999). Control and performance of a pulse-density-modulated series-resonant inverter for corona discharge processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35, 621-627.

Hong, R.-F., Chang, Y.-P., Huang, H.-H. & Lai, M.-P. (2007). A study of the hydrogen production from a small plasma converter. *Fuel*, 86, 81-89.

Hong, R.-F., Chang, Y.-P. & Wu, S.-C. (2006). Investigation on the production of hydrogen rich gas in a plasma converter for motorcycle applications. *Energy Conversion and Management*, 47, 2155-2166.

Jidenko, N., Petit, M. & Borra, J. P. (2006). Electrical characterization of microdischarges produced by dielectric barrier discharge in dry air at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 281.

Li, Z., Zhang, B., Qu, L., Ren, J. & Li, Y. (2011). A novel atmospheric dielectric barrier discharge (DBD) plasma graft-filling technique to fabricate the composite membranes for pervaporation of aromatic/aliphatic hydrocarbons. *Journal of Membrane Science*, 371, 163-170.

Massines, F., Rabehi, A., Decomps, P., Gadri, R. B., Segur, P. & Mayoux, C. (1998). Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier. *Journal of Applied Physics*, 83, 2950-2957.

Sugimoto, S., Kiuchi, M., Takechi, S., Tanaka, K. & Goto, S. (2001). Inverter plasma discharge system. *Surface and Coatings Technology*, (136), 65-68.

Wagner, H. E., Brandenburg, R., Kozlov, K. V., Sonnenfeld, A., Michel, P. & Behnke, J. F. (2003). The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. *Vacuum*, 71, 417-436.

Yong, L. & Xiangning, H. (2005). A series resonant inverter system with PDM and PFM hybrid control for plastic film surface treatment. Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005.