



ดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน
Electrical Discharges of Plasma Ozonizer and Its Application

พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล
Pitchasak Chankuson

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Physics
Prince of Songkla University

2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ดิสซาร์จไฟฟ้าของพลาสมาไอโซไนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน
ผู้เขียน นายพิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล
สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล) (ดร.ธวัฒน์ชัย เทพนวล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลีเมสกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ ดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมาไอโซไนเซออร์และการประยุกต์ใช้งาน
ผู้เขียน นายพิชญ์ศักดิ์ จันทร์กฤต
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

เครื่องกำเนิดพลาสมาไอโซไนเซออร์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยหลอดไอโซไนเซออร์ยาว 0.21 เมตร ขั้วไฟฟ้าโลหะไร้สนิม และหน่วยจ่ายพลังงาน ขั้วไฟฟ้าภายในหุ้มด้วยแก้วไฟเร็กซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริก ขั้วไฟฟ้าภายนอกทำด้วยโลหะไร้สนิม ช่องดิสชาร์จมีขนาด 0.0075 เมตร ใช้กระแสไฟฟ้าสลับความต่างศักย์สูง ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยให้ปริมาณไอโซน 41-135 มิลลิกรัม O_3 /ลิตรของ O_2 ที่ศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ โดยมีอัตราการไหลของก๊าซเป็น 8 ลิตรต่อนาที พบว่าปริมาณความเข้มข้นของไอโซนเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากการประยุกต์ใช้ไอโซน เพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเสียออกฤทธิ์ แบ่งเป็น 2 กระบวนการ กระบวนการแรกเป็นกระบวนการบำบัดแบบขั้นตอนเดียว โดยผ่านไอโซนลงในน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเสียออกฤทธิ์ เปรียบเทียบกับกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม กับกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ตกตะกอนด้วยสารส้ม กับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนที่ 2 ผ่านไอโซนเป็นระยะเวลา 60 นาที จากผลการทดลองในกรณีสีชมพู พบว่าสามารถลดการดูดกลืนแสง ลงได้ร้อยละ 44.0, 47.8, 57.6, 65.0 และ 99.4 ตามลำดับ ค่าบีโอดี ลงได้ร้อยละ 36.0, 29.8, 89.5, 45.6 และ 95.6 ตามลำดับ และค่าซีโอดี ลงได้ร้อยละ 22.0, 19.0, 74.8, 38.0 และ 85.5 ตามลำดับ กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถบำบัดสีชมพูได้ดีกว่าสีแดงและสีน้ำเงินตามลำดับ

เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในก๊าซที่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่ระบบ ได้ใช้โปรแกรม BOLSIG ในการจำลองปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโตรด พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ความดัน 1,000 ทอร์ จะได้ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็น 41.40 Td ($1Td = 10^{-17} Vcm^2$) ค่าพลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ยเป็น 3.31 eV ค่าโมบิลิตีเป็น 0.66×10^6 torr $cm^2/V/s$ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็น 1.71×10^6 torr cm^2/s ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนเป็น $4.44 \times 10^{-3} cm^{-1}/torr^{-1}$ ค่าสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนเป็น $0.91 \times 10^{-1} cm^{-1}/torr^{-1}$ พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง

Thesis Title Electrical Discharges of Plasma Ozonizer and Its Application
Author Mr.Pitchasak Chankuson
Major Program Physics
Academic Year 2007

ABSTRACT

Plasma ozonizer consists of ozonizer cell with 0.21 m length and diameter of 35 mm, stainless steel electrode and high voltage power supply unit. An inner electrode was put in pyrex test tube which was a dielectric while discharge gap between electrode was fixed at 0.0075 m. High voltage supply for both electrode was AC with 50 Hz. The result showed that concentration of ozone generated was in rang of 41–135 mg of ozone/liter of oxygen feed at 8–11 kV_{AC} and optimum flow rate of 8 l/min.

For study of ozone application on dye wastewater treatment, the raw dye wastewater was treated by 2 processes. Firstly, one-stage wastewater treatment was carried out using ozonation, Alum coagulation and adsorption by activated carbon (coconut shell). Lastly, two-stage treatment was run under the condition of combined ozonation and adsorption by activated carbon, the other treatment was operated using combined ozonation and Alum coagulation. The results concluded that percentage of light absorbance was 44.0, 47.8, 57.6, 65.0 and 99.4, respectively. The percentage of BOD reduction was 36.0, 29.8, 89.5, 45.6 and 95.6, respectively. The percentage of COD reduction was 22.0, 19.0, 74.8, 38.0 and 85.5, respectively. Consequently the two-stage treatment was the highest efficiency method and was suitable color reduction for pink dyed solution compared to dyed red and blue solution.

To determine plasma parameters explaining electron distribution in gas under various external high voltage electric field, the BOLSIG program which was based on Boltzmann equations and mass and energy balance was used for this purpose. The results showed that at high voltage of 10 kV and pressure of 1,000 torr the induced electric field was 41.40 Td (1Td = 10^{-17} Vcm²), average electron energy of 3.31 eV, mobility of 0.66×10^6 torr cm²/V/s. In addition, effective diffusion, ionization and electron attachment coefficient was 1.71×10^6 torr cm²/s, 4.44×10^{-3} cm⁻¹/torr⁻¹ and 0.91×10^{-1} cm⁻¹/torr⁻¹. The simulated results was good relation to experimental results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา ภูริระวีชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ภูริระวีชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ในระหว่างการวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ดี ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล และ ดร.ธวัชชัย เทพนวล คณะกรรมการควบคุมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาเสนอแนะและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นักศึกษาปริญญาโท ปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ในการศึกษาเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประสงค์ คุณแม่จรี ที่ได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจ คอยสนับสนุน และให้ความรักความเข้าใจเสมอมา พี่มลิรัตน์ พี่นริศ จันท์กุล ที่ เป็นกำลังใจให้ และขอบคุณคุณจุฑาทิพย์ สายทองอินทร์ ที่อยู่เคียงข้างกันตลอดมา

พิชญ์ศักดิ์ จันท์กุล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
2 ทฤษฎี	9
2.1 พลาสมา	9
2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา	9
2.1.2 การเกิดพลาสมา	9
2.1.3 ชนิดของพลาสมาแบบไม่สมดุล	13
2.2 พารามิเตอร์ในการเกิดพลาสมา	14
2.2.1 ภาคตัดขวางการชน	14
2.2.2 โมบิลิตี้	16
2.2.3 ความนำไฟฟ้าของก๊าซ	16
2.2.4 การแพร่กระจาย	17
2.3 โอโซน	19
2.4 การสร้างโอโซนโดยกระบวนการดิสชาร์จไฟฟ้า	23
2.5 ปฏิกิริยาสลายตัวโอโซนในน้ำ	28
2.6 ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน	30
2.7 การประยุกต์ใช้ประโยชน์โอโซน	32
2.7.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์	32
2.7.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์	35
2.7.3 การควบคุมสาหร่าย	36
2.7.4 การกำจัดสี	36
2.8 การดูดซับ	39
2.8.1 ประเภทของสารดูดซับ	40
2.8.2 กลไกของการดูดซับ	40
2.8.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	40
2.8.4 สมดุลการดูดซับ	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีการวิจัย	42
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	44
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	45
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	46
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	50
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
4.1 การหาความเข้มข้นของปริมาณไอโซน	59
4.2 การหาความสัมพันธ์ของปริมาณไอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	60
4.3 การหาความสัมพันธ์ของปริมาณไอโซนกับความต่างศักย์ไฟฟ้า	62
4.4 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ	63
4.5 การประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเครื่องสำอาง	66
4.5.1 การบำบัดน้ำทิ้งจากการย้อมสีเครื่องสำอางด้วยไอโซน	66
4.5.2 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเครื่องสำอางโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม	71
4.5.3 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเครื่องสำอางโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับไอโซน	72
4.5.4 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเครื่องสำอางโดยดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	73
4.5.5 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเครื่องสำอางโดยดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ร่วมกับไอโซน	76
4.6 การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีย้อมสีเครื่องสำอางหลังการบำบัดด้วยไอโซน	80
5 พารามิเตอร์ในดิสชาร์จไฟฟ้า	84
5.1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม BOLSIG	86
5.2 การทำงานและผลจากการทำงานของโปรแกรม BOLSIG	87
6 สรุปผลการทดลอง	99
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	106
ก ระบบไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	107
ข สีสำหรับย้อมผ้า	109
ค การบำบัดน้ำเสียตามมาตรฐานอุตสาหกรรม	115
ง การตรวจวัดปริมาณไอโซน	118

สารบัญ (ต่อ)

จ	การหาค่าซีไอดี และค่าบีไอดี	119
ฉ	อินฟาเรดสเปกโทรสโคปี	129
ช	การกระจายความเร็วแบบแมกเวลล์	132
ซ	ฐานข้อมูลสำหรับโปรแกรม BOLSIG	142
ณ	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย	149
ญ	การเผยแพร่ผลงานจากวิทยานิพนธ์	152
ประวัติผู้เขียน		153

รายการตาราง

ตารางที่		หน้าที่
1	แสดงกลไกการชนกันของก๊าซ	10
2	แสดงปฏิกิริยาเนื่องจากกลไกการชนกันของก๊าซออกซิเจน	12
3	แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์กับสารออกซิเดนต์ต่างๆ	30
4	แสดงเวลาในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ประสิทธิภาพการกำจัด 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โอโซน, คลอรีน และเปอร์แมงกาเนต	35
5	แสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ	36
6	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี ข้อด้อยของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ	38
7	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที	70
8	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มของน้ำเสีย	72
9	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที ของน้ำเสีย	72
10	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ของน้ำเสีย	76
11	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที ของน้ำเสีย	76
12	แสดงหมู่ฟังก์ชันของเสียออกฤทธิ์ระจูดสีชมพูก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน	80
13	แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ	91

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้าที่
14	แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ	92
15	แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ	92
16	แสดงค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเอกระจุตปริมาตร 550 มิลลิลิตร ด้วยวิธีต่างๆ	101
17	แสดงโครงสร้างของสีย้อมชนิดต่างๆ จากงานที่ได้มีการศึกษา	112
18	แสดงลักษณะสมบัติน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	115
19	แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากพื้นที่ชุมชนทะเลน้อยจังหวัดพัทลุง	117
20	แสดงช่วงค่าบีโอดี และวิธีการเจือจางด้วยน้ำ	127
21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง wavenumber กับกลุ่มฟังก์ชันที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรด ได้ปานกลางและดีมาก	129
22	แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย	149

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้าที่
1	แสดงช่วงเวลาการเกิดไมโครดิสชาร์จเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเป็นกระแสลับ	3
2	แสดงวิธีต่างๆ ที่ทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ	9
3	แสดงการชนของอนุภาคทรงกลมตัน	15
4	แสดงการแพร่กระจายแอมบิโพลาร์	18
5	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของก๊าซโอโซน	21
6	แสดงโครงสร้างระดับพลังงานศักย์ของออกซิเจน	21
7	แสดงรูปแบบเครื่องผลิตโอโซนสนามไฟฟ้าแรงสูง แบบ Dielectric barrier discharge	23
8	แสดงปฏิกิริยาการเกิดโอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า	23
9	แสดงแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์พลาสมาดิสชาร์จและ พลาสมาเคมีในการดิสชาร์จไฟฟ้า	24
10	แสดงโอโซนเซอร์ที่ใช้ในการผลิตโอโซนในงานวิจัย	27
11	แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ	29
12	แสดงปฏิกิริยาสลายสารฟีนอลโดยโอโซน	33
13	แสดงปฏิกิริยาเคมีโอโซนออกซิไดซ์สาร Naphthalene	34
14	แสดงวิธีการดำเนินการวิจัยในการศึกษา	42
15	แสดงโอโซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	45
16	แสดงเครื่อง UV visible spectrophotometer	46
17	แสดงหัววัดศักย์ไฟฟ้า Hewlett Parkard รุ่น 54502A	46
18	แสดงหัววัดกระแสไฟฟ้า Tektronic รุ่น CT-1	47
19	แสดงเครื่องมือสำหรับการทำ Jar Test	47
20	แสดงเครื่องเขย่า KK รุ่น VRN-200	48
21	แสดงการต่อ midget impringer 2 ขวด ต่ออนุกรมที่ใช้วัดปริมาณโอโซน	51
22	แสดงกราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสงต่อปริมาณโอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ	60
23	แสดงปริมาณโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 6-10 ลิตรต่อ นาที ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์	61
24	แสดงปริมาณโอโซนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ ที่อัตราการ ไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ที่เวลาดิสชาร์จในช่วง 0.5-2.5 นาที	62
25	แสดงสัญญาณของกระแสดิสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้าที่
26	แสดงสัญญาณของกระแสดีสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที	64
27	แสดงสัญญาณของกระแสดีสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที	64
28	แสดงสัญญาณของกระแสดีสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที	65
29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมหลังจากผ่านโอโซน ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ที่เวลา 15, 30, 60 และ 90 นาที	66
30	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีย้อมสีชมพูหลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที	68
31	แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีย้อมสีแดง หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที	68
32	แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีย้อมสีน้ำเงิน หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที	69
33	แสดงปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำให้น้ำสีย้อมตกตะกอน	71
34	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเสียของเครื่องเจือปน ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำสีย้อมที่เวลาต่างๆ	73
35	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเสียของเครื่องเจือปน ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำสีย้อมที่เวลาต่างๆ	74
36	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเสียของเครื่องเจือปน ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำสีย้อมที่เวลาต่างๆ	75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้าที่
37	แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของน้ำสีข้ม สีชมพูหลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ	77
38	แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD ของน้ำสีข้ม สีชมพูระหว่าง หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ กับก่อนบำบัด	78
39	แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ของน้ำสีข้ม สีชมพูระหว่าง หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ กับก่อนบำบัด	79
40	แสดงผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีข้มเสื่อกระจูดสีชมพู ก่อนการบำบัดด้วยโอโซน	81
41	แสดงผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีข้มเสื่อกระจูดสีชมพู หลังการบำบัดด้วยโอโซน	82
42	แสดงผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีข้มเสื่อกระจูดสีชมพู ก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน	83
43	แสดงการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลาสมาชนิดไม่สมดุล	84
44	แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม BOLSIG	85
45	แสดงหน้าจอเมื่อเข้าสู่โปรแกรม BOLSIG	87
46	แสดงเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรม BOLSIG	88
47	แสดงหน้าจอก๊าซที่ใช้ในการทดลอง	88
48	แสดงหน้าจอเพื่อใส่ค่าของ E/p ที่พิจารณา	89
49	แสดงหน้าจอของโปรแกรม BOLSIG เมื่อพร้อมทำงาน	89
50	แสดงหน้าจอของโปรแกรม BOLSIG ขณะทำงาน	90
51	แสดงหน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำงานเสร็จ	90
52	แสดงหน้าจอผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม	91
53	แสดงหน้าจอผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม BOLSIG	93
54	แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์ ที่ค่า $E/n = 31.06-46.58 \text{ Td}$	94
55	แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ที่ค่า $E/n = 34.50-51.74 \text{ Td}$	95
56	แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์ ที่ค่า $E/n = 12.00-18.66 \text{ Td}$	95

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้าที่
57	แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์	96
58	แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์	96
59	แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์	97
60	แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (nd) ในซีนอน	98
61	แสดงการประยุกต์ใช้กราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจนที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์	98
62	แสดงระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	107
63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนแก่ variac กับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า	108
64	แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน	110
65	แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายสีย้อมสีชมพู	111
66	แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายสีย้อมสีแดง	111
67	แสดงกราฟการแจกแจงอัตราเร็วของก๊าซแบบแมกเวลล์	133
68	แสดงตารางการอินทิเกรตของเกาส์	134
69	แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ N_2	142
70	แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ O_2	143
71	แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ H_2	143
72	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ N_2	144
73	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ O_2	145
74	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ H_2	145

บทที่ 1

บทนำ

ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาเป็นการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ความดันสูงกว่า หรือเท่ากับความดันบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของขั้วไฟฟ้า ลักษณะของดิสชาร์จคล้ายกับดิสชาร์จเรืองแสง ดิสชาร์จโคโรนาสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ในระดับมิลลิแอมแปร์ และเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องโดยลำพัง เช่น กรณีสายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนานกัน จะเกิดการเรืองแสงรอบเส้นลวด เมื่อศักย์เพิ่มขึ้นบริเวณเรืองแสงกว้างขึ้น โคโรนาในอากาศมีผลทำให้เกิดโอโซน และออกไซด์ของไนโตรเจน (ชัยวิทย์, 2529) การนำดิสชาร์จโคโรนาไปใช้มีมากกว่า 100 ปี มีการนำไปใช้ทางการค้า เช่น การถ่ายภาพทางไฟฟ้า การกำจัดสารพิษ และการเกิดโอโซน (Elassion และ Kogelschatz, 1991)

การกำเนิดโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าในการดิสชาร์จน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ และสามารถทำได้ที่ความดันบรรยากาศ (Elassion และ Kogelschatz, 1991) เริ่มจากอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูง และมีพลังงานจลน์ในช่วง 6-7 eV คิดเป็นอุณหภูมิ 69,600-81,200 K ซึ่งเพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างโมเลกุลออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นอะตอม 2 อะตอม โดยการแตกตัวนี้จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การชนกันของอะตอมออกซิเจนสามารถจับตัวเป็นโมเลกุลใหม่ โดยอาจจะเป็น O₂ หรือ O₃ ก็ได้ นอกจากนี้การชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลออกซิเจนก็อาจเกิดขึ้นเป็นโอโซนเช่นกัน แต่การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลออกซิเจนจะไม่เกิดเป็นอะตอมออกซิเจนเสมอไป เพราะมีปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นไปได้ระหว่างการเกิดดิสชาร์จโคโรนามากกว่า 139 ปฏิกิริยา ข้อสำคัญของการกำเนิดโอโซนวิธีนี้ คืออากาศที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนจะต้องแห้งปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์โอโซน และมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดโอโซนอีกด้วย (ธวัชมันชัย, 2542)

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้หลายด้าน ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ รองจากก๊าซคลอรีนเท่านั้น ทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นรวดเร็ว และสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดซ์อื่น ๆ สามารถลดค่า BOD (Biological Oxygen Demand) และค่า COD (Chemical Oxygen Demand) ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ และไม่มีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เมื่อใช้ในปริมาณมากจะสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการออกซิไดซ์ได้ สามารถลดสี กลิ่น ความขุ่น และสารตั้งผิวได้ เพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานโอโซนจึงมีมากมายหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ในการ

บทที่ 1

บทนำ

ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาเป็นการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่มีความดันสูงกว่า หรือเท่ากับความดันบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของขั้วไฟฟ้า ลักษณะของดิสชาร์จคล้ายกับดิสชาร์จเรืองแสง ดิสชาร์จโคโรนาสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ในระดับมิลลิแอมแปร์ และเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องโดยลำพัง เช่น กรณีสายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนานกัน จะเกิดการเรืองแสงรอบเส้นลวด เมื่อศักย์เพิ่มขึ้นบริเวณเรืองแสงกว้างขึ้น โคโรนาในอากาศมีผลทำให้เกิดโอโซน และออกไซด์ของไนโตรเจน (ชัยวิทย์, 2529) การนำดิสชาร์จโคโรนาไปใช้มีมากกว่า 100 ปี มีการนำไปใช้ทางการค้า เช่น การถ่ายภาพทางไฟฟ้า การกำจัดสารพิษ และการเกิดโอโซน (Elasson และ Kogelschatz, 1991)

การกำเนิดโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าในการดิสชาร์จน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ และสามารถทำได้ด้วยความดันบรรยากาศ (Elasson และ Kogelschatz, 1991) เริ่มจากอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูง และมีพลังงานจลน์ในช่วง 6-7 eV คิดเป็นอุณหภูมิ 69,600-81,200 K ซึ่งเพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างโมเลกุลออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นอะตอม 2 อนุภาค โดยการแตกตัวนี้จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การชนกันของอะตอมออกซิเจนสามารถจับตัวเป็นโมเลกุลใหม่ โดยอาจจะเป็น O₂ หรือ O₃ ก็ได้ นอกจากนี้การชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลออกซิเจนก็อาจเกิดขึ้นเป็นโอโซนเช่นกัน แต่การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลออกซิเจนจะไม่เกิดเป็นอะตอมออกซิเจนเสมอไป เพราะมีปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นไปได้ระหว่างการเกิดดิสชาร์จโคโรนามากกว่า 139 ปฏิกิริยา ข้อสำคัญของการกำเนิดโอโซนวิธีนี้ คืออากาศที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนจะต้องแห้งปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์โอโซน และมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดโอโซนอีกด้วย (ธวัชมันชัย, 2542)

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้หลายด้าน ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ รองจากก๊าซคลอรีนเท่านั้น ทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นรวดเร็ว และสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดซ์อื่น ๆ สามารถลดค่า BOD (Biological Oxygen Demand) และ COD (Chemical Oxygen Demand) ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ และไม่มีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เมื่อใช้ในปริมาณมากจะสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการออกซิไดซ์ได้ สามารถลดสี กลิ่น ความขุ่น และสารตั้งผิวได้ เพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานโอโซนจึงมีมากมายหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ในการ

ฆ่าเชื้อโรคสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุขวดพลาสติก โรงงานอุตสาหกรรมใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ
ทิ้งจากโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น (ไพฑูรย์, 2545)

จากที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาในการศึกษาสมบัติต่างๆ ที่ทำให้เกิดโอโซน และนำมา
ศึกษาผลที่ได้จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียเสียอม และเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยวิธี
อื่นๆ เนื่องจากปัญหาน้ำเสียเสียอมเป็นปัญหาด้านมลภาวะทางน้ำของสังคม โดยเฉพาะในพื้นที่
ภาคใต้

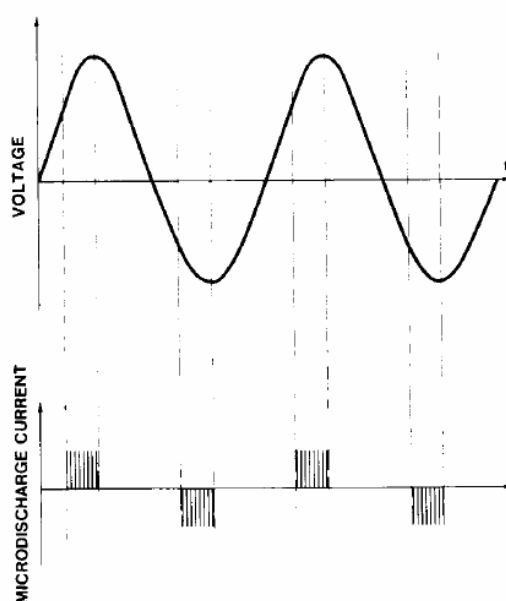
1.1 การตรวจเอกสาร

ได้มีการศึกษาการเกิดโอโซนโดยวิธีต่างๆ รวมทั้งปัจจัยที่มีต่อปริมาณโอโซนที่
เกิดขึ้นและที่สำคัญ คือการประยุกต์ใช้งานโอโซนในด้านต่างๆ

Hadj-Ziane *et al.* (1990) ได้ศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับดิสชาร์จโคโร
นาเพื่อกำเนิดก๊าซโอโซน โดยมีรูปทรงเรขาคณิตของขั้วอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดซ้อนกับขั้ว
อิเล็กโทรดท่อทรงกระบอก สรุปได้ว่า ที่ความดันต่ำ ขณะเกิดกระบวนการทางจลนศาสตร์ของการ
ผลิตก๊าซโอโซนนั้น ค่าความดันจะมีผลต่อการไหลของของไหลในโอโซนเซอร์ และสามารถทำให้
ผลผลิตก๊าซโอโซนได้สูงสุด โดยการหาอัตราการไหลและเวลาสัมผัส (contacting time) ของการ
แตกตัวของก๊าซในบริเวณช่องว่างดิสชาร์จที่ก๊าซไหลผ่าน

Elassion และ Kogelschatz. (1991) ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการ
เคมีพลาสมาแบบไม่สมดุลขนาดใหญ่ ซึ่งได้มุ่งประเด็นเน้นถึงการสังเคราะห์ก๊าซโอโซนจากระบบ
พลาสมาดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ และรายงานถึงพื้นฐานของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทางฟิสิกส์
และทางเคมีในระบบดิสชาร์จไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยการแยกอธิบายถึงระบบดิสชาร์จไฟฟ้าแบบ
ดิสชาร์จไฟฟ้าเรืองแสง ดิสชาร์จไฟฟ้าโคโรนา ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ ดิสชาร์จโดยคลื่นวิทยุ
และ ดิสชาร์จไมโครเวฟ เขาได้ออกแบบอุปกรณ์และทำการทดลองระบบพลาสมาโอโซนเซอร์ที่
เกิดขึ้น และถ่ายภาพปรากฏการณ์ไมโครดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

Elassion *et al.* (1991) ศึกษาการเกิดการดิสชาร์จไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในการดิสชาร์จแบบมีไดอิเล็กตริกขวางกั้นในออกซิเจนหรือ
อากาศที่ปริมาณ และระดับความดันบรรยากาศ การดิสชาร์จโดยการถ่ายโอนข้ามช่องว่างอากาศ
(space gap) ทำให้เกิดจำนวนของไมโครดิสชาร์จ (microdischarge) ที่มีช่วงอายุสั้นๆ จำนวน
มากมาย ไมโครดิสชาร์จเหล่านี้จะถูกแบ่งกันไปในที่ว่างและช่วงเวลาต่างๆ ที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และ
ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดนั้นกระแสการขจัด (displacement current) มีค่าเท่ากับศูนย์และการทำงานของ
ไมโครดิสชาร์จจะสิ้นสุดลง และจะเริ่มทำงานอีกครั้ง เมื่อมีการเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น
ในช่องว่างระหว่างครึ่งคลื่นถัดไป แสดงดังภาพประกอบที่ 1



ภาพประกอบที่ 1 แสดงช่วงเวลาการเกิดไมโครดิสชาร์จเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเป็นกระแสสลับ
(Elassion และ Kogelschatz, 1991)

Yamabe *et al.* (1994) ได้ศึกษาถึงหลอดกำเนิดไอโซนชนิดใหม่ซึ่งไม่มีไดอิเล็ก-
ตริกอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า จะได้มาซึ่งการดิสชาร์จแบบเรืองแสง และได้ศึกษาถึงลักษณะพื้นฐานของ
การกำเนิดไอโซน และความสามารถที่เป็นไปได้ในการพัฒนาผลผลิตไอโซนสำหรับการวัดไอโซน
ใช้การดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 253 นาโนเมตร จากหลอดปรอทซึ่งผสมก๊าซ He/O₂ ที่ความ
ดันบรรยากาศ

Masato *et al.* (1994) ศึกษาการใช้แบบจำลองวิเคราะห์ transient สำหรับการ
เบรคดาวน์ของไดอิเล็กตริก และวิเคราะห์ปรากฏการณ์ไดอิเล็กตริกดิสชาร์จโดยใช้วิธีไฟไนต์ลิ-
เมนต์ รวมถึงการอธิบายคุณสมบัติของปริมาณสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่ขึ้นกับความเข้มของ
สนามไฟฟ้า ความสัมพันธ์ผลจากการวิเคราะห์และรูปร่าง fractal ภายใต้เงื่อนไขที่มีการวัด

Perkins *et al.* (1995) ศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วยไอโซนและผลกระทบของ
อุณหภูมิและค่า pH ที่มีต่ออัตราการกำจัดสีย้อม รวมทั้งศึกษานำน้ำทิ้งที่ผ่านการกำจัดสีด้วย
ไอโซนกลับมาใช้ในการย้อมสีใหม่ พบว่า ไอโซนสามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างรวดเร็ว โดยที่
อุณหภูมิและค่า pH มีต่ออัตราการกำจัดสีน้อยมาก และน้ำสีที่ผ่านการบำบัดแล้วยังสามารถนำ
กลับมาใช้ในกระบวนการย้อมได้อีกด้วย

Hegelar *et al.* (1997) ได้รายงานการศึกษาการวัดความหนาแน่นไอโซนโดยการ
ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต หลังการปลดปล่อยกระแสบวกและลบในช่องว่างที่มีรูปทรงแบบ wire
to plate ความยาว 45 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2.5 เซนติเมตร หลังการ

ปลดปล่อยกระแสบวกหรือลบอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองชนิดความหนาแน่น โอโซนสูงสุดจะอยู่บริเวณพื้นที่ด้านล่างของขั้วไฟฟ้าที่เป็นลวดตรงไปยังแผ่นศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ความหนาแน่น โอโซนจะลดลงอย่างรวดเร็ว การปลดปล่อยกระแสบวกผลิตความหนาแน่นโอโซนได้มากกว่าการปลดปล่อยกระแสลบเป็น 2 เท่า โดยใช้ช่วงเวลาพัลส์เดียวกัน

Liakou *et al.* (1997) ทดลองใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ ให้เป็นสารประกอบที่ง่ายต่อการย่อยสลาย โดยได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนที่มีต่อผงสีอะโซ ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ รวมทั้งหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้อธิบายการกำจัดสี การเปลี่ยนแปลงของค่า COD และ BOD รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่เกิดปฏิกิริยากับระยะเวลา

Yang *et al.* (1998) ได้ศึกษาการใช้ UV/H₂O₂ ในการกำจัดสีน้ำทิ้งในโรงงานย้อม โดยการทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำถูกออกซิไดซ์กลายเป็นก๊าซ CO₂ และน้ำ ซึ่งจะไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยรังสี UV จะทำให้โมเลกุลของ H₂O แตกตัว และเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์เกิดเป็นเรดิคัลของสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์โมเลกุลอื่นได้ ทำให้สารอินทรีย์เหล่านั้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและมีขนาดเล็กลง เป็นสารไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องกำจัดตะกอน และก๊าซที่ได้ไม่มีกลิ่นเหม็นและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

Murphy และ Morrow. (2002) ศึกษาผลผลิตของโอโซนที่ได้จากดิสชาร์จไฟฟ้าแบรีเออร์ที่ช่องดิสชาร์จหุ้มด้วย glass sphere พบว่า การมีอยู่ของ glass sphere จะทำให้ศักย์ของการเบรคดาวน์ลดลง แต่อัตราการเกิดโอโซนจะน้อยกว่าที่มีศักย์มากกว่าช่องอากาศของโอโซน-เซอร์ทั่วไป คุณลักษณะการดิสชาร์จพบในช่วงระหว่าง steady glow และ short-lived filament ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของ sphere ความกว้างของช่องดิสชาร์จ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซ และก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

Chen *et al.* (2002) ศึกษาแบบจำลองทางตัวเลขของการเกิดโอโซนในอากาศที่บริสุทธิ์แห้ง โดยการดิสชาร์จโคโรนากระแสสลับ จากลวดบาง แบบจำลองได้รวมกระบวนการทางกายภาพในโคโรนาดิสชาร์จ รวมถึงด้านเคมีของการเกิดโอโซน และออกไซด์ไนโตรเจนที่เกิดจากการดิสชาร์จโคโรนา ประมาณ 80% ของโอโซนที่เกิดเป็นผลจากไนโตรเจนที่ถูกกระตุ้นและโมเลกุลของออกซิเจน พารามิเตอร์ที่ศึกษาในขณะที่มีการเกิดโอโซน ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสเชิงเส้น (0.1-100 ไมโครแอมป์แปรต่อเซนติเมตร ของลวด) รัศมีของลวด (10-1000 ไมโครเมตร) อุณหภูมิ (300-800 องศาเซลเซียส) และความเร็วอากาศ (0.05-2 เมตรต่อวินาที) พบว่าอัตราของการเกิดโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสและขนาดของลวด และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศมีผลต่อการกระจายของโอโซน แต่ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดโอโซน

Malik. (2003) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อม Acid yellow 36 ออกจากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยและแกลบข้าว ผลจากการทดลองพบว่าการดูดซับสี Acid yellow 36 เกิดได้ดีที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 และจากการศึกษาโคเนติกของการดูดซับ พบว่าขึ้นกำหนดอัตราการดูดซับแบบการแพร่ภายใน (intraparticle diffusion) ความสามารถในการดูดซับสี Acid yellow 36 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยและแกลบข้าวมีค่าเท่ากับ 183.8 และ 86.9 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยและแกลบข้าว เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีราคาถูกและสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมแอซิดได้

Garg *et al.* (2003) ได้ศึกษาการดูดซับ Malachite green โดยใช้ขี้เลื่อยที่ปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัสและกรดซัลฟิวริก ปัจจัยที่กำหนดได้แก่ ความเข้มข้นของสี ปริมาณของสารดูดซับ และเวลาการเขย่า ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกสูงกว่าขี้เลื่อยที่ปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัส และค่าพีเอชเริ่มต้นที่การดูดซับด้วยสารดูดซับทั้งสองเกิดได้ดี คือช่วงพีเอช 6-9 ซึ่งการกำจัด Malachite green เกิดได้ดีกับสารละลายที่เจือจาง

Ono และ Oda. (2003) primary และ secondary streamer ของพลาสมาโคโรนา ดิสชาร์จ์ สังเกตจากช่องระหว่างจุดถึงระนาบ (point-to-plane gap) ใช้กล้อง CCD short-gated อิทธิพลของความเข้มออกซิเจนและศักย์ที่ให้เข้าไปมีผลต่อคุณสมบัติการเกิดของ streamer ทั้งสอง แสดงถึงความเร็วของการแพร่ เส้นผ่านศูนย์กลาง และรูปร่างของ streamer มากเป็นผลจากความเข้มข้นของออกซิเจน ในไนโตรเจนบริสุทธิ์ primary streamer จะแตกออกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2-0.4 มิลลิเมตร ขณะที่ในอากาศ การแตกตัวไม่ปรากฏอย่างสมบูรณ์ รูปร่างของ primary streamer จะเรียบเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 มิลลิเมตร หลัง primary streamer มาถึงที่แคโทด secondary streamer ขยายจากแอโนดไปยังแคโทด เป็นครึ่งหนึ่งของช่อง ความยาวของการแพร่ของ secondary streamer เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นขณะให้สนาม จะแสดงอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้โดย secondary streamer ใช้พลังงานทั้งหมดโดยเพิ่มการดิสชาร์จ์เมื่อให้ศักย์

Ono และ Oda. (2004) การกระจายในช่องว่างของความหนาแน่นไอโซนขณะเกิดพลาสมาโคโรนา ดิสชาร์จ์ที่ระยะ 40 ไมโครเมตร ใช้วิธีการดูดกลืนเลเซอร์ 2 ลักษณะ ดิสชาร์จ์เกิดขึ้นที่ช่องระหว่าง point-to-plane ห่างกัน 13 มิลลิเมตร ในภาวะอากาศแห้งที่ระยะเวลาของพัลส์ 100 นาโนวินาที ผลที่ได้แสดงความหนาแน่นไอโซนเพิ่มขึ้นประมาณ 100 ไมโครวินาที หลังเกิดพัลส์ ดิสชาร์จ์อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของไอโซนและ ปฏิกิริยาการเกิดเป็น $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$ $3.5 \times 10^{-34} \text{ cm}^6$ จะพบไอโซนกระจายมากที่สุดในช่อง streamer ที่สองความคิดนี้ให้ไอโซนมากที่สุดโดย streamer ลำดับที่สอง หลังเกิดพัลส์ ดิสชาร์จ์ ไอโซนจะกระจาย

จากช่อง streamer ที่สองไปใน background สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนประมาณ 0.1 ถึง $0.2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

ประสาร ชาตะรัตน์. (2538) สร้างเครื่องผลิตไอออนด้วยกระบวนการโคโรนา ไชเรนท์ดิสชาร์จ ชนิด Wire to Plane โดยไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 15 kV ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเกิดไอออน พบว่า ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เกิดไมโครดิสชาร์จ (ที่ความดันบรรยากาศ 760 mmHg) ต่ำสุดที่ 7 kV ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณไอออนที่ละลายในน้ำ พบว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดไอออน โดยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ การเกิดไอออนจะสูงตาม ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนกับปริมาณไอออน พบว่าปริมาณไอออนจะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ($2-10 \text{ psi}$) และปริมาณไอออนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการเกิดดิสชาร์จ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอออนกับเวลาดิสชาร์จ พบว่าอุณหภูมิสูงการเกิดไอออนจะลดลง นำไปใช้การฆ่าเชื้อโรค (*Bacillus Subtilis*) พบว่าการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์จะดีขึ้นหากใช้เวลาในการผ่านไอออนนาน ๆ

ธวัณชัย เทพนวล. (2541) ศึกษาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไอออนที่อาศัยเทคนิคดิสชาร์จแบบไชเรนท์ ศึกษา 3 ส่วน คือ 1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ความถี่ 50 Hz 2. การเตรียมอากาศแห้งสำหรับใช้ในการผลิตไอออน ตัวกรองอากาศแห้งที่ใช้สาร Zeolite (มีคุณสมบัติในการดูดซับไอน้ำ) และ 3. เซลล์ไอออนไนเซอร์ ศึกษาทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่อการผลิตไอออนที่ภาวะเหมาะสมของระบบ (ศักย์ไฟฟ้า 7.90 kV อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิห้องปรับอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60%) เมื่อเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า ผลผลิตไอออนเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้า เป็นรูปเอกซโปเนนเชียล เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น (อัตราการผลิตไอออนเพิ่มขึ้น) ทำให้ปริมาณความเข้มข้นที่ได้มีค่าลดลง และเปลี่ยนวัสดุที่ใช้

ก. ใช้/ไม่ใช้ ตัวกรองอากาศแห้งของระบบ พบว่าผลผลิตไอออนที่ได้จากสารซีโอไลต์ จะให้ผลผลิตมากกว่าไม่ได้ใช้ถึง 7 เท่า

ข. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าภายใน (อะลูมิเนียมบาง/ลวดทองแดง) พบว่าขั้วที่ทำด้วยทองแดงให้ผลผลิตไอออนมากกว่า อะลูมิเนียม 2.69 เท่า

ค. เปลี่ยนพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด (เพิ่มความยาวเป็น 2 เท่าจากเซลล์เดิม) พบว่าปริมาณไอออนที่ได้เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า

นำผลผลิตไอออนที่สภาวะเหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำดิบผ่านการกรอง น้ำเสีย และน้ำนากุ้ง พบว่าไอออนใช้เวลาในการผ่านน้ำ 0.5 นาที สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเชื้อ 10^3 CFU/ml ได้ 100% สำหรับน้ำดิบผ่านการกรอง และใช้เวลา 3 นาที ในน้ำนากุ้งซึ่งทำให้ปราศจากเชื้อแบคทีเรียชนิด *Vibrio sp.* ที่ระดับ 500 CFU/ml ได้ 100% สำหรับน้ำเสียต้องใช้เวลา 10 นาที ในการทำให้ปราศจากเชื้อแบคทีเรียได้ 100% ที่ระดับเชื้อ $2 \times 10^4 \text{ CFU/ml}$

ไพฑูรย์ ไทยพันธ์. (2544) ศึกษากระบวนการโอโซนเซอร์ที่มีขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก กลวง 2 ขั้ว ซ้อนกัน ขั้วไฟฟ้าภายในทำจากสแตนเลส และถูกหุ้มด้วยแก้ว pyrex ซึ่งทำหน้าที่เป็น ไดอิเล็กทริก ขั้วไฟฟ้าภายนอกทำจากแก้ว pyrex เมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนไปยังช่องดิสชาร์จระหว่าง ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง พร้อมจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะได้โอโซน ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนตั้งแต่ 6-10 ลิตรต่อนาที พบว่าอัตราการไหลของออกซิเจนที่ให้ ปริมาณโอโซนสูงสุดคือ 8 ลิตรต่อนาที ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ได้มากขึ้น เมื่อจ่าย กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์มากขึ้น กระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดโอโซน โดยใช้หัววัด กระแส CT-1 พบว่ากระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นพัลส์ ค่อนข้างคงที่ โดยความต่างศักย์ เฉลี่ยประมาณ 4.17 โวลท์ (เมื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างดิสชาร์จ โดยใช้อัตราส่วน 5 mV ต่อ 1 mA) มีค่ากระแสเท่ากับ 0.834 แอมแปร์ ค่า rise time ประมาณ 1.7 นาโนวินาที ส่วนตัวแปรที่ต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ให้เครื่องกำเนิดโอโซน คือค่า duration time ของการเกิดพัลส์แต่ละครั้ง (ช่วงเวลาระหว่างพัลส์) พบว่าที่ 2 kV พัลส์จะไม่ต่อเนื่องกัน อย่างชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นช่วงเวลาระหว่างแต่ละพัลส์ได้ แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เป็น 6 kV พัลส์ที่เกิดขึ้นจะมีช่วงเวลาระหว่างพัลส์ แต่ละครั้งน้อยมาก มีลักษณะเหมือนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง นั่นคือมีค่า duration time ต่ำมาก กล่าวโดยสรุปคือเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ค่า duration time ระหว่างพัลส์จะลดลง นั่นคือปริมาณโอโซนเพิ่มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

การประยุกต์ใช้งานเพื่อบำบัดน้ำเสียจากสี่ย้อมเสียอเนกประสงค์หัวแปร 3 ตัวแปร คือ ค่าการดูดกลืนแสง ต้องใช้ความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืน แสงของน้ำสีจากการย้อมสีเสียอเนกประสงค์ ค่า BOD และ ค่า COD โดยบำบัดด้วยวิธี 1. การใช้โอโซน 2. การตกตะกอนด้วยสารส้ม 3. การกรองด้วยเมมเบรน ระบบ Ultrafiltration 4. การใช้โอโซน ร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม 5. การใช้โอโซนร่วมกับการกรองด้วยเมมเบรน ระบบ Ultrafiltration ศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสี่ย้อมหลังการบำบัดด้วยโอโซน ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

อย่างไรก็ดีในงานของไพฑูรย์ไม่ได้มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าปริมาณความเข้มข้นของ โอโซนมีผลต่อความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์มากน้อยเพียงใด ดังนั้นโครงร่างวิทยานิพนธ์นี้จึงมี ความสนใจการบำบัดน้ำเสียจากน้ำทิ้งจากการย้อมสีเสียอเนกประสงค์ที่เกิดขึ้นในจังหวัดพัทลุง และ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสี่ย้อมนั้น ๆ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า ของกระบวนการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไดอิเล็กทริกต่อการสร้างโอโซน ตลอดจนการนำไปประมมา ทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าในหลอดโอโซน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตโอโซน และคุณภาพของน้ำเสี้ยว
2. วิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม BOLSIG

1.3 ขอบเขตของงาน

1. ออกแบบและทดสอบระบบขั้วอิเล็กโทรดใหม่สำหรับพลาสมาโอโซนเซอร์
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้า ที่มีการให้โอโซนเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 6-10 l/min ศักย์ไฟฟ้า ในช่วง 8-11 kV_{AC} และวัดค่ากระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาผลที่ได้จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย และเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยวิธีการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม และ วิธีการบำบัดด้วยโอโซน ร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)
4. ศึกษาสมบัติทางเคมีของสารละลายก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน โดย เครื่อง FTIR
5. ทดสอบสมบัติของน้ำเสี้ยวตามมาตรฐานมอก. (มาตรฐานอุตสาหกรรม) ก่อน และหลังบำบัดด้วยโอโซน
6. ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม BOLSIG

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องกำเนิดโอโซนสำหรับใช้งาน
2. การประยุกต์ใช้งานโอโซน กับงานด้านสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสีย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 พลาสมา

ในทางฟิสิกส์ และเคมี สามารถอธิบายได้ว่า พลาสมา คือก๊าซที่มีสภาพเป็นไอออน และมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้ หมายความว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น

สถานะที่ 4 ของสสารนี้ มีการเอ่ยถึงครั้งแรก โดยเซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อค.ศ.1879 และคิดคำว่าพลาสมา (plasma) โดยเออร์วิง แลงมัวร์ (Irving Langmuir) เมื่อค.ศ.1928 เนื่องจากเขานึกถึงพลาสมาของเลือด

พลาสมาในสถานะก๊าซ (gaseous plasma) จะประกอบด้วยประจุ อิเล็กตรอน และอนุภาคอิสระ ซึ่งสามารถกระตุ้นให้สารต่างๆ เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา

พลาสมาเป็นส่วนผสมของก๊าซที่มีทั้งอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นลบ บวก และกลาง อนุภาคที่เป็นบวกคือ cations แต่อนุภาคที่เป็นลบอาจเป็นได้ทั้ง anions และอิเล็กตรอน ส่วนอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นกลางอาจเป็นส่วนผสมของอนุภาคอิสระหรือก๊าซที่อยู่ในสภาวะปกติต่างๆ คุณสมบัติสำคัญของพลาสมาคือ

ก. คุณสมบัติ Quasi-Neutral ความหนาแน่นทั้งหมดของอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นลบ จะต้องเท่ากับความหนาแน่นทั้งหมดของอนุภาคที่มีค่าประจุเป็นบวก

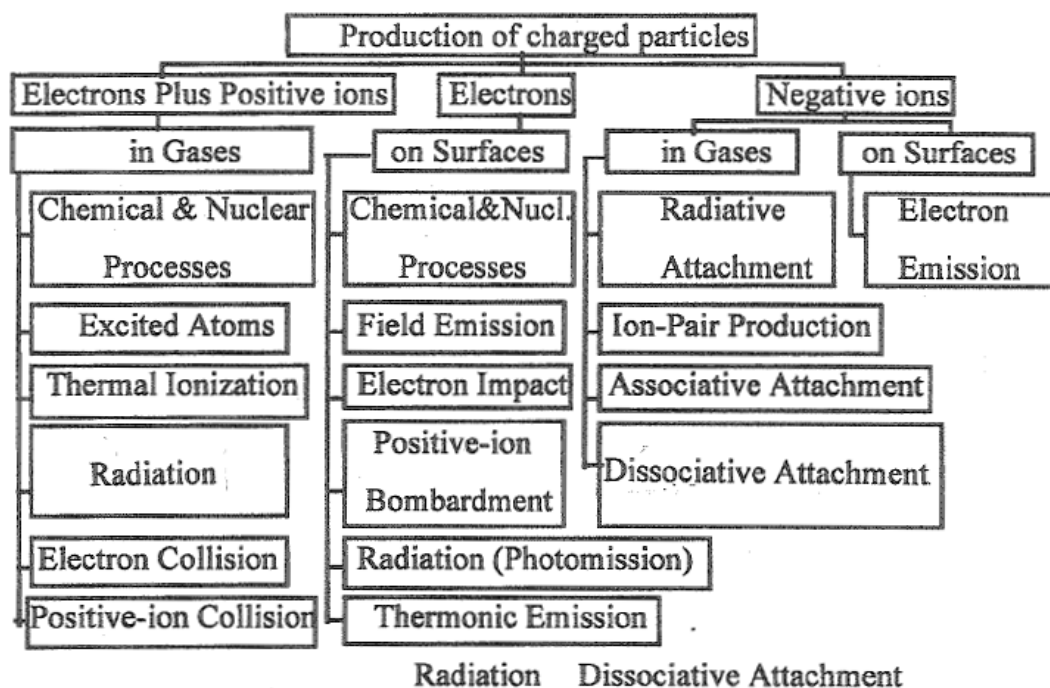
ข. อันตรกิริยาดัวยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลาสมาสามารถมีอันตรกิริยาภายใต้สภาวะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เนื่องจากพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุ

โดยทั่วไปพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้ทุกสภาวะ พลาสมาที่อยู่ในสภาวะของแข็งจะถูกเรียกว่า solid-state plasma ในขณะที่พลาสมาที่เกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซจะไม่มีชื่อเรียกเฉพาะ พลาสมาไม่เหมือนก๊าซโดยทั่วไป กล่าวคือ พลาสมาจะมีลักษณะแตกต่างไปขึ้นกับความดัน ความหนาแน่นของประจุ ปริมาตร อุณหภูมิ เป็นต้น

2.1.2 การเกิดพลาสมา

การทำให้เกิดพลาสมาอาจทำได้หลายวิธี เช่น การชนกันระหว่างรังสีคอสมิกกับก๊าซที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากมายในโมเลกุลของก๊าซ และทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ กระบวนการที่ดึงอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซ ทำให้เกิดประจุบวก เรียกว่า ionization กระบวนการดึงอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของของแข็งเรียกว่า electron emission

กระบวนการทั้งสองกระบวนการนี้มีความสำคัญพอ ๆ กัน ในการทำให้เกิดพลาสมา อิเล็กตรอน และประจุที่เกิดขึ้นในวัฏภาคก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการชนกับผิวของของแข็งและได้อิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ หลุดออกมา ในเวลาเดียวกัน อิเล็กตรอนพวกนี้ก็สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซตัวอื่นทำให้เกิด ionization ได้ วิธีการอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับสร้างอนุภาคที่มีประจุสามารถแบ่งได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2



ภาพประกอบที่ 2 แสดงวิธีต่างๆ ที่ทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ (Nasser, 1971)

จากภาพประกอบที่ 2 พบว่าประจุลบสามารถเกิดขึ้นได้จากอิเล็กตรอนอิสระที่รวมตัวกันเป็นกลาง (neutral atom or molecules) ก๊าซที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 1-2 ตัว จะมีช่องว่างในวงอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด ซึ่งง่ายในการชนกับอิเล็กตรอนอีกตัว เพื่อเติมลงไปในช่วงว่างนั้น และทำให้เกิดประจุลบขึ้น ก๊าซพวกนี้ เช่น ออกซิเจน

พลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้จากการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลาง (เช่น ก๊าซมีเทน) และอิเล็กตรอนที่ปล่อยมาจากผิวของขั้วโลหะ (metal electrode) เนื่องจากสนามไฟฟ้า กระบวนการนี้เรียกกันทั่วไปว่า field emission process อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวของขั้วโลหะจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ทันทีในทิศทางของสนามไฟฟ้า และสามารถชนกับอนุภาคที่เป็นกลางเกิดเป็น ionized gases และอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ อิเล็กตรอนจำนวนมาก อนุภาคก๊าซที่มีประจุ และอนุภาคอิสระ จะทำให้เกิดพลาสมาขึ้นได้ภายในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากเริ่มมีสนามไฟฟ้า ปฏิกริยาอื่นที่สามารถเกิดได้ภายใต้สภาวะพลาสมาขึ้นนี้ ทั้งปฏิกริยาการรวมตัวเป็นผลิตภัณฑ์ และปฏิกริยาการแตกตัวเป็นอนุภาคต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงกลไกการชนกันของก๊าซ (Nasser, 1971)

Collisions	
Elastic Collision	$e + A \rightarrow e + A$
Excitation	$e + A \rightarrow e + A^*$
Ionization	$e + A \rightarrow 2e + A^+$
Attachment	$e + A \rightarrow A^-$
Dissociative Attachment	$e + B_2 \rightarrow B^- + B$
Recombination	$e + B_2^+ \rightarrow B_2$
Detachment	$e + B_2^- \rightarrow 2e + B_2$
Ion Recombination	$A^- + B^+ \rightarrow AB$
Charge Transfer	$A^\pm + B \rightarrow B^\pm + A$
Electronic Decomposition	$e + AB \rightarrow A + B + e$
Atomic Decomposition	$A^* + B_2 \rightarrow AB + B$

ขั้นตอนต่างๆ ของ field emission process ได้แก่ การชนกันระหว่างอนุภาคด้วยตัวเอง และการชนกันระหว่างอนุภาคกับผิวของขั้วโลหะหรืออิเล็กตรอน รวมเรียกว่าปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้า (electric discharge phenomena) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของงานวิจัยนี้ โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณากรณีของก๊าซออกซิเจนเป็นสำคัญ เพราะก๊าซออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดโอโซนผ่านปฏิกิริยาในลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงปฏิกิริยาเนื่องจากกลไกการชนกันของก๊าซออกซิเจน (Soria et al, 2004)

การชน	ปฏิกิริยา
Elastic Collision	$e + O_2 \rightarrow e + O_2$
Excitation	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(a^1\Delta)$ $e + O_2 \rightarrow e + O_2(b^1\Sigma)$
Ionization	$e + O_2 \rightarrow 2e + O_2^+$
Attachment	$e + O_2 \rightarrow O_2^-$
Dissociative Attachment	$e + O_2 \rightarrow O^- + O$
Recombination	$O^- + O_2^+ \rightarrow O + O_2$
Detachment	$O_2^- + O_2^* \rightarrow e + 2O_2$
Ion Recombination	$O_2^- + O_2^+ \rightarrow 2O_2$
Charge Transfer	$O^+ + O_2 \rightarrow O + O_2^+$
Electronic Decomposition	$e + O_2 \rightarrow 2e + O^+ + O$ $e + O_3 \rightarrow e + O + O_2$
Atomic Decomposition	$O + 2O_2 \rightarrow O_3 + O_2$

พลาสมาที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรกคือ thermal plasma ซึ่งจะเกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิของก๊าซสูงพอๆ กับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน อาจเรียกว่า พลาสมาสมดุล (equilibrium plasma) อีกชนิดหนึ่งคือ non-thermal plasma ซึ่งจะเกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิของก๊าซต่ำแต่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูง อาจเรียกว่า พลาสมาชนิดไม่สมดุล (non-equilibrium plasma) อิเล็กตรอนจะมีพลังงานอยู่ในช่วง 1-10 eV ซึ่งสามารถมีอุณหภูมิได้สูงถึง 10,000 – 100,000 องศาเซลวิน (Rosache, 1993)

2.1.3 ชนิดของพลาสมาแบบไม่สมดุล

ก. ดิสชาร์จความถี่สูง (Radio frequency discharge)

คลื่นความถี่สูงนี้ใช้ผลิตพลาสมาสำหรับการวัดการปลดปล่อยของแสงที่มองเห็นได้ ชั่วไฟฟ้าจะอยู่ภายนอกของส่วนที่จะเกิดพลาสมา เพื่อป้องกันการกักร้อนและการปะปนของพลาสมา สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่นสูงมากกว่าขนาดของหลอดทดลอง ทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous plasma) เทคนิคนี้จะได้ดีที่ความดันต่ำ และบางครั้งสามารถใช้ได้ที่ความดันบรรยากาศในการทำพลาสมาสมดุล

ข. ดิสชาร์จคลื่นไมโครเวฟ (Microwave discharge)

เทคนิคนี้ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ประมาณ 0.3–10 GHz ผ่านลงในหลอดทดลองโดยตรง โดยใช้ส่วนประกอบที่เรียกว่า resonant cavity มีการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของมีเทน โดยตรงภายใต้อิทธิพลของเทคนิคนี้โดย (Zerger *et al*, 1992)

ค. ดิสชาร์จเรืองแสง (Glow discharge)

พลาสมาชนิดนี้เกิดที่ความดันต่ำประมาณ 1–10 มิลลิบาร์ ระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโตรดซึ่งเคลือบอยู่ในหลอดทดลอง สามารถใช้เทคนิคนี้ได้กับไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ เทคนิคนี้พบเห็นโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดนีออน แต่ไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี

ง. ดิสชาร์จโคโรนา (Corona discharge)

สืบเนื่องจากเทคนิค glow discharge เมื่อทำที่ความดันสูงขึ้น พลาสมาจะไม่เสถียรและกลายเป็นประจุไฟฟ้าแรงสูงซึ่งยากที่จะควบคุม การใช้ขั้วโลหะ 2 แผ่น หรือ 2 ชุด วางในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้พลาสมาในความดันสูง ๆ มีความเสถียรขึ้น วิธีนี้คือ corona discharge ลักษณะของพลาสมาจะแตกต่างกันตามชนิดของขั้ว แต่เนื่องจากส่วนเกิดปฏิกิริยารอบ ๆ ตัวขั้วมีขนาดเล็กมาก ทำให้เทคนิคนี้ไม่เหมาะสมสำหรับผลิตสารเคมีที่เป็นก๊าซจำนวนมากในอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในการตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้าได้

จ. ไดอิเล็กทริกแบร์เรียร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge)

หลักการคือ ประจุไฟฟ้าจะเกิดในช่องว่างสำหรับทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นขั้วโลหะที่สมมาตรกัน 2 แผ่น หรืออาจเป็นช่องว่างวงแหวนซึ่งอยู่ระหว่างขั้วทรงกระบอก 2 ขนาดซ้อนกัน ขั้วแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นหรือแผ่นใดแผ่นหนึ่งจะมี dielectric layer คลุมอยู่ ซึ่งโดยปกติมักใช้กระจกแก้วใส เทคนิคนี้อาจรู้จักกันในชื่อ silent electric discharge ซึ่งมีงานทดลองมากมายเกี่ยวกับพลาสมาแบบนี้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (Nasser, 1971) เทคนิคนี้สามารถใช้ได้ทั้งที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันไม่สูงมากนัก โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz พลาสมาจะถูกผลิตออกมามากมายในสภาวะก๊าซ และถูกเรียกว่า micro discharge ซึ่งกระจายอยู่ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น

การแตกตัวเป็นประจุของก๊าซจะเกิดขึ้น (ionization) ประจุจะเคลื่อนย้ายและสะสมอยู่ที่ผิวของกระจกแก้วซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าขาเข้า ไม่กี่วินาทีสนามไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดการสมดุลกันและหักล้างกันไป และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้สูงขึ้น micro discharge จะเกิดขึ้นมาใหม่อีกครั้งทันทีที่สนามไฟฟ้าพอเหมาะในช่องว่างนั้น

โดยสรุปแล้ว ไดอิเล็กทริก มีหน้าที่ 2 ประการคือ จำกัดการเคลื่อนย้ายของประจุไปยังขั้วไม่ให้มากจนเกินไป ซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจร อีกประการคือช่วยกระจายไมโครดิสชาร์จ ให้ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสร่วมสัมผัสกับอนุภาคของก๊าซให้ได้มากที่สุด เทคนิคนี้ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโอโซน และกำจัดสารพิษพวก NO_x และ SO_x ออกจากก๊าซจากการเผาไหม้ เป็นต้น

2.2 พารามิเตอร์ในการเกิดพลาสมา

ในการเกิดพลาสมาจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอนุภาคของก๊าซ เกิดขึ้นโดยการชนแบ่งได้เป็น 2 แบบ

ก. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision)

เป็นการชนที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคเท่านั้น ในก๊าซภายใต้สภาวะปกติและดิสชาร์จหลายชนิด การชนที่เกิดขึ้นภายในเป็นการชนแบบยืดหยุ่น จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานที่ถ่ายเทจากอนุภาคมวล m ไปยังอนุภาคมวล M เฉลี่ยได้

$$K.E. = \frac{2mM}{(m+M)^2} = \frac{2m}{M} \quad \text{เมื่อ } m \ll M$$

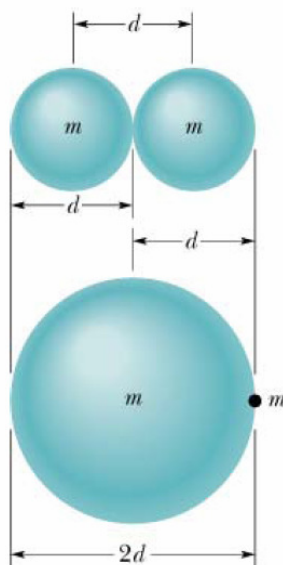
ข. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)

เป็นการชนที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในของการกระตุ้น การไอออนไนเซชัน และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ ดังนั้น อิเล็กตรอนที่ชนกับอะตอมอาจเกิดการกระตุ้นเป็นการเพิ่มพลังงานศักย์ของอะตอม โดยที่อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจลน์

2.2.1 ภาคตัดขวางการชน (Collision cross section)

การชนของอนุภาคในก๊าซจะเป็นอย่างไรระเบียบ การชนอาจไม่เป็นไปในรูปแบบของการชนทรงกลมแข็งในวิชาฟิสิกส์ แต่อนุภาคอาจเฉียดกันมาก การชนยังขึ้นอยู่กับโอกาสที่เป็นไปได้ (probability) ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปโดยไม่เกิดการชนกับอนุภาคอื่น เรียกว่า ระยะปลอดการชน (mean free path) ซึ่งอาจคำนวณหาได้ดังนี้

พิจารณาอนุภาคในรูปของทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลาง d เมื่ออนุภาค 2 ตัว วิ่งเข้าหาและเกิดการชน



ภาพประกอบที่ 3 การชนของอนุภาคทรงกลมตัน (อรรถกฤต, 2548)

ถ้าหากศูนย์กลางของทรงกลมอยู่ในปริมาตรทรงกระบอก ซึ่งมีรัศมี d และ แกนอยู่ในแนวของการชน ปริมาตรของทรงกระบอกที่กวาดไปต่อวินาทีมีค่า $\pi d^2 v$ เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคก๊าซ ถ้า n คือ จำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร จำนวนโมเลกุลจะมีค่า $\pi d^2 v n$ และจำนวนนี้เท่ากับจำนวนการชนต่อวินาที

ดังนั้น ระยะปลอดการชน (λ)

$$\lambda = \frac{1}{\pi d^2 n} \quad (2.1)$$

แต่จากการคำนวณโดยละเอียด ซึ่งพิจารณาการกระจายความเร็วของอนุภาค จะได้

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (2.2)$$

ความเป็นไปได้ P ของอนุภาคในการเกิดการชนในหน่วยระยะทาง คือ ส่วนกลับของระยะปลอดการชน

$$P = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

และให้นิยาม ภาคตัดขวางของการชนประสิทธิผล (effective collision cross section)

$$q = \pi d^2 \quad (2.4)$$

การชนของอนุภาคต่างๆ ในก๊าซจะให้ภาคตัดขวางของการชนต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคที่เข้าชน อนุภาคที่เป็นเป้า และยังเปลี่ยนไปได้ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาค ดังเช่นการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซ

เนื่องจากการชนระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่กับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซอาจนำไปสู่กระบวนการต่างๆ กัน เช่น ไอออนไนเซชัน การกระตุ้น การจับอิเล็กตรอน เป็นต้น แต่ละกระบวนการก็มีภาคตัดขวางของการชนต่างๆ กัน

$$Q = \sum_i nq_i \quad (2.5)$$

เมื่อ Q คือ total cross section

2.2.2 โมบิลิตี (Mobility)

พิจารณาก๊าซที่มีอนุภาคมีประจุรวมอยู่ด้วย เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า E อนุภาคมีประจุถูกเร่งจนมีความเร็วเฉลี่ย v (ความเร็วเฉลี่ย) ในทิศทางของสนามไฟฟ้า ให้นิยามของโมบิลิตีว่า

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (2.6)$$

2.2.3 ความนำไฟฟ้าของก๊าซ (Electrical conductivity of gas)

ในก๊าซซึ่งประกอบด้วยอนุภาคไอออนประจุบวก อิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลาง เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จะทำให้อนุภาคมีประจุเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็ว v_e, v_i ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

ให้นิยามความหนาแน่นกระแส J ว่า

$$J = n_i e v_i + n_e (-e) v_e = neE(\mu_i + \mu_e) \quad (2.7)$$

เมื่อ $n_i = n_e = n$ เป็นความหนาแน่นอนุภาคไอออนประจุบวก อิเล็กตรอน และอะตอมที่เป็นกลาง เนื่องจากอิเล็กตรอนมีน้ำหนักเบา

$$\mu_e \gg \mu_i \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$J \cong ne\mu_e E \quad (2.9)$$

ให้นิยามความนำไฟฟ้า σ ว่า

$$\sigma = \frac{J}{E} = ne\mu_e \quad (2.10)$$

2.2.4 การแพร่กระจาย (Diffusion)

อนุภาคในก๊าซจะมีการแพร่กระจายจากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ความเร็วของการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาค (n) นั่นคือ

$$v = -\frac{D}{n} \nabla n \quad (2.11)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย เครื่องหมายลบแสดงว่าการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นในทิศทางของความหนาแน่นที่น้อยกว่า และให้นิยามของฟลักซ์การแพร่ของอนุภาคว่า

$$\phi = nv \quad (2.12)$$

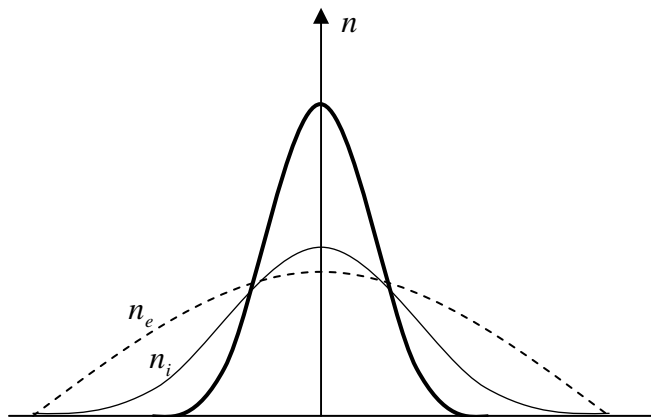
ในสนามไฟฟ้าอนุภาคมีประจุจะมีกระแสการแพร่กระจาย โดยค่า D สัมพันธ์กับค่า μ เขียนได้ในสมการของไอน์สไตน์

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad (2.12)$$

ทั้งนี้ก็มีเงื่อนไขว่าความเร็วของการแพร่กระจายน้อยกว่าความเร็วเทอร์มอล (v_{th})

ในพลาสมาภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก อนุภาคไอออนประจุบวกและอิเล็กตรอนจะมีการแพร่กระจาย แต่อิเล็กตรอนแพร่ได้เร็วกว่า เหลือแต่กลุ่มประจุบวก การแยกจากกันของอนุภาคมีประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งพยายามเหนี่ยวรั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และเร่งอนุภาคประจุบวกจนอนุภาคทั้งสองชนิดแพร่กระจายด้วยความเร็วเท่า ๆ กัน

เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแพร่กระจายแอมบิโพลาร์ (Ambipolar diffusion) อาจเขียนกราฟแสดงการกระจายของอนุภาคตามตำแหน่งได้ ดังภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 แสดงการแพร่กระจายแอมบิโพลาร์

พบว่าฟลักซ์ของการแพร่กระจาย มีค่า

$$\phi = D_a \nabla n \quad (2.13)$$

เมื่อ D_a คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายแอมบิโพลาร์ และ

$$D_a = \frac{D_i \mu_e + D_e \mu_i}{\mu_e + \mu_i} \quad (2.14)$$

เนื่องจาก $\mu_e \gg \mu_i$

ดังนั้น $D_a = \left(\frac{k}{e}\right)(T_e + T_i)\mu_i \quad (2.15)$

$$= \left(\frac{kT_e}{e}\right)\mu_i \quad \text{เมื่อ } T_e \gg T_i \quad (2.16)$$

$$= 2\left(\frac{kT_i}{e}\right)\mu_i = 2D_e \quad \text{เมื่อ } T_e = T_i \quad (2.17)$$

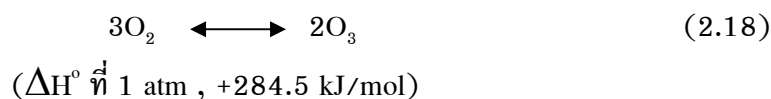
เมื่อ T_e, T_i คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

2.3 โอโซน

ประวัติการค้นพบโอโซน ปี ค.ศ.1785 เป็นเวลา 11 ปีหลังจากมีการค้นพบ ออกซิเจนโดย J. Priestly, M. van Marum ได้สังเกตพบกลิ่นลักษณะพิเศษเมื่ออยู่ใกล้เครื่องยนต์ ทางไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่แต่ในขณะนั้นยังไม่ทราบว่า เป็นโอโซน และไม่ทราบว่ากลิ่นนี้เกิดจากอะไร จนกระทั่งในปี ค.ศ.1840 C. F. Schobien ได้สังเกตพบกลิ่นเฉพาะนี้จากการแยก สารละลายด้วยไฟฟ้า และการสปาร์คทางไฟฟ้า แล้วได้ตั้งชื่อว่า “Ozone” หมายถึง การได้กลิ่น โอโซนเป็นก๊าซที่สามารถแสดงได้ด้วยสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ O_3

ต่อมา Werner von Siemens ได้แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถผลิตได้โดยการใช้ ออกซิเจนไหลผ่านช่องว่างในการดิสชาร์จระหว่างแก๊วทรงกระบอก 2 ชั้น การปลดปล่อยไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับอย่างสม่ำเสมอผ่านผนังแก๊วซึ่งเขาได้อ้างว่าเป็น “การแยกก๊าซด้วย ไฟฟ้า” อุปกรณ์นี้ได้เป็นที่เชื่อถือ และยอมรับในการผลิตโอโซนปริมาณที่เพียงพอสำหรับการ ศึกษาในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า “การดิสชาร์จแบบไซเรนท”

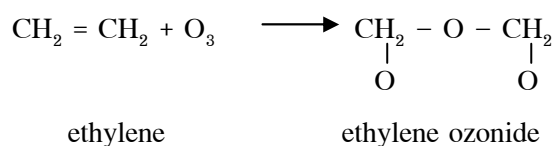
ก๊าซโอโซน เป็น โมเลกุลกึ่งเสถียรที่เกิดจากองค์ประกอบของออกซิเจนหรือ เรียกว่า allotropic form ของออกซิเจน ปฏิกิริยาของการทำให้เกิดโอโซนสามารถอธิบายด้วย ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังสมการ



และมีเอนโทรปี (ΔS° ที่ 1 atm , -69.9 (J/mol)/degree ซึ่งจะเห็นได้ว่าก๊าซโอโซนไม่สามารถ เกิดจากกระบวนการกระตุ้นออกซิเจนด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG° ที่ 1 atm , +161.3 kJ/mol) เป็นบวก ดังนั้นพลังงานความร้อนจะทำให้โอโซนสลายตัวได้ และกระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรม การออกแบบระบบผลิตโอโซนจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง เรื่องอุณหภูมิในขณะทำงานของอุปกรณ์โอโซนเซอร์เป็นสำคัญ

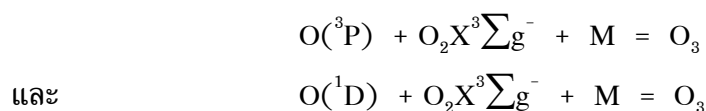
ก๊าซโอโซนสามารถละลายในออกซิเจนเหลวได้ถึง 30% โดยน้ำหนักและสามารถ เกิดจากการระเบิดได้เองเมื่อมีปริมาณมากกว่า 72% โดยน้ำหนักของโอโซนที่ละลายในออกซิเจน เหลว เนื่องจากก๊าซโอโซนมีแนวโน้มที่จะสลายตัว หรือรวมตัวกันระหว่างการระเหยในบรรยากาศ ของออกซิเจน จึงยากที่จะเก็บสะสมในปริมาณมากและความเข้มข้นสูงๆ ดังนั้นในกระบวนการ ผลิตก๊าซโอโซนจึงต้องผลิต ณ ที่ต้องการใช้งาน จึงให้ความปลอดภัยและคุ้มค่าการลงทุนสูงสุด

เนื่องจากก๊าซโอโซนมีค่า electronegative oxidation potential มากกว่าฟลูออรีน ก๊าซโอโซนจึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นได้หลายวิธี โดยเฉพาะ สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารประกอบอินทรีย์ประเภทยังไม่อิ่มตัว ซึ่งจะให้สารประกอบโอโซ ไนด์ เช่น

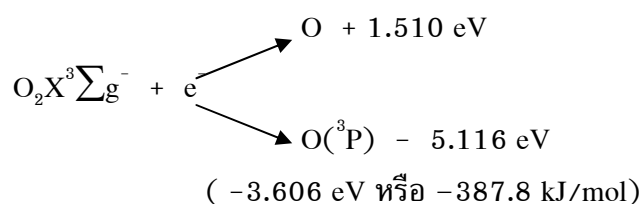


การผลิตโอโซนต้องเกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ของอะตอมออกซิเจนซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน เริ่มจากอะตอมของออกซิเจนต้องใช้พลังงาน 493.3 kJ/mol สำหรับการแตกตัว และเป็นอนุพันธ์ $\text{O}(^3\text{P})$ และ 682.8 kJ/mol สำหรับอนุพันธ์ $\text{O}(^1\text{D})$

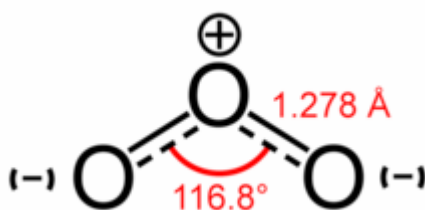
ปฏิกิริยาที่เกิดสำหรับโอโซนคือ



กระบวนการทั้งหมดที่สามารถทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอนุพันธ์ออกซิเจนคือปฏิกิริยาการเกิดก๊าซโอโซน แหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัวคือ อนุภาคอิเล็กตรอนหรือพลังงานฟोटอนควอนตัม อิเล็กตรอนสามารถใช้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงในโคโรนาดิสชาร์จแบบไซเลนท์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ และจากกระบวนการอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic processes) ซึ่งพลังงานฟोटอนควอนตัมที่เหมาะสมจะรวมถึง รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร และรังสีแกมมา การกระตุ้นอิเล็กตรอนของออกซิเจนจะทำให้เกิดอะตอมเดี่ยวของออกซิเจนไอออน (O^-) ดังสมการ



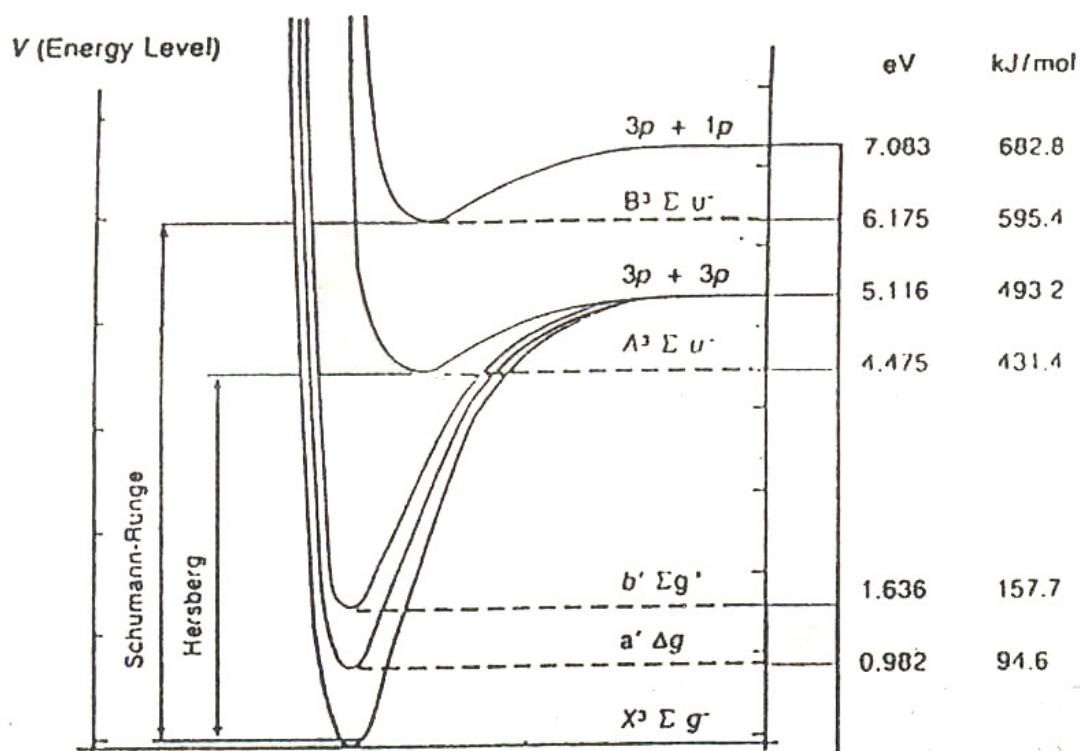
ในการศึกษาสเปกตรัมช่วงคลื่นไมโครเวฟของโมเลกุลโอโซนแสดงให้เห็นว่าโอโซนไม่ได้เป็น nonparamagnetic โดยมีมุมป้านเป็น $116^\circ 49'$ ความยาวพันธะระหว่างอะตอมออกซิเจนกับอะตอมออกซิเจนเท่ากับ 1.278 Å และมีไดโพลโมเมนต์ต่ำมากคือ $0.49 + 0.58$ ดีบายต์ ซึ่งสามารถอธิบายในรูปของ resonance hybrid ดังภาพประกอบที่ 5 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมออกซิเจนเป็น sp^2 ที่ sp^2 orbital มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม ดังนั้นจึงเกิดเป็นพันธะซิงเกิล หรือไม่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมระหว่างอะตอมเกิดขึ้น และการซ้อนทับของ p orbitals จะให้ π molecular orbitals ซึ่งทำให้เกิด 4π อิเล็กตรอนซิงเกิล



ภาพประกอบที่ 5 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของก๊าซโอโซน

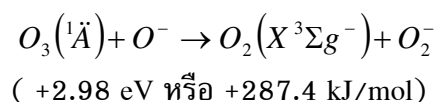
(ที่มา : <http://www.wikipedia/ozone.html>)

ลักษณะโมเลกุลของโอโซนเหล่านี้แสดงสมบัติเหมือน 1,3 dipole , electrophile หรือ nucleophile โดยไม่แสดงคุณสมบัติเป็นแบบหมู่ธาตุที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมดเหมือนกับเป็นอะตอมของธาตุเดี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็น diamagnetic หรือสลายตัวเป็นโมเลกุลและอะตอมของออกซิเจน

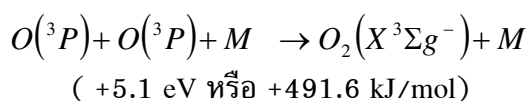


ภาพประกอบที่ 6 แสดงโครงสร้างระดับพลังงานศักย์ของออกซิเจน (Francis, 1972)

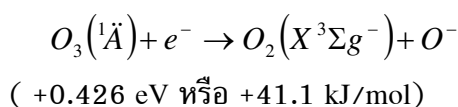
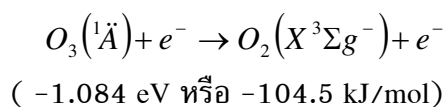
นอกจากนี้ไอออนของออกซิเจนที่เป็นแบบอะตอมเดี่ยว (O^-) สามารถทำปฏิกิริยาสลายก๊าซโอโซนได้ ดังสมการ



อนุพันธ์ของออกซิเจนสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นออกซิเจน (O_2) ดังสมการ



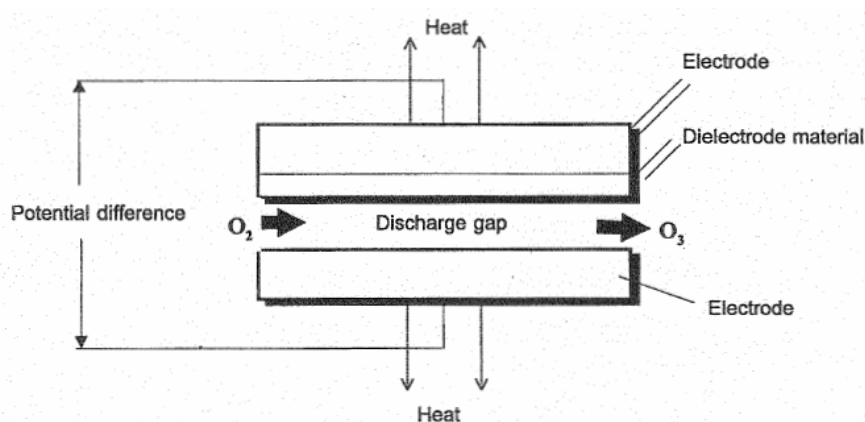
ผลที่ตามมาก็คือ ถ้าอนุพันธ์ของออกซิเจนมีความเข้มข้นมากเกินไป ก็ทำให้ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นลดลงด้วย พบว่าที่อัตราส่วนโมลของ $[O] / [X_2] \leq 10^{-13}$ และ $[O_3] / [O] \geq 80\%$ ก๊าซโอโซนจะลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวเมื่อเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโอโซนดังสมการ



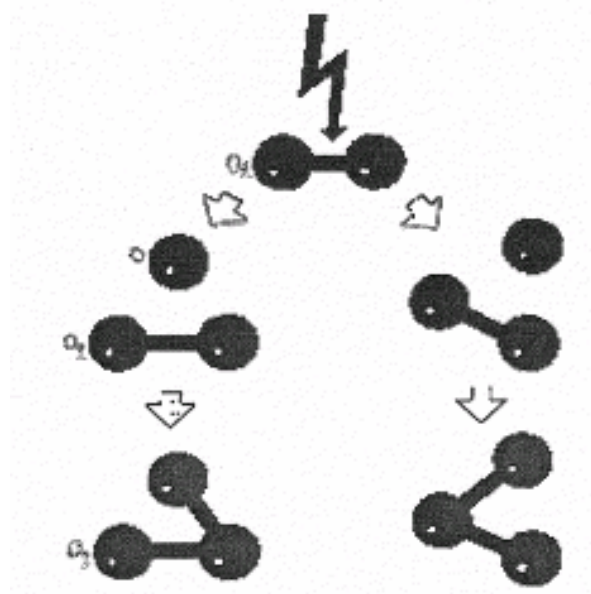
ในหลักการที่คล้ายกันโดยกระบวนการทำให้เกิดโฟโตเคมีคัล (Photochemical reaction) ซึ่งใช้ก๊าซปรอท เป็นแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยความยาวคลื่น 254 nm ก็สามารทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซโอโซน

2.4 การสร้างโอโซนโดยกระบวนการดิสชาร์จไฟฟ้า

โอโซนเป็นโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม โอโซนสามารถผลิตได้โดยผ่านอากาศหรือออกซิเจนในสนามไฟฟ้าแรงสูง (Dielectric barrier discharge หรือเรียกว่า Silent electrical discharge) ภาพประกอบที่ 7 แสดงหลักการของระบบผลิตโอโซนโดยโมเลกุลออกซิเจนบางส่วนจะถูกแยกออกเป็นอะตอมออกซิเจนโดยการวิ่งชนของประจุลบ (อิเล็กตรอน) จากนั้นอะตอมออกซิเจนจะไปรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเป็นโอโซนดังแสดงในภาพประกอบที่ 8 โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโอโซนอยู่ในช่วง 9-19 กิโลโวลต์ (Lin et al, 1993)

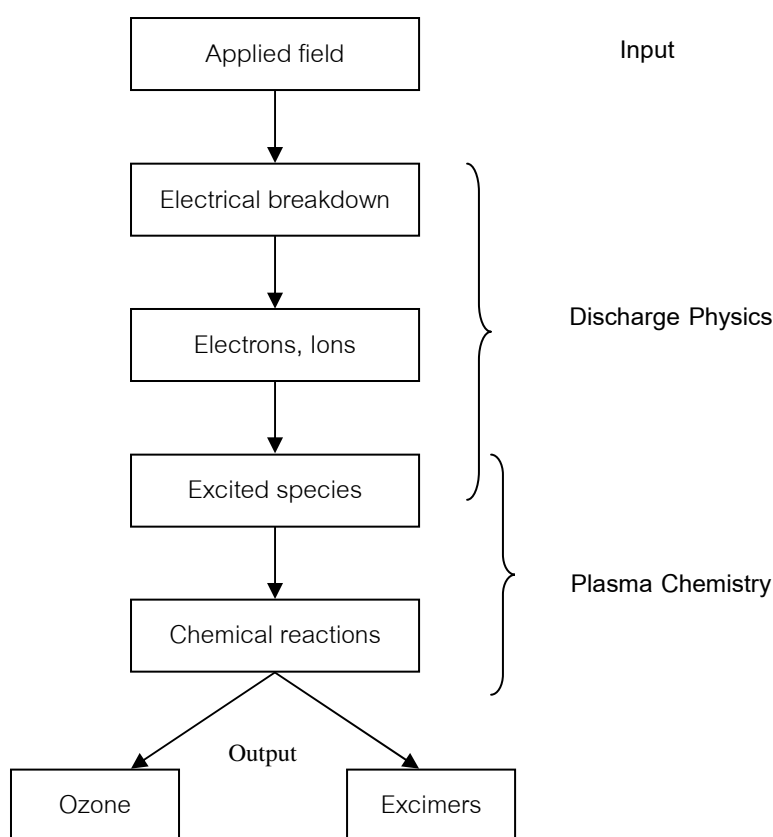


ภาพประกอบที่ 7 แสดงเครื่องผลิตโอโซนสนามไฟฟ้าแรงสูงแบบ Dielectric barrier discharge (Lin et al, 1993)



ภาพประกอบที่ 8 แสดงปฏิกิริยาการเกิดโอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า (Lin et al, 1993)

การสังเคราะห์โอโซนในการดิสชาร์จแบบไซเรนที่จัดเป็นการประยุกต์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในกระบวนการทางเคมีพลาสมาและกระบวนการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไม่สมดุล ในการดิสชาร์จปริมาตรทางเคมีจะเร่งการเพิ่มขึ้นของอนุภาค อาทิ อนุภาคอิเล็กตรอน ไอออน ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคทางเคมี อาทิ อะตอม โมเลกุล และอนุมูล ปฏิกิริยาเหล่านี้ก่อให้เกิดการกระตุ้น และการแตกตัวของกลุ่มอนุภาคทางเคมี ซึ่งหลังจากนั้นจะก่อให้เกิดการสังเคราะห์กลุ่มอนุภาคใหม่ทางเคมีเกิดขึ้น การเกิดขึ้นของโอโซนจะแสดงได้ด้วยแผนภูมิความสัมพันธ์ของการเกิดดิสชาร์จทางฟิสิกส์และทางพลาสมาเคมีในการเกิดดิสชาร์จแบบไซเรน ดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบที่ 9 แสดงแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของฟิสิกส์พลาสมาดิสชาร์จ และพลาสมาเคมีในการดิสชาร์จไฟฟ้า (ยุทธนา และคณะ, 2539)

ก๊าซโอโซนถูกผลิตขึ้น จะเกิดจากการดิสชาร์จไฟฟ้าข้ามช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเรน เหตุผลของการมีไดอิเล็กทริกที่สำคัญมี 2 ประการ คือ หนึ่งทำหน้าที่เพื่อป้องกันการอาร์คและสปาร์คของไฟฟ้าโดยจำกัดกระแสระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดปริมาณประจุที่ถูกถ่ายโอนเป็นไมโครดิสชาร์จแบบเดี่ยว (single

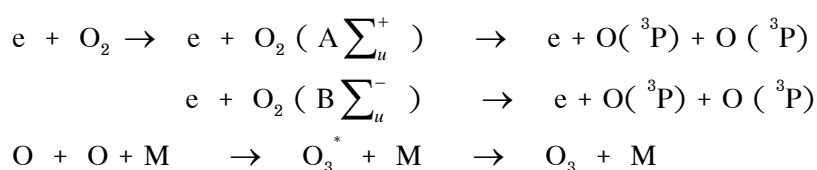
microdischarge) และหน้าที่ที่สองคือทำให้เกิดความสม่ำเสมอของกระแสไมโครดิสชาร์จ โอโซนในเซอร์ (Ozoniser) ในระยะเริ่มต้นมักจะเป็นประเภทที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานจากการใช้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงในช่วง 50 หรือ 60 Hz ในขณะที่โอโซนในเซอร์กำลังสูงในสมัยใหม่ เริ่มมีการใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหลากหลายรูปแบบมากขึ้น เช่น การใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor) เป็นตัวป้อนกำลัง ซึ่งจะสามารถควบคุมความถี่ให้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 – 5 kHz ทำให้กำลังความหนาแน่นในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น (Eliasson *et al*, 1987)

สำหรับการผลิตโอโซนจากอากาศให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นจะต้องทำให้อากาศมีค่าจุดน้ำค้าง (Dewpoint) ต่ำกว่า -60 องศาเซลเซียส ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องนั้นไม่เพียงแต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเชิงจลน์และสภาพการนำไฟฟ้าของผิวสารไดอิเล็กตริกด้วยและการเลือกใช้อากาศปกติเป็นอากาศที่ป้อนให้กับระบบ พบว่าในการดิสชาร์จจะไหลกลุ่มของไอออนของไนโตรเจน N^+ , N_2^+ , อะตอมของไนโตรเจน และกลุ่มของโมเลกุลและอะตอมในภาวะการกระตุ้นอื่น ๆ จากการปะปนกับอากาศอีก ซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนและยุ่งยากให้กับระบบโดยสามารถประมาณการได้ว่าอาจจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นถึง 143 ปฏิกิริยา (Eliasson *et al*, 1991)

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการกำเนิดโอโซนในอากาศมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ และต้องพิจารณา ดังต่อไปนี้

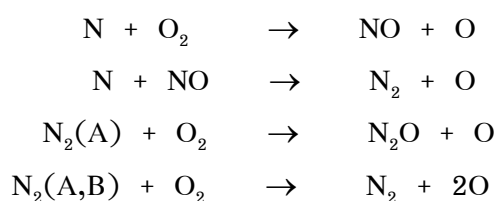
1. ภายใต้เงื่อนไขปกติของโอโซนในเซอร์นอกจากโอโซนแล้วยังตรวจพบออกไซด์ของ N_2O และ N_2O_5 ด้วย แต่ความเข้มข้นของออกไซด์มีขนาดต่ำกว่าความเข้มข้นของโอโซน
2. ที่พลังงานจำเพาะสูง ๆ การผลิตโอโซนจะล้มเหลวและไนโตรเจน ออกไซด์จะถูกผลิตขึ้นเท่านั้น (ก๊าซพิษถูกปล่อยออกมา ในส่วนของโอโซนจะน้อยลง) ในส่วนนี้พบว่าออกไซด์ของ NO และ NO_2 จะต่ำกว่า N_2O
3. การผลิตโอโซนในอากาศ (ความเข้มข้นและประสิทธิภาพ) จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ควรจะเป็นถ้าประมาณว่าออกซิเจนในอากาศ 21%

ขั้นตอนปฏิกิริยาที่สำคัญส่วนใหญ่นำไปสู่การสร้างโอโซนเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนโดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเหมาะสม (6–9 eV) ปฏิกิริยา three body ในกลุ่ม O , O_2 และ M ซึ่งเป็นตัวร่วมในการชนอันดับสาม (O_2 , O_3 ในอากาศจะมี N_2) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

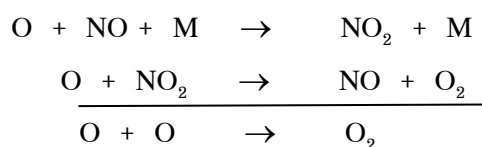


ในที่นี้ O_3^* เป็นกลุ่มโอโซนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น

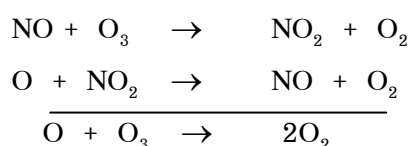
สำหรับการผลิตโอโซนในอากาศความเข้มข้นโอโซนจะไม่อิ่มตัว และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานจำเพาะที่ใช้เพิ่มขึ้น และอาจเป็นพิษเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของอากาศขาเข้าว่ามีการปะปนของปริมาณ NO_x (NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5) อย่างไร ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอะตอมไนโตรเจนหรือสถานะโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น N_2 ($\text{A}^3 \Sigma_g^-$) และ N_2 ($\text{B}^3 \Pi_g$) มีปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (Eliasson *et al*, 1991)



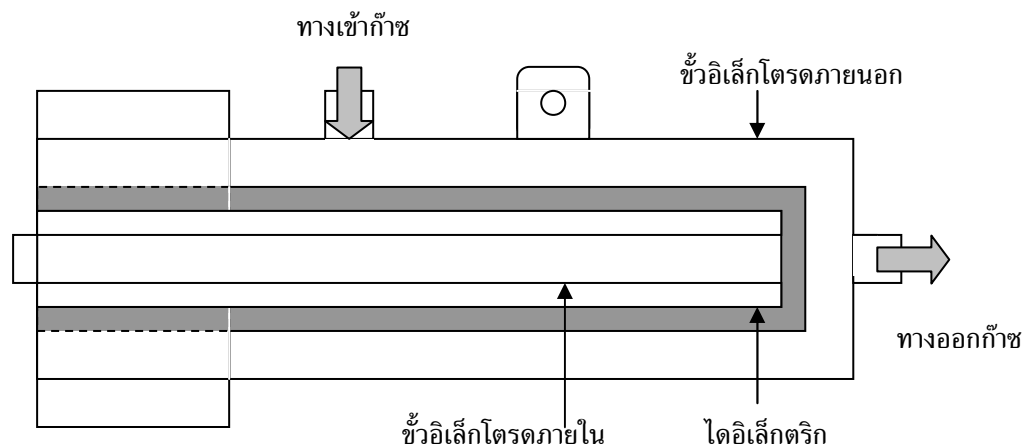
ผลที่ได้เพิ่มขึ้นในปฏิกิริยาการรวมกันของออกซิเจน เป็นดังปฏิกิริยา



โอโซนจะถูกปฏิกิริยากระบวนการทำลายที่เกี่ยวข้องกับ NO และ NO_2 ปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการดิสชาร์จแบบไซเรนท์ ในการสร้างเซลล์โอโซนในเซอร่าเพื่อผลิตก๊าซโอโซน ซึ่งมีลักษณะของโอโซนในเซอร่าที่ใช้ในการผลิตโอโซนเป็นดังภาพประกอบที่ 10 ลักษณะของไซเรนท์ดิสชาร์จเป็นปรากฏการณ์ที่อยู่ระหว่างการดิสชาร์จแบบโคโรนา และการดิสชาร์จแบบเรืองแสง เกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศ หรือสูงกว่านี้ ทำให้เทคนิคนี้เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้อย่างมาก เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบสุญญากาศ หน่วยการกำเนิดก๊าซโอโซนหรือโอโซนในเซอร่าประกอบด้วย ท่อแก้ว ช่องว่างดิสชาร์จ และแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ



ภาพประกอบที่ 10 แสดงโอโซนเนอร์ที่ใช้ในการผลิตโอโซนในงานวิจัย

เมื่อปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปในตัวกำเนิดโอโซนที่สะอาดและแห้ง การเกิดโอโซนจะเกิดปรากฏการณ์โคโรนาภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$V \propto pg$$

$$(Y/A) \propto f\varepsilon V^2 / d$$

เมื่อ ขั้วไฟฟ้าชั้นใน ชั้นใน	Y/A	คือ ปริมาณผลผลิตโอโซนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า
	V	คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว
	p	คือ ความดันของก๊าซในช่องว่าง (gap) ที่อยู่ระหว่างไดอิเล็กทริกกับ
	g	คือ ความกว้างของช่องว่าง (gap) ที่อยู่ระหว่างไดอิเล็กทริกกับขั้วไฟฟ้า
	f	คือ ความถี่ของศักย์ไฟฟ้า
	ε	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	d	คือ ความหนาของไดอิเล็กทริก

การทำให้ปริมาณโอโซนที่ได้มีค่าที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับ

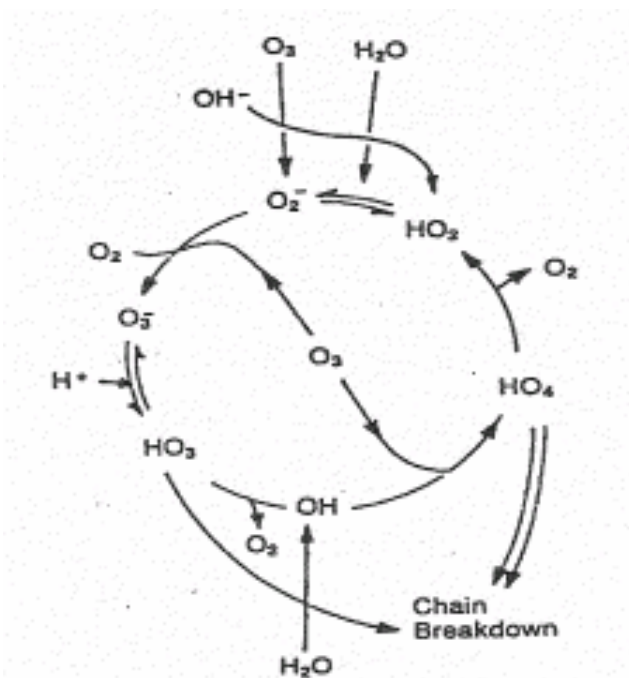
1. ความดันและช่องว่าง (gap) ที่อยู่ระหว่างไดอิเล็กทริกกับขั้วไฟฟ้าชั้นใน ที่เกิดขึ้นควรจะทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำ
2. วัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กทริกควรจะเป็น และมีความคงที่ไดอิเล็กทริกสูง
3. ควรใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เนื่องจากที่ความถี่สูงจะทำลายผิวไดอิเล็กทริกน้อยกว่าที่ศักย์ไฟฟ้าสูง จากเหตุผลนี้ส่งผลทำให้ช่วยลดการบำรุงรักษาเครื่องมือ และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือด้วย ในขณะที่ปริมาณโอโซนที่ได้ก็จะมากขึ้น

4. ระบบระบายความร้อนควรจะมีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยก๊าซที่ไหลผ่านช่องว่างที่อยู่ระหว่างไดอิเล็กตริกกับขั้วไฟฟ้าชั้นใน เพื่อให้เกิดการระบายความร้อน ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นน้อยลง ถ้าต้องการให้โอโซนมีความเข้มข้นมากขึ้นควรจะมีระบบหล่อเย็น

2.5 ปฏิริยาสลายตัวโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร โอโซนจะสลายเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวเป็นเรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}OH$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide O_2^- ดังแสดงในภาพประกอบที่ 11 เรดิคัลต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิริยากับสารต่างๆ (Strong Oxidation) ตารางที่ 3 แสดงความสามารถของสารโอโซนในการออกซิไดส์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถึง 1.3 เท่า

ในน้ำธรรมชาติ กลไกการสลายตัวของโอโซนจะซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะในน้ำธรรมชาติจะมีสารประกอบต่างๆ ซึ่งอาจเป็นตัวก่อ (initiator) เช่น ฟอर्मेट, HO_2^- , Fe^{2+} , $^{\circ}OH$ ตัว promotor เช่น ฟอर्मेट, และ primary alcohol อาจมีสารยับยั้ง (inhibitor) เช่น คาร์บอนेट, ไบคาร์บอนेट และ tertiary alcohol ของการสลายตัวของโอโซน อนุมูล hydroxide ion เป็น promotor ของการสลายตัวของโอโซน ครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นต่าง โดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นตัวทำลายโอโซน (scavenger) อื่นสามารถทำปฏิริยากับ $^{\circ}OH$ ดังนั้นจึงหยุดปฏิริยาของ radical chain reaction ที่ส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($^{\circ}OH$) และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัว initiator และ promotor ของปฏิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย



ภาพประกอบที่ 11 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ (Langlais *et al*, 1991)

ปฏิกิริยาของโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ hydroperoxide ion (OH_2^-) เริ่มด้วยการเกิดเป็น hydroxyl radical ก่อน ดังนั้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ H_2O_2 กับโอโซนจะมีประโยชน์ในการเพิ่มการเกิด $^{\circ}OH$ สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เองจะเกิดปฏิกิริยาซ้ำกับโอโซนแต่ conjugate base, OH_2^- จะว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซนมากกว่า ซึ่งส่งผลให้อัตราการสลายตัวของโอโซนในสถานะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม pH (Stachelin *et al*, 1993) พบว่าภายใต้สภาวะที่เป็นต่างหรือเป็นกลาง อัตราการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแสดงได้ด้วย

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k[O_3][OH_2^-]$$

$$\text{เมื่อ } k = (5.5 \pm 1.0) \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ S}^{-1}$$

ส่วนกลไกการสลายตัวของโอโซนโดยใช้แสง มีนักวิทยาศาสตร์ได้ตรวจสอบและพบว่าเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หลังจากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยาต่อไปโดย direct photolysis หรือ conjugate base ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์กับสารออกซิแดนซ์ต่างๆ

(Lin *et al*, 1993)

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical ($^{\circ}OH$)*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40

* formed when ozone decomposed

2.6 ปฏิกริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน

ปฏิกริยาระหว่างโอโซนกับสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่า โอโซนไลซิส (Ozonolysis) แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. Direct attack โดยโมเลกุลของโอโซนโดยตรง เกิดโดย electrophilic หรือ dipolar cyclo addition

2. Indirect attack โดย free radicals ที่เกิดจากปฏิกริยาขั้นที่ 1

ปฏิกริยาของ free radicals จะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกริยาขั้นแรก ซึ่งพบว่าเป็นปฏิกริยาอันดับที่ 1 เมื่อเทียบกับสารอินทรีย์และโอโซน

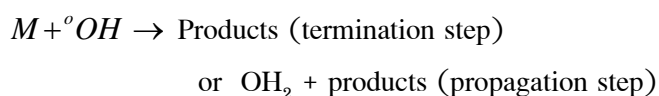
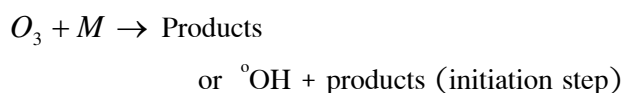
$$d[M]/dt = k[O_3][M]$$

เมื่อ $[M]$ คือ ความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

$[O_3]$ คือ ความเข้มข้นโอโซนในน้ำ

k คือ ค่าคงที่

โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่บริเวณพันธะคู่ ($C=C$, $C=C-O-R$, $C=C=X$) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ nucleophilic C) สารอะโรมาติกส์ที่มีหมู่ OH, CH_3 , หรือ OCH_3 อยู่ตรงบริเวณอโรจะเข้าทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ NO_2 , CO_2H หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดช้า สามารถแสดงปฏิกิริยาของทั้ง 2 ชั้นได้ดังนี้



สารที่สามารถเกิดการย่อยสลายด้วยโอโซนได้ง่ายต้องมีค่า $k > 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ในกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลที่เกิดขึ้นมักจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย มีชีวิตหรือย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจะไม่ทำให้ค่า Total Organic Carbon เปลี่ยนแปลง

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารลดแรงตึงผิวซึ่งพบในผงซักฟอกไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยใช้โอโซน อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนตเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิกเมื่อโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาจะเข้าทำที่วงอะโรมาติก โดยอัตราทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับโครงสร้างของหมู่ R โดยสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิกจะถูกออกซิไดซ์ได้เร็วกว่าสารลดแรงตึงผิวที่เป็นกลาง ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก ยังไม่มีผู้ทำการทดลองไว้ แต่คาดว่าปฏิกิริยาค่อนข้างช้า รวมถึงสารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออนิก ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาก็ค่อนข้างช้า ด้วยต้องการจำนวนโมเลกุลของโอโซนมากและต้องใช้เวลาในการสัมผัสนานด้วยเพื่อที่กำจัดสารชนิดนี้ (Masten *et al*, 1994)

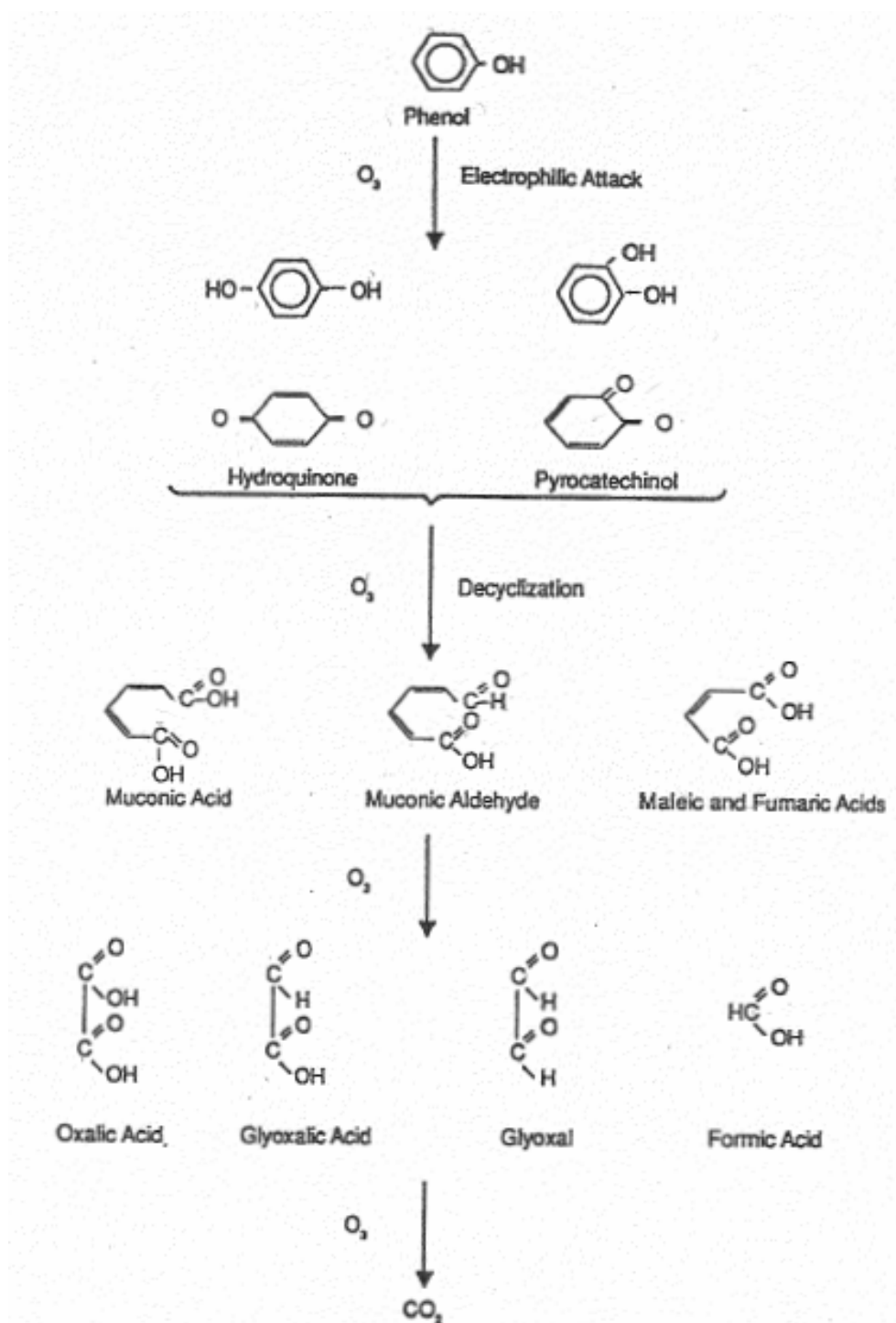
ส่วนปฏิกิริยาของโอโซนกับสารประกอบที่ก่อให้เกิดสี สีที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำเกิดเนื่องจากสาร fulvic ถึงแม้ว่าจะมีอยู่ในปริมาณน้อยก็ยังคงทำให้เกิดสี สารอินทรีย์ตัวนี้จะถูกออกซิไดซ์ได้บางส่วน และมักอยู่ในรูปของคอนจูเกตของโครงสร้างอะโรมาติก เพราะฉะนั้นจึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยเริ่มแรกโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของคาร์บอนและไนโตรเจน ($C=C$, $N=N$) และวงอะโรมาติก ซึ่งทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกของวง โดยความซับซ้อนของโมเลกุลเป็นเพราะว่าสารอินทรีย์มีเตียตที่เกิดขึ้นหลายตัวซึ่งยังคงมีสีอยู่ จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยายาวนานในการที่จะกำจัดสีออกให้หมด จากตัวอย่างการกำจัดสี azoic พบว่าต้องใช้เวลา 1-2 ชั่วโมง จึงจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 500-700 นาโนเมตร ลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ (Masten *et al*, 1994)

สำหรับสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ด้วยโครงสร้างทางเคมีของสารนี้ไม่มีหมู่-นิวคลีโอไฟล์ด ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อต้านข้างซ้ายกับไฮดรอกซิล ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลกับสารโพแซคคาไรด์ เริ่มแรกเกิดขึ้นโดยการแตกของพันธะ glycosidic ตามด้วยการออกซิไดซ์หมู่แอลกอฮอล์ของ free monosaccharides สุดท้ายได้เป็นอัลดีไฮด์และกรดที่เป็นโซ่ยาว (aliphatic acid) ปฏิกิริยาของโมเลกุลไฮดรอกซิลเองและปฏิกิริยาของ hydroxyl radicals โดยเฉพาะถ้ามี radicals scavengers (Masten *et al*, 1994)

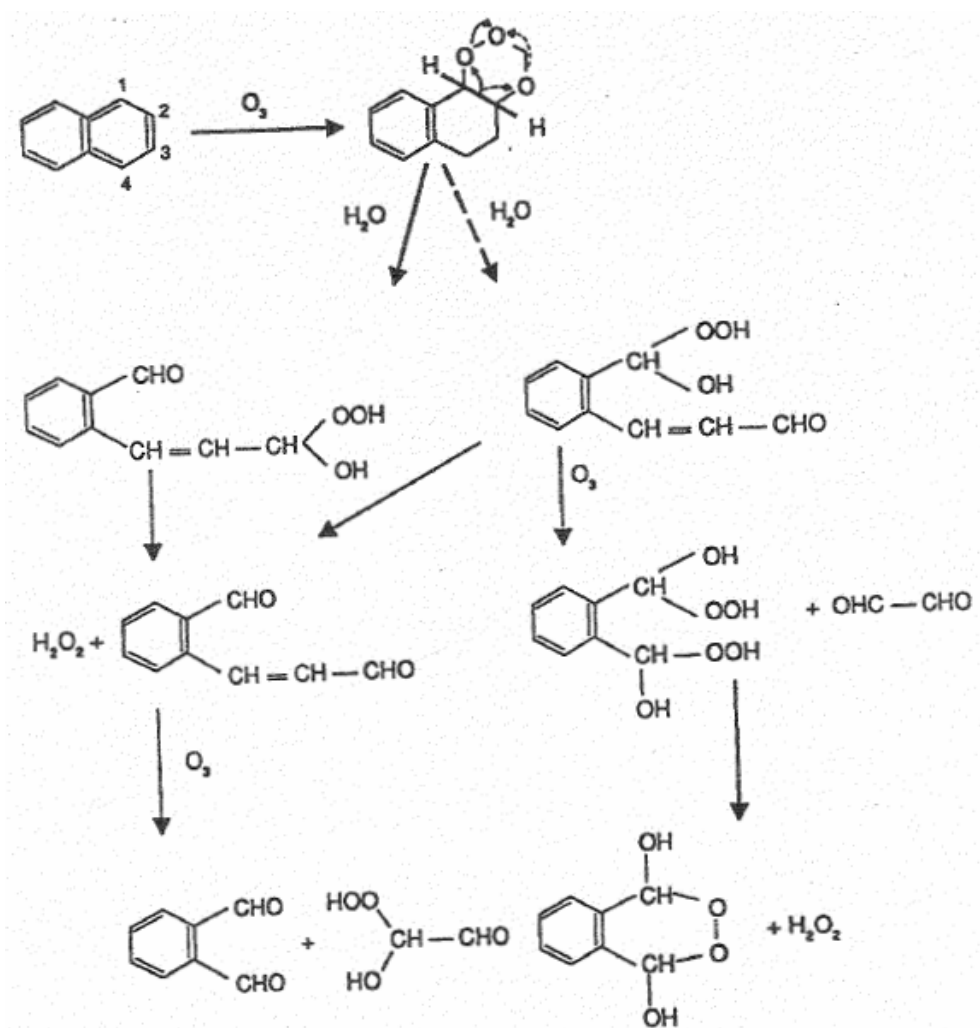
2.7 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ไฮดรอกซิล

ไฮดรอกซิลถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ (Disinfection) นอกจากนี้ไฮดรอกซิลยังสามารถนำมาใช้ประยุกต์ด้านต่างๆ คือ

2.7.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics) ดังที่กล่าวมาแล้ว ไฮดรอกซิลเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้เรดิคัลต่างๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยไฮดรอกซิลอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่น ไฮดรอกซิลสามารถออกซิไดซ์ฟีนอล ได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงในภาพประกอบที่ 12 โดยสารฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อนึ่ง สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างสลับซับซ้อนไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยไฮดรอกซิล เช่น สารเนฟทาลีน (Naphthalene) จะถูกออกซิไดซ์โดยไฮดรอกซิลได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalonic acid, Formic acid, Orthophathadiadehyde acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide, Phthalic acid และ 1,4-Naphthaquinone ดังแสดงในภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบที่ 12 ปฏิกิริยาสลายสารฟีนอลโดยโอโซน (Langlais *et al*, 1991)



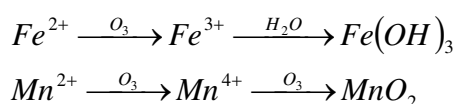
ภาพประกอบที่ 13 ปฏิกิริยาเคมีโอโซนออกซิไดซ์ Naphthalene (Langlais *et al*, 1991)

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนเปรียบเทียบกับคลอรีนและเปอร์แมงกาเนต โดยแสดงเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์เมื่อใช้โอโซนสั้นกว่าเมื่อใช้คลอรีนและเปอร์แมงกาเนตอย่าง เดียวมาก

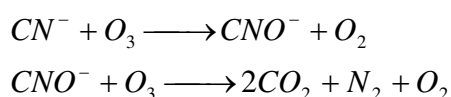
ตารางที่ 4 แสดงเวลาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ประสิทธิภาพการกำจัด 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โอโซน, คลอรีน และเปอร์แมงกาเนต (Lin *et al*, 1993)

Compound	Chlorine	Permanganate	Ozone
Acetophenone	26 d	43 d	25 min
Benzaldehyde	>3.2 d	36 min	28 min
Benzothiazole	8.2 min	>5.8 d	22 min
Camphor	>3.2 d	>5.8 d	>12 min
p-Nitrophenol	2.1 h	1.1 d	2.0 min

2.7.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics) โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยเปลี่ยนวาเลนซ์จากสองเป็นสามสำหรับเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ ดังแสดงในสมการเคมี



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนต จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้ในโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับต่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นด่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้ ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างลดต่ำลงเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ (Lin *et al*, 1993)

Metal	pH	
	Lime	Lime and Ozonation
Alumina	-	7.0
Cadmium	10.0	10.0
Chromium	9.0	7.0
Cobalt	11.0	9.0
Copper	9.0	7.0
Iron	4.0	4.0
Manganese	9.0	6.1
Nickel	11.0	10.0
Silver	11.0	10.0
Zince	10.0	9.0

2.7.3 การควบคุมสาหร่าย (Algae Control) ปัญหาสาหร่ายมักพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรม เช่น น้ำหล่อเย็น การใช้คลอรีนเพื่อทำลายสาหร่ายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตสาหร่ายพบว่าใช้ไม่ได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้นเคยกับคลอรีน การใช้โอโซนจะได้ผลดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน (Lin *et al*, 1993)

2.7.4 การกำจัดสี (Colour Removal) สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี สามารถใช้โอโซนออกซิไดซ์สารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้สีของน้ำเสียลดลงโดยโมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ประสิทธิภาพการกำจัดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้มากมายหลายด้าน ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนมีข้อดี ดังนี้

1. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ ทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นรวดเร็วและสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดซ์อื่นๆ
2. สามารถลดค่า BOD (Biological Oxygen Demand) และค่า COD (Chemical Oxygen Demand) ได้
3. สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และไม่มีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เมื่อใช้ในปริมาณมากจะสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการออกซิไดซ์
4. สามารถลดสี กลิ่น ความขุ่น และสารตั้งผิวได้

5. การไม่มีโอโซนเหลืออย่างถาวร ทำให้ไม่เหลือผลิตภัณฑ์เป็นพิษให้ต้องทำการกำจัดเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการผลิตโอโซน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา คือ ออกซิเจน และธาตุบางชนิด เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้มีส่วนสำคัญในการฆ่าเชื้อโรคด้วย ไม่มีปัญหาในการเคลื่อนย้ายสารเคมีที่เป็นพิษ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของโอโซนมีมากมายหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมยา และอาหารโรงงานผลิตน้ำแข็ง เนื่องจากโอโซนไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรส เหมือนการใช้คลอรีน ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุขวดพลาสติก เนื่องจากไม่สามารถใช้ความร้อน และคลอรีนซึ่งอาจทำลายขวดพลาสติกได้ และการย่อยสลายอย่างรวดเร็วของโอโซนที่เหลือ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โอโซนถูกใช้ในการฆ่าเชื้อของขวดพลาสติก อุตสาหกรรมโรงงาน ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น แต่เนื่องจากการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานบางชนิด ไม่สามารถใช้วิธีทางชีวภาพได้ เพราะน้ำทิ้งเหล่านี้อาจประกอบด้วยสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้

ในการประยุกต์ใช้งานโอโซน ปริมาณโอโซนที่ใช้ไม่เพียงเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารประกอบเป้าหมายเท่านั้น แต่ยังอาจเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำอีก ทำให้สูญเสียปริมาณโอโซนก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเป้าหมาย นอกจากนี้ยังมีการสลายตัวของโมเลกุลโอโซนเองอีกด้วย

ก. ลักษณะน้ำทิ้งจากการย้อมสี

น้ำจะมีสีเมื่อมีสารซึ่งดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่สายตามองเห็นละลายอยู่ หรือเมื่อมีสารแขวนลอยซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของแสง จากเหตุผลของการเกิดสีทั้งสอง ทำให้เกิดข้อแตกต่างระหว่างสีจริงกับสีปรากฏ สีปรากฏเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ส่วนสีจริงเกิดการกระเจิงของแสง ขึ้นกับชนิดของสารที่ละลายในน้ำ ซึ่งการกระเจิงเกิดขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคอยู่ภายในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น (400-800 นาโนเมตร) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะลดผลที่เกิดการกระเจิงของแสง โดยการกรองด้วยเมมเบรน 0.45 ไมครอน

โมเลกุลสารที่ทำให้เกิดสีจะประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก 1 วงขึ้นไป หรือมากกว่า

ข. วิธีบำบัดน้ำทิ้งจากการย้อมสี

จากที่กล่าวมาเบื้องต้น การที่น้ำทิ้งจากการย้อมสีถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยปราศจากการบำบัด อาจทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นได้ จึงได้มีการรวบรวมวิธีการบำบัด รวมทั้งข้อดี ข้อเสีย ของแต่ละวิธี ดังนี้

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารส้ม ลงไปเพื่อทำให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาเกาะกัน เกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

เพื่อให้การตกตะกอนเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไป การใช้วิธีตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการกรอง สามารถกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำได้มากกว่า 70%

2. การใช้คลอรีน เป็นการกำจัดสีโดยการเติมคลอรีนลงในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ในน้ำที่เป็นสาเหตุของการเกิดสี

3. การใช้โอโซน เป็นวิธีการกำจัดสีที่มีหลักการคล้ายกับการใช้คลอรีน แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับสารอินทรีย์จะรุนแรงกว่าการใช้คลอรีน เนื่องจากโอโซนมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงกว่าคลอรีน คือ โอโซนมีศักย์ไฟฟ้า +2.07 V ในขณะที่คลอรีนมีศักย์ไฟฟ้าเพียง +0.94 V

4. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) โดยใช้คุณสมบัติการดูดซับของถ่านในการกำจัดสีของน้ำเสีย

5. การกรอง อาจใช้การกรองแบบ microfiltration หรือ reverse osmosis

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการบำบัดน้ำสีย้อมด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี	เนื่องจากมักใช้สารส้มเป็นตัว ทำให้ตกตะกอน จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ และสามารถหาได้ง่าย	มีปัญหาด้านการกำจัดกากตะกอน และไม่สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. การใช้คลอรีน	หาง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ	ต้องใช้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับการใช้โอโซนนอกจากนี้ยังอาจให้สารอินทรีย์กลุ่ม Chlorinated organics ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ
3. การใช้โอโซน	มีประสิทธิภาพสูง ผลิตรกษณ์ที่เหลือไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเก็บและขนย้าย	ไม่สามารถเก็บโอโซนได้เป็นเวลานานจึงต้องผลิตในบริเวณที่ใช้งานเท่านั้น และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง
4. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	มีราคาถูก และหาง่าย	ไม่สามารถกำจัดสีบางชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. การกรองด้วยเมมเบรน	สามารถกำจัดสีและอนุภาคต่างๆ ได้ดี	อาจมีปัญหาเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน

โดยทั่วไปสำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นสูง การบำบัดมักใช้หลายวิธีร่วมกัน เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การให้ออกซิเจนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม นอกจากจะทำให้ระยะเวลาในการใช้ออกซิเจนน้อยลง ยังทำให้ลดปริมาณกากตะกอนที่จะเกิดขึ้นให้น้อยลงอีกด้วย ซึ่งในการศึกษาจะนำการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มาร่วมในการบำบัดน้ำเสีย

2.8 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ.1773 ซึ่งเป็นการดูดซับของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ.1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลาย การดูดซับเป็นความสามารถของการดูดซับในการดึงโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว หรือก๊าซ ให้มาเกาะติดบนพื้นผิว การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างพื้นผิว (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของ 2 วัสดุ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับบนของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย กระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของพลังงานและ/หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (แรงวันเดอร์วาลส์) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับหรือตัวถูกละลาย จำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อย การหลุดออกของสารดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย

2) การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เอง เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง (Faust *et al*, 1987 ; Kenneth *et al*, 1992)

2.8.1 ประเภทของสารดูดซับ

(Kenneth *et al*, 1992) ได้รวบรวมสารดูดซับที่มีอำนาจดูดซับโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวไว้หลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอ็คติเวตเต็ดซิลิกา สารธรรมชาติเหล่านี้มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียคือ มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ สารเรซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.2 กลไกของการดูดซับ

(Kenneth *et al*, 1992) ได้อธิบายการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับในระหว่างเกิดการดูดซับไว้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เข้าถึงผิวด้านนอกสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวด้านนอกของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวน้ำสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal of Pore Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่เข้าสู่ภายในรูเล็กๆ จำนวนมากมายภายในเนื้อสารดูดซับ รูเล็กๆ ดังกล่าวจะก่อให้เกิดพื้นที่ผิวปริมาณมากมายในสารดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.8.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

(Faust *et al*, 1987) ได้กล่าวถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้

Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูง ทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2) ขนาดของสารดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของสารดูดซับให้มีขนาดเล็ก ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

3) พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับ

4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

5) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

6) ค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

7) อุณหภูมิ ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิ ลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยให้ความหนาของฟิล์มน้ำลดลง การเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น

2.8.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับจากสารละลายก็คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายมารวมกันอยู่บนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่กระบวนการการดูดซับดำเนินไปข้างหน้า ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium State) เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับหรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ และอื่น ๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า เทอมการดูดซับ (Adsorption Isothem) (Faust et al,1987)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พัฒนาไอโซไนเซออร์ที่ใช้ในการผลิตไอโซน ศึกษาหาความเข้มข้นของปริมาณไอโซนที่ได้จากไอโซไนเซออร์ โดยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดส์ ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณไอโซนตามมาตรฐาน และได้ผลค่อนข้างแม่นยำ

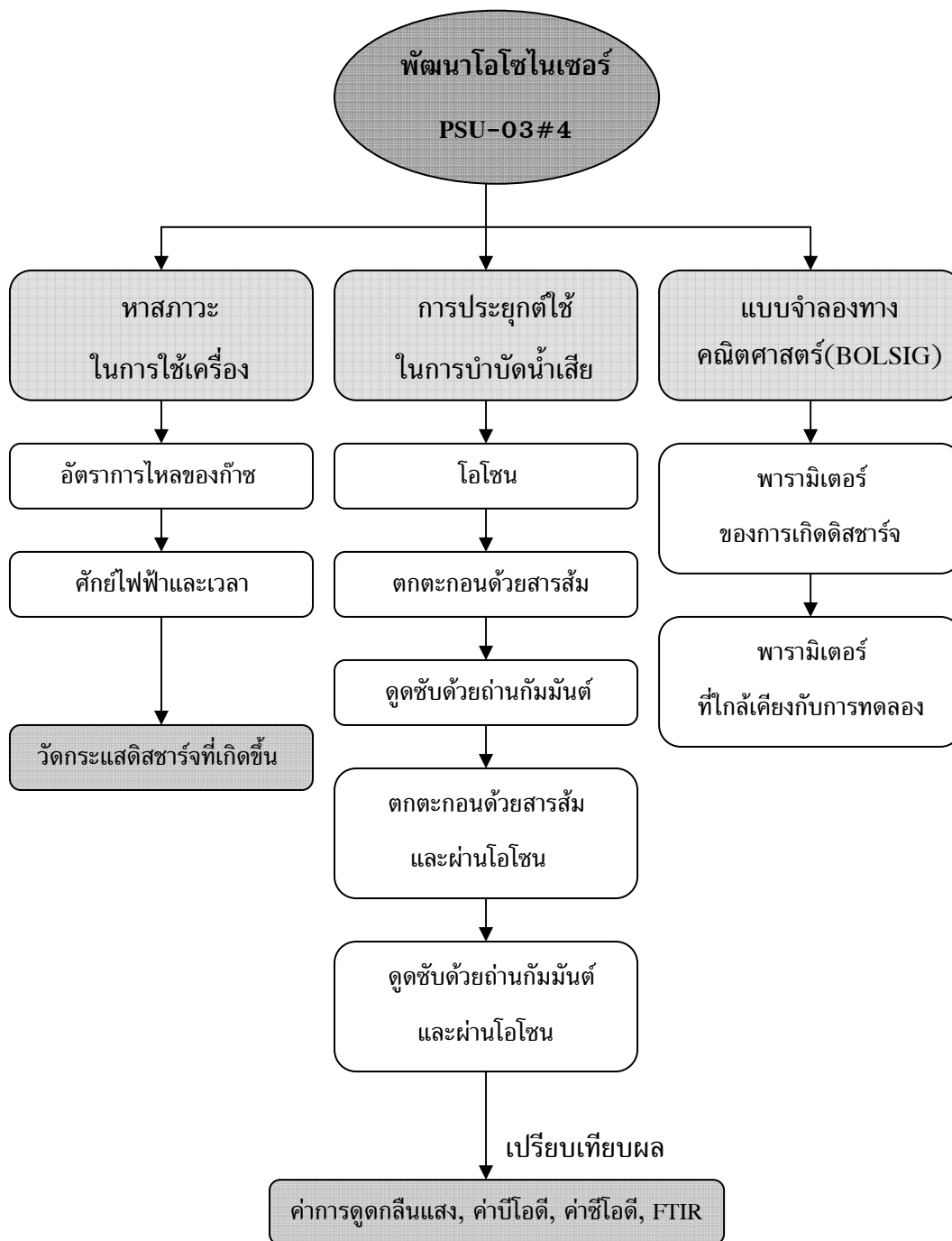
ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหาอัตราการไหลของออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตไอโซน ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ให้ปริมาณไอโซนสูงสุด ซึ่งจะเป็นค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไอโซนในการทดลองนี้ และเป็นอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาหาความเข้มข้นของไอโซนที่ความต่างศักย์ต่างๆ ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาปริมาณไอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโซนกับเวลาของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อที่จะสามารถใช้ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการดิสชาร์จไอโซน เนื่องจากในระหว่างที่เกิดดิสชาร์จไอโซน จะมีกระแสไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะเป็นกระแสดิสชาร์จเล็กๆ เกิดขึ้นจำนวนมาก ในขั้นตอนนี้จึงทำการศึกษากระแสดิสชาร์จเหล่านี้ เพื่อให้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของกระบวนการผลิตไอโซน

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำจากการข่มสีเสียกระจุต และการบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการใช้ไอโซน รวมทั้งการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ร่วมกับการบำบัดด้วยไอโซน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้งานของไอโซน โดยในที่นี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำจากการข่มสีเสียกระจุต และเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยไอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม รวมทั้งการบำบัดด้วยไอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีข่มเสียกระจุตที่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการบำบัดด้วยไอโซน ในขั้นตอนนี้จะวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคสีข่มโดยใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เพื่อเปรียบเทียบ และหาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคสีที่ถูกทำลายโดยไอโซน



ภาพประกอบที่ 14 แสดงวิธีการดำเนินการวิจัยในการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย สามารถจำแนกได้ดังนี้

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไอโซน

(1) ท่อโลหะไร้สนิมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 33 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 มิลลิเมตร

(2) หลอดแก้ว pyrex ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร

(3) แท่งโลหะไร้สนิม ยาว 170 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

(4) ลวดทองเหลือง

(5) แท่งอะคลิลิก

(6) O-ring

(7) ก๊าซออกซิเจน

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการหาความเข้มข้นของไอโซน

(1) สารละลาย Absorbing reagent 1% KI ใน 0.1 M Phosphate buffer

(2) สารละลายไอโอดีนมาตรฐาน (Standard iodine)

3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดีสซาร์จ

(1) แท่งเทฟลอน

(2) ลวดทองแดง

3.1.4 วัสดุที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์โดยการบำบัดด้วยไอโซน

(1) น้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์

3.1.5 วัสดุที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์โดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

(1) น้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์

3.1.6 วัสดุที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

(1) น้ำเสียขมเสียออกฤทธิ์

(2) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย สามารถจำแนกได้ดังนี้

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการหาความเข้มข้นของไอโซน

- (1) โพแทสเซียมไอโอไดด์
- (2) ไอโอดีน
- (3) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
- (4) Anhydrous disodium hydrogen phosphate
- (5) น้ำกลั่น (Double distilled water)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดการตกตะกอนด้วย

สารส้ม

- (1) สารส้ม
- (2) โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่า BOD

- (1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- (2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
- (3) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์
- (4) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์
- (5) สารละลายแมงกานีสซัลเฟต
- (6) สารละลายอัลคาไล-ไอโอไดด์-เอไซด์
- (7) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 N
- (8) conc. H_2SO_4
- (9) น้ำแป้งอินดิเคเตอร์
- (10) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไอโอเดต 0.025 N

3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่า COD

- (1) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต
- (2) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต
- (3) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)

- (4) ผงเมอร์คิวรีซัลเฟต (HgSO_4)
- (5) สารละลายกรดกำมะถัน
- (6) Ferriin indicator solution
- (7) น้ำกลั่น

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดโอโซน

- (1) เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ความต่างศักย์สูง
- (2) หลอดโอโซน
- (3) มาตรวัดอัตราการไหล



ภาพประกอบที่ 15 แสดงโอโซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของปริมาณโอโซน

- (1) เครื่อง UV visible spectrometer ยี่ห้อ Perkin Elmer
- (2) midjet imprinter
- (3) นาฬิกาจับเวลา ความแม่นยำ ± 0.01 วินาที



ภาพประกอบที่ 16 แสดงเครื่อง UV visible spectrophotometer

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

- (1) หัววัดกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Tektronic รุ่น CT-1
- (2) เครื่องออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Hewlett Parkard รุ่น 54502A



ภาพประกอบที่ 17 แสดงหัววัดศักย์ไฟฟ้า Hewlett Parkard รุ่น 54502A



ภาพประกอบที่ 18 แสดงหัววัดกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Tektronix รุ่น CT-1

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซน

- (1) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- (2) นาฬิกาจับเวลา ความแม่นยำ ± 0.01 วินาที

3.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

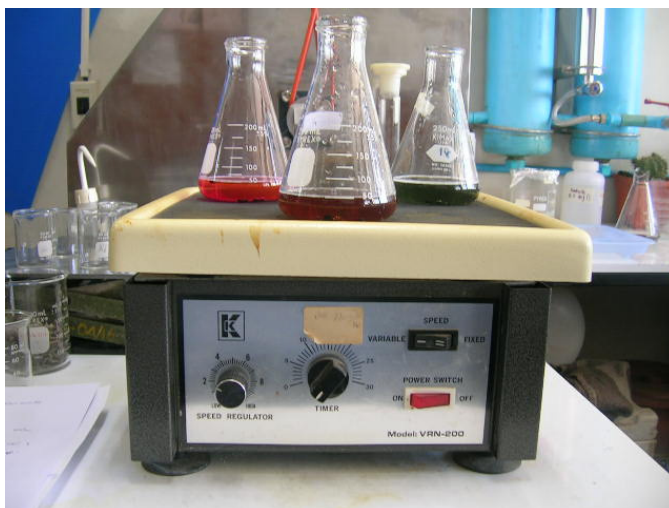
- (1) ชุดอุปกรณ์ Jar test
- (2) pH meter
- (3) ปิเปต



ภาพประกอบที่ 19 แสดงเครื่องมือสำหรับการทำ Jar Test

3.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

- (1) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
- (2) นาฬิกาจับเวลา ความแม่นยำ ± 0.01 วินาที
- (3) Shaker ยี่ห้อ KK รุ่น VRN-200



ภาพประกอบที่ 20 แสดงเครื่องเขย่า ยี่ห้อ KK รุ่น VRN-200

3.3.7 อุปกรณ์วิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่าง ๆ

- (1) ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่า COD , BOD

3.3.8 ชุดอุปกรณ์ศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีข้อม

- (1) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น Quinox 55
- (2) เครื่อง Freeze Dryer

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การหาความเข้มข้นของไอโซน ตามวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ (AOAC, 1995)

1) การเตรียมสารละลาย Absorbing reagent 1% KI ใน 0.1 M Phosphate buffer มีขั้นตอนดังนี้

- (1) ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 13.61 กรัม
- (2) ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 10.00 กรัม
- (3) ชั่ง Anhydrous disodium hydrogen phosphate 14.20 กรัม
- (4) ละลายสารเคมีทั้งหมดในน้ำกลั่น (Double distilled water) ทำให้มีปริมาตร

1 ลิตร

(5) บรรจุสารละลายในขวดสีชา เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนนำมาใช้ หากเก็บสารละลายในตู้เย็นจะสามารถเก็บไว้ได้นานหลายสัปดาห์

2) การเตรียมสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.025 M

- (1) ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 16.0 กรัม
- (2) ชั่งไอโอดีน (I) 3.1730 กรัม
- (3) ละลายสารเคมีทั้งหมดในน้ำกลั่น (Double distilled water) ทำให้มีปริมาตร

500 มิลลิลิตร

(4) บรรจุสารละลายในขวดสีชา เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนนำมาใช้

3) การสร้างกราฟไอโอดีนมาตรฐาน

เป็นกราฟมาตรฐานที่ใช้บอกปริมาณความเข้มข้นของไอโซน เมื่อทราบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Absorbing reagent มีขั้นตอนดังนี้

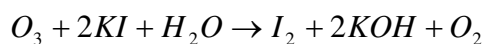
(1) เตรียมสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.00125 M โดยปิเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.025 M ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร โดยให้ละลายในสารละลาย Absorbing reagent

(2) ปิเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.00125 M ที่เตรียมไว้ 0.2 , 0.4 , 0.6 , 0.8 , 1.0 และ 1.2 มิลลิลิตร ละลายด้วยสารละลาย Absorbing reagent จนได้ปริมาตร 25

มิลลิลิตร โดยปริมาตรสารละลายไอโอดีนมาตรฐานสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอโอดีนได้ดังนี้

ไอโอดีนมาตรฐาน (ml)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
Exact Concentration ($\mu\text{mole/l}$)	10	20	30	40	50	60

(3) นำสารละลายไอโอดีนมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมไว้หาค่าการดูดกลืนของแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร (Nagdev, 1992) เป็นไปตามสมการ



โดยไอโอดีน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์ ได้เป็นโมเลกุลของไอโอดีน 1 โมล

3.4.2 การศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณไอโอดีนกับอัตราการไหลของออกซิเจน

อัตราการไหลที่ต่างกันทำให้ปริมาณไอโอดีนที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงต้องมีการหาปริมาณไอโอดีนที่อัตราการไหลของออกซิเจนในช่วง 6-10 ลิตรต่อนาที เพื่อจะได้ทราบอัตราการไหลของออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตไอโอดีน โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) นำสารละลาย absorbing reagent บรรจุใน midget impringer 2 ขวด ที่ต่อกันแบบอนุกรม ขวดละ 50 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบที่ 21 ที่ปลายของท่อนำออกซิเจนเป็นลูกฟูกแก้วที่ช่วยในการแตกตัวของออกซิเจน และทนต่อการกัดกร่อนของไอโอดีน ถ้าเป็นลูกฟูกทั่วไปอาจเกิดการกัดกร่อนทำให้เกิดความเสียหายแก่ลูกฟูกได้ และทำให้สารละลายเกิดการเจือปน

2) ผ่านออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดไอโอดีน โดยกำหนดให้ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 8 กิโลโวลต์ ให้อัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 6 ลิตรต่อนาที

3) ผ่านไอโอดีนที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอโอดีนไปยัง midget impringer ที่บรรจุสารละลาย absorbing reagent ทั้ง 2 ขวด เป็นเวลา 3 นาที

4) นำสารละลาย absorbing reagent ที่ได้หาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร

5) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ หาคความเข้มข้นของไอโชนโดยเทียบกับกราฟไอโอดีนมาตรฐาน

6) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 7 , 8 , 9 และ 10 ลิตรต่อนาที

7) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ให้เป็น 9 , 10 และ 11 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

8) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนในช่วง 6-10 ลิตรต่อนาที กับปริมาณไอโชนที่ความต่างศักย์ในช่วง 8-11 กิโลโวลต์



ภาพประกอบที่ 21 แสดงการต่อ midget imprinter 2 ขวด ต่ออนุกรมที่ใช้วัดปริมาณไอโชน

3.4.3 การศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณไอโชนกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องกำเนิดไอโชน ปริมาณไอโชนที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไป จึงมีการหาค่าปริมาณไอโชนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) นำสารละลาย absorbing reagent บรรจุใน midget imprinter 2 ขวด ที่ต่อกันแบบอนุกรม ขวดละ 50 มิลลิลิตร

2) ผ่านออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 ลิตรต่อนาที ให้ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 8 กิโลโวลต์

3) ผ่านโอโซนที่ได้จากเครื่องกำเนิดโอโซนไปยัง midget imprinter ที่บรรจุสารละลาย absorbing reagent ทั้ง 2 ชนิด เป็นเวลา 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.5 นาที ตามลำดับ

4) นำสารละลาย absorbing reagent ที่ได้หาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV - visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร

5) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ หาค่าความเข้มข้นของโอโซนโดยเทียบกับกราฟไอโอดีนมาตรฐาน

6) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ให้เป็น 9 , 10 และ 11 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

7) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการผ่านโอโซนกับปริมาณโอโซน ที่ความต่างศักย์ในช่วง 8-11 กิโลโวลต์

3.4.4 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ

1) การเตรียมอุปกรณ์การวัดกระแสไฟฟ้า

(1) หุ้มหัววัดด้วยเทฟลอน เพื่อป้องกันอันตรายของไฟฟ้าแรงสูงที่อาจเกิดกับหัววัด

(2) นำเส้นลวดต่อผ่านช่องของหัววัดและเทฟลอน โดยพยายามให้เส้นลวดอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องหัววัด และไม่สัมผัสกับผนังของช่องหัววัด

2) การวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างการดิสชาร์จ

(3) นำปลายข้างหนึ่งของเส้นลวดต่อเข้ากับสายดินของเครื่องกำเนิดโอโซน

(4) ต่อสายสัญญาณจากหัววัดไปยังออสซิลโลสโคป

(5) ผ่านก๊าซออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยให้อัตราการไหลของก๊าซเป็น 2 ลิตรต่อนาที

(6) จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับเครื่องกำเนิดโอโซน โดยเริ่มที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์

(7) บันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

(8) เปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 ลิตรต่อนาที โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์เท่าเดิม ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

(9) แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นกระแสชาร์จ โดยใช้อัตราส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 มิลลิโวลต์ ต่อกระแสชาร์จ 1 มิลลิแอมป์

(10) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 3 กิโลโวลต์ ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 และ 8 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

3.4.5 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน

1) นำน้ำเสียที่ย้อมสีอะครีลิก 550 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2) ต่อขวดรูปชมพู่ ในข้อ 1) เข้ากับ midget impringer 2 ขวด ซึ่งมีสารละลาย absorbing reagent บรรจุขวดละ 50 มิลลิลิตร เพื่อทำการหาปริมาณโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยทั้ง 2 ขวดจะต่อกันในลักษณะอนุกรม

3) เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 8 ลิตรต่อนาที

4) ผ่านโอโซนไปยังขวดรูปชมพู่ ในข้อที่ 1 เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ

5) เก็บน้ำสี ทำการหาค่าการดูดกลืนของแสง ค่า BOD และค่า COD เพื่อใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำสี โดยจำแนกขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

5.1) การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนของแสงมีขั้นตอนดังนี้

(1) หาความยาวคลื่นที่เหมาะสมเนื่องจากการหาค่าการดูดกลืนของแสงจะต้องใช้ค่าความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสม เพราะจะทำให้ค่าการดูดกลืนของแสงที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลของความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์น้ำเสียที่ย้อมสีอะครีลิก จึงต้องทำการหาค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีแต่ละชนิด ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุด (ภาคผนวก ข)

(2) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสง

(3) หาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสี

(4) นำตัวอย่างน้ำสีที่ต้องการวิเคราะห์ มาทำการหาค่าการดูดกลืนของแสง โดยใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสม

5.2) การหาค่า COD

- (1) นำตัวอย่างน้ำสี 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดสำหรับหาค่า COD ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (2) เติม H_2SO_4 0.4 กรัม และ glass beads 2-3 เม็ด
- (3) เติมสารละลายกรดกำมะถัน (มี Ag_2SO_4 ผสมอยู่ก่อนแล้ว) 5 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ ผสมให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้เย็น
- (4) เติมสารละลายมาตรฐานโพตัสเซียมไดโครเมต 0.04167 M 10 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
- (5) เติมสารละลายกรดกำมะถัน 25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
- (6) นำขวดหาค่า COD ต่อกับ Condenser เปิดน้ำหล่อเย็น
- (7) เปิดเตาให้ความร้อนทำการ Reflux 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็น ผสมน้ำกลั่นจนปริมาตรรวมเป็น 140 มิลลิลิตร
- (8) ไทเตรตไดโครเมตที่มากเกินไปด้วย FAS 0.25M โดยใช้ 2-3 หยด Ferroin indicator solution จุดยุติคือจุดที่สีของสารละลายเปลี่ยนจากน้ำเงินแกมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
- (9) คำนวณหาค่า COD

5.3) การหาค่า BOD

- (1) ตวงตัวอย่างปริมาตรที่ต้องการตามตารางช่วงค่าบีโอดีและวิธีการเจือจางตัวอย่างน้ำ* เทในขวดสำหรับหาค่าบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร
- (2) เติม Dilution water จนถึงคอขวด และเติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 2 มิลลิลิตร
- (3) เติม Alkali-iodide-azide reagent 2 มิลลิลิตร ปิดฝาอย่างให้เกิดฟองอากาศ เขย่าให้เข้ากัน
- (4) รอให้เกิดตะกอนของ $Mn(OH)_2$ เติม conc. H_2SO_4 2 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน
- (5) ดูดตัวอย่างจากขวดหาค่าบีโอดี 203 มิลลิลิตร ไทเตรตด้วย 0.025 N $Na_2S_2O_3$ โดยมีน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์จนสีของสารละลายกลายเป็นสีเหลืองอ่อน
- (6) ไทเตรตต่อด้วย 0.025 N $Na_2S_2O_3$ จนสีน้ำเงินหายไป

(7) คำนวณค่าบีโอดี

6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การลดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสี กับเวลา และกราฟระหว่าง %การลดของค่า COD และ %การลดของค่า BOD กับเวลา

3.4.6 การบำบัดน้ำสีด้วยโอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม

1) หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม มีขั้นตอน ดังนี้

(1) หาค่า pH และการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำสี

(2) ปรับค่า pH ของน้ำสียอมเสียกระจุต โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

(3) นำตัวอย่างน้ำสีใส่ในบีกเกอร์ 5 ใบ ใบละ 500 มิลลิลิตร

(4) นำบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบ ต่อเข้ากับเครื่อง Jar Test

(5) เติมสารส้มความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 10, 20, 30, 40

และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับลงในแต่ละบีกเกอร์

(6) เปิดเครื่อง Jar Test ด้วยความเร็วใบพัด 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

(7) เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

(8) ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

(9) ดูดตัวอย่างน้ำสี เฉพาะด้านบนโดยใช้ปิเปต

(10) หาค่าการดูดกลืนแสงของน้ำแต่ละบีกเกอร์ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำสุด

จะเป็นปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการใช้ในการทดลอง

2) การบำบัดน้ำสีด้วยสารส้ม และการผ่านโอโซน

(1) ปรับค่า pH ของน้ำสียอมเสียกระจุต โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

(2) นำตัวอย่างน้ำสีใส่ในบีกเกอร์ 5 ใบ ใบละ 500 มิลลิลิตร

(3) นำบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบ ต่อเข้ากับเครื่อง Jar Test

(4) เติมสารส้มความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อ

ลิตร ตามลำดับลงในแต่ละบีกเกอร์

(5) เปิดเครื่อง Jar Test ด้วยความเร็วใบพัด 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

(6) เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

(7) ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

(8) ตูดตัวอย่างน้ำสีเฉพาะด้านบนโดยใช้ปิเปต

(9) นำน้ำสีย้อมสีเอกระจูด 550 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000

มิลลิลิตร

(10) เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 8 ลิตรต่อนาที

(11) ผ่านโอโซนไปยังขวดรูปชมพู่ ในข้อที่ (9) เป็นเวลา 30 และ 60 นาที

ตามลำดับ

(12) เก็บน้ำสีทำการหาค่าการดูดกลืนของแสงค่า BOD และค่า COD เพื่อใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำสี

3.4.7 การบำบัดน้ำสีย้อมด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมทำการศึกษาโดย

1) นำน้ำเสียสีย้อม 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมถ่าน 10 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียสีย้อม

2) เขย่าด้วย shaker ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 5 นาที

3) กรองน้ำเสียสีย้อมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

4) นำไปวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีแต่ละตัว

5) เปลี่ยนเวลาสัมผัสเป็น 10, 15, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที

6) เปลี่ยนปริมาณถ่านเป็น 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียสีย้อม

7) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีกับเวลาเพื่อหาเวลาที่ต้องการดูดซับเข้าสู่สมดุล

3.4.8 การบำบัดน้ำสีย้อมด้วยโอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

1) นำน้ำเสียสีย้อม 550 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมถ่าน 10 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียสีย้อม

2) เขย่าด้วย shaker ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 120 นาที

3) กรองน้ำเสียสีย้อมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

4) นำน้ำสีข้อมเสื่อกระจุด 550 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

5) เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 8 ลิตรต่อนาที

6) ผ่านโอโซนไปยังขวดรูปชมพู่ในข้อที่ 4) เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ

7) เก็บน้ำสี ทำการหาค่าการดูดกลืนของแสง ค่า BOD และ ค่า COD เพื่อใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำสี

3.4.9 การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีข้อมหลังบำบัดด้วยโอโซน

1) ชั่งผงสีข้อมเสื่อกระจุดสีชมพู 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร

2) นำสารละลายสีชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ใน midget imprinter

3) เปิดเครื่องกำเนิดโอโซนโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที

4) ผ่านโอโซนไปยังสารละลายสีชมพูเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที

5) นำสารละลายสีชมพูจากข้อ 1) และสารละลายสีชมพูที่ผ่านการบำบัดจากข้อ

4) ทำให้แห้ง โดยใช้อุปกรณ์ Freeze Dryer

6) ศึกษาโครงสร้างของผงสีที่แห้งแล้วจากข้อที่ 5) ด้วยเครื่อง FTIR โดยชั่งน้ำหนักผงสีชมพูทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนเท่ากันคือ 2.1 มิลลิกรัม และใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 200 มิลลิกรัม

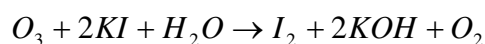
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ จะแบ่งตามขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยตามที่แบ่งไว้ในบทที่ 3 ดังนี้

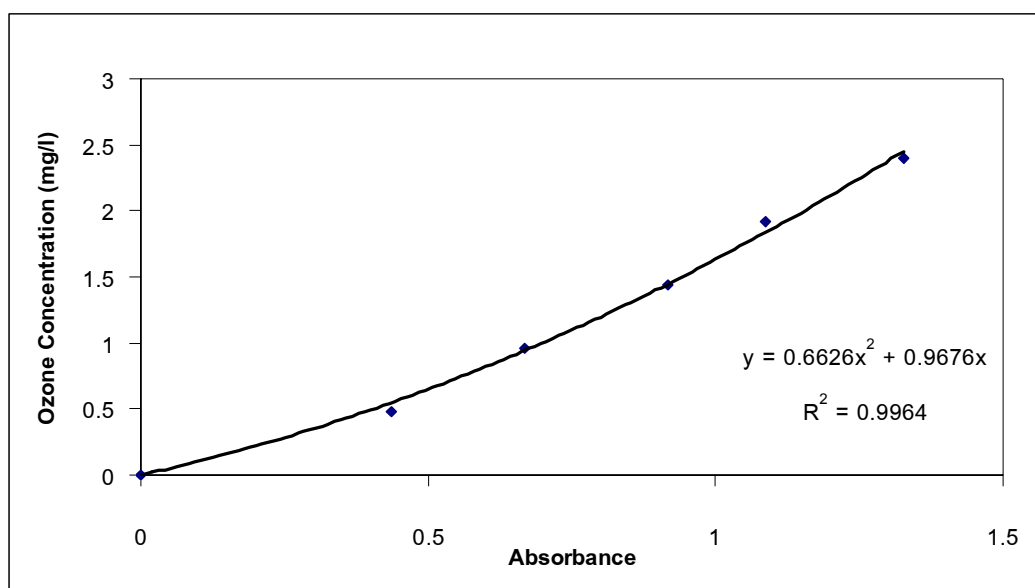
4.1 การหาความเข้มข้นของปริมาณโอโซน

โอโซนที่ผลิตได้จากเซลล์พลาสมาโอโซนในเซอร์สามารถวัดได้โดยใช้วิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ (AOAC, 1995) จะได้กราฟไอโอดีนมาตรฐานที่ใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการเปรียบเทียบหาปริมาณไอโอดีน (I_2) ที่เกิดขึ้นจากโอโซนที่ผลิตได้ไปทำปฏิกิริยากับไอโอไดต์ไอออน (I^-) เกิดเป็นไอโอดีน (I_2) ใน absorbing reagent ซึ่งไอโอดีนสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของไอโอดีนที่ 352 นาโนเมตร ทำให้สามารถบอกปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น ได้จากปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้น ตามสมการ (Nagdev, 1992)



จากสมการข้างต้น 1 โมล ของโอโซน จะได้ 1 โมล ของไอโอดีน (I_2) ดังนั้นปริมาณของโอโซนที่ได้สามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสง (I_2) กับปริมาณของโอโซน

จากการศึกษาการหาปริมาณโอโซน โดยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ จะได้กราฟไอโอดีนมาตรฐานที่ใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการเปรียบเทียบหาปริมาณโอโซน ดังภาพประกอบที่ 22



ภาพประกอบที่ 22 แสดงกราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสงต่อปริมาณโอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ

เขียนสมการของกราฟ

$$y = ax^2 + bx$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของโอโซน หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

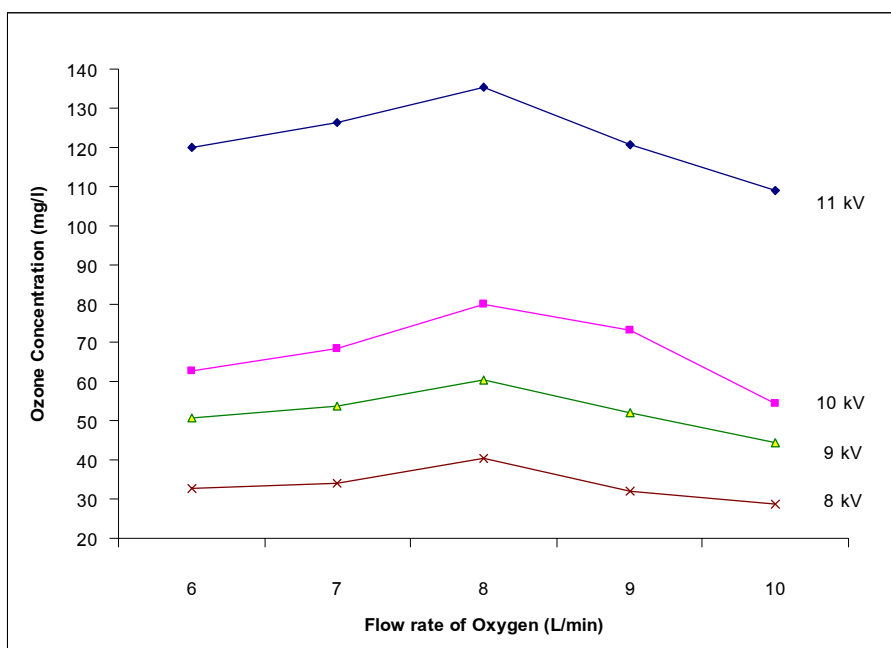
x คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$$a = 0.6626$$

$$b = 0.9676$$

4.2 การหาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซออกซิเจนเข้าหลอดโอโซนเซอร์ที่ค่าต่างๆ ต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้ โดยกำหนดอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 6-10 ลิตรต่อนาที เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จ 3 นาที จะได้ผลการทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 23



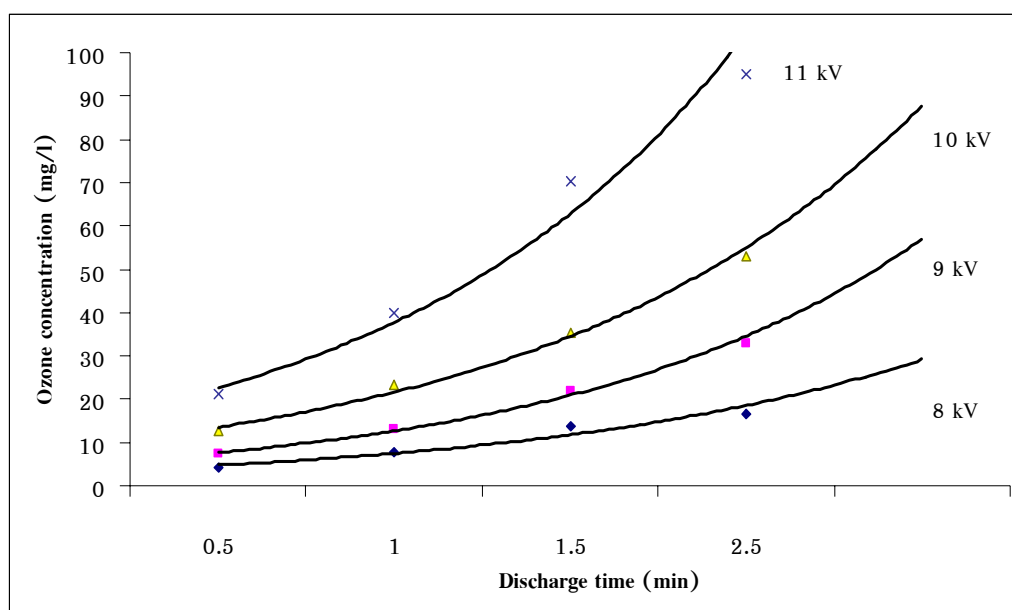
ภาพประกอบที่ 23 แสดงปริมาณโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 6-10 ลิตรต่อ นาที ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์

จากภาพประกอบที่ 23 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน มีผลต่อการปริมาณการเกิดโอโซนของระบบ นั่นคือเมื่อให้เงื่อนไขของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ และปัจจัยอื่น ๆ ให้มีค่าคงที่ พบว่า อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้ ปริมาณการเกิดโอโซนเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหล ที่ทำให้เกิดโอโซนมากที่สุด และหลังจากอัตราการไหลช่วงนี้แล้วปริมาณการเกิดโอโซนจะลดลง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวระดับหนึ่งที่ทำให้สามารถผลิตโอโซนได้มากที่สุด น่าจะมีสาเหตุมาจาก ณ ปริมาณศักย์ไฟฟ้าคงที่นั้น พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (โอโคโนเซอร์) คงที่ ซึ่งเพียงพอต่อจำนวนโมเลกุลของออกซิเจนขนาดหนึ่ง ดังนั้นหากเพิ่มปริมาณโมเลกุลของ ออกซิเจนมากขึ้น โดยเพิ่มอัตราการไหล จึงเป็นผลให้ปริมาณโมเลกุลบางส่วนไม่สามารถถูก ดิสชาร์จและเปลี่ยนไปเป็นโอโซนได้ อีกเหตุผลหนึ่งน่าจะมาจากการที่อัตราการไหลของอากาศสูง ๆ จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนไหลผ่านเร็วมากในบริเวณช่องว่างดิสชาร์จ ทำให้โมเลกุลของก๊าซ ส่วนมากไม่ได้ถูกทำให้แตกตัวในเวลาที่เหมาะสม ทำให้ปริมาณโอโซนต่ำกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ๆ

ภายใต้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ต่างกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน ขณะที่ใช้เวลาดิสชาร์จเท่า ๆ กัน จะเห็นว่า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิต โอโซนของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากัน คือ 8 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเป็นอัตราการไหล ที่ให้ปริมาณโอโซนมากกว่าที่อัตราการไหลอื่น ๆ ดังนั้นในการศึกษาจึงเลือกกำหนดอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจนเพียงค่าเดียวคือที่ 8 ลิตรต่อนาที

4.3 การหาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากการหาปริมาณโอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที จะได้กราฟแสดงปริมาณโอโซนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ แสดงดังภาพประกอบที่ 24



ภาพประกอบที่ 24 แสดงปริมาณโอโซนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ที่เวลาดีสชาร์จในช่วง 0.5-2.5 นาที

จากผลของการทดลองพบว่าปริมาณความเข้มข้นของการเกิดโอโซนกับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ แสดงดังภาพประกอบที่ 24 พบว่าที่เวลาดีสชาร์จเดียวกันปริมาณการเกิดโอโซนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้า สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของโอโซนกับเวลาดีสชาร์จในลักษณะของกราฟเป็นรูปเอกซโพเนนเชียลซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่แสดงในรูป

$$y = a \cdot \exp(bt)$$

เมื่อ y คือ ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

t คือ เวลาที่เกิดดีสชาร์จ หน่วย นาที

$$a = 0.0504 \exp(0.5098V) \quad ; \quad R^2 = 0.9975$$

$$b = 0.0171V + 0.3107 \quad ; \quad R^2 = 0.7945$$

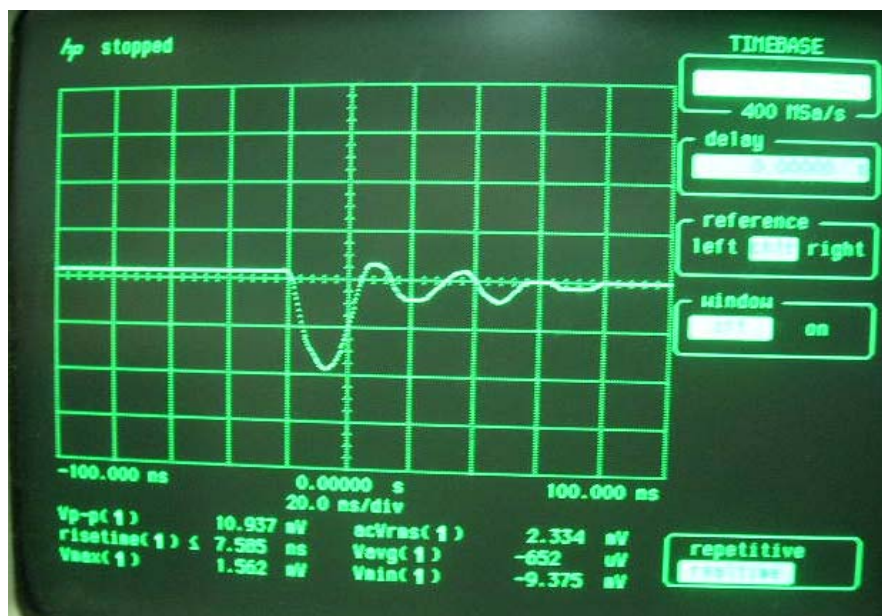
V = ค่าศักย์ไฟฟ้า หน่วย kV

และได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเวลาการดิสชาร์จทำให้ปริมาณโอโซนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเวลาในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือเวลาในการทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวแล้วรวมกันเป็นโอโซนมีมากขึ้นก็ย่อมได้โอโซนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือปริมาณ yield ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Francis, 1972; ยุทธนา และคณะ, 2541)

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลองที่ 10 กิโลโวลต์ เพื่อเปรียบเทียบกับงานที่ได้มีการศึกษามาก่อน (ไพฑูรย์, 2544) ว่าโอโซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่จะให้ผลผลิตโอโซนที่มากกว่าหรือไม่ เนื่องจากผลผลิตโอโซนที่มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้บำบัดน้ำเสียดียิ่งขึ้น พบว่าโอโซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ให้ผลผลิตโอโซนที่มากกว่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือ 10 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที และในเวลาเท่ากันคือ 3 นาที

4.4 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ

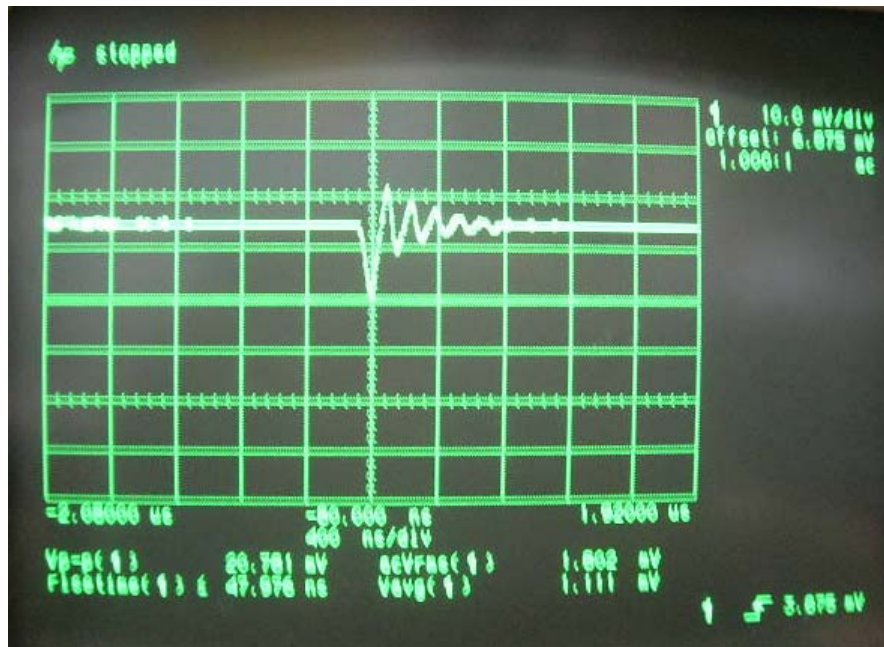
จากการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ ผลการทดลองจากการออกซิลโลสโคปที่ความต่างศักย์ 2 และ 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2 และ 8 ลิตรต่อนาที แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 25, 26, 27 และ 28



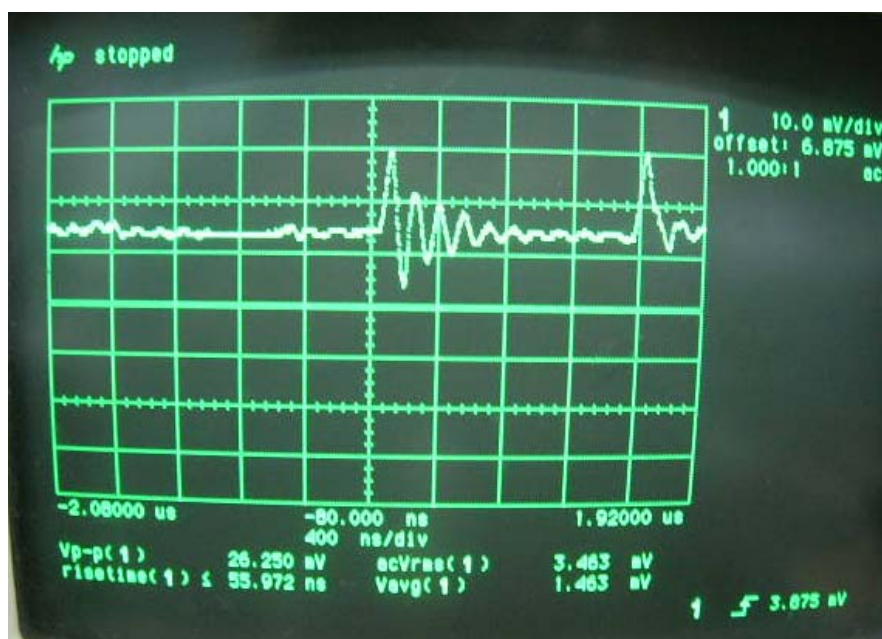
ภาพประกอบที่ 25 แสดงสัญญาณของกระแสดิสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที



ภาพประกอบที่ 26 แสดงสัญญาณของกระแสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที



ภาพประกอบที่ 27 แสดงสัญญาณของกระแสชาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที



ภาพประกอบที่ 28 แสดงสัญญาณของกระแสดิซาร์จที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที

จากภาพประกอบที่ 25 และ 26 แสดงกระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างการดิซาร์จ จะพบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 และ 8 ลิตรต่อนาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็น 10 มิลลิโวลต์ แปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างการดิซาร์จ โดยใช้อัตราส่วน 5 มิลลิโวลต์ต่อ 1 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นกระแสดิซาร์จมีค่าเท่ากับ 2 มิลลิแอมแปร์ กระแสดิซาร์จที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่

เมื่อเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 และ 8 ลิตรต่อนาที แสดงดังภาพประกอบที่ 27 และ 28 พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็น 14 มิลลิโวลต์ ทั้งสองอัตราการไหล เมื่อแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างการดิซาร์จ โดยใช้อัตราส่วน 5 มิลลิโวลต์ต่อ 1 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นกระแสดิซาร์จมีค่าเท่ากับ 2.8 มิลลิแอมแปร์ กระแสดิซาร์จที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ เช่นเดียวกัน

ดังนั้นจากการศึกษาได้ว่า ค่ากระแสดิซาร์จที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้นตามค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านเข้าไปในระบบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสดิซาร์จ ซึ่งเป็นไปตามกฎทางไฟฟ้าของโอห์มที่ว่า เมื่อพิจารณาในระบบที่มีความต้านทานเดียวกัน ค่าของกระแสไฟฟ้าของระบบจะแปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบนั้น

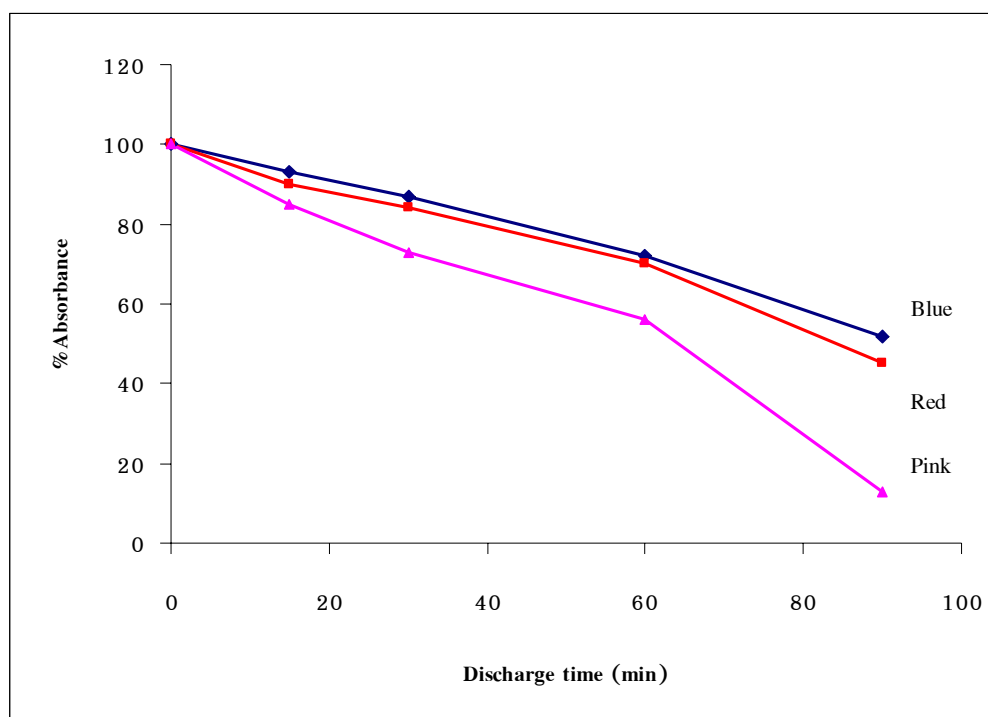
4.5 การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเอกระจุด

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสีเอกระจุด ทำการศึกษา โดยการใช้โอโซน, การตกตะกอนด้วยสารส้ม, การใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม, การดูดซับด้วยถ่าน Activated Carbon และการใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่าน Activated Carbon ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อใช้ออกคุณภาพน้ำ 3 ตัวแปร คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างก่อนการบำบัด (ที่เวลาติสซาร์จเท่ากับศูนย์) กับภายหลังการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ

ในการหาค่าการดูดกลืนของแสงจะต้องทำการวิเคราะห์ เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสีย้อมแต่ละชนิด โดยวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ผลการตรวจสอบหาความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำเสียสีเอกระจุดของสีต่าง ๆ คือ น้ำเสียสีย้อมสีน้ำเงินที่ 590 นาโนเมตร สีแดงที่ 490 นาโนเมตร และสีชมพูที่ 555 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข)

4.5.1 การบำบัดน้ำเสียสีเอกระจุดด้วยโอโซน

จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียสีเอกระจุด ด้วยโอโซนนาน 15, 30, 60 และ 90 นาที ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 29



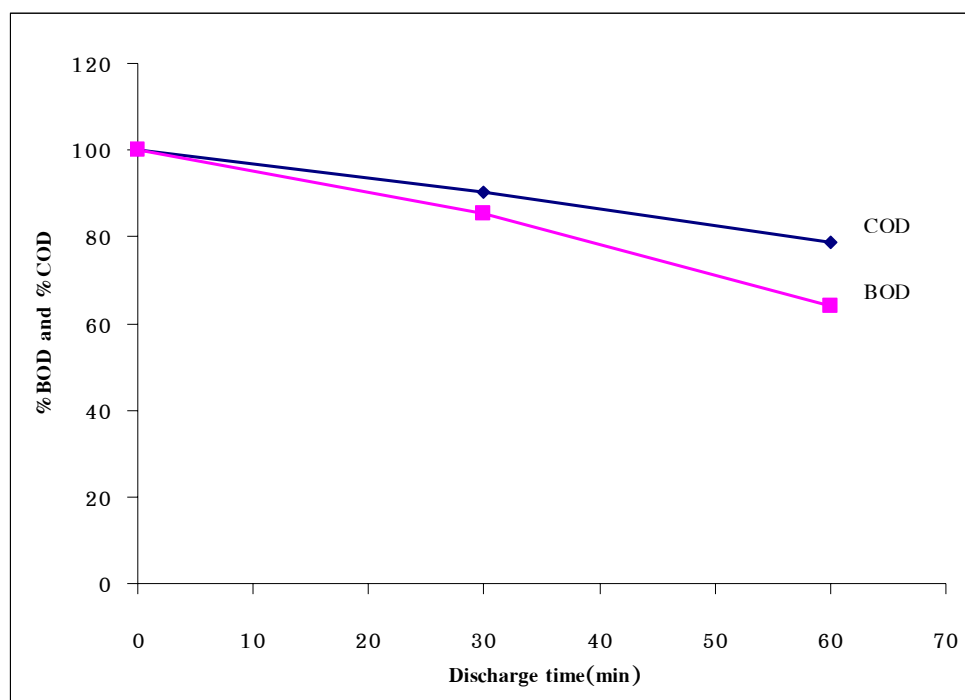
ภาพประกอบที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมหลังผ่านโอโซน อัตราการไหลออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ที่เวลา 15 30 60 และ 90 นาที

จากภาพประกอบที่ 29 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นโอโซนสามารถทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียลดลง โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการดูดกลืนของแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซน ที่เวลา 15, 30, 60 และ 90 นาที มีค่าลดลงเหลือ 85%, 73%, 56% และ 13% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการบำบัดด้วยโอโซน (ที่เวลาติดสาร์จเท่ากับศูนย์) เห็นได้ว่าระยะเวลาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสีย โดยเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสของโอโซนกับน้ำเสียมากขึ้นความเข้มข้นของน้ำเสียก็จะลดลง และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในน้ำเสียสีส้มสีแดงและสีน้ำเงิน

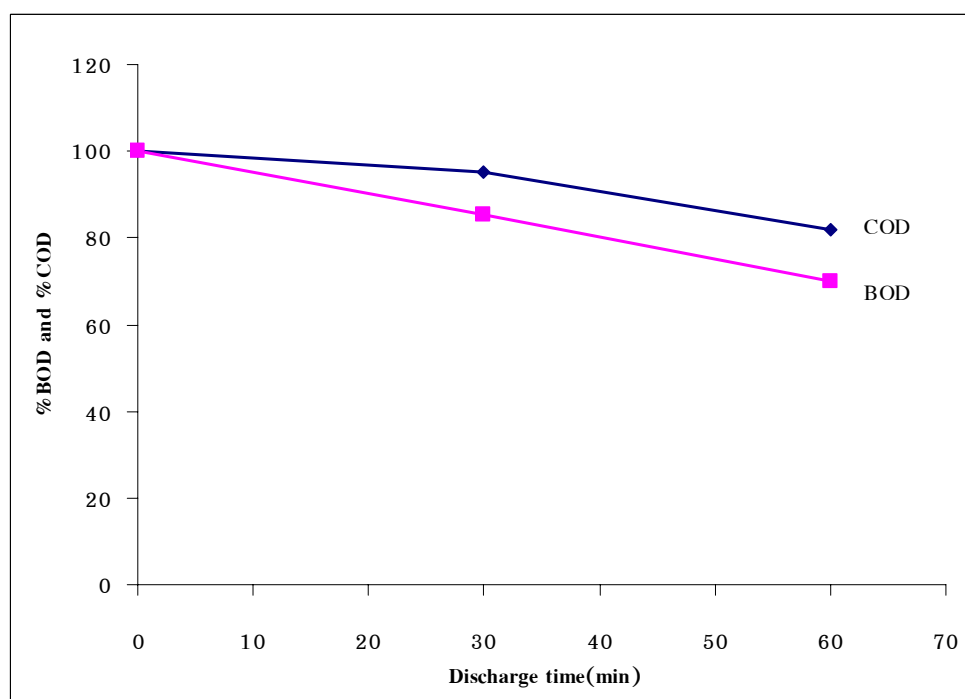
การที่ร้อยละของการดูดกลืนแสงลดลงหมายความว่าสารละลายสีส้มเหล่านี้ยอมให้แสงส่องผ่านได้ดีมากขึ้น ซึ่งในตามธรรมชาติการที่แสงส่องผ่านได้ดีมากขึ้นจะทำให้การสลายตัวเองตามธรรมชาติของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น (เพราะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์) สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อการบำบัดตัวเองตามธรรมชาติได้ดีขึ้นนั่นเอง จึงกล่าวได้ว่าโอโซนเป็นตัวเร่งให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในสารละลายสีส้มโดยกระบวนการตามธรรมชาติเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ยืนยันว่าโอโซนช่วยทำให้คุณภาพของสารละลายดีขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าสารประกอบเชิงซ้อนในสารละลายโดยใช้เทคนิคของ FTIR ในหัวข้อต่อไป

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย จะศึกษาดัชนีตรวจวัดลักษณะสมบัติน้ำเสีย หรือคุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ ค่า COD และค่า BOD ของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีการต่างๆ โดยค่า COD (Chemical oxygen demand) เป็นค่าปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์ หรือย่อยสารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนค่า BOD (Biochemical oxygen demand) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความสกปรกของน้ำในรูปปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ในช่วงระยะเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เวลา 5 วัน และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

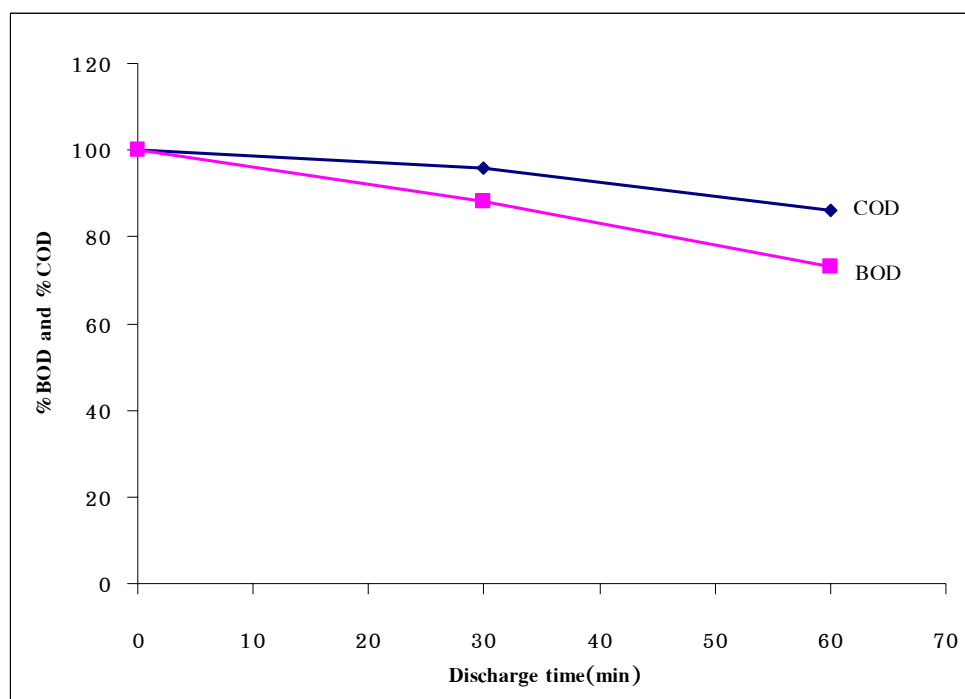
โดยในที่นี้ได้มีการศึกษาในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียหลังจากที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนเป็นเวลา 30 และ 60 นาที เปรียบเทียบกับค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนของสีชมพู สีแดง และสีน้ำเงิน ได้ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 30, 31 และ 32



ภาพประกอบที่ 30 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียผสมพู่ หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน อัตราการไหลออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที



ภาพประกอบที่ 31 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียผสมแดง หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน อัตราการไหลออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่าง 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที



ภาพประกอบที่ 32 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียชุมชนน้ำเงิน หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ที่อัตราการไหลออกซิเจน 8 ลิตรต่อนาที ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที

จากภาพประกอบที่ 30, 31 และ 32 พบว่าโอโซนทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียชุมชนต่างๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนนาน 30 และ 60 นาที เทียบกับค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียชุมชนพุก่อนการบำบัด (ที่เวลาดีสชาร์จเท่ากับศูนย์) โดยของน้ำเสียชุมชนพุกมีค่าลดลงเหลือ 64% และ 78% ตามลำดับ ของน้ำเสียชุมชนแดงมีค่าลดลงเหลือ 70% และ 82% ตามลำดับ และของน้ำเสียชุมชนน้ำเงินมีค่าลดลงเหลือ 73% และ 86% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า BOD และค่า COD ที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD นี้จะมีค่าลดลงตามเวลาดีสชาร์จที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง, ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที

Sample / Parameter	Absorbance		BOD (mg/l)		COD (mg/l)		%reduction of Absorbance	% reduction of BOD	% reduction of COD
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.768	114	73	392	306	44.0%	36.0%	22.0%
Blue	2.098	1.511	158	115	627	539	28.0%	27.2%	14.0%
Red	3.681	2.834	117	82	431	353	23.0%	30.0%	18.1%

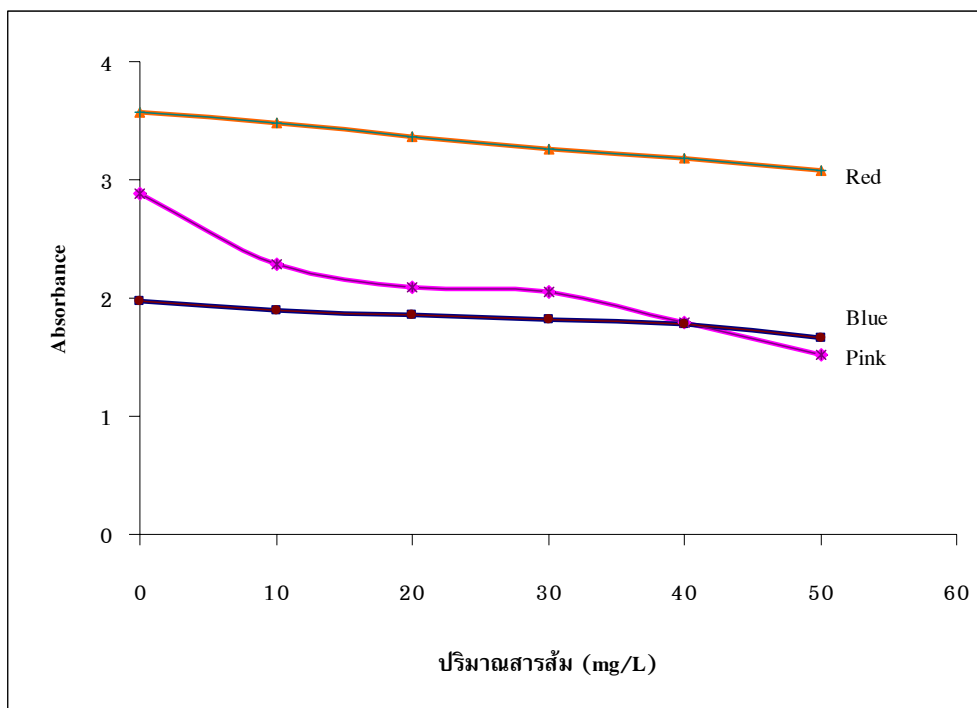
หมายเหตุ : Bef. หมายถึง ก่อนการบำบัด Aft. หมายถึง หลังการบำบัด

จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำสีข้อมลือกระจุตสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 7 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โอโซนสามารถทำให้ความเข้มข้นของน้ำสีข้อมลดลง โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการดูดกลืนแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซนของสีข้อม สีชมพู สีน้ำเงิน และสีแดง ที่เวลา 60 นาที มีค่าเป็น 44.0% 28.0% และ 23.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ไม่ได้บำบัดด้วยโอโซน (ที่เวลาดีสชาร์จเท่ากับศูนย์) เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดส์สารประกอบเชิงซ้อนของสีข้อม ทำให้ความเข้มของสีลดลง หรือกล่าวได้ว่าทำให้น้ำมีความโปร่งแสงมากขึ้น โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซน

นอกจากการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสงแล้ว ค่า BOD และค่า COD ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงคุณภาพน้ำ จากตารางที่ 7 พบว่าโอโซนทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีข้อมสีชมพูหลังการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที มีค่าลดลง 36.0% และ 22.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีข้อมสีชมพูก่อนการบำบัด (ที่เวลาดีสชาร์จเท่ากับศูนย์) และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้สำหรับน้ำสีข้อมสีน้ำเงิน และสีแดง ค่า BOD และค่า COD หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนในสีข้อมกับไอออนของออกซิเจนที่แตกตัวโมเลกุลของโอโซน

4.5.2 การบำบัดน้ำสีข้อมลื่อกระจูดโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ในขั้นตอนนี้เริ่มจากการหาปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 33



ภาพประกอบที่ 33 แสดงปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำให้น้ำสีข้อมลื่อตกตะกอน

จากภาพประกอบที่ 33 พบว่าเมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการบำบัดน้ำสีข้อมลื่อกระจูด ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำให้เกิดการตกตะกอนสูงสุด คือ 50 มิลลิกรัม เนื่องจากให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำสุด (มีการตกตะกอนมากที่สุด) ซึ่งจะเป็น ปริมาณที่กำหนดที่ใช้ในการทดลอง และเป็นปริมาณที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดง และสีน้ำเงินเช่นเดียวกัน

เมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิกรัม ทำการ บำบัดน้ำสีโดยการทำให้เกิดการตกตะกอน สามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืน แสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการ บำบัด ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มของน้ำเสีย

Sample / Parameter	Absorbance		BOD (mg/l)		COD (mg/l)		% reduction of Absorbance	% reduction of BOD	% reduction of COD
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.648	114	80	392	318	47.8%	29.8%	19.0%
Blue	2.098	1.732	158	91	627	293	17.5%	42.4%	53.3%
Red	3.681	3.104	117	38	431	248	15.7%	67.5%	42.5%

หมายเหตุ : Bef. หมายถึง ก่อนการบำบัด Aft. หมายถึง หลังการบำบัด

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มสามารถทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง, ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเป็น 47.8% 29.8% และ 19.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียเสียก่อนการบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม และพบลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับน้ำเสียสีน้ำเงิน และสีแดง

4.5.3 การบำบัดน้ำเสียสีน้ำเงินโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับโอโซน

ในหัวข้อนี้ทำการทดลองโดยทำการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อน และนำน้ำที่ได้ไปทำการออกซิเดชันด้วยโอโซนที่ผลิตจากระบบโอโซนเซอร์นาน 60 นาที น้ำที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง และคุณภาพของน้ำด้วยการวัดค่า BOD และค่า COD โดยผลที่ได้สามารถแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง, ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที ของน้ำเสีย

Sample / Parameter	Absorbance		BOD (mg/l)		COD (mg/l)		% reduction of Absorbance	% reduction of BOD	% reduction of COD
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.105	114	62	392	243	65.0%	45.6%	38.0%
Blue	2.098	1.154	158	30	627	218	45.0%	81.0%	65.2%
Red	3.681	2.088	117	21	431	223	43.3%	82.1%	48.3%

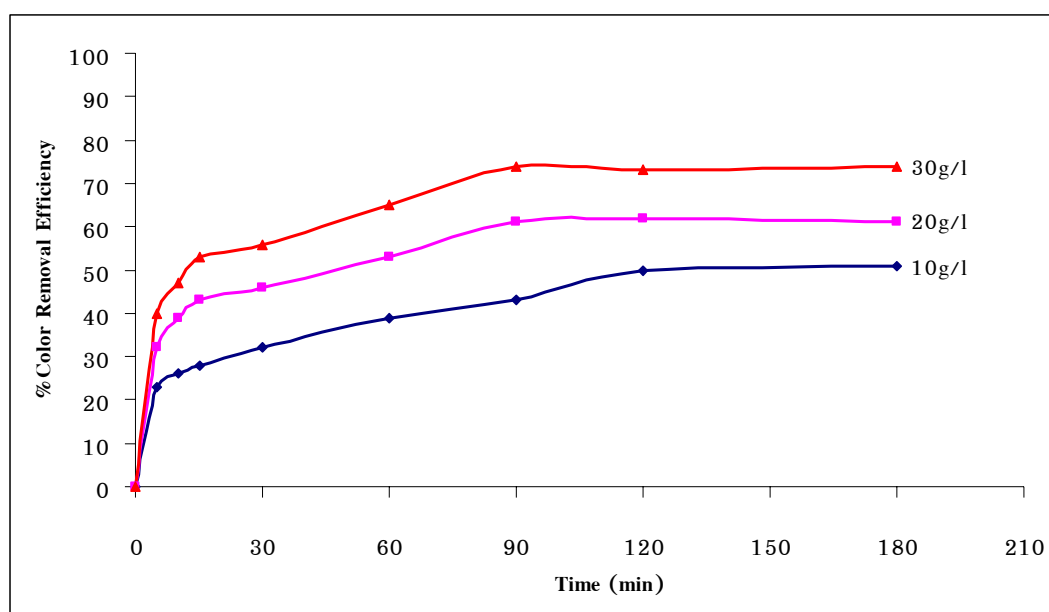
หมายเหตุ : Bef. หมายถึง ก่อนการบำบัด Aft. หมายถึง หลังการบำบัด

จากตารางที่ 9 พบว่าการบำบัดน้ำสีโดยการตกตะกอนด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อน ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที สามารถทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของน้ำสีข้อมสีชมพูเป็น 65.0% 45.6% และ 38.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีข้อมสีชมพูก่อนการบำบัด และพบลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับน้ำสีข้อมสีน้ำเงิน และสีแดง

โดยการทำการบำบัดน้ำสีข้อมด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อน ทำให้การบำบัดด้วยโอโซนสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสีข้อมดีขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนด้วยสารส้มทำให้สารแขวนลอย หรืออนุภาคใหญ่บางส่วนถูกกำจัดไปก่อนการบำบัดด้วยโอโซน

4.5.4 การบำบัดน้ำสีข้อมสีชมพูโดยดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

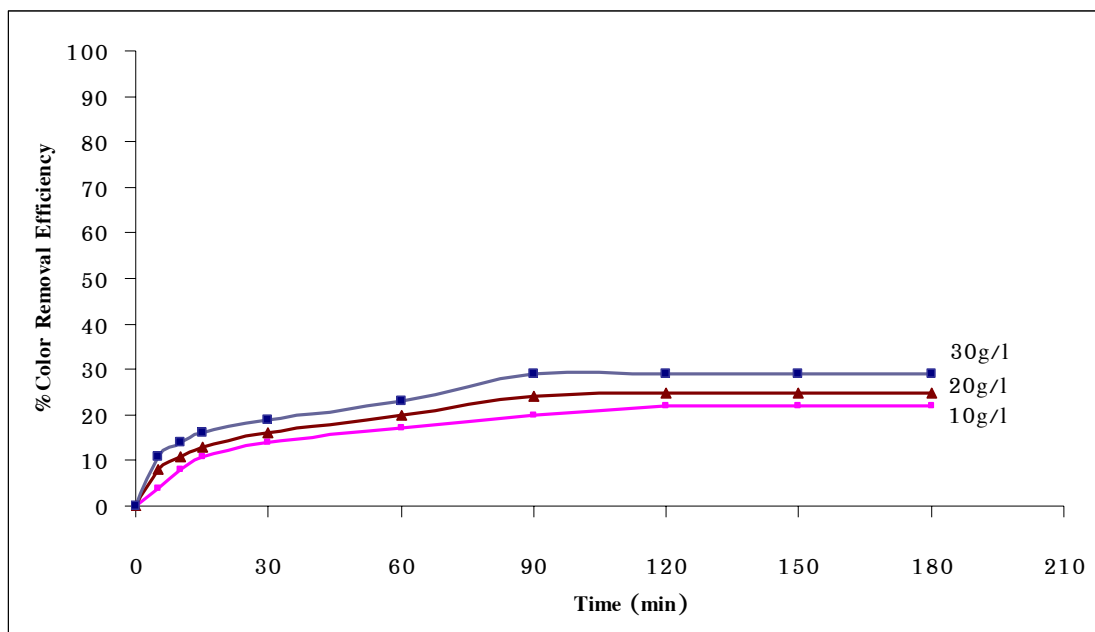
ผลจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านและเวลาสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิด ทำการศึกษาโดยแปรเปลี่ยนปริมาณถ่านที่ 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร และที่เวลา 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที แสดงดังภาพประกอบที่ 34, 35 และ 36



ภาพประกอบที่ 34 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมสีชมพู ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำสีข้อมที่เวลาต่างๆ

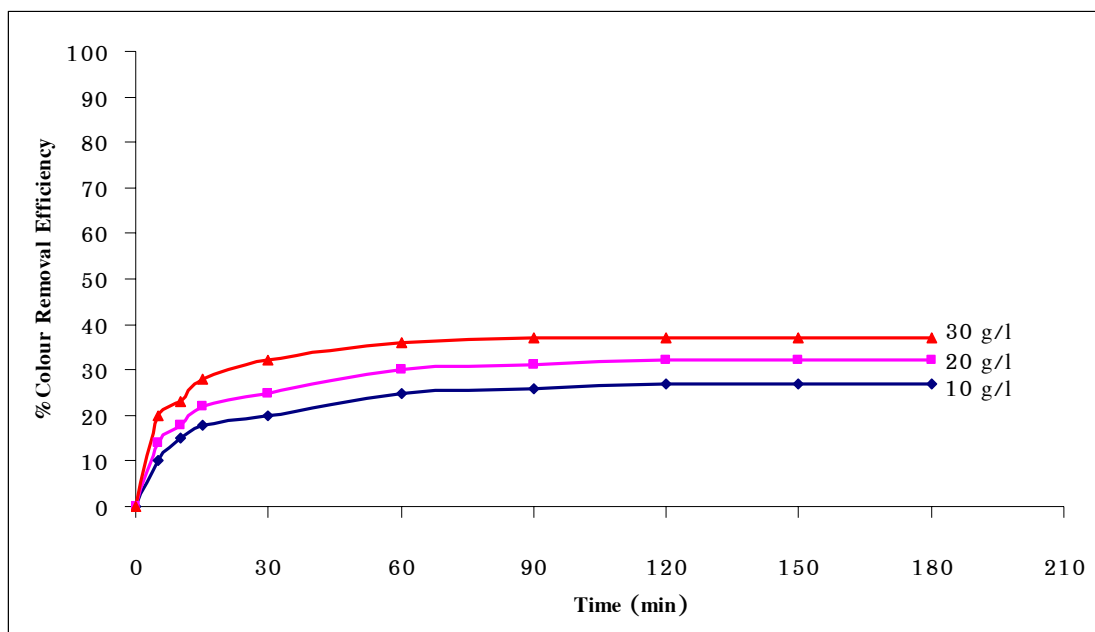
จากภาพประกอบที่ 34 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าประสิทธิภาพ

ในการกำจัดสีย้อมที่จุดสมดุลเป็น 50% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 61% และ 74% ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 35 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสีอะครีลิกแดง ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียสีย้อมที่เวลาต่างๆ

จากภาพประกอบที่ 35 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่จุดสมดุลเป็น 22% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 25% และ 29% ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 36 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเส้นกระดาษเงิน ที่ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า 120 รอบ/นาที เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียสีย้อมที่เวลาต่างๆ

จากภาพประกอบที่ 36 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่จุดสมดุลเป็น 27% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 32% และ 37% ตามลำดับ

สำหรับการเพิ่มปริมาณสารดูดซับทำให้ความหนาแน่นของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับน้อยลง เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับยังคงดูดซับไม่อิ่มตัวในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และที่ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจึงทำให้มีการดูดซับสารได้เพิ่มขึ้น โดยในขณะที่กระบวนการดูดซับดำเนินไป ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลจะไม่มีเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ

ตารางที่ 10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ของน้ำสีขุ่น

Sample / Parameter	Absorbance		ค่า BOD (mg/l)		ค่า COD (mg/l)		% reduction of Absorbance	% reduction of BOD	% reduction of COD
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.338	114	12	392	99	57.6%	89.5%	74.8%
Blue	2.098	1.348	158	17	627	241	35.8%	89.2%	61.6%
Red	3.681	2.637	117	26	431	227	28.4%	77.8%	47.3%

หมายเหตุ : Bef. หมายถึง ก่อนการบำบัด Aft. หมายถึง หลังการบำบัด

จากตารางที่ 10 พบว่าการบำบัดน้ำสีขุ่นโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีผลต่อการบำบัดน้ำสีขุ่น โดยค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของสีขุ่นสีชมพูเป็น 57.6% 89.5% และ 74.8% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD ของน้ำสีขุ่นเสียก่อนการบำบัดโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และพบลักษณะนี้เช่นเดียวกันสำหรับน้ำสีขุ่นสีน้ำเงินและสีแดง

4.5.5 การบำบัดน้ำสีขุ่นเสียก่อนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ร่วมกับโอโซน

เมื่อทำการทดลองบำบัดน้ำสีขุ่นโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ แล้วนำน้ำที่ได้มาบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที สามารถแสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัด โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที ของน้ำสีขุ่น

Sample / Parameter	Absorbance		BOD (mg/l)		COD (mg/l)		% reduction of Absorbance	% reduction of BOD	% reduction of COD
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	0.019	114	5	392	57	99.4%	95.6%	85.5%
Blue	2.098	0.123	158	8	627	175	94.1%	95.0%	72.1%
Red	3.681	0.311	117	7	431	179	91.6%	94.0%	58.5%

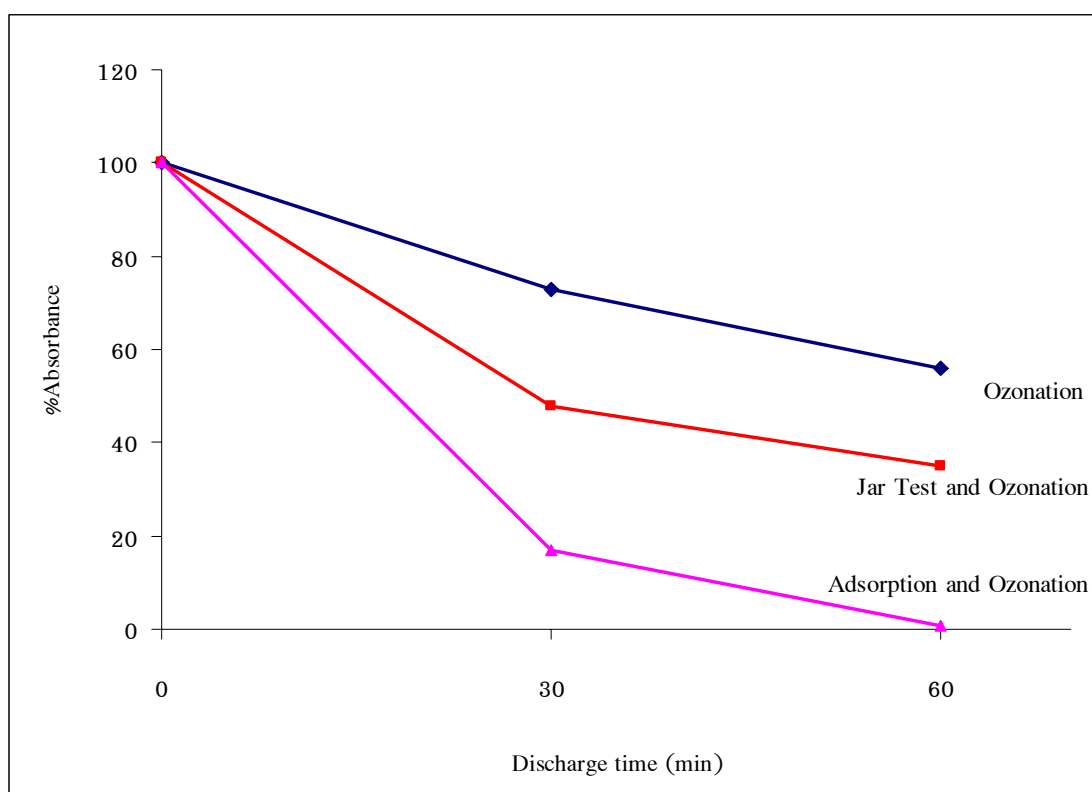
หมายเหตุ : Bef. หมายถึง ก่อนการบำบัด Aft. หมายถึง หลังการบำบัด

เมื่อทดลองทำการบำบัดน้ำสีขุ่นโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที สามารถแสดงผลที่ได้ตามตารางที่ 11 โดยการบำบัดน้ำสีขุ่นด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อนการใช้โอโซนในการออกซิไดซ์ พบว่าทำให้การบำบัดด้วยโอโซนมี

ประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีเหตุผลมาจากโมเลกุลของสีที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า เกิดการดึงดูดกับประจุทางไฟฟ้าของสารดูดซับ ทำให้โครงสร้างบางส่วนของสียอมเปลี่ยนไปก่อนการบำบัดด้วยโอโซน ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD เพิ่มขึ้นจากกรณีการใช้ถ่านดูดซับเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลชัดเจนว่ากระบวนการบำบัดแบบใดที่มีประสิทธิภาพสูง จึงนำผลการทดลองทั้งสามตอนมาสร้างกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD

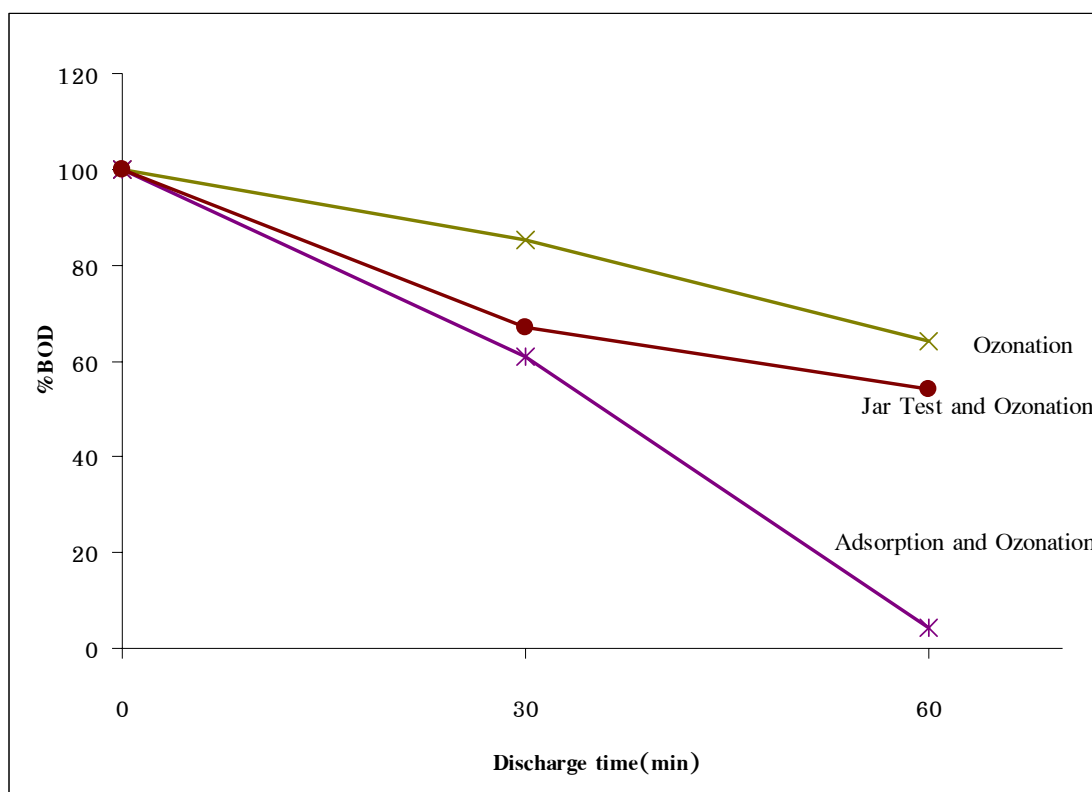
เมื่อนำผลที่ได้จากการบำบัดน้ำสีด้วยการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว ผลที่ได้จากการบำบัดน้ำสีด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้ม และผลที่ได้จากการบำบัดน้ำสีด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการใช้โอโซน มาเปรียบเทียบกัน จะได้ดังภาพประกอบที่ 37, 38 และ 39



ภาพประกอบที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีข้อมสีชมพู หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่าง ๆ

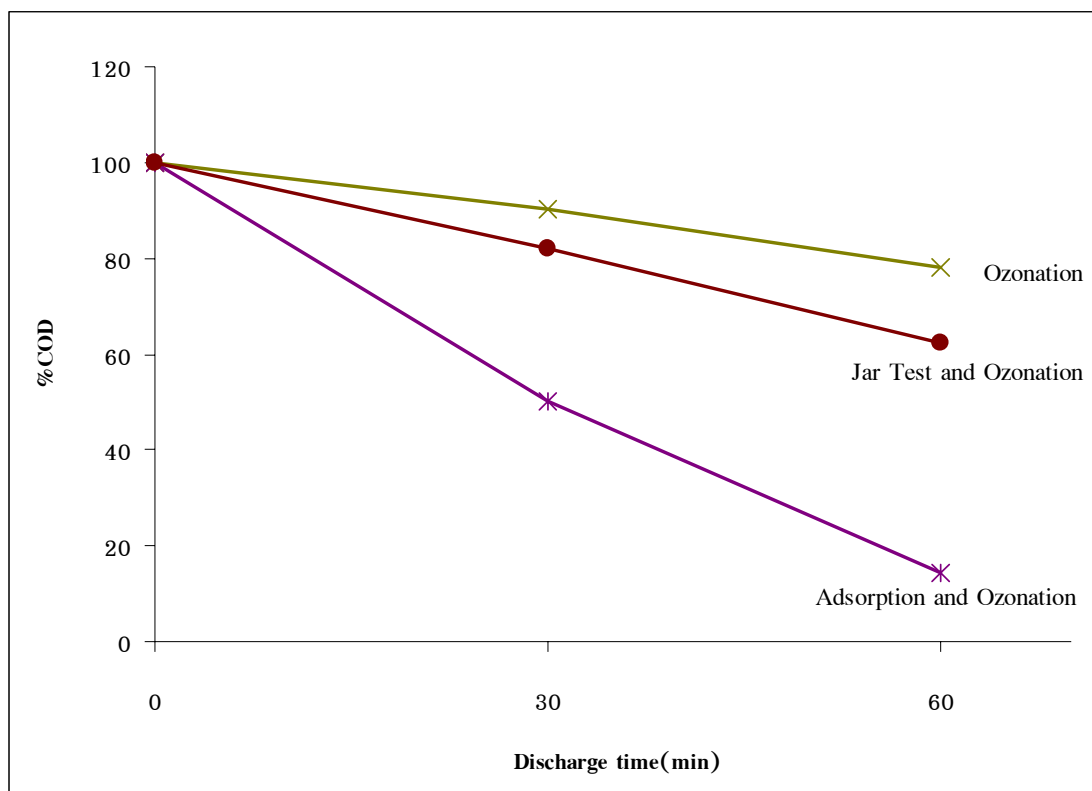
ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีข้อมสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียสีข้อมด้วยวิธีต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 37 พบว่าวิธีการดูดซับด้วยถ่านดูดซับก่อนแล้วตามด้วยการบำบัดโดยใช้โอโซนสามารถทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสีน้ำเสียสีข้อมสี

ชมพูมีค่าลดลงเหลือ 0.6% ในขณะที่วิธีการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงเหลือ 35.0% หรือการใช้โอโซนร่วมกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงเหลือ 56.0% เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของน้ำเสียที่ย้อมที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีใด ๆ ดังนั้นวิธีการที่ให้ผลดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมเสียกระทันหัน คือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อนแล้วตามด้วยการผ่านโอโซน ซึ่งพบผลการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกันนี้ทั้งในน้ำเสียที่ย้อมสีแดง และสีน้ำเงิน



ภาพประกอบที่ 38 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าBOD ของน้ำเสียที่ย้อมสีชมพู หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ กับก่อนบำบัด

ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ค่า BOD ของน้ำเสียที่ย้อมสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมด้วยวิธีต่างๆดังภาพประกอบที่ 38 พบว่าวิธีการดูดซับด้วยถ่านดูดซับก่อนแล้วตามด้วยการบำบัดโดยการใช้โอโซนสามารถทำให้ค่า BOD ของน้ำเสียที่ย้อมสีชมพูมีค่าลดลงเหลือ 4.4% ในขณะที่วิธีการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวค่า BOD มีค่าลดลงเหลือ 64.0% หรือการใช้โอโซนร่วมกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มค่า BOD มีค่าลดลงเหลือ 54.0% เมื่อเทียบกับค่า BOD เริ่มต้นของน้ำเสียที่ย้อมที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีใด ๆ ดังนั้นวิธีการที่ให้ผลดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมเสียกระทันหัน คือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อนแล้วตามด้วยการผ่านโอโซน ซึ่งพบผลการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกันนี้ทั้งในน้ำเสียที่ย้อมสีแดง และสีน้ำเงิน



ภาพประกอบที่ 39 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ของน้ำเสียสีข้มสีชมพู หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีต่าง ๆ กับก่อนบำบัด

ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ค่า COD ของน้ำเสียสีข้มสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียสีข้มด้วยวิธีต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 39 พบว่าวิธีการดูดซับด้วยถ่านดูดซับก่อนแล้วตามด้วยการบำบัดโดยใช้โอโซนสามารถทำให้ค่า COD ของน้ำเสียสีข้มสีชมพูมีค่าลดลงเหลือ 14.5% ในขณะที่วิธีการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวค่า COD มีค่าลดลงเหลือ 78.0% หรือการใช้โอโซนร่วมกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มค่า COD มีค่าลดลงเหลือ 62.0% เมื่อเทียบกับค่า COD เริ่มต้นของน้ำเสียสีข้มที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีใด ๆ ดังนั้นวิธีการที่ให้ผลดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสีข้มเสียกระทันหัน คือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แล้วตามด้วยการผ่านโอโซน ซึ่งพบผลการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกันนี้ทั้งในน้ำเสียสีข้มสีแดง และสีน้ำเงิน

4.6 การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีย้อมสีเอกระจูดหลังการบำบัดด้วยโอโซน

จากการศึกษาโครงสร้างสีย้อมสีเอกระจูดด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลดังภาพประกอบที่ 40, 41 และ 42 พบว่ามีพีคต่างๆ มากมาย เมื่อแปลงพีคที่ปรากฏเด่นชัดให้เป็นหมู่ฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12

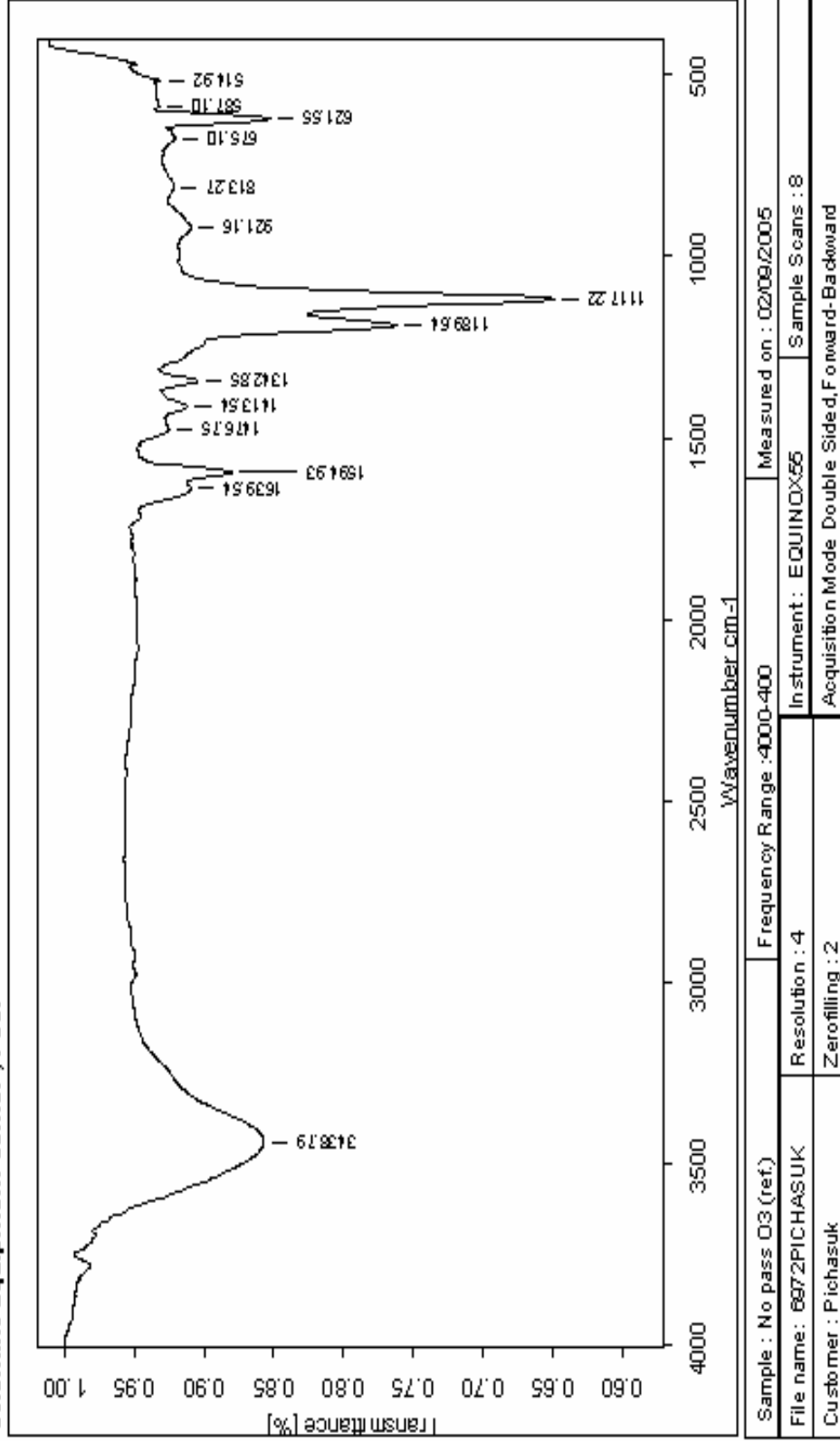
ตารางที่ 12 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมสีเอกระจูดสีชมพูก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน

สีชมพูก่อนการบำบัดด้วยโอโซน		สีชมพูหลังการบำบัดด้วยโอโซน	
Wave number	หมู่ฟังก์ชัน	Wave number	หมู่ฟังก์ชัน
3438.79	OH	3435.28	OH
1594.93	-C=C-	1636.35	-C=C-
1413.54	COOH		
1342.85	CH ₃		
1189.64	C-O-C	1153.73	C-O-C
1117.22	COH		
621.55	C-Cl	626.22	C-Cl

จากตารางที่ 12 พบว่า สีชมพูทั้งก่อนและหลังการบำบัดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันกลุ่มแอลกอฮอล์ (หมู่ OH) กลุ่มที่มีลักษณะวงแหวนอะโรมาติก (หมู่ -C=C-) กลุ่มวงของคาร์โบไฮเดรต (หมู่ C-O-C) และสารประกอบพวกคลอไรด์ (C-Cl) สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันระหว่างสีชมพูก่อนการบำบัดและหลังการบำบัด คือ สีชมพูก่อนการบำบัดจะประกอบด้วยกลุ่มเมทิล (methyl group, CH₃) กลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid, COOH) และกลุ่มของไฮดรอกซิล (COH) กลุ่มคาร์บอกซิเลต (carboxylate, C=O) ในขณะที่สีชมพูหลังการบำบัดจะไม่มีกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าพีคเล็กๆ จำนวนมากในช่วง wave number 1600 ถึง 1300 พีคเหล่านี้จะหายไปหลังการบำบัดด้วยโอโซน แสดงว่าโครงสร้างของสีย้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่โอโซนเข้าไปทำลายพันธะบางส่วนทำให้โครงสร้างของสีย้อมจากเดิมที่มีขนาดใหญ่ยากแก่การย่อยสลาย มีขนาดเล็กลงที่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติ หรือโดยกระบวนการบำบัดอื่นต่อไป

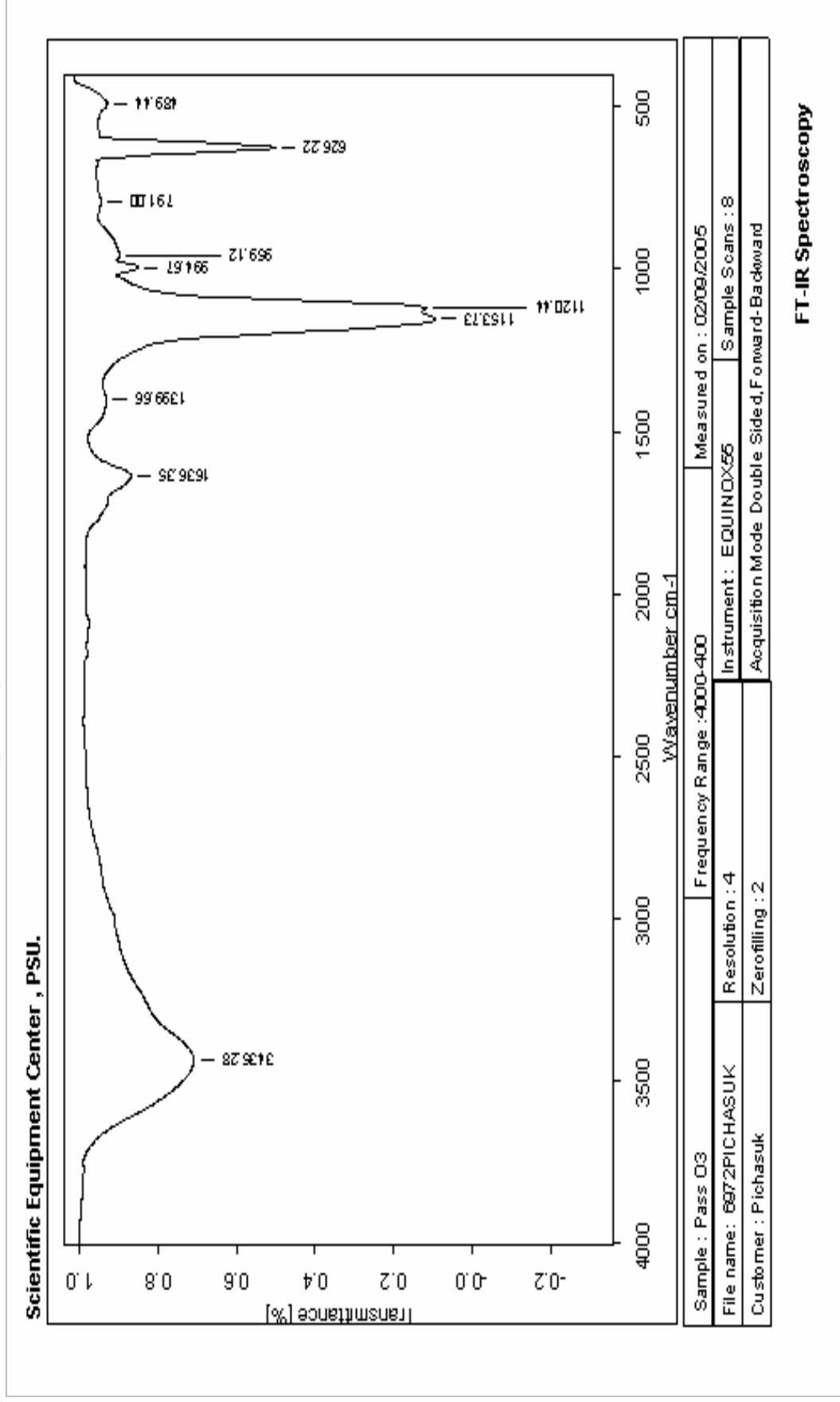
ภาพประกอบที่ 40 แสดงผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีย้อมสีการจุดสีชมพูก่อนการบำบัดด้วยโอโซน

Scientific Equipment Center , PSU.

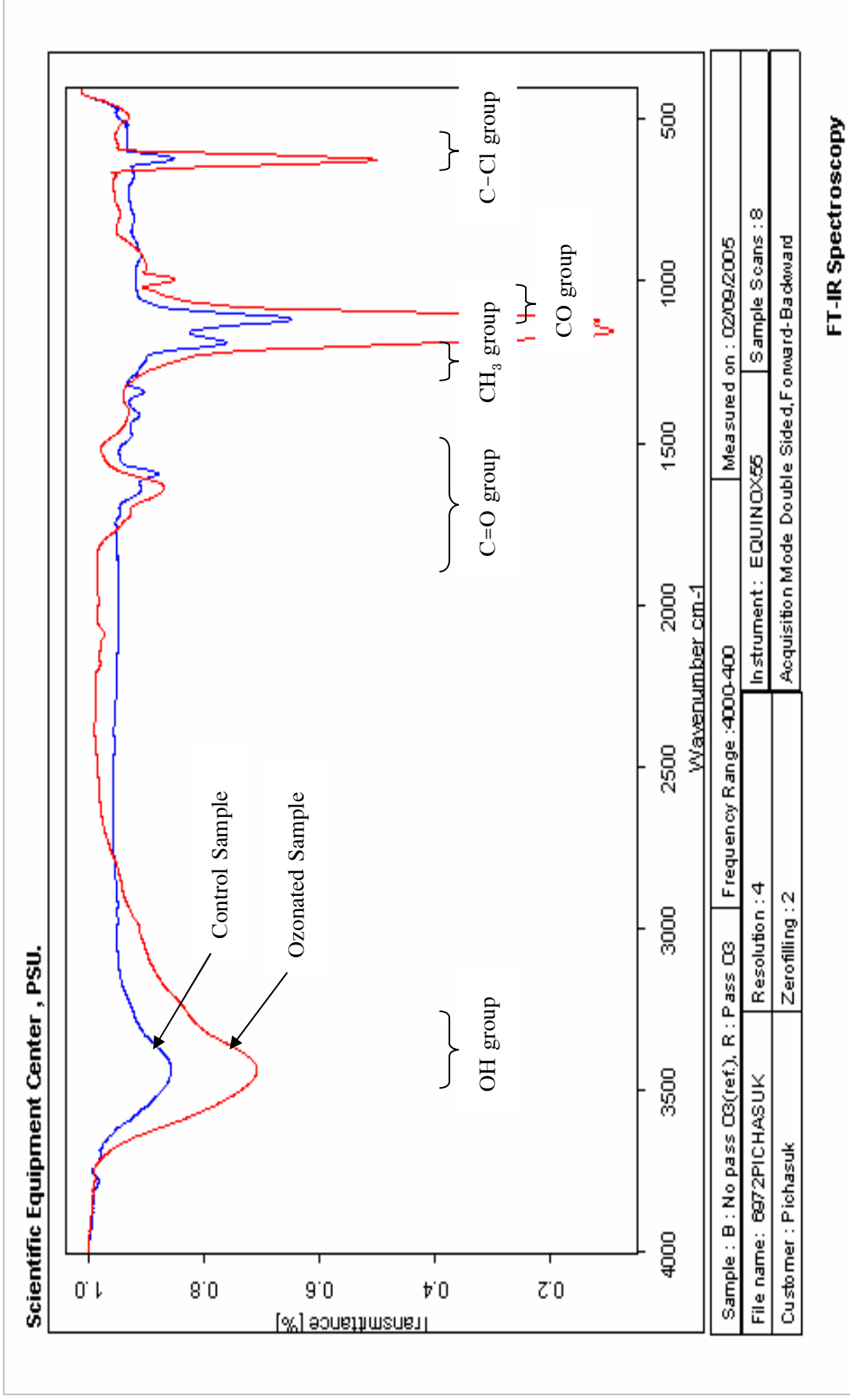


FT-IR Spectroscopy

ภาพประกอบที่ 41 แสดงผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีย้อมสีชมพูหลังการบำบัดด้วยโอโซน



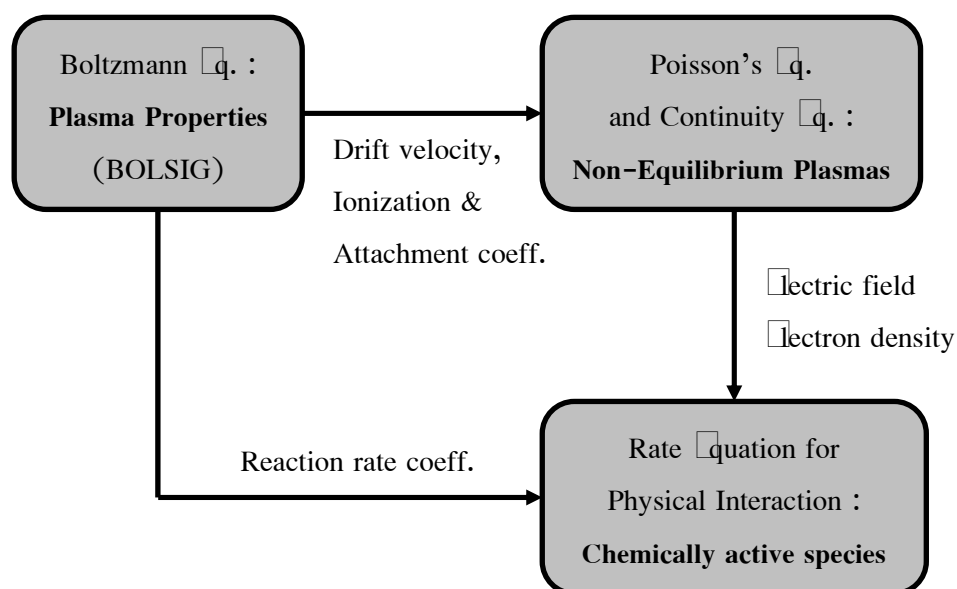
ภาพประกอบที่ 42 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ของสีย้อมสีชมพูก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน



บทที่ 5

พารามิเตอร์ในดิสชาร์จไฟฟ้า

ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลาสมาชนิดไม่สมดุลจะแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของพลาสมาจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดิสชาร์จโดยใช้สมการโบซต์มาน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาโดยพิจารณาพลาสมาในลักษณะที่เป็นของไหล โดยใช้สมการของความต่อเนื่อง และสมการปัวซองส์ และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของพลาสมาจากส่วนแรก และส่วนที่สองดังที่กล่าวข้างต้น ดังภาพประกอบที่ 43



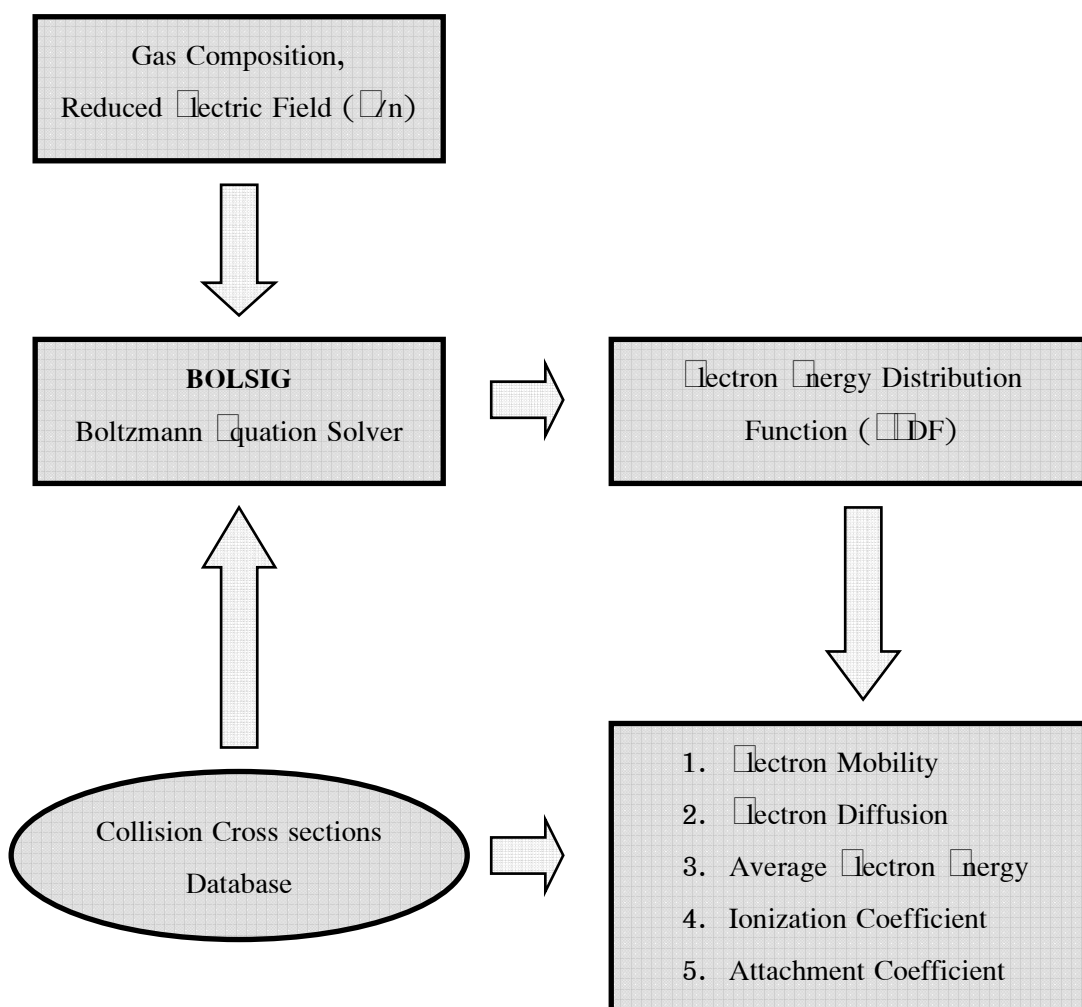
ภาพประกอบที่ 43 แสดงการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลาสมาชนิดไม่สมดุล
(Kim et al, 2000)

ในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดิซชาร์จเพื่ออธิบายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งการเกิดดิซชาร์จไฟฟ้ามีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุ เช่น อิเล็กตรอน ไอออนบวก และอนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยา ที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในการดิซชาร์จไฟฟ้า โดยในการศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้มีการพัฒนาโปรแกรม BOLSIG ที่พัฒนาโดย W. L. Morgan, J. P. Boeuf และ L. C. Pitchford โดยโปรแกรม BOLSIG พิจารณาเฉพาะของอิเล็กตรอน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปใช้ในแบบจำลองของของไหลเพื่ออธิบายดิซชาร์จไฟฟ้าตามเงื่อนไขที่พิจารณาต่อไป

โปรแกรม BOLSIG เป็นโปรแกรมสำหรับแก้สมการโบซต์มานสำหรับอิเล็กตรอนในก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนอย่างอ่อนได้ และในสภาวะคงตัว (steady state) โปรแกรม BOLSIG แสดงข้อมูลภาคตัดขวาง (cross section data) ของก๊าซ 15 ชนิด ได้แก่ N_2 , O_2 , H_2 , Cl_2 , F_2 , HCl , CF_4 , SiH_4 , CO_2 , SF_6 , He , Ne , Ar , Kr , Xe โปรแกรมนี้ถูกออกแบบมาเฉพาะสำหรับอิเล็กตรอน และแสดงข้อมูลการเคลื่อนที่ (transport data) ในก๊าซบริสุทธิ์หรือก๊าซผสมในช่วงของค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (reduced electric field) \square/N โปรแกรม BOLSIG เป็นโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปและข้อมูลที่ออกมาใน โปรแกรม BOLSIG ถูกควบคุมโดยเมนู pop-up ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปคือลำดับของค่า \square/N ที่จะพิจารณา และส่วนประกอบของก๊าซ ส่วนประกอบของก๊าซอาจจะมีมากถึง 3 ชนิด และข้อมูลภาคตัดขวางจากไฟล์ฐานข้อมูลในโปรแกรม ผลที่ได้จะแสดงในรูปของตาราง หรือในรูปแบบของกราฟ แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ (transport coefficient) สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate coefficient) พลังงานในกระบวนการชนต่างๆ (fractional energy deposited) และฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน (electron energy distribution functions) ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ

5.1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

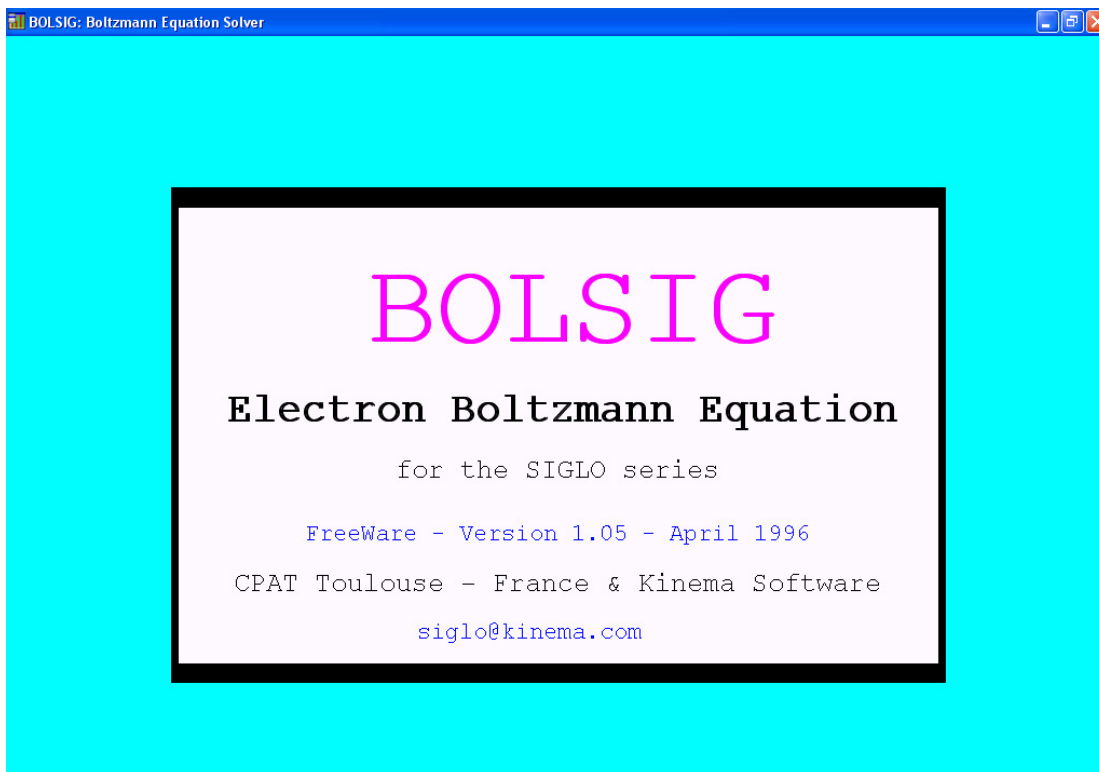
โปรแกรมจะรับค่าชนิดและส่วนผสมของก๊าซ และค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (reduced electric field) ตามเงื่อนไขที่พิจารณา จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มการทำงานโดยพิจารณาชนิดของก๊าซและส่วนผสมของก๊าซ จากนั้นโปรแกรมจะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลภาคตัดขวางการชนของอิเล็กตรอนของก๊าซนั้นในการคำนวณ เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานโปรแกรมจะแสดงผลคือ การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน ในขณะที่เดียวกันโปรแกรมจะคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในการเกิดดิสชาร์จ คือ โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน และสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน ที่เป็นฟังก์ชันของค่าภาคตัดขวางการชนและฟังก์ชันของการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน ดังภาพประกอบที่ 44



ภาพประกอบที่ 44 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

5.2 การทำงานและผลจากการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

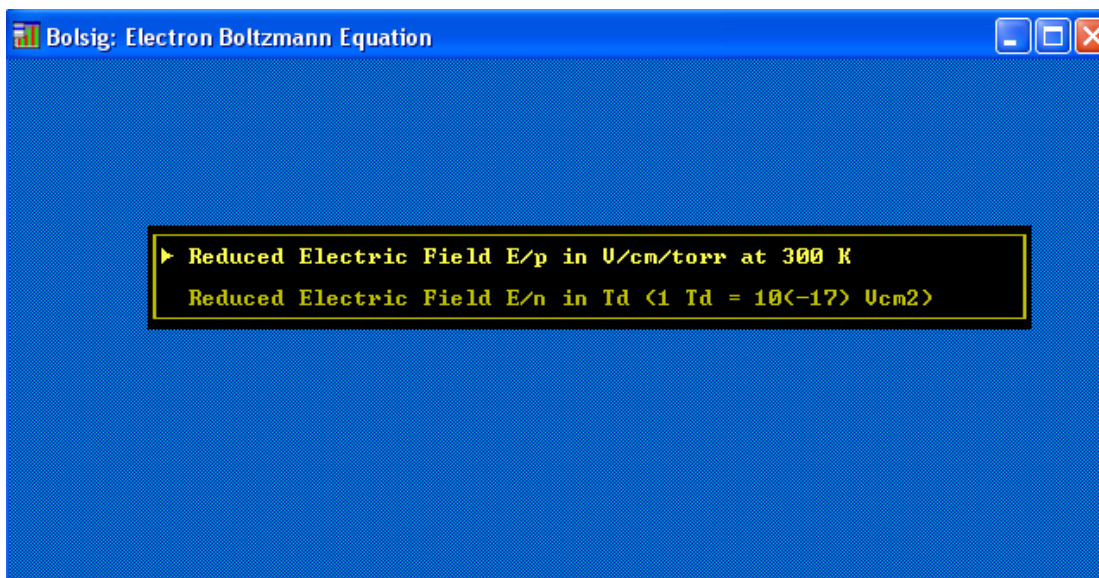
เริ่มการทำงานของโปรแกรม BOLSIG แสดงดังภาพประกอบที่ 45



ภาพประกอบที่ 45 แสดงหน้าจอเมื่อเข้าสู่โปรแกรม BOLSIG

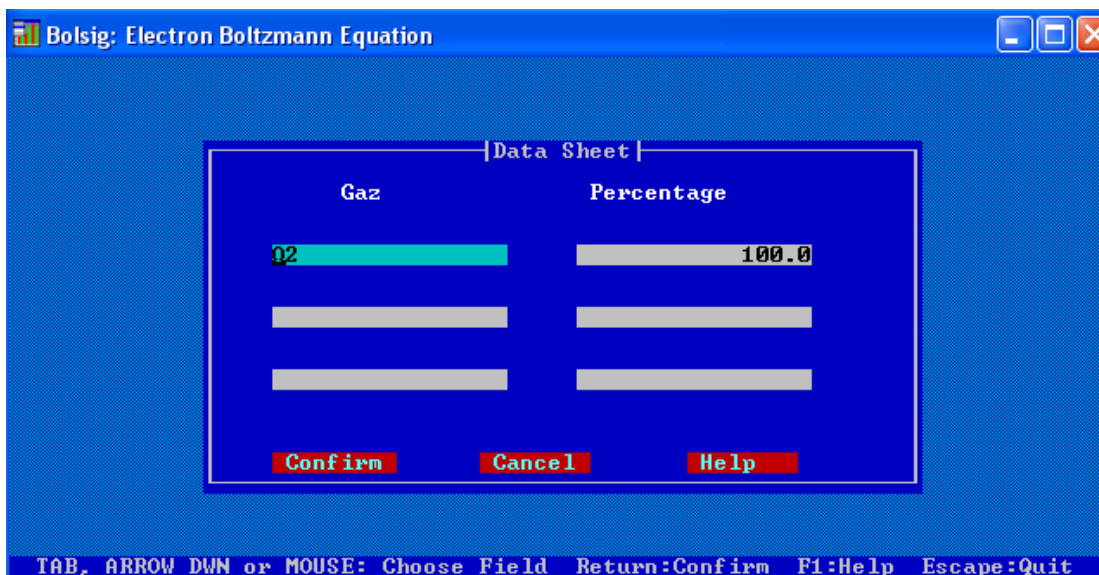
เงื่อนไขในการพิจารณาของโปรแกรมมี 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่พิจารณาสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเทอมของความดันที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน หรือ เงื่อนไขที่พิจารณาสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเทอมของจำนวนโมเลกุลของก๊าซ เลือกว่าพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเงื่อนไขใด ดังภาพประกอบที่ 46

ในการศึกษานี้เลือกกรณีที่สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเทอมของความดันในหน่วย V/cm/torr ที่ 300 เคลวิน โดยให้ภายในระบบที่พิจารณามีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ (760 ทอร์) เล็กน้อย โดยกำหนดความดันเป็น 800 1,000 และ 1,200 ทอร์ และที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9, 10 และ 11 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับการทดลอง



ภาพประกอบที่ 46 แสดงเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

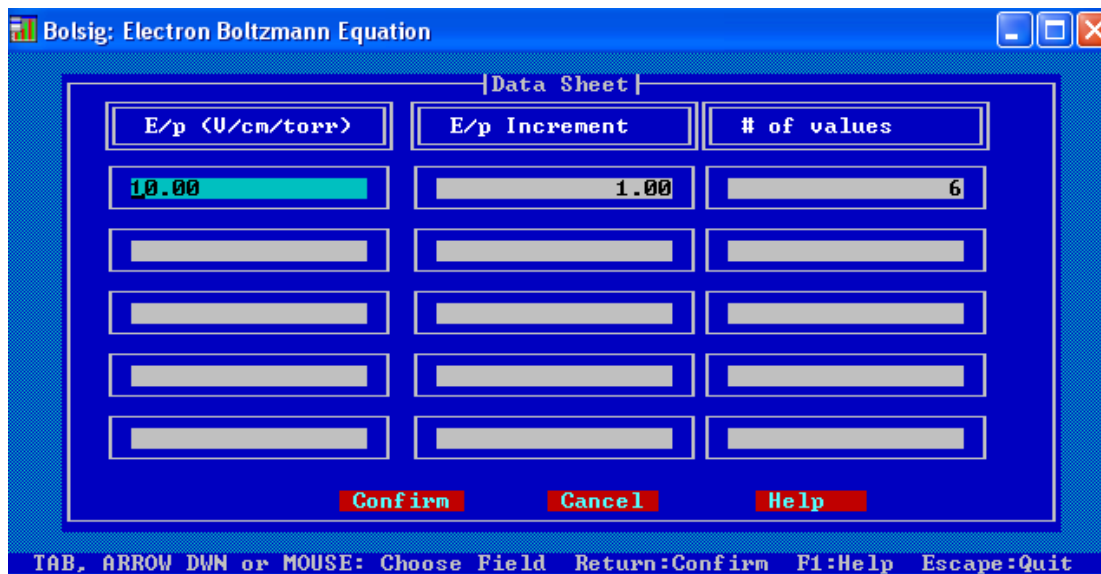
จากนั้นโปรแกรมจะให้ใส่ชนิดของก๊าซ และกรณีเป็นก๊าซผสมก็ต้องใส่ร้อยละของก๊าซแต่ละชนิดที่พิจารณา ดังภาพประกอบที่ 47 โดยในการศึกษานี้ก๊าซที่พิจารณาคือ ก๊าซออกซิเจน 100%



ภาพประกอบที่ 47 แสดงหน้าจอก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

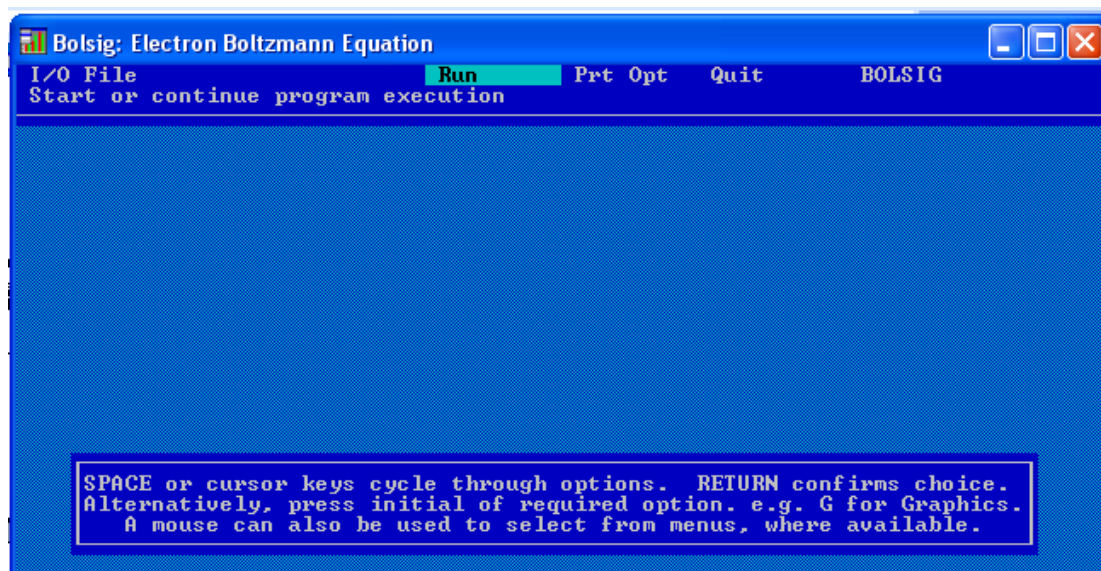
ใส่ค่าของ E/p ที่พิจารณาในช่อง E/p ในหน่วย โวลต์/เซนติเมตร/ทอร์ ต่อมาช่วงของการเพิ่มขึ้นของค่า E/p ในช่อง E/p Increment และจำนวนค่าที่จะพิจารณาในช่อง # of values ดังภาพประกอบที่ 48 จากภาพเป็นกรณีพิจารณาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9,000 โวลต์ ระยะระหว่างอิเล็กโตรด 0.75 เซนติเมตร ที่ความดัน 800 1,000 และ 1,200 ทอร์ โดยคำนวณ

ค่า \square/p ได้เป็น 15, 12 และ 10 โวลต์/เซนติเมตร/ทอร์ ตามลำดับ โดยโปรแกรมจะทำจนครบ 6 ค่าตามที่กำหนด ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ทำการทดลองจริง



ภาพประกอบที่ 48 แสดงหน้าจอเพื่อใส่ค่าของ \square/p ที่พิจารณา

เมื่อใส่ค่าหรือช่วงของ \square/p ที่พิจารณาแล้วหน้าจอจะปรากฏดังภาพประกอบที่ 49 ซึ่งโปรแกรมพร้อมที่จะทำงาน โดยคลิกที่ Run เพื่อให้โปรแกรมทำงาน



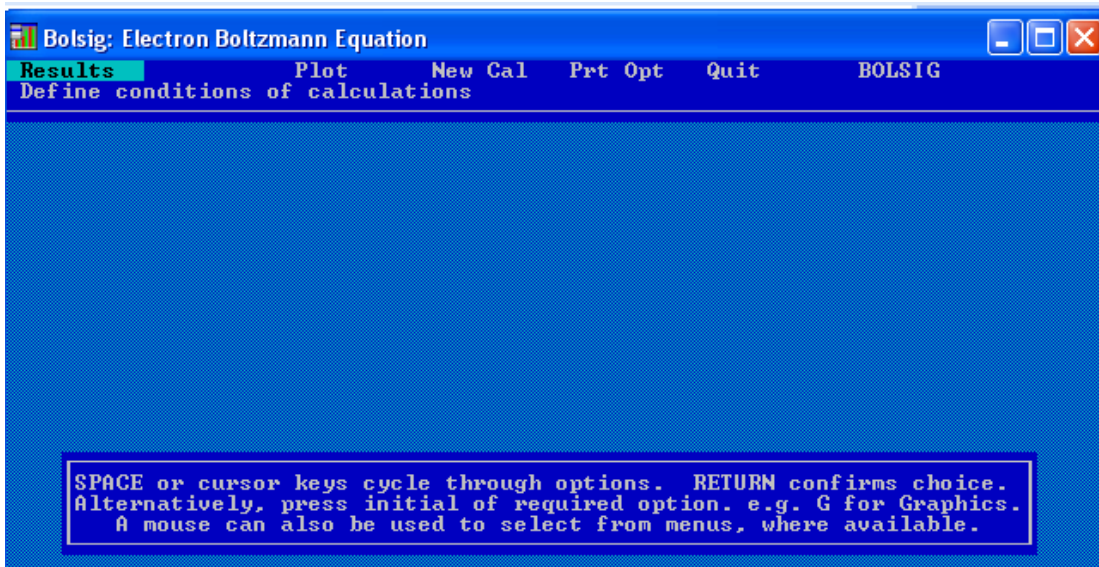
ภาพประกอบที่ 49 แสดงหน้าจอของโปรแกรม BOLSIG เมื่อพร้อมทำงาน

ขณะที่โปรแกรมทำงานจะปรากฏหน้าจอตั้งภาพประกอบที่ 50

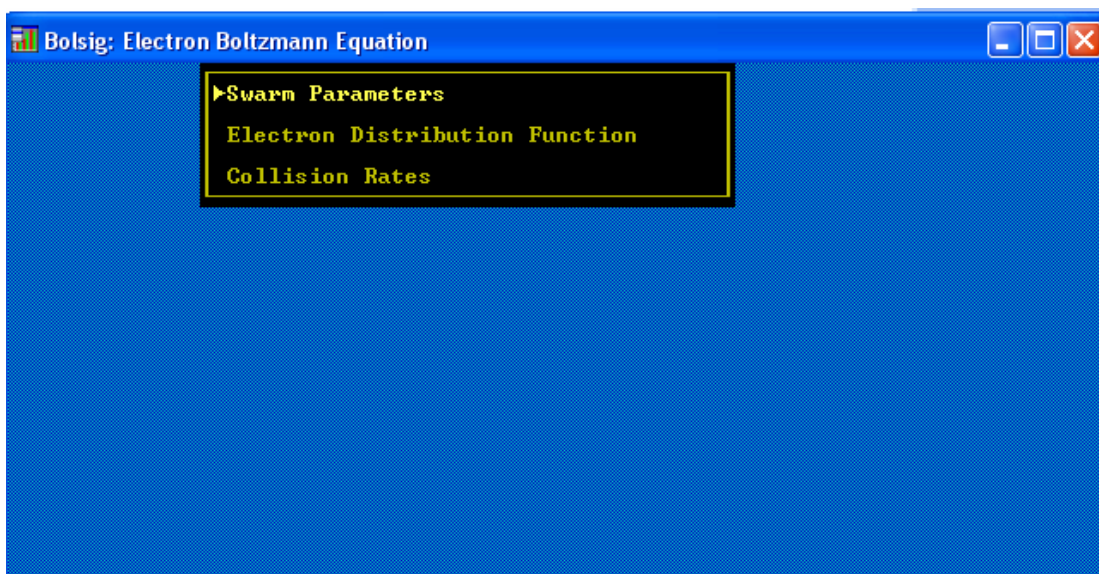


ภาพประกอบที่ 50 แสดงหน้าจอของโปรแกรม BOLSIG ขณะทำงาน

เมื่อโปรแกรมทำงานเสร็จแล้วจะโปรแกรมแสดงหน้าจอตั้งภาพประกอบที่ 51 โดยเมื่อคลิกที่ Results จะแสดงค่าที่ได้จากโปรแกรมคือ กลุ่มของพารามิเตอร์ (Swarm Parameters) ฟังก์ชันการกระจายของอิเล็กตรอน (Electron Distribution Function) และอัตราการชน (Collision Rates) ดังภาพประกอบที่ 52



ภาพประกอบที่ 51 แสดงหน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำงานเสร็จ



ภาพประกอบที่ 52 แสดงหน้าจอผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

โดยค่าที่ได้จากโปรแกรมนั้นคือ Swarm Parameters แสดงกลุ่มของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า เช่น ค่าของโมบิลิตี้ ค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ค่าของพลังงาน ค่าของสัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน (α/p) และสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน (η/p)

ตารางที่ 13 แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ

O ₂ (100%)						
Mobility(torr _{cm} ² /V/s); Diffusion(torr _{cm} ² /s); Energy(eV); alpha/p, eta/p(cm ⁻¹ /torr ⁻¹)						
E/p (V/cm/torr)	E/n (Td)	Mobility	Diffusion	Energy	alpha/p	eta/p
0.1500 ⁿ	0.4658 ⁿ	0.6484 ⁿ	0.1719 ⁿ	0.3381 ⁿ	0.1277 ⁿ	0.8874 ⁿ
0.1200 ⁿ	0.3727 ⁿ	0.6839 ⁿ	0.1676 ⁿ	0.3161 ⁿ	0.1391 ⁿ	0.8350 ⁿ
0.1000 ⁿ	0.3106 ⁿ	0.7141 ⁿ	0.1637 ⁿ	0.2987 ⁿ	0.1570 ⁿ	0.7572 ⁿ

หมายเหตุ : ⁿ ที่ความดัน 800 ทอร์, ⁿ ที่ความดัน 1,000 ทอร์ และ ⁿ ที่ความดัน 1,200 ทอร์

ตารางที่ 14 แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ

O ₂ (100%)						
Mobility(torr_cm ² /V/s); Diffusion(torr_cm ² /s); Energy(eV); alpha/p, eta/p(cm ⁻¹ /torr ⁻¹)						
E/p (V/cm/torr)	E/n (Td)	Mobility	Diffusion	Energy	alpha/p	eta/p
0.1666 □+02 ⁿ	0.5174 □+02	0.6252 □+06	0.1747 □+07	0.3526 □+01	0.3291 □+03	0.9271 □+01
0.1333 □+02 ^ข	0.4140 □+02	0.6583 □+06	0.1710 □+07	0.3310 □+01	0.4441 □+04	0.9056 □+01
0.1111 □+02 ^ค	0.3450 □+02	0.7181 □+06	0.1619 □+07	0.2959 □+01	0.4649 □+05	0.7016 □+01

หมายเหตุ : ⁿ ที่ความดัน 800 ทอร์, ^ข ที่ความดัน 1,000 ทอร์ และ ^ค ที่ความดัน 1,200 ทอร์

ตารางที่ 15 แสดงค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์ ที่ความดันต่างๆ

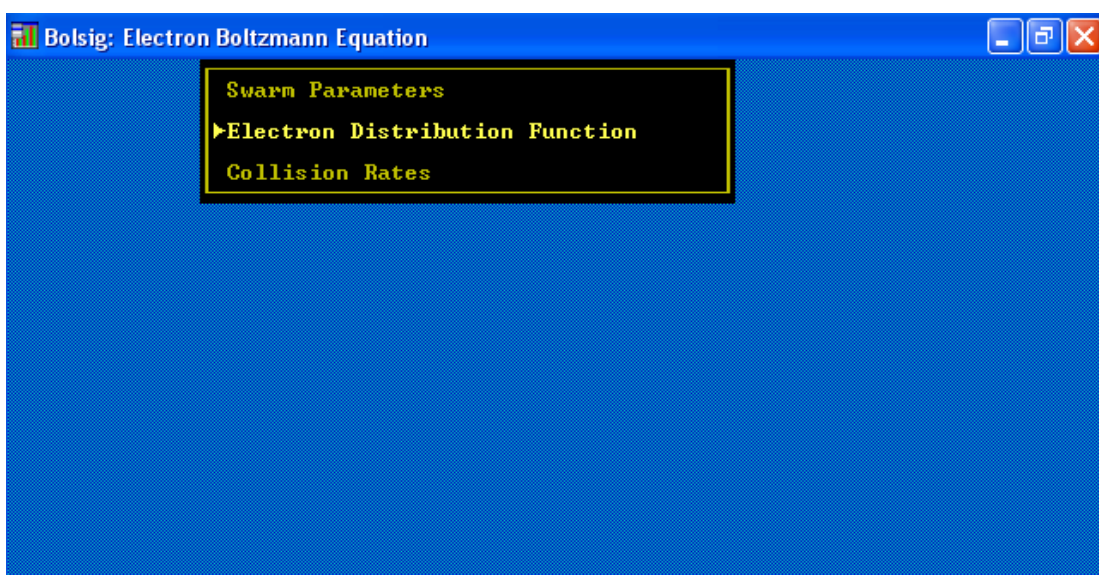
O ₂ (100%)						
Mobility(torr_cm ² /V/s); Diffusion(torr_cm ² /s); Energy(eV); alpha/p, eta/p(cm ⁻¹ /torr ⁻¹)						
E/p (V/cm/torr)	E/n (Td)	Mobility	Diffusion	Energy	alpha/p	eta/p
0.1833 □+02 ⁿ	0.5693 □+02	0.6209 □+06	0.1746 □+07	0.3563 □+01	0.6270 □+03	0.8786 □+01
0.1466 □+02 ^ข	0.4553 □+02	0.6552 □+06	0.1707 □+07	0.3333 □+01	0.9854 □+04	0.8651 □+01
0.1222 □+02 ^ค	0.3795 □+02	0.6834 □+06	0.1673 □+07	0.3159 □+01	0.1654 □+04	0.8250 □+01

หมายเหตุ : ⁿ ที่ความดัน 800 ทอร์, ^ข ที่ความดัน 1,000 ทอร์ และ ^ค ที่ความดัน 1,200 ทอร์

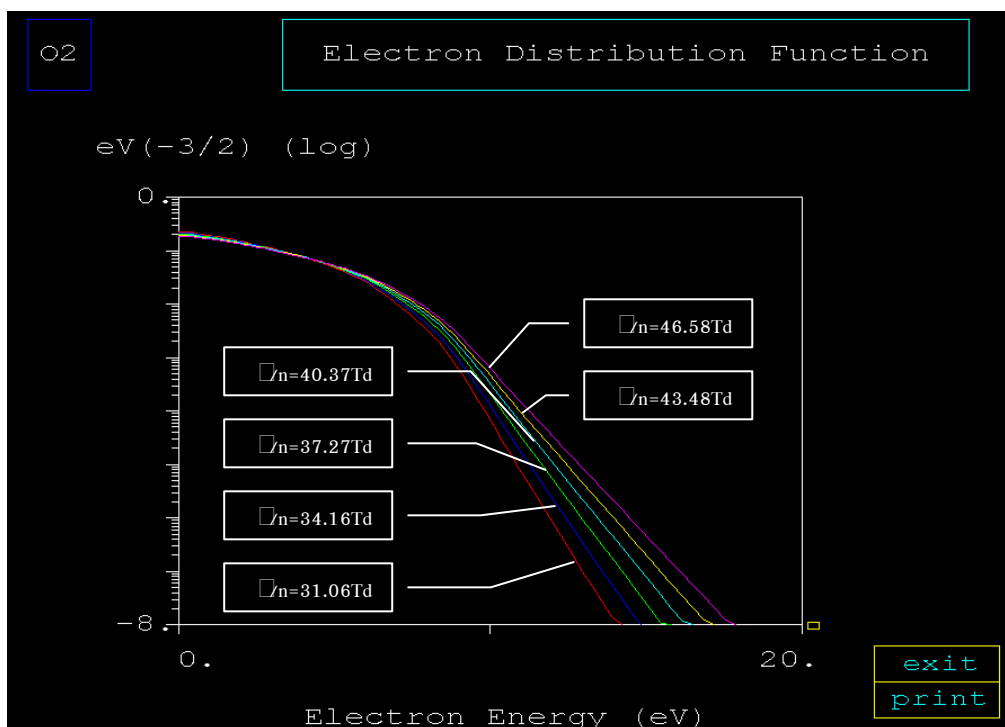
จากตารางที่ 13 14 และ 15 พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ความดัน 800 1,000 และ 1,200 ทอร์ คำนวณค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E/p ได้เป็น 15 12 และ 10 โวลต์/เซนติเมตร/ทอร์ ตามลำดับ โดยค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ลดลงทำให้กลุ่มของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าของโมบิลิตีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายจะมีแนวโน้มลดลง ค่าของพลังงานจะมีแนวโน้มลดลง สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนจะมีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกันคือ 1,000 ทอร์ ซึ่งก็คือการกำหนดอัตราการใช้แก๊สที่ค่าหนึ่ง ในขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 9 กิโลโวลต์ เป็น 10 กิโลโวลต์ และ 11 กิโลโวลต์ ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 12.00 13.33 และ 14.66 โวลต์/เซนติเมตร/ทอร์ ตามลำดับ โดยค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นทำให้กลุ่มของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำมี

การเปลี่ยนแปลงดังนี้ ค่าโมบิลิตีจะมีแนวโน้มลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับปริมาณไอออนที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองในงานที่ทำที่ได้กล่าวในเบื้องต้นที่ว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนคงที่ค่าหนึ่ง ปริมาณไอออนจะเพิ่มขึ้นตามค่าของศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ไหลเข้าและออกจากระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในกราฟภาพประกอบที่ 23

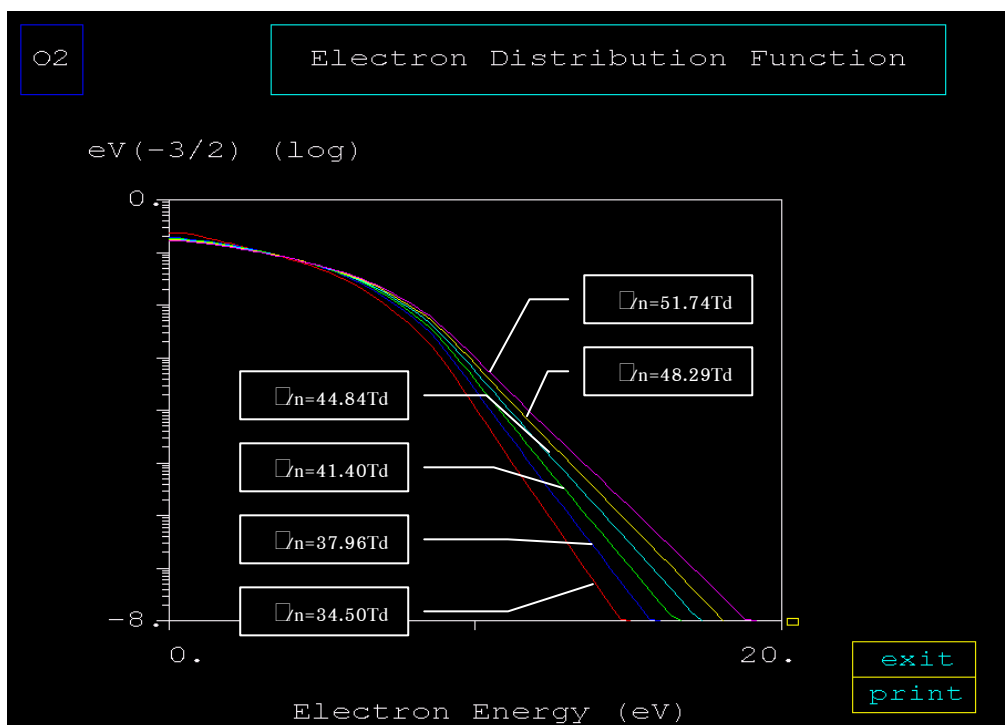


ภาพประกอบที่ 53 แสดงหน้าจอผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม BOLSIG

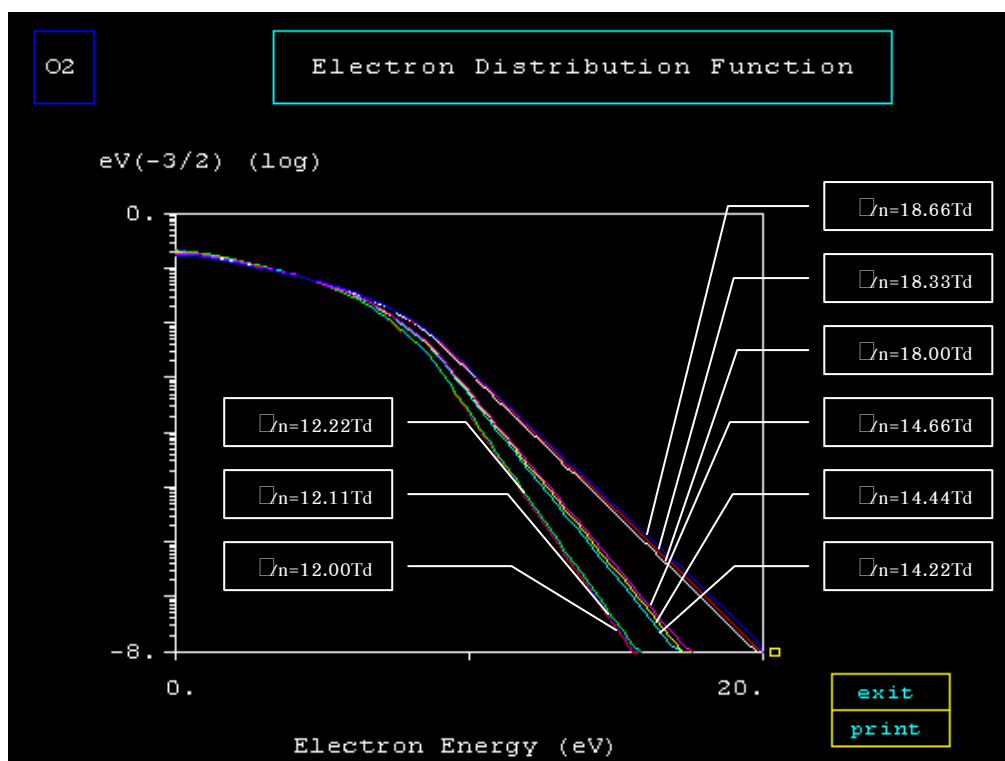


ภาพประกอบที่ 54 แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์ ที่ค่า $I_n = 31.06-46.58$ Td

กราฟของฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน (EDF) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 กิโลโวลต์ ที่ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I_n ต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 54 พบว่าค่าของ EDF ไม่เป็นแบบแมกเวลส์ในช่วงค่า $I_n = 31.06 - 46.58$ Td โดยเมื่อสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I_n เพิ่มขึ้นกราฟของค่า EDF จะกว้างขึ้น เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนบริเวณหางของกราฟ EDF ตกอย่างรวดเร็วเป็นเพราะพลังงานของอิเล็กตรอนหมดไปเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากความดันของระบบพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นกราฟของค่า EDF จะแคบลง เพราะความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และจากกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจนดังกล่าว พบว่าที่ค่าพลังงานอิเล็กตรอนช่วงเริ่มต้นจนก่อนถึง 10 eV ลักษณะของกราฟจะจับกลุ่มกันเป็นเพราะช่วงดังกล่าวเป็นช่วงพลังงานที่ทำให้ก๊าซออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนสถานะ และเกิดเป็นอนุพันธ์รูปอื่นๆ ของออกซิเจน สอดคล้องกับกราฟพลังงานศักย์ของออกซิเจน (ภาพประกอบที่ 6) และพบลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อทำการศึกษาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 11 กิโลโวลต์ ตามภาพประกอบที่ 55 และ 56 ตามลำดับ

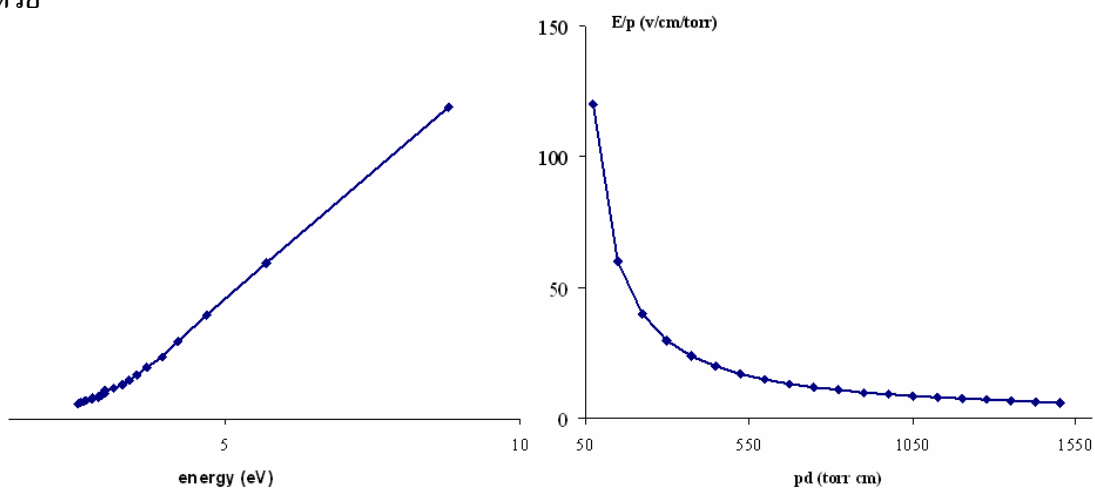


ภาพประกอบที่ 55 แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน
ที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ที่ค่า $n = 34.50-51.74$ Td

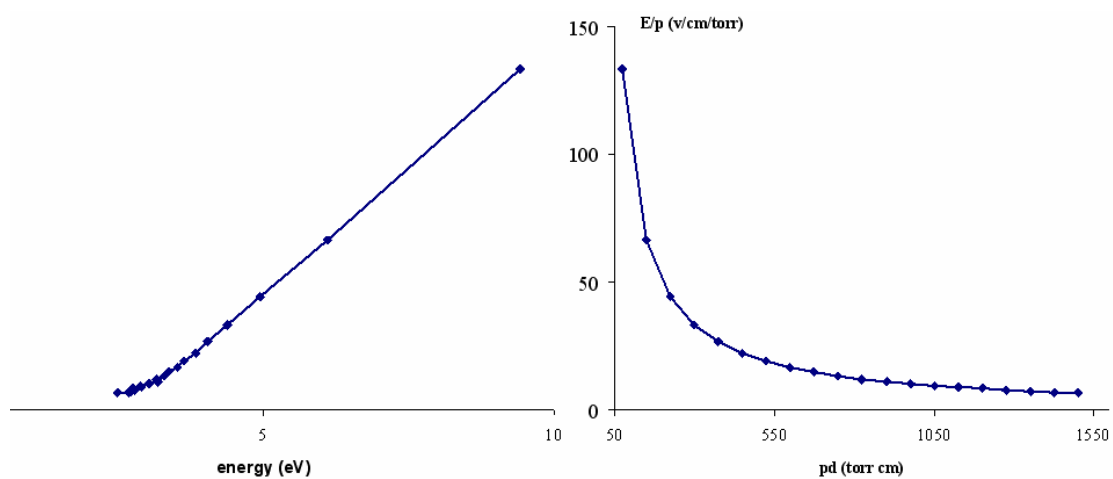


ภาพประกอบที่ 56 แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานของออกซิเจน
ที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์ ที่ค่า $n = 12.00-18.66$ Td

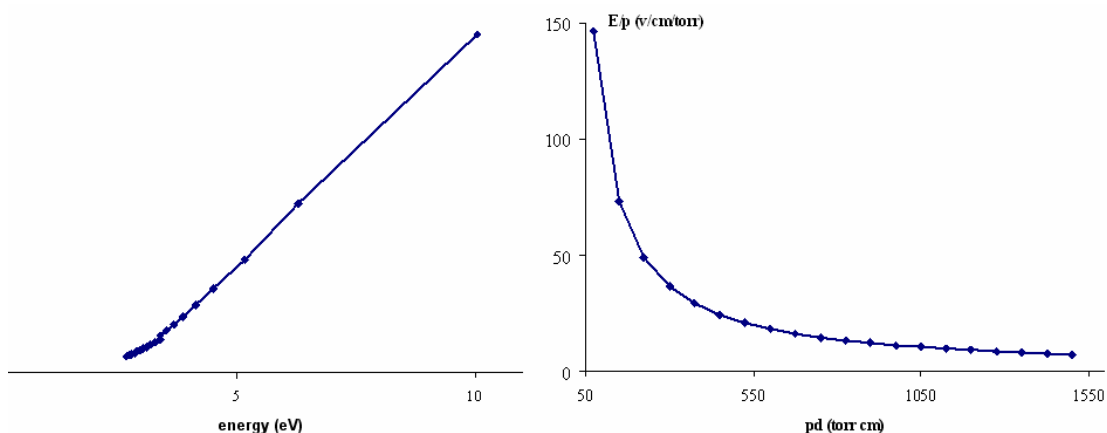
และเมื่อนำค่าที่ได้จากโปรแกรม BOLSIG มาเขียนกราฟระหว่างค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E/p กับ product (pd) และกับพลังงาน จะได้ดังภาพประกอบที่ 57 , 58 และ 59 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันของระบบและระยะระหว่างอิเล็กโตรดมีการเปลี่ยนแปลง ค่า product (pd) ที่ได้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย



ภาพประกอบที่ 57 แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 9 กิโลโวลต์



ภาพประกอบที่ 58 แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์



ภาพประกอบที่ 59 แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจน ที่ความต่างศักย์ 11 กิโลโวลต์

โดยอธิบายความสัมพันธ์ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E/p) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ ศักย์ไฟฟ้า (V), ระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) และความดันของระบบ (p) ได้ตั้งสมการ

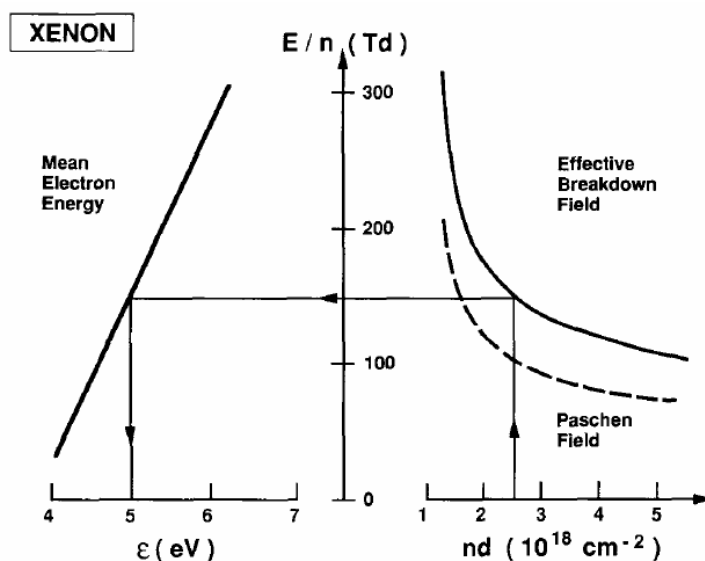
$$E = \frac{V}{d}$$

ดังนั้น

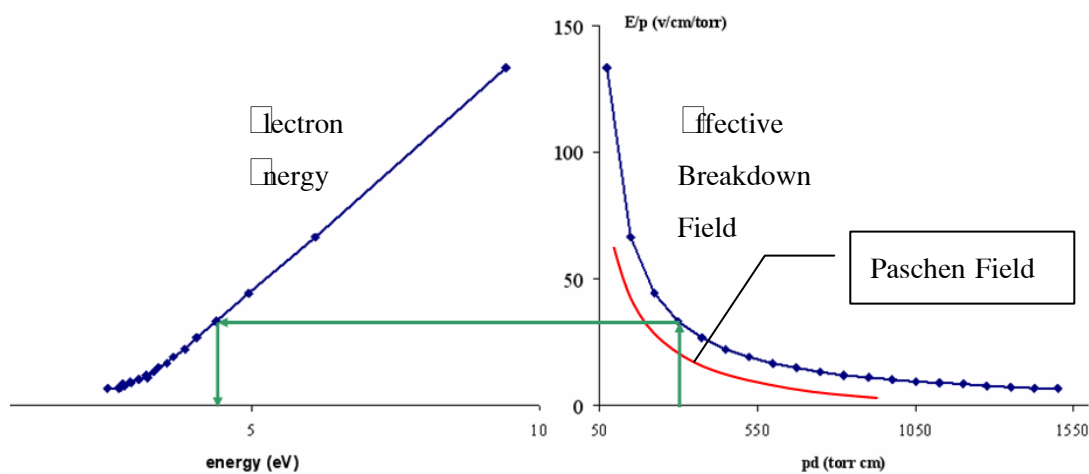
$$\frac{E}{p} = \frac{V}{pd}$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับพลังงานของอิเล็กตรอน พบว่าเมื่อค่า product (pd) มีการเปลี่ยนแปลงทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงด้วย (Liasson และ Kogelschatz, 1991) จากกราฟพบว่าเมื่อค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ผลที่ได้ตามมาคือ พลังงานของอิเล็กตรอนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้จากการศึกษาของ Liasson และ Kogelschatz ได้บอกถึงข้อดีของ กราฟพลังงานของอิเล็กตรอนกับ product (pd) ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดัง ภาพประกอบที่ 60 คือสามารถประมาณกราฟของพาสเชน (Paschen curve) ที่บอกถึงศักย์ไฟฟ้า ต่ำที่ทำให้เกิดการแตกตัว จะได้จากการประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของกราฟการเบรคดาวน์ ประสิทธิภาพ (Effective breakdown field curve) และใช้หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการศึกษา ดิสชาร์จ คือพลังงานอิเล็กตรอนที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวเป็นเท่าไร สามารถกำหนดได้ จากค่าความดันของระบบ ระยะระหว่างอิเล็กโทรด และศักย์ไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดการแตกตัวที่จะ เลือกใช้ เพื่อให้ได้พลังงานอิเล็กตรอนที่ต้องการ



ภาพประกอบที่ 60 แสดงกราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (nd) ในซีนอน (Liasson และ Kogelschatz, 1991)



ภาพประกอบที่ 61 แสดงการประยุกต์ใช้กราฟพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นกับ product (pd) ในก๊าซออกซิเจนที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์

ตัวอย่างการคำนวณจากกราฟที่ได้จากการทดลองดังภาพประกอบที่ 61 ที่ pd เท่ากับ 300 จะมีพลังงานอิเล็กตรอนเท่ากับ 4.38 eV และตัดตำแหน่งกราฟของพาสเชนที่ ประมาณ 20 จะคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวได้เท่ากับ 6 กิโลโวลต์ เป็นต้น

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถสรุปแบ่งเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน พบว่าปริมาณความเข้มข้นโอโซนจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน แต่จะมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ที่ 10 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ปริมาณโอโซนที่ได้มีค่า 80 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตรออกซิเจน

2. เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนเปลี่ยนไป ปริมาณโอโซนที่ได้จะเปลี่ยนไปด้วย โดยเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณโอโซนที่ได้จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับในงานวิจัยนี้เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่เครื่องกำเนิดโอโซน 8, 9, 10 และ 11 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ปริมาณโอโซนที่ได้มีค่าเท่ากับ 41, 60, 80 และ 135 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตรออกซิเจน ตามลำดับ

3. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จมีค่าคงที่ ที่ความต่างศักย์เดียวกัน ซึ่งจะอยู่ในระดับมิลลิแอมป์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านเข้าไปในโอโซนเซอร์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 และ 8 ลิตรต่อนาที กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จมีค่า 2 มิลลิแอมแปร์ และพบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเดียวกัน กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จมีค่าเป็น 2.8 มิลลิแอมแปร์

4. การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียอเนกประสงค์ พบว่าใช้โอโซนสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียอเนกประสงค์ได้ โดยพิจารณาอเนกประสงค์ผสมโอโซนสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสิ่งได้ 44.0 % รวมทั้งทำให้คุณภาพของน้ำดีขึ้นอีกด้วย พิจารณาจากค่า BOD ลดลง 36.0%, ค่า COD ลดลง 22.0% เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการบำบัด และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในอเนกประสงค์น้ำเงิน และสีแดง

5. การใช้กระบวนการบำบัดแบบสองขั้นตอน คือการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อนแล้วจึงนำน้ำเสียมาผ่านโอโซน พบว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้น และเพิ่มคุณภาพของน้ำ ได้ดีกว่าการบำบัดด้วยโอโซนอย่างเดียว หรือการตกตะกอนด้วยสารส้มเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อพิจารณาอเนกประสงค์ผสมเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นเป็น 65%, เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD มีค่าเป็น 45.6% และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD มีค่าเป็น 38.0% เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการบำบัด และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในอเนกประสงค์น้ำเงิน และสีแดง

6. การใช้กระบวนการบำบัดแบบสองขั้นตอน คือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อน แล้วจึงนำน้ำเสียที่ย้อมมาผ่านโอโซน พบว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้น และเพิ่มคุณภาพของน้ำ ได้ดีกว่าวิธีการอื่น ๆ โดยเมื่อพิจารณาสีข้อมลือ่ของกระจุตสีชมพูเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นเป็น 99.4% เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD มีค่าเป็น 95.6% และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD มีค่าเป็น 85.5% เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการบำบัด และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในสีข้อมลือ่ของกระจุตสีน้ำเงิน และสีแดง

7. โดยการใช้โอโซนบำบัดน้ำสีข้อมลือ่ของกระจุตพบว่าโครงสร้างของสีข้อมลือ่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยโอโซนเข้าไปทำลายพันธะบางส่วนทำให้โครงสร้างของสีข้อมลือ่จากเดิมที่มีขนาดใหญ่ยากแก่การย่อยสลาย ให้มีขนาดเล็กลง ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ หรือโดยกระบวนการบำบัดอื่น ๆ ต่อไป

8. จากการใช้โปรแกรม BO SIG พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรม สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลอง คือที่ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ความดัน 1,000 ทอร์ จะได้

ค่าสนามเหนี่ยวนำเป็น 41.40 Td

พลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ยเป็น 3.31 eV

โมบิลิตี้เป็น 0.66×10^6 torr_{cm}²/V/s

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็น 1.71×10^6 torr_{cm}²/s

สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนเป็น 4.44×10^{-3} cm⁻¹/torr⁻¹

และ ค่าสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนเป็น 0.91×10^{-1} cm⁻¹/torr⁻¹

ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์เฉพาะของไซเรนทดิสชาร์จ (characteristic parameter of silent discharge) ที่ได้มีการศึกษา (Eliasson และ Kogelschatz, 1991) คือ ค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในช่วง 1-500 Td ค่าพลังงานอิเล็กตรอนจะอยู่ในช่วง 1-10 eV และจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาดิสชาร์จได้

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

1. ระบบความปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูงที่อาจมีการรั่วไหลของกระแสตามโครงเหล็กของการผลิตของระบบผลิตโอโซน ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องตรวจความเรียบร้อย และรอบคอบในการทดลองทุกครั้ง

2. ภายในเซลล์โอโซนในเซอร์ชั้นของไดอิเล็กทริกจะต้องแนบสนิทกับอิเล็กโตรด เพื่อป้องกันการอาร์คเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และทำให้เซลล์โอโซนในเซอร์เกิดความเสียหายได้ ทำให้อายุการใช้งานของเซลล์โอโซนในเซอร์จะสั้น

3. ในการประยุกต์ใช้งานจริงในการบำบัดน้ำสีข้อมลือ่ของกระจุตของชุมชนที่ผลิตสีของกระจุต เซลล์โอโซนในเซอร์จะต้องมีขนาดใหญ่ หรือมีหลาย ๆ เซลล์ประกอบกัน ขึ้นอยู่กับ

ผู้ออกแบบในการนำไปใช้งาน และจำเป็นต้องใช้ร่วมกับการบำบัดด้วยวิธีการอื่น ๆ เพื่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดียิ่งขึ้น

4. ในการศึกษาโครงสร้างของสีย้อม ควรเลือกสีที่ทราบชนิดของสี โครงสร้างของสีมาก่อน หรือทำการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการหาโครงสร้างของสี เพื่อจะได้ทราบถึงผลเนื่องมาจากการใช้ไอโซนในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีที่ชัดเจน

5. การศึกษากระบวนการบำบัดแบบสองขั้นตอน ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบผลเนื่องจากการใช้กระบวนการบำบัดแบบวิธีใดก่อนหรือหลัง คือ การตกตะกอนด้วยสารส้มก่อนแล้วจึงนำไปบำบัดด้วยไอโซนกับการบำบัดด้วยไอโซนก่อนแล้วจึงนำไปตกตะกอนด้วยสารส้ม และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อนแล้วจึงนำไปบำบัดด้วยไอโซนกับการบำบัดด้วยไอโซนก่อนแล้วจึงนำไปดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

6. การเลือกวิธีใดในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเสียกระทันหัน ปัจจัยที่สำคัญในการประกอบการพิจารณา คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายโดยประมาณที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเสียกระทันหัน ปริมาตร 550 มิลลิลิตร ด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ค่าใช้จ่าย	รวมเป็นเงิน
การใช้ไอโซน	ค่าไฟฟ้า 1 ชั่วโมง 0.0069 หน่วยไฟฟ้า เป็นเงิน 0.187 สตางค์ ค่าก๊าซออกซิเจน เป็นเงิน 11.6 บาท	11.787 บาท
การตกตะกอนด้วยสารส้ม	ค่าสารส้ม 50 มิลลิกรัม เป็นเงิน 0.04 สตางค์	0.04 สตางค์
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	ค่าถ่านกัมมันต์ 10 กรัม เป็นเงิน 2 บาท	2 บาท

จากตารางที่ 16 พบว่าการใช้การตกตะกอนด้วยสารส้ม เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยที่สุด แต่วิธีนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนเพิ่มขึ้นอีก

บรรณานุกรม

1. ชัยวิทย์ ศิลาวรรณานอย. 2529. “ฟิสิกส์ของดิสชาร์จไฟฟ้า”. โครงการส่งเสริมตำราของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
2. ประสาร ชาดะรัตน์. 2538. “การสร้างโอโซนที่ความดันบรรยากาศด้วยโคโรนาดิสชาร์จโดยไฟฟ้ากระแสสลับ”. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. ธวัฒน์ชัย เทพนวล. 2542. “เครื่องกำเนิดโอโซนโดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
4. ไพฑูรย์ ไทยพันธ์. 2544. “การผลิตโอโซนด้วยวิธีไฟฟ้าแรงสูง และการใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมเส้นใย”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
5. ยุทธนา ภูริวัฒนชัยกุล และ ณรงค์ สุวรรณมณี. 2541. “การออกแบบและสร้างระบบพลาสมาดิสชาร์จแบบไดอิเล็กตริกสำหรับผลิตก๊าซโอโซน”. รายงานโครงการวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ประเภทงบประมาณแผ่นดิน/เงินรายได้คณะฯ
6. จรรยา คงฤทธิ. 2546. “การกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล และสีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยซีเถ้ากลอบดำ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. Elassion B. and Kogelschatz U. 1991. “Modeling and applications of silent discharge plasma”. *IEEE. Transaction on plasma science.* 2. p.309–323.
8. Elassion B. and Kogelschatz U. 1991. “Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing ”. *IEEE. Transaction on plasma science.* 6. p.1063–1077.
9. Yamabe C. S. and Ishimine M. 1994. “Fundamental Studies of Ozone Generating and Its Characteristics Using New Type of Ozonizer”. *Jpn. J. Appl. Phys.* 33 (1994). p.4361–4364.
10. Hadj-Ziane S. Held, B. Pignolet P., Peyrous R. Benas, J.M. and Coste C. 1990. “Ozone production in and oxygen-fed wire cylinder ozonizer”. *J. Phys D : Appl. Phys.* 23(1990). p.1390–1395.
11. Perkins Warren S., Walsh W.K., Reed I.E. and Namboodri C.G. 1995. “A Demonstration of Reuse of Spent Dyebath Water Following Color Removal with Ozone”. *Textile Chemist and colorist.* 28(1995). p.31–37.

บรรณานุกรม (ต่อ)

12. Masato E. and Hirohiko T. 1994. "Finite Element Analysis for Discharge Phenomenon". *IEEE. Transactions on Macnetics. Vol.30. No.5.(1994).* p. 2936-2939.
13. A. B. Murphy and R. Morrow. 2002. "Glass Sphere Discharges for Ozone Production". *IEEE. Transactions on Plasma Science. Vol.30. No.1. February.* p.180-181.
14. Junhong Chen and Jane H. Davidson. 2002. "Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge:Model And Comparison to E_hperiments". *Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol.22. No.4. December 2002.* p. 495-522.
15. P. A. Balakrishnan, A. Arunagiri and P.G. Rao. 2002. "Ozone generation by silent electric discharge and its application in tertiary treatment of tannery effluent". *Journal of Electrostatics 56.* p.77-86.
16. Ryo Ono and Teisuji Oda. 2003. "Formation and structure of primary and secondary streamers in positive pulse corona discharge-effect of oxygen concentration and applied voltage". *J. Phys D : Appl. Phys.36.* p.1952-1958.
17. Malik P. K. 2003. "Use of Activated Carbons Prepared from Sawdust and Rice Husk for Adsorption of Acid dyes : a Case Study of Acid Yellow 36". *Dyes and Pigment. 56(3).* p.239-249.
18. Garg V. K., Gupta R., Yadav A.B., Kumar R. 2003. "Dye Removal fro Aqueous Solution by Adsorption on Treated Sawdust". *Bioresource Tech.89(2).* p.121-124.
19. Faust S. D. and Aly O. M. 1987. "Adsorption Processes for Water Treatment.". *United States of America : Butterworth.* p.1-100.
20. AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. (15th ed.) The Association of Official Analytical Chemists. Arlington Virginia USA.
21. Nasser E. 1971. "Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics". USA: *John Wiley and Sons Inc.*
22. Rosacha L.A. 1993. "Treatment of Hazardous Organic Wastes Using Silent Discharge Plasmas". In *B.M. Penetrante and S.E. Schultheis (eds.) Non-Thermal Plasma Technique for Pollution Control-NATO ASI Series G 34.*

บรรณานุกรม (ต่อ)

23. Boeuf J. P. and Pitchford L. C. 1996. "The SIGLO series Gas parameters and Cross section data". *Kinema Software*.
24. Morgan W. L. 1991. "The Feasibility of Using Neural Networks to Obtain Cross Sections from Electron Swarm Data". *IEEE Transactions on Plasma Science*. Vol.19 No.2 April 1991. p.250-254.
25. Saeed Ul-Haq and Gorur Raju. 2003. "Influence of electron-neutral collision cross sections on swarm parameters in Argon". *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. p.436-439.
26. Hagelaar G. J. M. and Pitchford L. C. 2005. "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficient and rate coefficient for fluid models". *Plasma Sources Sci. Technol.*14. p.722-733.
27. Ping Jiang and Demetre J. Economou. 1993. "Temporal evolution of electron energy distribution function in oxygen and chlorine gases under dc and ac fields". *American Institute of Physics. J. Appl. Phys.* Vol.73 No.12. p.8151-8160.
28. Yong Ho Kim, Woo Seok Kang, Sang Hee Hong and Young Hoon Song. 2000. "Comparative Study of Pulsed Corona and Dielectric Barrier Discharges Using Single-Streamer Modeling and No Decomposition Experiment".
29. D. A. Ward and J. La. T. Eon. 1993. "Using Rogowski Coils for Transient Current Measurement". *Engineering Science and Education Journal*. June. p.105-113.
30. C Soria, F Pontiga and A Castellanos. 2004. "Plasma chemical and electrical modeling of negative DC corona in pure oxygen". *Plasma Source Sci. Technol.* 13. p.95-107.
31. David W. Larkin, Liming Zhou and Lance L. Lobban. 2001. "Product Selectivity Control and Organic Oxygenate Pathways from Partial Oxidation of Methane in a Silent Electric Discharge Reaction". *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001. 40. p.5496-5506.
32. Dongsoo Lee and Yongho Kim. 2005. "Numerical Simulation on Mode Transition of Atmospheric Dielectric Barrier Discharge in Helium-Oxygen Mixture". *IEEE Transaction on Plasma Science*. Vol. 33. No.2. p.949-957.

บรรณานุกรม (ต่อ)

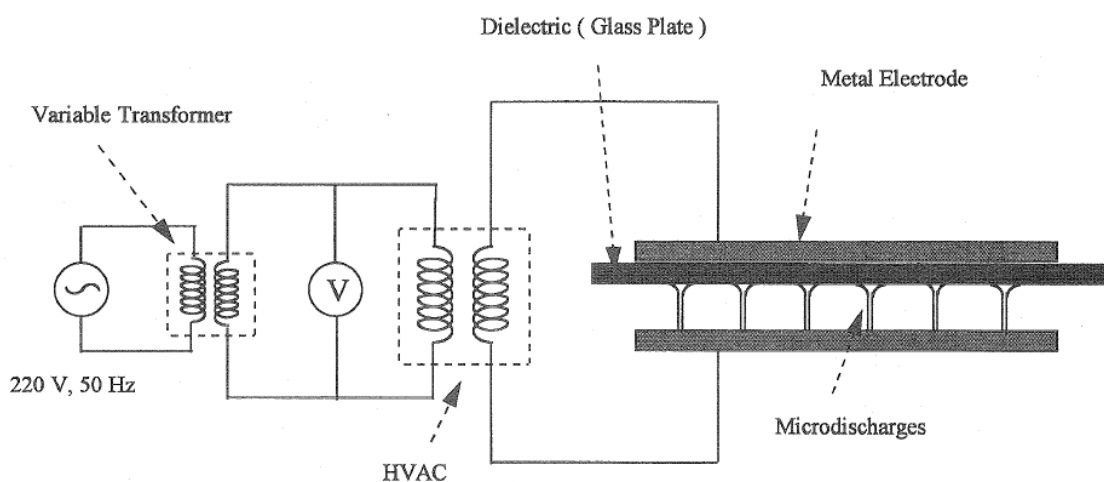
33. K. Yanallah and S. Hadj Ziane. 2006. "Numerical modeling of ozone production in direct current corona discharge". *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM* 777. p.125-129.
34. Yu. V. Serdyuk, S. M. Gubanski and M. Sjoberg. 2000. "Electrical Discharge in an Air Gap with Dielectric-Covered Electrodes". *2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. p.397-400.
35. Yuriy V. Serdyuk and Stanislaw M. Gubanski. 2005. "Computer Modeling of Interaction of Gas Discharge Plasma with Solid Dielectric Barriers". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.12. No.4. August 2005. p.725-735.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

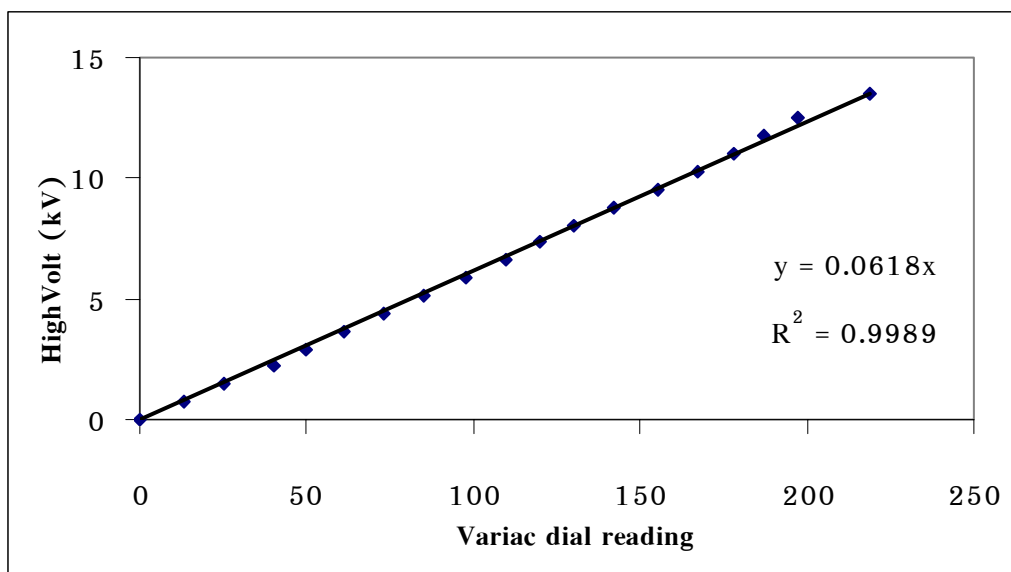
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนแก่ variac กับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรการทำงานของหม้อแปลงแสดงดังภาพประกอบที่ 62



ภาพประกอบที่ 62 แสดงระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าที่จะให้กับเซลล์พลาสมาไอโซไนเซอร์ได้จากระบบไฟฟ้าแรงสูงซึ่งประกอบด้วย ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้เข้ามีความต่างศักย์ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต โดยมีตัวปรับค่าความต่างศักย์เข้าได้ตามต้องการ (variac) ก่อนผ่านเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยหม้อแปลงนี้สามารถปรับความต่างศักย์ให้สูงขึ้น 125 เท่า ความต่างศักย์ก่อนเข้าหม้อแปลงอ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ ความต่างศักย์ที่ถูกแปลงให้สูงขึ้นนี้จะต่อไปยังขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์พลาสมาไอโซไนเซอร์ ผ่านทางสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง



ภาพประกอบที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนแก่ variac กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ variac กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมา แสดงดังภาพประกอบที่ 63 ทำให้เราทราบถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับเซลล์พลาสมาไอโซไนเซอร์ เพื่อทำให้เกิดดิสชาร์จขึ้นภายในช่องว่างระหว่างชั้นไดอิเล็กตริกที่ทำให้เกิดไอออน เขียนสมการของกราฟได้เป็น

$$y = 0.0618x$$

เมื่อ y คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับเซลล์พลาสมาไอโซไนเซอร์
หน่วย โวลต์

x คือ ค่าความต่างศักย์ขาเข้า หน่วยกิโลโวลต์

ภาคผนวก ข

สีสำหรับย้อมผ้า (Dyes)

การจำแนกสีย้อมผ้า (Dye Classification) มีหลายระบบด้วยกัน เช่น การจำแนกตามแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้าง หรือการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบที่ใช้ดัชนีสี (Color Index) ที่แบ่งตามการใช้งาน ดังนี้

1. Disperse dyes เป็นสีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซับน้ำได้น้อย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสม ทำให้สามารถย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย

2. Acid dyes ตัวสีย้อมเกิดจากสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง อาจนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เส้นใยบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยโพลีเอไมด์ เป็นต้น

3. Azoic dyes นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่จะจับบนเส้นใยได้ จะต้องทำการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเดียม เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซ ที่ให้สีบนเส้นใย

4. Basic dyes นิยมใช้ย้อมขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด สีชนิดนี้ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวสีย้อมเป็นสารอินทรีย์ประเภทโครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งให้แคโทไอออน ดังนั้นเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคโทไอออน ซึ่งสามารถย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5. Direct dyes เป็นสีที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวก dis- , tris- หรือ polyazo มีหมู่ที่ละลายน้ำได้เป็นพวก sulfonic acid carboxylic acid หรือ hydroxyl ละลายน้ำได้ดีมาก และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย มักจะใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส เป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก เนื่องจากเชื่อกันว่าการที่สีไดเร็กต์ยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสนั้น เกิดจากแรงดึงดูดจำนวนมากของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonds) และแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals forces) ซึ่งแรงดึงดูดเหล่านี้ไม่แข็งแรง ประกอบกับคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ของสีไดเร็กต์ จึงมีแนวโน้มที่สีจะหลุดออกมาจากเส้นใยได้ง่าย ผ้าที่ย้อมด้วยสีชนิดนี้จึงซีดจางง่าย ในการย้อมสีชนิดนี้ทำได้ง่ายเพียงแต่ใช้ความร้อน และมีสารช่วยย้อมเพียงชนิดเดียว คือ เกลือ เช่น เกลือแกง (NaCl) หรือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

6. Reactive dyes เป็นสีที่มีประจุลบที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยประเภทเดียวกับ สีดอเร็กท์ สีชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลสได้ พันธะ โคเวเลนต์ที่แข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสีดอเร็กท์กับเส้นใยเซลลูโลสมาก จึงมีความ ทนต่อการซักดี โครงสร้างของสีรีแอคทีฟประกอบด้วย

ก. หมู่โครโฟอร์ม (chromophore group) ซึ่งอาจเป็น azo (monoazo หรือ disazo) anthraquinone phthalocyanine (หรือ triphenodiozaine)

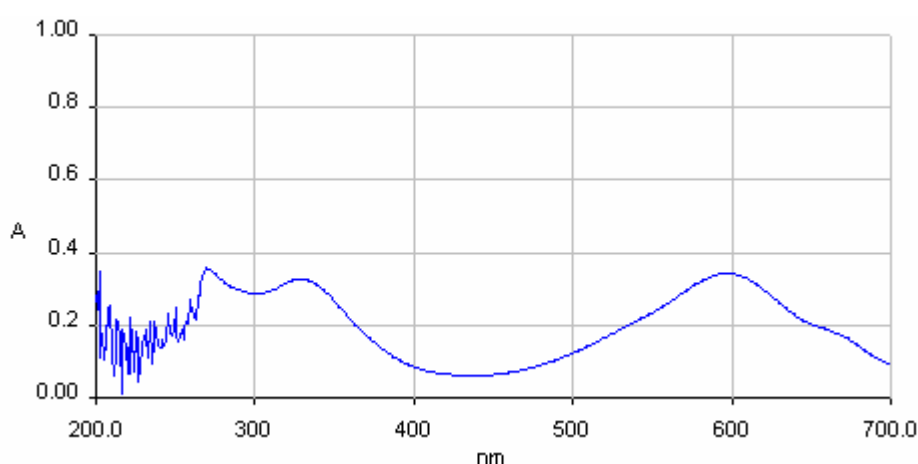
ข. หมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (reactive group) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่จะทำปฏิกิริยากับ เส้นใย ได้แก่ six-membered heterocyclic หรือ aromatic ring ที่มีการแทนที่ไฮโดรเจนอะตอม ด้วยหมู่ฮาโลเจน สำหรับหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ในสีรีแอคทีฟ ได้แก่ Triazines (Procion) Pyrimidine (Levafix Drimarene Cibaron) และ Vinylsulphones (Remazol)

ค. ตัวเชื่อม (bridging group) ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างหมู่โครโฟอร์ม และ หมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเชื่อมจะเป็นหมู่อะมิโน (amino group, -NH-)

ง. หมู่ที่ละลายน้ำได้ (water solubilizing group) เป็นหมู่ที่ช่วยให้สีมีการละลาย น้ำได้ดีซึ่งได้แก่ พวก ionic group โดยมากจะเป็น sulphonate salts

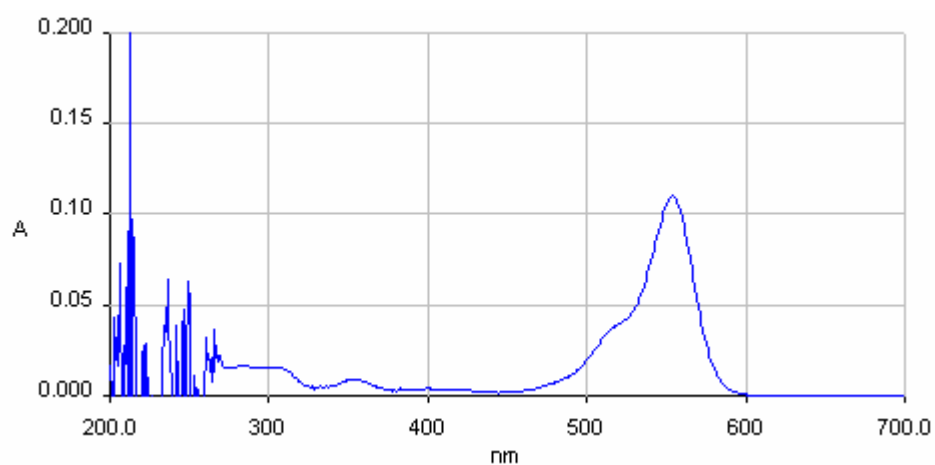
ในการหาค่าการดูดกลืนแสงจะต้องทำการวิเคราะห์ โดยใช้ความยาวคลื่นที่ เหมาะสม ซึ่งความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม แต่ละสีแสดงดังภาพประกอบที่ 64, 65 และ 66

(1) สารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน พิจารณาที่ความยาวคลื่น 590 nm มีค่า pH = 5



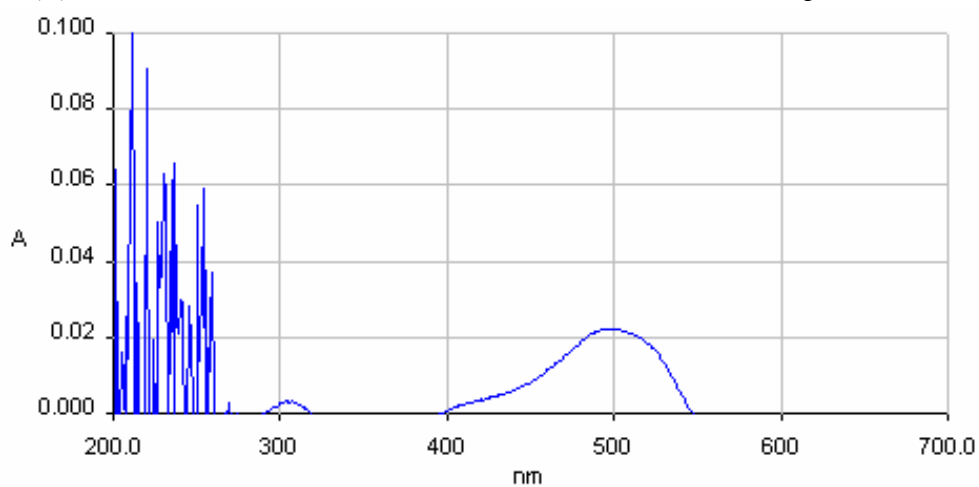
ภาพประกอบที่ 64 แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ของสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน

(2) สารละลายสีข้อมสีชมพู พิจารณาที่ความยาวคลื่น 555 nm มีค่า pH = 6



ภาพประกอบที่ 65 แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อมสีชมพู

(3) สารละลายสีข้อมสีแดง พิจารณาที่ความยาวคลื่น 490 nm มีค่า pH = 6

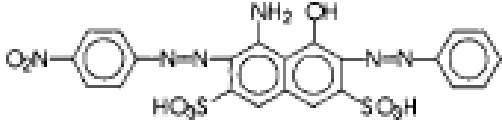
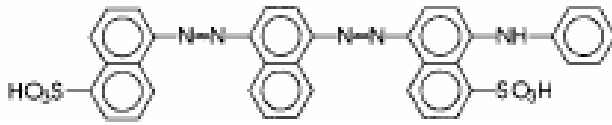
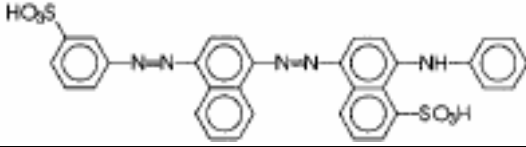
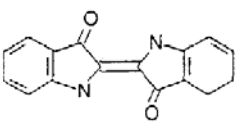
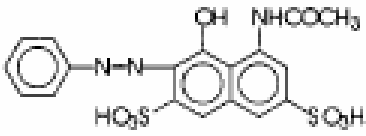
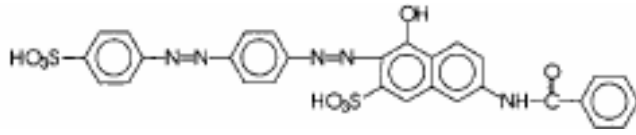
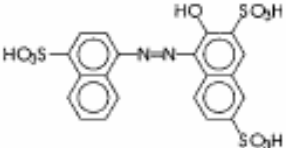
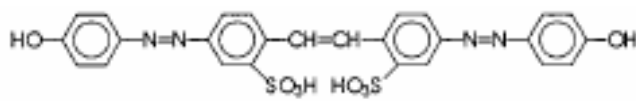


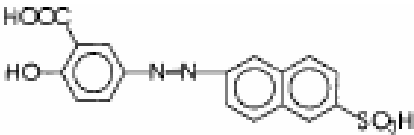
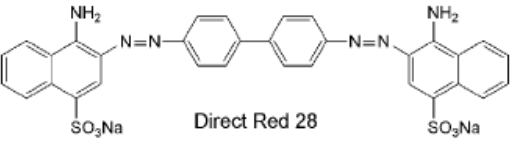
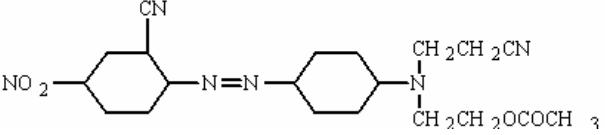
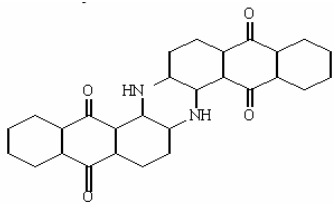
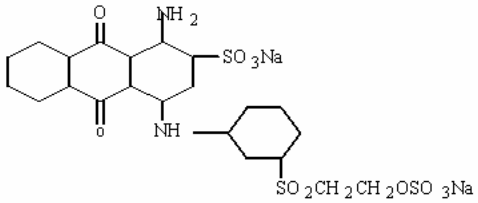
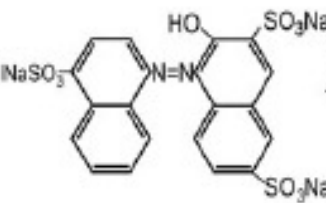
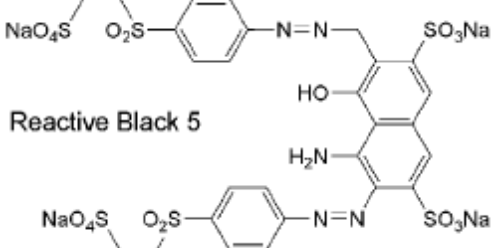
ภาพประกอบที่ 66 แสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อมสีแดง

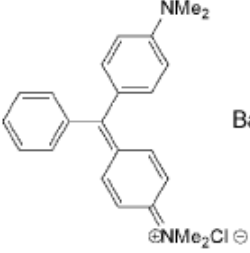
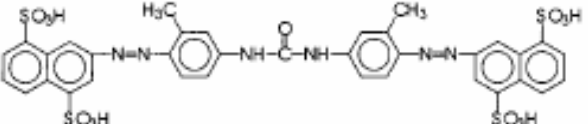
ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อมที่มีการศึกษา

พิจารณาตัวอย่างสีย้อมจากงานที่ใช้สีย้อมที่ทราบโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมที่ชัดเจน เพื่อทราบถึงโครงสร้างของสีย้อมที่ใช้ในงานวิจัยโดยสังเขป เพื่อบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของสีย้อมที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งไม่ทราบโครงสร้างทางเคมีที่ชัดเจน

ตารางที่ 17 แสดงโครงสร้างของสีย้อมชนิดต่าง ๆ จากงานที่ได้มีการศึกษา

ชื่อสี	โครงสร้างทางเคมี	ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุด (nm)
Acid Black 1		618
Acid Black 24		560
Acid Blue 113		557
Indigo		ไม่พบข้อมูล
Acid Red 1		530
Direct Red 81		509
Amaranth		520
Direct Yellow 4		404

ชื่อสี	โครงสร้างทางเคมี	ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง
Mordant Yellow 3		ไม่พบข้อมูล
Direct Red 28	 Direct Red 28	ไม่พบข้อมูล
Disperse Red 72		ไม่พบข้อมูล
Vat Blue 14		ไม่พบข้อมูล
Reactive Blue 19		ไม่พบข้อมูล
Aramant azo		521
Reactive Black 5	 Reactive Black 5	582

ชื่อสี	โครงสร้างทางเคมี	ความยาวคลื่น ที่ดูดกลืนแสง
Basic Green 4	 <p style="text-align: center;">Basic Green 4</p>	425
Direct Yellow 50		398

ภาคผนวก ค

การบำบัดน้ำเสียตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

การข้มสีเป็นกระบวนการที่ใช้ข้มสีเป็นวัตถุดิบสำคัญ ร่วมกับน้ำและสารเคมีอื่น ๆ ทำให้มีการปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนขององค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ตัวอย่างที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียข้มสีประกอบด้วย บีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สารแขวนลอย (SS) สี และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสภาพและวิธีการในกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงาน ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงลักษณะสมบัติน้ำเสียโรงงานฟอกข้มสี

พารามิเตอร์	ช่วงที่พบ
อุณหภูมิ	10 – 90 °ซ.
COD	80 – 4000 มก./ล.
BOD	50 – 2000 มก./ล.
TSS	20 – 500 มก./ล.
Color	สังเกตเห็น
NH3	0 – 36 มก./ล.
Phenol	0 – 12 มก./ล.
pH	2 – 12 มก./ล.
Cr(VI)	0 – 1 มก./ล.
Cr(III)	0 – 1 มก./ล.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2542) ได้กล่าวถึงวิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกข้มสีไว้ ซึ่งมีขั้นตอนการบำบัดดังนี้

ก. การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (Primary Treatment) เป็นการแยกเอาตะกอนแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย เช่น เศษผ้า และเศษตัด นอกจากนี้ยังเป็นการปรับคุณภาพน้ำให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทุติยภูมิต่อไป ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นในอุตสาหกรรมฟอกข้มสี ได้แก่ การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยตะแกรง การปรับสภาพสมดุล และการปรับความเป็นกรด-ด่าง

ข. การบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment) เป็นระบบบำบัดที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ หรือเป็นระบบบำบัดทางเคมีแล้วตามด้วยระบบทางชีวภาพ ระบบบำบัดขั้นทุติยภูมิมีหลายระบบ เช่น ระบบปรับบ่อเสถียร ระบบสระเติมอากาศ ระบบตะกอนเร่ง ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ เป็นต้น สำหรับระบบบำบัดที่เหมาะสมและนิยมใช้กันมากได้แก่ ระบบปรับบ่อเสถียร ระบบสระเติมอากาศ และระบบตะกอนเร่ง

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำเสียจากการย้อมสีเครื่องนุ่งห่มเป็นปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้นกับชุมชนขนาดเล็กน้อย จังหวัดพัทลุง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนของชุมชน จากการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียดังกล่าว ดังตารางที่ 16 พบว่าเป็นน้ำเสียอุตสาหกรรม กล่าวคือ มีค่าความสกปรกในรูปต่างๆ ค่อนข้างสูงมาก ในการบำบัดจึงต้องใช้ระบบบำบัดที่ประกอบด้วย

1) บ่อกักเก็บน้ำเสีย

น้ำเสียจากบ้านเรือนแต่ละหลังจะถูกทิ้งรวมกันในบ่อกักเก็บก่อนจะถูกสูบไปยังหน่วยบำบัดหลัก (ถังกวนเร็ว กวนช้า) โดยบ่อมีระยะเวลาการกักเก็บประมาณ 2.5 วัน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นบ่อปรับสภาพสมดุล ไปในขณะเดียวกัน โดยช่วยลดความแปรผันของปริมาณและลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าระบบ อุปกรณ์ในบ่อประกอบด้วย เครื่องเป่าอากาศใต้ผิวน้ำ เพื่อป้องกันการตกตะกอนของของแข็งที่ก้นบ่อ และเครื่องสูบน้ำที่ทำหน้าที่สูบน้ำเสียไปยังถังกวนเร็ว กวนช้า

2) ถังกวนเร็ว กวนช้า

เป็นถังปฏิบัติการสำหรับกระบวนการตกตะกอน โดยการเติมสารเคมี ในที่นี้ใช้สารส้ม โดยน้ำเสียจะเกิดปฏิกิริยาในถังกวนเร็ว หลังจากนั้นน้ำเสียจะผ่านไปยังถังกวนช้าเพื่อให้อนุภาคที่ผ่านกระบวนการกวนเร็ว มีขนาดใหญ่ทำให้ตกตะกอนง่าย

3) ถังตกตะกอน

เป็นถังที่ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างตะกอนกับน้ำใส โดยน้ำใสจะไหลทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ส่วนน้ำตะกอน (ประกอบด้วยตะกอนจากสารเคมี และตะกอนจากของแข็งแขวนลอย) จะไหลโดยแรงโน้มถ่วงไปยังลานตากทราย

4) ลานตากทราย

เป็นหน่วยบำบัดน้ำตะกอนโดยใช้กลไกการระเหยของน้ำ และการกรองก่อให้เกิดตะกอนแห้ง โดยชั้นกรองตะกอนประกอบด้วยวัสดุรูปพรุน พวกกรวด ทราย น้ำตะกอนที่ไหลมายังลานตากทราย นอกจากจะระเหยหลังจากการตากแดดประมาณ 3 วันแล้ว ส่วนหนึ่งจะไหลผ่านชั้นกรองกลับไปยังบ่อกักเก็บเพื่อเข้าสู่ระบบบำบัดอีกครั้ง ในส่วนตะกอนแห้งให้ตกไปทิ้งอย่างสม่ำเสมอ

5) การกำจัดกากตะกอนแห้ง

เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียจากน้ำย้อมสีเสื่อกระจูดเป็นการบำบัดทางเคมี ซึ่งใช้สารส้มเป็นหลัก ตะกอนที่เกิดขึ้นเกิดจากของแข็งแขวนลอย และตะกอนจากสารเคมีซึ่งยังคงมีสารเคมีค้างอยู่ในตะกอนแห้ง ทั้งสารเคมีจากน้ำเสียเองและสารเคมีที่ใส่จากภายนอกเพื่อทำปฏิกิริยา โดยปกติในการบำบัดสารเคมีที่เป็นพิษในน้ำเสียจะใช้หลักการทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่มีพิษแล้วตกตะกอน แต่ในกรณีของน้ำเสียจากการย้อมสีเสื่อกระจูด ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของทางราชการ ในการบำบัดจึงให้ความสำคัญในแง่ของการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอยมากกว่าโลหะหนัก

อย่างไรก็ตามตะกอนแห้งที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นตะกอนสารอินทรีย์ ดังนั้นเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยกำจัดตะกอนแห้งโดยสร้างเป็นบ่อซีเมนต์ เพื่อกักเก็บ และขนถ่ายไปฝังกลบต่อไป

ตารางที่ 19 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากพื้นที่ชุมชนทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง

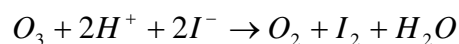
ตัวอย่างน้ำ	ดัชนีวิเคราะห์						แหล่งรองรับน้ำ
	pH	อุณหภูมิ (^o C)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	ของแข็ง แขวนลอย (mg/l)	ไนโตรเจน ทั้งหมด (mg/l)	
น้ำย้อมสีเสื่อกระจูด ตัวอย่างที่ 1	5.90	33.50	8,840	3,627	4,864	138.60	ทะเลน้อย
น้ำย้อมสีเสื่อกระจูด ตัวอย่างที่ 2	5.83	32.50	12,720	3,822	6,334	169.40	ทะเลน้อย

อ้างอิง : การศึกษาความเหมาะสมและออกแบบเบื้องต้นระบบรวบรวม และบำบัดน้ำเสียของอำเภอควนขนุน และปากพะยูน จังหวัดพัทลุง รายงานฉบับสมบูรณ์. มิถุนายน 2540

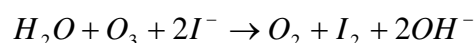
ภาคผนวก ง

การตรวจวัดปริมาณโอโซน

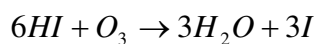
ในการตรวจวัดปริมาณโอโซน นอกเหนือจากวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ได้กล่าวในงานวิจัยแล้ว การทดสอบการมีอยู่ของปริมาณโอโซนยังสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีทางกายภาพจะทดสอบด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่งใช้ยาสำเร็จรูปตรวจสอบโอโซน โดยใช้ชุด Palin kit วิธีนี้สามารถทราบปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำในหน่วย mg/l วัดปริมาณโอโซนในช่วง 0.1-1.0 mg/l ได้อย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำพอสมควรอีกทั้งใช้งานง่าย วิธีที่สองโดยการใช้กระดาษลิตมัส และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ วิธีนี้สามารถบอกได้เพียงว่าเกิดโอโซนขึ้นจริงคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชันของ KI เขียนได้เป็น



สังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน ถ้าหากปริมาณโอโซนน้อยกว่า 1.0 mg/l จะเกิดความผิดพลาดของปฏิกิริยาระหว่างโอโซนตามปฏิกิริยาดังนี้



ในสภาพที่สารละลายมีสภาพเป็นกรด อัตราส่วนของไอโอไดด์ที่ถูกปล่อยออกมาเพิ่มขึ้น ดังนั้นการรวมกันกับไฮโดรเจนไอโอไดด์ (HI) จะเป็นไปตามปฏิกิริยา



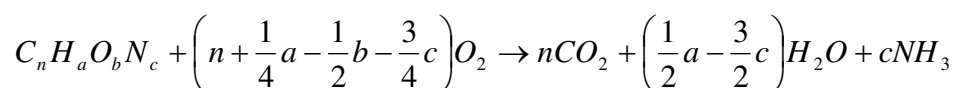
ดังนั้นจุดสำคัญในการตรวจสอบวิธีนี้คือ ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำ

ภาคผนวก จ

ซีไอดี และ บีไอดี

1. ซีไอดี

ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งจากชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม อาจบอกได้จากค่าซีไอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) ซึ่งเป็นค่าปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์ หรือย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการว่าสารอินทรีย์สามารถถูกออกซิไดส์ได้โดยตัวเติมออกซิเจนภายใต้สภาวะที่เป็นกรดดังสมการ



โดยที่ n, a, b, และ c เป็นค่าคงที่สำหรับสารอินทรีย์นั้น ๆ

สมการนี้เกิดขึ้นทั้งในปฏิกิริยาของการหาค่าบีไอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) และค่าซีไอดี ดังนั้นจะเห็นว่าหลักการของการหาค่าซีไอดีคล้ายกับการหาค่าบีไอดี คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์ หรือย่อยสลายจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ต่างกันที่การหาค่าบีไอดีจะต้องใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย ส่วนค่าซีไอดีใช้ตัวเติมออกซิเจนในการย่อยสลาย

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวเติมออกซิเจนในการหาค่าซีไอดีมีหลายตัว เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นต้น ในการวิเคราะห์นั้นเลือกใช้โพแทสเซียมไดโครเมต เพราะราคาถูกและสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดี ความต้องการออกซิเจนในการออกซิไดส์ หรือย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีคือความต้องการออกซิเจนของน้ำที่หาได้โดยวิธีทางเคมี ดังนั้นค่าซีไอดีจึงแสดงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งหมดที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ และแบคทีเรียย่อยสลายไม่ได้ โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์โดยใช้สารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดส์สูงในสารละลายที่เป็นกรด ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเท่านั้นจึงต้องทำการต้มภายใต้การรีฟลักซ์ (Reflux)

โดยปกติในน้ำเสียตัวอย่างเดียวกันค่าซีไอดีจะสูงกว่าค่าบีไอดี เนื่องจากการหาค่าซีไอดีใช้ตัวเติมออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์ย่อมจะทำได้สมบูรณ์กว่าการใช้แบคทีเรียในการหาค่าบีไอดี โดยทั่วไปเมื่อทราบข้อมูลของค่าซีไอดีของน้ำ

เสีย อาจทำการคำนวณหาค่าบีโอดีอย่างคร่าว ๆ ได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีและค่าบีโอดีของน้ำเสียแต่ละประเภทจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ข้อดีของการหาค่าซีโอดีเมื่อเทียบกับการหาค่าบีโอดีคือ

1) ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงก็สามารถหาค่าซีโอดีได้ ในขณะที่การหาค่าบีโอดีต้องใช้เวลาอย่างน้อย 5 วัน

2) มีการแปรผันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการหาค่าบีโอดี และค่าซีโอดีมีความน่าเชื่อถือกว่า

3) ในกรณีที่มีสารพิษ เช่น โลหะหนัก ซึ่งโดยทั่วไปสารพิษจะมีความสามารถที่จะขัดขวางการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ทำให้การหาค่าบีโอดีผิดพลาด ในขณะที่สารพิษไม่มีผลต่อการหาค่าซีโอดี

อย่างไรก็ตามค่าที่ใช้บอกปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้ โดยวิธีการทางชีววิทยาในรูปของค่าบีโอดี ย่อมจะเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย โดยวิธีการทางชีววิทยาได้อย่างถูกต้องมากกว่าค่าซีโอดี

การวิเคราะห์หาค่า COD แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. Dichromate open reflux, titrimetric method ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

1.1 สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.25 M : เตรียมโดยชั่ง $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 98 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติมน้ำ conc. H_2SO_4 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรรวมเป็น 1 ลิตร

2) สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 0.04167 M : เตรียมโดยชั่ง $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (อบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 12.259 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเป็น 1 ลิตร

3) สารละลายกรดกำมะถัน : ผสม Ag_2SO_4 และ conc. H_2SO_4 ด้วยสัดส่วน 5.5 กรัม ของ Ag_2SO_4 ต่อ 1 กิโลกรัมของ conc. H_2SO_4 ตั้งทิ้งไว้ 2 – 3 วันก่อนนำมาใช้

4) ผง HgSO_4

5) Ferroin indicator solution : เตรียมโดยชั่ง 1,10 – phenanthroline monohydrate 1.485 กรัม และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 695 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 100 มิลลิลิตร

1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

1.2.1 หาค่าซีโอดี

1) นำตัวอย่างน้ำสี 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดสำหรับหาค่า COD ขนาด 250

มิลลิลิตร

- 2) เติม Hg_2SO_4 0.4 กรัม และ glass beads 2-3 เม็ด
- 3) เติมสารละลายกรดกำมะถัน (มี AgSO_4 ผสมอยู่ก่อนแล้ว) 5 มิลลิลิตร
อย่างช้าๆ ในตู้ดูดควัน ผสมให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้เย็น
- 4) เติมสารละลายมาตรฐานโพตัสเซียมไดโครเมต 0.04167M 10 มิลลิลิตร
โดยใช้ปิเปต
- 5) เติมสารละลายกรดกำมะถัน 25 มิลลิลิตร ในตู้ดูดควัน ผสมให้เข้ากัน
- 6) นำขวดหาค่า COD ต่อกับ Condenser เปิดน้ำหล่อเย็น
- 7) เปิดเตาให้ความร้อนทำการ reflux 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็น ผสมน้ำ
กลั่นจนปริมาตรรวมเป็น 140 มิลลิลิตร
- 8) ไทเตรตไดโครเมตที่มากเกินไปด้วย FAS 0.25 M โดยใช้ 2-3 หยด
Ferroun indicator solution จุดยุติคือจุดที่สีของสารละลายเปลี่ยนจากน้ำเงินแกมเขียวเป็นสีน้ำตาล
แดง

1.2.2 หาความเข้มข้นของ FAS

- 1) ใช้ปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานโพแตสเซียมไดโครเมต 0.04167 M 10
มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 2) เติม conc. H_2SO_4 30 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น
- 3) ไทเตรตด้วย FAS 0.25 M โดยใช้ Ferroun indicator solution 2 - 3 หยด
จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือ จุดที่สีของสารละลายเปลี่ยนจากน้ำเงินแกมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

1.3 การคำนวณ

Molarity ของ FAS (M) = [ปริมาณ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (mL) x 0.25] / ปริมาณ FAS ที่ใช้ (mL)

COD (mg/L) = [(A-B) x M x 8,000] / ปริมาณตัวอย่าง (mL)

โดยที่ A = ปริมาณ FAS ที่ใช้สำหรับ Blank (mL)
B = ปริมาณ FAS ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง (mL)
M = Molarity ของ FAS

2. Dichromate closed reflux, titrimetric method ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

2.1 สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.1 M : เตรียมโดยชั่ง $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 39.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติม conc. H_2SO_4 20 มิลลิลิตร ปลอ่ยให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรรวมเป็น 1 ลิตร

2) สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมตใช้ในการย่อยสลาย 0.01667 M : เตรียมโดยชั่ง 4.903 กรัม $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ primary standard grade ซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติม conc. H_2SO_4 167 มิลลิลิตร ชั่ง 33.3 กรัม HgSO_4 ละลาย ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เจือจางเป็น 1 ลิตร

3) สารละลายกรดกำมะถัน : ผสม Ag_2SO_4 และ conc. H_2SO_4 ด้วยสัดส่วน 5.5 กรัม ของ Ag_2SO_4 ต่อ 1 กิโลกรัมของ conc. H_2SO_4 ตั้งทิ้งไว้ 2 – 3 วันก่อนนำมาใช้

4) Ferroin indicator solution : เหมือนวิธี Dichromate open reflux เจือจางสารละลายนี้โดยแฟคเตอร์ 5(1+4)

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.2.1 หาค่าซีไอดี

1) ปิเปตน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร ลงในหลอด

2) เติมสารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ใช้ในการย่อยสลาย 1.5 มิลลิลิตร

3) เติมสารละลายกรดกำมะถัน 3.5 มิลลิลิตร ปิดจุกหลอดให้แน่น กลับหลอดไปมาหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ผสมกันอย่างสมบูรณ์

4) วางหลอดลงใน Block digester ที่ผ่านการให้ความร้อนถึง 150 องศาเซลเซียส reflux 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เทสารละลายลงในขวดรูปชมพู่

5) เติมสารละลายกรดกำมะถัน 25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

6) นำขวดหาค่า COD ต่อกับ Condenser เปิดน้ำหล่อเย็น

7) เปิดเตาให้ความร้อนทำการ reflux 2 ชั่วโมง ปลอ่ยทิ้งไว้ให้เย็น ผสมน้ำกลั่นจนปริมาตรรวมเป็น 140 มิลลิลิตร

8) หยด Ferroin indicator solution 1-2 หยด ไทเตรตด้วย FAS 0.1 M จุดยุติคือจุดที่สีของสารละลายเปลี่ยนจากน้ำเงินแกมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

2.2.2 หาค่าความเข้มข้นของ FAS

1) ใช้ปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 5 มิลลิลิตร เจือลงในขวดรูปชมพู่

2) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ทำให้เย้นที่อุณหภูมิห้อง

3) หยด Ferroin indicator solution 1-2 หยด ที่เทรตด้วย FAS 0.1 M จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือ จุดที่สีของสารละลายเปลี่ยนจากน้ำเงินแกมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

2.3 การคำนวณ

Molarity ของ FAS(M) = [ปริมาณ 0.01667 M $K_2Cr_2O_7$ (mL)/ปริมาณFASที่ใช้(mL)] x 0.1

COD (mg/L) = [(A-B) x M x 8,000] / ปริมาณตัวอย่าง (mL)

โดยที่ A = ปริมาณ FAS ที่ใช้สำหรับ Blank (mL)

B = ปริมาณ FAS ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง (mL)

M = Molarity ของ FAS

เมื่อเราทราบค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างที่เราจะทำการวัดคุณภาพน้ำ เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดช่วงค่าบีโอดี และวิธีการเจือจางตัวอย่างน้ำ ตามตารางที่ ค-1

ซึ่งค่าบีโอดี จะมีค่าประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของค่าซีโอดี

ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าซีโอดีที่ได้เป็น ประมาณ 300 mg/L เราจะเลือกช่วงที่ค่าบีโอดี 3 ช่วง คือ 120-420, 60-120 และ 30-105 mg/L ซึ่งทำให้เรากำหนดปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็น 5.0, 10.0 และ 20.0 มิลลิลิตร

2. บีโอดี

บีโอดี (Biochemical oxygen demand;BOD) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความสกปรกของน้ำในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ในช่วงระยะเวลา และอุณหภูมิที่กำหนดซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เวลา 5 วัน และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ค่าบีโอดีมีประโยชน์ในการใช้เป็นตัวแปรที่แสดงถึงคุณภาพน้ำจากแหล่งต่าง ๆ เช่น น้ำจากแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ และเพื่อบอกถึงความสกปรกของน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจากชุมชน หรือโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวแปรแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้น ๆ

เนื่องจากออกซิเจนในอากาศสามารถละลายน้ำได้ในปริมาณจำกัด คือมีค่าประมาณ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นในน้ำเสียซึ่งมีความสกปรกมากจึงจำเป็นต้องทำให้ปริมาณสกปรกเจือจางอยู่ในระดับสมมูลย์พอดีกับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ การวิเคราะห์นี้เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ในน้ำ จึงจำเป็นต้องทำให้มีสภาพที่เหมาะสม

สำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์ กล่าวคือไม่มีสารพิษ แต่มีอาหารเสริมสำหรับจุลินทรีย์อย่างเพียงพอ

นอกจากนี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กระทำโดยจุลินทรีย์หลายชนิดจึงจำเป็นต้องมีปริมาณจุลินทรีย์ต่าง ๆ เหล่านี้เพียงพออยู่ในตัวอย่าง ซึ่งในการวิเคราะห์ หากไม่มีจุลินทรีย์หรือมีปริมาณน้อยไปควรเติมจุลินทรีย์ผสมลงไปในพื้นที่ทำการวิเคราะห์

1. วิธีการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์หาค่าบีโอดีทำได้โดยหาความแตกต่างของค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำช่วงระยะเวลา 5 วัน ซึ่งจะใช้วิธี Azide modification สำหรับการหาค่าบีโอดีมี 2 วิธี แยกตามปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนี้

1) วิธีการหาโดยตรง เมื่อมีค่าบีโอดีน้อยกว่า 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนใหญ่เป็นน้ำจากแม่น้ำลำคลอง

2) วิธีทำให้เจือจาง ใช้ในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีความสกปรกสูงโดยมีค่ามากกว่า 7 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจำเป็นต้องทำให้น้ำมีความสกปรกเจือจางลงโดยใช้น้ำผสมเจือจาง (Dilution water) และควรวิเคราะห์อย่างน้อย 3 ความเข้มข้น

2. สารเคมี

1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer solution) : ละลาย K_2HPO_4 21.75 กรัม $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ 33.4 กรัม และ NH_4Cl 1.7 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.2

2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulfate solution) : ละลาย $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร

3) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride solution) ละลาย anhydrous $CaCl_2$ 27.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร

4) สารละลายเฟอร์ริคคลอไรด์ : ชั่ง $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร

5) สารละลายแมงกานีสซัลเฟต (Manganese sulfate solution) : ละลาย $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ 480 กรัม ($MnSO_4 \cdot 2H_2O$ 400 กรัม หรือ $MnSO_4 \cdot H_2O$ 364 กรัม) ในน้ำกลั่นกรองแล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะต้องไม่เกิดสีกับแป้ง ภายหลังเติมสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide solution) ในสภาพที่เป็นกรด

6) สารละลายอัลคาไล-ไอโอไดด์-เอไซด์ (Alkali-iodide-azide reagent) : เตรียมได้โดยละลาย $NaOH$ 500 กรัม หรือ KOH 700 กรัม และ NaI 135 กรัม หรือ KI 150 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร เติม NaN_3 10 กรัม (ซึ่งเตรียมไว้ก่อนโดยละลาย

ในน้ำกลั่นจำนวน 40 มิลลิลิตร) ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ข้างต้น สารละลายนี้ไม่ควรเกิดสีกับน้ำแ่่งเมื่อทำให้เป็นกรดหรือทำให้เจือจาง

7) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 N : ซึ่ง $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 6.205 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเติม NaOH 0.4 กรัม หรือ NaOH 6N 1.5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร ทำการ standardize สารละลายนี้ด้วยสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต

8) conc. H_2SO_4

9) น้ำแ่่งอินดิเคเตอร์

10) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไอโอเดต 0.025 N : ซึ่ง $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$ 812.4 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเป็น 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดแก้วมีฝาปิด การ standardize สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 N สามารถทำได้โดยการตวงน้ำกลั่น 100 – 150 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติม KI 2 กรัม เติม 10 มิลลิลิตรของ 1+9 H_2SO_4 และสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต 0.025 N ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร ลงไป เติมน้ำกลั่นลงไปอีกจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ทิเทรตไอโอดีนที่ถูกขับออกมาด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 N ที่เตรียมไว้ จนกระทั่งใกล้ถึงจุดยุติ สังเกตจากสีของสารละลายจางลงเติมน้ำแ่่งลงไป 1 มิลลิลิตร ทิเทรตต่อจนถึงจุดยุติ ถ้าสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่เตรียมไว้มีความเข้มข้น 0.025 N พอดี ปริมาตรที่ใช้ในการทิเทรตจะเท่ากับ 20.00 มิลลิลิตร ถ้าไม่ได้ให้ปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตให้เท่ากับ 0.025 N พอดีเพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 วิธีการวิเคราะห์โดยตรง

- 1) เติมออกซิเจนลงในน้ำโดยการพ่นอากาศลงไปให้อิ่มตัว
- 2) รินน้ำตัวอย่างลงในขวดสำหรับหาค่าบีโอดีจนเต็ม 3 ขวด ปิดจุกให้สนิท ให้แน่ใจว่ามีน้ำหล่อที่ปากขวด นำขวดที่หนึ่งมาหาออกซิเจนละลายก่อน อีกสองขวดนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

- 3) หลังจาก 5 วัน นำขวดบีโอดีอีก 2 ขวด มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่

3.2 วิธีทำให้เจือจาง

- 1) การเตรียมน้ำผสมเจือจาง (Dilution water) ทำได้โดย
 - นำน้ำกลั่นมาปรับอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20 ± 1 องศาเซลเซียส
 - ปรับคุณภาพให้เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ โดยการเติมสารละลายต่อไปนี้ อย่างละ 1 มิลลิลิตร ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

(1) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

(2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

(3) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

(4) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

และเติมอากาศให้มีออกซิเจนอิ่มตัว ประมาณ 30 นาที

2) การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) เพื่อให้ได้จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีจำเป็นต้องเลือกหัวเชื้อที่เหมาะสมกับตัวอย่างน้ำแต่ละชนิด โดยทั่วไปใช้น้ำจากส้วมหรือน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Effluent) ที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อมาก่อนเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์

เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจึงทำการผสมเจือจางดังนี้

- ค่อย ๆ รินน้ำผสมเจือจางประมาณ 500 มิลลิลิตร โดยให้น้ำค่อย ๆ ไหลลงตามข้างกระบอกลงขนาด 1 ลิตร

- เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ลงในกระบอกลง 2 มิลลิลิตร

- เติมตัวอย่างน้ำตามส่วนที่คำนวณได้

- เติมน้ำผสมเจือจางลงจนครบ 1 ลิตร

- คนให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วเสียบจุกยางไว้ที่ปลายชักขึ้นเบา ๆ ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ

- ค่อย ๆ รินตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้วนี้ ใส่ลงในขวดบีโอดีที่แห้งและสะอาดจนเต็ม 3 ขวด ปิดจุกให้สนิท ขวดหนึ่งนำไปวิเคราะห์หาค่าออกซิเจนละลายวันแรก อีกสองขวดนำไปใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน โดยให้ตรวจสอบว่ามีน้ำหล่อที่ปากขวดหรือไม่ และควรตรวจดูทุกวันอย่าให้แห้ง (ถ้าแห้งเติมน้ำผสมเจือจาง)

หลังจากที่นำขวดหาค่าบีโอดีไปเก็บไว้ในตู้มีด อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ครบ 5 วัน นำมาหาค่าออกซิเจนละลาย ตัวอย่างที่ใช้ได้จะต้องมีค่าออกซิเจนละลายเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการใช้ออกซิเจนไปอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

3) การแก้ค่าเนื่องจากการเติมหัวเชื้อ (Seed correction) ถ้ามีการเติมหัวเชื้อในน้ำตัวอย่าง จะต้องทำหัวเชื้อให้เจือจาง แล้วนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเช่นเดียวกับการหาค่าบีโอดีในตัวอย่างน้ำ หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าการใช้ปริมาณออกซิเจนในระยะเวลา 5 วันในการคำนวณค่าบีโอดีต้องทำการแก้ค่าเนื่องจากการเติมหัวเชื้อด้วย

ตารางที่ 20 แสดงช่วงค่าบีโอดี และวิธีการเจือจางด้วยน้ำ

(Sawyer C.N. and P.L. McCarty, 1994)

Using percent mixture		By direct pipeting into 300 mL bottles	
% Mixture	Range of BOD ₅ (mg/L)	Sample Volume (mL)	Range of BOD ₅ (mg/L)
0.01	20,000 – 70,000	0.02	30,000 – 105,000
0.02	10,000 – 35,000	0.05	12,000 – 42,000
0.05	4,000 – 14,000	0.10	6,000 – 21,000
0.1	2,000 – 7,000	0.20	3,000 – 10,500
0.2	1,000 – 3,500	0.50	1,200 – 4,200
0.5	400 – 1,400	1.0	600 – 2,100
1.0	200 – 700	2.0	300 – 1,050
2.0	100 – 350	5.0	120 – 420
5.0	40 – 140	10.0	60 – 210
10.0	20 – 70	20.0	30 – 105
20.0	10 – 35	50.0	12 – 42
50.0	4 – 14	100.0	6 – 21
100.0	0 – 7	300.0	0 – 7

3.3 วิธีการหาค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen; D.O.)

1) ตวงตัวอย่างปริมาตรที่ต้องการตามตารางช่วงค่าบีโอดีและวิธีการเจือจางตัวอย่างน้ำ เทในขวดสำหรับหาค่าบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร

2) เติม Dilution water จนถึงคอขวด และเติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 2 มิลลิลิตร

3) เติม Alkali-iodide-azide reagent (AIA) 2 มิลลิลิตร ปิดฝาอย่างให้เกิดฟองอากาศเขย่าให้เข้ากัน

4) รอให้เกิดตะกอนของ Mn(OH)₂ เติม conc. H₂SO₄ 2 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน

5) ตูดตัวอย่างจากขวดหาค่าบีโอดี 203 มิลลิลิตร (เทออกด้วยกระบอกตวง 97 มิลลิลิตร) ไทเตรตด้วย 0.025 N Na₂S₂O₃ โดยมีน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ (ประมาณ 1 มิลลิลิตร) จนสีของสารละลายกลายเป็นสีเหลืองอ่อน

6) ไทเตรตต่อด้วย 0.025 N Na₂S₂O₃ จนสีน้ำเงินหายไป

3.4 คำนวณค่าบีโอดี

1) ออกซิเจนละลาย (D.O.)

$$1 \text{ mL } 0.025 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 1 \text{ mg/L D.O. (ในตัวอย่างน้ำ 200 mL)}$$

2) BOD₅ (เมื่อไม่เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์)

$$\text{BOD}_5 \text{ (mg/L)} = (D_1 - D_2) / P$$

3) BOD₅ (เมื่อเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์)

$$\text{BOD}_5 \text{ (mg/L)} = [(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)f] / P$$

โดยที่ D_1 = ค่าออกซิเจนละลายในวันแรก (mg/L)

D_2 = ค่าออกซิเจนละลายในวันที่ 5 (mg/L)

P = อัตราส่วนของการเจือจางตัวอย่างน้ำ

B_1 = ค่าออกซิเจนละลายในวันแรก ของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (mg/L)

B_2 = ค่าออกซิเจนละลายในวันที่ 5 ของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (mg/L)

f = อัตราส่วนของปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำต่อปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการแก้ค่า เนื่องจากการเติมหัวเชื้อ

ภาคผนวก จ

อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสารทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยให้ข้อมูลในลักษณะที่เกี่ยวกับการสั่นและการหมุนของโมเลกุลเมื่อมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสาร กล่าวคือโมเลกุลของสารดูดกลืนแสงของอินฟราเรด (IR) โมเลกุลจะถูกกระตุ้นเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าสภาวะพื้น โดยมีพลังงานเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 2 – 10 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งเป็นพลังงานที่เพียงพอจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นหรือเกิดการหมุนเท่านั้น ทำให้เกิดอินฟราเรดสเปกตรัมของสาร และสามารถนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสารได้ การบอกตำแหน่งพีกของอินฟราเรดสเปกตรัม นิยมบอกเป็นจำนวนคลื่น (wavenumber, $\tilde{\nu}$) หรืออาจบอกเป็นความยาวคลื่น (λ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคลื่นกับความยาวคลื่นเป็นดังสมการ

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

การวิเคราะห์โครงสร้างของสารอินทรีย์ด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีมักบอกในรูปของกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ ที่ปรากฏออกมาที่ wavenumber ต่างกัน ดังตารางที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง wavenumber กับกลุ่มฟังก์ชันที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ปานกลางและดีมาก

ตารางที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง wavenumber กับกลุ่มฟังก์ชันที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ปานกลางและดีมาก

Wavenumber range (cm ⁻¹)	กลุ่มฟังก์ชัน
3700 – 3600	OH(H ₂ O, ROH, PhOH) (dilute solution)
3530 – 3400	NH ₂ (2 bands), NH (1 band) (dilute solution)
3500 – 3250	OH (polymers) (solid and liquids)
3500 – 3060	NH (amines, amides)
3320 – 3250	-C=C-H (sharp)
3300 – 2400	COOH (broad)
3110 – 3000	C-H (C=C-H, Ph-H, CH ₃ X, CH ₂ X)

Wavenumber range (cm ⁻¹)	กลุ่มฟังก์ชัน
3000 – 2800	C-H (-CH ₂ -, -CH ₃)
2835 – 2815	OCH ₃
2750 – 2700	CHO
2260 – 2100	-C=C-
2190 – 2130	CNS, C=N
2000 – 1650	C-H (phenyl)
1980 – 1950	-C=C=C-
1950 – 1600	C=O
1715 – 1630	RCONH ₂ , RCONHR
1710 – 1530	-COO- (broad)
1680 – 1630	C=C (nonconjugated, noncyclic), C=N
1680 – 1560	C=C (cyclic or conjugated)
1650 – 1590	RONO, RONO ₂
1650 – 1475	RCONH ₂ , RCONHR
1615 – 1590	Phenyl
1615 – 1565	Pyridines(doublet)
1610 – 1560	COO ⁻ M ⁺
1550 – 1490	PhNO ₂
1515 – 1485	Phenyl
1475 – 1450	CH ₂ , CH ₃
1440 – 1400	COOH
1430 – 1400	CO-CH ₂
1420 – 1400	CO- NH ₂
1400 – 1360	(CH ₃) ₃ C(two bands)
1400 – 1310	COO ⁻ M ⁺ (broad)
1380 – 1370	CH ₃
1380 – 1360	CH(CH ₃) ₂ (two bands)
1370 – 1300	C-NO ₂
1330 – 1310	Ph- CH ₃
1300 – 1000	CF
1280 – 1250	SiCH ₃
1280 – 1180	C-N-(aromatic)

Wavenumber range (cm ⁻¹)	กลุ่มฟังก์ชัน
1280 – 1150	-C-O-C-
1255 – 1240	(CH ₃) ₃ C-
1275 – 1070	-C-O-C-
1230 – 1100	-C-N-
1160 – 1100	C=S
1200 – 1000	COH
1120 – 1030	C-NH ₂
1095 – 1015	Si-O-Si, Si-O-C
1000 – 970	CH=CH ₂
980 – 690	C=C-H
870 – 670	Aromatic ring
860 – 760	R-NH ₂ (broad)
835 – 800	CH=C (out-of-plane)
760 – 510	CCl
730 – 675	CH=CH (cis isomer)
700 – 550	CBr

ภาคผนวก ข

การกระจายความเร็วแบบแมกเวลล์

ทฤษฎีจำลองของของเหลวของพลาสมาสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ได้หลายอย่าง โดยมักสมมุติว่าพลาสมามีการกระจายความเร็วแบบแมกเวลล์

การแจกแจงอัตราเร็วของโมเลกุลก๊าซ

ในปี ค.ศ. 1852 นักฟิสิกส์ชาวสก็อต เจมส์ คราก แมกเวลล์ เสนอการแจกแจงอัตราเร็วของก๊าซในอุดมคติ ซึ่งเรียกกันว่า การแจกแจงอัตราเร็วแบบแมกเวลล์ (Maxwell speed distribution) แมกเวลล์แสดงให้เห็นว่า ความน่าจะเป็นที่จะพบโมเลกุลที่มีอัตราเร็ว v นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซ

โดยความน่าจะเป็นที่จะพบโมเลกุลที่มีอัตราเร็ว v (Probability distribution function) สามารถเขียนได้เป็น

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left\{ -\frac{Mv^2}{2RT} \right\} \quad (1)$$

มีหน่วยเป็น (ความเร็ว)⁻¹ หรือ s/m

โดย M คือ มวลต่อหนึ่งโมลของก๊าซ

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

T คือ อุณหภูมิของก๊าซ

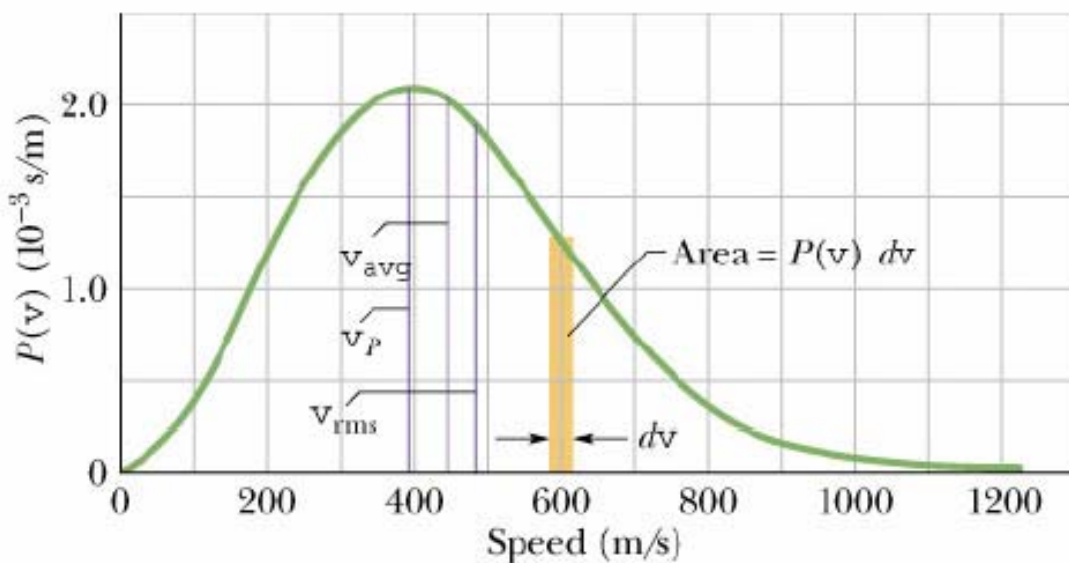
หรือเขียนให้อยู่ในรูป

$$P(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left\{ -\frac{mv^2}{2kT} \right\} \quad (2)$$

โดย m คือ มวลของโมเลกุลก๊าซ

k คือ ค่าคงที่ มีค่า 1.38×10^{-23}

T คือ อุณหภูมิของก๊าซ



ภาพประกอบที่ 67 แสดงกราฟการแจกแจงอัตราเร็วของก๊าซแบบแมกเวลล์

สำหรับความเร็ว v ใดๆ ปริมาณ $P(v)dv$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเจอโมเลกุลที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v ถึง $v + dv$ จากรูป $P(v)dv$ เป็นพื้นที่ของแท่งสี่เหลี่ยม ซึ่งมีความสูง $P(v)$ และกว้าง dv พื้นที่ใต้กราฟแสดงสัดส่วนของโมเลกุลที่มีความเร็วอยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞ เนื่องจากทุกๆ โมเลกุลของก๊าซจะมีความเร็วอยู่ในช่วงนี้ เราจึงได้ว่า พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือ ผลรวมของความน่าจะเป็น เท่ากับ 1

$$\int_0^{\infty} P(v)dv = 1 \quad (3)$$

ทดสอบว่า Maxwell distribution สอดคล้องกับคุณสมบัตินี้ โดยการอินทิเกรต

$$\int_0^{\infty} P(v) dv = \int_0^{\infty} \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left\{ -\frac{mv^2}{2kT} \right\} dv = 1$$

Gauss's Probability Integral and Other Definite Integrals

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$$

$$I_0 = \int_0^{\infty} e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (\text{Gauss's probability integral})$$

$$I_1 = \int_0^{\infty} xe^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a}$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} x^2 e^{-ax^2} dx = -\frac{dI_0}{da} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a^3}}$$

$$I_3 = \int_0^{\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = -\frac{dI_1}{da} = \frac{1}{2a^2}$$

$$I_4 = \int_0^{\infty} x^4 e^{-ax^2} dx = \frac{d^2 I_0}{da^2} = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\pi}{a^5}}$$

$$I_5 = \int_0^{\infty} x^5 e^{-ax^2} dx = \frac{d^2 I_1}{da^2} = \frac{1}{a^3}$$

⋮

$$I_{2n} = (-1)^n \frac{d^n}{da^n} I_0$$

$$I_{2n+1} = (-1)^n \frac{d^n}{da^n} I_1$$

ภาพประกอบที่ 68 แสดงตารางการอินทิเกรตของเกาส์

จากตารางพบว่า

$$\int_0^{\infty} x^2 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a^3}}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} P(v) dv &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} v^2 \exp\left\{-\frac{mv^2}{2kT}\right\} dv \\ &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\left(\frac{mv^2}{2kT}\right)^3}} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

ก. อัตราเร็วเฉลี่ย (v_{avg})

อัตราเร็วเฉลี่ยของก๊าซสามารถหาได้จาก

$$v_{avg} = \int_0^{\infty} vP(v) dv \quad (5)$$

แทนค่า $P(v)$ ของการแจกแจงอัตราเร็วแบบแมกเวลล์ จะได้

$$\begin{aligned} v_{avg} &= \int_0^{\infty} vP(v) dv \\ &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} v^3 \exp\left\{-\frac{mv^2}{2kT}\right\} dv \end{aligned} \quad (6)$$

และจากตาราง

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a^2}$$

เราจะได้

$$v_{avg} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (7)$$

ข. ค่าเฉลี่ยอัตราเร็วกำลังสอง (v_{rms})

ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วกำลังสอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} (v_{rms})^2 &= \langle v^2 \rangle \\ &= \int_0^{\infty} v^2 P(v) dv \end{aligned} \quad (8)$$

แทนค่า $P(v)$ ของการแจกแจงอัตราเร็วแบบแมกเวลล์ จะได้

$$\begin{aligned} \langle v^2 \rangle &= \int_0^{\infty} v^2 P(v) dv \\ &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} v^4 \exp\left\{-\frac{mv^2}{2kT}\right\} dv \end{aligned} \quad (9)$$

และจากตาราง

$$\int_0^{\infty} x^4 e^{-ax^2} dx = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\pi}{a^3}}$$

เราจะได้

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m} \quad (10)$$

นั่นคือ

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (11)$$

ค. อัตราเร็วที่เป็นไปได้มากที่สุด v_m

อัตราเร็วที่เป็นไปได้มากที่สุดสามารถคำนวณได้จาก

$$v = v_m, \quad \left. \frac{dP}{dv} \right|_{v=v_m} = 0$$

$$\left. \frac{dP}{dv} \right|_{v=v_m} = v_m^2 \exp\left(-\frac{mv_m^2}{2kT}\right) \left(-\frac{mv_m}{kT}\right) + 2v_m \exp\left(-\frac{mv_m^2}{2kT}\right) = 0 \quad (12)$$

นั่นคือ

$$\frac{mv_m^2}{kT} = 2$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (13)$$

จากความเร็วทั้ง 3 ชนิด

สรุปได้ว่า

$$v_m < v_{avg} < v_{rms} = 1 : 1.128 : 1.224$$

แบบจำลองของของไหลสำหรับดิสชาร์จในก๊าซ อธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยมีมีการพิจารณาเฉพาะของอิเล็กตรอน เพื่อลดความยุ่งยากของการแก้สมการ แบบจำลองของของไหลจะอธิบายพลาสมาอยู่บนพื้นฐานของสมการโบชต์มาน

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f - \frac{e}{m} \vec{E} \cdot \nabla_{\vec{v}} f = C[f] \quad (14)$$

เมื่อ $f(r, v, t)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน
 \vec{v} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน
 e คือ ประจุของอิเล็กตรอน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า
 $\nabla_{\vec{v}}$ คือ เกรเดียนต์ของความเร็ว
 $C[f]$ คือ เทอมอินทิกรัลของการชน

โดยทั่วไปแบบจำลองของของไหลจะประกอบด้วยโมเมนต์ของสมการโบชต์มาน ได้แก่ โมเมนต์ลำดับที่ศูนย์ของสมการโบชต์มาน เป็นสมการความต่อเนื่องของความหนาแน่นอนุภาค หรือสมการอนุรักษ์มวล, โมเมนต์ลำดับที่หนึ่งของสมการโบชต์มาน เป็นสมการอนุรักษ์โมเมนตัม และ โมเมนต์ลำดับที่สองของสมการโบชต์มาน เป็นสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งแต่ละสมการจะมีสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ และสัมประสิทธิ์อัตรา สัมประสิทธิ์ของอิเล็กตรอนเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน (Electron energy distribution function ; EEDF) และค่าข้อมูลภาคตัดขวางการชน โดยค่า EEDF ได้จากการแก้สมการโบชต์มาน

ในการแก้สมการโบชต์มานมี 2 ทาง คือ การขยายทรงกลมฮาร์มอนิก (spherical harmonic expansion) หรือ two-term approximation และการขยายฟูรีเยร์ (Fourier expansion) ร่วมกับค่าข้อมูลภาคตัดขวางการชน และค่า reduced electric field (E/p) ในที่นี้ใช้การประมาณ two-term approximation ดังนั้นสมการ (14) และเปลี่ยนจากในเทอมของความเร็วเป็นเทอมของพลังงาน จะได้

$$\sqrt{\varepsilon} \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial J_{\varepsilon}}{\partial \varepsilon} + N[Q_{el}(f) + Q_{in}(f)] \quad (15)$$

เมื่อ J_{ε} คือ ฟลักซ์ในพิกัดพลังงาน

$$J_\varepsilon = -\frac{1}{3} \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{eE}{N} \right)^2 \frac{\varepsilon}{\sum_k y_k \sigma_{mk}(\varepsilon)} N \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) \quad (16)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นของก๊าซ
 $Q_{el}(f)$ คือ เทอมอินทิกรัลการชนแบบยืดหยุ่น
 $Q_{in}(f)$ คือ เทอมอินทิกรัลการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

โดย

$$Q_{el}(f) = \sqrt{8m} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\left(\frac{\sum_k y_k \sigma_{mk}(\varepsilon)}{M_k} \right) \varepsilon^2 \left(f + kT_g \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) \right] \quad (17)$$

$$Q_{in}(f) = \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \sum_k y_k \sum_j [(\varepsilon + I_{jk}) \sigma_{jk}(\varepsilon + I_{jk}) \times f(\varepsilon + I_{jk}, t) - \varepsilon \sigma_{jk}(\varepsilon) f(\varepsilon, t)] + Q_{att}(f) + Q_{rot}(f) \quad (18)$$

เมื่อ $Q_{att}(f)$ คือ เทอมอินทิกรัลการชนการจับอิเล็กตรอน
 $Q_{rot}(f)$ คือ เทอมอินทิกรัลการชนการกระตุ้นการหมุน
 \sum_k ใช้สำหรับอนุภาคหนักทั้งหมด
 \sum_j ใช้สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นทั้งหมด

y_k คือ เศษส่วนโมลของอนุภาคที่ k

M_k คือ มวลของอนุภาคที่ k

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

T_g คือ อุณหภูมิของก๊าซ

σ_{mk} คือ ภาคตัดขวางการถ่ายเทโมเมนตัม

σ_{jk} คือ ภาคตัดขวางการชนแบบไม่ยืดหยุ่น j ระหว่างอิเล็กตรอน

และอนุภาคที่ k

I_{jk} คือ พลังงานเริ่มต้นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น j ระหว่างอิเล็กตรอน

และอนุภาคที่ k

เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับสมการที่ (15) คือ

$$J_\varepsilon = N \sum_k y_k \langle \sigma_{i,k}(\varepsilon) v \rangle \quad \text{ที่ } \varepsilon = 0, \forall t \quad (19)$$

$$f \rightarrow 0 \quad \text{เมื่อ } \varepsilon \rightarrow \infty, \forall t \quad (20)$$

เมื่อ J_ε คือ ฟลักซ์ นิยามตามสมการที่ (16)

$\langle \sigma_{jk}(\varepsilon) v \rangle$ คือ สัมประสิทธิ์อัตราการแตกตัวเป็นไอออนเฉลี่ยของอนุภาค k

ฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อเริ่มต้นให้เป็นแบบแมกเวลล์ด้วย อุณหภูมิ T_e

$$f(\varepsilon) = (2/\sqrt{\pi}) \exp(-\varepsilon/kT_e) / (kT_e)^{3/2} \quad \text{ที่ } t = 0 \quad (21)$$

เมื่อ พลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ย $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT_e$

การกระจายของฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นแบบปกติ

$$\int_0^\infty \sqrt{\varepsilon} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1 \quad (22)$$

สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่, สัมประสิทธิ์อัตรา ที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่

ก) พลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ย (electron mean energy)

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^\infty f_0(\varepsilon) \varepsilon^{3/2} d\varepsilon \quad \text{หน่วย } eV \quad (23)$$

ข) สัมประสิทธิ์อัตรา (rate coefficient)

$$k_i = \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \int_0^\infty \sigma_j(\varepsilon) f(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon \quad \text{หน่วย } cm^3/s \quad (24)$$

ค) ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (electron drift velocity)

$$v_d = -\frac{1}{3} \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{eE}{N} \right) \int_0^\infty \frac{\varepsilon}{\sum_k y_k \sigma_{mk}(\varepsilon)} \frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} d\varepsilon \quad \text{หน่วย } cm/s \quad (25)$$

ง) สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient)

$$D_e = \frac{1}{3N} \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \int_0^\infty \frac{f(\varepsilon)}{\sum_k y_k \sigma_{mk}(\varepsilon)} d\varepsilon \quad \text{หน่วย } cm^2/s \quad (26)$$

เมื่อ μ_e คือ โมบิลิตีของอิเล็กตรอน, ε_k คือ พลังงานเฉพาะ (characteristic energy), $v_{m,eff}$ คือ ความถี่การเปลี่ยนโมเมนตัมลัพท์ และ v_u คือ ความถี่ของพลังงานที่ปล่อยออกมา จะได้ว่า

$$\mu_e = \frac{v_d}{E} \quad (27)$$

$$\varepsilon_k = \frac{D_e}{\mu_e} \quad (28)$$

$$\frac{v_{m,eff}}{N} = \left(\frac{1}{mv_d} \right) \left(\frac{eE}{N} \right) \quad (29)$$

$$\frac{v_u}{N} = v_d \left(\frac{eE}{N} \right) / (\varepsilon_k - kT_g) \quad (30)$$

โดยความหนาแน่นของก๊าซ $N = 3 \times 10^{16} cm^{-3}$ ที่ 300 เคลวิน

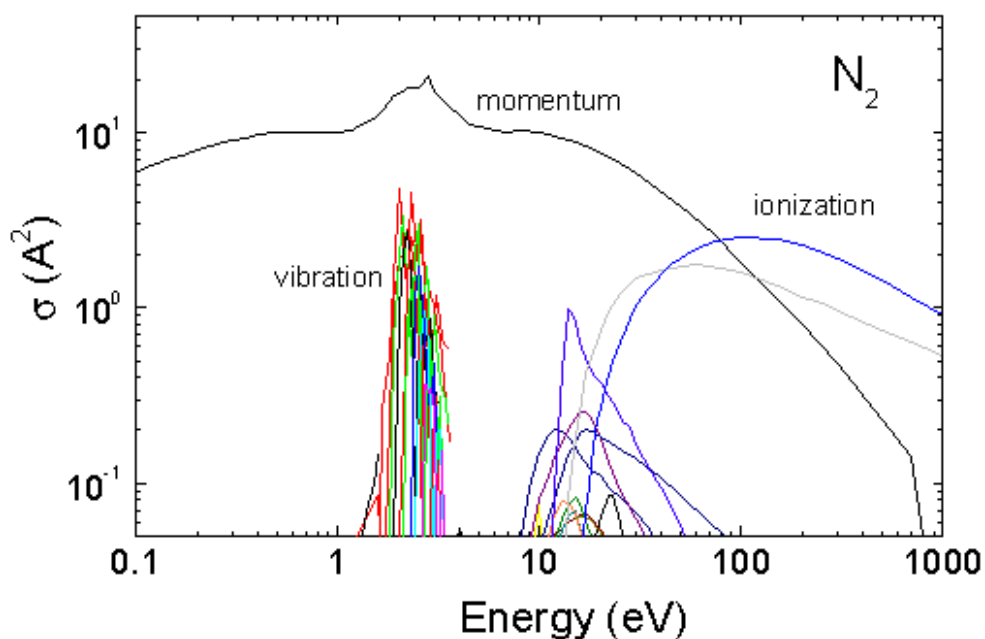
ภาคผนวก ข

ฐานข้อมูลของโปรแกรม BOLSIG

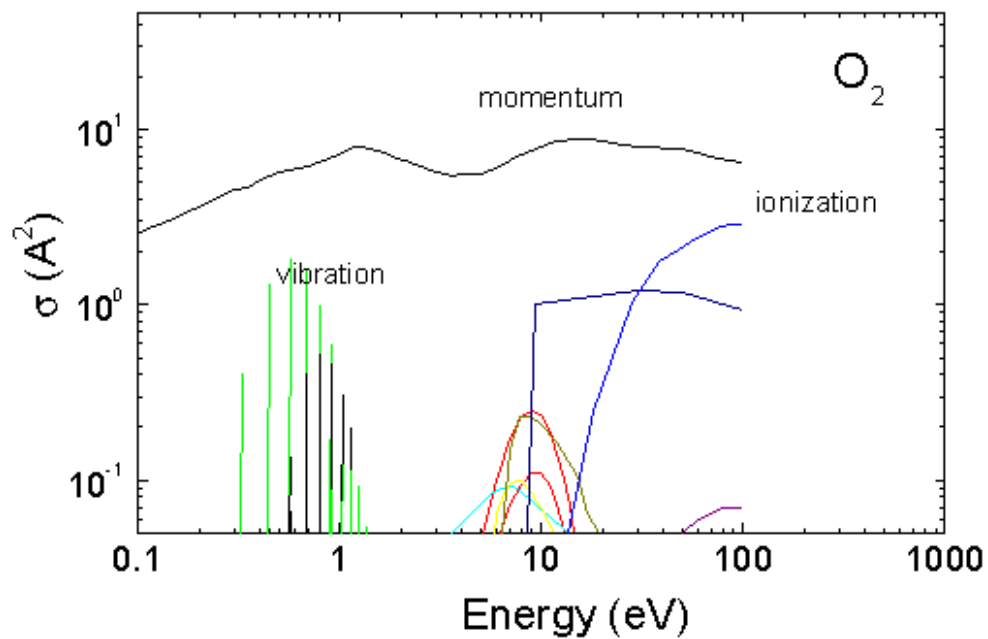
ชุดของฐานข้อมูลที่ใช้ในการทำงานของโปรแกรม BOLSIG มี 2 ข้อมูลหลัก คือ ข้อมูลภาคตัดขวางการชนของอิเล็กตรอน และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของก๊าซ 15 ชนิด ได้แก่ N_2 , O_2 , H_2 , Cl_2 , F_2 , HCl , CF_4 , SiH_4 , CO_2 , SF_6 , He , Ne , Ar , Kr , Xe

ภาคตัดขวางการชนของอิเล็กตรอน (Electron-molecule cross-sections)

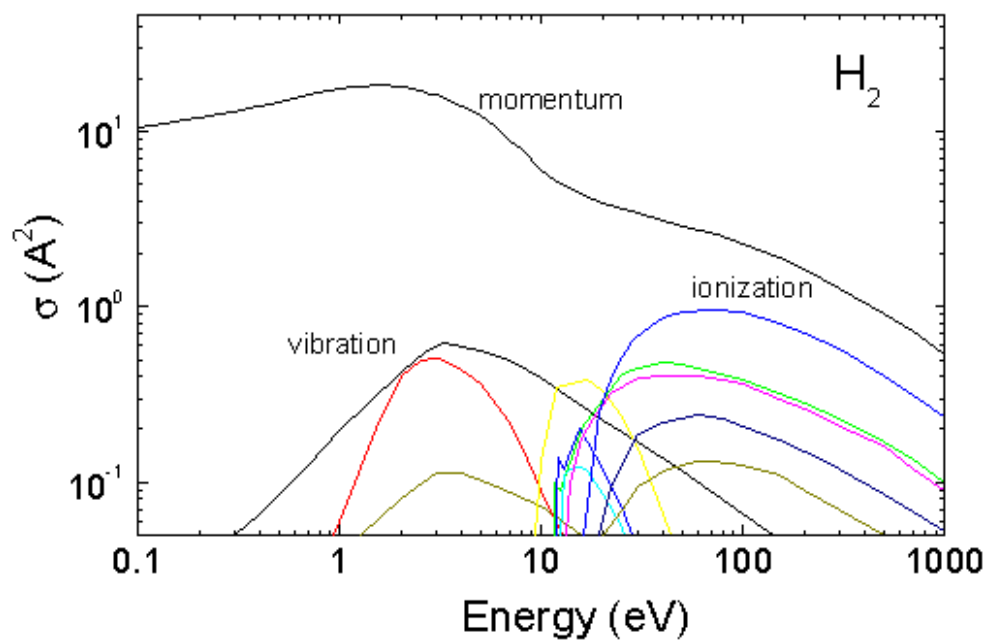
จะแสดงกราฟของข้อมูลภาคตัดขวางการชนของโมเลกุลอิเล็กตรอนในก๊าซแต่ละชนิดที่สอดคล้องกับข้อมูลในไฟล์ siglo.sec ที่ใช้สำหรับโปรแกรม BOLSIG



ภาพประกอบที่ 6 แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ N_2



ภาพประกอบที่ 70 แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ O_2



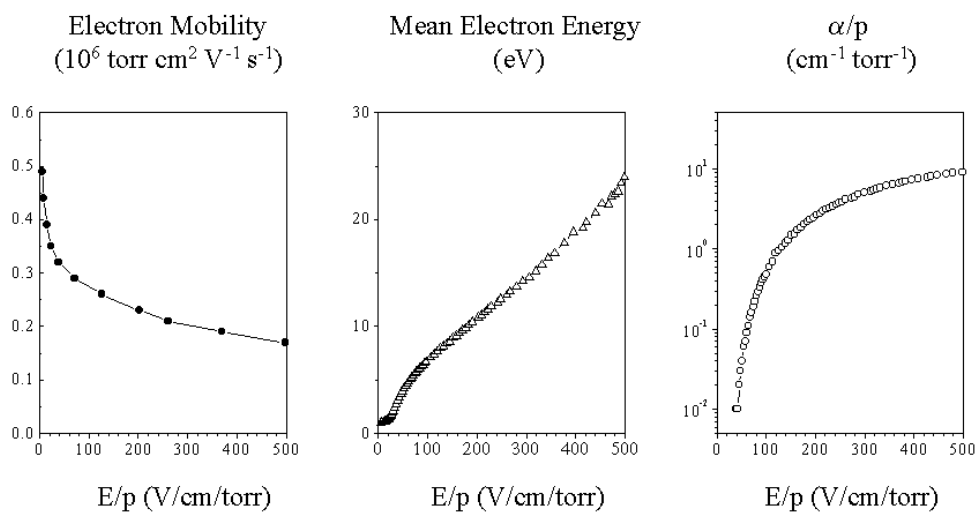
ภาพประกอบที่ 71 แสดงภาคตัดขวางการชนของก๊าซ H_2

สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron Transport Coefficients)

แสดงกราฟของโมบิลิตีของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, และสัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน และสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนกับค่า E/p (ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน)

สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ทั้งหมดได้จากการคำนวณโดยแก้สมการโบชต์มาน โดยใช้ชุดของข้อมูลภาคตัดขวางการชนของอิเล็กตรอน แสดงรายละเอียดในไฟล์ siglo.sec ที่ใช้สำหรับโปรแกรม BOLSIG ลักษณะของไฟล์สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน gaspar.dat และไฟล์ภาคตัดขวางอธิบายในไฟล์ annex.pdf

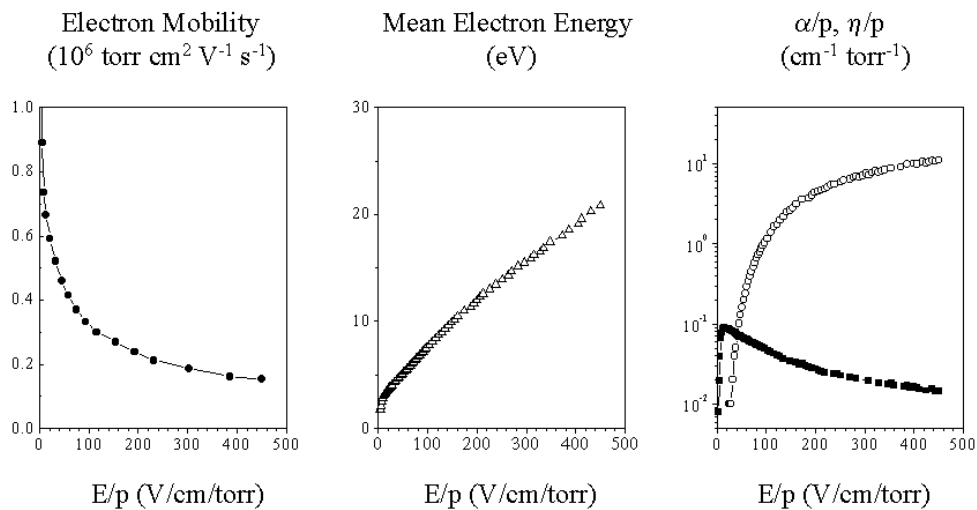
N₂



ภาพประกอบที่ 72 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ N₂

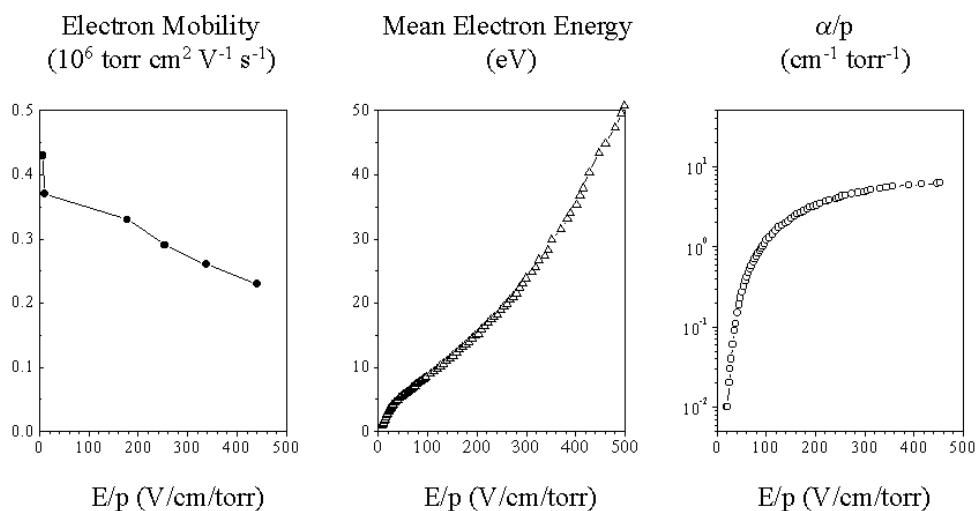
O₂

The attachment rate was calculated for a gas pressure of 1 Torr



ภาพประกอบที่ 73 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ O₂

H₂



ภาพประกอบที่ 74 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของก๊าซ H₂

ภาคตัดขวางการจัดกระจายของอิเล็กตรอนและโมบิลิตี้ของไอออน

อ้างอิงของค่าภาคตัดขวางที่ใช้ในวิธี Monte Carlo simulation สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์อัตรา และอ้างอิงของการเคลื่อนที่ของไอออน, ข้อมูลการรวมตัว (recombination) และการ detachment นอกจากนี้อัตราการรวมกันของอิเล็กตรอนกับไอออน และอัตราการรวมกันของไอออนกับไอออน และความถี่การ detachment จะให้เป็นศูนย์

ไนโตรเจน

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Phelps (1985) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็นฟังก์ชันของค่า E/p นั้นคือของ N_2^+ ใน N_2 , โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

ออกซิเจน

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน และสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Phelps (1985) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็นฟังก์ชันของค่า E/p นั้นคือของ O_2^+ ใน O_2 , โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกนั้นคือ O^- ใน O_2 ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976) อัตราการรวมกันระหว่างไอออนกับไอออนเป็น $10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ของ Raizer (1991)

ไฮโดรเจน

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Buckman และ Phelps (1985) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็นฟังก์ชันของค่า E/p นั้นคือของ H_3^+ ใน H_2 , โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976) ไม่รวมของไอออนลบ

คลอรีน

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Rogoff, Kramer และ Piejak (1986) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ ที่ได้จาก Park และ Economou (1991) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออนใช้ค่าที่ได้จาก Park และ Economou (1991)

ฟลูออรีน

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน สัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Morgan (1992) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ ที่ได้จาก Park และ Economou (1991) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออนใช้ค่าที่ได้เหมือนกับของคลอรีน

ไฮโดรคลอริก (HCl)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Morgan (1992) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ ที่ได้จาก Davies (1982) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออนประมาณเป็น $2 \times 10^7 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

CF₄

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน สัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Nakamura (1991) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ ที่ได้จาก Kono (1991) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออน และความถี่ของการ detachment ใช้ค่าที่ได้จาก Gogolides (1994)

SiH₄

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Kurachi และ Nakamura (1989) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ ที่ได้จาก Chatham และ Gallagher (1985) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออนประมาณเป็น $5 \times 10^7 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

CH₄

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน สัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Davies (1989) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ และค่าคงที่ และความถี่ของการ detachment ใช้ค่าที่ได้จาก Davies (1989)

SF₆

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน สัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Phelps และ Van Brunt (1988) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวก Brand และ Jungblunt (1983) การรวมตัวกันของไอออนกับไอออน ใช้ค่าที่ได้จาก Church และ Smith (1977)

ฮีเลียม (He)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Boeuf (1987) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็นฟังก์ชันของค่า E/p ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

นีออน (Ne)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Meunier และคณะ (1995) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็นฟังก์ชันของค่า E/p ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

อาร์กอน (Ar)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน
คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Fiala และคณะ (1994) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็น
ฟังก์ชันของค่า E/p ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

คริปทอน (Kr)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน
คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Date และคณะ (1989) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็น
ฟังก์ชันของค่า E/p ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

ซีนอน (Xe)

โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน, พลังงานเฉลี่ย, สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออน
คำนวณโดยใช้ค่าภาคตัดขวางของ Meunier และคณะ (1995) โมบิลิตี้ของไอออนประจุบวกเป็น
ฟังก์ชันของค่า E/p ใช้ค่าที่ได้จาก Ellis และคณะ (1976)

ภาคผนวก ฅ

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นถ่านที่ขายตามท้องตลาดที่หาซื้อได้ไม่ยาก เนื่องจากมีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในระบบกรองน้ำ เพื่อกำจัด สี กลิ่น เป็นต้น ดังนั้น จึงได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการวิจัยนี้ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่ย่อมเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบำบัดกับวิธีอื่น ๆ ต่อไป โดยถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย

Physical Properties	Specification
1. Particle size distribution :	
+8(2.36 mm) (ASTM MESH/MM.)	MAX 5%
8x16 (2.36 – 1.18 mm)	MIN 90%
– 16(1.18 mm)	MAX 5%
2. Apparent Density (g/cc.)	MIN 0.48
3. Moisture (%w/w)	MAX 8
4. ASH (%w/w)	MAX 3.5
5. pH	9-11
6. Surfaced area (m/g) (BET)	MIN 1100
7. Iodine number (mg/g) (AWWA B604)	MIN 1050
8. Carbon Tetrachloride Adsorption (%w/w) (ASTM 3467-88)	MIN 50
9. Hardness Number (%) (ASTM 3802-79)	MIN 98
10. Methylene Blue (cc/g) (JISK 1407-67)	MIN 170

ถ่านกัมมันต์ Granular Activated Coconut Shell Based Carbon ยี่ห้อ
MAZUMA ผลิตในประเทศไทย ผ่านกระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน : ASTM, Unless other
wise stated

สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

ใช้เพื่อแสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กซึ่งขึ้นกับกลไกการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวก็มีข้อจำกัด คือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียวในลักษณะที่ปกคลุมผิวของสารดูดซับหรือถ่านกัมมันต์พอดี

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลาระตุ้นเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวจะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

2. เถ้า (ash content)

หมายถึง การหาปริมาณสารอนินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูงและปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เถ้าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากมีเถ้าอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูงควรนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำ หรือสารละลายกรดซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น

3. ความเป็นกรด ต่าง (pH)

ความเป็นกรด ต่างของถ่านกัมมันต์จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรด ต่างของผลิตภัณฑ์เป็นอันมาก ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือต่างลงได้ โดยการเติมสารที่มีความเป็นกรด ต่าง ตรงกันข้าม เพื่อปรับให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นกรด ต่างตามต้องการ

4. ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density)

หมายถึงการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้หมายถึงปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาคและปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3 – 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น

5. การดูดซับเมธิลีนบลู

เป็นการทดสอบการดูดซับออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจากสารเมธิลีนบลู ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ประเภทต่าง และมีประจุบวก เชื่อว่ารูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม จะเป็นบริเวณที่ใช้ในการดูดซับโมเลกุลของเมธิลีนบลูได้ดีที่สุด

6. การดูดซับไอโอดีน

เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารถูกดูดซับ เนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกักกรองสูง โดยเฉพาะ

เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซ เชื่อว่ารูปพุนที่ใช้ในการดูดซับไอโอดีนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอม โดยทั่วไปมีค่าไม่น้อยกว่า 600 mg/g

7. การดูดซับฟีนอล

เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดกลิ่นในน้ำใช้ ปริมาณคาร์บอนที่ต้องใช้ในการลดความเข้มข้นในน้ำให้เหลือ 0.1 - 0.001 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เรียกว่า phenol number

8. ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขจัดสี

ตลอดการปฏิบัติการของกระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์จะถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการขัดสีกันเองระหว่างอนุภาคถ่านและอนุภาคอื่น ๆ ซึ่งปนมากับกระแสของของไหล ผลคือการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วนและหลุดออกมากับกระแสไหลของของไหล ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการขจัดสีต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้ สำหรับถ่านกัมมันต์แบบเม็ด

ส่วนความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์นั้นจะวัด และเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เริ่มใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ ถ่านกัมมันต์บางส่วนจะมีการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลงซึ่งจะนำมาคำนวณเปรียบเทียบออกมาเป็นความแข็งแรงอีกชั้นตอนหนึ่ง

ภาคผนวก ญ

การเผยแพร่ผลงานจากวิทยานิพนธ์

จากการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในวารสาร 2 ฉบับ คือ

1. ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล □ สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล และพิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล. 2549.
“ลักษณะเฉพาะของการดิสชาร์จไฟฟ้าของระบบพลาสติกไอโซไนเซอร์และการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมสีอะครีลิก”. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2549. หน้า 27-43.
2. ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล □ พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล และสุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล. 2550.
“ดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสติกไอโซไนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน”. วารสารสงขลานครินทร์ วทท. ปีที่ 29 พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2. หน้า 365-378.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 4722042
 วุฒิการศึกษา
 วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
 วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2545
 (ฟิลิปปินส์)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- ยุทธนา ภูริระวณิชชกุล, สุภวรรณ ภูริระวณิชชกุล และพิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล 2549
 “ลักษณะเฉพาะของการดิสชาร์จไฟฟ้าของระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์และการ
 ประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมเสื่อกระจูด” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 9
 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2549 หน้า 27-43
- ยุทธนา ภูริระวณิชชกุล, พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล และสุภวรรณ ภูริระวณิชชกุล 2550
 “ดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนในเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน”
 วารสารสงขลานครินทร์ วทท ปีที่ 29 พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2
 หน้า 365-378
- Pitchasak Chankuson, Supawan Tirawanichakul and Yutthana Tirawanichakul 2005
 “Integrated Dielectric Barrier Discharge, Coagulation and RO-System for
 Dye Wastewater Treatment”, Regional Symposium on Chemical Engineering
 2005, 30th November – 2nd December 2005, Hanoi Horison Hotel, Hanoi,
 VIETNAM, Proceedings pp 168-172
- ยุทธนา ภูริระวณิชชกุล, พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล และสุภวรรณ ภูริระวณิชชกุล 2549
 “การศึกษาดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนในเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน”
 การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 4 ณ ศูนย์ปาลูกตาประดิษฐ์
 เชยจิตร (ตึกฟักทอง) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
 วันที่ 31 มีนาคม 2549 บทความย่อหน้า 68-69