

การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศแบบ

โคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ

*ลีดา มิตรายน พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 086 6886144 โทรสาร 0 2218 6780 E-mail: puji_jung@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศเริ่มมีบทบาทเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรม การแพทย์ และงานวิจัยต่าง ๆ อย่างไรก็ตามพลาสมาในลักษณะนี้มักจะมีพลาสมาแน่นที่ค่อนข้างต่ำจึงมีข้อจำกัดทางด้านประสิทธิภาพและประเภทของงานที่นำไปใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศขึ้น โดยใช้เทคนิคการผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (dielectric barrier discharge หรือ DBD) ซึ่งออกแบบในลักษณะโคแอ็กเซียลเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อทางการแพทย์ และได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มีต่ออุณหภูมิและสเปกตรัมของพลาสมา ซึ่งพบว่า ด้วยความสามารถของแหล่งจ่ายไฟที่มีอยู่ในขณะนี้ สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาที่ได้ยังมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ทดลอง และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ระหว่าง 4-5 eV

คำสำคัญ : พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ

Development of Low-Temperature Atmospheric Coaxial Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Source

*Leeda Mitrayon, Phongphaeth Pengvanich and Suvit Punnachaiya

Department of Nuclear technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phone: 086 6886144, Fax: 0 2218 6780, E-mail: puji_jung@hotmail.com

Abstract

Low-temperature atmospheric plasma has played an increasingly important role in various industrial, medical, and research applications. Nevertheless, this type of plasma usually has low density which imposes a limit on its effectiveness and the type of work that it can be applied to. In this research, a low-temperature atmospheric plasma source has been designed and developed using the dielectric barrier discharge (DBD) plasma production technique. The source is designed to have coaxial geometry for future utilization in medical sterilization. The effects of the amplitude and frequency of the driving potential on the temperature and spectrum of plasma have been studied. It is found that with the amplitudes and frequencies of the driving potentials that can

be supplied by the available power supply, similar plasma spectrum have been obtained and the electron temperatures are measured between 4-5 eV

Keywords: low-temperature atmospheric plasma source, dielectric barrier discharge (DBD)

1. บทนำ

การวิจัยและประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายทั้งในงานด้านการแพทย์และอุตสาหกรรม เช่น การฆ่าเชื้อ การผลิตแสง UV และการปรับปรุงผิวหน้าวัสดุให้มีสมบัติต่าง ๆ (อาทิ การเพิ่มสมบัติการทนต่อการขีดข่วนด้วยกระบวนการ plasma-enhanced chemical vapor deposition หรือ การเพิ่มสมบัติการกันน้ำด้วยกระบวนการ plasma polymerizations¹ เป็นต้น การเลือกใช้และการออกแบบแหล่งกำเนิดของพลาสมาให้เหมาะสมกับงาน นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะนอกจากชนิดและแบบของแหล่งกำเนิดพลาสมาจะมีผลต่อสมบัติของพลาสมาแล้ว ยังสามารถช่วยในเรื่องของความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งานอีกด้วย²

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบรียเออร์ดีสชาร์จ (dielectric barrier discharge)² โดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแบบต่อเนื่อง (continuous AC) ซึ่งแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้สามารถสร้าง non-equilibrium plasma³ อุณหภูมิต่ำ ประสิทธิภาพสูงที่ความดันบรรยากาศได้ และยังมีจุดเด่นที่สามารถใช้งานง่าย ราคาประหยัด ปราศจากเครื่องระบายความร้อน และไม่จำเป็นต้องปฏิบัติงานภายใต้ระบบสุญญากาศ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน ซึ่งที่กำลังได้รับความสนใจด้านหนึ่ง คือ การใช้พลาสมาทางการแพทย์หรือที่เรียกว่า “เวชศาสตร์พลาสมา” (plasma medicine)⁴ รวมถึงการนำพลาสมาไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคและการปรับปรุงวัสดุชีวภาพ เป็นต้น

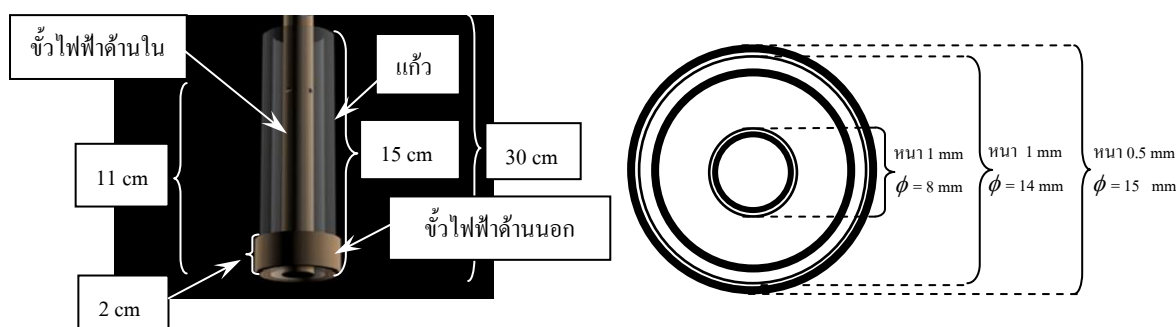
แหล่งกำเนิดพลาสมาที่ทำการพัฒนาในงานวิจัยนี้ได้รับการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในกระบวนการฆ่าเชื้อทางการแพทย์ ซึ่งในปัจจุบันการใช้พลาสมาในลักษณะนี้ยังอยู่ในวงจำกัด เนื่องจากเครื่องมือยังมีราคาแพงเมื่อเทียบกับวิธีการฆ่าเชื้อแบบอื่น และการศึกษาพบว่ายังอยู่ในขั้นเริ่มต้น โดยเฉพาะในส่วนของกลไกการฆ่าเชื้อที่เกิดขึ้น

2. การออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบ dielectric barrier discharge (DBD) ซึ่งออกแบบจ่ายไฟฟ้าในลักษณะโคแอ็กเซียล โดยใช้แหล่งจ่ายไฟชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 1-10 กิโลโวลต์ และมีความถี่ในช่วงระดับเฮิร์ตซ์ ซึ่งเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ DBD จะได้พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ผลิตได้ที่ความดันบรรยากาศ (1 atm)

2.1 ขั้นตอนการออกแบบ

โครงสร้างของ DBD แบบโคแอ็กเซียลที่พัฒนาดังแสดงในรูปที่ 1 มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกหรือท่อ 2 ขั้วขนานกัน และมีวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) กั้นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อมิให้ขั้วไฟฟ้าสัมผัสโดยตรงกับพลาสมา จึงสามารถป้องกันการเกิด Arcing ที่แรงดันไฟฟ้าสูง และช่วยลดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าด้านที่ไม่สัมผัสโดยตรงกับพลาสมา ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเกิด Secondary emission ที่ขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านในซึ่งทำจากทองแดงจะต่อเข้ากับ Ground และขั้วไฟฟ้าด้านนอกซึ่งทำจากทองแดงเช่นกันจะต่อเข้ากับไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกสำหรับกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง รูปที่ 1 แสดงขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ในแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิด DBD ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 1 แผนภาพและภาพตัดขวางของโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบรีเออดิสชาร์จ์ที่ทำการออกแบบ

ขั้วไฟฟ้าด้านใน ขั้วไฟฟ้าด้านนอก และวัสดุไดอิเล็กทริกถูกประกอบเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 1 ในการทดลอง ส่วนท้ายของขั้วไฟฟ้าด้านใน (ด้านบนในรูปที่ 1) จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแก๊สซึ่งแก๊สจะถูกส่งเข้าไปทางด้านในของขั้วไฟฟ้าด้านใน ซึ่งได้ทำการเจาะรูจำนวน 4 รูไว้รอบ ๆ โดยเว้นระยะห่างระหว่างแต่ละรูเท่า ๆ กัน เพื่อให้แก๊สสามารถไหลผ่านรูทั้ง 4 จากด้านในของขั้วไฟฟ้าออกสู่ด้านนอกได้ ตำแหน่งของรูจะอยู่ห่างจากส่วนหัวของท่อ (ด้านล่างในรูปที่ 1) ประมาณ 11 cm เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของลำแก๊สที่ออกมา ส่วนหัวของขั้วไฟฟ้าด้านในจะถูกปิดไว้เพื่อให้แก๊สมีทางออกทางเดียว (ผ่านรูที่เจาะไว้) ขั้วไฟฟ้าด้านในถูกประกอบติดกับท่อแก้วโดยใช้ยางหนูนั้วที่ส่วนท้าย โดยรอบ เพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและท่อแก้ว (Air gap) ที่มีระยะห่างสม่ำเสมอและให้แก๊สไหลออกทางส่วนหัวเท่านั้น ขั้วไฟฟ้าด้านนอก (Outer electrode) ถูกติดไว้บริเวณส่วนหัวของท่อแก้ว และใช้กาว Epoxy หุ้มไว้เพื่อป้องกันการ Arcing ข้ามผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านนอกสู่ขั้วไฟฟ้าด้านใน รูปที่ 2 แสดง DBD ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว และรูปที่ 3 แสดงลักษณะของพลาสมาที่ได้เมื่อทำการทดลอง



รูปที่ 2 ภาพจริงของ DBD ที่ทำการออกแบบ

รูปที่ 3 การผลิต non-thermal plasma จาก DBD

2.2 ระบบการผลิตพลาสมาด้วยแหล่งกำเนิดแบบ DBD

ระบบการผลิตพลาสมาด้วยแหล่งกำเนิดโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ ส่วนแรกที่เป็นแหล่งกำเนิดความถี่ซึ่งสามารถปรับเลือกความถี่ได้ 4 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 (15 ถึง 150 เฮิรตซ์) ช่วงที่ 2 (150 ถึง 1.5 กิโลเฮิรตซ์) ช่วงที่ 3 (1.5 ถึง 15 กิโลเฮิรตซ์) และช่วงที่ 4 (15 ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์) ติดตั้งอยู่กับตัวขับสัญญาณคลื่นรูปไซน์ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นรูปไซน์และขับสัญญาณไปยังหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงขนาด 50 วัตต์ ในส่วนที่สองคือ แหล่งกำเนิดพลาสมาซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และท่อแก๊สซึ่งมีวาล์วควบคุมการไหลเป็นอุปกรณ์กำหนดอัตราการไหลของแก๊สประสิทธิภาพของพลาสมาจะต้องมีปริมาณของแก๊สที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สเป็นพลาสมา ในส่วนสุดท้ายคือส่วนของระบบวัดสเปกโตรมิเตอร์เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

2.3 เครื่องมือวัดสเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอาศัยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น HR4000CG ซึ่งมีหลักการพื้นฐานจากการแผ่รังสีของอะตอมหรือไอออนของแก๊สที่ไอออไนซ์เป็นพลาสมา HR4000CG มีพื้นที่รับแสงขนาด 5 ไมโครเมตร เป็นเลนส์ CCD แบบแถวสามารถตรวจวัดได้ 3648 จุด วัดได้แม่นยำในย่านความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตรและแจกแจงความละเอียดได้ถึง 0.75 นาโนเมตร (FWHM) อีกทั้งมีประสิทธิภาพที่ไวต่อความยาวคลื่นในย่าน 1070 ถึง 1100 นาโนเมตร และสามารถวัดได้ทั้งในย่าน optical และ UV

โดยปกติแล้วสเปกตรัมของพลาสมาจะประกอบด้วยพีกหลายพีก ซึ่งแต่ละพีกจะเกิดจากการปลดปล่อยพลังงานของแก๊สในพลาสมาจากระดับพลังงานหนึ่งไปอีกระดับพลังงานหนึ่งด้วยกระบวนการ radiative decay ในการคำนวณสเปกตรัมที่ออกมาจากพลาสมา จำเป็นที่จะต้องรู้ว่ามีการปล่อยแก๊สชนิดใดที่แตกตัวออกมาบ้าง และมีการกระจายตัวเป็นอย่างไร แบบจำลองของพลาสมาที่ง่ายที่สุด คือ สมมุติว่าพลาสมาอยู่ในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถใช้แบบจำลองนี้คำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สเปลี่ยนระดับพลังงาน (เช่น จากระดับ p ไประดับ q) กับความหนาแน่นของแก๊สที่ระดับพลังงานเริ่มต้น (ระดับ p) ดังแสดงตามสมการที่ 1

$$I_{pq} = \frac{hcA_{pq}}{4\pi\lambda_p} N_p \quad (1)$$

เมื่อ h คือค่าคงตัวของพลังค์ ($4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$), c คือความเร็วแสง ($2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), A_{pq} คือโอกาสที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ p ไปที่ระดับ q , λ_p คือความยาวคลื่นของโฟตอนที่ระดับพลังงาน p และ N_p คือความหนาแน่นของแก๊สที่มีระดับพลังงาน p ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$N_p = N_0 \frac{g_p}{U_0} \exp\left(\frac{-E_p}{kT_e}\right) \quad (2)$$

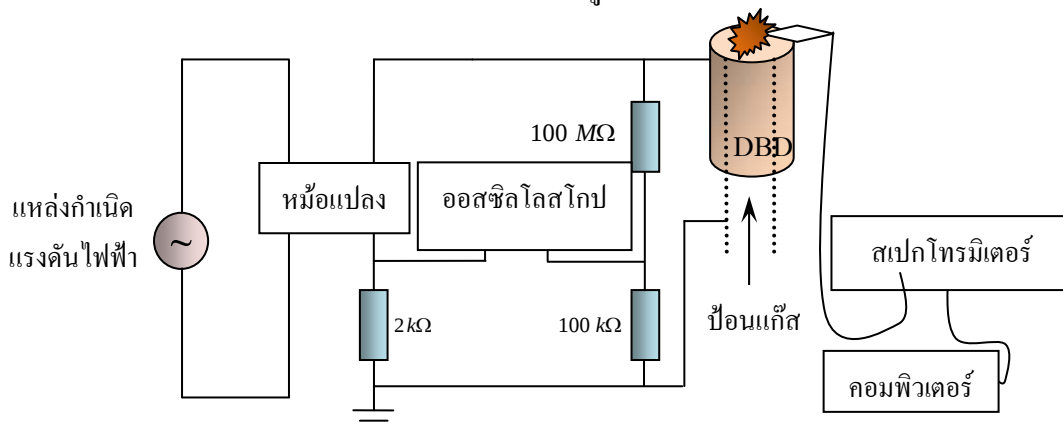
เมื่อ g_p คือตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ, U_0 คือ Electronic partition function ของแก๊สแต่ละสปีชีส์, E_p คือระดับพลังงาน p , N_0 คือความหนาแน่นของแก๊สแต่ละสปีชีส์แทนสมการ (2) ใน (1) และนำค่า $\ln$ คูณทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการ (3) ตามลำดับ

$$\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_p}{A_{pq}g_p}\right) = \frac{-E_p}{kT_e} - \ln\left(\frac{4\pi U_0}{hcN_0}\right) \quad (3)$$

เมื่อใช้กระบวนการข้างต้นกับแต่ละฟีก ในสเปกตรัมของพลาสมา จะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{pq}\lambda_p / A_{pq}g_p)$ กับ E_k/k_B ได้ ซึ่งจากสมการ (3) จะเห็นว่าคือค่าความชันของกราฟที่มีค่าเท่ากับ $-1/T_e$ นั่นเอง

3. วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการผลิตอาร์กอนพลาสมาด้วยแหล่งกำเนิดที่พัฒนาขึ้นที่ย่านความถี่ 200, 320 และ 340 เฮิร์ตซ์ และที่แรงดันไฟฟ้าขาออกประมาณ 1 ถึง 8 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนถูกจำกัดไว้ที่ 8 ลิตรต่อนาที ข้อมูลสเปกตรัมของพลาสมาที่ความถี่และแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ถูกเก็บด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งได้ทำการติดตั้งหัววัดไว้ห่างจากพลาสมาประมาณ 5 cm ระบบการผลิตและการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเป็นไปตามรูปที่ 4

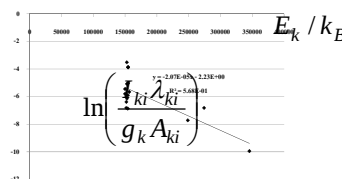
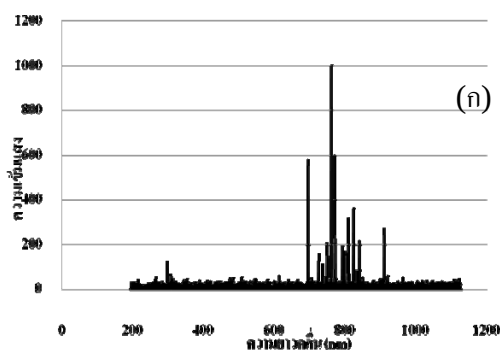


รูปที่ 4 ระบบการผลิตพลาสมาด้วยโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ์และต่อเข้ากับระบบการวัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์

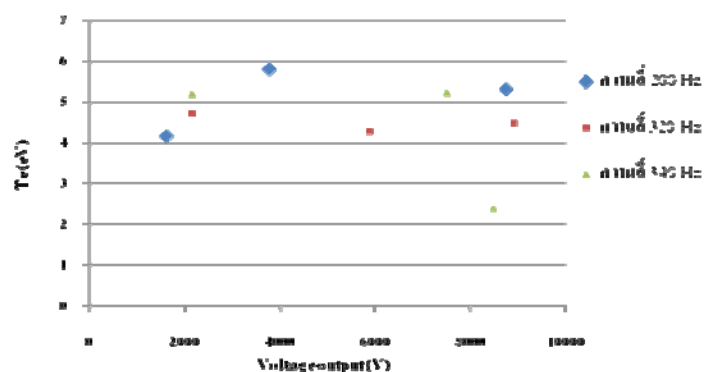
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองแหล่งกำเนิดแบบโคเอ็กเซียลไดโอดเลเซอร์ที่ปรับจูนสามารถผลิตพลาสมาได้ 3 cm สูงจากส่วนหัวแหล่งกำเนิดดังแสดงในรูปที่ 3 และเมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของพลาสมาในแต่ละย่านความถี่พบว่ามีความถี่ของสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันดังตัวอย่างในรูปที่ 5 (ก) และเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ความเข้มแสงจะมากขึ้น ซึ่งสเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 600 ถึง 900 เฮิร์ตซ์ และเมื่อทำการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากค่าความชันของกราฟรูปที่ 5 (ข) ที่ย่านความถี่ 200 , 320 และ 340 เฮิร์ตซ์จะได้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 eV ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากช่วงความถี่ที่สามารถเลือกใช้ในการทดลองนั้นยังแคบอยู่ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในขณะนี้

อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนสังเกตเห็นว่า วิธีการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากสเปกตรัมอาจมีข้อผิดพลาดได้มาก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟในรูป 5 (ข) ซึ่งจะเห็นว่า ค่า R^2 ของเส้นแนวโน้มยังต่ำกว่า 1 มาก นอกจากนี้ การคำนวณยังสมมุติว่าประสิทธิภาพของการวัดสเปกตรัมไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ (หรือความยาวคลื่น) อีกด้วย



รูปที่ 5 ผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอน: (ก) เส้นสเปกตรัมที่ความถี่ 200 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้า 1626.36 โวลต์ (ข) การคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากค่าความชัน



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่ 200, 320 และ 340 เฮิร์ตซ์

5. สรุป

แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบโคเอ็กซ์เซิลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตอาร์กอนพลาสมาที่มีความดันบรรยากาศได้ และด้วยความสามารถของแหล่งจ่ายไฟที่มีอยู่ในขณะนี้ พบว่าสเปกตรัมของพลาสมาที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้อยู่ระหว่าง 4-5 eV เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะทำการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำภายใต้ความดันบรรยากาศที่มีความหนาแน่นสูง ในขั้นตอนต่อไปจึงจะทำการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาในช่วงความถี่และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่กว้างขึ้น ซึ่งคาดว่าจะเริ่มเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือนิวเคลียร์ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชัน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อและสนับสนุนเครื่องมือตลอดจนอุปกรณ์วิจัย ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงด้วยดีสุดท้ายนี้ขอขอบคุณพระศรีรัตนตรัยจงบันดาลให้ท่านทั้งหลายจงประสบแต่ความสุขตลอดไป

7. เอกสารอ้างอิง

1. P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, T. Vilaitong ., 2005. Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. Surface & Coatings Technology . 193 (2005) 356–360
2. Nehra, Ashok Kumar, H K Dwivedi Atmospheric Non- Thermal Plasma Source. Deptt of Electronic & Communication Guru Jambheshwar University of Science & Technology.
3. Claire Tendero , Christelle Tixier a, Pascal Tristant a, Jean Desmaison a, Philippe Leprince b Review ., 2006. Atmospheric pressure plasmas : A review. , Science direct, Spectrochimica Acta Part B 61 30a Laboratoire Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surfaces.
4. G E Morfill , M G Kong and J L Zimmermann., Focus on Plasma Medicine., New Journal of Physics 11