



การบำบัดน้ำเสียอมเมทิลีนบลูจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ
NON - THERMAL PLASMA TREATMENT FOR METHYLENE BLUE WASTEWATER
FROM TEXTILE INDUSTRY

นายจิรเวทย์	มากมี
นายณัฐวัตร	ท้วมเทียบ
นายณัฐวัชร์	ถาวรวงษ์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

การบำบัดน้ำเสียอมเมทิลีนบลูจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ
NON - THERMAL PLASMA TREATMENT FOR METHYLENE BLUE WASTEWATER
FROM TEXTILE INDUSTRY

นายจิรเวทย์ มากมี
นายณัฐวัตร ท่วมเทียบ
นายณัฐวัชร ถาวรวงษ์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงการวิศวกรรม

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียอเนกเมทิลีนบลูจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

ของ

นายจิรเวทย์ มากมี

นายณัฐวัตร ท้วมเทียบ

นายณัฐวัชร์ ถาวรวงษ์

ได้รับอนุมัติจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บำรุง ท้าวศรีสกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

การบำบัดน้ำเสียอเมทิลีนบลูจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

ปีการศึกษา 2559

โดย

นายจิรวุฒิ มากมี
นายณัฐวัตร ท่วมเทียบ
นายณัฐวัชร ถาวรวงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.คณิตร์ มาตรา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาของพลาสมาอุณหภูมิต่ำสภาวะบรรยากาศและการออกแบบเครื่องกำเนิดพลาสมาสำหรับการบำบัดน้ำเสียอเมทิลีนบลูจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ จากผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์เช่นอัตราการไหลของแก๊ส ค่ากำลังไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดโดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ส่งผลกระทบต่อลักษณะของพลาสมา และจะเห็นได้ว่าอาร์กอนพลาสมาอิเล็กโทรดสามารถลดความเข้มข้นของน้ำเสียอเมทิลีนบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองที่ดีที่สุดสำหรับการบำบัดน้ำเสียอเมทิลีนบลูในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าผลิต 20.35 วัตต์ หลังจากการบำบัด 60 นาที ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียอเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่น 292 นาโนเมตร และ 664 นาโนเมตร มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 4.4931 และ 5.2323 มิลลิโมลต่อลิตรวินาที ลดความเข้มข้นลงได้ 0.9757 ppm และ 1.3361 ppm ตามลำดับ และพบว่า อาร์กอนพลาสมาไม่เพียงแต่จะช่วยลดความเข้มข้นของน้ำเสียเท่านั้น แต่พลาสมายังสามารถปรับปรุงค่าพีเอชของน้ำเสียอเมทิลีนบลูได้อีกด้วย

คำสำคัญ: น้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียอเมทิลีนบลู พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ

**NON - THERMAL PLASMA TREATMENT FOR METHYLENE BLUE
WASTEWATER FROM TEXTILE INDUSTRY
Academic Year 2016**

By

Mr. Jiravate Makmee
Mr. Nattawat Tuamtiab
Mr. Nattawach Thawornwong

Advisor

Dr.Khanit Matra

Abstract

This research proposed a study of atmospheric low temperature plasma, and design the atmospheric low temperature plasma jet generator for methylene blue dyed water treatment from textiles industrial factory. From the experimental results, the experimental parameters such as flow rate gas, electrical power and electrode gap, all affected on plasma characteristics. It was confirmed that the argon plasma could effectively reduce methylene blue dyed concentration. The best result for methylene blue dyed water treatment in this research was found in plasma-treated water at the argon gas flow rate of 4 lpm, 20.35 watts generating power. After 60 minutes treatment, the concentration value of methylene blue dyed water at wavelength of 292 nm and 664 nm, was reduced at the reaction rate of 4.4931 and 5.2323 millimol/Ls to 0.9757 ppm, and 1.3361 ppm, respectively. It was found that argon plasma not only could reduce the concentration, but also improve pH value of dyed water.

Keywords: Wastewater, Methylene Blue waste water treatment, Non-thermal atmospheric plasma

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ ดร.คณิตร์ มาตรา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการได้ช่วยเหลือให้ความรู้ในการสร้างเครื่องกำเนิดลำพลาสมารวมไปถึงการจัดหาอุปกรณ์ในการทดลอง เช่น ออสซิลโลสโคป แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง หัววัดแรงดันแรงสูง ถึงแก๊สอาร์กอน และกรุณาเป็นที่ปรึกษาตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้โครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ทำการศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว และอาจารย์ ดร.สุธิดา ที่ปรึกษาพันธุ์ที่เป็นผู้ให้คำปรึกษาด้านการตรวจวัดคุณภาพของน้ำเสียและอาจารย์ทุกท่าน รวมไปถึงบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่กรุณาสอน และให้ยืมอุปกรณ์ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำเสีย เช่น เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) ปีกเกอร์หลอดทดลอง เทอร์โมมิเตอร์ สีเมทิลีนบลู (Methylene blue) ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย รวมถึงเพื่อนๆ ที่คอยให้คำแนะนำเป็นที่ปรึกษา ตลอดจน อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ และขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด ให้ความรัก ความเมตตา อบรมสั่งสอน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้ตลอดมา จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ทำการศึกษาขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูง สำหรับทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ ทั้งที่กล่าวมาแล้ว และยังไม่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้ทำการศึกษาขออภัยเป็นอย่างสูง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้คงมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย ถ้ามีสิ่งผิดพลาดบกพร่องหรือผิดพลาดประการใดก็ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลาสมา	3
2.1.1 คุณสมบัติของพลาสมา	3
2.1.2 ชนิดของพลาสมา	4
2.1.3 หลักการของพลาสมา	5
2.2 สนามไฟฟ้า	5
2.2.1 ความหมายของสนามไฟฟ้า	6
2.2.2 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า	7
2.3 เงื่อนไขการชนเกิดไอออนไนเซชัน	9
2.3.1 โฟโตไอออนไนเซชัน	9
2.3.2 การไอออนไนเซชันที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำ	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การดิสชาร์จ	11
2.4.1 การดิสชาร์จในแก๊ส	11
2.4.2 การดิสชาร์จเบรกดาวนในแกป	11
2.4.3 การดิสชาร์จข้ามฉนวน	13
2.5 กลไกการเบรกดาวน	14
2.5.1 ผลของชั่วแรงแรงดันต่อค่าแรงแรงดันเริ่มต้น	14
2.5.2 ประจุก้างมีผลต่อแรงแรงดันเบรกดาวนต่างชั่ว	15
2.5.3 ผลของรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์	16
2.5.4 กลไกการเบรกดาวนของทาวนเซนต์	17
2.5.5 กฎของพาสเซน	22
2.5.6 กลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์	26
2.6 น้ำ	29
2.6.1 ประเภทของน้ำเสีย	29
2.6.2 ลักษณะของน้ำเสีย	30
2.7 สีย้อม	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและการออกแบบ	43
3.1 การออกแบบการสร้างพลาสมา	43
3.1.1 ความต้องการในการออกแบบ	43
3.1.2 รายละเอียดในการออกแบบ	43
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 ผลการทดลองเบื้องต้น	46
3.4 ปัญหาในการทดลองเบื้องต้น	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบและการทดลอง	48
4.1 ขั้นตอนการทดสอบและการทดลอง	48
4.1.1 การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดพลาสมาของ แบบจำลองที่ 1	48
4.1.2 การทดสอบเพื่อหาลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมาที่ดีที่สุดของ แบบจำลองที่ 1	48
4.1.3 การทดสอบเพื่อหาช่วงแรงดันเบรกดาวน์ที่ทำให้พลาสมามีลักษณะ ทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดของแบบจำลองที่ 1	48
4.1.4 การทดลองเพื่อหาช่วงของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตพลาสมาของ แบบจำลองที่ 2	49
4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	49
4.3 การทดสอบหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู	68
4.3.1 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถบำบัดน้ำสีย้อมได้ดีที่สุด	69
4.4 การทดสอบหาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อม	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	82
5.1 สรุปผล	82
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	83
5.3 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	87
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่ำสุดของแก๊สชนิดต่างๆ	25
3.1 ความกว้าง ความยาว ความหนา และจำนวนของอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2	46
4.1 ความถี่และระยะห่างของลวดกับปลายลวดที่ส่งผลต่อระยะความยาวของพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ถึง 5 ลิตรต่อนาทีที่ระยะห่างของขั้วแอโนดกับปลายลวดเท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 มิลลิเมตร แบบจำลองที่ 1 ที่แรงดันแหล่งจ่ายเท่ากับ 800 โวลต์	51
4.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	52
4.3 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	52
4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	53
4.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	53
4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	54
4.7 ค่าแรงดันเบรกดาวน์และกระแสเบรกดาวน์ที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ระยะแกป 5 มิลลิเมตรที่ระดับแรงดันต่างๆ ของแบบจำลองที่ 1	58
4.8 ค่าแรงดันดิสชาร์จ กระแสดิสชาร์จและค่ากำลังไฟฟ้าที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2	62
4.9 ค่าแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่เกิดพลาสมา ก่อนเกิดอาร์กที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2	62
4.10 ค่าแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2	63
4.11 ลักษณะของลำพลาสมาที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	70
4.13 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	71
4.14 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	71
4.15 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ	72
4.16 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ	72
4.17 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ	72
4.18 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	76
4.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	76
4.20 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน	6
2.2 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ	7
2.3 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแบบต่างๆ	12
2.4 โครงสร้างทั่วไปของการดิสชาร์จข้ามฉนวน	13
2.5 อิเล็กโทรดแผ่นระนาบวางขนานกันในอากาศ	14
2.6 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจากผลของประจุค้างปลายแหลมหัวบวก	15
2.7 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจากผลของประจุค้างปลายแหลมหัวลบ	16
2.8 วงจรการทดลองของทาวน์เซนต์	17
2.9 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์จนเกิด การเบรกดาวน์	18
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์กับผลคูณของความดันและ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า	24
2.11 กลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์	26
2.12 การดิสชาร์จแบบสตรีมเมอร์บวก	27
2.13 การดิสชาร์จแบบสตรีมเมอร์ลบ	28
2.14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับความยาวของลำ พลาสมาที่สภาวะความยาวของหลอดต่างกัน (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับความยาวของลำ พลาสมาที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำกับปลายหลอด	32
2.15 ลักษณะแบบจำลองของงานวิจัยของจินดนา	33
2.16 ปริมาณ H_2O_2 ที่เกิดขึ้นจากแก๊สชนิดต่างๆ	33
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดลงของสารเมทิลีนบลูกับเวลาที่ใช้บำบัด	34
2.18 การย่อยสลายสีย้อม AB25 ด้วยอาร์กอนพลาสมาที่ความเข้มข้นของสีย้อม ต่างกัน	38
2.19 อัตราการย่อยสลายเริ่มต้นที่ค่าพีเอชต่างๆ	39
2.20 สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาที่สภาวะบรรยากาศที่กระแส 20 มิลลิแอมแปร์	40
2.21 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลาย AB25 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ TiO_2 ต่างกัน	40

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 อัตราการย่อยสลายเริ่มต้นของสีย้อม AB25 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ	41
3.1 การต่อวงจรเพื่อสร้างพลาสมาของแบบจำลองที่ 1	43
3.2 (ก).แบบจำลองที่ 1	44
(ข).พลาสมาที่เกิดจากแบบจำลองที่ 1	
3.3 การต่อแบบจำลองแบบจำลองที่ 1	44
3.4 การต่อวงจรเพื่อทำการวัดแรงดันดิสชาร์จ	45
3.5 การเกิดพลาสมาของแบบจำลองที่ 1	46
3.6 การเกิดพลาสมาของแบบจำลองที่ 2	47
4.1 การต่ออุปกรณ์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ, กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ และ กราฟ	49
4.2 ความยาวของลำพลาสมาที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สและระยะห่างระหว่าง ขั้วแอโนดกับปลายหลอดค่าต่างๆ ที่แรงดันเอาพุตเท่ากับ 900 โวลต์ ของ แบบจำลองที่ 1	55
4.3 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตร ต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	55
4.4 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อ นาทีของแบบจำลองที่ 1	56
4.5 แรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตร ต่อนาทีของแบบจำลองที่ 1	56
4.6 แรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตร ต่อนาทีของแบบจำลองที่ 1	57
4.7 แรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ลิตร ต่อนาทีของแบบจำลองที่ 1	58
4.8 แรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตร ต่อนาทีที่ระยะแกปเท่ากับ 5 มิลลิเมตรที่ระดับแหล่งดินแหล่งจ่ายต่างๆ ของ แบบจำลองที่1	58
4.9 ลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมาที่ระดับแรงดันต่างๆอัตราการไหลของแก๊ส เท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 การสร้างพลาสมาเหนือน้ำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด	60
4.11 การสร้างพลาสมาใต้น้ำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด	60
4.12 การสร้างพลาสมาเหนือน้ำโดยจ่ายไฟเข้าตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	61
4.13 (ก) การสร้างพลาสมาใต้น้ำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด	61
(ข) การสร้างพลาสมาใต้น้ำโดยจ่ายไฟขนานเข้าขั้วอิเล็กโทรดทุกเส้น	
4.14 แร่งดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ค่ากำลังไฟฟ้าในการสร้างพลาสมาค่าต่างๆ ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สค่าต่างๆ	64
4.15 เครื่อง T80 UV/VIS Spectrometer สำหรับใช้วัดค่าความเข้มข้นของน้ำสีขุ่น	68
4.16 (ก) ไชริงขนาด 10 มิลลิเมตร	69
(ข) คิวเวทที่ใส่น้ำที่ใช้ในการทดลอง	
4.17 ความเข้มข้นของน้ำสีขุ่นเมทิลีนบลู ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 292 นาโนเมตร	73
4.18 ค่าความเข้มข้นของน้ำสีขุ่นเมทิลีนบลู ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 664 นาโนเมตร	74
4.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีขุ่นปกติก่อนการบำบัด	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ปล่อยน้ำเสียในปริมาณมากออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมและไม่ผ่านการบำบัด ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาทิเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องอุปโภค บริโภค เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจไปที่อุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งจัดเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในระหว่างกระบวนการผลิตเป็นจำนวนถึงร้อยละ 26 จากน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหมด ซึ่งในปัจจุบันมีการบำบัดน้ำเสียอยู่หลากหลายวิธี เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ (onsite treatment) บ่อดักไขมัน (grease trap) ระบบระบายน้ำเสีย (sewerage system) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (constructed wetland) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge process) ระบบบำบัดน้ำเสียคลองวนเวียน (oxidation ditch) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (rotating biological contactor) เป็นต้น (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ, 2555)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอยู่หลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงได้เกิดงานวิจัยและการประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำมาเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอีกหนึ่งทางเลือก ซึ่งพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศ (atmospheric pressure non-thermal plasma) มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ สามารถสร้างขึ้นได้ ที่ความดันบรรยากาศและสูญญากาศ สามารถควบคุมขนาดและตำแหน่งของพลาสมาได้ตามต้องการ สามารถนำพลังงานไอออนไนเซชันของสารอื่นๆ มาทำปฏิกิริยากับน้ำเสียได้ อีกทั้ง พลาสมายังสามารถผลิตสารเรดิคัล (radical) ได้ เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) จากอิเล็กตรอน (e^-) และโพตอน (h^+) ที่เกิดจากกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส (photocatalysis) ที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความเป็นกรด (มีค่า $pH < 7$) หรือด่าง (มีค่า $pH > 7$) ของน้ำ ซึ่งนำมาช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้ และพลาสมายังสามารถผลิตแก๊สโอโซนที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าออกซิเจนในน้ำได้อีกด้วย (<http://ienergyguru.com/2015/plasma>, 2559)

ในปัจจุบัน ได้มีการนำพลาสมาอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์มากมายในชีวิตประจำวัน เช่น เลเซอร์พลาสมา ใช้ตัดชิ้นส่วนโลหะที่ต้องการได้ในทางอุตสาหกรรม พลาสมาในหลอดไฟฟลูออโรเรสเซนต์ หรือแม้กระทั่ง พลาสมาฆ่าเชื้อในอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด และสามารถปรับปรุงผิวหน้าวัสดุให้มีคุณสมบัติต่างๆ อาทิ เช่น การเพิ่มคุณสมบัติการทนทานต่อการขีดข่วนด้วยกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) หรือการ

เพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์พลาสมา (plasma polymerizations) เป็นต้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550)

โครงการวิจัยนี้ได้สนใจการนำเอาความรู้ทางพลาสมาอณูหุ้มีต่ำ มาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียอเมทิลินบลู โดยปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียอเมทิลินบลูที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และออกแบบแหล่งกำเนิดของพลาสมาให้เหมาะสมกับงานวิจัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการสร้างเครื่องมือต้นแบบเครื่องกำเนิดลำพลาสมาอณูหุ้มีต่ำที่สภาวะบรรยากาศ (atmospheric pressure non-thermal plasma) โดยจะทำการฉายพลาสมาในน้ำเสียอเมทิลินบลูเพื่อทำการเปรียบเทียบน้ำเสียอเมทิลินบลูก่อนฉายพลาสมา และหลังฉายพลาสมาด้วยวิธีการทางเคมี ในการทดลองได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดของพลาสมาและหาค่าพารามิเตอร์ แรงดันของแก๊ส และระยะห่างระหว่างขั้ว ซึ่งส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า กระแสดิสชาร์จ และแรงดันดิสชาร์จ ที่ส่งผลต่อการสร้างพลาสมาเพื่อทำการทดลองที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียอเมทิลินบลู เพื่อเป็นต้นแบบในการนำพลาสมาอณูหุ้มีต่ำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 สร้างแบบจำลองการกำเนิดลำพลาสมาอณูหุ้มีต่ำที่สภาวะบรรยากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการอิทธิพลของพลาสมาอณูหุ้มีต่ำที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียอเมทิลินบลู

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของโครงการ

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดอณูหุ้มีต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
- 1.3.2 ศึกษาผลจากการฉายพลาสมาอณูหุ้มีต่ำลงในน้ำเสียอเมทิลินบลู โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียอเมทิลินบลู และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียอเมทิลินบลู

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างพลาสมาอณูหุ้มีต่ำที่สภาวะต่างๆ
- 1.4.2 สามารถสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาอณูหุ้มีต่ำเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียอเมทิลินบลูได้
- 1.4.3 เป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจทำการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการนำพลาสมามาประยุกต์ใช้ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันด้านต่างๆ อาทิเช่น ด้านการแพทย์ ด้านโรงงานอุตสาหกรรม ด้านการถนอมอาหาร เป็นต้น ซึ่งโครงการวิจัยนี้ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองและการนำพลาสมาไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียอเมทิลีนบลูที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของพลาสมา และการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพลาสมากับน้ำเสียอเมทิลีนบลูที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550) โดยในบทนี้จะได้ทำการอธิบายหลักการพื้นฐานของพลาสมา ซึ่งประกอบไปด้วย การเบรกดาว์นของทาวว์เนนด์ กลไกการเบรกดาว์นของสตรีมเมอร์ กฎของพาสเซน รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่จะแสดงในหัวข้อต่อไป

2.1 พลาสมา

2.1.1 ความหมายพลาสมา

พลาสมาคือสถานะของสสารประกอบด้วยอนุภาคอิสระที่มีประจุ (free charged particle) โดยผ่านกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือบางครั้งอาจหมายถึงแก๊สที่แตกตัวเป็นไอออน (ionized gas) โดยการแตกตัวเป็นไอออนนั้นรวมถึงการที่อิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวถูกทำให้แยกตัวออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุลเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น อนุภาคมีประจุที่ได้จะเป็นอิสระโดยมีความเป็นประจุทางไฟฟ้าทำให้พลาสมานำไฟฟ้าได้ และตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์. 2551)

พลาสมาจัดเป็นสถานะที่สี่ของสสารประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก เช่น อิเล็กตรอน (electron) ไอออนบวก (positive ions) ไอออนลบ (negative ions) อนุภาคอิสระ (free radical) อะตอมแก๊ส (gas atom) โมเลกุล (molecules) ซึ่งพลาสมาสามารถเกิดได้ที่สภาวะความดันแก๊สต่ำที่ระบบสุญญากาศ และที่ความดันบรรยากาศ โดยทั่วไปการศึกษาระบบการเกี่ยวกับพลาสมาจะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิพลาสมา (plasma temperature) โดยจะกล่าวถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของอิเล็กตรอนหรือไอออนในพลาสมา และความหนาแน่นพลาสมา (plasma density) ซึ่งอุณหภูมิและความหนาแน่นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิดเช่นกัน เช่น แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ความดันแก๊ส ความเป็นสุญญากาศ ชนิดแก๊สที่ใช้สร้างพลาสมา เป็นต้น ถ้าต้องการทราบความหนาแน่นของพลาสมาสามารถคำนวณโดยใช้สมการพื้นฐานคือสมการของโบลต์zman (boltzmann's equation) จะมีการสัมพันธ์ด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า

พฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน (collective behavior) (ดร.จิราภรณ์ พงษ์โสภา และคณะ. 2558)

2.1.2 ชนิดของพลาสมา

พลาสมาสามารถแบ่งโดยใช้อุณหภูมิของพลาสมาเป็นเกณฑ์ได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูง (thermal plasma) และพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำหรือแบบไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal plasma)

2.1.2.1 พลาสมาอุณหภูมิสูง (thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ แก๊สดีสชาร์จแบบพลาสมาสภาวะสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e : electron temperature) จะมีค่าเท่ากับ อุณหภูมิของไอออน (T_i : ion temperature) และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแก๊ส (T_g : gas temperature) ($T_e = T_i = T_g$) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบอาร์คดีสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งจากการเกิด กระบวนการดีสชาร์จ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวก และขั้วลบสูงมากพอ ทำให้แก๊สบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอน ที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับ อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สด้วยความถี่สูงและรุนแรง เกิดการปล่อยประจุในลักษณะสปาร์ค (spark) ของ ประจุเป็นเส้นเล็กๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดัน และพลังงานสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้ความดันบรรยากาศ ซึ่งใช้ในการผลิตพลาสมาสเปร์ย์ หรือใช้ ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ

2.1.2.2 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (non-thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิต่ำ คือแก๊สดีสชาร์จแบบพลาสมาสภาวะไม่สมดุลทางความร้อน (Non-thermal equilibrium) โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e : Electron temperature) จะมีค่า มากกว่าอุณหภูมิของแก๊ส (T_g : Gas temperature) และอุณหภูมิของไอออน (T_i : ion temperature) ($T_e > T_i = T_g$) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharges) เป็นการสร้างพลาสมา ที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อน เป็นการลดความดันแก๊สในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลง โดยเกิดอยู่ที่ประมาณ 0.001-10 ทอร์ แต่ที่ความดันบรรยากาศก็สามารถสร้างพลาสมาอุณหภูมิต่ำได้เช่นเดียวกัน โดยการใช้ กฎแห่งความคล้ายคลึงกัน (similarity law) ของพาเซเน เนื่องจากอุณหภูมิของไอออนจะมีค่าต่ำแต่ อิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมาก ไอออนจึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่าย การที่อิเล็กตรอน มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจากกระบวนการดีสชาร์จเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวก และขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วน แตกตัวและกลายเป็นประจุบวก อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไป ชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า

กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำลงมาทำให้เกิดแสงสว่าง นิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (etching) หรือการทำฟิล์มบาง (thin film) เป็นต้น (อัจฉราภรณ์ บุญมา. 2556)

2.1.3 หลักการสร้างพลาสมา

พลาสมาสามารถเกิดได้โดย แก๊สที่เป็นกลางไหลผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก แก๊สที่เป็นกลางจะมีสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดเป็นพลาสมาในที่สุด (ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์. 2551)

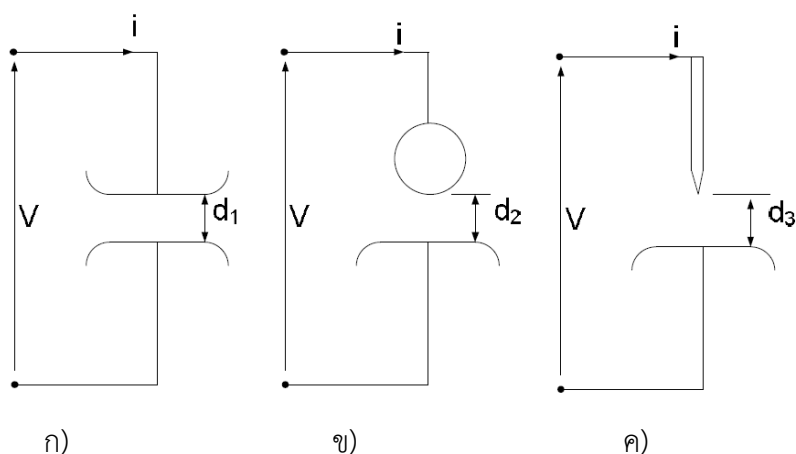
2.2 สนามไฟฟ้า (electric field)

2.2.1 ความหมายของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึงปริมาณที่ใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุภายในบริเวณโดยรอบตามจุดต่างๆ ซึ่งบริเวณสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าต้นกำเนิดสนามจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้า คือนิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ต่อเมตร พิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ก หรือ วาบไฟ หรือ เบรกดาวนผ่านฉนวนโดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างดีนั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกดาวน ถ้าฉนวนนั้นเป็นแก๊ส ฉนวนนั้นเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าไป และคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงพอจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสีสภาพการฉนวนของแก๊สนั้นไม่เป็นแบบถาวร คือ เสีสภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากเกิดเบรกดาวนแล้วสภาพการฉนวนจะเสีไปอย่างถาวรส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสีสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากเบรกดาวน หรือ สปาร์ก ได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นแก๊ส

2.2.2 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า

โดยทั่วไป ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยที่สนามไฟฟ้าแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly non-uniform field)
- ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field)

ที่มา: ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศ ดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนจะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1 d_2 และ d_3 ให้เท่ากัน ซึ่งฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่จะกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแพ็คเกจต่างๆ หลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ฯลฯ

2.2.2.1 ลักษณะอิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากัน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่องระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.1 ก) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (2.1)$$

E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์ต่อเมตร)

U คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด (โวลต์)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1

2.2.2.2 ลักษณะอิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

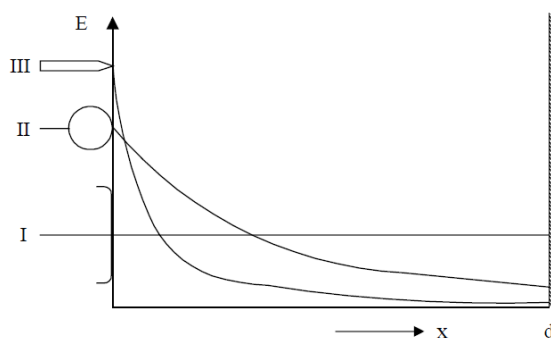
อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอนี้将有ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แต่ละจุดมีค่าที่ต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ซึ่งความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอนี้ จะคำนวณได้จากสมการ 2.2

ในกรณีอิเล็กโทรดแบบความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยค่า η^* จะมีค่า

$$0.4 < \eta^* \leq 0.8$$

ในกรณีอิเล็กโทรดแบบความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยสูง η^* จะมีค่า

$$0.1 < \eta^* \leq 0.3$$



รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ที่มา: ดร.สำราญ สังข์สะอาด. (2549)

จากรูปที่ 2.2 ในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่บริเวณที่ผิวของอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น บริเวณปลายแหลม เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้ว เบรกดาวน์จะยังไม่เกิดแต่จะเกิดโคโรนา บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดซึ่งเป็นบริเวณมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟาลดลงและไม่เกิดโคโรนา ส่วนกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดโคโรนาเรียกว่ากระแสโคโรนา ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้จากสมการที่ 2.2

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.2)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์ต่อเมตร)

U_i คือ แรงดันที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์)

โดยสมการนี้สามารถคำนวณหาแรงดันโคโรนา (inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด) ค่าแรงดันนี้จึงอาจเขียนในรูปของสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.3)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์ต่อเมตร)

v_i คือ แรงดันที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์)

สามารถสรุปได้ คือ ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าของ $U_b > U_i$ และ $E_b > E_i$ โดยที่ U_b คือแรงดันเบรกดาวน์ และ E_b คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์

2.3 เงื่อนไขการชนเกิดไอออนในเซชัน

อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า (E) ในขณะที่วิ่งเข้าหาขั้วแอโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับนี้จากสนามไฟฟ้านี้ มากกว่าพลังงานไอออนในเซชันของโมเลกุลของแก๊ส แต่ถ้าหากพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออนได้ อาจจะทำให้โมเลกุลที่ถูกชน (แบบไม่ยืดหยุ่น) นั้นอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้นได้ ในการทดลองได้สนใจเงื่อนไขโฟโตไอออนในเซชัน และเทอร์มัลไอออนในเซชัน

2.3.1 โฟโตไอออนในเซชัน (photo ionization)

เมื่ออะตอมได้รับพลังงานจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากนิวเคลียส และป้อนพลังงานให้อะตอมมากขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนแยกตัวห่างออกไปมากขึ้นทำให้วงโคจรมีรัศมีมากขึ้น เมื่ออะตอมอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น พลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้นเพียง 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาทีเท่านั้นแล้วอะตอมก็กลับสู่สภาพต้นปกติ และขณะเดียวกันก็ปล่อยพลังงานที่ได้รับมาในตอนแรกออกไปในรูปของโฟตอน (photon) และเมื่อโฟตอนวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลางอาจทำให้ตื่นกระตุ้นหรือไอออนในเซชันได้ดังนี้คือ

$$hv \leq wi \quad (2.1)$$

หรือ
$$hv - wi = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ	$f = \frac{c}{\lambda}$	เป็นความถี่ของโฟตอน (เฮิร์ต)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (มีค่าเท่ากับ 6.6257×10^{-24} จูลวินาที)
	c	คือ ความเร็วของแสง (มีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที)
	λ	คือ ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
	m	คือ มวลของอิเล็กตรอน (กรัม)
	wi	คือ พลังงานไอออนในเซชัน = $e\phi$ (กิโลจูลต่อโมล)
	v	คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน (เมตรต่อวินาที)
	vi	คือ แรงแดันไอออนในเซชัน
	hv	คือ พลังงานควอนตัม

เมื่ออะตอมได้รับโฟตอนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์สองอย่างคือ

2.3.1.1 กระตุ้นให้อะตอมมีระดับพลังงานที่สูงขึ้น (higher energy state)

2.3.1.2 การแตกตัวของอิเล็กตรอน (direct ionization)

กรณีกลับกันอะตอมหรือโมเลกุลรวมตัวกับอิเล็กตรอนหรือกรณีการลดระดับพลังงานจะทำให้เกิดการคายโฟตอนออกมาเขียนได้ดังสมการ



กรณีที่พลังงานควอนตัมน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน เมื่อชนกันกับอะตอมให้อะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A เป็นอะตอมที่ถูกอิเล็กตรอนที่มีความเร็วหรือมีพลังงาน KE ชน A* เป็นอะตอมที่มีระดับพลังงานสูงขึ้นเมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอน อะตอมที่ A* จะกลับคืนสู่สภาพภายในเวลา $10^{-7} - 10^{-10}$ วินาที

กรณีที่พลังงานควอนตัมมากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน อะตอม A* จะคายพลังงานโฟตอนซึ่งอาจจะไอออไนซ์อะตอมอื่นซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าโฟตอน พลังงานนี้จะส่งเสริมให้อะตอมปล่อยอิเล็กตรอนออกมาดังสมการ



2.3.2 การไอออไนเซชันที่เกิดจากอุณหภูมิ (thermal ionization) เป็นการไอออไนซ์อะตอม ไอออไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้จาก

2.3.2.1 ไอออไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุลหรืออะตอม เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความเร็วสูง ทำให้เกิดไอออไนเซชัน

2.3.2.2 แก๊สร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมา และเกิดโฟตอนไอออไนเซชันขึ้นได้

2.3.2.3 การชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง จากข้อที่กล่าวมา

การเกิดไอออไนเซชันด้วยพลังงานจลน์ที่ได้จากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศ เป็นไปได้ยาก ไอออไนเซชันแบบเทอร์มัลจะเป็นผลสืบเนื่องจากโฟตอน ไอออไนเซชันเกิดที่อุณหภูมิสูง หรือจากอิเล็กตรอนชนโมเลกุล เมื่อโมเลกุลที่อยู่ในสภาพถูกกระตุ้นปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา ในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (ground state) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม พลังงานโฟตอนตกลงบนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา และเป็นส่วนช่วยในการเพิ่มอิเล็กตรอนอิสระจนนำไปสู่การไอออไนเซชันโมเลกุลที่อยู่ในเมตาสเตเบิล (meta stable) อาจแพร่กระจายกลับไปหาแคโทดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งไปกระทบแคโทด (<http://www.oocities.org/thana755/index2.html>)

2.4 การดิสชาร์จ

2.4.1 การดิสชาร์จในแก๊ส

การดิสชาร์จ เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ในลักษณะการเบรกดาวนหรืออาร์ค ซึ่งเกิดแก๊สได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น หลอดไฟบรรจุแก๊ส หลอดเรืองแสง หลอดป้องกันแรงดันเกิน หลอดไดโอด เป็นต้น

2.4.2 การดิสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ส

ดิสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ส อาจแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เบรกดาวนแบบสมบูรณ์ และ เบรกดาวนเพียงบางส่วน

2.4.2.1 เบรกดาวนแบบสมบูรณ์ (complete breakdown)

เบรกดาวนแบบสมบูรณ์ หมายถึงการเกิด เบรกดาวนตลอดแก๊ส เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้วัสดุฉนวนเสียหาย การเป็นฉนวนโดยสิ้นเชิง แรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโทรดจะมีค่าน้อย และมีกระแสสูงมากไหลตามแนวที่เกิดเบรกดาวนซึ่งค่ากระแสเบรกดาวนนี้ขึ้นอยู่กับวงจรไฟฟ้า เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนสมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกดาวน (breakdown voltage) การเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ ยังอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดได้เป็น 2 แบบ คือ

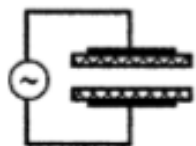
(1) เบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) เกิดขึ้นในแก๊ปที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสูง หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย คือจะไม่มีโคโรนาหรือดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ เมื่อได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที

(2) เบรกดาวน์แบบโคโรนา (corona breakdown) เกิดขึ้นในแก๊ปที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง คือจะมีโคโรนาหรือดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ ค่าแรงดัน โคโรนาเริ่มเกิดสามารถคำนวณได้ แรงดันเบรกดาวน์โคโรนามีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและคำนวณไม่ได้

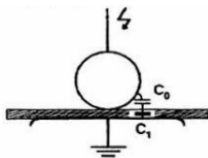
2.4.2.2 เบรกดาวน์เพียงบางส่วน (partial breakdown)

เบรกดาวน์เพียงบางส่วน (partial breakdown) หรือเบรกดาวน์ไม่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นกับ ระบบฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง เบรกดาวน์เพียงบางส่วนจะเกิดก่อนเบรกดาวน์สมบูรณ์ โดยเป็นการเกิดไอออนในแก๊ปเพียงบางส่วน เช่น ดิสชาร์จแบบโคโรนา เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์บางส่วนว่า แรงดันเริ่มเกิด (inception voltage) ดิสชาร์จแบบบางส่วน หมายถึง การดิสชาร์จเพียงบางส่วนในแก๊ปที่เป็นแก๊สเบรกดาวน์ระหว่างอิเล็กโทรดยังเชื่อมโยงไม่ถึงกัน อาจแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

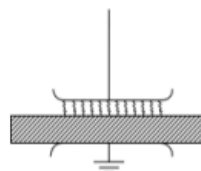
- (1) โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge) ดังรูปที่ a)
- (2) ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge) ดังรูปที่ b)
- (3) ดิสชาร์จภายใน (internal discharge) ดังรูปที่ c)



a).โคโรนาดิสชาร์จ



b).ดิสชาร์จตามผิว



c).ดิสชาร์จภายใน

รูปที่ 2.3 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแบบต่างๆ

- a. โคโรนาดิสชาร์จ เกิดที่ปลายอิเล็กโทรดในอากาศ
- b. ดิสชาร์จตามผิว เกิดขึ้นที่ผิวฉนวนแข็งคั่นระหว่างอิเล็กโทรดวางผ่านแก๊ส
- c. ดิสชาร์จภายใน เกิดขึ้นจากชั้นรอยต่อระหว่างฉนวนมีค่าความซึมซาบผ่านต่างกัน

ที่มา: ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549)

(1) โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge)

โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบๆ อิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆ บริเวณนั้นเกิดไอออนเซชัน

(2) ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)

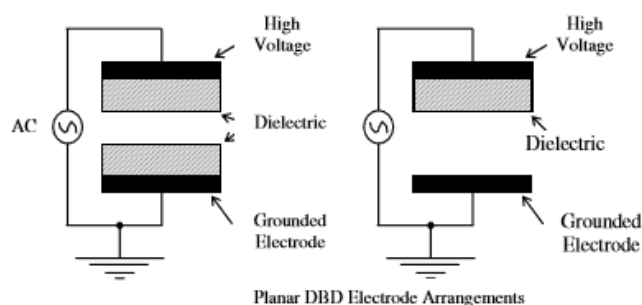
ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับแก๊ส หรือของแข็งกับ ของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนกับตัวนำสายปลายสายเคเบิล หรือดิสชาร์จภายนอกกระทบเข้ากับฉนวนซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูง พอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวนจ์ทะเล่ได้เช่นแผ่นคั่นระหว่างอิเล็กโทรด หรือปลอกฉนวนนำสาย

(3) ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (internal discharge)

ดิสชาร์จบางส่วนภายในหมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่ซึ่งมี โพรงหรือฟองแก๊ส หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าความซึมซาบผ่าน ต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก อันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากกราฟวิเคราะห์ที่มีความซึมซาบผ่าน ต่างกันวางซ้อนกัน

2.4.3 การดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge)

การดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge) คือ การดิสชาร์จทางไฟฟ้าระหว่างสองขั้วไฟฟ้าแยกจากกันโดยมีฉนวนไดอิเล็กทริกกั้น แต่เดิมเรียกว่าไซเลนต์ดิสชาร์จ (silent discharge) หรือการดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทั่วไปของการดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge) ที่บริเวณการเกิดดิสชาร์จถูกปกคลุมไปด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนกั้นเส้นระหว่างอิเล็กโทรด และอิเล็กโทรดเป็นเส้นใยดิสชาร์จซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

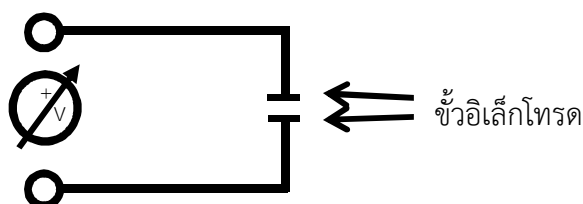


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของการดิสชาร์จข้ามฉนวน

ที่มา: Vijay Nehra; et al. (1989)

2.5 กลไกการเบรกดาวน์ (Breakdown mechanisms)

การเกิดเบรกดาวน์ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าคือเป็นช่วงต่อระหว่าง สถานภาพที่กระแสไหลประทั่งตัวเองไม่ได้ (non self-sustained) ไปสู่สถานภาพที่กระแสไหลประทั่งตัวเอง ได้ (self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในอิเล็กโตรดมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออน มากพอจนทำให้อิเล็กโตรดมีสภาพนำไฟฟ้าสูง ซึ่งวงจรทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.5 อิเล็กโตรดแผ่นระนาบวางขนานกันในอากาศ

2.5.1 ผลของขั้วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น

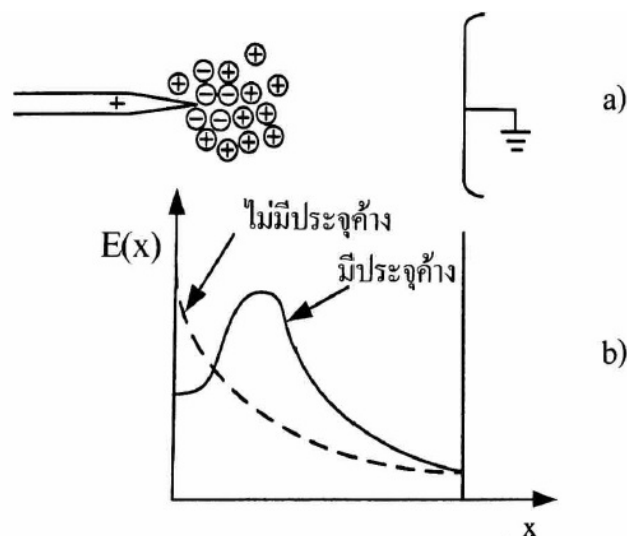
แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแก๊ป ถ้าอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันเบรกดาวน์โดยตรง กล่าวคือ เมื่อในแก๊ปได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที ในกรณีของแก๊ปที่สนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกดาวน์แบบโคโรนาคความดันแก๊สต่ำกว่าความดันวิกฤต แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด จะเกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และแบบไม่สมมาตร แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขั้วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าขั้วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการจะเกิดเบรกดาวน์ได้นั้น จะต้องมียุติกรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ ตามกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้นตัวอย่างเช่น แก๊ปของอิเล็กโตรดแท่งกับแผ่นระนาบ ถ้าที่แท่งเป็นขั้วลบ อิเล็กโตรนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายแท่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีโอกาสเกิดไอออนในเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถ สร้างอะวาลานซ์วิกฤตของอิเล็กโตรนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้าแท่งเป็นขั้วบวก อิเล็กโตรน เริ่มต้นจะต้องเริ่มในแก๊ปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดแท่งไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤตเพื่อให้อิเล็กโตรนมีโอกาสสร้างอิเล็กโตรนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวน วิกฤตได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับระยะวิกฤตตามเงื่อนไขการเบรกดาวน์ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ แต่ที่ระยะวิกฤตจากปลายแท่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออนในเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยากหรือเป็นไปไม่ได้ ถ้าจะให้เกิดไอออนในเซชัน ที่ระยะวิกฤตได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวน์ได้ต้องป้อน แรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบจึงต่ำกว่าของ ขั้วบวก

2.5.2 ประจุก้างมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนต่างขั้ว

ประจุก้างเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง เป็นผลให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและผลของประจุก้างทำให้แรงดันเบรกดาวนของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรกดาวนโดยตรง กล่าวคือแรงดันเบรกดาวนหรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขั้วลบจะต่ำกว่าขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุก้างทำให้แรงดันเบรกดาวนขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC AC และอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงของขั้วอิเล็กโทรดแบบไม่สมมาตร เช่น ปลายแหลมกับแผ่นระนาบ ทั้งนี้การอ้างอิงถึงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบ หมายถึงขั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

2.5.2.1 ปลายแหลมขั้วบวก

ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบ ดังรูป 2.6 เมื่อแรงดันสูงถึงค่าโคโรนาเริ่มเกิด แก๊สในปริมาตรของแก๊ปจะเกิดไอออนในเซชันรอบๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาไอออน คือปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าทิศเข้าหาคาโทดคือ แผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น ประจุก้างไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนหนึ่งว่าทำให้อิเล็กโทรดยาวขึ้น เมื่อระยะแกปสั้นลงและเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าแกปเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ประจุก้างทำให้แรงดันเบรกดาวนขั้วบวกต่ำลง

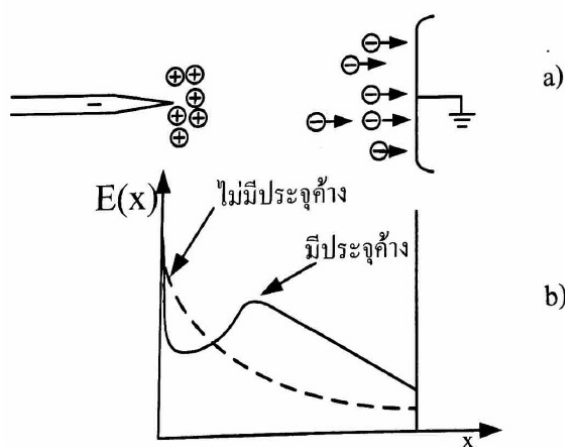


รูปที่ 2.6 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจากผลของประจุก้างปลายแหลมขั้วบวก

ที่มา: ดร.สำราญ สังข์สะอาด. (2549)

2.5.2.2 ปลายแหลมข้าวลบ

ปลายแหลมเป็นข้าวลบตามรูปที่ 2.7 อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนไนเซชันเคลื่อนที่ไปหา ระบายแอโนด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนเกาะตัวบนโมเลกุลได้และรวมตัว เป็นกลางที่แอโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาหาแคโทดปลายแหลม จะค้างอยู่บริเวณหน้า ปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้น แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอก ประจุค้างกับแอโนดจะกลับสม่าเสมอดีขึ้นเนื่องจากประจุค้าง จึงทำให้เบรกดาวนียากขึ้น ฉะนั้นผลของ ประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.7 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจากผลของประจุค้างปลายแหลมข้าวลบ

ที่มา: ดร.สำราญ สังข์สะอาด. (2549)

ผลของประจุค้างขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ป้อนแรงดันคงอยู่ ฉะนั้นแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบ กระแสตรง (DC) และอิมพัลส์ จะสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบ ส่วนในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ความถี่ต่ำนั้น ค่าแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบจะสูงกว่าแบบสวิตชิ่งยาวลบบเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าช่วงของสนามไฟฟ้า ที่อิเล็กโทรดแห่งจะกลับไปกลับมาอยู่ตลอดเวลา คือผลของประจุค้างมีทั้งยาวลบบและยาวลบบ ซึ่งผลประจุ ค้างยาวลบบ ทำให้เกิดเบรกดาวนี่ยาวลบบได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบจึงต่ำกว่า เมื่อเป็นกระแสสลับเบรกดาวนี่ยาวลบบ จึง ขึ้นบน ค่ายอดคาบยาวลบบเสียก่อนเสมอ

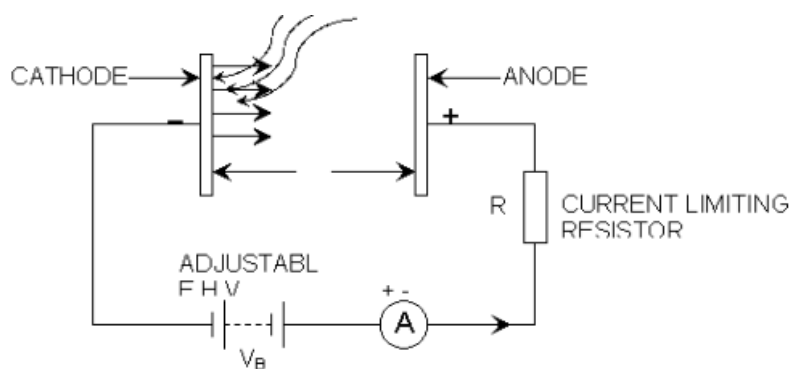
2.5.3 ผลของรูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration)

รูปลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าว่า เป็นแบบสม่าเสมอ ไม่สม่าเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่าเสมอมาก ซึ่งกำหนดด้วยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่าเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้น คือค่าแรงดันเบรกดาวนี่ยาวลบบ กล่าวคือ เมื่ออะวาลานซ์วิฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิด เบรกดาวนี่ยาวลบบทันที โดยไม่มีโคโรนาก่อนเกิดเบรกดาวนี่ยาวลบบ เป็นเบรกดาวนี่ยาวลบบโดยตรง

ในปัจจุบันทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิกฤต หรือกลไกการเกิดเบรกดาว์นมีอยู่ สองทฤษฎี คือ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาว์นของทาว์นเซนต์ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาว์นแบบสตรีมเมอร์ (ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549))

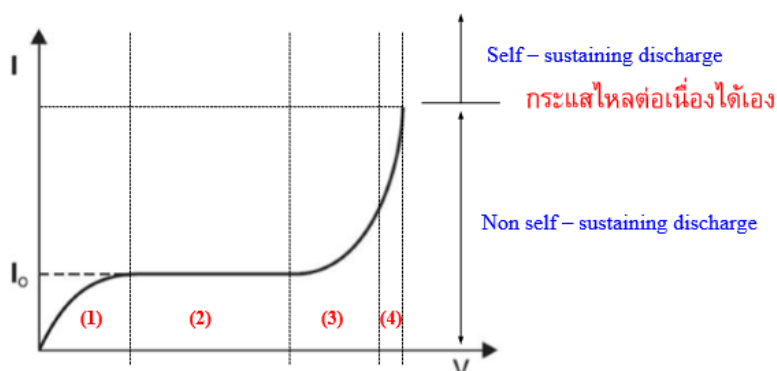
2.5.4 กลไกการเบรกดาว์นของทาว์นเซนต์

พลาสมาจะเกิดขึ้นตามทฤษฎีกลไกการเบรกดาว์นของทาว์นเซนต์ การเบรกดาว์นในแก๊สเกิดขึ้นจากการไอออไนเซชันในขั้นต้น (primary process หรือ α - process) และการไอออไนเซชันในขั้นสอง (secondary process หรือ β - process) ซึ่งได้จากการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนในแก๊ส โดยไอออนบวกชนโมเลกุลของแก๊ส แต่กระบวนการนี้ไม่ก่อให้เกิดการเบรกดาว์นในแก๊ส กระบวนการที่ก่อให้เกิดการเบรกดาว์นคือการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทด (γ - process) ดังทฤษฎีกลไกของทาว์นเซนต์ จะได้ศึกษาจากวงจรในรูปที่ 2.8 (ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549))



รูปที่ 2.8 วงจรการทดลองของทาว์นเซนต์

ที่มา: <http://www.oocities.org/thana755/index2.html>



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์จนเกิดการเบรกดาวน์
ที่มา: Piyadanai Pachanapan. (2556)

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายได้ว่า

ช่วงที่ 1 กระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันที่ป้อน

ช่วงที่ 2 กระแสอิ่มตัวที่ค่า I_0 แม้จะเพิ่มแรงดัน (ความเครียดสนามไฟฟ้า) สูงขึ้น กระแสก็
จะไม่เพิ่ม เพราะอิเล็กตรอนอิสระจากขั้วแคโทดวิ่งไปหาขั้วแอโนดทั้งหมด (ไม่มีการชนเกิดขึ้นมาก)

ช่วงที่ 3 กระแสจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนอิสระจากขั้วแคโทด
วิ่งชนโมเลกุลและอะตอมที่เป็นกลาง ระหว่างเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนดด้วยความเร่งจะทำให้เกิดการแตกตัว
ให้อิออนและอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมาก

ช่วงที่ 4 กระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นที่ผิวแคโทดเนื่องจาก
ไอออนประจุบวกในแก๊สวิ่งไปชนผิวแคโทด

การเบรกดาวน์เกิดจากกระบวนการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็น แบบทวีคูณซึ่งเกิดจาก
กระบวนการไอออนไนเซชัน 2 ขั้นตอน

2.5.4.1 กระบวนการขั้นต้น (α - process)

อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้วิ่งไปหาขั้วแอโนด เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า
สม่ำเสมอ และพลังงานจลน์จะสูงขึ้นจนเกิดการไอออนไนเซชัน เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของแก๊สจะทำ
ให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลที่เป็นกลาง และที่เหลือเป็นไอออนบวก จนเกิดเป็นกลุ่มก้อนประจุ
(Avalanche) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และสมการที่ 2.6-2.8

$$n_x = n_o e^{\alpha x} \quad (2.6)$$

เมื่อ n_o แทนจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดต่อวินาที (s)
 n_x แทนจำนวนอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดที่ระยะทาง x จำนวนอิเล็กตรอนวิ่งไปถึงขั้วแอโนด (x=d) ต่อวินาที (s)

$$n_d = n_o e^{\alpha d} \quad (2.7)$$

อิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนใหม่ให้มีจำนวนเท่ากับไอออนบวกที่เกิดขึ้น $e^{\alpha x} - 1$ เขียนในเทอมกระแสได้ว่า

$$I = I_o e^{\alpha d} \quad (2.8)$$

จากสมการจะเห็นว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอกซโพเนนเชียล ซึ่งแสดงว่าถ้ามีอิเล็กตรอนจำนวน n_o ต่อวินาที ออกจากแคโทด จะมีอิเล็กตรอน n_x ตัว วิ่งเข้าสู่แอโนด

2.5.4.2 กระบวนการชั้นสองแบบ β (β - process)

กระบวนการ β เป็นกระบวนการชั้นที่สอง ที่อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นจากไอออนบวก มีพลังงานสูงวิ่งเข้ามาชนโมเลกุล ทำให้เกิดไอออนเซชันในแก๊ส แต่เนื่องจากกระบวนการ β มีโอกาสเกิดอิเล็กตรอนอิสระยาก กระบวนการนี้จึงไม่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในแก๊สได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแก๊สที่มีความดัน ด้วยเหตุผลดังนี้

1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนเซชันในแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่า แต่โอกาสเกิดน้อยมาก

2) ถ้ากลไกการไอออนเซชันตามกระบวนการ β เป็นส่วนทำให้เกิดเบรกดาวน โลหะผิวของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวน แต่ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า เวิร์กฟังก์ชันของโลหะที่ทำแคโทดมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวน

3) กลไกการเบรกดาวนตามกระบวนการ β ต้องใช้เวลาเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแกปมากกว่าเวลาเกิดเบรกดาวนที่วัดได้

ฉะนั้นกระบวนการชั้นสองมีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอน เพื่อทำให้เกิดเบรกดาวน จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทด (γ) ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่สอดคล้องด้วยเหตุผลข้อ 1) และ 2) ข้างต้น

2.5.4.3 กระบวนการชั้นสองแบบ γ (γ - process)

กระบวนการนี้เกิดจากไอออนบวกวิ่งชนแคโทดจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นทีละคน เกิดเป็นสมการดังนี้

ถ้าให้ γ เป็นจำนวนอิเล็กตรอนเกิดที่แคโทดต่ออิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เกิดกระบวนการขึ้นต้นต่อการไอออนหนึ่งครั้ง

- n_0 จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดต่อวินาที
- n_0' จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการชั้นสองตอนเริ่มต้น
- n_0'' จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดต่อวินาที

ดังนั้น
(2.9)

$$n_0'' = n_0 + n_0'$$

อิเล็กตรอนจะชนไอออนเมื่อวิ่งออกจากขั้วแคโทดเป็นจำนวน $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งคือ

$$n_o' = \gamma n_o'' (e^{\alpha d} - 1)$$

จากสมการที่ 2.9 แทนค่า n_o' จะได้

$$n_o'' = n_o + \gamma n_o'' (e^{\alpha d} - 1)$$

$$n_o'' = \frac{n_o}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.10)$$

จะได้จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงขั้วแอโนด

$$n_d = n_o'' e^{\alpha d}$$

แทนค่า n_o'' จากสมการที่ 2.10 จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงขั้วแอโนด คือ

$$n_d = \frac{n_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.11)$$

ค่ากระแสในจะช่วง สภาวะอยู่ตัว (steady State)

$$I = \frac{I_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 ถ้าเทอม $\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1$ ตามทฤษฎีกระแสจะมีค่าเป็นอนันต์

กรณีที่ $\gamma e^{\alpha x} < 1$ จะไม่เกิดกระบวนการ α คือ กระแสดีสชาร์จจะเป็นแบบประทุงตัวเองไม่ได้ (Non-Self-Sustained Discharge) กระแสจะหยุดไหลเมื่อเอาแหล่งจ่ายไฟฟ้าออก

กรณีที่ $\gamma e^{\alpha x} = 1$ กระแสดีสชาร์จแบบนี้จะเป็นแบบประทุงตัวเองได้ (Self-sustained discharge) ถ้าเอาแหล่งจ่ายไฟออกกระแสก็ยังคงไหลต่อไป จำนวนไอออน $e^{\alpha x}$ ทำให้เกิดกลุ่มก้อนประจุ จุดนี้จะเป็นจุดการเบรกดาวน

กรณีที่ $\gamma e^{\alpha x} > 1$ จะเกิดกระแสดีสชาร์จอย่างรวดเร็วช่วงนี้กระแสจะไหลอย่างมากมาย (ดร.สำรวจ สังข์สะอาด. 2549.)

2.5.5 กฎของพาสเซน (Paschen's Law)

จากทฤษฎีการเบรกดาวนของทาวน์เซนต์ (Townsend breakdown theory) ทฤษฎีพาสเซนได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของความดันก๊าซ (p) กับระยะห่างแคป (d) ของอิเล็กโตรดกับแรงดันเบรกดาวนไว้ว่า ค่าแรงดันเบรกดาวนจะอยู่ในฟังก์ชันของผลคูณ p.d เท่านั้น แต่กฎของพาสเซนไม่สามารถใช้กับแก๊สความดันสูงได้ ดังสมการ

$$v_s = f(pd) \quad (2.13)$$

จากการเบรกดาวนของพาสเซนจะได้สมการว่า

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.14)$$

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) = K = \text{ค่าคงตัว}$$

ค่า Γ ที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ $\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$ สัมประสิทธิ์ไอออนในเซชัน α มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า E ดังสมการ

เอา p.d คูณตลอด;

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.15)$$

$$\alpha d = p.d.f\left(\frac{E}{p}\right)$$

โดยสนามไฟฟ้ามีค่า

$$E = \frac{v}{d} \quad (2.16)$$

$$\alpha d = p.d.f\left(\frac{U}{p.d}\right) = K \quad (2.17)$$

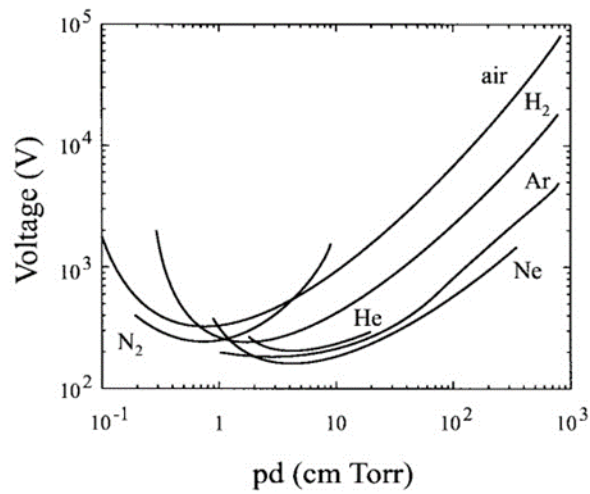
สามารถเขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$\tan \theta = \frac{\alpha / p}{E / p}$$

แต่ $U = E.d$

$$\therefore \tan \theta = \frac{\alpha \cdot d}{U} \quad (2.18)$$

จากกฎของพาสเชนการหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นสำหรับช่วงที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ สำหรับอากาศ ไนโตรเจน ฮีเลียม นีออน อาร์กอนและไฮโดรเจน แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์กับผลคูณของความดันและระยะห่างขั้วไฟฟ้า

ที่มา: eestaff.kku.ac.th/~amnat/HVLectureNote/HV-5.doc

จากสมการที่ 2.15 จะได้ว่า

$$\alpha = p \cdot A \cdot e^{\frac{-B \cdot p \cdot d}{U}} \quad (2.19)$$

จากเงื่อนไขเบรกดาวน์สมการที่ 2.18 เขียนได้ว่า

$$p \cdot A \cdot e^{\frac{-B \cdot p \cdot d}{U}} = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

ให้ $U = V_b$ จะได้

$$V_b = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} \quad (2.20)$$

โดยที่ A และ B เป็นค่าคงตัวของแต่ละแก๊ส

เมื่อทราบค่า Γ ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} จากสมการที่ 2.20 จะสามารถหาค่า U_b และค่า U_b จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ p.d ที่ p.d ต่ำมากๆ

ตารางที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุดของแก๊สชนิดต่างๆ

แก๊ส	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน (V_b) (โวลต์)	ผลคูณของความดันกับระยะห่างขั้วไฟฟ้า ($p \cdot d$) (มิลลิเมตรปรอทเซนติเมตร)
อากาศ	327	0.567
อาร์กอน	137	0.9
ไฮโดรเจน	273	1.15
ฮีเลียม	156	4.0
คาร์บอนไดออกไซด์	420	0.51
ไนโตรเจนไดออกไซด์	418	0.5
ออกซิเจน	450	0.7
ซิลเฟอร์ไดออกไซด์	457	0.33
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	414	0.6

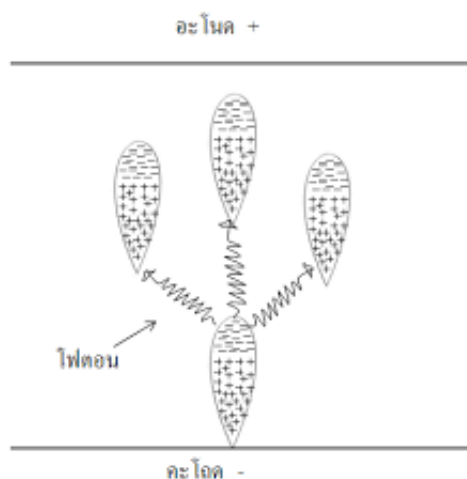
ที่มา: <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HV-5.doc>

ดังนั้นเมื่อค่าความหนาแน่นของแก๊สสูงส่งผลให้เกิดอัตราการชนที่สูง ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความหนาแน่นของแก๊ส โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนั้นเคลื่อนที่ไปทางขั้วแอโนดและมีการชนกันเกิดขึ้น ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดพลาสมาได้ศึกษาและนำหลักการกฎของพาสเซนรวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแก๊สดีสชาร์จ มาช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้แรงดันเบรกดาวนที่เหมาะสม คือการกำหนดระยะห่างของขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดรวมไปถึงความดันแก๊สที่ใช้ในการทดลองให้มีความเหมาะสม

(<http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HV-5.doc>)

2.5.6 กลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์

หลังจากเกิดกระบวนการขึ้นต้น จะเกิดกลุ่มก้อนประจุขึ้น มีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน (photoionization) ค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกิดจากกลุ่มประจุค้างที่ส่วนหัวของกลุ่มก้อนประจุ จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันมากขึ้นและความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการเบรกดาวนขึ้น เรียกว่า สตรีมเมอร์เบรกดาวน (streamer breakdown) การเสนอกฎการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์บวในปี ค.ศ. 1940 ทฤษฎีนี้ถูกคิดค้นโดยมีค (Meek) และโลบ (Loeb) และในเวลาเดียวกันเรเธอร์ (Rather) นำเสนอการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ลบ ทั้งยังสามารถอธิบายเกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของกลุ่มก้อนประจุ และประจุค้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2549)



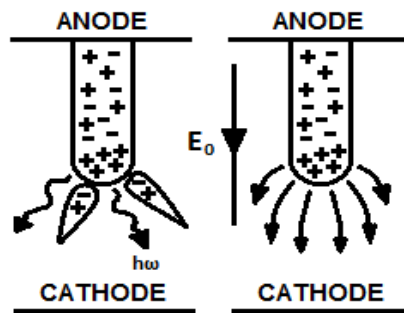
รูปที่ 2.11 กลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์

ที่มา: ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549)

จากรูปกลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์นี้ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- 1) กลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์บวโดยมีคและโลบ
- 2) กลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ลบโดยเรเธอร์

2.5.3.1. มีค (Meek) และโลบ (Loeb) กล่าวไว้ว่า สตรีมเมอร์เกิดขึ้นเมื่อสนามเนื่องจากประจุค้างไอออนบวกมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การดิสชาร์จแบบสตรีมเมอร์บวก

ที่มา: ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549)

เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวในแนวรัศมีของกลุ่มก้อนประจุ (E_r) และความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน (E) มีค่าเท่ากัน คือ

$$E_r = \frac{4eae^{\alpha x}}{\sqrt[3]{\frac{2Dx}{V}}} = \frac{4eae^{\alpha x}}{\sqrt[3]{\frac{2Dx}{kE}}} \quad (2.21)$$

รัศมีของหัวของกลุ่มก้อนประจุที่มีความยาว x หาได้จากสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย คือ

$$r = \sqrt{2Dt}$$

$$t = \frac{x}{v} = \frac{x}{kE} \quad (2.22)$$

- โดยที่
- x ความยาวของกลุ่มก้อนประจุในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 - e ประจุอิเล็กตรอน
 - D สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
 - k สภาพเคลื่อนไหลของอิเล็กตรอน
 - v ความเร็วการถอยกลับของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

แทนค่า D/k จะได้

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \alpha e^{\alpha x} \sqrt{\frac{p}{x}} \quad (2.23)$$

2.5.3.2 กลไกการเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ลอบ

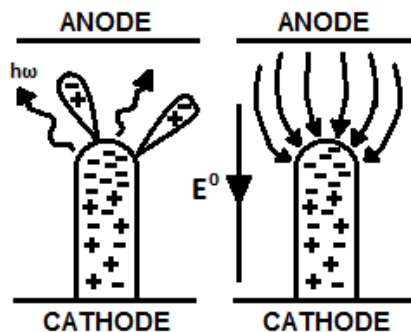
เรเธอร์ (Rather) กล่าวไว้ว่า สตรีมเมอร์เกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวก $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^8 ตัวโดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สหรือความดันแก๊สหรือความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

$$E_r = \frac{e \Sigma^{\alpha x}}{4 \pi r^2 k} r k \quad (2.24)$$

r คือรัศมีของอะวาลานซ์

k คือสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ

อิเล็กตรอนจากกลุ่มก้อนประจุนี้ เกิดจากโฟโตไอออไนเซชัน ค่า αx จาก $e^{\alpha x}$ ที่จะทำให้เกิดกลุ่มก้อนประจุประมาณ 10^8 ในสตรีมเมอร์การเบรกดาวนแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การดีสชาร์จแบบสตรีมเมอร์ลอบ

ที่มา: ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549)

ในปัจจุบันพลาสมาอุณหภูมิต่ำนี้ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน เช่น งานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ งานโลหะการ การรักษาทางการแพทย์ การถนอมอาหาร ซึ่งในงานโครงการนี้ได้สนใจการนำเอาความรู้ทางพลาสมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียอเนกเมทิลีนบลูจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยปรับปรุงสีและคุณภาพของน้ำเสียให้ดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างเครื่องมือต้นแบบเครื่องกำเนิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศ (atmospheric pressure plasma jet) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด โดยจะได้ทำการฉายลำพลาสมาในน้ำเสียอเนกเมทิลีนบลู เพื่อทำการทดสอบว่าพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศสามารถลดค่าความเข้มข้นและปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียอเนกเมทิลีนบลู

2.6 น้ำ (water)

น้ำ (water) เป็นสารประกอบเคมีชนิดหนึ่ง มีสูตรเคมีคือ H_2O โมเลกุลของน้ำประกอบด้วย ออกซิเจน 1 อะตอมและไฮโดรเจน 2 อะตอมเชื่อมติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ น้ำสามารถเป็นได้ 3 สถานะ คือ ของแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ของเหลวที่อุณหภูมิห้องและแก๊สที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

2.6.1 ประเภทของน้ำเสีย

น้ำเสียที่เกิดขึ้นในชุมชนต่างๆ ถ้าแบ่งตามลักษณะแหล่งกำเนิดแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.6.1.1 น้ำเสียจากชุมชน (domestic sewage) น้ำเสียประเภทนี้โดยทั่วไปแล้วมาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ น้ำเสียที่เกิดจากการขับถ่ายอุจจาระ และ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมอื่นๆ เช่น การประกอบอาหาร การล้างภาชนะและอุปกรณ์ การชำระร่างกายหรือกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ น้ำเสียจากชุมชนนี้ส่วนมากจะมีสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (organic matters) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

2.6.1.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (industrial wastewater) เป็นน้ำที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ในการผลิต เช่น น้ำเสียจากกระบวนการล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักร น้ำเสียจากโรงงานแต่ละโรงหรืออุตสาหกรรมแต่ละประเภท จะมีลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกัน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสิ่งสกปรกต่างๆ เจือปนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์

2.6.1.3 น้ำเสียจากการเกษตร (agricultural wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลี้ยงสัตว์ที่มีลักษณะเป็นอุตสาหกรรม น้ำเสียประเภทนี้จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำและใช้ปุ๋ยตลอดจนสารเคมีต่างๆ

2.6.1.4 น้ำเสียที่เกิดจากน้ำฝน (storm sewage) ได้แก่ น้ำฝนที่ตกลงมาและไหลไปตามพื้นดิน น้ำเสียประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องผ่านระบบการบำบัดแต่อย่างไร สามารถปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตาม หากน้ำดังกล่าวเกิดการชะล้างสิ่งสกปรก ก็อาจทำให้เป็นปัญหาต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้เช่นเดียวกับน้ำเสียชนิดอื่นๆ

2.6.2 ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสียแบ่งออกได้ 3 ด้าน คือ ด้านกายภาพ ด้านเคมี และด้านชีวภาพ โดยโครงการนี้ได้ทำการทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยกรปรับสภาพทางเคมีและชีวภาพ จึงจะกล่าวถึงเพียงลักษณะทางเคมี และลักษณะทางชีวภาพ

2.6.2.1 ลักษณะของน้ำเสียทางเคมี

ลักษณะของน้ำทางเคมีดังต่อไปนี้ ถ้ามีในน้ำปริมาณมากหรือน้อยเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดจะทำให้เกิดน้ำเสีย

(1) บีโอดี (biochemical oxygen demanded: BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายแบคทีเรียในเวลา 5 วัน โดยที่สารอินทรีย์อุณหภูมิตั้งที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าบีโอดี ให้เป็นตัวกำหนดขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียได้ เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

(2) ซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ค่าซีโอดีมีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้ง การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย เช่นเดียวกับค่าบีโอดี

(3) แก๊สต่างๆที่ละลายในน้ำ ปริมาณแก๊สออกซิเจน (O_2) ละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO) เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำ โดยทั่วไปต้องมีค่ามากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าดีโอ เป็นตัวชี้ถึงปฏิกิริยาทางชีววิทยาในน้ำ การละลายของออกซิเจนขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดัน สิ่งเจือปนในน้ำ เช่น เกลือชนิดต่าง ๆ (กัณฐกรีย์ ศรีพงษ์พันธุ์. 2540)

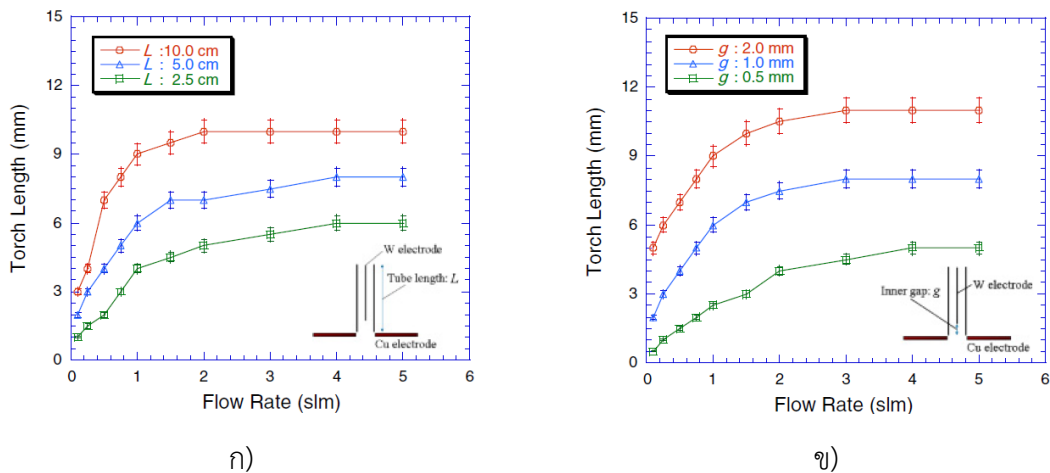
2.7 สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ สารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากแล้วสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทั่วไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ (reactive dye) สีเอซิด (acid dye) สีเบสิก (basic or cationic dye) สีไตรงิเรกต์ (direct dye) สีแว๊ต (vat dye) และสีดีสเพอร์ส (disperse dye) เป็นต้น ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้วยังลดอัตราการนำเข้าของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ (ณัฐวุฒิ; และภูมิชาย. 2555)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการนี้ได้สนใจเกี่ยวกับการนำเอาพลาสมามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอให้ดีขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะพูดถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ลำพลาสมา แรงดันแก๊ส ชนิดของแก๊ส ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า แรงดันกระแสที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหรือแคป มีความสำคัญต่องานวิจัยเล่มนี้เป็นอย่างมาก จึงได้หาข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งต่างๆ เพื่อนำมาใช้ประกอบการทดลอง ดังจะได้กล่าวต่อไป

ในปี ค.ศ. 2008 แจกยู ชอย (Jaegu CHOI) และคณะ ได้ศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับพลาสมา โดยทำการทดลองเพื่อหาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความยาวของลำพลาสมา ซึ่งสรุปได้ว่าความยาวของลำพลาสมา ขึ้นอยู่กับ แรงดันแก๊ส ชนิดของแก๊ส ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า แรงดัน กระแสที่แคป ระยะแคประหว่างลวดตัวนำกับปลายหลอด ความยาวของหลอดทดลอง ดังรูปที่ 2.14

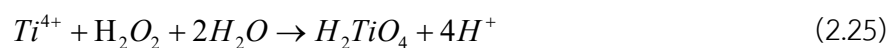


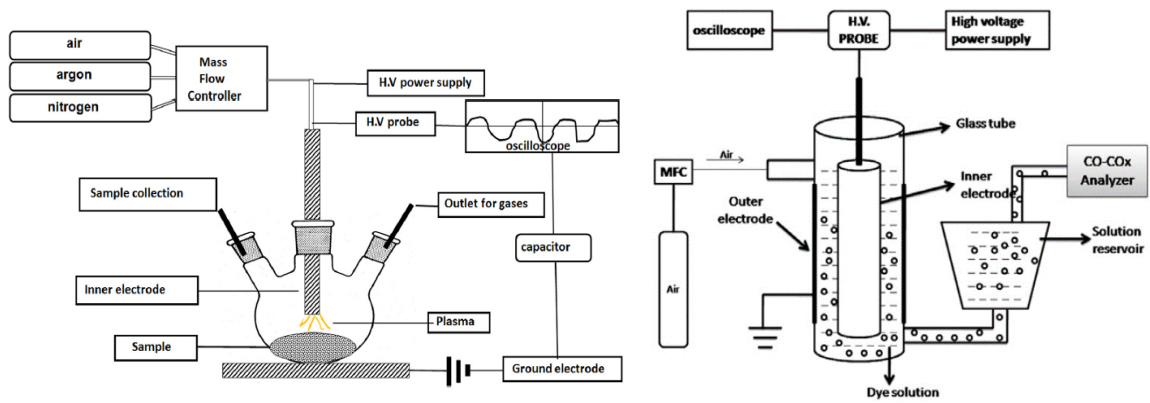
รูปที่ 2.14 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับความยาวของลำพลาสมาที่สภาวะความยาวของหลอดต่างกัน
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับความยาวของลำพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำกับปลายหลอด

ที่มา: Jaegu CHOI; et al. (2008)

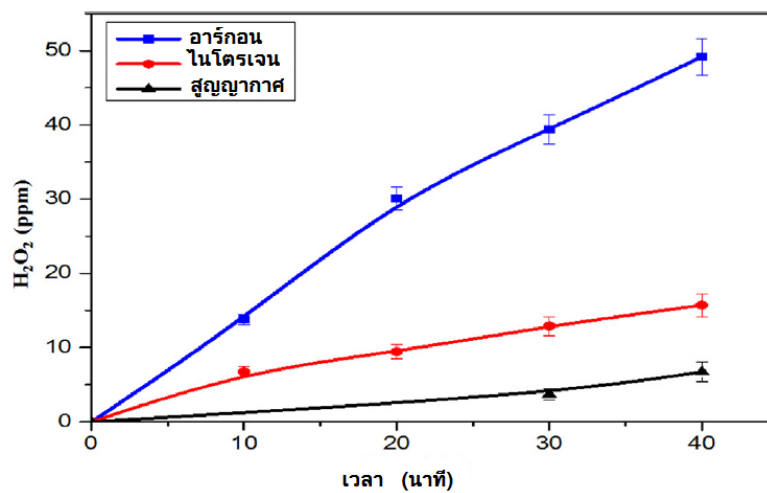
จะพบว่า ความยาวของหลอดทดลองที่มากขึ้นมีผลทำให้ลำพลาสมายาวขึ้น แจกยู ซอย (Jaegu CHOI) และคณะ ได้กล่าวอีกว่าการทดลองสามารถบอกได้ว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมาในสภาวะที่อยู่ใต้น้ำกับเหนือน้ำมีการกำหนดค่าที่ไม่แตกต่างกัน เพราะการกำหนดค่าส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊ส (Jaegu CHOI; et al. (2008))

ในปี ค.ศ. 2015 จันดนา (L. Chandana) และคณะได้ทำการศึกษาและทำการทดลองโดยใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำไปบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยมีแบบจำลองดังรูปที่ 2.15 ซึ่งแบบจำลองมีลักษณะเป็นพลาสมาเจ็ทแบบหัวเดียว จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงได้ข้อสรุปว่า อาร์กอนพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบลำพลาสมาเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีมลพิษอยู่ในน้ำเสีย ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่ากลุ่มอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นตัวหลักที่ช่วยในการย่อยสลายสีย้อม โดยอาร์กอนพลาสมาเป็นตัวสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เมื่อทำการเติมไทเทเนียมซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไปในปฏิกิริยา ไทเทเนียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (ดังสมการที่ 2.25)





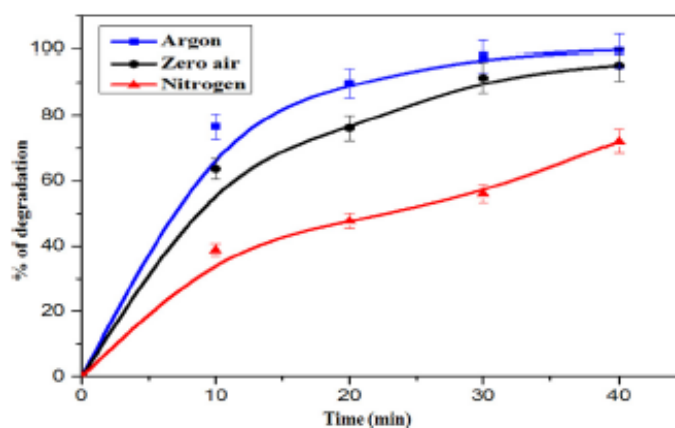
รูปที่ 2.15 ลักษณะแบบจำลองของงานวิจัยของจันดนา
ที่มา: L. Chandana; et al. (2015)



รูปที่ 2.16 ปริมาณ H_2O_2 ที่เกิดขึ้นจากแก๊สชนิดต่างๆ
ที่มา: L. Chandana; et al. (2015)

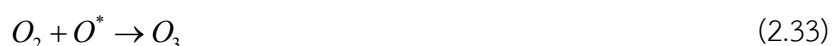
จากรูปที่ 2.16 แสดงปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ผลิตจากแก๊สแต่ละชนิด และเกิดขึ้นในระหว่างการปล่อยพลาสมา สังเกตเห็นได้ว่า เมื่อ 40 นาทีแรก อาร์กอนสามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 50 ppm ในขณะที่ไนโตรเจนและสูญญากาศ ผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้ 16 ppm และ 7 ppm ตามลำดับ อาจจะเป็นเพราะอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมามีความหนาแน่นมากจึงทำให้มีพลังงานสูงและมีค่าช่วงชีวิตอาร์กอนยาวนาน (1.25×10^9 ปี) เมื่อถูกกระตุ้นทำให้การถ่ายโอนพลังงานของค่าช่วงชีวิตอาร์กอนที่ถูกกระตุ้นและโมเลกุลของน้ำที่ก่อตัวสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) นั้นมีความง่ายขึ้น (สมการที่ 2.26 และ 2.27) และสมการที่ 2.28 แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถทำปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ตและเปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลได้ สมการที่ 2.29 เป็นปฏิกิริยาแข่งขัน (competition reaction) (คือปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นหนึ่งตัวไปทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอีกสองตัวในเวลาเดียวกันและได้ผลิตภัณฑ์ออกมาสองตัว)

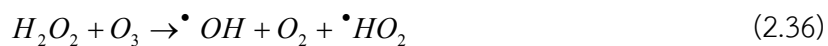
ระหว่างไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) กับไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) และไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) กับไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในสารละลายที่เป็นน้ำ ดังแสดงในรูป 2.18 ที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ก่อตัวเพิ่มขึ้นตามฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดลงของสารเมทิลีนบลูกับเวลาที่ใช้บำบัด
ที่มา: L. Chandana; et al. (2015)

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นการสลายตัวของเมทิลีนสีฟ้าจากพลาสมาโดยมีประสิทธิภาพการย่อยสลาย คืออาร์กอนสลายได้มากกว่าสุญญากาศและมากกว่าไนโตรเจน อาจจะเป็นเพราะว่า ส่วนประกอบของอาร์กอนและไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญที่ช่วยในการย่อยสลาย (สมการที่ 2.37 – 2.40) และสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ออกซิเจนได้ ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สหลักที่ใช้งานได้น้อยกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) (สมการที่ 2.31 – 2.35) ซึ่งถ้าอาร์กอนพลาสมาจะแสดงให้เห็นการย่อยสลายที่มากถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งย่อยสลายภายใน 40 นาที ในขณะที่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ทดลองในสุญญากาศและไนโตรเจนย่อยสลายที่ 99 เปอร์เซ็นต์และ 89 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 70 นาทีซึ่ง อาจเกิดจากปฏิกิริยาแข่งขัน (competition reaction) ระหว่างโมเลกุลของ NO_x และเมทิลีนสีฟ้าที่มีพันธะเคมีกลุ่มไฮดรอกซิลโดยพันธะเคมีกลุ่มไฮดรอกซิลนี้อาจถูกดูดกลืนโดย NO_x (สมการที่ 2.36) เมื่อเทียบกับอาร์กอน ซึ่งอิเล็กตรอนพลังงานสูงในพลาสมาที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) ในเฟสแก๊สและ H_2O ในน้ำ โดยปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นอาจสรุปได้ดังนี้ (L. Chandana; et al. 2015)





ที่มา: L. Chandana; et al. (2015)

ในปี ค.ศ.2015 อวเรียมและคณะได้ศึกษากระบวนการย่อยสลายสีย้อม AB25 ด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลการทดลองดังนี้ จากการทดลองพบแก๊สที่เกิดขึ้นโดยแก๊สนั้นเป็นอะตอมของออกซิเจน ไฮดรอกซิลเรดิคอลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในอินเตอร์เฟซระหว่างพลาสมากับน้ำระบุไว้ดังต่อไปนี้





เมื่อสร้างอาร์กอนพลาสมา ไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถผลิตผ่านการกระตุ้นน้ำ (H₂O) ด้วยอะตอมอาร์กอนที่ถูกกระตุ้น กล่าวคือน้ำจะทำปฏิกิริยากับอาร์กอนที่ถูกกระตุ้นซึ่งเป็นผลทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลงสมการที่ 2.46



ผู้เขียนหลายคนได้ศึกษาอิทธิพลของแก๊สสถานะบรรยากาศในการกำจัดฟินอลโดยปล่อยกระแสไฟฟ้า สรุปได้ว่าการทดลองนี้ใช้อาร์กอนในการผลิตออกซิเจนอะตอมและไอโซน โดยมีไฮดรอกซิลเรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวหลักที่ใช้ในการย่อยสลายมลพิษ

2.8.1 การใช้พลาสมาในการกำจัดโดยปราศจากไทเทเนียมไดออกไซด์

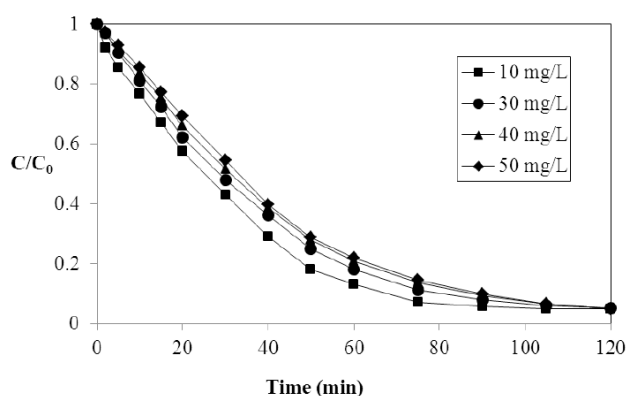
2.8.1.1 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น

ผลของความเข้มข้นที่ต่างกันของสีย้อมตั้งแต่ 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการย่อยสลายสีย้อม AB25 ด้วยพลาสมาและตรวจสอบด้วยการวัดจลนพลศาสตร์ของสีย้อม AB25 ที่ทำการย่อยสลายตัวอย่างทั่วไปของจลนพลศาสตร์แสดงดังรูปที่ 2.17 ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของสีกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการบำบัดที่มีค่าแตกต่างกันของสีย้อมที่ค่าคงที่ 6.7 สำหรับการย่อยสลายทุกความเข้มข้นของสีย้อม AB25 สังเกตได้ระหว่างการทำบำบัดซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริyajลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพของพลาสมาจะถูกคำนวณเป็นอัตราเริ่มต้นของการย่อยสลาย AB25 อัตราการย่อยสลายครั้งแรก

$\frac{dC_{H_2O_2}}{dt}$ ที่ระดับความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 10, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คำนวณเป็น 0.573 0.664 0.224 และ 0.723 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ตามผลการทดลอง อัตราการย่อยสลายเบื้องต้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสีย้อมซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่อธิบายไว้โดยผู้วิจัยท่านอื่นๆ

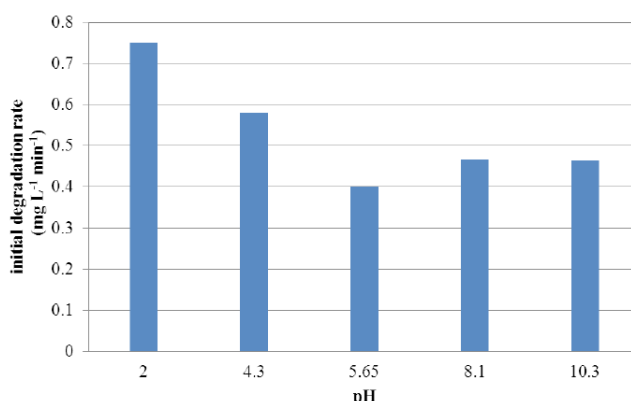
2.8.1.2 ผลของค่าพีเอช

การย่อยสลายของ AB25 ด้วยพลาสมากระแสดตรงโดยความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการศึกษาความเป็นกรด-เบสจาก 2 ถึง 10.3 ซึ่งอัตราการลดลงของค่าความเป็นกรด-เบส อัตราการย่อยสลาย AB25 ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสเป็นอย่างมาก อัตราการย่อยสลายในการแก้ปัญหาที่เป็นกรดสูง (2-4.3) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ปริมาณการย่อยสลายอยู่ที่ 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตรนาที่ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่าง (2-5.65) พบว่าอัตราการย่อยสลายสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.9 เพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีผลกระทบต่อความโค้งค่า ยูวี/วีไอเอส ของสีย้อม AB25 การทดลองเพิ่มเติมมีการดำเนินการได้ผลลัพธ์เพื่อเป็นการบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของการแก้ปัญหาไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2-10.3 ซึ่งหมายความว่า การย่อยสลายนั้นทำได้เร็วขึ้นในสภาพที่เป็นกรดแก่ซึ่งอาจมีความเกี่ยวข้องกับโปรตอนของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3^{2-}) การเพิ่มขึ้นของอัตราการย่อยสลายอาจจะเกิดจากคุณสมบัติของสีย้อม



รูปที่ 2.18 การย่อยสลายสีย้อม AB25 ด้วยอาร์กอนพลาสมาที่ความเข้มข้นของสีย้อมต่างกัน

ที่มา: Houria Ghodbane; et al. (2015)



รูปที่ 2.19 อัตราการย่อยสลายเริ่มต้นที่ค่าพีเอชต่างๆ

ที่มา: Houria Ghodbane; et al. (2015)

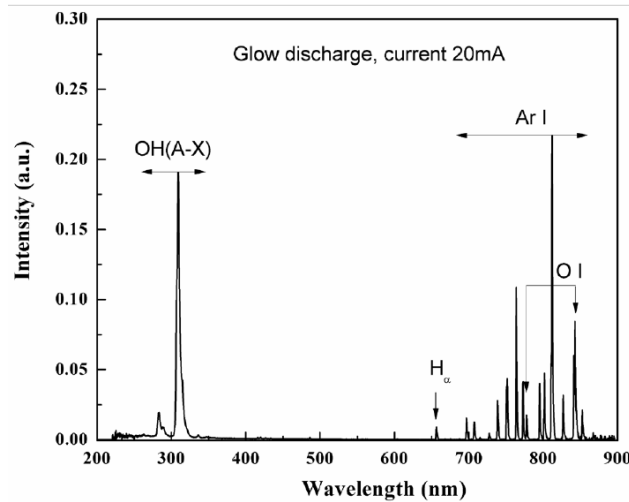
2.8.2 กระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาพลาสมา

การรวมกันระหว่างพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยาถือว่าเป็นวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพ ในการย่อยสลายของอินทรีย์สารมลพิษในของเหลวและเป็นการลดต้นทุนด้านพลังงานของกระบวนการ ในปัจจุบันได้ศึกษาการรวมตัวกันระหว่างพลาสมาอุณหภูมิต่ำด้วยไฟฟ้ากระแสตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการย่อยสลายสีย้อม AB25 พลาสมาดังกล่าวนี้เป็นแหล่งกำเนิดของโฟตอนรังสียูวีเป็นส่วนใหญ่ เพราะการเกิดพันธะของไฮดรอกไซด์ไอออนในช่วง 286-315 นาโนเมตร ที่แสดงในการปล่อยสเปกตรัมที่ค่ากระแสเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ดังรูปที่ 2.20 โฟตอนของรังสียูวีสามารถทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ทำงานได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรรวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง แรงกระตุ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ธรรมชาติของสาร ฯลฯ ในบางงานวิจัยจะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มโหนดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากกว่าค่าที่ดีที่สุดจะมีผลต่อการกระตุ้นพื้นผิวที่สัมผัสกับรังสียูวีซึ่งจะช่วยป้องกันแสงกระตุ้นจากการเข้าถึงและอื่นๆทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง

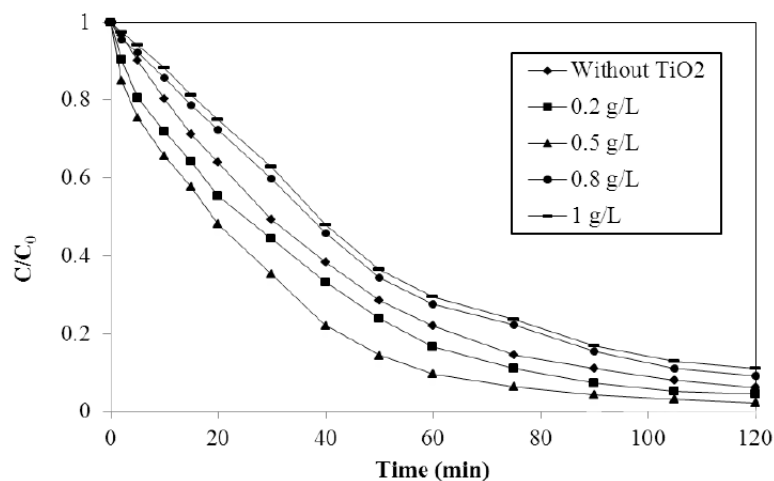
2.8.2.1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไทเทเนียมไดออกไซด์

การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะนำเดินการโดยเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับสีย้อม AB25 กระบวนการย่อยสลายด้วยพารามิเตอร์อื่นๆคงที่ รูปที่ 2.21 หมายถึงลดความเข้มข้นของสีย้อม AB25 $\frac{C}{C_0}$ กับ $C_0 = 20$ มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0-1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความแตกต่างของค่า $\frac{C}{C_0}$ หลังจากผ่านไป 120 นาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.20 สำหรับสีย้อม AB25 ถูกย่อยสลายด้วยค่า $C_0 = 30$ มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรณีที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อธิบายได้ว่าควบคุมการปล่อยพลังงานมีค่าเท่ากับ 2-5 % และสังเกตความแตกต่างอยู่ในขีดจำกัดของความผิดพลาดของการทดลอง ผลแสดงในเห็นว่าการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าความเข้มข้นของสีย้อม

จะลดลงเหลือ 0.5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการย่อยสลาย 90% จะใช้เวลาในการบำบัดอยู่ที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งการย่อยสลายโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพเพียง 78% นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นที่สูงกว่า 0.5 กรัมต่อลิตร จะมีผลต่อการย่อยสลายการเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นจะนำไปสู่การแก้ปัญหาในเรื่องการลดพิษสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นไปได้ยากและทำให้ประสิทธิภาพการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



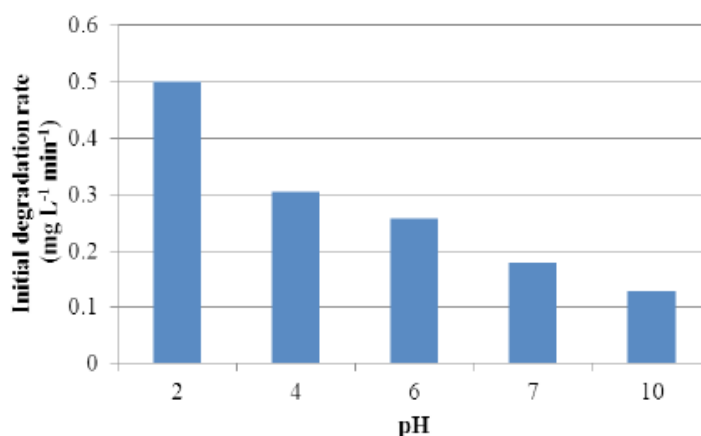
รูปที่ 2.20 สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาที่สภาวะบรรยากาศที่กระแส 20 มิลลิแอมแปร์
ที่มา: Houria Ghodbane; et al. (2015)



รูปที่ 2.21 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลาย AB25 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ TiO_2 ต่างกัน
ที่มา: Houria Ghodbane; et al. (2015)

2.8.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

การทดลองนี้ได้รับการดำเนินการที่ค่าความเป็นกรด-ด่างโดยการผสมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) การย่อยสลายสีย้อม AB25 ด้วยพลาสมาไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเพิ่มขึ้นที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีลดลงตามทีค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10 ลักษณะการทำงานจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อม AB25 สูงขึ้นในสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูง ซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้ทีเฉพาะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ซึ่งอาจจะเป็นที่น่าพอใจสำหรับการทำงานที่สภาวะบรรยากาศมากกว่าที่อาร์กอนเพราะในช่วงของการย่อยสลายในอาร์กอนจะมีกรดไนตริก (HNO_3) ซึ่งทำให้เกิดกรดไนตรัส (HNO_2) ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงและอื่นๆ



รูปที่ 2.22 อัตราการย่อยสลายเริ่มต้นของสีย้อม AB25 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ
ที่มา: Houria Ghodbane, et al. (2015)

งานวิจัยข้างต้นนำพลาสมามาย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อม AB25 ได้ผลคือพลาสมาสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อม AB25 ได้ดีในระดับหนึ่ง แสดงว่าพลาสมาสามารถสร้างสารบางอย่างที่ทำให้อะตอมของสีย้อมนั้นเปลี่ยนไป โดยงานวิจัยนี้จะนำพลาสมาทำการย่อยสลายสีย้อมแอคทีฟเรดซึ่งเป็นสีที่สามารถย่อยสลายได้ยากและจะใช้พลาสมาประเภทพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (non-thermal plasma) แบบลำพลาสมา มาใช้ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด และในบทถัดไป จะกล่าวถึงหลักการออกแบบแบบจำลองที่ใช้สำหรับสร้างพลาสมา วิธีการสร้างพลาสมา อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างพลาสมา วิธีการวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ ค่ากระแสที่ไหลในวงจรและการดำเนินการเบื้องต้น

จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ทราบว่าพลาสมาสามารถผลิตสารเรดิคอลที่มีประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย และสามารถปรับค่าความเป็นกรด-ด่างได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียออมเมทิลีนบลูโดยการสร้างอาร์กอนพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศได้น้ำ เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียออมเมทิลีนบลู จากการทดลองของจินดนานั้นเป็นการนำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศมาบำบัดน้ำเสียออมเมทิลีนบลู โดยทำการฉายพลาสมาเหนือผิวน้ำ ซึ่งมีแบบจำลองดังรูปที่ 2.15 และตรวจวัดค่าความเข้มข้นของออมเมทิลีนบลูที่ค่าความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศมาบำบัดน้ำเสียออมเมทิลีนบลู เช่นเดียวกับงานวิจัยของจินดนา แต่ลักษณะของแบบจำลองของงานวิจัยนี้เป็นรูปทรงกระบอก ขั้วแอโนดใช้เป็นเส้นลวดสแตนเลสจำนวน 6 เส้น เส้นลวดแต่ละเส้นปลายมีลักษณะแหลมเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าชนิดอื่น ๆ นั้นจะสามารถสร้างพลาสมาได้ง่าย ซึ่งอาจทำให้พลาสมาทำปฏิกิริยากับน้ำเสียออมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น และงานวิจัยนี้จะวัดค่าความเข้มข้นของน้ำเสียออมเมทิลีนบลูในช่วงความยาวคลื่น 292 นาโนเมตร และ 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีของออมเมทิลีนบลู และศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียออมเมทิลีนบลูเมื่อพลาสมาทำปฏิกิริยากับน้ำเสียออมเมทิลีนบลู

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการสร้างพลาสมา การออกแบบแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง และออกแบบการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

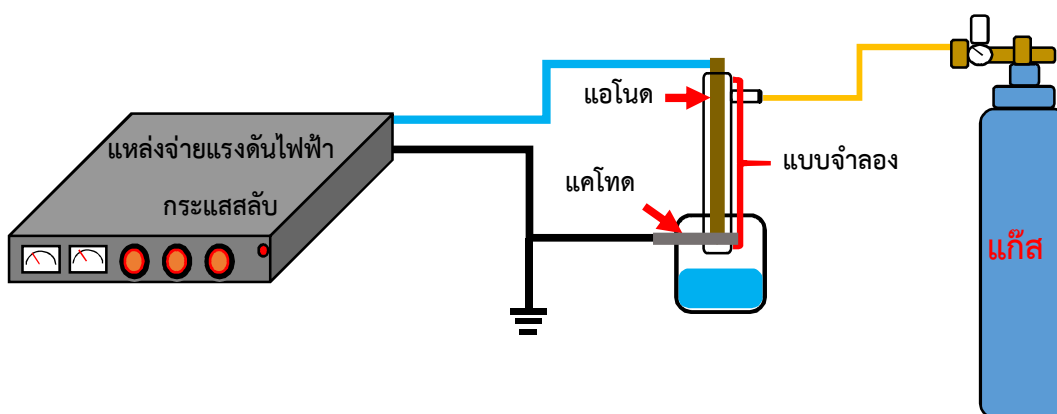
3.1 การออกแบบการสร้างพลาสมา

3.1.1 ความต้องการในการออกแบบ

เป้าหมายในการวิจัยนี้เพื่อออกแบบการสร้างพลาสมาโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

3.1.2 รายละเอียดในการออกแบบ

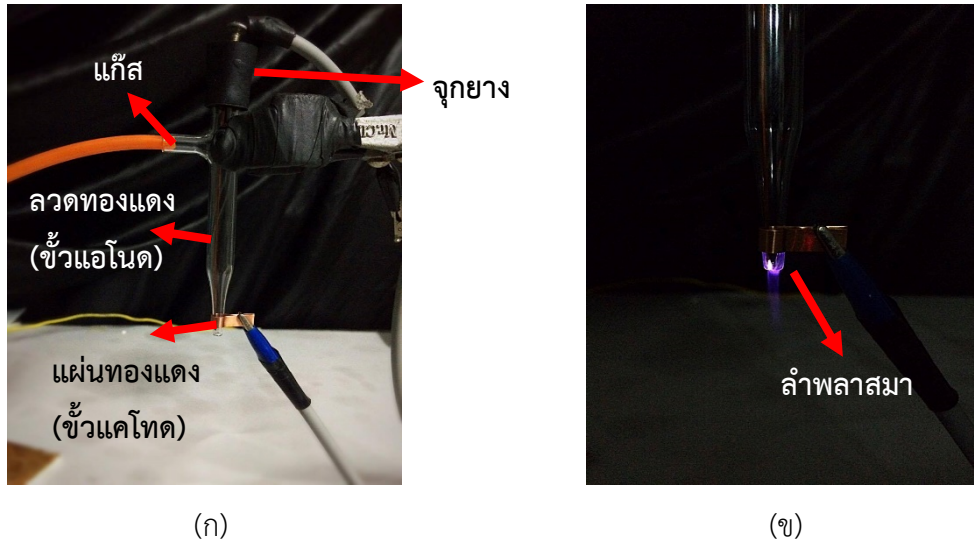
ในการออกแบบกระบวนการสร้างพลาสมาที่ได้ออกแบบจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง เป็นตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กโทรดในตัวแบบจำลองเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าปริมาณมากให้แก่แก๊สที่เป็นกลางโดยใช้แก๊สอาร์กอนและทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) จนกลายเป็นพลาสมา โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแคโทดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การต่อวงจรเพื่อสร้างพลาสมาของแบบจำลองที่ 1

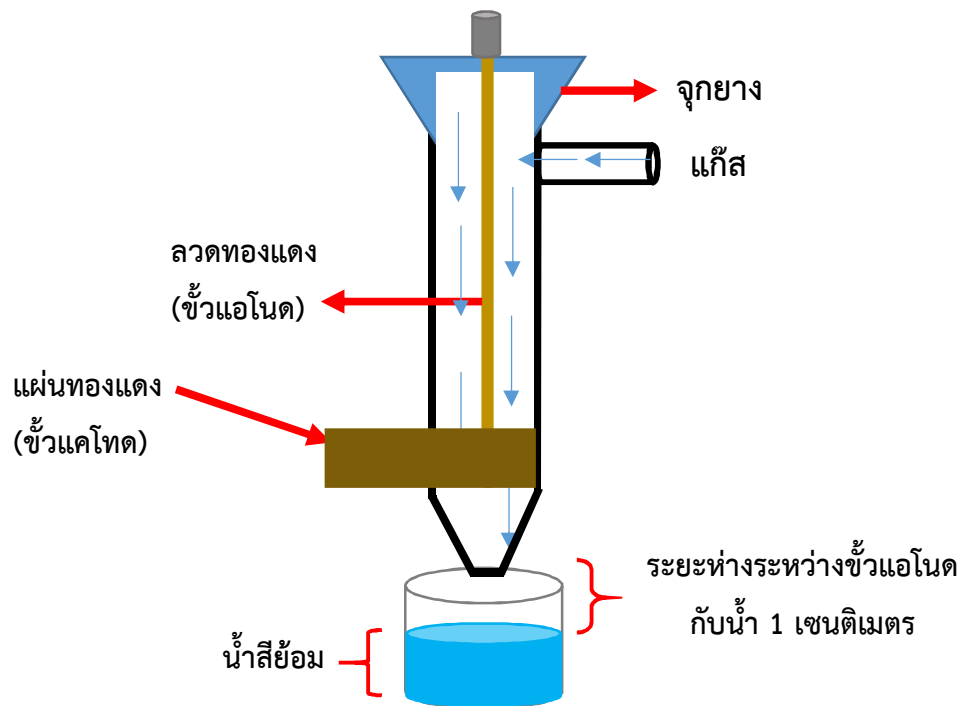
แบบจำลองการแบบที่ 1 สร้างพลาสมาแบบ DBD (dielectric barrier discharge) โดยใช้แบบจำลองเป็นหลอดแก้วยาว มีลวดทองแดงเป็นขั้วแอโนดอยู่ภายในหลอด และใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแคโทด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ผ่านหลอดซึ่งเป็น

ฉนวน เมื่อแก๊สอาร์กอนไหลผ่านสนามไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นไอออน และเกิดเป็นพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 3.2



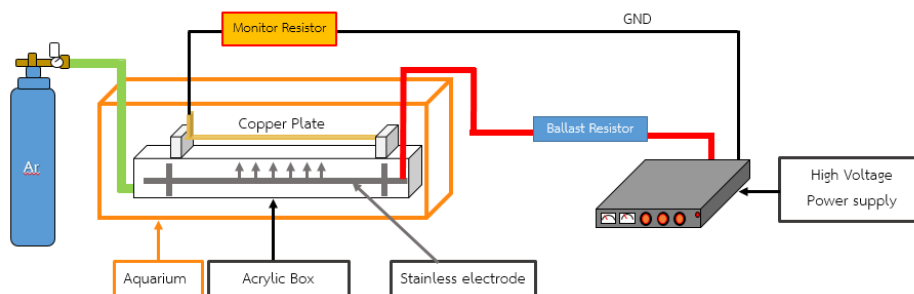
รูปที่ 3.2 (ก).แบบจำลองที่ 1

(ข).พลาสมาที่เกิดจากแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 3.3 การต่อแบบจำลองแบบจำลองที่ 1

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในระบบที่ใหญ่ขึ้นได้ จึงได้มีการออกแบบแบบจำลองที่ 2 ขึ้นมาโดยทำเป็นลักษณะรูปทรงกระบอกยาว 24 เซนติเมตร โดยที่ขั้วแอโนดมีลักษณะคล้ายหวี ทำจากลวดสแตนเลส และขั้วแคโทดทำจากแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การต่อวงจรเพื่อทำการวัดแรงดันเบรกดาวน

รูปที่ 3.4 แสดงถึงแบบจำลองที่ 2 ของเครื่องสร้างพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำสีที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ได้ทำการออกแบบไว้ในเบื้องต้นแก๊สอาร์กอน (Argon gas) ที่ใช้ในการสร้างพลาสมาจะถูกบรรจุไว้ในถังแก๊ส (gas cylinder) ซึ่งปริมาณแก๊สจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส เมื่อแก๊สไหลผ่านสายยางเข้าสู่ท่ออะคลิริกที่อยู่ในตู้กระจก ซึ่งบรรจุน้ำสีย้อมอยู่ ขั้วแอโนดจะประกอบด้วยแท่งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ถูกเชื่อมด้วยลวดสแตนเลสปลายแหลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ยาว 1 เซนติเมตร โดยวางห่างกันระยะประมาณ 1 เซนติเมตร ซึ่งทำให้ขั้วแอโนดมีลักษณะคล้ายหวี และขั้วแคโทดเป็นแผ่นทองแดงบาง วางอยู่ด้านบนของท่ออะคลิริก

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

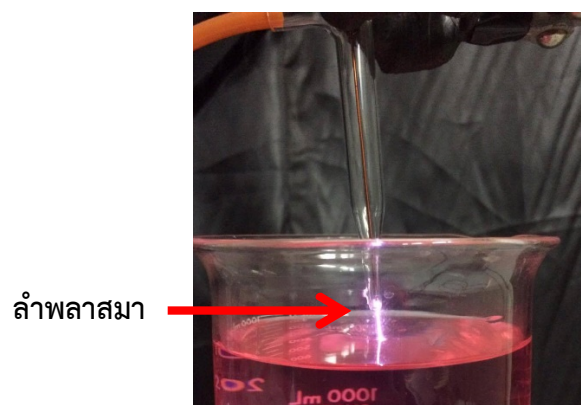
- แหล่งจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้
- หลอดแก้ว (glass tube)
- หลอดอะคลิริก
- ออสซิลโลสโคป SIGLENT SDS 2304 (oscilloscope)
- โพรบวัดแรงดันสูง 28 กิโลโวลต์ PINTEK HVP-28HF (high voltage probe)
- แก๊สอาร์กอน
- มาตรวัดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน
- โพรบออสซิลโลสโคป
- ชุดตัวต้านทานบัลลาสต์ ขนาด 100 โอห์ม
- ชุดตัวต้านทานมอเนเตอร์ ขนาด 1 กิโลโอห์ม

ตารางที่ 3.1 ความกว้าง ความยาว ความหนา และจำนวน ของอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2

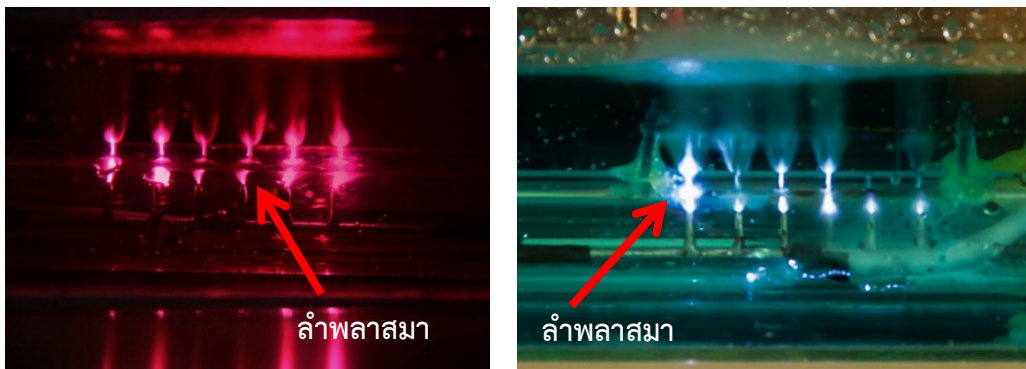
วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	จำนวน
ลวดทองแดง	17	259	1.55	1
หลอดแก้ว	12	110	1	1
แผ่นทองแดง	-	100	0.1	1
จุกยาง	13	20	1.7	1
หลอดอะคลิลิก	30	240	2	1
ลวดสแตนเลส	2	20	2	1

3.3 ผลการทดลองเบื้องต้น

สำหรับการทดลองในการสร้างพลาสมาเพื่อยิงลงน้ำ ผลปรากฏว่า สามารถยิงพลาสมาลงน้ำและได้น้ำได้ โดยในช่วงแรกได้นำอาร์กอนพลาสมาไปบำบัดน้ำสีย้อมรีแอกทีฟเรด ผลที่ได้คือพลาสมาสามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟเรดได้ แต่ลดได้ในปริมาณที่ไม่เด่นชัดมากจึงได้ทำการเปลี่ยนน้ำสีย้อมจากน้ำสีย้อมรีแอกทีฟเรดมาเป็นน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 การเกิดพลาสมาของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 3.6 การเกิดพลาสมาของแบบจำลองที่ 2

3.4 ปัญหาในการทดลองเบื้องต้น

- 3.4.1 การกระเพื่อมของน้ำมีผลต่อการต่อเนื่องของพลาสมา
- 3.4.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีกำลังไม่มากพอ ส่งผลต่อการผลิตพลาสมา
- 3.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองไม่มีความคงทนต่อความร้อน

บทที่ 4

การทดสอบและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาค่า แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ และ ค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู และค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำสีย้อม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขั้นตอนการทดสอบและการทดลอง

4.1.1 เตรียมอุปกรณ์พร้อมทั้งติดตั้งแบบจำลอง โดยจ่ายแก๊สอาร์กอนให้แก่แบบจำลองโดยเปิดไว้นาน 1 นาที เพื่อให้ภายในแบบจำลองมีแต่แก๊สอาร์กอนและทำให้เกิดพลาสมาได้ดีขึ้น จากนั้นเริ่มการทดลองโดยการจ่ายแรงดันและจ่ายอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 ลิตรต่อนาที โดยแต่ละระดับอัตราการไหลของแก๊สจะแบ่งระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วตามลำดับดังนี้

4.1.1.1 ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

4.1.1.2 ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

4.1.1.3 ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

4.1.1.4 ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่ากับ 4 มิลลิเมตร

4.1.1.5 ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่ากับ 5 มิลลิเมตร

โดยทดลองเพื่อหาความถี่ที่ทำให้เกิดพลาสมาเนื่องจากแหล่งจากแรงดันที่ใช้ในการทดลองเป็นแหล่งจ่ายที่มีค่าความถี่ไม่คงที่ เราจึงต้องทำการทดลองหาว่าสำหรับแบบจำลองประเภทนี้ใช้ความถี่อยู่ในช่วงไหนที่ทำให้เกิดพลาสมาได้ และตรวจสอบว่าระยะห่างของลวด(ขั้วแอโนด)กับปลายหลอดแก้วและอัตราการไหลของแก๊สส่งผลกระทบต่อความยาวของพลาสมาหรือไม่

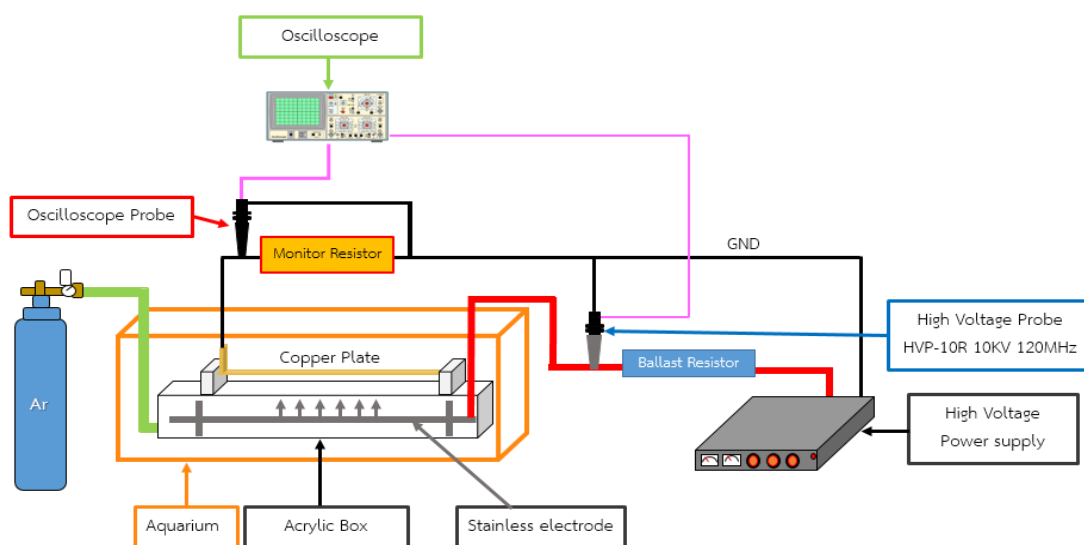
4.1.2 ทำการทดลองคล้ายกับ 4.1.1 แต่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วจาก 1 2 3 4 และ 5 มิลลิเมตรเป็น 1 3 5 7 และ 9 มิลลิเมตร เนื่องจากที่ระยะเดิมนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดแก้วเท่าไรและระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่าไรที่ทำให้พลาสมามีลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยทดลองเพื่อหาค่าแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ทำให้เกิดพลาสมา

4.1.3 เป็นการนำกรณีที่พลาสมามีลักษณะทางไฟฟ้าดีที่สุดมาทำการปรับค่าแรงดันเบรกดาวนเพิ่มขึ้นครั้งละ 200 โวลต์จนถึงค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุด (ก่อนเกิดอาร์ค) โดยทดลองเพื่อหาช่วงแรงดันเบรกดาวนที่ทำให้พลาสมามีลักษณะทางไฟฟ้าดีที่สุด

4.1.4 เป็นการทดลองของแบบจำลองที่ 2 เตรียมอุปกรณ์พร้อมทั้งติดตั้งแบบจำลอง โดยจ่ายแก๊สอาร์กอนให้แก่แบบจำลองโดยเปิดไวนาน 1 นาที จากนั้นเริ่มการทดลองโดยการจ่ายแรงดันและจ่ายอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 2 3 และ 4 ลิตรต่อนาที เพื่อหาช่วงของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตพลาสมา

นำผลที่ได้จาก 4.1.4 มาทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าจำนวน 5 ค่าโดยพิจารณาจากช่วงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก 4.1.4 นำไปทำการบำบัดน้ำเสีย จากนั้นนำน้ำเสียไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นของเสีย และค่าความเป็นกรด-ด่าง แล้วทำการสรุปผลว่าที่กรณีไหนสามารถบำบัดเสียได้ดีที่สุด

4.2 การทดสอบเพื่อหาค่า แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ และ กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ



รูปที่ 4.1 การต่ออุปกรณ์วัดค่า แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ และ กราฟ

จากรูปที่ 4.1 ออสซิลโลสโคป จะต่ออยู่กับโพรบแรงสูง (สีเทา) ที่ส่วนปลายของโพรบจะต่ออยู่กับขั้วแอนโนด ซึ่งเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบบจำลอง และส่วนท้ายจะต่ออยู่กับนิวทรัล โดยออสซิลโลสโคป (SIGLENT SDS 2304 Oscilloscopes) จะมีหน้าที่แสดงและบันทึกกราฟของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ส่วนทางด้านโพรบออสซิลโลสโคป (สีดำ) จะต่อคร่อมตัวต้านทานมอเนเตอร์ขนาด 1000 โอห์ม ที่ส่วนปลายของโพรบจะต่ออยู่กับนิวทรัล เพื่อทำการหาค่าแรงดันตกคร่อม

ตัวต้านทานมอนิเตอร์และหาค่ากระแสที่ไหลในวงจรได้ และนำไปคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ โดยสามารถหาค่า แรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ จากสมการ 4.1

$$V_D = V_E - V_R \quad (4.1)$$

โดยที่ V_D คือ แรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ
 V_E คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบบจำลองเทียบกับกราวด์
 V_R คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน 1000 โอห์ม เทียบกับกราวด์

$$I_D = \frac{V_M}{1000} \quad (4.2)$$

โดยที่ I_D คือ กระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ
 V_M คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานมอนิเตอร์ 1,000 โอห์ม

เมื่อจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1 แล้วและทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าค่าแรงดันเบรกทาว์นของแก๊สพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นที่บริเวณปลายหลอดและผิว การทดลองที่ 1 หาความถี่ที่ทำให้เกิดพลาสมาและตรวจสอบว่าระยะห่างของลวด (ขั้วแอโนด) กับปลายหลอดแก้ว และอัตราการไหลของแก๊สส่งผลกระทบต่อความยาวของพลาสมาหรือไม่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความถี่และระยะห่างของลวดกับปลายลวดที่ส่งผลต่อระยะความยาวของพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ถึง 5 ลิตรต่อนาทีที่ระยะห่างของขั้วแอโนดกับปลายลวดเท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 มิลลิเมตร ของแบบจำลองที่ 1 ที่แรงดันแหล่งจ่ายเท่ากับ 800 โวลต์

ระดับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	ระยะห่างของขั้วแอโนดกับปลายลวด(มิลลิเมตร)									
	1		2		3		4		5	
	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความยาวสูงสุดของลำพลาสมา (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความยาวสูงสุดของลำพลาสมา (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความยาวสูงสุดของลำพลาสมา (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความยาวสูงสุดของลำพลาสมา (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความยาวสูงสุดของลำพลาสมา (มิลลิเมตร)
1	107	13	107	15	107	19	107	24	107	25
2	107	16	107	17	107	22	106	24	107	26
3	107	18	107	20	107	23	107	26	106	28
4	108	19	107	21	107	25	106	30	107	34
5	107	26	107	28	106	29	106	32	107	35

จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นความยาวของลำพลาสมาก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และให้อีกกรณีหนึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างของขั้วแอโนดกับปลายลวดเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความยาวของลำพลาสมาเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของแจกู ขอยที่สรุปไว้ว่าความยาวของลำพลาสมา ขึ้นอยู่กับ แรงดันแก๊ส ชนิดของแก๊ส ความเข้มสนามไฟฟ้า แรงดัน ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ (ขั้วแอโนด) กับปลายลวด

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

ระยะแกป (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์)	แรงดันเบรกดาวน (โวลต์) (V_{rms})	แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสเบรกดาวน (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
1	107.2	641.1	647.8	1.9
3	107.3	711.0	723.3	2.7
5	107.6	728.8	742.9	2.4
7	107.5	750.4	763.1	2.4
9	107.3	1030	1040	2.8

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

ระยะแกป (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์)	แรงดันเบรกดาวน (โวลต์) (V_{rms})	แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสเบรกดาวน (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
1	107.3	649.9	660.9	1.6
3	107.2	609.2	614.4	2.2
5	107.3	669.3	682.3	3.0
7	107.2	746.1	760.0	3.1
9	106.9	926.0	945.7	3.3

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการใช้ของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

ระยะแกป (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์)	แรงดันเบรกดาวน (โวลต์) (V_{rms})	แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสเบรกดาวน (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
1	107.7	702.0	715.5	2.0
3	107.5	614.4	620.9	1.6
5	107.5	720.0	727.7	2.3
7	107.5	791.9	804.9	2.6
9	106.6	946.5	964.9	3.3

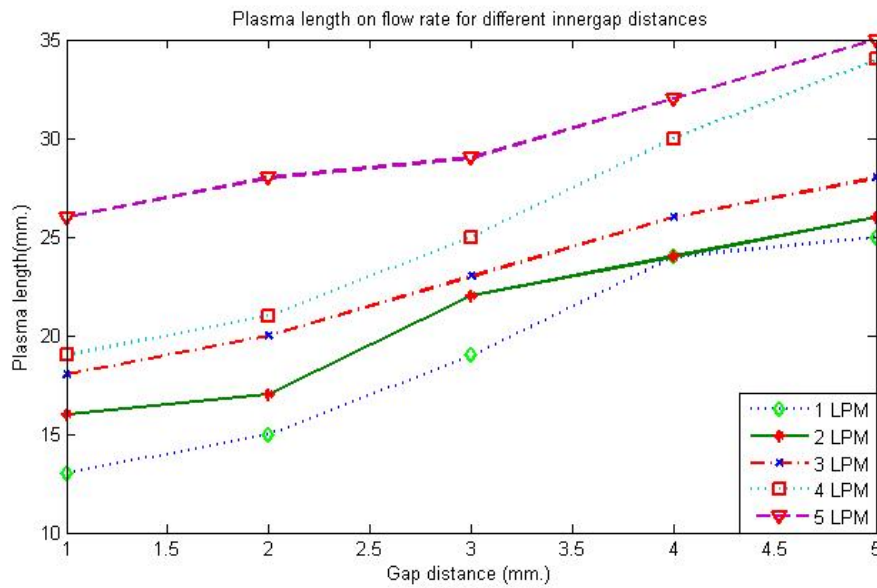
ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการใช้ของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

ระยะแกป (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์)	แรงดันเบรกดาวน (โวลต์) (V_{rms})	แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสเบรกดาวน (มิลลิแอมแปร์)
1	107.8	688.1	699.7	2.4
3	107.7	634.9	643.7	2.8
5	107.1	659.7	670.5	2.3
7	107.3	807.9	819.7	2.8
9	107.0	880.0	898.8	3.0

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวนและกระแสเบรกดาวนที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

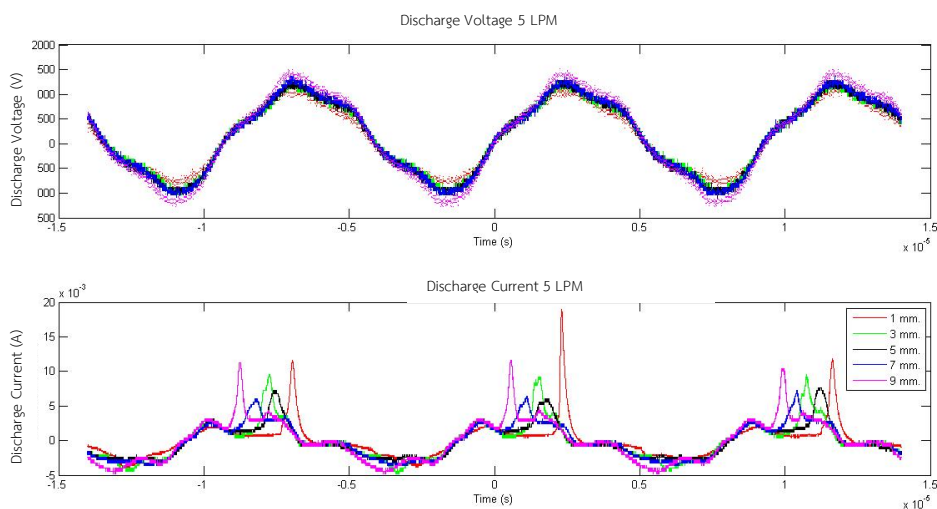
ระยะแกป (มิลลิเมตร)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์)	แรงดันเบรกดาวน (โวลต์) (Vrms)	แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์) (Vrms)	กระแสเบรกดาวน (มิลลิแอมแปร์)(I _{rms})
1	107.4	629.9	641.2	2.3
3	107.6	659.7	666.9	2.0
5	107.8	702.0	715.5	2.4
7	107.4	715.5	726.6	2.7
9	106.9	827.5	842.8	2.8

จากตารางที่ 4.1-4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับทำการปรับระยะแกประหว่างขดลวดกับปลายหลอดแก้วที่ระยะเท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 มิลลิเมตร และทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 ลิตรต่อนาที ลักษณะของลำพลาสมาจะมีความยาวที่เปลี่ยนไป ซึ่งที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที ลักษณะของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดที่สุด สังเกตได้จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการคงที่อัตราการไหลของแก๊สคงที่และปรับระยะห่างระหว่างขดลวดกับปลายหลอดแก้ว จะได้ผลดังนี้คือเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับปลายหลอดมากขึ้นจะได้ลำพลาสมายาวขึ้นดังกราฟ

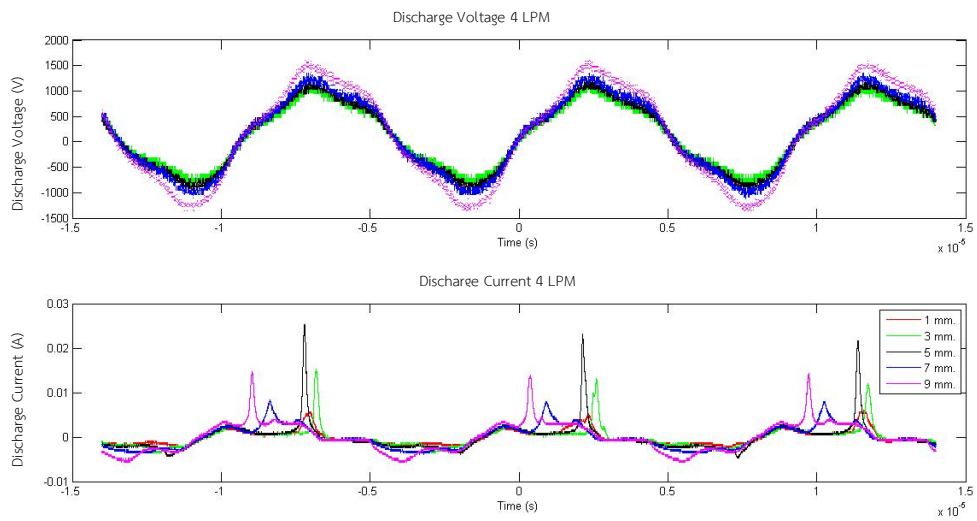


รูปที่ 4.2 ความยาวของลำพลาสมาที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สและระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับปลายหลอดค่าต่างๆ ที่แรงดันเอาพุตเท่ากับ 900 โวลต์ ของแบบจำลองที่ 1

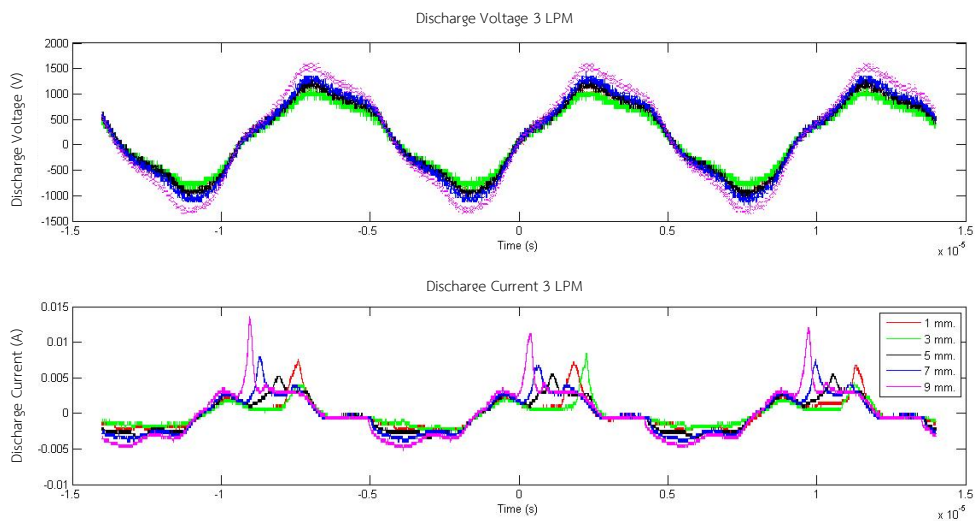
จากตาราง 4.1-4.6 ที่ผ่านมาเป็นตารางค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จเฉลี่ยที่ได้จากการวัดโดยโพรบแรงดันสูง ในส่วนนี้จะได้นำเสนอผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปขณะทำการฉายพลาสมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูป 4.3 – 4.7



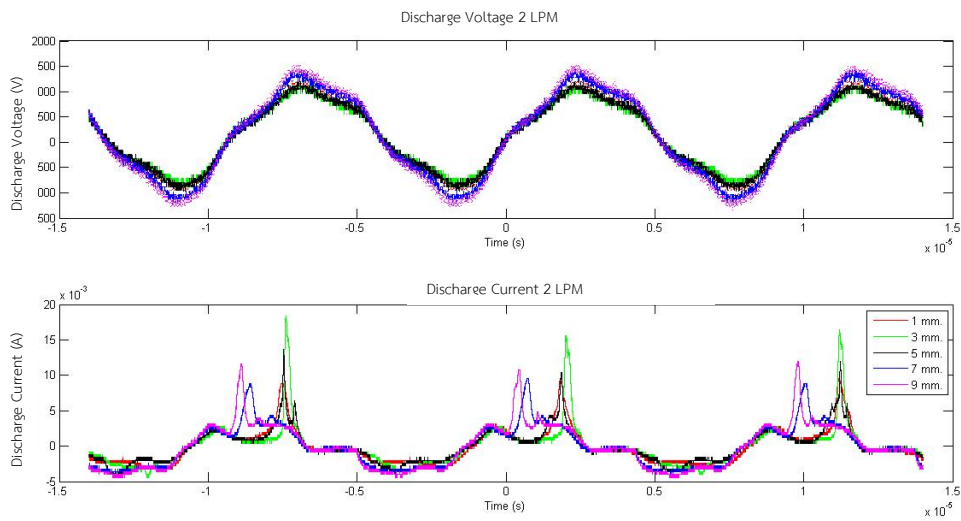
รูปที่ 4.3 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตรต่ออนาที ของแบบจำลองที่ 1



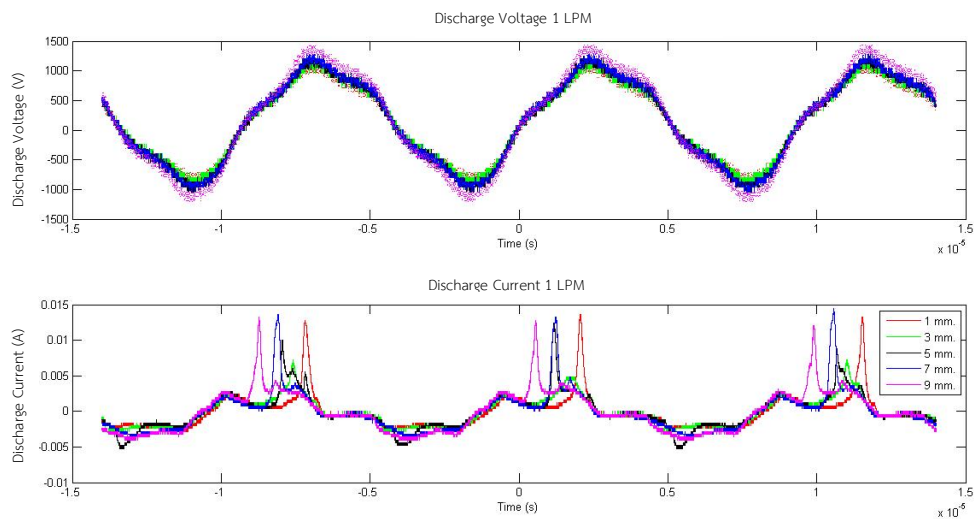
รูปที่ 4.4 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที
ของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 4.5 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที
ของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 4.6 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาทีของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 4.7 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาทีของแบบจำลองที่ 1

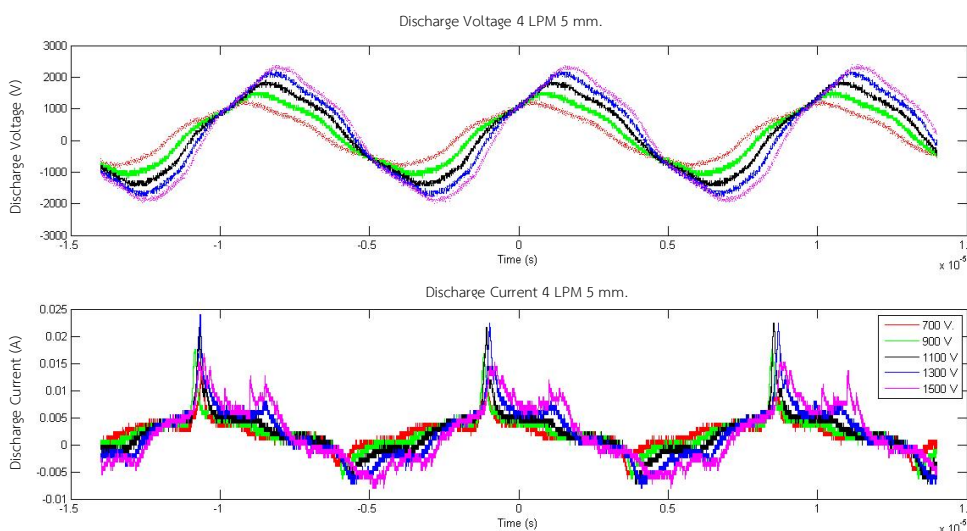
จากกราฟทั้ง 5 กราฟสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาทีที่ระยะแกปเท่ากับ 5 มิลลิเมตร (เส้นสีดำ) เป็นเงื่อนไขที่ทำให้พลาสมามีลักษณะทางไฟฟ้าดีที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ทำการทดลอง เพราะที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาทีที่ระยะแกป 5 มิลลิเมตรมีค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายและแรงดันดิสชาร์จที่ต่ำ และให้กระแสดิสชาร์จสูงและใช้อัตราการ

ไหลของแก๊สไม่มาก ซึ่งหมายความว่าในการผลิตพลาสมาถ้ามีกระแสดีสชาร์จสูงจะทำให้ปริมาณสารเรดิคอล (radical) มากขึ้น จะทำให้พลาสมามีลักษณะทางไฟฟ้าดีที่สุดในั้นจึงเลือกเงื่อนไขที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาทีที่ระยะแก๊ปเท่ากับ 5 มิลลิเมตรมาทำการปรับค่าแรงดันแหล่งจ่ายทั้งหมด 5 ระดับโดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 200 โวลต์เริ่มที่ 700 โวลต์ถึง 1,500 โวลต์

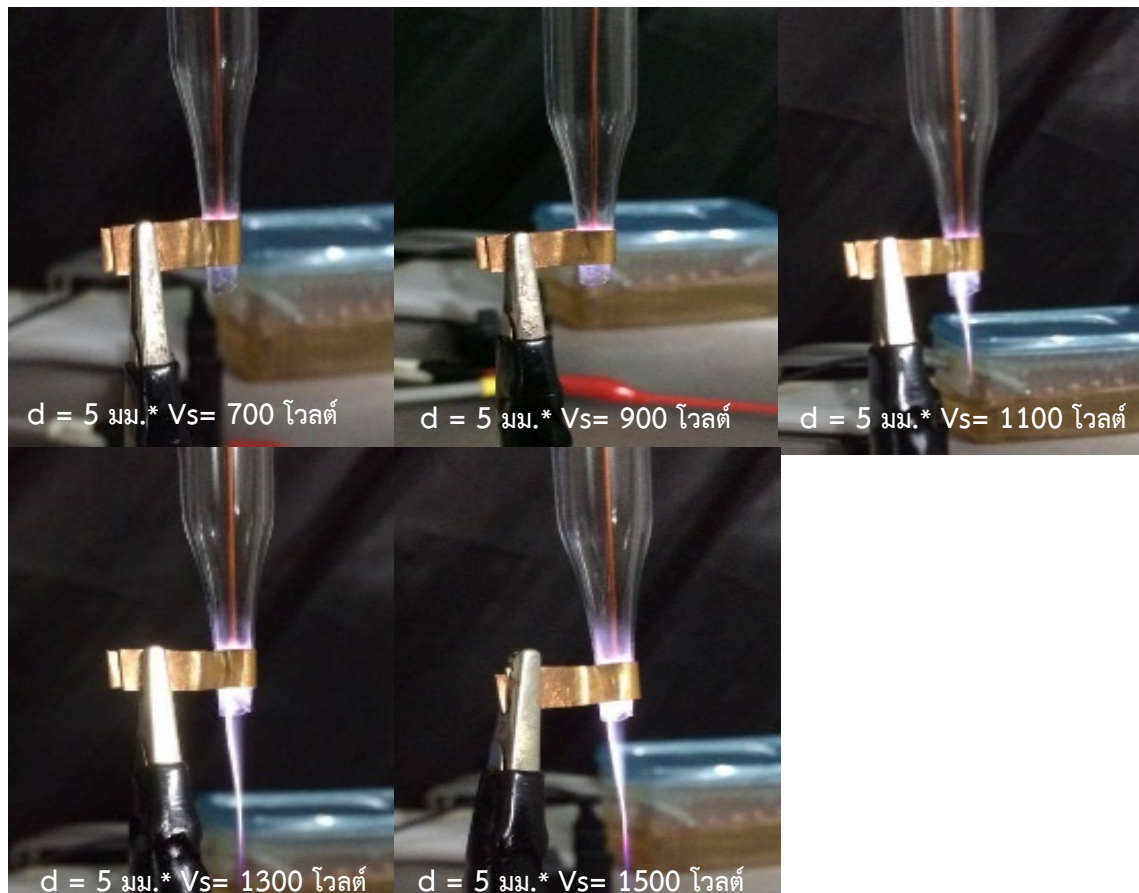
ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันดีสชาร์จและกระแสดีสชาร์จที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ระยะแก๊ป 5 มิลลิเมตรที่ระดับแรงดันต่างๆ ของแบบจำลองที่ 1

แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์)(V_{rms})	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	แรงดันดีสชาร์จ (โวลต์)(V_{rms})	กระแสดีสชาร์จ (มิลลิแอมแปร์)(I_{rms})
700	107.4	697.4	2.76
900	107.4	887.2	3.67
1100	107.7	1090	4.38
1300	107.1	1290	5.25
1500	106.9	1460	5.77

จากตารางที่ 4.7 สามารถเขียนเป็นกราฟแรงดันดีสชาร์จและกระแสดีสชาร์จได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แรงดันดีสชาร์จและกระแสดีสชาร์จที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ที่ระยะแก๊ปเท่ากับ 5 มิลลิเมตรที่ระดับแหล่งจ่ายต่างๆ ของแบบจำลองที่ 1

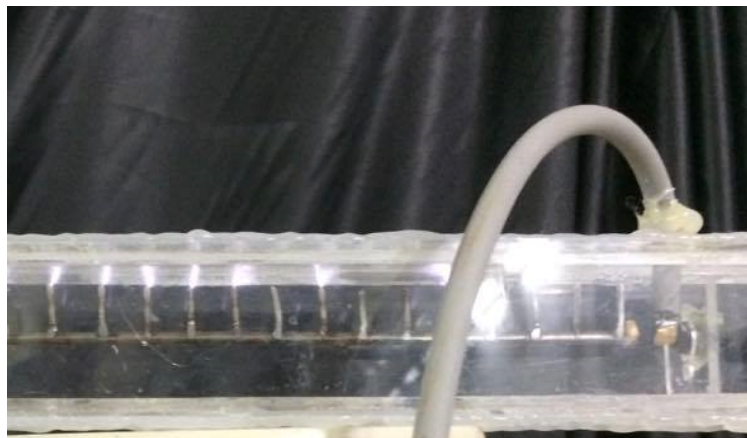


รูปที่ 4.9 ลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมาที่ระดับแรงดันต่าง ๆ อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 1

ซึ่งจากการทดลองทั้ง 3 การทดลองสังเกตได้ว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นหรือระยะแก๊บเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าแรงดันแหล่งจ่ายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของของพาสเซนในหัวข้อที่ 2.11 ทำให้ทราบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแอโนดและแคโทดเพิ่มขึ้น แรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการเกิดเบรกดาวน์ (breakdown) และการเกิดอาร์ค (arc) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังสมการ $V_s = f(pd)$ การใช้แก๊สต่างชนิดกันก็ส่งผลต่อการเกิดเบรกดาวน์ (breakdown) และการเกิดอาร์ค (arc) ที่ต่างกันขึ้นอยู่กับพลังงานไอออไนเซชันของแก๊สนั้นๆ โดยอธิบายได้ดังตารางที่ 2.1 ตามกฎของพาสเซน ความเข้มข้นของแก๊สที่มีพลังงานไอออไนเซชันต่ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนง่าย ซึ่งส่งผลให้เกิดการเบรกดาวน์ (breakdown) และเกิดการอาร์ค (arc) ได้ง่ายกว่าสารที่มีพลังงานไอออไนเซชันสูง

การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองของแบบจำลองที่ 2 เตรียมอุปกรณ์พร้อมทั้งติดตั้งแบบจำลองโดยจ่ายแก๊สอาร์กอนให้แก่แบบจำลองโดยเปิดไวนาน 1 นาที จากนั้นเริ่มการทดลองโดยการจ่ายแรงดันและจ่ายอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 2 3 และ 4 ลิตรต่อนาที เพื่อทำการหาลักษณะทางไฟฟ้า

ที่ดีที่สุดของพลาสมา ชั้นแรกเป็นการสร้างพลาสมาเหนือน้ำ โดยจ่ายไฟเข้าทางด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งได้ผลดังรูป 4.10



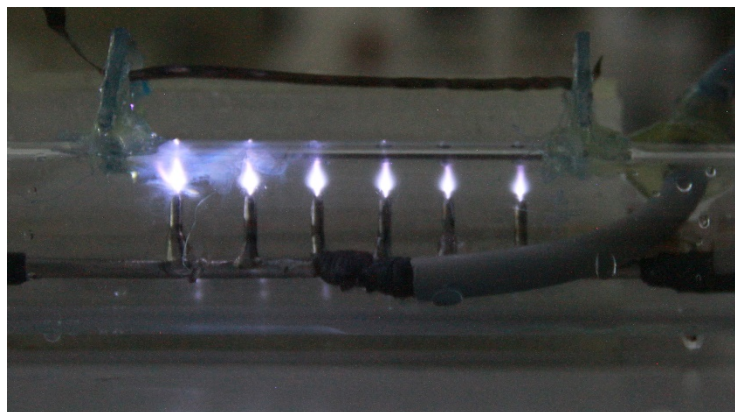
รูปที่ 4.10 การสร้างพลาสมาเหนือน้ำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด

จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.10 พลาสมาจะเกิดแบบกระจายตัวเกือบทุกๆ เซม โดยเข็มที่อยู่ใกล้กับฝั่งขาเข้าของแก๊สอาร์กอนจะสามารถเกิดได้ดีที่สุด และเมื่อนำพลาสมาไปสร้างใต้น้ำ ได้ผลดังรูปที่ 4.11



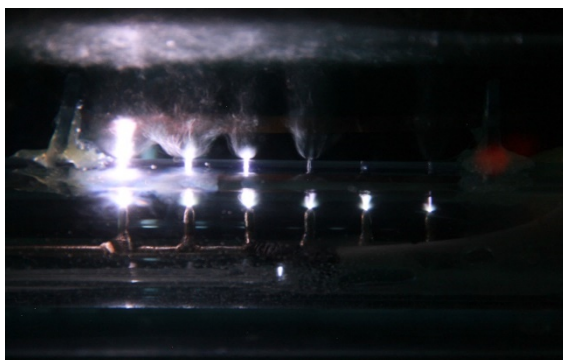
รูปที่ 4.11 การสร้างพลาสมาใต้น้ำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด

จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายไฟเข้าด้านข้างขั้วอิเล็กโทรด พลาสมาจะเกิดที่บริเวณด้านซ้ายซึ่งคือด้านที่ใกล้กับช่องจ่ายแก๊สอาร์กอน ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงแก้ไขโดยจ่ายไฟเข้าตรงกลางของขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้แรงดันกระจายไปทุกๆ เซมให้เท่ากัน โดยสร้างพลาสมาเหนือน้ำ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.12

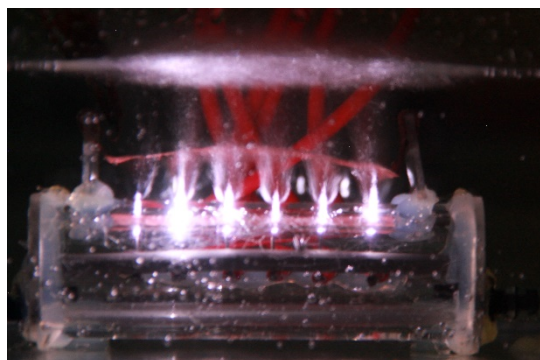


รูปที่ 4.12 การสร้างพลาสมาเหนือน้ำโดยจ่ายไฟเข้าตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.12 สังเกตเห็นว่าพลาสมาสามารถเกิดกระจายกันครบทุกๆ เข็มของขั้วอิเล็กโทรด นั้นหมายความว่า เป็นการสร้างพลาสมาได้สมบูรณ์ ดังนั้นจึงนำไปสร้างได้นำ ได้ผลดังรูป 4.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 (ก) การสร้างพลาสมาได้นำโดยจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรด

(ข) การสร้างพลาสมาได้นำโดยจ่ายไฟขนานเข้าขั้วอิเล็กโทรดทุกเส้น

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการจ่ายไฟขนานเข้าขั้วอิเล็กโทรดทุกเส้นสามารถเกิดพลาสมาได้ดีกว่าจ่ายไฟเข้าด้านข้างของขั้วอิเล็กโทรดและเข้าตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดแรงดันกระจายของขั้วอิเล็กโทรด การกระจายแรงดันบนขั้วอิเล็กโทรด จะไม่สม่ำเสมอบนความยาวของขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากผลของค่าเก็บประจุไฟฟ้าสเตรย์ของขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้การฉนวนของขั้วอิเล็กโทรดตันทาง หรือใกล้ขั้วแรงสูงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ห่างจากขั้วแรงสูงออกไป (ดร.สำรวย สังข์สะอาด. (2549))

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันดิสชาร์จ กระแสดิสชาร์จและค่ากำลังไฟฟ้าที่เริ่มเกิดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ที่ความถี่ 66 กิโลเฮิร์ตของแบบจำลองที่ 2 ข

ระดับอัตรา การไหลของ แก๊ส(ลิตรต่อ นาที)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (วัตต์)	กำลังไฟฟ้า เอาพุต(วัตต์)	แรงดัน ดิสชาร์จ (โวลต์) (V_{rms})	แรงดัน แหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสดิสชาร์จ (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
2	17.5	17	885.4	926.9	19.23
3	60	31.4	944.8	987.9	33.23
4	70	32.2	960.2	985.8	33.54

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่เกิดพลาสมาก่อนเกิดอาร์กที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ที่ความถี่ 66 กิโลเฮิร์ตของแบบจำลองที่ 2 ข

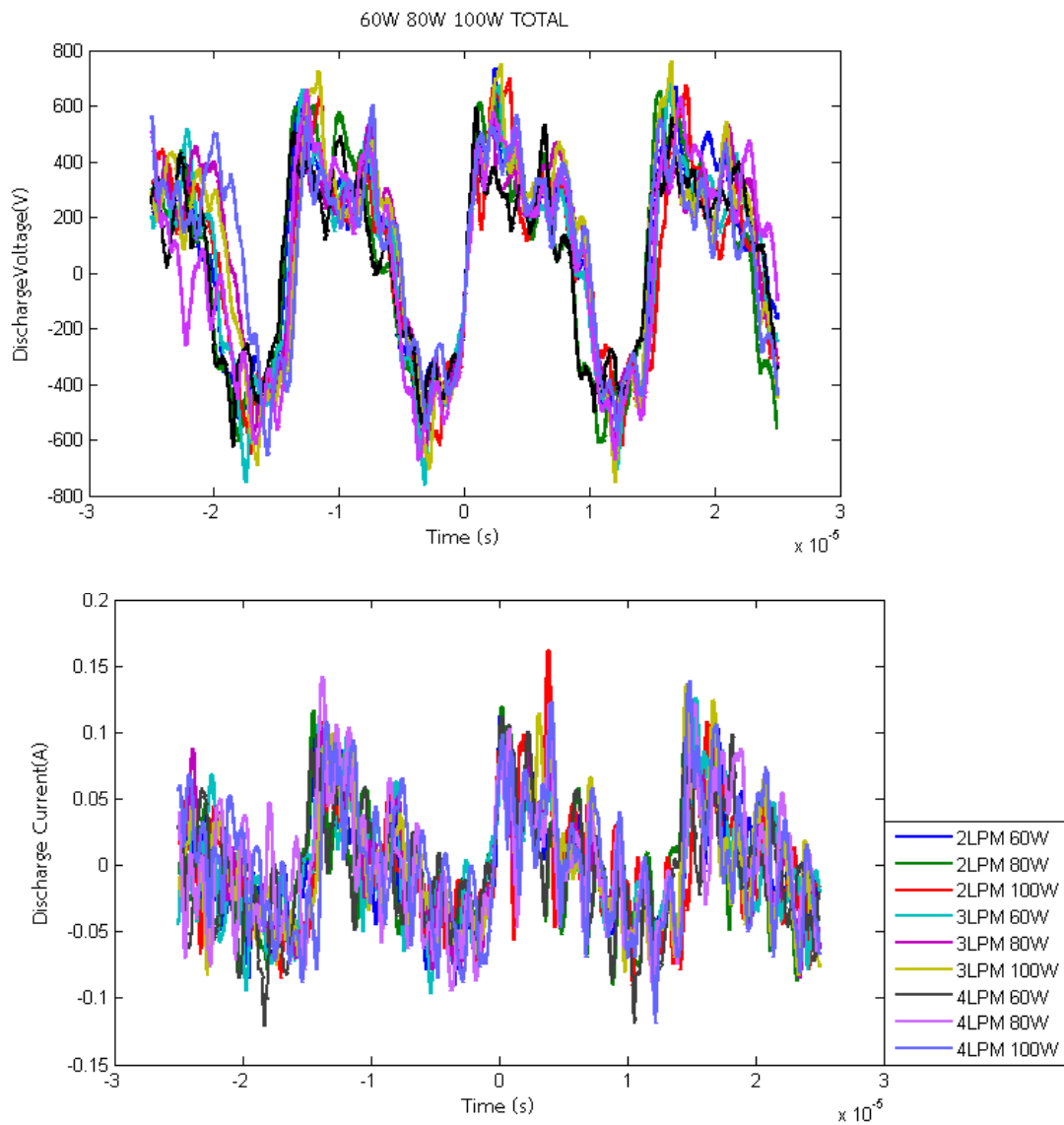
ระดับอัตรา การไหลของ แก๊ส(ลิตรต่อ นาที)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (วัตต์)	กำลังไฟฟ้า เอาพุต(วัตต์)	แรงดัน ดิสชาร์จ (โวลต์) (V_{rms})	แรงดัน แหล่งจ่าย (โวลต์) (V_{rms})	กระแสดิสชาร์จ (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
2	120	25.1	937.2	982.2	25.6
3	140	38.0	941.4	996.7	38.16
4	132	48.1	967.4	1020	47.16

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าเอาพุตต่ำสุดของทั้ง 3 ระดับอัตราการไหลคือ 17 วัตต์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 ระดับอัตราการไหลคือ 48.1 วัตต์ ซึ่งการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาช่วงของค่ากำลังไฟฟ้าจากต่ำสุดไปสูงสุด โดยจะเริ่มที่ค่าสูงสุดของกรณีทีพลาสมาเริ่มเกิดคือค่า 60 วัตต์ไปจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกรณีทีก่อนเกิดอาร์กคือ 140 วัตต์ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไม่สามารถจ่ายที่ค่ากำลังไฟฟ้า 120 ถึง 140 วัตต์ได้นาน จึงทำการเลือกกรณีที 100 เป็นกรณีทีกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงได้ดังนี้คือ 60 80 และ 100 วัตต์ จะได้ค่าแรงดันและกระแสดิซชาร์จดังนี้

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันดิซชาร์จและกระแสดิซชาร์จที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2

ระดับอัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	กำลังไฟฟ้าเอาพุต(วัตต์)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	แรงดันดิซชาร์จ (โวลต์) (V_{rms})	กระแสดิซชาร์จ (มิลลิแอมแปร์) (I_{rms})
2	60	15.39	66.49	364.1	42.27
	80	15.87	66.84	369.1	43.01
	100	16.39	66.74	373.1	43.94
3	60	15.32	66.14	350.2	43.76
	80	16.65	66.26	379.9	43.83
	100	18.23	66.83	395.2	46.12
4	60	14.60	66.46	333.0	43.84
	80	18.86	66.56	393.5	47.93
	100	20.35	66.41	419.1	48.56

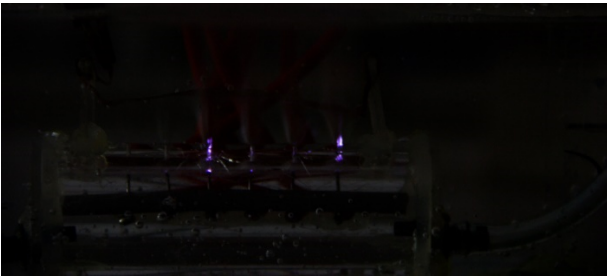

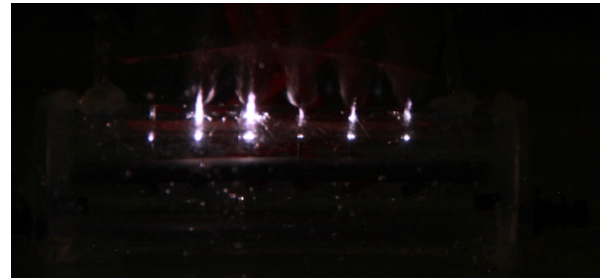
จากตาราง 4.10 เห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุต มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตมากพอสมควร ทั้งนี้เกิดจากค่ากำลังสูญเสียของแหล่งจ่ายกระแสสลับที่มีค่ามาก ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุตมีค่าน้อย และจากข้อมูลในตารางสามารถพล็อตกราฟได้ดังนี้



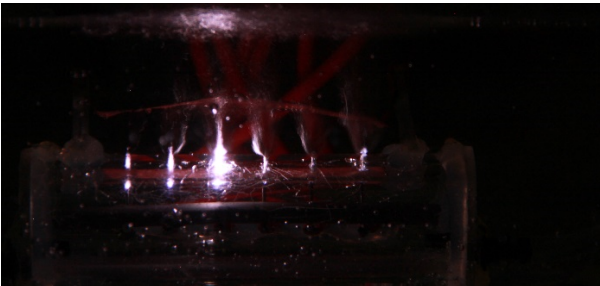
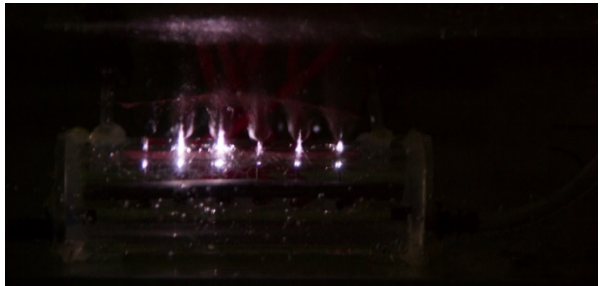
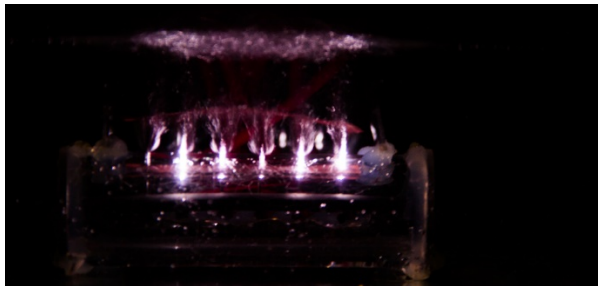
รูปที่ 4.14 แรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ค่ากำลังไฟฟ้าในการสร้างพลาสมาค่าต่างๆ ที่ระดับ อัตราการไหลของแก๊สค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ใช้ในการสร้างพลาสมานั้นมีค่าไม่ต่างกันมาก และมีค่าความถี่เดียวกันคือค่าประมาณ 66 กิโลเฮิร์ต (kHz) ดังนั้นจึงมาทำการพิจารณาที่ล้าพลาสมา โดยมีผลการทดลองดังตาราง 4.11

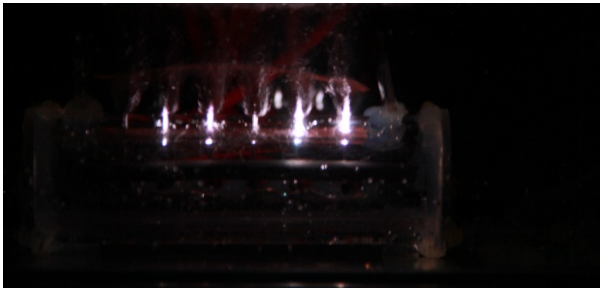
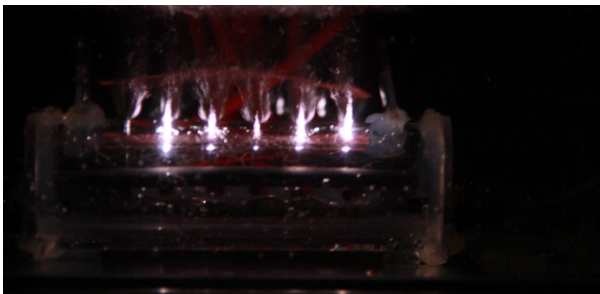
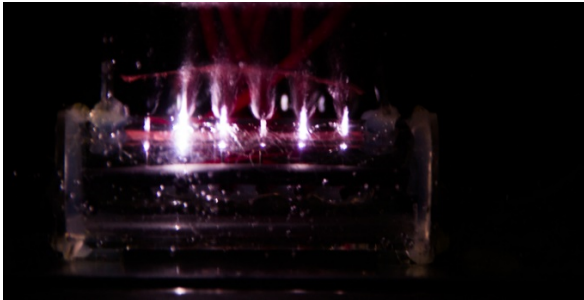
ตารางที่ 4.11 ลักษณะของลำพลาสมาที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2

ระดับอัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต(วัตต์)	ลักษณะของลำพลาสมา
2	60	
	80	
	100	

ตารางที่ 4.11 ลักษณะของลำพลาสมาที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2 (ต่อ)

ระดับอัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต(วัตต์)	ลักษณะของลำพลาสมา
3	60	
	80	
	100	

ตารางที่ 4.11 ลักษณะของลำพลาสมาที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ที่อัตราการไหลของแก๊สระดับต่างๆ ของแบบจำลองที่ 2 (ต่อ)

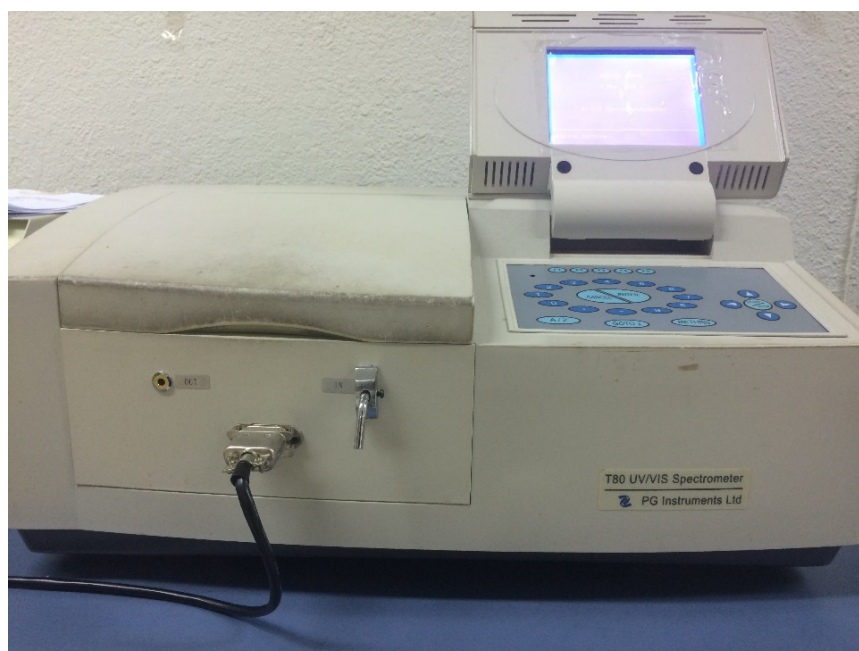
ระดับอัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต(วัตต์)	ลักษณะของลำพลาสมา
4	60	
	80	
	100	

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าลักษณะของลำพลาสมาที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์ พุ่งออกมาจากรูของแบบจำลองและมีความเข้มของพลาสมา มากที่สุด และจากตารางสามารถสังเกตเห็นได้อีกว่าที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณของลำพลาสมามากที่สุด เนื่องจากเป็นระดับอัตราการไหลของแก๊สที่สูงที่สุดในการทดลอง ซึ่ง มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของแจกู ซอย และงานวิจัยของคณิศร์ มาตรา ที่กล่าวไว้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ ส่งผลต่อการสร้างพลาสมาได้แก่ ระดับอัตราการไหลของแก๊ส โดยเมื่อระดับอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น

จนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ล้าพลาสมามีความยาวเพิ่มมากขึ้น โดยจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ การที่พลาสมาสามารถสัมผัสกับน้ำได้มากนั้นสามารถอนุมานได้ว่าพลาสมาจะสามารถทำปฏิกิริยากับ น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด และสามารถสร้างสารเรดิคัล (radical) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อม เมทิลีนบลูได้มาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลาสมาในกรณีที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 100 วัตต์ (ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาเท่ากับ 20.35 วัตต์) เป็น กรณีที่ดีที่สุด ในการทดลอง

4.3 การทดสอบหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่อง T80 UV/VIS Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ในการวัดค่าความเข้มข้น โดยจะนำน้ำตัวอย่างปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในคิวบิกแล้ว ทำการฉายแสง อัลตราไวโอเลตเพื่ออ่านค่าความเข้มข้นในเงื่อนไขต่างๆ ของค่ากำลังไฟฟ้ากับ ระดับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ก่อนและหลังจากฉายพลาสมาในน้ำ จะทดสอบเงื่อนไขละ 3 ครั้งแล้วจึงหาค่าเฉลี่ยโดยมีค่า เป็นไปตามตารางที่ 4.12 ซึ่งในการทดลองทั้งหมดจะใช้น้ำสีย้อมที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.15 เครื่อง T80 UV/VIS Spectrometer สำหรับใช้วัดค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อม

4.3.1 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด

ในการเปรียบเทียบเพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด โดยทำการฉายพลาสมาในเงื่อนไขต่างๆ คือ ที่กำลังไฟฟ้าอินพุต 60 80 และ 100 วัตต์ โดยทุกช่วงกำลังไฟฟ้าจะใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 2 3 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่เวลา 10 20 30 40 50 และ 60 นาทีและเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย เพื่อหาว่าที่เงื่อนไขใด ที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด โดยตารางผลการทดลองต่อไปนี้เป็นตารางที่นำมาคิดค่าเฉลี่ยแล้วที่เงื่อนไขของกำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของแก๊ส และเวลาต่างๆในการทดลองเราใช้ปริมาณน้ำที่ 10 มิลลิลิตร ทุกชุดการทดลองดังรูปที่ 4.16 และได้ผลการทดลองดังนี้



ก)



ข)

รูปที่ 4.16 (ก) ไซริงค์ขนาด 10 มิลลิลิตร (ข) คิวเวทที่ใส่น้ำที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.12 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	ค่าความเข้มข้นที่เวลา (วินาที)													
		292 นาโนเมตร							664 นาโนเมตร						
		0	10	20	30	40	50	60	0	10	20	30	40	50	60
2	60	4.8921	4.8248	4.7947	4.7413	4.6543	4.6369	4.5766	4.9188	4.9157	4.9139	4.9085	4.9015	4.8991	4.8741
	80	4.7367	4.7355	4.6903	4.6334	4.4374	4.2796	4.2668	4.9181	4.9079	4.9058	4.8940	4.8929	4.8645	4.8391
	100	4.7390	4.6555	4.5893	4.5209	4.4223	4.3666	4.2181	4.9341	4.6848	4.6122	4.5301	4.4368	4.3503	4.2426

ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	ค่าความเข้มข้นที่เวลา (วินาที)													
		292 นาโนเมตร							664 นาโนเมตร						
		0	10	20	30	40	50	60	0	10	20	30	40	50	60
3	60	4.7483	4.6566	4.6241	4.4942	4.3573	4.2738	4.1369	4.9877	4.9117	4.8984	4.8179	4.7290	4.6921	4.6038
	80	4.1752	4.1613	4.1531	4.0951	4.0348	3.958	3.943	4.9105	4.7822	4.6975	4.6159	4.6013	4.4694	4.4222
	100	4.1705	4.1485	4.1206	4.0371	3.9617	3.9420	3.8805	4.9510	4.8355	4.8276	4.5741	4.3273	4.1488	4.0877

ตารางที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสีเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของแก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	ค่าความเข้มข้นที่เวลา (วินาที)													
		292 นาโนเมตร							664 นาโนเมตร						
		0	10	20	30	40	50	60	0	10	20	30	40	50	60
4	60	4.1450	4.0778	4.0592	3.9826	3.9397	3.8863	3.7436	4.9068	4.8203	4.6715	4.5275	4.3182	4.1827	4.0980
	80	4.0800	4.0591	3.9722	3.9118	3.8167	3.6299	3.3167	4.9280	4.7217	4.6086	4.4906	4.3097	3.9462	3.8439
	100	4.1288	4.0812	4.0325	3.942	3.8527	3.3028	3.1531	4.9858	4.7665	4.5729	4.1942	4.1482	3.9825	3.6497

ตารางที่ 4.15 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับ
อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ

กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	k (292 nm)	k (664 nm)
60w	0.00111125	0.00015238
80w	0.00174105	0.00027074
100w	0.00194063	0.00251647

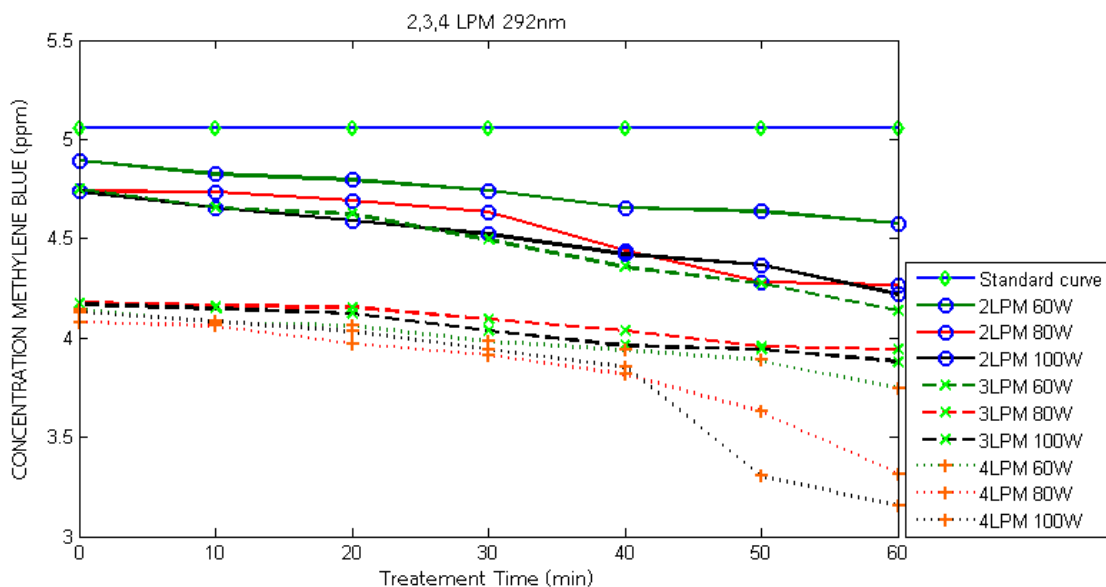
ตารางที่ 4.16 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับ
อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ

กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	k (292 nm)	k (664 nm)
60w	0.002297228	0.00133573
80w	0.000952913	0.001745289
100w	0.001201288	0.003193367

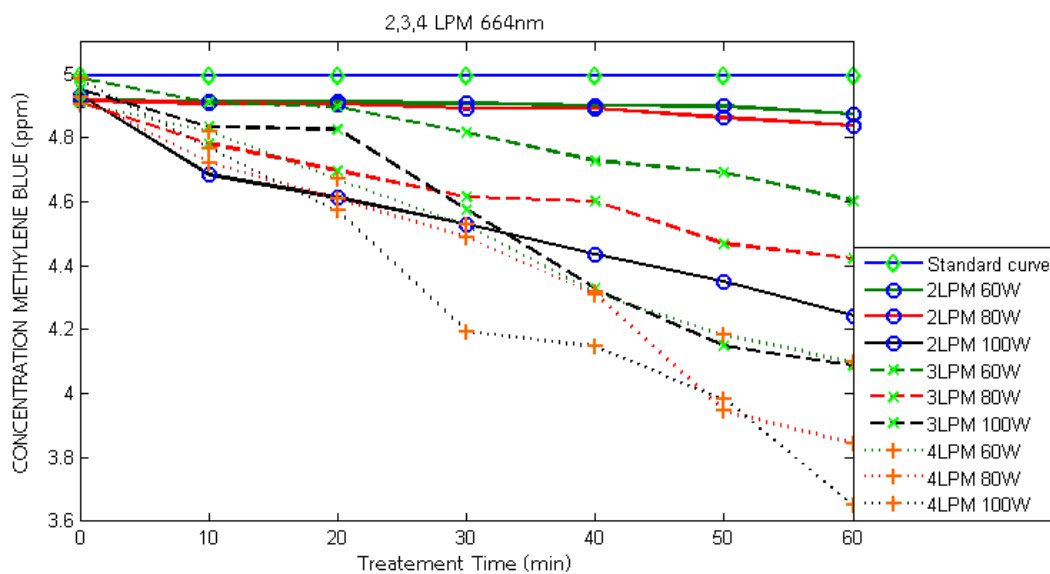
ตารางที่ 4.17 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับ
อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตค่าต่างๆ

กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)	k (292 nm)	k (664 nm)
60w	0.001697544	0.003002157
80w	0.003452274	0.004140708
100w	0.004493055	0.0052323

จากตารางที่ 4.10 และจากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสดิซชาร์จของพลาสมามีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณี ดังนั้นจึงพิจารณาที่ลักษณะของลำพลาสมาที่สามารถสัมผัสกับน้ำได้มากที่สุด จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 100 วัตต์ (ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาเท่ากับ 20.35 วัตต์) ลำพลาสมามีการสัมผัสกับผิวน้ำได้มากที่สุด จึงอนุมานได้ว่าพลาสมาและสารเรดิคอล (radical) สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ซึ่งทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อมเมื่อทำการฉายพลาสมาในน้ำที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์ (ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาเท่ากับ 20.35 วัตต์) มีค่ากำลังไฟฟ้าเอาพุตเท่ากับ 20.35 วัตต์ สามารถลดค่าความเข้มข้นไปได้ 0.9757 ppm มีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 4.493055 มิลลิโมลต่อลิตรวินาที (millimol/Ls) ที่ความยาวคลื่น 292 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรมีค่าเท่ากับ 1.3361 ppm มีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 5.23230 มิลลิโมลต่อลิตรวินาที (millimol/Ls) กล่าวคือเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากพอไปที่ขั้วแอโนด จนกระทั่งเกิดการดิซชาร์จและเกิดพลาสมา พลาสมาจะผลิตสารเรดิคอล (radical) ที่เรียกว่า ไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\cdot\text{OH}$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยสารเรดิคอล (radical) จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเมทิลีนบลูทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าน้อยลง และสารเรดิคอล ดังกล่าวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการแตกตัวของไอออนที่เกิดจากพลาสมา และค่าในตารางทั้งสามสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้ (L. Chandana; et al. 2015.)



รูปที่ 4.17 ค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 292 นาโนเมตร



รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 664 นาโนเมตร

4.4 การทดสอบหาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อม

ในการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อม จะทดสอบที่อัตราการใช้ของแก๊สอาร์กอน 2 3 และ 4 ลิตรต่อนาที และที่กำลังไฟฟ้า 60 80 และ 100 วัตต์ ของแบบจำลองที่ 2

4.4.1 อุปกรณ์ทดสอบค่าไอโซน

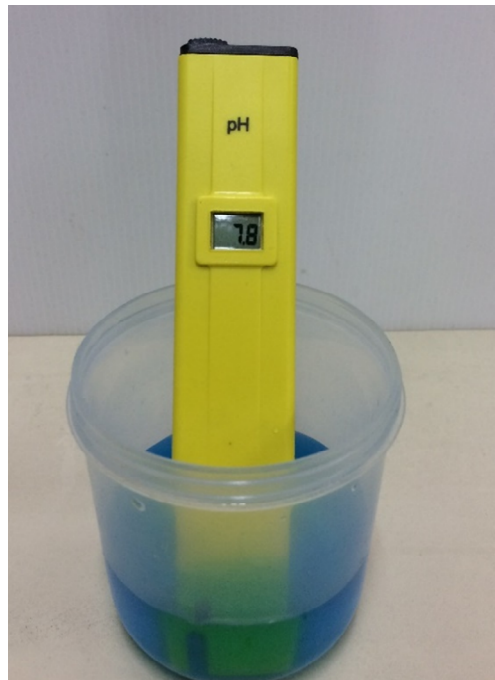
4.4.1.1 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง รุ่น PH107

4.4.2 วิธีการทดลอง

4.4.2.1. นำน้ำที่เตรียมมาใส่กระปุกทดสอบ 20 มิลลิลิตร

4.4.2.2. นำเครื่องทดสอบความเป็นกรด-ด่างจุ่มลงในน้ำสีย้อมตัวอย่าง

4.4.2.3. ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอ่านค่าแล้วบันทึกผล



รูปที่ 4.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมปกติก่อนการบำบัด

ตารางที่ 4.18 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของ แก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (วัตต์)	ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา (วินาที)						
		0	10	20	30	40	50	60
2	60	7.9	7.7	7.6	7.4	7.4	7.4	7.4
	80	7.9	7.6	7.5	7.3	7.3	7.2	7.2
	100	7.8	7.5	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1

ตารางที่ 4.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของ แก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (วัตต์)	ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา (วินาที)						
		0	10	20	30	40	50	60
3	60	7.8	7.6	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2
	80	7.7	7.5	7.4	7.3	7.3	7.2	7.1
	100	7.7	7.5	7.5	7.4	7.3	7.1	7.0

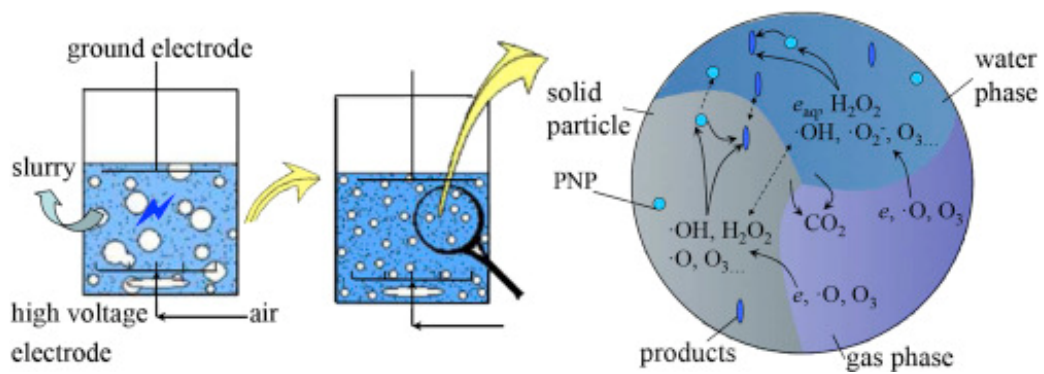
ตารางที่ 4.20 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียอ้อมเมทิลีนบลูที่ระดับอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ของแบบจำลองที่ 2

อัตราการไหลของ แก๊ส(ลิตรต่อนาที)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (วัตต์)	ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา (วินาที)						
		0	10	20	30	40	50	60
4	60	7.6	7.5	7.4	7.3	7.2	7.1	7.1
	80	7.6	7.4	7.3	7.3	7.2	7.1	7.0
	100	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.9

จากตาราง 4.18 ถึง ตาราง 4.20 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู จะเห็นได้ว่าที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สมีค่าเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที สามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระดับอัตราการไหลอื่น ๆ ในการทดลอง โดยเฉพาะที่ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 100 วัตต์สามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดจาก 7.7 เป็น 6.9 หมายความว่าน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีค่าความเป็นกรดมากขึ้น ($\text{pH} < 7$) ซึ่งจากงานวิจัยของจันดนา (L. Chandana) และคณะ ได้กล่าวไว้ว่า เมื่ออาร์กอนพลาสมาทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูจะทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสมาจะสร้างสารไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับโมเลกุลของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำสีย้อมเมทิลีนบลูแล้วเกิดเป็นกรดไนตริก (HNO_3) ขึ้น (L. Chandana; et al. 2015)

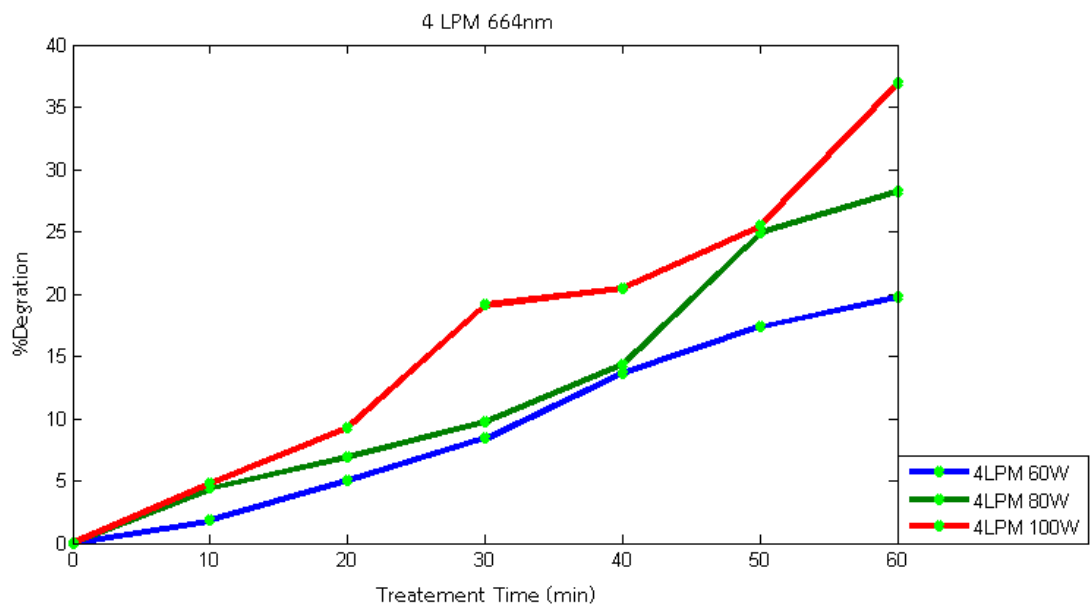
จากการทดลองทั้งหมดพบว่าเมื่อทำการฉายพลาสมาในน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู พลาสมาจะทำปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู โดยมีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยสารเรดิคัลที่เกิดจากพลาสมาเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไนโตรเจนที่มีอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี ผลที่ได้คืออาร์กอนพลาสมาสามารถลดค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูได้จริง ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 และทำให้ น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นั้นมี ความสัมพันธ์กับงานวิจัยของจันดนา (L. Chandana) และคณะ และงานวิจัยของมานोज (P. Manoj Kumar Reddy) และคณะ ที่ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อฉายพลาสมาลงในน้ำสีย้อมเมทิลีนบลู พลาสมา จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไนโตรเจนของสีย้อมเมทิลีนบลูได้ผลิตภัณฑ์คือ กรดไนตริก (HNO_3) เป็นผลทำให้ น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีคุณสมบัติเป็นกรดมากขึ้น จากการทดลองดังกล่าวบ่งบอกได้ว่าพลาสมาถือเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดและมีประโยชน์หลายด้าน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสีชนิดอื่น ๆ และนำไปพัฒนาใช้กับงาน ได้หลาย ๆ แบบได้ ซึ่งกระบวนการแลกเปลี่ยนและปฏิกิริยาเคมีของสารเรดิคัล (radical) กับน้ำ สามารถสรุปได้ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.5 และรูปที่ 4.20



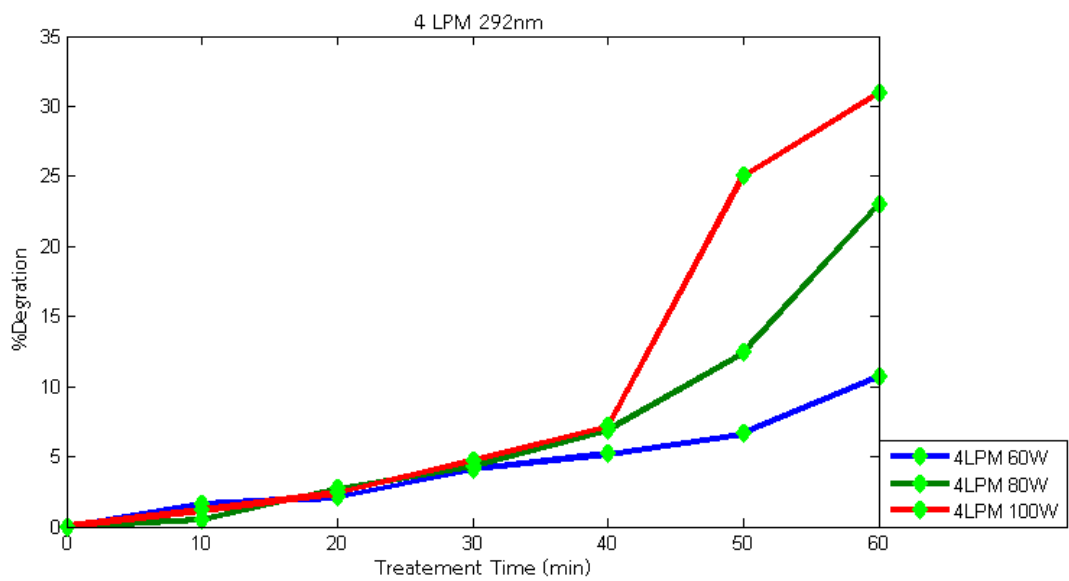


รูปที่ 4.20 สารเรดิคอลลที่ผลิตได้จากอาร์กอนพลาสมา

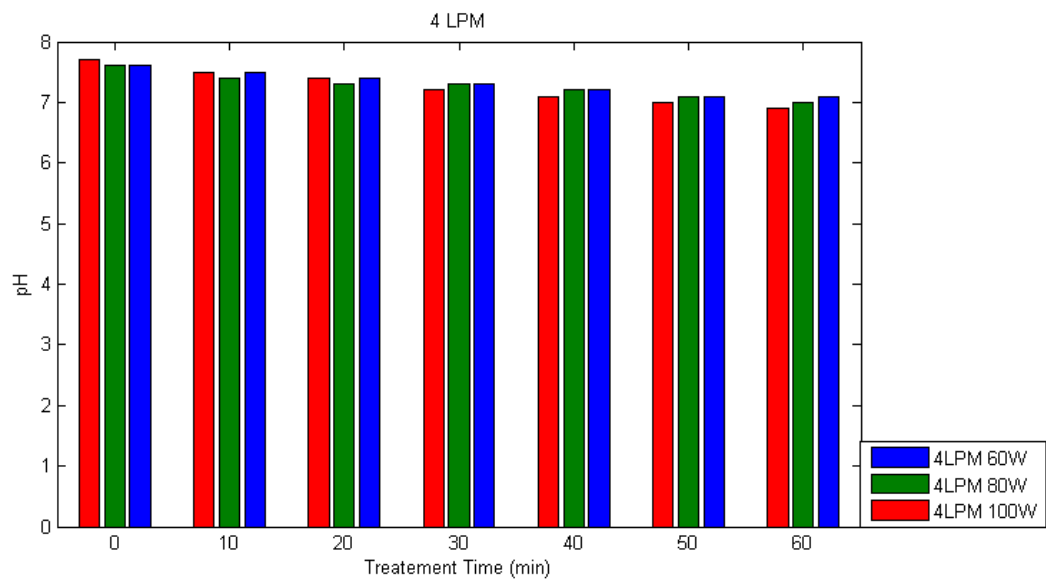
ที่มา: Tiecheng Wang; et al. (2015)



รูปที่ 4.21 เปอร์เซนต์การลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 664 นาโนเมตร



รูปที่ 4.22 เปอร์เซนต์การลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 292 นาโนเมตร



รูปที่ 4.23 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีข้อมเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการศึกษา การออกแบบและสร้างแบบจำลอง การทดสอบผลการฉายพลาสมาลงในน้ำสีย้อม ว่ามีผลต่อค่าความเข้มข้นของสีย้อม และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อม และข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ให้มีประสิทธิภาพต่อไป

5.1 สรุปผล

5.1.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแบบจำลองในการสร้างพลาสมาเพื่อนำไปฉายในน้ำสีย้อม เพื่อศึกษาผลของพลาสมาที่มีผลต่อค่าความเข้มข้น และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีย้อม โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนซ์ เป็นตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ระบบ โดยตัวแบบจำลองจะมีสองแบบ แบบแรกคือมีขั้วแอโนดอยู่ในหลอดแก้วและแคโทดจะอยู่รอบแอโนดโดยมีแก้วเป็นฉนวนกัน โดยขั้วทั้งสองจะไม่สัมผัสน้ำ และตัวหลอดแก้วจะลงไปในน้ำเป็นระยะ 1 เซนติเมตร เรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองที่ 1 ในแบบที่ 2 ขั้วแอโนดจะมีลักษณะคล้ายหวี และมีแคโทดเป็นแผ่นทองแดงวางอยู่ด้านบน เรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองที่ 2

5.1.2 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพลาสมาสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สและปรับระยะห่างระหว่างลวดตัวนำกับปลายหลอดจะส่งผลทำให้ลักษณะความยาวของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของแจกู ซอย ที่ได้กล่าวไว้ว่าการปรับอัตราการไหลของแก๊สและระยะห่างระหว่างลวดตัวนำกับปลายหลอดส่งผลทำให้ลำพลาสมามีความยาวที่เปลี่ยนไป เมื่อค่าแรงดันดิสชาร์จมีค่าต่ำแต่กระแสดิสชาร์จมีค่าสูงจะเป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดของพลาสมา และเมื่อทำการเพิ่มระดับอัตราการไหลของแก๊สหรือเพิ่มระยะห่างระหว่างแก๊ส จะทำให้แรงดันแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของพาสเซน

5.1.3 ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้พลาสมามีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากกราฟกระแสดิสชาร์จและแรงดันดิสชาร์จ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดพลาสมาคือระดับอัตราการไหลของแก๊ส ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่าย เป็นต้น พบว่าค่าแรงดันและกระแสดิสชาร์จของพลาสมามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาที่ลักษณะของลำพลาสมาที่สัมผัสกับน้ำมากที่สุด ซึ่งลำพลาสมาที่สัมผัสกับน้ำมากที่สุดคือพลาสมาที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์

5.1.4 ผลการตรวจวัดค่าความเข้มข้นและตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย พบว่าที่ระดับอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 100 วัตต์ สามารถย่อยสลายเสียได้ดีกว่าทุกเงื่อนไขการทดลอง และสามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดให้มีความลดลงได้ดีกว่าเงื่อนไขอื่นๆ ซึ่งสรุปได้ว่า พลาสมาที่ถูกผลิตโดยค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 100 วัตต์ ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาทีสามารถผลิตสารเรดิคัล (radical) ได้ในปริมาณที่มากกว่าเงื่อนไขอื่นๆ ในการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดเห็นได้ชัดว่าการฉายพลาสมาสามารถลดค่าความเข้มข้นของเสียเมทิลีนบลูได้จริง ซึ่งความยาวคลื่น 292 นาโนเมตรสามารถลดค่าความเข้มข้นไปได้ 0.9757 ppm และที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรมีค่าเท่ากับ 1.3361 ppm และสามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดของน้ำเสียเมทิลีนบลูได้จาก 7.7 เป็น 6.9 โดยต้องใช้ระดับอัตราการไหลของแก๊ส ค่ากำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมและยังใช้ระยะเวลาในการฉายพลาสมาในน้ำเสียเมทิลีนบลูมากยิ่งขึ้นทำให้ค่าความเข้มข้นของเสียเมทิลีนบลูลดลง ซึ่งเงื่อนไขที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้คือที่เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าอินพุต 100 วัตต์และระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที และจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ใช้ในการสร้างพลาสมามีค่าเท่ากับ 20.35 วัตต์ ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าน้อย ดังนั้นเพื่อต้องการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ควรที่จะเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่มีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นหลอดอะคลีริก ซึ่งไม่สามารถทนความร้อนได้ หากจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงเกินไป เพราะจะทำให้หลอดอะคลีริกเกิดหลอมละลายซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเกิดพลาสมา

5.2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับไม่สามารถจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงๆได้ ทำให้เงื่อนไขในการทดลองมีไม่กว้างพอ

5.2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับไม่มีความคงทนต่อการใช้งาน

5.2.4 แหล่งจ่ายมีการสูญเสีย (loss) ที่เยอะเกินไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 หากใช้หลอดแก้วในการสร้างแบบจำลอง ควรใช้ตัวต้านทาน และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ตัวหลอดแก้วเกิดความเสียหาย

5.3.2 ใช้อุปกรณ์ป้องกันฉนวนสำหรับผู้ทดลอง เนื่องจากการทดลองนั้นใช้ระดับแรงดันที่สูง อาจเกิดอันตรายต่อผู้ทดลองได้

5.3.3 ค่าความต้านทานที่ได้ทำการต่อเพื่อลดค่ากระแส ควรมีค่าวัตต์ที่สูงพอ เพราะต้องเข้ากับไฟแรงสูงจากแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสสลับ

5.3.4 หลังจากการหยุดทำการทดลองทุกครั้ง ควรทำการดิสชาร์จคายประจุที่ยังเหลืออยู่ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการคายประจุใส่ผู้ทำการทดลอง

5.3.5 ผู้ทำการทดลองควรศึกษา และตรวจสอบอุปกรณ์ให้ถี่ถ้วนก่อนการเริ่มทำการทดลอง เพราะในการทดลองจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสสลับ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลอง

5.3.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับต้องมีค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงพอที่จะใช้ในการผลิตพลาสมาที่มีแบบจำลองขนาดใหญ่

เอกสารอ้างอิง

- กัณฑ์ศรี พงศ์พันธ์. (2540). *มลพิษทางน้ำ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม : มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุรักษ์; และ ภูมิชาย. (2555). *การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 3 โดยการใช้กระแสไฟฟ้า* : ปริญญาณีพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี). นครนายก: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2559, จาก [ฐานข้อมูลปริญญาณีพนธ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ](http://www.oocities.org/thana755/index3.html) *ประเภทของพลาสมา*. (2545). สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2559, จาก <http://www.oocities.org/thana755/index3.html>
- พลาสมาอุณหภูมิต่ำ*. (2559). สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2559, จาก <http://ienergyguru.com/2015/10/plasma/>
- สำรวย สังข์สะอาด. (2549). *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง* : พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2550). *การประยุกต์ใช้พลาสมา*. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2559 , จาก [www.material.chula.ac.th/Journal/ PHUCHAROEN.pdf](http://www.material.chula.ac.th/Journal/PHUCHAROEN.pdf)
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. (2555). *น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม*. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2559, จาก <http://www.dpm.nida.ac.th>
- ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์. (2551). *ฟิสิกส์พลาสมาเบื้องต้น (Introduction Plasma Physics)*: พิมพ์ครั้งที่ 1 .กรุงเทพฯ : สตีปส์ ดีไซน์ แอนด์ พรินท์
- อัจฉราภรณ์ บุญมา. (2556). *อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการตัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด*. วิทยานิพนธ์ วศ.บ. นครราชสีมา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- อำนาจ สุขศรี. (2559). *การเบรกดาวนในแก๊ส*. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม 2559, จาก <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HV/LectureNote/HV-5.doc>
- Chandana L, Manoj Kumar Reddy P, Subrahmanyam C. *Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium*. Chemical Engineering Journal. 2015; 282:116-22.
- Ghodbane H, Hamdaoui O, Vandamme J, Van Durme J, Vanraes P, Leys C, et al. *Degradation of AB25 dye in liquid medium by atmospheric pressure non-thermal plasma and plasma combination with photocatalyst TiO₂*. Open Chemistry. 2014; 13(1).

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

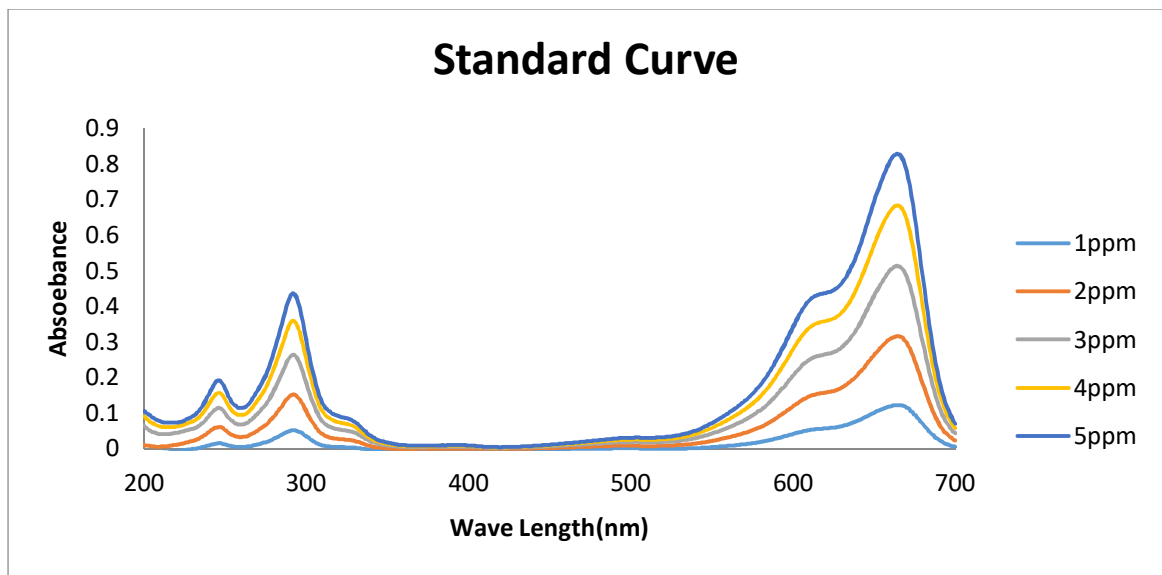
- Jaegu C, Keita M, Hidekazu Y, Takao N, Sunao K, Hidenori A. *Characteristics of a DC-Driven Atmospheric Pressure Air Microplasma Jet*. Japanese Journal of Applied Physics. 2008; 47:6459–63.
- Magureanu M, Bradu C, Piroi D, Mandache NB, Parvulescu V. *Pulsed Corona Discharge for Degradation of Methylene Blue in Water*. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2012; 33(1):51-64.
- Manoj Kumar Reddy P, Rama Raju B, Karuppiyah J, Linga Reddy E, Subrahmanyam C. *Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor*. Chemical Engineering Journal. 2013; 217:41-7.
- Matra K. *DC non-thermal atmospheric-pressure plasma jet generated using a syringe needle electrode*. Japanese Journal of Applied Physics. 2016; 55(7S2):07LB2.
- Piyadanai Pachanapan. (2556). *การเบรกดาวน*. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 กันยายน 2559, จาก http://nemoning.blogspot.com/2011/12/blog-post_15.html
- Sirawit Kitplapaiboon. (2556). *พลาสมา*. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 กันยายน 2559, จาก <http://physicsparticles.blogspot.com>
- Thana Kaewtapee. (2552). *การไอออนไนเซชัน*. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 กันยายน 2559, จาก <http://www.oocities.org/thana755/index2.html>
- Vijay Nehra, Ashok Kumar, Dwivedi HK. *Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources*. International Journal of Engineering. 2015; 2:53-68.
- Wang T, Qu G, Sun Q, Liang D, Hu S. *Evaluation of the potential of p-nitrophenol degradation in dredged sediment by pulsed discharge plasma*. Water Res. 2015; 84:18-24.

ภาคผนวก

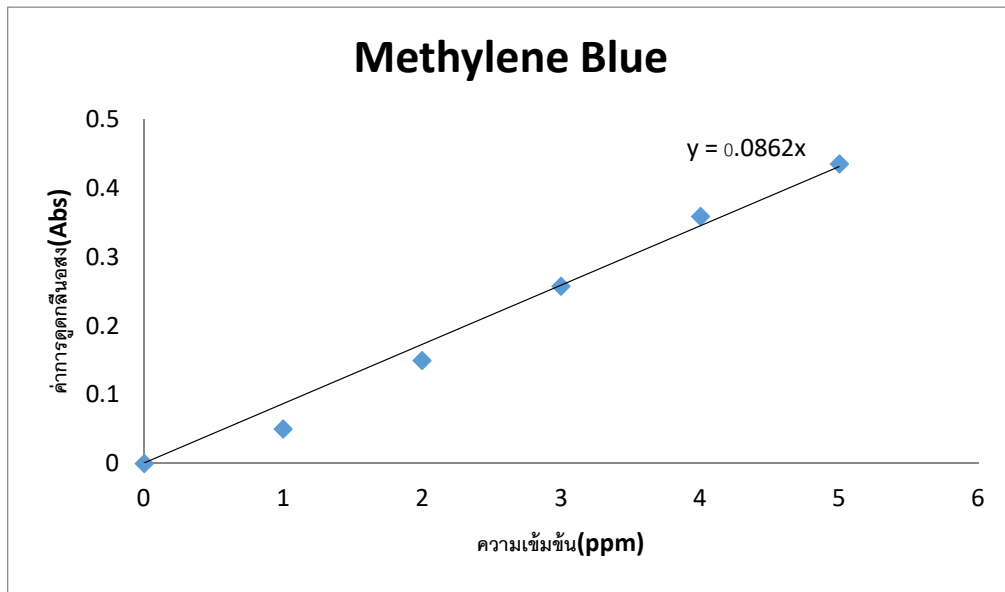
ภาคผนวก ก

รายละเอียดของค่ามาตรฐานของน้ำสีข้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นต่างๆ

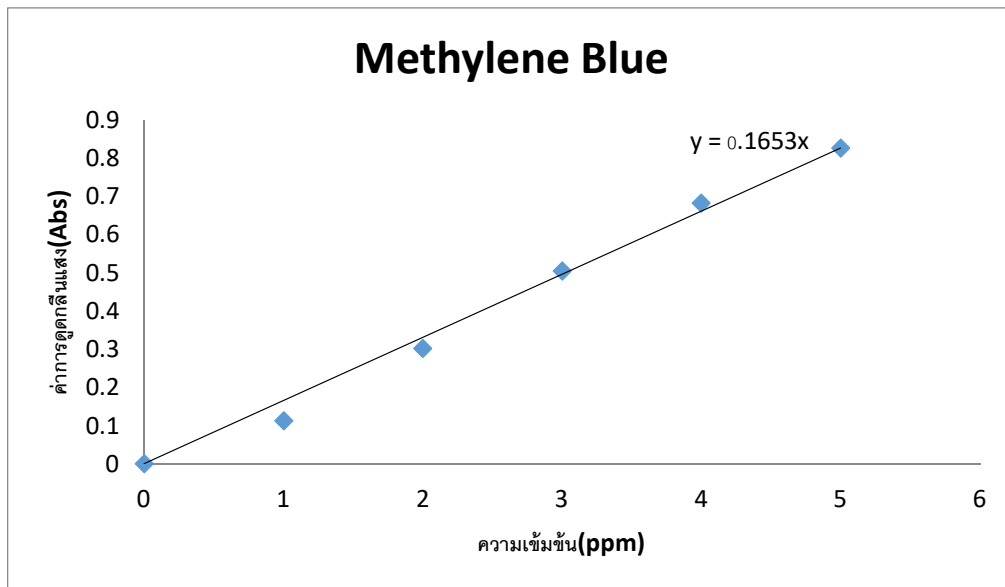
รูปที่ ก 1 ค่ามาตรฐานของสีข้อมเมทิลีนบลูที่ค่าความเข้มข้น 1 2 3 4 และ 5 ppm



รูปที่ ก 2 ค่ามาตรฐานของสีข้อมเมทิลีนบลูที่ค่าความเข้มข้น 1 2 3 4 และ 5 ppm ที่ความยาวคลื่น 292 นาโนเมตร



รูปที่ 3 ค่ามาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ค่าความเข้มข้น 1 2 3 4 และ 5 ppm ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร



ภาคผนวก ข

รายละเอียดผลการหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา เปอร์เซนต์ค่าความเข้มข้นที่ลดลง

ตาราง ข 1 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 60 วัตต์

2LPM 60w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.4217	4.892111369	0	0.8131	4.918935269	0	0	0
t=10	0.4159	4.824825986	0.013849	0.8126	4.915910466	0.00061512	1.394566001	0.061530889
t=20	0.4133	4.79466357	0.02012	0.8123	4.914096	0.000984	2.032422	0.098486
t=30	0.4087	4.7412993	0.031313	0.8114	4.908651	0.002093	3.1808172	0.209514
t=40	0.4012	4.65429234	0.049834	0.8102	4.901391	0.003573	5.109671	0.357936
t=50	0.3997	4.63689095	0.05358	0.8098	4.898972	0.004067	5.5041281	0.407508
t=60	0.3945	4.57656613	0.066675	0.8057	4.874168	0.009143	6.8948035	0.918456

ตาราง ข 2 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 80 วัตต์

2LPM 80w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.4083	4.73665893	0	0.813	4.91833	0	0	0
t=10	0.4082	4.73549884	0.000245	0.8113	4.908046	0.002093	0.0244978	0.20954
t=20	0.4043	4.69025522	0.009845	0.8109	4.905626	0.002586	0.9893643	0.258972
t=30	0.3994	4.63341067	0.022039	0.809	4.894132	0.004932	2.2283425	0.494438
t=40	0.3825	4.43735499	0.065274	0.8088	4.892922	0.005179	6.745098	0.519288
t=50	0.3689	4.27958237	0.101477	0.8041	4.864489	0.011007	10.680401	1.106828
t=60	0.3678	4.26682135	0.104463	0.7999	4.83908	0.016244	11.011419	1.637705

ตาราง ข 3 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์

2LPM 100w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.4085	4.73897912	0	0.8156	4.934059	0	0	0
t=10	0.4013	4.65545244	0.017783	0.7744	4.684815	0.051836	1.794169	5.320248
t=20	0.3956	4.58932715	0.032088	0.7624	4.61222	0.067453	3.2608696	6.977964
t=30	0.3897	4.52088167	0.047115	0.7489	4.530551	0.085319	4.8242238	8.906396
t=40	0.3812	4.42227378	0.069168	0.7334	4.436782	0.106233	7.161595	11.20807
t=50	0.3764	4.36658933	0.08184	0.7191	4.350272	0.125924	8.5281615	13.41955
t=60	0.3636	4.21809745	0.116438	0.7013	4.242589	0.150988	12.348735	16.2983

ตาราง ข 4 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 60 วัตต์

3LPM 60w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.4093	4.748259861	0	0.8245	4.987901	0	0	0
t=10	0.4014	4.656612529	0.01949	0.8119	4.911676	0.0154	1.968112	1.551915
t=20	0.3986	4.62412993	0.02649	0.8097	4.898367	0.018113	2.684395	1.827837
t=30	0.3874	4.494199536	0.054991	0.7964	4.817907	0.034676	5.653072	3.528378
t=40	0.3756	4.357308585	0.085924	0.7817	4.728978	0.053306	8.972311	5.475246
t=50	0.3684	4.273781903	0.105279	0.7756	4.692075	0.06114	11.10206	6.304796
t=60	0.3566	4.136890951	0.137834	0.761	4.603751	0.080144	14.77846	8.344284

ตาราง ข 5 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 80 วัตต์

3LPM 80w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.3599	4.175174014	0	0.8117	4.910466	0	0	0
t=10	0.3587	4.1612529	0.00334	0.7905	4.782214	0.026465	0.334541	2.681847
t=20	0.358	4.153132251	0.005293	0.7765	4.69752	0.044334	0.530726	4.533162
t=30	0.353	4.09512761	0.019358	0.763	4.61585	0.061873	1.954674	6.3827
t=40	0.3478	4.034802784	0.034199	0.7606	4.601331	0.065023	3.479011	6.71838
t=50	0.3412	3.958236659	0.053357	0.7388	4.469449	0.094104	5.480657	9.867352
t=60	0.3399	3.943155452	0.057175	0.731	4.422263	0.104717	5.884084	11.03967

ตาราง ข 6 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์

3LPM 100w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	0.3595	4.170533643	0	0.8184	4.950998	0	0	0
t=10	0.3576	4.148491879	0.005299	0.7993	4.835451	0.023615	0.53132	2.389591
t=20	0.3552	4.120649652	0.012033	0.798	4.827586	0.025243	1.210586	2.556391
t=30	0.348	4.03712297	0.032512	0.7561	4.574108	0.079178	3.304598	8.239651
t=40	0.3415	3.961716937	0.051366	0.7153	4.327284	0.134649	5.270864	14.41353
t=50	0.3398	3.94199536	0.056357	0.6858	4.14882	0.176765	5.797528	19.33508
t=60	0.3345	3.880510441	0.072077	0.6757	4.087719	0.191602	7.473842	21.11884

ตาราง ข 7 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 60 วัตต์

4LPM 60w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	4.145011601	0	0.8111	4.906836	0	4.145011601	0	0
t=10	4.077726218	0.016366	0.7968	4.820327	0.017788	4.077726218	1.650071	1.794679
t=20	4.059164733	0.020928	0.7722	4.671506	0.049148	4.059164733	2.11489	5.037555
t=30	3.982598608	0.039971	0.7484	4.527526	0.080454	3.982598608	4.078066	8.377873
t=40	3.939675174	0.050807	0.7138	4.318209	0.127789	3.939675174	5.212014	13.63127
t=50	3.886310905	0.064445	0.6914	4.182698	0.159673	3.886310905	6.656716	17.3127
t=60	3.74361949	0.101853	0.6774	4.098004	0.180129	3.74361949	10.72203	19.73723

ตาราง ข 8 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 80 วัตต์

4LPM 80w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	4.080046404	0	0.8146	4.92801	0	4.080046404	0	0
t=10	4.059164733	0.005131	0.7805	4.721718	0.042762	4.059164733	0.514433	4.368994
t=20	3.972157773	0.026799	0.7618	4.60859	0.067013	3.972157773	2.716121	6.930953
t=30	3.911832947	0.042102	0.7423	4.490623	0.092944	3.911832947	4.300119	9.739997
t=40	3.816705336	0.066721	0.7124	4.30974	0.134058	3.816705336	6.899696	14.34587
t=50	3.629930394	0.116895	0.6523	3.946158	0.222193	3.629930394	12.40013	24.88119
t=60	3.316705336	0.207136	0.6354	3.84392	0.248442	3.316705336	23.01504	28.20271

ตาราง ข 9 ค่าจากการวัดและคำนวณได้จากการหาค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 วัตต์

4LPM 100w	absorbance 292 nm	concentrate (292)	lnC0/C	absorbance 664 nm	concentrate (664)	lnC0/C	%degration 292 nm	%degration 664 nm
t=0	4.128770302	0	0.8258	4.995765	0	4.128770302	0	0
t=10	4.081206497	0.011587	0.7879	4.766485	0.046981	4.081206497	1.165435	4.810255
t=20	4.032482599	0.023597	0.7559	4.572898	0.088444	4.032482599	2.387802	9.247255
t=30	3.94199536	0.046293	0.6933	4.194192	0.17489	3.94199536	4.738081	19.1115
t=40	3.852668213	0.069214	0.6857	4.148215	0.185912	3.852668213	7.166516	20.43168
t=50	3.302784223	0.223214	0.6583	3.982456	0.226692	3.302784223	25.00878	25.44433
t=60	3.153132251	0.269583	0.6033	3.649728	0.313938	3.153132251	30.94187	36.88049

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายจิรเวทย์ มากมี
วันเดือนปีเกิด	10 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1/3 หมู่ที่ 3 ต.ป่าชะ อ.บ้านนา จ.นครนายก 26110
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	094-553-7085
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนนครนายกวิทยาคม
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล

นายณัฐวัตร ท่วมเทียบ

วันเดือนปีเกิด

11 กันยายน 2538

สถานที่เกิด

อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

212/11 หมู่ที่ 11 ต.เกาะหลัก อ.เมือง

จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77000

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

085-679-4922

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

มัธยมศึกษาปีที่ 6

จากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย


พ.ศ. 2560

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายณัฐวัชร ถาวรวงษ์	
วันเดือนปีเกิด	09 มิถุนายน 2538	
สถานที่เกิด	แขวงบางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร	
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	2 หมู่บ้าน นภาลัย ซ.นภาลัย 13 เขตบางนา แขวงบางนา จ.กรุงเทพมหานคร 10260	
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	081-900-7009	
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	

พ.ศ. 2556

พ.ศ. 2560