

การศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่สภาวะบรรยากาศต่อการปรับสภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์

The Study of Atmospheric Plasma Effectiveness on Surface Modification Using Plasma Actuator

กิตติศักดิ์ โคมน้อย^{1,2} คณิศร์ มาตรา^{2*} พสิษฐ์ วงษ์หาญศย์^{1,2} และ วุฒิโชค แสงวัง^{1,2}

¹ศูนย์วิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก khanit@g.swu.ac.th^{2*}

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์ภายใต้สภาวะบรรยากาศ (atmospheric plasma actuator, APA) เพื่อศึกษาผลของพลาสมาแอคทูเอเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความชอบน้ำของพื้นผิววัสดุภายหลังการผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยเทคโนโลยีพลาสมา วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC), อะลูมิเนียม (aluminum, Al) และทองแดง (copper, Cu) โดยมีการสังเกตความเปลี่ยนแปลงความชอบน้ำของพื้นผิววัสดุที่มีความแตกต่างกัน โดยดำเนินการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle, WCA) ทั้งก่อนและหลังการผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยเทคโนโลยีพลาสมา โดยในครั้งนี้ผลการทดลองบ่งบอกได้ว่าเทคนิคการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยเทคโนโลยีพลาสมาแอคทูเอเตอร์มีคุณสมบัติในการเพิ่มความชอบน้ำของพื้นผิววัสดุ โดยมีการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกับการทดลองทั้ง 3 ระยะ โดยกำหนดระยะความห่างระหว่างปลายขั้วอิเล็กโทรดถึงอีกปลายขั้วโดยกำหนดระยะความห่างที่ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.48 กิโลวัตต์ (kW) โดยพบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำทั้ง 3 วัสดุมีแนวโน้มลดลงเฉลี่ยเป็น 1.60 เท่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 3 นาที โดยพบว่าวัสดุทองแดง มีอัตราการชอบน้ำมากกว่าทั้ง 2 วัสดุ ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและระยะเวลาในการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์ ในการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุเพื่อรองรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการปรับปรุงพื้นผิววัสดุในอนาคต

คำสำคัญ: พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศ, การปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุ, พลาสมาแอคทูเอเตอร์, ความชอบน้ำ

Abstract

This study presents the application of an Atmospheric Plasma (APA) This study investigates the application of atmospheric plasma actuator technology for surface modification of materials, with an emphasis on evaluating

changes in surface wettability. Three materials polyvinyl chloride (PVC), aluminum (Al) and copper (Cu) were subjected to plasma treatment, and their water contact angles (WCA) were measured before and after surface modification. The experiments were conducted using a high-voltage power supply with electrode gap distances of 2, 4, and 6 mm, and an average power consumption of 0.48 kW. The results revealed that plasma treatment significantly enhanced the hydrophilic properties of the tested materials, with an average reduction in water contact angle by a factor of 1.60 compared to the control group after a treatment duration of 3 minutes. Among the tested materials, copper exhibited the greatest improvement in wettability. The degree of change was found to depend on both the material type and treatment duration. These findings demonstrate the potential of plasma actuator technology as a promising method for improving material surface properties, supporting its future applications in industrial and advanced surface modification technologies.

Keywords: Atmospheric non-thermal plasma, Contact angle Plasma actuator, Surface conditioning of materials

1. ข้อมูลทั่วไป

เทคโนโลยีพลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal plasma) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงทั้งในเชิงกายภาพและเคมีต่อชิ้นงาน กระบวนการนี้ถูกประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย อาทิ การสังเคราะห์วัสดุ การเคลือบผิว การกัดผิว (etching), การสเปตเตอริง (sputtering), รวมถึงการทำความสะอาดและปรับสภาพพื้นผิวก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไป โดยทั่วไปสามารถจำแนกกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1. การทำความสะอาดผิว (plasma cleaning), 2. การกัดผิว (etching), 3. การกระตุ้นพื้นผิว (surface activation), 4. การเกิดพอลิเมอร์เซชัน (polymerization) กระบวนการเหล่านี้มักต้องดำเนินการในสภาวะสุญญากาศซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงและมีกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการทำทำความสะอาด

พื้นผิวด้วยพลาสมา (plasma surface cleaning) ถือเป็นกระบวนการสำคัญที่ถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรม เซมิคอนดักเตอร์ อุตสาหกรรมโลหะ และบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น โดยอาศัยพลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อนในการจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว เช่น คราบอินทรีย์และออกไซด์ต่าง ๆ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิววัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสูงของเทคโนโลยีนี้ ทั้งยังสามารถปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละอุตสาหกรรมได้อย่างยืดหยุ่น [1] สำหรับการปรับปรุงสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคโนโลยีพลาสมายังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ เช่น (gallium arsenide, GaAs) และ (silicon, Si) ได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยแสงอัลตราไวโอเลตจากอะลูมิเนียมที่ระเหยในพลาสมาเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายฟิล์มคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

เทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์ (plasma actuator) เป็นแนวทางเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถสร้างพลาสมาในชั้นบรรยากาศปกติ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ระบบห้องสุญญากาศหรือการเติมก๊าซภายนอก จึงช่วยลดความซับซ้อนและต้นทุน มีการออกแบบการจัดวางขั้วอิเล็กโทรดที่ระยะห่างแตกต่างกันซึ่งมีส่วนสำคัญในการสร้างพลาสมาแอคทูเอเตอร์และการเลือกใช้แผ่นฉนวนกัน (Insulator) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เครื่องพลาสมาแอคทูเอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [3] โดยเทคนิคนี้ได้รับความนิยมในด้านการควบคุมการไหลของอากาศ หรือเรียกว่าลมไอออน (ionic wind) เช่น การปรับสภาพพื้นผิววัสดุ โดยในระบบจะเกิดอนุภาคลำแสงสูงและอนุภาคอิสระที่เกิดจากพลาสมามีคุณสมบัติในการทำมาความสะอาด ฆ่าเชื้อ การสลายของสารเคมี และปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิว เช่น การเพิ่มแรงยึดเกาะและความแข็งแรงของพื้นผิว ด้วยข้อดีในด้านความง่ายในการใช้งาน ความสะดวก และไม่จำเป็นต้องใช้ก๊าซภายนอก เทคนิคนี้จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะด้านการทำความสะอาดพื้นผิวและการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะของสี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างพลาสมาโดยใช้เทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดรูปฟันเลื่อย (sawtooth electrode) ที่มีการปรับระยะความห่างของขั้วอิเล็กโทรดถึงปลายขั้วอิเล็กโทรดอีกฝั่ง โดยกำหนดระยะ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ และศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมจำลอง (Simulation) การวัดค่าความเข้มของแสงด้วย (optical emission spectrometry, OES) รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบำบัดกับคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilicity) ของพื้นผิวหลังจากการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์

2. การออกแบบและกระบวนการทดลอง

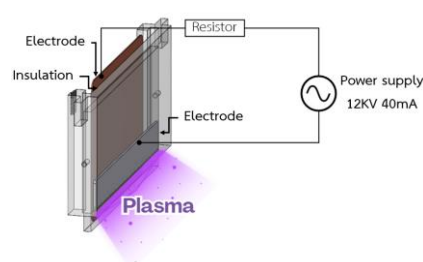
2.1 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

การจำลองระยะห่างระหว่างแอโนดและแคโทดด้วยซอฟต์แวร์ (COMSOL Multiphysics) มีการใช้โมดูล (electrostatic module) ทำการจำลอง โดยแอโนดถูกสร้างขึ้นในรูปแบบสองมิติ (2D) ซึ่งแบบจำลอง

ขั้วอิเล็กโทรดแบบฟันเลื่อยมีขนาดความยาว 70 มิลลิเมตร และความกว้าง 10 มิลลิเมตร ส่วนแคโทดมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบที่มีความกว้าง 100 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างปลายฟันเลื่อยของแอโนดกับแผ่นแคโทด (d) ถูกกำหนดไว้ที่ 2 มิลลิเมตร, 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ พื้นที่จำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 100 x 20 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้เป็นอากาศ โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายให้กับแอโนดคือ 12 กิโลโวลต์ (12 kV) เพื่อทำการสังเกตสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณปลายอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแบบฟันเลื่อย

2.2 การออกแบบการทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงแบบจำลองประกอบด้วยชุดแผ่นอิเล็กโทรดจำนวน 2 ชุด โดยระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าฟันเลื่อยกับแผ่นเรียบถูกจำลองในระยะ 2 มิลลิเมตร, 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่ใช้ในการทดลองเป็นหม้อแปลงแรงดันสูง ขนาด 110 โวลต์ โดยมีแรงดันขาเข้า 220 โวลต์ และแรงดันขาออก 12 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ ในการออกแบบระบบได้ติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 200 โอห์ม ความต้านทานสูงสุด 30 กิโลโอห์ม เพื่อจำกัดหรือลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร นอกจากนี้ยังใช้หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน (variable transformer) ซึ่งสามารถปรับแรงดันขาเข้าได้ในช่วง 0-250 โวลต์ เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า การสร้างพลาสมาเกิดขึ้นที่ปลายของอิเล็กโทรดภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูง 12 กิโลโวลต์จากแหล่งจ่าย ตามที่แสดงในรูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองมี 3 ประเภท ได้แก่ แผ่นพลาสติก PVC, แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดง ขนาด 15 x 35 มิลลิเมตร อย่างละ 6 แผ่น สำหรับแต่ละวัสดุแบ่งเป็น 2 แผ่นควบคุม (control), 2 แผ่นสำหรับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 นาที และอีก 2 แผ่นสำหรับการบำบัดเป็นเวลา 3 นาที โดยในระหว่างการทดลองได้มีการควบคุมสภาพอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ไม่ให้เกิน 60%



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองประกอบด้วยชุดแผ่นอิเล็กโทรดจำนวน 1 ชุด

2.3 การวัดสัญญาณไฟฟ้า

การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าก่อนและระหว่างการเกิดพลาสมาในระบบพลาสมาแอคทูเอเตอร์ การวัดลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมาแอคทูเอเตอร์ดำเนินการทั้งก่อนและระหว่างการเกิดการดีสชาร์จ (discharge) ของพลาสมา โดยทำการวัดรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่จ่ายให้กับระบบพลาสมาแอคทูเอเตอร์ และวัดสัญญาณ

แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการดีสชาร์จ โดยใช้ข้อสซิลโลโคป ยี่ห้อ Tektronix รุ่น 4 series MSO44B เชื่อมต่อหัววัดแรงดันไฟฟ้ากับขั้ว อิเล็กโทรดทั้งด้านบน (แอโนด) และด้านล่าง (แคโทด) เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้า ณ ทั้งสองจุด และคำนวณแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณพลาสมาแอคทูเอเตอร์ หัววัดแรงดันไฟฟ้าแบบแรงดันสูงที่ใช้ ได้แก่ ยี่ห้อ PINTEK รุ่น HVP-39pro นอกจากนี้ยังใช้ หัววัดกระแสแบบแคลมป์ (current probe) ยี่ห้อ PEARSON รุ่น 411 Pearson Electronics คล้องกับสายไฟเส้นใดเส้นหนึ่งของระบบเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ตัวกระตุ้นพลาสมา โดยข้อมูลที่ได้จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของพลาสมาแอคทูเอเตอร์ ทั้งในด้านการเกิดพลาสมา ความถี่ของการดีสชาร์จ และผลต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ

2.4 การวัดความเข้มของแสงด้วย OES

การออกแบบระบบการวัดความเข้มแสงจากพลาสมาแอคทูเอเตอร์ในงานวิจัยนี้อาศัยเทคนิค (optical emission spectroscopy, OES) ทำการวัดสเปกตรัมของแสง โดยใช้อุปกรณ์หลักคือเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น HORIBA MicroHR ร่วมกับหัวรับแสงแบบ (cosine corrector) และสายไฟเบอร์ออปติกที่รองรับแสงในช่วง (UV-VIS) โดยทำการจัดวางหัววัดแสงบริเวณจุดที่ใกล้ที่สุดกับจุดเกิดลำแสงพลาสมา โดยทำการจัดวางแบบตั้งฉากกันมีระยะห่างอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้อุปกรณ์วัดความเข้มแสงเกิดความเสียหาย

2.5 การวัดมุมสัมผัสของน้ำ

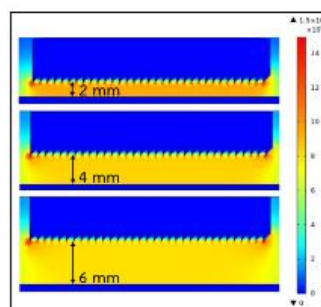
การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำภายหลังการบำบัดพื้นผิวด้วยพลาสมา โดยใช้พลาสมาแอคทูเอเตอร์แบบบรรยากาศนั้น ประกอบด้วยการจัดวางอุปกรณ์อย่างเป็นระบบเพื่อให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความชอบน้ำบนพื้นผิววัสดุได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยทำการปรับสภาพผิววัสดุทั้ง 3 แบบคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), อะลูมิเนียม (Al) และทองแดง (Cu) จะมีการหยดน้ำบริสุทธิ์ขนาด 5 ไมโครลิตรลงบนพื้นผิวและถ่ายภาพด้านข้างของหยดน้ำภายใต้แสงที่ควบคุมด้วยกล้องที่ผ่านการสอบเทียบยี่ห้อ KINO รุ่น SL250 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ ภายใต้การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่ให้เกิด 60% ที่อุณหภูมิ 25 องศา และมีการใช้เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีมาตรฐาน [4]

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 ลักษณะการจำลองความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของโมเดลพลาสมาแอคทูเอเตอร์

จากรูปที่ 2 การจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบปลายฟันเลื่อยของแอโนดและแผ่นแคโทดถูกกำหนดไว้ที่ 2 มิลลิเมตร จะทำให้เกิดความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) สูงสุดในบริเวณปลายฟันเลื่อย ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการของกระบวนการปล่อยประจุในสภาวะใช้งาน

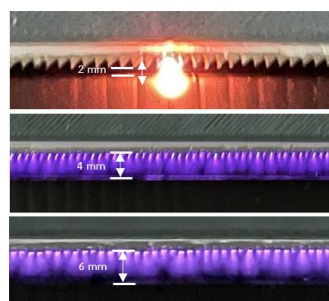
โดยเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 4 มม. และ 6 มม. ตามลำดับ พบว่าสนามไฟฟ้าจะมีการกระจายตัวเฉลี่ย (5×10^6 ถึง 1.2×10^7 V/m) และมีความเข้มลดลงประมาณ (2 MV/m) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการกระจายศักย์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นการลดช่องว่างของอิเล็กโทรดจะเพิ่มประสิทธิภาพของสนามแต่ต้องพิจารณาความเสี่ยงของการเกิด Breakdown ด้วยที่อาจเกิดประกายไฟ (spark) ดังนั้นข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นเกณฑ์เบื้องต้นในการออกแบบระบบของเครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานสูงสำหรับการสร้างพลาสมาแอคทูเอเตอร์ที่ตรงความต้องการ [5]



รูปที่ 2 แสดงการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL

3.2 ลักษณะของพลาสมา

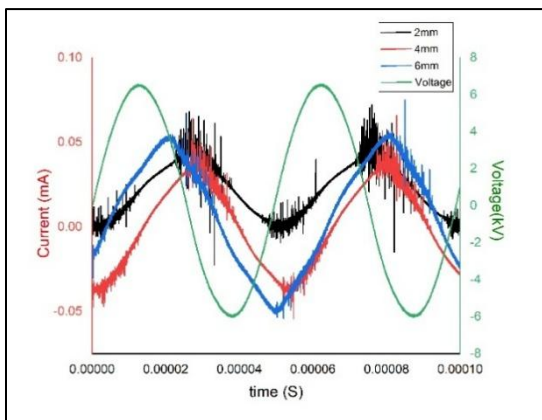
รูปที่ 3 การแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบพลาสมาแอคทูเอเตอร์ในการปรับปรุงผิววัสดุ ผลการทดลองพบว่าที่ระยะห่างอิเล็กโทรด 4 มิลลิเมตร พลาสมามีความเข้มสูงและพุ่งออกจากขอบฉนวนได้ต่อเนื่อง ทำให้สัมผัสชิ้นงานได้ดีกว่าระยะ 2 มิลลิเมตรซึ่งเกิดประกายไฟ และระยะ 6 มิลลิเมตรที่พลาสมาอ่อนและไม่พุ่งขอบฉนวน ทั้งนี้ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการจำลองด้วย (COMSOL) โดยสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้นและส่งผลให้ลักษณะการปล่อยพลาสมาเปลี่ยนจากการปล่อยแบบ (arc discharge) ที่มีการกระจุกตัวสูงนำไปสู่กระบวนการเกิดพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่องที่เสถียรและครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น



รูปที่ 3 การแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบพลาสมาแอคทูเอเตอร์ในการปรับปรุงผิววัสดุ ที่ 2 มิลลิเมตร, 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

3.3 ความสัมพันธ์ของระยะห่างและการดีสชาร์จ (Discharge)

จากรูปที่ 4 แสดงถึงรูปแบบการดีสชาร์จของกระแสไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายพื้นเรียบที่มีการศึกษาภายใต้การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างขั้วที่ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร โดยลักษณะการดีสชาร์จของกระแสไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายพื้นเรียบ พบว่าค่ากระแส RMS มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ 4 มม. มีการเกิดไมโครดีสชาร์จต่อเนื่องในระดับกระแสต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับโหมดพลาสมาแบบ (non-thermal) และ (non-spark regime) ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงผิววัสดุ ขณะที่ระยะ 2 มม. แสดงพฤติกรรมกระแสที่มีแอมพลิจูดสูงและเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว บ่งชี้ถึงแนวโน้มเข้าสู่โหมด (spark discharge) ส่วนระยะ 6 มม. ให้การดีสชาร์จที่อ่อนและเกิดขึ้นน้อย แสดงถึงการลดลงของความเข้มสนามไฟฟ้าและการเกิดอิเล็กตรอนอวาลานซ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสร้างพลาสมาลดลง. [6]

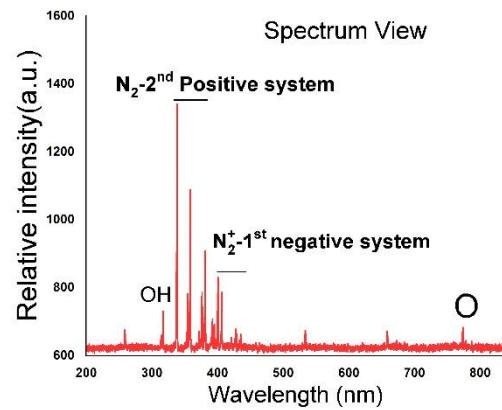


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของระยะห่างและการดีสชาร์จ (Discharge)

3.4 Optical Emission Spectrometry (OES)

จากผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค (optical emission spectroscopy, OES) ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าในกระบวนการกระตุ้นพลาสมาด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์ มีการปล่อยสเปกตรัมของแสงที่บ่งชี้ถึงการเกิดอนุมูลอิสระหลายชนิด โดยตรวจพบ อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radicals, OH) ในช่วงความยาวคลื่น 307-309 นาโนเมตร (nm) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการแตกตัวของไอน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในอากาศบริเวณผิววัสดุ นอกจากนี้ ยังพบ อนุมูลอิสระของไนโตรเจน (N_2) ในช่วงความยาวคลื่น 331-430 นาโนเมตร, อนุมูลของออกซิเจน (O_2) โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น 777 นาโนเมตร [7] ซึ่งอาจรวมถึงการเกิด โอโซน (O_3) ที่มีฤทธิ์ออกซิไดซ์สูง กระบวนการดีสชาร์จที่เกิดจากพลาสมาแอคทูเอเตอร์นั้น ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนพลังงานสูงกับโมเลกุลของอากาศหรือน้ำที่อยู่บริเวณใกล้ผิววัสดุ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่นำไปสู่การเกิดอนุมูลอิสระและสารประกอบออกฤทธิ์หลายชนิด ซึ่งในบริบทของการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ สารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลง

สมบัติทางเคมีของพื้นผิว เช่น การเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ การทำให้พื้นผิวมีความชอบน้ำ (hydrophilicity) มากขึ้น และการกำจัดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ กระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปสู่การสร้างกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจนบนพื้นผิววัสดุ เช่น กลุ่มคาร์บอกซิล ($COOH$), อนุมูลไฮดรอกซิล (OH), หรือกรดไนตริก (HNO_2)



รูปที่ 5 การตรวจวัด OES

3.5 อิทธิพลของพลาสมาแอคทูเอเตอร์ที่มีผลต่อผิววัสดุ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบปลายพื้นเรียบต่อพฤติกรรมของการปล่อยพลาสมาและผลการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของพื้นผิววัสดุภายใต้แรงดันไฟฟ้าพลังงานสูง โดยทำการทดลองที่ระยะห่าง 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร พบว่า ที่ระยะ 2 มม. เกิด (spark discharge) ประมาณ 0.07 mA ซึ่งเป็นผลจากความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่มากเกินไปค่าความเป็นฉนวนของอากาศ ในขณะที่ระยะ 6 มม. มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำจนไม่สามารถกระตุ้นการเกิดพลาสมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม ระยะ 4 มม. เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถกระตุ้นให้เกิดไมโครดีสชาร์จที่เสถียรโดยไม่เกิด (Spark) การศึกษาผลการบำบัดพลาสมาในการปรับปรุงสภาพพื้นผิว โดยได้ดำเนินการโดยใช้วัสดุสามชนิด ได้แก่ พลาสติก, อะลูมิเนียม และทองแดง ภายใต้แรงดันไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ และเวลาการบำบัด 1 และ 3 นาที ซึ่งเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติพื้นผิวโดยสังเกตผ่านมุมสัมผัสของหยดน้ำ RO ซึ่งวัดในช่วง 1 นาที หลังการบำบัด พบว่ามุมสัมผัสลดลงในทุกกรณี แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) อันเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนสภาพผิวด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์ โดยรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าในกรณีของ (PVC) มุมสัมผัสลดลงจาก 62 องศา เหลือ 60 องศา หลังการบำบัด 1 นาที และลดลงเหลือ 49 องศา เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 3 นาที ขณะที่ อะลูมิเนียม (Al) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจากมุมสัมผัสเดิม 70 องศา ลดลงเหลือ 47 องศา ภายใน 1 นาที และเหลือเพียง 39 องศา หลังบำบัด 3 นาที ส่วน ทองแดง (Cu) ลดลงจาก 70 องศา เหลือ 59 องศา หลังบำบัด 1 นาที และลดลงต่อเนื่องเป็น 53 องศา เมื่อบำบัด 3 นาที แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มความชอบน้ำเช่นเดียวกับการบำบัดด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์ในทุกวัสดุที่มีการศึกษา ทำให้มุม

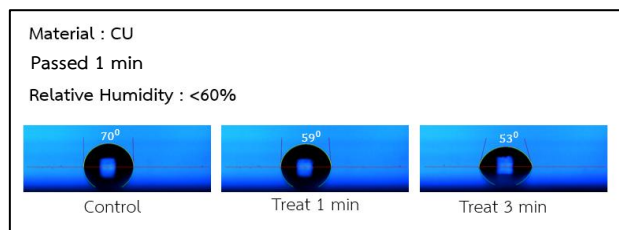
สัมพัทธ์ลดลงตามระยะเวลาการบำบัด สอดคล้องกับกลไกการเกิดออกซิเดชันและการปรับเปลี่ยนทางเคมีบนพื้นผิวหรือการทำความสะอาดที่ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติความชอบน้ำมากขึ้น ผลการทดลองนี้จึงเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของพลาสมาแอคทูเอเตอร์ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวได้อย่างชัดเจนและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1 แสดงการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิววัสดุ

Material	Time	Control (Degrees)	Treatment 1min (Degrees)	Treatment 3 min (Degrees)
PVC	1 min	62 ± 4.96	60 ± 5%	59 ± 5 %
Al	1 min	70 ± 9%	62 ± 9%	55 ± 7%
Cu	1 min	70 ± 4%	59 ± 6%	53 ± 9%

(Al = Aluminum), (Cu = Copper)

จากการทดลองหยดน้ำที่มีปริมาณเท่ากันบนพื้นผิวของวัสดุทุกชนิดที่ผ่านการบำบัดเป็นเวลา 1 นาที พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุมหลังผ่านไป 1 นาที เมื่อหยดน้ำบนพื้นผิวของวัสดุทุกชนิดในชุดที่ผ่านการบำบัดเป็นเวลา 3 นาที พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำหลังผ่านไป 1 นาทีมีค่าน้อยกว่าชุดควบคุมและชุดที่ผ่านการบำบัด 1 นาที ผลการทดลองดังกล่าวยืนยันว่าการบำบัดพื้นผิวด้วยเทคนิคพลาสมาทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) มากขึ้น และสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัด [7], [8] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุที่ผ่านการบำบัดสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงเชิงกลไกระหว่างลักษณะของสนามไฟฟ้าที่จำลองด้วย COMSOL กับพฤติกรรมทางไฟฟ้าและผลกระทบต่อสมบัติพื้นผิววัสดุภายใต้การบำบัดด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์ โดยเฉพาะการควบคุมระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดแบบปลายฟินเลื้อยซึ่งมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวและความเข้มของสนามไฟฟ้า ทั้งนี้พบว่าที่ระยะ 2 มิลลิเมตร ความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงมากเกินไป จนนำไปสู่การเกิด ประกายไฟ (spark discharge) ซึ่งไม่เหมาะกับกระบวนการบำบัดที่ต้องการความเสถียร ขณะที่ระยะ 6 มิลลิเมตร เส้นแรงของสนามไฟฟ้าอ่อนเกินกว่าจะเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวของอากาศและสร้างพลาสมาได้สม่ำเสมอ และที่ระยะ 4 มิลลิเมตร พบว่าเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มพอเหมาะ กระตุ้นให้เกิด (non-thermal plasma) อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดประกายไฟ การเกิดพลาสมาที่ยืนยันได้จากการตรวจวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค (optical emission

spectroscopy, OES) ซึ่งแสดงให้เห็นการปล่อยแสงจากอนุภาคนิวตรอนสำคัญ ได้แก่ OH, N₂, H และ O₂ ซึ่งมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีของพื้นผิววัสดุ โดยเฉพาะการสร้างกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจน เช่น OH, NO₂, COOH ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกน้ำ (hydrophilicity) และความสามารถในการยึดเกาะ (adhesion) ของวัสดุผิว ผลการวัด มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) บนพื้นผิว พลาสติก, อะลูมิเนียม และทองแดง หลังการบำบัดพลาสมา พบว่าแนวโน้มของการลดลงของมุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อบำบัดที่ระยะเวลา 3 นาที จากการวิเคราะห์ภาพรวมทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าการควบคุมสนามไฟฟ้าอย่างเหมาะสมผ่านการกำหนดระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดมีส่วนสำคัญในการควบคุมลักษณะของพลาสมาและผลของการปรับสภาพผิววัสดุ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องปรับปรุพื้นผิวของวัสดุด้วยเทคโนโลยีพลาสมาที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำในสภาวะบรรยากาศ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 12 kV และกระแสสูงสุด 40 mA เพื่อกระตุ้นการเกิดพลาสมาอย่างมีประสิทธิภาพและควบคุมง่าย ผ่านชุดขั้วอิเล็กโทรดแบบปลายฟินเลื้อยงาน โดยวิจัยได้มีการนำเทคนิค พลาสมาแอคทูเอเตอร์ที่ทำงานในสภาวะบรรยากาศมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของวัสดุสามชนิด ได้แก่ แผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), แผ่นอะลูมิเนียม (Al) และแผ่นทองแดง (Cu) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ารูปใบเลื่อยในระยะห่าง 4 มม. ซึ่งเป็นระยะห่างที่มีความเหมาะสมที่สุด ที่แรงดันไฟฟ้า 12 kV เพื่อสร้างพลาสมาบนพื้นผิววัสดุ ผลการทดลองพบว่า การบำบัดด้วยพลาสมาแอคทูเอเตอร์ส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีคุณสมบัติ ชอบน้ำ (hydrophilicity) มากขึ้นอย่างชัดเจน โดยมุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิววัสดุลดลงหลังผ่านการบำบัด โดยพบว่าการเพิ่มระยะเวลาการบำบัดจาก 1 นาทีเป็น 3 นาที ทำให้ความชอบน้ำของพื้นผิววัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในการทดลองครั้งนี้วัสดุ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีอัตราการชอบน้ำสูงกว่าทั้ง 2 วัสดุ โดยพลาสมาแอคทูเอเตอร์สร้างอนุมูลอิสระ เช่น (hydroxyl radicals, OH), (nitrogen radicals, N₂), (hydrogen radicals, H) และ (oxygen radicals, O₂) ส่งผลให้การยึดเกาะของวัสดุอื่น ๆ หรือสารเคลือบมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคพลาสมาแอคทูเอเตอร์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติพื้นผิววัสดุในภาคอุตสาหกรรม โดยไม่จำเป็นต้องใช้สภาวะสุญญากาศ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Belkind and S. Gershman, "Plasma cleaning of surfaces" Vacuum Technology & Coating, 2008.
- [2] Z. Niu, C. Zhang, T. Shao, Z. Fang, Y. Yu, and P. Yan, "Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers," Surface and Coatings Technology, vol. 228, pp. S578–S582, Aug. 2013.
- [3] B. Dong, M. S. Driver, Ismail Emesh, Roey Shaviv, and J. A. Kelber, "Surface chemistry and fundamental limitations on the plasma cleaning of metals," *Applied Surface Science*, vol. 384, pp. 294–297, May 2016.
- [4] E. Pescini, M. G. De Giorgi, A. Suma, L. Francioso, and A. Ficarella, "Separation control by a microfabricated SDBD plasma actuator for small engine turbine applications: influence of the excitation waveform," *Aerospace Science and Technology*, vol. 76, pp. 442–454, May 2018.
- [5] V. N. Arustamov, R. KH. Ashurov, V. M. Rotchtein, KH. B. Ashurov, and I. KH. Khudaykulov, "Cleaning the surface of products with glow discharge plasma," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1686, no. 1, p. 012013, Dec. 2020.
- [6] D. Marinov, J.-F. de Marneffe, Q. Smets, G. Arutchelvan, K. M. Bal, E. Voronina, T. Rakhimova, Y. Mankelevich, S. E. Kazzi, A. N. Mehta, P.-J. Wyndaele, M. H. Heyne, J. Zhang, P. C. With, S. Banerjee, E. C. Neyts, I. Asselberghs, D. Lin, and S. De Gendt, "Reactive plasma cleaning and restoration of transition metal dichalcogenide monolayers," *npj 2D Materials and Applications*, 2021.
- [7] A. Samaei and S. Chaudhuri, "Multiphysics modeling of metal surface cleaning using atmospheric pressure plasma," *Journal of Applied Physics*, vol. 128, no. 5, Aug. 2020.
- [8] A. Sánchez, J. J. Diaz, Y. Kudriavtsev, M. Avendaño, and R. Asomoza, "Rapid oxidation of semiconductors at room temperature with a basic plasma cleaner," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 35, no. 17, pp. 35–1156, Jun. 2024.



กิตติศักดิ์ โคมน้อย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2562

และ พ.ศ. 2564 ตามลำดับ ปัจจุบันเขาดำรงตำแหน่งวิศวกรนิวเคลียร์ ศูนย์วิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์

แห่งชาติ (องค์การมหาชน) งานวิจัยของเขาเน้นในส่วนของเทคโนโลยีด้าน พลาสมาอุณหภูมิต่ำ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ในงานวิจัยและพัฒนา



คณิตร์ มาตรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) และ ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2550 และ พ.ศ. 2552 ตามลำดับ เขา ได้รับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟิสิกส์ ในปี พ.ศ. 2556 จาก Kochi University of Technology ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันเขาดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ งานวิจัยของเขาครอบคลุมลักษณะเฉพาะ ของไมโครพลาสมา วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การประยุกต์ใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ ความร้อนในบรรยากาศ และเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่อื่น ๆ



นายพลิชฐ์ วงษ์หาบศุข สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันศึกษาในระดับ ปริญญาเอก คณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรี นครินทรวิโรฒ ตำแหน่งงานปัจจุบัน เป็นวิศวกรนิวเคลียร์ ศูนย์วิศวกรรม และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ขั้นสูง ฝ่ายนิวเคลียร์ฟิวชันและพลาสมา สถาบัน เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) รับผิดชอบงาน การเดินเครื่องโทคาแมค ด้านการควบคุมและเก็บข้อมูลการทดลอง และความ สนใจในงานพลาสมาอุณหภูมิต่ำในสภาวะบรรยากาศ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ ในงานเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม



วุฒิโชค แสงวัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2566 ตามลำดับ ปัจจุบัน ศึกษาในระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ตำแหน่งงานปัจจุบันเป็นวิศวกรนิวเคลียร์ ศูนย์วิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน) งานวิจัยของเขาเน้นในส่วนของเทคโนโลยีด้าน พลาสมาอุณหภูมิต่ำ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และเครื่องเร่งอนุภาคชนิด ต่างๆ