

กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซน
หลักการโคโรนาดีสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อก่อโรคในซากไก่
สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

OPTIMAL PROCESS FOR REDUCING PATHOGENS IN CHICKEN
CARCASSES USING AN OZONE GENERATOR FOR INDUSTRIES

การุณย์ สุนทรโร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอโซน
หลักการโคโรนาดีสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อก่อโรคในซากไก่
สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

การุณย์ สุนทรโร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอโซน
หลักการโคโรนาดีสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อก่อโรคในซากไก่
สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนา
ดิสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่
เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

Optimal Process for Reducing Pathogens in Chicken Carcasses
Using an Industrial Ozone Generator

ชื่อ - นามสกุล

นายการุณย์ สุนทโร

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.

ปีการศึกษา

2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนทล นาวงษ์, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย, วศ.ด.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)

วันที่ 14 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนา ดิสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อก่อโรคในซากไก่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม
ชื่อ - นามสกุล	นายการุณย์ สุนทโร
วิชาเอก	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการที่เหมาะสมในการลดเชื้อซัลโมเนลลาในซากไก่โดยใช้เครื่องกำเนิดโอโซนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้หลักการโคโรนาดิสชาร์จด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบวงจรแปลงผันแรงดันสูงความถี่สูงชนิดฟลายแบ็คสำหรับเพิ่มระดับแรงดัน โดยการออกแบบวงจรแปลงผันชนิดฟลายแบ็คผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแส และวงจรกรองทางด้านเอาต์พุต เพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรงเอาต์พุตที่นำมาใช้งานกับอิเล็กโตรดแบบไม่สม่ำเสมอ สำหรับชุดอิเล็กโตรดใช้วัสดุที่ทำจากสแตนเลสชนิดแบบขดลวด กราฟต์อิเล็กโตรดทำจากสแตนเลสทรงกระบอก เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซโอโซนได้ดี

จากนั้นนำเครื่องกำเนิดโอโซนไปใช้ในกระบวนการทำความสะอาดซากไก่เบื้องต้นที่กรณีศึกษาโรงงานแห่งหนึ่งในประเทศไทย โดยกำหนดตัวแปรที่ต้องการในการทดลอง 1 ตัวแปร คือ การไม่พบเชื้อซัลโมเนลลา จากการใส่เชื้อก่อโรค 10,000 cfu/g วัดการวัดปริมาณความเข้มข้นจากเครื่องกำเนิดโอโซนที่ 400 ppm โดยปรับที่ค่าแรงดันที่ 15 kV ความถี่ 40 kHz ภายในเวลา 20 นาที ควบคุมปริมาณน้ำล้นถึง 300 ลิตรต่อนาที น้ำหนักซากไก่ขนาด 2,250 กรัม และควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 1.9°C นำไปตามวัดผลปริมาณเชื้อซัลโมเนลลาล้างผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น และเก็บตัวอย่างส่งตรวจ 5 ตัวอย่างตัวฟาร์ม สุ่มจำนวน 100 ฟาร์ม รวม 500 ตัวอย่าง

ผลที่ได้พบว่าค่าแรงดันที่ 15 kV ความถี่ 40 kHz ค่าความต้านทานที่ฉนวนอากาศเท่ากับ 0.76 k Ω ค่าความต้านทานที่ฉนวนแก้วเท่ากับ 1.90 k Ω ค่าประจุฉนวนอากาศ เท่ากับ 23.23 μ F ค่าประจุฉนวนแก้ว เท่ากับ 68.35 μ F ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนสูงสุด เท่ากับ 37.17 kV/cm ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดในช่องว่างอากาศ เท่ากับ 21.92 kV จ่ายลมออกซิเจนที่ 3 ลิตรต่อนาที จะทำให้เกิดก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นที่ 400 ppm สามารถลดเชื้อซัลโมเนลลาที่ปริมาณ 10,000 cfu/g ได้ และตรวจสอบผลทางห้องปฏิบัติการไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อซัลโมเนลลาจากการส่งตัวอย่างซากไก่ทุกตัวอย่างที่ส่งตรวจ

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดโอโซน โคโรนาดิสชาร์จ การลดเชื้อก่อโรค

Thesis Title	Optimal Process for Reducing Pathogens in Chicken Carcasses Using an Ozone Generator for Industries
Name – Surname	Mr. Karoon Suntharo
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Nathabhat Phankong, Ph.D.
Academic Year	2024

ABSTRACT

This research presents an effective process for reducing *Salmonella.spp* in chicken carcasses using ozone generator for Industries. It operated on the principle of corona discharge, powered by a high-frequency, high-voltage flyback power converter for increasing the voltage level. The flyback converter circuit was designed with a high-frequency flyback transformer, a rectifier circuit, and an output filter to generate direct current for use with an irregular electrode. The electrode was made of brushed stainless steel, while the ground electrode was constructed from cylindrical stainless steel, effectively preventing chemical reactions with ozone gas.

The ozone generator was then applied during the chicken carcass cleaning process at an industrial plant in Thailand, used as a case study. The experiment focused on a specific variable: the absence of *Salmonella.spp*. Chicken carcasses, inoculated with 10,000 cfu/g of *Salmonella.spp*, were treated using the ozone generator at a concentration of 400 ppm, with a voltage of 15 kV and a frequency of 40 kHz for 20 min. The process was carried out while controlling the water flow rate at 300 L/min, maintaining the chicken carcasses at a weight of 2,250 g, and keeping the water temperature at 1.9°C. Following the cleaning process, the *Salmonella.spp* levels were measured by increasing the concentration level, with 5 samples collected for testing from 100 randomly selected farms.

The results showed that the voltage was 15 kV, with a frequency of 40 kHz. The resistance at the air insulator was 0.76 k Ω , while the resistance at the glass insulator was 1.90 k Ω . The air insulator capacitance was measured at 23.23 μ F, and the charge of the glass insulator was 68.35 μ F. The maximum electric field stress in the insulator was found to be 37.17 kV/cm, and the voltage in the air gap was 21.92 kV. Oxygen was supplied at a rate of 3 L/min, producing ozone gas with a concentration of 400 ppm at the output of the ozone generator. This treatment successfully reduced *Salmonella.spp* at an initial concentration of 10,000 cfu /g. Laboratory results confirmed that no *Salmonella.spp* contamination was present in any of the chicken carcass samples.

Keywords: ozone generator, corona discharge, reducing pathogens

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่ง จากรองศาสตราจารย์ อนุรักษ์ พันธ์คง, Ph.D. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล รวมถึงคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ได้กรุณา ให้คำชี้แนะต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งการช่วยเหลือต่างๆ อย่างดียิ่งจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้เอื้อเพื่ออุปกรณ์เครื่องมือในการทดลอง เครื่องมือในการวัดค่าดิซซาร์จ และห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้อง ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือส่งเสริมในด้านต่างๆ เป็นอย่างดียิ่งเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปอย่าง ด้วยดีตามเป้าหมาย

การุณย์ สุนทโร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญรูป.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.4 สมมติฐานของวิทยานิพนธ์.....	14
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	15
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 บริบทศรัทธาธรรม.....	16
2.2 เชื้อชาติและชนชั้นที่ปนเปื้อนในชาวกั๊ก.....	19
2.3 การลดอุณหภูมิชาวกั๊กเบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.....	20
2.4 หลักการทำให้เกิดไอโซน.....	21
2.5 หลักการโคโรนาดีสชาร์จ.....	22
2.6 สนามไฟฟ้า.....	24
2.7 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	30
2.8 ดีสชาร์จบางส่วน.....	39
2.9 การผสมไอโซนกับน้ำ.....	45
2.10 การล้างทำความสะอาดด้วยไอโซน.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	47
3.1 แผนการดำเนินการและขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	47
3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแบบพัลส์วิดโมดูลเลชั่น....	47
3.3 การออกแบบหลอดอิเล็กโทรดของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	55
3.4 การคำนวณสนามไฟฟ้า.....	61
3.5 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด.....	64
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม.....	66
3.7 การทดสอบหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอโซนเพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	70
4.1 บทนำ.....	70
4.2 ขั้นตอนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	70
4.3 วิธีการส่งผ่านก๊าซไอโซนให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่.....	72
4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการศึกษ.....	73
4.5 รูปแบบการทดสอบในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อทำการศึกษ.....	74
4.6 ผลการทดลอง.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	96
5.1 บทสรุป.....	96
5.2 กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับโรงงานในขั้นตอนลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น.....	96
5.3 เครื่องกำเนิดไอโซนที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทำการวิจัย.....	97
5.4 ค่าความเข้มข้นของไอโซนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย.....	98
5.5 ข้อเสนอแนะในการวิจัยถัดไป.....	98
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	107

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	แนวโน้มเชื้อซัลโมเนลล่าที่ตรวจพบการปนเปื้อนระหว่างปี 2019-2021.....
รูปที่ 2.2	ลักษณะการเกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....
รูปที่ 2.3	ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนโดย ปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ.....
รูปที่ 2.4	หลักการเกิดพลาสมา.....
รูปที่ 2.5	หลักการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ
รูปที่ 2.6	อิเล็กทรอนิกส์ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ.....
รูปที่ 2.7	อิเล็กทรอนิกส์ลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย.....
รูปที่ 2.8	อิเล็กทรอนิกส์ลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง.....
รูปที่ 2.9	การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ตามลักษณะทางไฟฟ้า
รูปที่ 2.10	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....
รูปที่ 2.11	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ.....
รูปที่ 2.12	ทรงกระบอกซ้อนกัน.....
รูปที่ 2.13	ทรงกระบอกซ้อนที่มีแก้วเป็นไดโอดอิเล็กทรอนิกส์.....
รูปที่ 2.14	รูปเสมือนของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน.....
รูปที่ 2.15	วงจรสมมูลของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้กำเนิดก๊าซโอโซนที่ความถี่ต่ำ.....
รูปที่ 2.16	แบบจำลองของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้กำเนิดก๊าซโอโซนที่ความถี่สูง วงจรเรกติไฟร์
รูปที่ 2.17	การแทนวงจรเรกติไฟร์และส่วนของ Discharge Voltage Source ค่า R_p
รูปที่ 2.18	รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน.....
รูปที่ 2.19	วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน.....
รูปที่ 2.20	แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD.....
รูปที่ 2.21	ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับช่องว่างอากาศเล็กๆ.....
รูปที่ 2.22	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัด PD.....
รูปที่ 2.23	การแสดงผลของ PD.....
รูปที่ 2.24	วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง.....
รูปที่ 3.1	วงจรทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบ็ค.....

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 วงจรพัลส์วิดโมดูลेशन (Pulse Width Modulation) ของ IC TL494.....	50
รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ในการออกแบบความถี่วงจรพัลส์วิดโมดูลेशन โดยใช้ IC TL494.....	51
รูปที่ 3.4 วงจร PWM ของ IC TL494 ที่ความถี่ปรับค่าได้ที่ 40 kHz.....	51
รูปที่ 3.5 คลื่นสัญญาณเอาต์พุต ของพัลส์วิดโมดูลेशन.....	52
รูปที่ 3.6 วงจรภาคขับเคลื่อนมอเตอร์กำลัง.....	54
รูปที่ 3.7 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุต 15 kV วงจรขับพาวเวอร์มอสเฟต.....	55
รูปที่ 3.8 อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน.....	56
รูปที่ 3.9 ชุดหลอดผลิตก๊าซไอโซนที่จะดำเนินการออกแบบ.....	56
รูปที่ 3.10 อิเล็กทรอนิกส์ภายในแบบขดลวดสแตนเลสชนิด 304L.....	57
รูปที่ 3.11 หลอดแก้วไดอิเล็กตริกแบบแก้วโบโรซิลิกเกต กลาส 3.3.....	57
รูปที่ 3.12 กราฟไดอิเล็กตริกแบบท่อสแตนเลสชนิด 304L (ศรีไทย สแตนเลส).....	58
รูปที่ 3.13 ฝาครอบอิเล็กทรอนิกส์ทำจากซูเปอร์อินคาสน์.....	58
รูปที่ 3.14 ท่อส่งก๊าซไอโซน EPDM.....	59
รูปที่ 3.15 ข้อต่อท่อส่งก๊าซไอโซน.....	59
รูปที่ 3.16 ยางโอริงกันรั่วซึม ทนความร้อนสูง ยาง VMO.....	60
รูปที่ 3.17 ระบบจ่ายลมออกซิเจนบริสุทธิ์และแห้ง.....	60
รูปที่ 3.18 ระบบระบายความร้อนวงจรเครื่องกำเนิดไอโซน.....	61
รูปที่ 3.19 อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน.....	61
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-15 kV.....	63
รูปที่ 3.21 กระบวนการกำเนิดก๊าซไอโซนที่มีอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน.....	64
รูปที่ 3.22 ถังลดอุณหภูมิจากไก่อัดดันสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดความจุ 32 ลูกบาศก์เมตร.....	66
รูปที่ 3.23 ระบบทำน้ำเย็นชนิด Ripple plate กำลังการผลิต 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	67
รูปที่ 3.24 น้ำสะอาดที่ใช้ในโรงงานหลังจากทำอุณหภูมิเย็นแล้ว.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.25 ระบบระบายอากาศในโรงงาน ควบคุมการหมุนเวียนอากาศ.....	68
รูปที่ 3.26 กระบวนการล้างซากไก่ในโรงงานอุตสาหกรรม.....	69
รูปที่ 4.1 รูปแสดงแผนภูมิการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา.....	71
รูปที่ 4.2 รูปแบบระบบการผลิตก๊าซโอโซนให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น.....	72
รูปที่ 4.3 รูปแบบการทดสอบในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อทำการศึกษา.....	74
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับระดับแรงดัน 9-22 kV ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 ลิตรต่อนาที ความถี่ 40 kHz.....	77
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับปริมาณเชื้อ Salmonella spp ที่พบในตัวอย่างซากไก่ที่ทดสอบ.....	81
รูปที่ 4.6 แสดงค่าน้ำหนักซากไก่ที่ใช้ในการทดสอบของโรงงานกรณีศึกษา.....	82
รูปที่ 4.7 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่ใช้ลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ทำการศึกษา.....	82
รูปที่ 4.8 แสดงมาตรวัดน้ำที่ใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำล้นถึงลดอุณหภูมิซากไก่.....	83
รูปที่ 4.9 แสดงการควบคุมความเร็วการหมุนใบพัดในถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นโดยอินเวอร์เตอร์.....	83
รูปที่ 4.10 แสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา.....	84
รูปที่ 4.11 แสดงค่าของระบบการถ่ายเทอากาศในห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ศึกษา.....	84
รูปที่ 4.12 แสดงค่าแรงดันที่วัดได้ที่ 15 kV ที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ.....	85
รูปที่ 4.13 แสดงค่าความถี่ที่วัดได้ที่ 40 kHz ที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ.....	85
รูปที่ 4.14 แสดงการไตเตรทเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในน้ำ.....	86
รูปที่ 4.15 การเจริญของเชื้อที่มีลักษณะเดียว และเป็น single colony หรือโคโลนีเดี่ยวบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Salmonella.spp.....	86
รูปที่ 4.16 แสดงอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่เชื้อ Salmonella.spp จำนวน 10,000 cfu/g.....	87
รูปที่ 4.17 การใส่เชื้อ Salmonella.spp ในตัวอย่างซากไก่เพื่อทำการศึกษา.....	87
รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างน้ำล้างซากไก่ หลังการผ่านกระบวนการครบถ้วนเพื่อส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการ.....	88

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แผนงานในการดำเนินการวิจัย.....	46
ตารางที่ 3.2 ลักษณะสมบัติของ ไอซีเบอร์ TL494.....	49
ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติการใช้งานของไอซี Octocoupler H11L1.....	54
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับระดับแรงดัน 9-22 kV ที่อัตราการไหลของอากาศเข้า 3 ลิตรต่อนาที ความถี่ 40 kHz.....	76
ตารางที่ 4.2 กระบวนการที่กำหนดเพื่อใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานการผลิตของโรงงาน.....	78
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษา เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 105 ppm.....	78
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษา เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 203 ppm.....	79
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษา เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 309 ppm.....	79
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษา เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 400 ppm.....	80
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam A H1 ถึง Sam A H9.....	88
ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam B H1 ถึง Sam B H12.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นไอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam C H1 ถึง Sam C H7.....	90
ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นไอโซนความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam D H1 ฟาร์ม Sam E H1 ฟาร์ม Sam F H1 และ ฟาร์ม Sam G H1 ถึง Sam G H3.....	91
ตารางที่ 4.11 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นไอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam H H1 ถึง Sam H H3 และ ฟาร์ม Sam I H1 ถึง Sam I H4.....	91
ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นไอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam J H1 ถึง Sam J H49.....	92
ตารางที่ 5.1 กระบวนการที่กำหนดเพื่อใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานการผลิตของโรงงานที่ใช้วิจัย.....	96
ตารางที่ 5.2 เครื่องกำเนิดไอโซนที่ออกแบบที่ใช้ในการวิจัย.....	97
ตารางที่ 5.3 ปริมาณความเข้มข้นของไอโซนที่เหมาะสมในการวิจัย.....	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำหรับเศรษฐกิจของประเทศไทยธุรกิจการส่งออกไก่แช่แข็งถือเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญประเภทหนึ่งซึ่งนำเงินตราเข้าประเทศด้วยมูลค่าการส่งออกมากกว่าปีละกว่าสามแสนล้านบาท หนึ่งในความท้าทายที่ผู้ประกอบการที่สำคัญของธุรกิจอุตสาหกรรมนี้คือการพบการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคชนิดหนึ่งที่เรียกว่า ซัลโมเนลล่า ซึ่งเกินข้อกำหนดที่ประเทศคู่ค้า หากมีการตรวจพบการปนเปื้อนเชื้อมีผลให้อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการส่งออกของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นเพื่อจัดการแก้ไขปัญหาให้แล้วเสร็จก่อนส่งออกอีกครั้ง ทำให้เสียโอกาสและสร้างความเสียหายให้กับธุรกิจเป็นอย่างมาก เพื่อรับมือกับปัญหาการปนเปื้อนเชื้อให้ลดลง ทางผู้ประกอบการจึงเลือกสารเคมีที่สามารถสัมผัสอาหารได้ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุสิ้นเปลืองมาช่วยในการลดการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคนั้น จากการทำการเปรียบเทียบวิธีการฆ่าเชื้อในเนื้อสัตว์ ซึ่งทำการเปรียบเทียบ โอโซน คลอรีน และ รังสีอุตราไวโอเลตต่อการเหลือรอดของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคพบว่าโอโซนสามารถลดการเหลือรอดของแบคทีเรียได้ดีที่สุด อีกทั้งยังพบว่าโอโซนสามารถทำลายเชื้อไวรัส รวมถึงไข่ของพยาธิ [1] ซึ่งสารตั้งต้นต่างๆต้องนำเข้าจากต่างประเทศโดยนำมาใช้กับขั้นตอนในระหว่างการผลิต อาทิ เช่น การล้างรถไก่ การล้างตะกร้าใส่ไก่ การล้างซากหลังบั่นขนไก่ การล้างอุปกรณ์ในการทำความสะอาด รวมถึงวิธีการล้างซากไก่ และการลดอุณหภูมิซากไก่ เป็นทางเลือกหนึ่งที่ผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมไก่ อีกทั้งเทคโนโลยีการใช้โอโซนนั้นยังเป็นมิตรที่ดีต่อสิ่งแวดล้อมไม่ทำลายระบบนิเวศวิทยา สอดคล้องกับนโยบายแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งความยั่งยืนตามหลักการ BCG Model เป็นการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวมที่มุ่งเน้นการพัฒนา 3 เศรษฐกิจควบคู่กันไปซึ่งได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) มุ่งสร้างมูลค่าเพิ่มของทรัพยากรชีวภาพ เชื่อมโยงกับเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) คำนึงถึงการใช้ทรัพยากรให้เกิดความคุ้มค่าหรือยาวนานที่สุด และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) การพัฒนาเศรษฐกิจโดยคำนึงถึงความยั่งยืนของทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งในการลดการใช้สารเคมีที่เป็นผลพลอยได้จากการกลั่นปิโตรเลียมและต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อลดการปนเปื้อนเชื้อมีผล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอทางเลือกในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ ซากไก่เบื้องต้นโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการลดเชื้อก่อโรคซัลโมเนลล่า ในขั้นตอนดังกล่าวที่เหมาะสมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

จากเหตุผลดังกล่าวทางผู้วิจัย จึงให้ความสนใจที่จะออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนเพื่อหา
ค่าที่เหมาะสมในการใช้งานในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลด
เชื้อซัลโมเนลล่า ด้วยวิธีการออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ฟลายแบ็คด้วยวงจรพัลส์วิด
โมดูลเลชันแรงดันสูงความถี่สูง เพื่อให้เกิดโคโรนา ดิสชาร์จ สนามไฟฟ้าที่หลอดอิเล็กโทรดที่ออกแบบ และ
ใช้อากาศไหลผ่านชุดหลอดอิเล็กโทรด เพื่อทำให้เกิดก๊าซโอโซนอย่างต่อเนื่องเพื่อนำก๊าซโอโซนดังกล่าวไป
ใช้งานในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดย
เก็บค่าที่เครื่องกำเนิดโอโซนผลิตและจ่ายให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงาน
อุตสาหกรรม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่าดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้จะได้การ
ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนที่สามารถใช้งานทดแทนสารเคมีในการล้างทำความสะอาดและฆ่า
เชื้อได้ เพื่อเป็นทางเลือกที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ผู้ประกอบการธุรกิจโรงงานอุตสาหกรรมไก่นำไปพิจารณาใช้งาน
ในโรงงานในขั้นตอนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเพื่อใช้ในการลด
เชื้อซัลโมเนลล่าในกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดิสชาร์จต้นแบบโดยหม้อ
แปลงไฟฟ้าฟลายแบ็คด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชันแรงดันสูงความถี่สูงที่เหมาะสมสำหรับใช้งานใน
ขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนสำหรับการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงาน
อุตสาหกรรมแห่งหนึ่งของประเทศ

1.3.2 การสร้างโอโซนใช้หลักการโคโรนาดิสชาร์จที่สร้างจากหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบ็ค
เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าโคโรนาดิสชาร์จ ด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชันสวิตซิงแรงดันสูงที่ 15 kV ความถี่สูงที่
40 kHz ด้วยชุดหลอดอิเล็กโทรดชนิดทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม

1.3.3 หาค่าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดโอโซนและกระบวนการในการผลิตในขั้นตอนการลด
อุณหภูมิซากไก่เพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่า โดยความเข้มข้นที่ปล่อยออกจากเครื่อง และปริมาณความ
เข้มข้นของโอโซนในน้ำล้างซากไก่ที่ 9,000 ตัวต่อชั่วโมงต่อ 1 สายการผลิต

1.4 สมมติฐานของวิทยานิพนธ์

กระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมสามารถหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้นแบบและแนวทางการลดค่าใช้จ่ายพร้อมทั้งยังสามารถนำสู่ตลาดอุตสาหกรรมอาหารต่อไปได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาวิธีการและขั้นตอนในการผลิตไก่ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น
- 1.5.3 ศึกษาหลักการและวิธีการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จ
- 1.5.4 ทดสอบค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ได้จากการเครื่องกำเนิดโอโซน
- 1.5.5 ทดสอบค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ได้จากน้ำลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น
- 1.5.6 ทดสอบหาค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์
- 1.5.7 สรุปวิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จโดยหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบ็คพัลส์วิดท์มอดูเลชันต้นแบบในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นเพื่อใช้งานในการลดเชื้อจุลินทรีย์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมได้
- 1.6.2 สามารถหาค่าที่เหมาะสมของปริมาณโอโซนที่ใช้ในการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม
- 1.6.3 สามารถใช้เป็นทางเลือกให้ผู้ประกอบการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เป็นมิตรที่ดีต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องตามแผนการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวมที่ยั่งยืนได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรีทรรศน์วรรณกรรม

สำหรับการฆ่าเชื้อซัลโมเนลล่าในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีบทความที่เกี่ยวข้องเพื่อทำลายเชื้อซัลโมเนลล่า ดังนี้

2.1.1 การใช้ความร้อน สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม ระบุการใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที หรือ 100 องศาเซลเซียส ที่ 1 นาที สามารถทำลายเชื้อซัลโมเนลล่าได้

2.1.2 การใช้สารเคมี สมศักดิ์ สุภสิทธิ์มงคล สวทช. ได้พัฒนาน้ำยาฆ่าเชื้อด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีโดยใช้เกลือกับน้ำบริสุทธิ์เพื่อทำเป็นสารละลายเกลือแกง ก่อนใช้กระบวนการทางไฟฟ้าทำปฏิกิริยาเคมี จนได้สารเคมีออกมา 2 ชนิด ที่เป็นชนิดกรดและด่าง โดยในส่วนที่เป็นกรด มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน ๆ เป็นสารเคมีที่ผ่านการรับรองด้านความปลอดภัยเหมาะในการใช้อาหารและสามารถที่จะสัมผัสอาหารได้ รับรองโดยหน่วยงาน U.S. Environmental Protection Agency (EPA) และ Food and Drug Administration (FDA) สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และเกาหลี [2]

2.1.3 การใช้เทคโนโลยีของไหลวิกฤตยิ่งยวด (supercritical fluid technology) ปิยาภัทร ไตรสนธิ ระบุใช้ความดันต่ำกว่ามากโดยการสกัดด้วย SFC จะใช้ความดัน 20 เมกกะพาสกาล ในขณะที่ HPP ใช้ความดัน 600-800 เมกกะพาสกาล เงื่อนไขของการฆ่า เชื้อแบคทีเรียในอาหารด้วยวิธีนี้คือ SFC จะต้องสามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวกลางที่ เซลล์จุลินทรีย์อาศัยอยู่ได้ และสามารถ แทรกซึมผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เป้า หมายได้ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำลาย เซลล์ของจุลินทรีย์ด้วยการเปลี่ยนแปลง สภาพความเป็นกรดต่าง ทำให้โปรตีนที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์เสื่อม สภาพ และทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งพบว่าวิธีการนี้มี ประสิทธิภาพในการลดจำนวน จุลินทรีย์ปน เปื้อนในอาหารหลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็น แบคทีเรียแกรมบวก แบคทีเรียแกรมลบ เชื้อรา และสปอร์ของแบคทีเรีย [3]

2.1.4 การใช้เทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) นิพัทธ์ ลิ้มสงวน ระบุการใช้เทคโนโลยีโคลด์พลาสมาเพื่อคงคุณภาพและความปลอดภัยของเนื้อและผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัตถุประสงค์หลัก ใช้เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ไม่พึง ประสงค์ของชิ้นเนื้อ เช่น การใช้ plasma jet ในการ ลดปริมาณจุลินทรีย์ (total bacterial count) ที่ผิว ของเนื้อไก่ เนื้อหมู และเนื้อวัว จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึง

ความสามารถ ในการยับยั้งจุลินทรีย์จำพวก psychrotrophs ได้เป็นอย่างดีอีกทั้งยังสามารถยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ นอกเหนือจาก การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้เนื้อที่ผ่านการใช้พลาสมา มีลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้น เช่น สี และเนื้อสัมผัส อีกทั้งเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถ ประยุกต์ใช้ในการบ่ม (curing) เนื้อให้มีสีชมพู-แดง โดยสามารถลดการตกค้างของสารไนไตรตทั้งในชั้น เนื้อสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปเนื้อสัตว์ รวมถึงการใช้เทคโนโลยีนี้ในการลดการปนเปื้อนของ จุลินทรีย์ในอุปกรณ์การผลิตด้วยมีแนวคิดในการ พัฒนาระบบการผลิตแบบต่อเนื่องในระดับ อุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์แปรรูปเนื้อสัตว์ [4]

2.1.5 การใช้โอโซน(Ozone technology) โอโซนถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ดี เป็นมิตรที่ต่อสิ่งแวดล้อม และ ช่วยในการกำจัดเชื้อก่อโรคได้ ในการลดการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคซึ่งหากมีการนำโอโซนมาใช้งานร่วมกับขั้นตอนโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไก่ที่เป็นธุรกิจนำเข้าเงินตราต่างประเทศลำดับต้นๆได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มทางเลือกให้ผู้ประกอบการในการตัดสินใจเลือกใช้งานได้ สำหรับงานวิจัยนี้ผู้เขียนได้นำเอาเทคโนโลยีใช้เครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดิสชาร์จเพื่อนำมาใช้ลดการปนเปื้อนเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการล้างซากไก่ โดยส่วนประกอบพื้นฐานที่ประกอบไปด้วย หลักเกณฑ์การเลือกใช้โอโซนและมาตรฐานเชื้อซัลโมเนลล่าในสินค้าสำหรับการผลิตเพื่อแปรรูปเนื้อสัตว์ปีกในโรงงานอุตสาหกรรม ตัวเครื่องกำเนิดโอโซน เช่น หลอดอิเล็กโทรด แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่สูง ต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม และมีบทความหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

หลักเกณฑ์การเลือกใช้เทคโนโลยีโอโซนเพื่อการลดการปนเปื้อนเชื้อซัลโมเนลล่า Thabet และ คณะ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการฆ่าเชื้อในเนื้อสัตว์ ซึ่งทำการเปรียบเทียบ โอโซน คลอรีน และ รังสีอุตราไวโอเลตต่อการเหลือรอดของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคพบว่าโอโซนสามารถลดการเหลือรอดของแบคทีเรียได้ดีที่สุด อีกทั้งยังพบว่าโอโซนสามารถทำลายเชื้อไวรัส รวมถึงไข่ของพยาธิ ทำให้มีความปลอดภัยในการพบการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคในสินค้าลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อผู้บริโภค [1] สำหรับโอโซนเพื่อสัมผัสกับซากเนื้อสัตว์ปีกในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ทางสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา แห่งสหรัฐอเมริกา (The united states Food and drug administration ; U.S. FDA) ได้มีการยอมรับอย่างเป็นทางการในให้ใช้โอโซนกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์และสัตว์ปีกในการลดการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคในผลิตภัณฑ์ ที่มาจากสถานประกอบการที่ได้รับมาตรฐาน GMP ทั้งที่ใช้ในสถานะของเหลว ก๊าซ ตามประกาศเลขที่ FSIS Directive 7120.1

มาตรฐานเชื้อซัลโมเนลล่าในสินค้าสำหรับการผลิตเพื่อแปรรูปเนื้อสัตว์ปีกในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้มีความชัดเจนสำหรับคำว่าซากไก่ ทางกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดการ

เรียก ส่วนของตัวไก่ทั้งหมดที่เอาเลือด ขน หัว และอวัยวะภายในโพรงซากออกหมดแล้ว ว่าซากไก่เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะของชิ้นส่วนที่ใช้ในการทำงานวิจัยให้มีความชัดเจนและครอบคลุม สำหรับขั้นตอนการล้างซากทางหน่วยงานกรมปศุสัตว์ ได้กำหนด ปริมาณน้ำล้างถึงมากกว่า 1.5 ลิตรต่อซาก ที่น้ำหนักซากไก่ไม่เกิน 2.5 กิโลกรัมต่อซาก และมาตรฐานเชื้อซัลโมเนลล่าสำหรับสินค้าไก่สดแช่เยือกแข็งทางหน่วยงานกรมปศุสัตว์ ได้กำหนดให้เชื้อซัลโมเนลล่า ต้องไม่พบในสินค้าตัวอย่าง 25 กรัม ด้วยวิธี AOAC หรือ เทียบเท่า อาทิเช่น ISO/IEC 6579

ตัวเครื่องกำเนิดโอโซน สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง เต็มสิน พัทธกษาสาลี ระบุวิธีการที่นิยมใช้ในการสร้างโอโซนมี 3 ประเภทหลักๆ และการใช้หลักการโคโรนา ดิสชาร์จ เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดเนื่องจาก มีต้นทุนต่ำ สามารถสร้างโอโซนในการใช้งานได้มากพอ โดยใช้วงจรพลาสมาแบบคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ IC TL 494 ควบคุมการสวิตชิงของเพาเวอร์มอสเฟสเบอร์ IRFP 460 ส่วนงานวิจัยของพร้อมศักดิ์ อภิตกุลและจรงค์ บุญเส็ง ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน โดยใช้หลักการโคโรนา ดิสชาร์จ ตัวแหล่งจ่ายใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสวิตชิงพลาสมาแบบ แรงดันสูง 10-15 kV ความถี่สูง 15-20 kHz เช่นกันซึ่งสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ 100 ppm/hr และงานวิจัยของ อำนาจ สุขศรี ศราวุธ กาญจนเลขา และ พร้อมศักดิ์ อภิตกุล ทำการเปรียบเทียบการสร้างโอโซนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง หลักการโคโรนา ดิสชาร์จ พบว่าการสร้างโอโซนโดยใช้ความถี่สูงทำให้ได้ความเข้มข้นของโอโซนจำนวนมาก และที่การใช้งานความเข้มข้นของโอโซนที่ต่ำกว่า 600 ppm แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง AC 50 Hz จะเหมาะสมที่สุด [5] อีกหนึ่งบทความได้ทำการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของโอโซนโดย ศิศิโรตม์ เกตุแก้ว ทำการทดสอบค่าความเข้มข้นที่ ความถี่ 40 kHz แหล่งจ่ายไฟ 220 V 50 Hz พบว่าสามารถสร้างปริมาณก๊าซโอโซนได้ถึง 500 ppm [6]

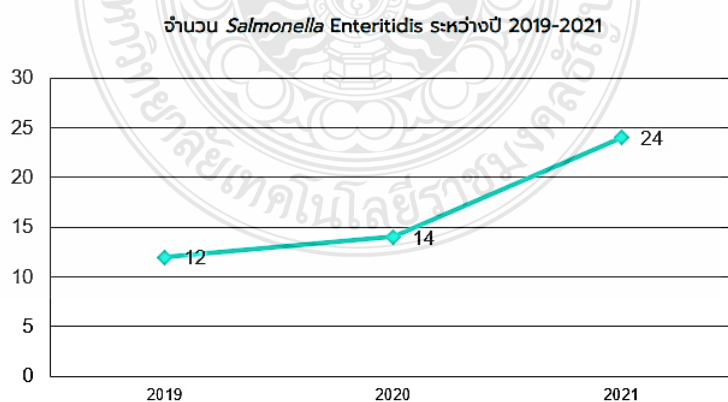
ตัวหลอดอิเล็กโทรดเพื่อสร้างปฏิกิริยาโคโรนาดิสชาร์จงานวิจัยของ สราวุธ ศิริวัฒนตระกุล ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของโอโซนจากประเภทของหลอดอิเล็กโทรด 4 ประเภท พบว่าหลอดอิเล็กโทรดที่ประเภทขดลวดสามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้ดี มีปริมาณความเข้มข้น อัตราการผลิตสูง และเป็นชนิดแบบดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของหลอดแก้วยาวนานกว่าอีก 3 ประเภท [7] สำหรับงานวิจัยของ บุญเลิศ สือเฉย และ ชัยพิสิษฐ์ ผิวนอน ได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดชนิดทำจากสแตนเลส เทียบกับวัสดุประเภทอื่นอื่นๆอีก 4 ชนิด พบว่าแท่งอิเล็กโทรดชนิดสแตนเลส และ อลูมิเนียม ทรงกระบอก สามารถผลิตโอโซนได้ สูงกว่า 3000 ppm ซึ่งดีกว่าชนิดอื่นๆ และปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่เหมาะสมในการใช้ล้างซากไก่และเนื้อไก่ และผลงานวิจัยของ คมแข พิลาสสมบัติ ได้ศึกษาการลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคโดยการล้างด้วยน้ำ

โอโซน ในตัวอย่างเนื้อมีค่าต่ำกว่าน้ำที่โอโซนที่ความเข้มข้น 5 ถึง 10 ppm สามารถลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคได้ [8]

จากการศึกษาทางทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการนำเทคโนโลยีการผลิตโอโซนด้วยหลักการโคโรนาดิสชาร์จมาใช้ในการลดเชื้อก่อโรคมักมีค่าใช้จ่ายแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ดี หากงานวิจัยทางวิชาการนี้สามารถได้รับการนำมาพิจารณาใช้งานกับภาคธุรกิจโรงงานอุตสาหกรรม จะทำให้ลดต้นทุนการนำเข้าสารเคมีซึ่งต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับประเทศผู้ส่งออกอื่นๆได้มากขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการที่จะศึกษาการหากระบวนการที่เหมาะสมโดยใช้เครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดิสชาร์จเพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม และออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนต้นแบบที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งเทคโนโลยีการใช้โอโซนดังกล่าวนี้ยังเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรที่ดีต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงสอดคล้องตามหลักแผนการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวมที่ยั่งยืน (BCG Model) ของประเทศไทย โดยการดำเนินการและผลงานวิจัยที่นำมาทบทวนวรรณกรรมจะนำไปใช้อ้างอิงในบทถัดไป

2.2 เชื้อซัลโมเนลล่าที่ปนเปื้อนในซากไก่

ซากไก่ กระทรงเกษตรและสหกรณ์ ได้ออกประกาศกระทรวง เพื่อแก้ไขมาตรฐานเชื้อสินค้าเกษตรที่เป็นมาตรฐานทั่วไป ตามพระราชบัญญัติสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551 ได้ระบุเชื้อสินค้าเกษตรจากไก่ โดยให้เรียก ส่วนของร่างกายของไก่ทั้งหมดที่เอาเลือด ขนและอวัยวะภายในออกหมดแล้วว่า ซากไก่ [9]



รูปที่ 2.1 แนวโน้มเชื้อซัลโมเนลล่าที่ตรวจพบการปนเปื้อนระหว่างปี 2019-2021

สำหรับเชื้อซัลโมเนลล่าเป็นเชื้อก่อโรคประเภทไทฟรอยด์ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคกลุ่ม แบคทีเรียแกรมลบ ตระกูลเอนเทอโรแบคทีเรียซีอี ที่มีอันตรายและสำคัญชนิดหนึ่งที่ส่งผลต่อผู้บริโภค ส่วนใหญ่มักอาศัยอยู่ในบริเวณลำไส้ คน สัตว์มีปีก สัตว์ปีก สัตว์เลื้อยคลาน สามารถอาศัยอยู่ได้ในหลอดเลือดได้หากมีอาการป่วยจากซัลโมเนลโลซิสรุนแรง เชื้อดังกล่าวทำให้เกิดอาการท้องเสีย ท้องร่วงรุนแรง และผู้บริโภคที่รับเชื้อมากเกินไปหรือมีอาการแพ้นรุนแรงมากสามารถทำให้เสียชีวิตได้ จึงมีประกาศจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา หน่วยบริการด้านความปลอดภัยและตรวจสอบคุณภาพอาหาร (U.S.FSIS) เพื่อควบคุมสินค้าปศุสัตว์ ซึ่งสามารถลดความรุนแรงและอาการเจ็บป่วยกับประชากรในประเทศลงได้ และได้กำหนดมาตรฐานทางห้องปฏิบัติการ โดยเนื้อสัตว์ปีกที่นำเข้าต้องมีการรับรองผลการตรวจจากทางห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน ISO/IEC 17025 ว่าไม่พบเชื้อซัลโมเนลล่าในตัวอย่างสินค้า 25 กรัม ที่ส่งมอบในแต่ละชุดการผลิต ตรวจด้วยวิธี AOAC หรือวิธีเทียบเท่า เช่น ISO/IEC 6579 ซึ่งหน่วยงานของประเทศไทยที่รับผิดชอบดูแลสินค้าปศุสัตว์ได้มีการออกกฎระเบียบปี 2551 ตามประกาศกรมปศุสัตว์ เรื่อง เกณฑ์ด้านจุลชีววิทยาของสินค้าปศุสัตว์เพื่อการส่งออก โดยกำหนดให้เชื้อแบคทีเรียก่อโรค ซัลโมเนลล่าต้องไม่พบในสินค้าตัวอย่าง 25 กรัม [10] โดยใช้มาจนถึงปัจจุบันวิธีตรวจสอบใช้วิธีเดียวกับที่ U.S.FSIS ประเทศสหรัฐอเมริกากำหนด

2.3 การลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

โรงงานที่สามารถแปรรูปเนื้อสัตว์ปีกเพื่อการจำหน่ายได้ต้องได้รับการรับรองมาตรฐานสุขลักษณะที่ดีในการผลิตสำหรับโรงงานผลิตอาหาร โดยกรมปศุสัตว์ โดยมีนายสัตวแพทย์ประจำโรงงานจากหน่วยงานราชการเป็นผู้ควบคุมการผลิตทุกขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นได้มีการระบุให้มีการควบคุมต้องมีปริมาณน้ำใช้ล้างมากกว่า 1.5 ลิตรต่อซาก ที่น้ำหนักไก่ไม่เกิน 2.5 กิโลกรัมต่อซาก และอุณหภูมิหลังออกจากกระบวนการลดอุณหภูมิต้องไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส โดยค่ามาตรฐานตามเกณฑ์ของกรมปศุสัตว์ในสินค้าเนื้อไก่ดิบส่งออก ต้องไม่พบเชื้อซัลโมเนลล่า ในตัวอย่างเนื้อไก่ที่ 25 กรัม ด้วยวิธี AOAC หรือวิธีที่เทียบเท่า [10]

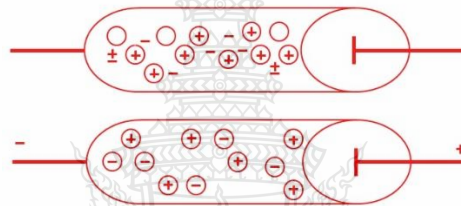
โอโซนเริ่มมีการใช้ร่วมกับการแปรรูปเนื้อสัตว์โดยใช้ผ่านน้ำเป็นตัวช่วยในการล้างทำความสะอาดสินค้าประเภทเนื้อสัตว์ซึ่งรวมถึงเนื้อไก่และซากไก่ด้วยเช่นกัน โดยเริ่มต้นจากการนำมาใช้ทำความสะอาดวัสดุ อุปกรณ์ พื้น ผนัง เพดาน และ อุปกรณ์ที่ใช้งานต่างๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 และพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี 2544 ทางคณะกรรมการอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกา U.S. FDAได้ออกประกาศให้การรับรองการใช้โอโซนในสถานะก๊าซและของเหลวที่สามารถสัมผัสเนื้อสัตว์

โดยตรงและใช้กับอุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ได้ และออกมาเป็นระเบียบที่ชัดเจน โดยกระทรวงเกษตร
 แห่งชาติประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนงานคณะกรรมการควบคุมมาตรฐานความปลอดภัยของอาหาร (U.S.FSIS) [14] และมีผลบังคับใช้จนถึงปัจจุบัน

2.4 หลักการทำให้เกิดโอโซน

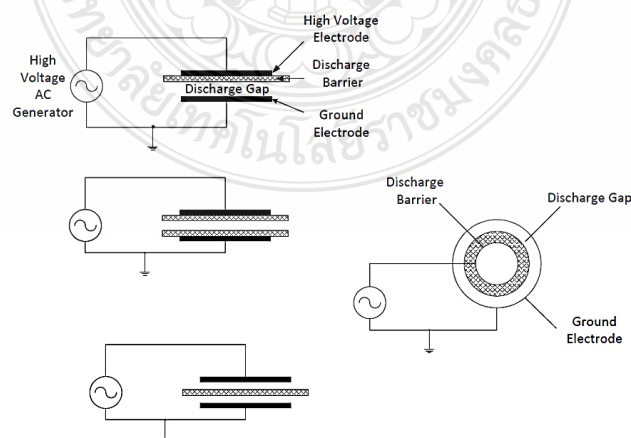
วิธีการผลิตก๊าซโอโซนแบ่งออกได้ 3 วิธีได้แก่

2.4.1 จากระังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Irradiation) ที่ได้จากการใช้งานจากหลอดยูวี ที่
 บรรจุด้วยไอปรอทที่มีความยาวคลื่น 190-250 นาโนเมตร รังสี UV สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ค่อนข้างต่ำ
 คือ มีความเข้มข้น 0.1-20 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง



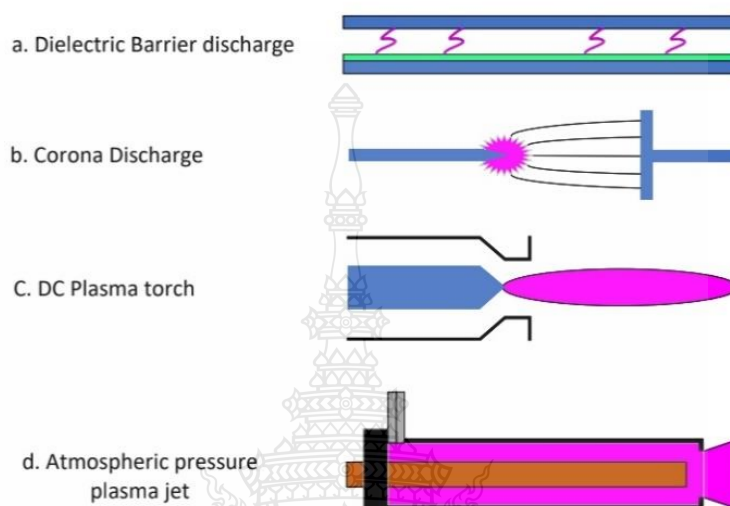
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดรังสีอัลตราไวโอเลต

2.4.2 หลักการโคโรนาดีสชาร์จ(Corona Discharge) เป็นการฉายด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่มี
 ความต่างศักย์สูง ลงบนก๊าซออกซิเจนซึ่งผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ที่มี
 กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุด และสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ตั้งแต่ 2.5
 มิลลิกรัม ถึง 200 กรัมต่อชั่วโมง และมีต้นทุนต่ำซึ่งสามารถที่จะผลิตก๊าซที่เพียงพอต่อการใช้งานที่ไม่
 ต้องการความเข้มข้นที่สูงมากนัก



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนโดย ปฏิกิริยาโคโรนาดีสชาร์จ

2.4.3 หลักการพลาสมา (Cold Plasma Method) คือเกิดขึ้นได้โดยการฉายด้วยรังสีพลาสมาที่ได้จากแท่งแก้ว 2 แท่ง ที่บรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าแรงสูงไหลผ่าน ทำให้เกิดสนามพลาสมาที่มีพลังงานสูง ซึ่งใช้ในขบวนการอุตสาหกรรมที่ต้องการปริมาณก๊าซไอออนสูง วิธีนี้ให้ผลผลิตได้มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 2.4 หลักการเกิดพลาสมา

จากหลักการการทำให้เกิดไอออนดังกล่าวการเลือกใช้การเกิดไอออนหลักการโคโรนา ดิสชาร์จจึงมีความเหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากมีความคุ้มค่าคุ้มทุน ราคาไม่สูงมากในการลงทุนและสามารถผลิตไอออนในความเข้มข้นที่ไม่น้อยไปหรือมากเกินไป ในการนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

2.5 หลักการโคโรนาดิสชาร์จ

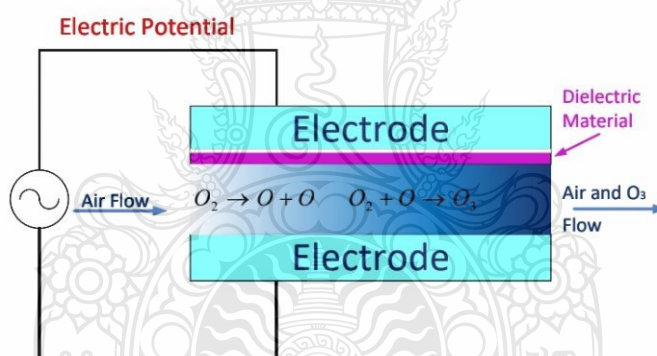
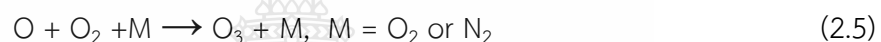
หลักการโคโรนาดิสชาร์จ คือการทำให้เกิดไอออนโดยใช้หลักการป้อนออกซิเจนแห้งและบริสุทธิ์ให้กับสนามไฟฟ้า (Electrical fields) แรงสูง ทั้งย่านความถี่ต่ำ (50 Hz – 100 Hz) ความถี่ปานกลาง (100 Hz- 1000 Hz) และความถี่สูง (1 kHz ขึ้นไป) ที่บริเวณ Discharge gap แล้วให้กระแสไฟฟ้าที่บริเวณ Dielectric surface ทำให้ออกซิเจนในอากาศแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมลบ ที่มีความคงตัวและรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนของโมเลกุลอื่นๆ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไอออนความเข้มข้นสูงที่ 1% - 10% ต่อ น้ำหนัก การสร้างไอออนแบบพื้นฐาน แรงดันไฟฟ้าจะถูกป้อนให้อิเล็กโทรดทั้งสองขั้วที่มีไดอิเล็กทริกและช่องอากาศชั้นอิเล็กโทรดทั้งสองอยู่ อากาศจะถูกดูดผ่านช่องอากาศนี้และจะเกิดการแตกตัวของอากาศ

เนื่องจากเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอิเล็กโทรดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ออกซิเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นโอโซนตามขั้นตอนดังนี้

2.5.1 อนุมูลิสรระของออกซิเจนกำเนิดจากกระบวนการไอออนิกดังสมการเคมีที่ 2.1 - 2.4



2.5.2 โอโซนถูกผลิตโดยปฏิกิริยาของอนุมูลิสรระออกซิเจนดังสมการ :



รูปที่ 2.5 หลักการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ [3]

แรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญในการกำเนิดโอโซน ที่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วของอิเล็กโทรด จากสมการที่ 2.6 โดยกำหนดให้ V คือ แรงดันจำเป็น มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ p คือ ความดันที่ช่องว่าง มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล g คือ ระยะของช่องว่าง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และ k_1 คือ ค่าคงที่

$$V = k_1 p g \quad (2.6)$$

ในทำนองเดียวกันความสามารถในการกำเนิดโอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแรงดันกำลังสองและผกผันกับความหนาของไดอิเล็กตริก จากสมการที่ 2.7 โดย

กำหนดให้ f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิร์ตซ์ e คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก d คือ ความหนาของไดอิเล็กตริก มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

$$\text{Yield} : \frac{k_1(\text{feV}^2)}{d} \quad (2.7)$$

จากสมการนี้พบว่าจะมีปัญหาในการออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซน คือ ต้องพยายามทำให้ไดอิเล็กตริกบางที่สุดเท่าที่ทำได้และทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูง ขณะเดียวกันเองให้ไอโซนมาก ๆ ก็ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น ด้วย เพราะแรงดันยิ่งสูงยิ่งดี ($O3 \propto V^2$) ในอีกทางหนึ่งขณะที่แรงดันสูง ๆ ถูกนำมาใช้สารไดอิเล็กตริกก็จะเสียหายได้ง่ายขึ้น ในทางปัจจุบันมีวิธีที่นิยมในการเพิ่มปริมาณไอโซนที่ต้องการโดยเพิ่มความถี่ของกระแสที่ใช้ นอกจากนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไอโซนก็ยังมีการพัฒนาคุณภาพไดอิเล็กตริกให้ดียิ่งขึ้นและการระบายความร้อนออกจากเซลล์ที่กำเนิดไอโซน

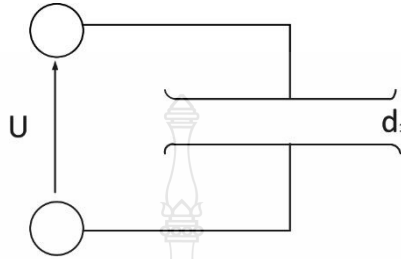
2.6 สนามไฟฟ้า

ฉนวนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเพื่อใช้ในการสร้างและใช้ประโยชน์ในทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใดมีไฟฟ้าที่นั่นก็ต้องมีการฉนวนเพื่อป้องกันการได้รับอันตรายกับคน สัตว์หรือ สิ่งมีชีวิตอื่นๆที่เข้ามาใกล้หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟกับสายไฟ หรือ สายไฟกับดิน การฉนวนแก่ส่วนที่มีไฟฟ้าย่อมทำได้ง่ายถ้าหากมีที่ว่างมากพอ หรือแรงดันนั้นต่ำ เช่น 100 โวลต์ แต่ในกรณีแรงดันสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบการฉนวนให้ดีและประหยัด จำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวนซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน

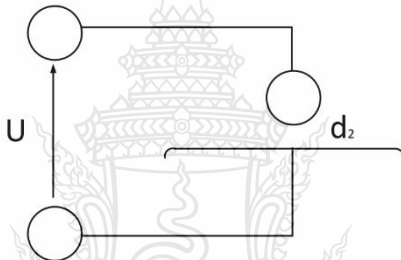
พิกัดขีดชั้นความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้ากำหนดด้วยภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์คหรือวาบไฟหรือเบรกดาวน์ผ่านฉนวนโดยปกติสภาพการนำไฟฟ้าอย่างดีนั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกดาวน์ ถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซฉนวนเปลี่ยนสภาพนำไฟฟ้าไปและคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนจนเป็นอาร์คนั้นหมายความว่าสภาพการฉนวนของก๊าซนั้นไม่เป็นแบบถาวร คือ สภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากการเกิดเบรกดาวน์ หรือ สปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

2.6.1 ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้า (electric field configuration)

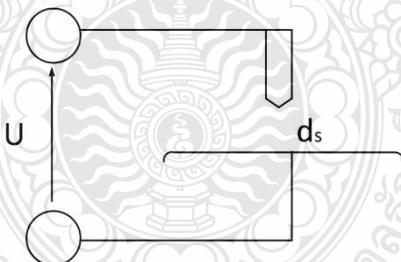
โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.6-2.8



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (uniform field)



รูปที่ 2.7 อิเล็กโทรดลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)



รูปที่ 2.8 อิเล็กโทรดลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1 , d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณมักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรด ในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆหลายประการ

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

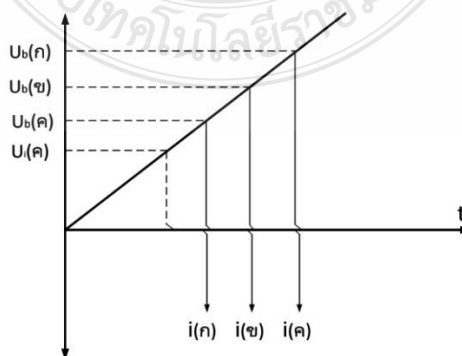
สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.11 ที่กำหนดให้ $E_{\max}$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ และ d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.11)$$

ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวนหรือมีการสปาร์คขึ้นทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมาในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวนนี้นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกดาวนนี้นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังรูปที่ 2.2 (ก) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวนนี้นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (electric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ที่ 2.12 โดยกำหนดให้ E_d คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.12)$$

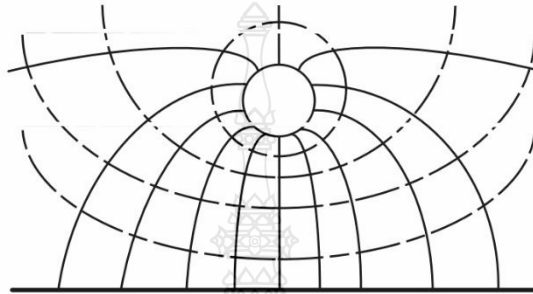
อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไปเพราะขึ้นอยู่กับ แพลกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐาน ที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดอิเล็กตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า

2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโทรดรูปที่ 2.7 ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ 2.13 และ 2.14 โดยกำหนดให้ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) และ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.13)$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.14)$$

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ธรรมชาติให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านั่นเอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ตามสมการ 2.15 และ 2.16 ได้คือ

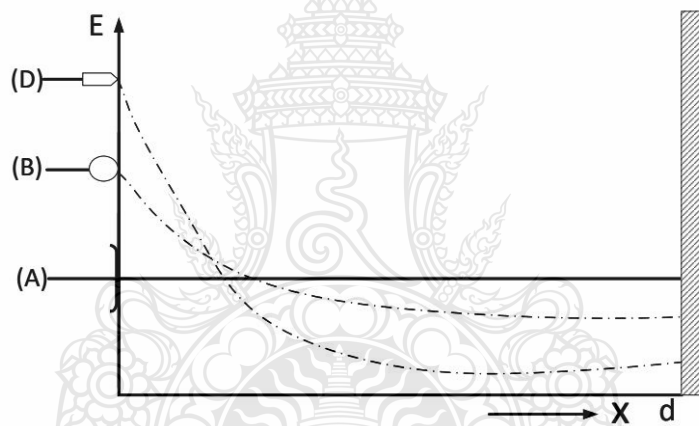
$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.15)$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.16)$$

แสดงว่าอิเล็กโทรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวนก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรน่า คือ ไม่มีดิสชาร์จนำหน้า (predischage) เกิดก่อนเบรกดาวน ดังอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.7 กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวนจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวนทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน $E_{\max} = E_b$

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะอยู่ในบริเวณใกล้ผิวอิเล็กโทรดที่มีผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูปที่ 2.8 เมื่อความระยะห่าง ออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟความเครียด สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูปที่ 2.10 อิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงนี้ แม้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตามเบรกดาวนจะยังไม่เกิด แต่จะเกิดโคโรน่า



รูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่าง ออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรน่าไม่เกิด ฉะนั้นช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด จะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดกระแสนี้วัด ได้ก่อนเกิดเบรกดาวน เรียกว่ากระแสโคโรน่าหรือกระแสพรีดิสชาร์จดังในรูปที่ 2.8

การเกิดโคโรน่าจะทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (Space Discharge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการ (2.13) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.13) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่ง เรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง จากสมการ 2.17 โดยกำหนดให้ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโร

นำเริ่มเกิด มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์และ U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage) มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.16) ใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (Free of Space Charge) คือ ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (Inception Voltage , Starting Voltage , Threshold Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในช่องว่างอากาศ

2.6.2 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิดเบรกดาวน์

ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย (แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η^* มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด จะเป็นแบบเบรกดาวน์โดยตรง (Direct Breakdown) เป็นเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นทันทีทันใดเมื่อได้รับเงื่อนไขโดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ แต่ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ค่าแฟกเตอร์ η^* มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์ U_b จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น U_i นั่นคือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงจะไม่เกิดเบรกดาวน์ หากแต่เริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เกิดเบรกดาวน์ หรือเบรกดาวน์แบบโคโรนา (Corona Breakdown) ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนในรูปสมการทั่วไป 2.18 โดยกำหนดให้ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรและ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ได้ดังนี้

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.18)$$

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i ก็คือ U_b และ E_i ก็คือ E_b เป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่สามารถคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายประจุค้างว่าเป็นอย่างไรจึงหาความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายไม่ได้ ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น U_i หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_i เป็นตัวแสดงถึงความคงทนต่อการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

2.6.3 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมี 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว ความคงทนของฉนวนกำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ก หรือวابل หรือเบรกดาวน์ผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างดีนั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกดาวน์ถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซ ฉนวนเปลี่ยนสภาพนำไฟฟ้าและคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงจนเป็นอาร์ก นั่นก็หมายความว่า การเสถียรภาพของการฉนวนของก๊าซนั้นเป็นแบบไม่ถาวร คือ เสถียรภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของแข็ง หลังจากการเกิดเบรกดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสถียรภาพของการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดังเดิมหลังจากเกิดเบรกดาวน์ หรือสปาร์กได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึงค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโทรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน (Plate-to-Plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

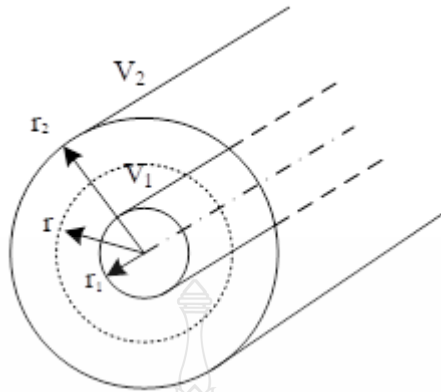
$$E_b = \text{ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, ลักษณะสมบัติของฉนวน และเวลา)}$$

- ลักษณะสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรด (Electrode Configurations)
- ลักษณะสมบัติของฉนวนจะหมายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี
- เวลาในที่นี้หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับรูปแบบรูปคลื่นแรงดันนั่นเอง

2.7 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เมื่ออิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่แนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ดังนั้นโดยอาศัยการอินทิเกรตสมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์

$$Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A} \text{ สำหรับทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีความยาว } l \text{ รัศมี } r (r_1 \leq r \leq r_2) \text{ ดังรูปที่ 2.12}$$



รูปที่ 2.12 ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

และ $E = D/\epsilon$ จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \epsilon \ell} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.19)$$

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนทั้งสอง คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi \epsilon \ell} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.20)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi \epsilon \ell} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.21)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ $r_1 \leq r \leq r_2$ $E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}$ (2.22)

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อนอันใน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.23)$$

จากนิยามสนามแฟกเตอร์ไฟฟ้า $\eta^* = E_{av}/E_{\max}$

โดยที่ $E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1}$ (2.24)

ฉะนั้น

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.25)$$

ความจุสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันร่วมคำนวณจาก $Q = CU$ ในสมการ (2.21) ได้

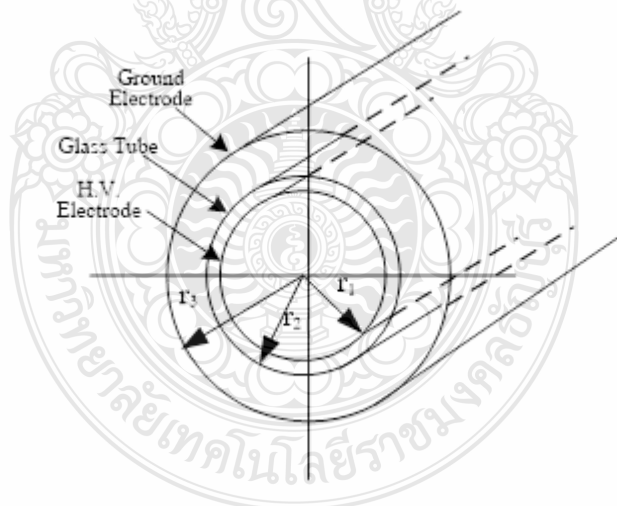
$$C = \frac{2\pi \epsilon \ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.26)$$

จากสมการหาค่าที่ 2.19-2.26 กำหนดให้ Q คือ ค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์) มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ มีหน่วยเป็น ฟารัด ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแต่ละชั้น ไม่มีหน่วย ℓ คือ ความยาวของฉนวน มีหน่วยเป็น เมตร

2.7.1 อิเล็กโทรด แบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมที่มีแก้วเป็นไดอิเล็กตริก

จากลักษณะของทรงกระบอกซ้อนกันร่วมนำมาสู่การออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน ลักษณะอิเล็กโทรดจะประกอบด้วยทรงกระบอกด้านในซึ่งจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริกไฟฟ้าแรงสูง มีอากาศและแก้วคั่นระหว่างทรงกระบอกด้านในและทรงกระบอกด้านนอก แสดงในภาพที่

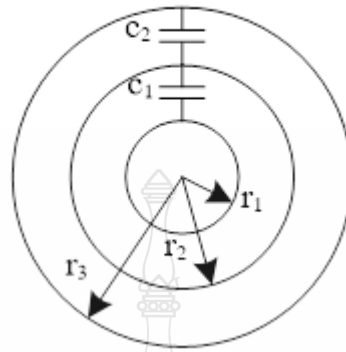
2.13



รูปที่ 2.13 ทรงกระบอกซ้อนกันที่มีแก้วเป็นไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 2.13 การที่มีแก้วและช่องว่างอากาศเป็นไดอิเล็กตริกนั้น ย่อมทำให้เกิดรอยต่อของชั้นฉนวนขึ้นระหว่างอากาศที่เป็นบริเวณ Discharge Gap และแก้ว จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวน จากรูปที่ 2.13 ให้ r_1 เป็น

รัศมีทรงกระบอกด้านในและรัศมีด้านในของหลอดแก้ว r_2 เป็นรัศมีด้านนอกของหลอดแก้วและ r_3 เป็นรัศมีด้านนอกทรงกระบอก



รูปที่ 2.14 รูปเสมือนของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน

ลักษณะของอิเล็กโทรดดังกล่าวจากรูปที่ 2.14 จะเสมือนว่ามีคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกัน คือ C_1 และ C_2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า จากสมการ 2.27 โดยกำหนดให้ C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของหลอดแก้ว มีหน่วยเป็น ฟารัดต่อเมตร C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ มีหน่วยเป็นฟารัดต่อเมตร ϵ_1 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของหลอดแก้ว ϵ_2 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ ได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.27)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้จากสมการ 2.28 โดยกำหนดให้ C_t คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม มีหน่วยเป็น ฟารัดต่อเมตร

$$C_t = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.28)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนแก้วและอากาศแต่ละชั้นต่ออันดับกัน ดังนั้นประจุของตัวเก็บประจุย่อมเท่ากัน คือ

$$Q_1 = Q_2 = Q_t = C_t U \quad (2.29)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมี r_x คำนวณได้จากความสัมพันธ์ เมื่อ x คือ รัศมีที่ระยะใดๆ (mm)

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon x r_x} = \frac{C_t \cdot U}{2\epsilon x r_x} \quad (2.30)$$

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \cdot U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.31)$$

อัตราส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี r_x และ r_{x+1} จะได้

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x} \quad (2.32)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้นจะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น คือ ในฉนวนชั้นที่ 1 (แก้ว) $E_{\max}$ เกิดขึ้นที่ $r = r_1, \epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1\max} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}; r_x = r_1, \epsilon_x = \epsilon_1 \quad (2.33)$$

และในฉนวนชั้นที่ 2 (อากาศ) $E_{\max}$ เกิดขึ้นที่ $r = r_2, \epsilon = \epsilon_2$

$$E_{2\max} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}; r_x = r_2, \epsilon_x = \epsilon_2 \quad (2.34)$$

อัตราความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (2.35)$$

2.7.2 แรงดันไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

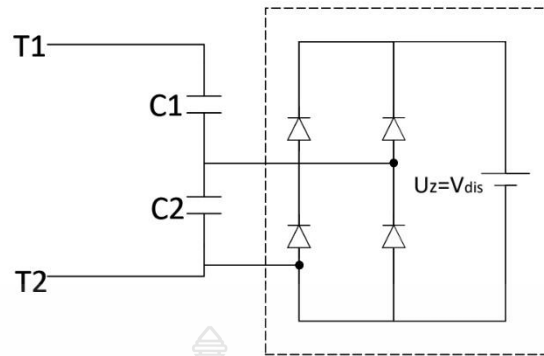
เนื่องจากสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้นเมื่อได้รับเงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงจะไม่เกิดเบรกดาวนแต่จะเป็นแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ถ้าจะให้เกิดเบรกดาวนจะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไปอีก ซึ่งแรงดันเบรกดาวนนี้นี้ไม่สามารถคำนวณได้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้ำว่าเป็นอย่างไร แต่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.36-2.38 โดยกำหนดให้ U_{cs} คือ แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ U_s คือ แรงดันที่เกิดในช่องว่างอากาศ มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ C_d คือ คาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริก มีหน่วยเป็น ฟารัดต่อเมตร C_g คือ คาปาซิแตนซ์ของช่องว่างอากาศ มีหน่วยเป็น ฟารัดต่อเมตร ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแต่ละชั้น มีหน่วยเป็น F/m ℓ คือ ความยาวของท่อแก้ว มีหน่วยเป็น เมตร t_g คือ ระยะช่องว่างอากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร p คือ ความดันก๊าซสัมบูรณ์ (101.325 kPa) ดังนี้

$$U_{cs} = \frac{C_d + C_g}{C_d} U_s \quad (2.36)$$

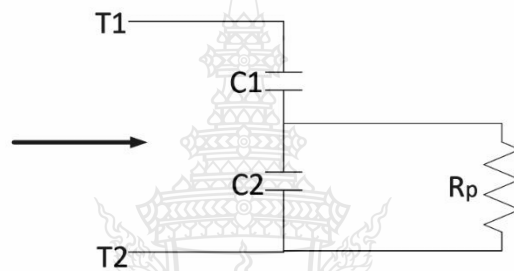
$$C_d = \frac{2\pi\ell\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad C_g = \frac{2\pi\ell\epsilon}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.37)$$

$$U_s = 29.64pt_g + 1350(\text{air}) \quad (2.38)$$

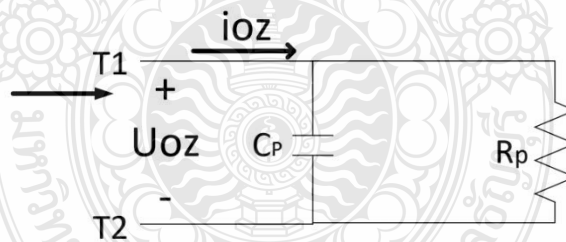
2.7.3 วงจรสมมูลของชุดอิเล็กโทรด จากการนำอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างในโดยใช้แกนกลางร่วมกันดังแสดงรูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่นำวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี ไม่เท่ากันซ้อนกันจึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งลักษณะของค่าตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยที่ค่าตัวเก็บประจุ C_2 เป็นค่าตัวเก็บประจุของช่องว่างอากาศ (Gap) ที่เกิดการดิสชาร์จซึ่งต่ออนุกรมกับค่าตัวเก็บประจุที่เป็นค่าตัวเก็บประจุ C_1 ของฉนวนที่เป็นแก้ว



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้เกิดก๊าซไอโซนที่ความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.16 แบบจำลองของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้เกิดก๊าซไอโซนที่ความถี่สูง วงจรเรกติไฟร์



รูปที่ 2.17 การแทนวงจรเรกติไฟร์และส่วนของ Discharge Voltage Source ค่า R_p

จากรูปที่ 2.15 เป็นวงจรสมมูลของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนกำเนิดก๊าซไอโซนโดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า U_Z หรือ U_{dis} ใช้แทนค่า Discharge Sustaining Voltage ส่วนของวงจรไดโอดเรกติไฟร์ใช้แทนการเกิดสภาวะการดิสชาร์จ หรือกล่าวได้ว่า แรงดันตกคร่อมช่องว่างของการดิสชาร์จ (Discharge Gap) น้อยที่สุดที่เป็นค่าเริ่มต้นทำให้เกิดไมโครดิสชาร์จ (Micro discharge) ขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.15 เป็นวงจรสมมูลของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้เกิดก๊าซไอโซนที่ความถี่ต่ำ ส่วนในรูปที่ 2.16 และ 2.17 เป็นการยู่บรวมเพื่อให้ได้เป็นแบบจำลองของชุดอิเล็กทรอนิกส์

โอโซนที่ความถี่สูง โดยในขั้นตอนแรก จะทำการแทนวงจรเรกติไฟร์และส่วนของ Discharge Voltage Source (U_z, U_{dis}) ด้วยค่าความต้านทานสมมูล R_p ค่าพลังงานที่ถูกใช้ในตัวต้านทานนี้เป็นการแทนพลังงานที่จ่ายให้กับชุดอิเล็กโทรดที่ให้เกิดก๊าซโอโซนซึ่งจะอยู่ในรูปของ การสร้างก๊าซโอโซน, ความร้อน และแสง ซึ่งเป็น 3 ปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโทรดที่ให้เกิดก๊าซโอโซนที่ใช้พลังงานแอคทีฟ (Active Power) ในขั้นตอนที่สอง ค่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะถูกรวมกันเป็นค่าตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว คือ ค่าตัวเก็บประจุ C_p ซึ่งต่อขนานอยู่กับค่าความต้านทาน R_p ซึ่งแบบจำลองวงจรสมมูลของชุดอิเล็กโทรดที่ให้เกิดก๊าซโอโซนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 (ค) การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถกระทำได้โดยการพิจารณาค่าแรงดันและกระแสที่ชุดอิเล็กโทรด ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในเชิงของสมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับหนึ่งตามสมการที่ 2.39

$$i_{oz}(t) = C_p \frac{dU_{oz}(t)}{dt} + \frac{1}{R_p} U_{oz}(t) \quad (2.39)$$

โดยที่ i_{oz} และ U_{oz} เป็นกระแสและแรงดันของชุดอิเล็กโทรดตามลำดับ

$$U_{oz}(t) = U_g \sin \omega t \quad (2.40)$$

ดังนั้น จะได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดมีค่าตามสมการที่ (2.41)

$$i_{oz}(t) = \frac{U_g}{X_p} \cos \omega t + \frac{U_g}{R_p} \sin \omega t = \frac{U_g}{Z_p} \sin (\omega t + \phi_p) \quad (2.41)$$

โดยที่

$$X_p = \frac{1}{\omega C_p}, Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}, \phi_p = \tan^{-1} \frac{X_p}{R_p} \quad (2.42)$$

จะได้ว่าค่าคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้ามีค่าตามสมการที่ (2.43)

$$i_{oz}(t) = \frac{1}{R_p} U_{oz}(t) \pm \frac{1}{X_p} \sqrt{U_g^2 - U_{oz}^2(t)} \quad (2.43)$$

เมื่อกำหนดให้ $U_{oz} = 0$ จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สามารถคำนวณตามสมการที่ (2.44)

$$I_0 = \pm \frac{U_g}{X_p} \quad (2.44)$$

เพราะฉะนั้น จากการวัดค่าของกระแสไฟฟ้า I_0 ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าสมมูล C_p ที่ต่อขนานอยู่กับตัวต้านทานสมมูล R_p ซึ่งมีค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าสมมูล C_p มีค่าเท่ากับ

$$C_p = \frac{I_0}{\omega U_g} = \frac{I_0}{2\pi f U_g} \quad (2.45)$$

ค่าประจุไฟฟ้าในชุดอิเล็กทรอนิกส์ของการจำลองชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอ นั้น สามารถหาค่าได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าตามสมการที่ (2.46)

$$i_{oz}(t) = \frac{dq_{oz}(t)}{dt} \quad (2.46)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.46) จะได้ค่าประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$q_{oz}(t) = C_p U_{oz}(t) + \frac{1}{R_p} \int U_{oz}(t) dt \quad (2.47)$$

ในกรณีนี้แหล่งจ่ายมีค่าแรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ (2.40) จะทำให้ได้ค่าประจุไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้จาก

$$q_{oz}(t) = C_p U_g \sin \omega t - C_R U_g \cos \omega t = C_E U_g \sin(\omega t - \phi_q) \quad (2.48)$$

โดยที่

$$C_R = \frac{1}{\omega R_p}, C_E = \sqrt{C_p^2 + C_R^2}, \phi_q = \tan^{-1} \frac{C_R}{C_p} \quad (2.49)$$

และค่าคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้า-ประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$q_{oz}(t) = C_p U_{oz}(t) \pm C_R \sqrt{U_g^2 - U_{oz}^2(t)} \quad (2.50)$$

ถ้ากำหนดให้ค่า $U_{oz} = 0$ จะได้ค่าประจุไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเท่ากับ

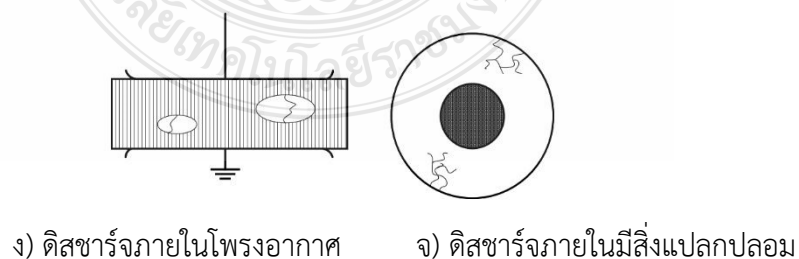
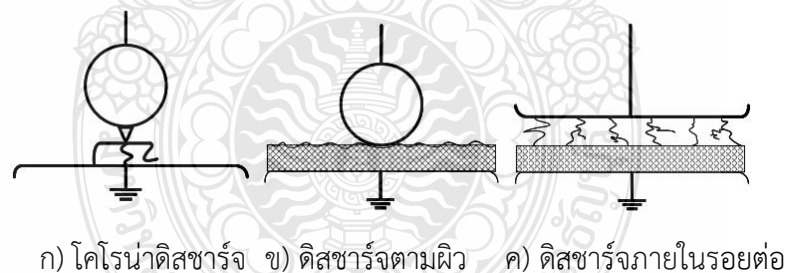
$$Q_0 = \pm C_R U_g \quad (2.51)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานสมมูล R_p ที่ต่อขนานกับค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าสมมูล C_p ของชุดอิเล็กทรอนิกส์สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.52)

$$R_p = \frac{U_g}{\omega Q_0} = \frac{U_g}{2\pi f Q_0} \quad (2.52)$$

2.8 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD)

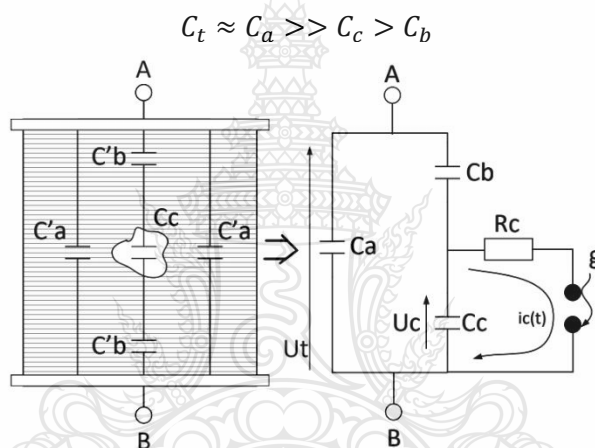
การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) คือ การส่งผ่านทางไฟฟ้าไม่เชื่อมโยงเข้าหากันแบบโดยตรงระหว่างชุดอิเล็กทรอนิกส์ ที่เกิดขึ้นกับฉนวนลักษณะที่เป็นก๊าซ ของเหลว หรือ ของแข็ง หากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น จะมีผลทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้า มีแสงเสียงของกระแสพัลส์วงจรไฟฟ้ากำลังสูญเสียได้อิเล็กทรอนิกส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูง สูญเสียปฏิกิริยาทางเคมี และเกิดความร้อนสะสมซึ่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ 1) โคโรนาดิสชาร์จ 2) ดิสชาร์จตามผิว และ 3) ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงในรูปที่ 2.18 [10]



รูปที่ 2.18 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน

2.8.1 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน

วัสดุที่เป็นฉนวนและมีโพรงภายในเนื้อฉนวนและตัวฉนวนจะถูกวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B แสดงในรูปที่ 2.13 โดยเขียนสมการหาค่าที่แทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับตัวโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนสมการหาค่าแทนด้วยความจุไฟฟ้า C'_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะคำนวณรวมกันได้เป็น C_b ส่วนตัวของฉนวนที่สมบูรณ์โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C'_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.18 ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของการใช้วัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b นั่นคือค่าที่ได้



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน [10]

หากมีแรงดันที่ป้อนทำให้แรงดันตกคร่อมตัวโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c จะทำให้เกิดลักษณะการเบรกดาวน์เกิดขึ้นในโพรงก๊าซ ซึ่งแทนด้วยช่องว่างอากาศ (g) โดยมีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวกำจัดการระคายเคือง $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์กว้างมีหน่วยเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

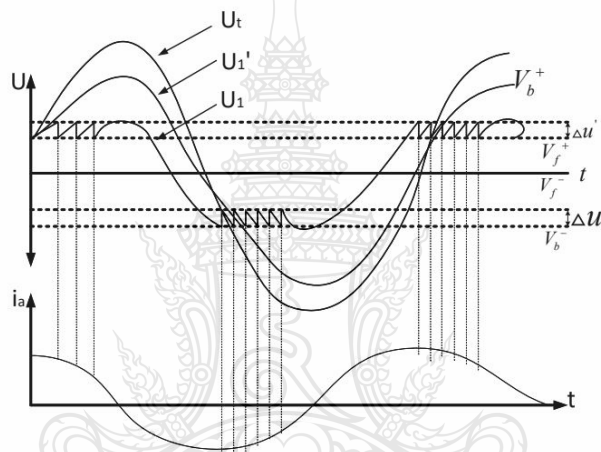
$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.53)$$

กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในซึ่งไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ของวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.54)$$

2.8.2 ธรรมชาติของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

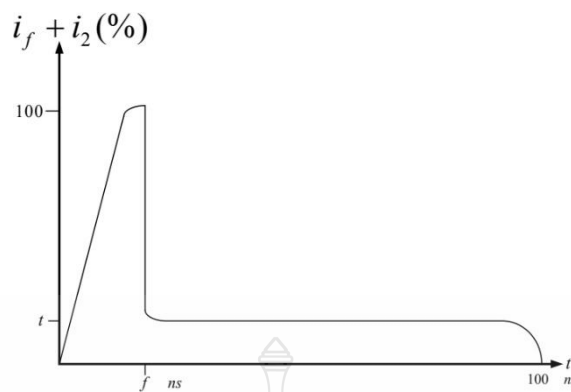
ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.19 โดยที่ U_t คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ U_b คือแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซ U_r คือแรงดันหลังเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซ U_1 คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซ U_1' คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซถ้าไม่มีการเกิด PD และ i_a คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

2.8.3 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในช่องว่างอากาศหรือโพรงก๊าซเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.20 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านช่องว่างอากาศจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านช่องว่างอากาศสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านช่องว่างอากาศหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้ จะยังคงไหลต่อไปอีก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาที ถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 10 เมกะเฮิรตซ์ขึ้นไป และอาจมีความกว้างถึง 200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะการเกิดทรีอิง (treeing) ในฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด

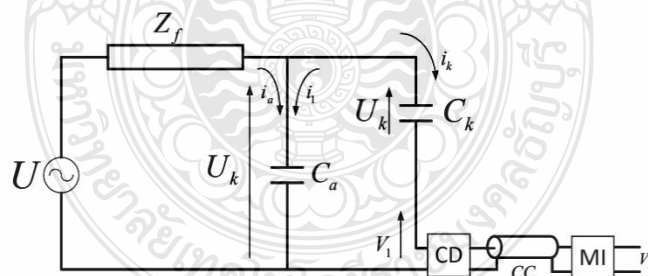


รูปที่ 2.21 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับช่องว่างอากาศเล็กๆ

2.8.4 หลักการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD)

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 602270:1998 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test object) C_a ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.22 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้ [10]

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD ที่แรงดันทดสอบเป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายเช่น ฮาร์โมนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้นและหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าว ต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่นตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลด PD

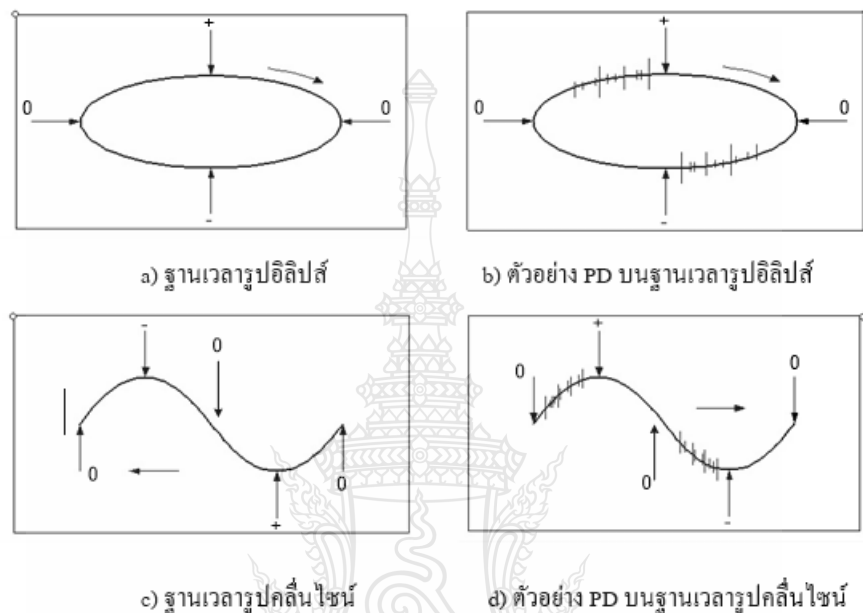
3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a , C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือเป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากคอยๆป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ทำให้ C_k จะดิสชาร์จประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i_i ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย C_k , C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.8.5 การแสดงผลดิซชาร์ทบางส่วน

การวัด PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt (μV), picocoulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมี

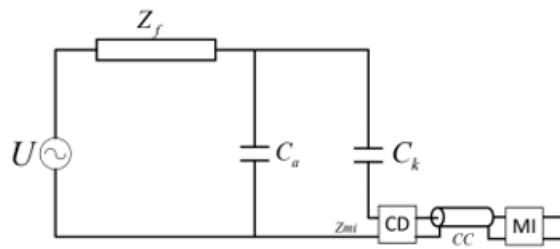
เครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวกยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.15 a) และ b) หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.15 c) และ 2.15 d) การแสดง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงบนฐานเวลารูปอีลิปส์ มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร



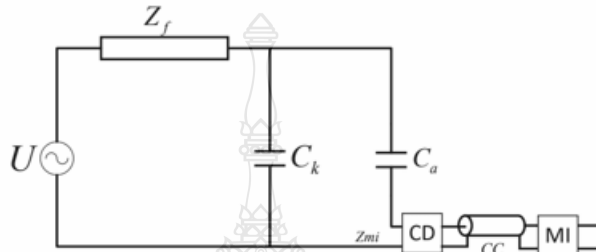
รูปที่ 2.23 การแสดงผลของ PD

2.8.6 การต่อระบบวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ

การต่อระบบวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ซึ่งมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่า อุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์ Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในรูปที่ 2.24 a) และ b) ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับ PD วิธีตรง (straight detection circuit) โดยกำหนดให้ U คือ แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ Z_f คือ ตัวกรอง Z_{mi} คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ CC คือ เคเบิลวัด C_a คือ ตัวเก็บประจุวัสดุทดสอบ C_k คือ ค่าประจุคาบเกี่ยว CD คือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว



a) CD ต่ออนุกรมกับ C_k



b) CD ต่ออนุกรมกับ C_a

รูปที่ 2.24 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง

ความแตกต่างของวงจรแบบ a) และแบบ b) คือ แบบ a) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ b) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ C_a แบบ b) จะมีความไวสูงกว่าเพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_a ค่าเก็บประจุทดสอบสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

2.9 การผสมโอโซนกับน้ำ

กรรมวิธีการผสมโอโซน เพื่อให้โอโซนผสมกับน้ำและมีความเข้มข้นของปริมาณโอโซนในการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น พบว่าสามารถดำเนินการ ดังนี้

2.9.1 ระบบการกระจายฟองอากาศ (Aeration system) ดำเนินการได้ดังนี้

ใช้ปั๊มลมดันก๊าซโอโซนเข้ากับน้ำผ่านหัวทรายหรือหัวกระจายอากาศ ตัวขนาดฟองอากาศของโอโซนจะขึ้นกับคุณภาพของหัวกระจายอากาศ โดยกรรมวิธีนี้เหมาะสำหรับการใช้น้ำที่มีเวลาในการพักอยู่ในถังเก็บเป็นเวลานาน วิธีกรรมวิธีนี้มีข้อดีคือ ใช้งานง่ายและราคาไม่สูงมาก และข้อเสียของกรรมวิธีกรรมวิธีนี้คือ ได้ประสิทธิภาพการผสมโอโซนต่ำ คุณภาพน้ำไม่ควรมีสิ่งเจือปนเนื่องจากจะทำให้

หัวกระจายฟองอากาศอุดตัน และวิธีนี้ไม่เหมาะกับระบบผลิตน้ำที่ต้องการความต่อเนื่องในการผลิตและมีเวลาที่น้ำพักในถังน้อย ซึ่งระบบการกระจายฟองอากาศมีข้อจำกัดในการติดตั้งคือ ต้องวางหัวกระจายฟองอากาศ และการติดตั้งต้องติดตั้งให้สูงกว่าระดับน้ำเพื่อป้องกันระบบน้ำไหลย้อนกลับเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซน

2.9.2 ระบบการผสมโอโซนผ่านหัวเวนทรี (Ventury injection system)

ใช้ระบบเวนทรี อินเจคเตอร์เป็นตัวดูดให้อโอโซนละลายในน้ำอาศัยหลักการการสร้าง ความแตกต่างของแรงดันให้เกิดสุญญากาศและดูดก๊าซโอโซนในปริมาณที่ต้องการได้ ตัวขนาด ฟองอากาศจะเล็กมารวมถึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบกระจายอากาศ วิธีนี้เหมาะกับระบบการที่ ต้องการผลผลิตมากและมีความต่อเนื่อง วิธีการนี้มีข้อดีคือ ให้ประสิทธิภาพการผสมโอโซนกับน้ำที่ดีให้ ผลลัพธ์ที่แน่นอน รวมซ่อมซ่อมบำรุงดูแลง่าย และข้อเสียของกรรมวิธีการนี้คือ มีค่าใช้จ่ายที่สูงในการ ติดตั้งและการเดินระบบการทำงาน ซึ่งระบบการผสมโอโซนผ่านหัวเวนทรีมีข้อจำกัดในการติดตั้งคือ ต้องเลือกขนาดและแรงดันของเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับขนาดของเวนทรี อินเจคเตอร์รวมถึงต้อง เลือกขนาดของถังผสมโอโซนในเวลาที่เหมาะสมกับน้ำตามที่กำหนด

2.10 การล้างทำความสะอาดด้วยโอโซน

การล้างทำความสะอาดด้วยโอโซนต้องคำนึงถึงปริมาณโอโซนที่ตกค้าง (Residue Ozone) อยู่ในน้ำ เพราะหากไม่พบปริมาณโอโซนตกค้างในน้ำ จะส่งผลถึงการใช้งานที่ไม่มีประสิทธิภาพ โดยการใช้ งานระบบโอโซนเพื่อล้างทำความสะอาดต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

2.10.1 ปริมาณโอโซนที่เครื่องกำเนิดโอโซนผลิตได้ต้องมีปริมาณเพียงพอในการใช้งาน

2.10.2 ความเข้มข้นที่เครื่องกำเนิดโอโซนผลิตได้ เมื่อเทียบกับอากาศที่ใช้ในการผลิต ความเข้มข้นต้องสูงเพียงพอ เนื่องจากความเข้มข้นของโอโซนที่เครื่องกำเนิดโอโซนที่ใช้ผลิตจะมีผลต่อ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้

2.10.3 ปริมาณโอโซนที่ตกค้างในน้ำ จะเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสิ่งปนเปื้อนในน้ำ ดังนั้น โอโซนที่ละลายน้ำต้องมีความเข้มข้นที่เพียงพอ

2.10.4 ระบบผสมโอโซนกับน้ำ เนื่องจากโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดโอโซนจะอยู่ใน ลักษณะก๊าซซึ่งต่างสถานะกับน้ำ จึงจำเป็นต้องมีระบบผสมที่เพียงพอที่จะทำให้โอโซนละลายได้ดี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิทยานิพนธ์

3.1 แผนการดำเนินการและขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

แผนการดำเนินการในงานวิจัยนี้ได้มีการวางแผนการทำงานเพื่อให้ให้ทราบระยะเวลาขั้นตอนการทำงาน การทดสอบ การสรุปผลทั้งหมดของงานวิจัย และเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นในการทำงาน ทางผู้วิจัยจึงได้จัดทำแผนการดำเนินงานมาพอสังเขปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนงานในการดำเนินการวิจัย

ลำดับ	แผนงานในการดำเนินการ	ปี พ.ศ. 2565					ปี พ.ศ. 2566								
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1	กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับ														
2	ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง														
3	ทำการออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซโทปหลักการโคโรนา ดิสชาร์จ														
4	สร้างเครื่องกำเนิดไอโซโทปจากการออกแบบและที่ได้ศึกษา														
5	วัดค่าของเครื่องกำเนิดไอโซโทปที่สร้างและออกแบบ														
6	นำเครื่องไอโซโทปที่ออกแบบและสร้าง ทดสอบกับขั้นตอนการล้างซากไปในโรงงานอุตสาหกรรมที่ขนาด 30,000 ตัวต่อชั่วโมง														
7	วัดค่าผลการฆ่าเชื้ออัลโมเนลล่าก่อนและหลังการใช้เครื่องกำเนิดไอโซโทปในการฆ่าไปในโรงงานอุตสาหกรรม														
8	เผยแพร่ผลงานส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ ตีพิมพ์ผลงานในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (EMSES 2022 ครั้งที่ 15)														
9	จัดทำวิทยานิพนธ์ บทที่ 1 - 3														
10	สอบหัวข้อวิทยานิพนธ์														
11	จัดทำวิทยานิพนธ์ บทที่ 4 - 5														
12	สอบปกป้องวิทยานิพนธ์														
13	จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์														
14	ส่งข้อมูลฉบับสมบูรณ์เข้าระบบ IThesis														

3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแบบพัลส์วิดโมดูลเลชั่น

ในการออกแบบแหล่งจ่าย และตัววงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น แรงดันสูงความถี่สูง ทางผู้วิจัยคำนึงถึงการซ่อมแซม การถอดเปลี่ยน และ อุปกรณ์ที่เป็นสากล หาง่ายตามท้องตลาด ตรวจสอบวงจรเพื่อแก้ไขปัญหาได้ง่าย สามารถถอดเปลี่ยนได้ทันที เพื่อลดเวลาการหยุดการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม โดยการคำนวณออกวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น ทางผู้วิจัยเลือกใช้ตามคำแนะนำจากผู้ผลิตอุปกรณ์ในการเลือกค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของขา 5 Ct และ ขา 6 Rt รวมถึงพิจารณาใช้ตารางความสัมพันธ์ในการคำนวณหาค่าจากสมการ ตามความถี่ที่ต้องการออกแบบที่ 40 กิโลเฮิร์ต ส่วนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบ็คแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสูตรสมการหาค่า และส่งที่วงจรที่ออกแบบและคำนวณค่าให้ผู้เชี่ยวชาญที่มีอาชีพผลิตโดยตรงดำเนินการผลิตหม้อแปลง และวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น ตามที่ออกแบบ โดยมีรายละเอียดตัววงจร ดังนี้

3.2.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบ็ค ออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง มีแรงดันขาเข้าที่ 12 โวลต์ และให้แรงดันขาออกที่ 15 กิโลโวลต์ ทำงานในช่วงความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ โดยหลักการคำนวณออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบ็ค สามารถคำนวณได้ดังนี้

1) คำนวณคาบเวลาการทำงาน

$$\text{จากสมการ} \quad T = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

$$\text{แทนค่า} \quad = \frac{1}{40 \times 10^3} \quad (3.2)$$

ดังนั้นคาบเวลาการทำงาน $T = 25$ ไมโครวินาที

2) คำนวณค่าอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

แรงดันไฟฟ้าเข้า $V_{in} = 12$ โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าออก V_{out} ที่ออกแบบที่ 15 กิโลโวลต์กำหนดรอบขดลวดปฐมภูมิที่ 10 รอบ เพื่อคำนวณหาค่าขดลวดทุติยภูมิ

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (3.3)$$

$$N_s = \frac{(15 \times 10^3) \times 10}{12} \quad (3.4)$$

ดังนั้นจำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$N_s = 12,500 \text{ รอบ}$$

3) คำนวณหาค่าช่วงเวลาสวิตช์ทำงาน t_{on} ได้จากสมการ

$$\text{สมการหาค่า} \quad t_{on} = \frac{(V_o + V_D) \times \left(\frac{N_p}{N_s}\right) \times 0.8T}{(V_{in} - V_{sat}) + (V_o + V_D) \times \left(\frac{N_p}{N_s}\right)} \quad (3.5)$$

กำหนดให้แรงดันตกคร่อมที่ตัวไดโอด $V_D = 1 \text{ V}$

$$\text{แทนค่า} \quad t_{on} = \frac{((25 \times 10^{-6}) + 1) \times \left(\frac{10}{12,500}\right) \times (0.8 \times (25 \times 10^{-4}))}{(12 - 1) + ((15 \times 10^3 + 1) \times \left(\frac{10}{12,500}\right))}$$

เพราะฉะนั้น ช่วงเวลาที่สวิตช์ทำงาน $t_{on} = 19.999$ ไมโครวินาที

จากคู่มือวงจร IC TL494 เพื่อใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์วิดโมดูเลชั่นระบุพิกัดทำงานที่ 20 ไมโครวินาที ดังนั้นวงจรที่ออกแบบจึงเลือกใช้งานที่ 20 ไมโครวินาที

4) คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก คำนวณได้ดังนี้

$$\text{สมการหาค่า} \quad V_{out} = \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \times (V_{in} - V_{sat}) \times t \quad (3.7)$$

โดย T คือ คาบเวลาการทำงานของสวิตช์

t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส

N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์

V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์

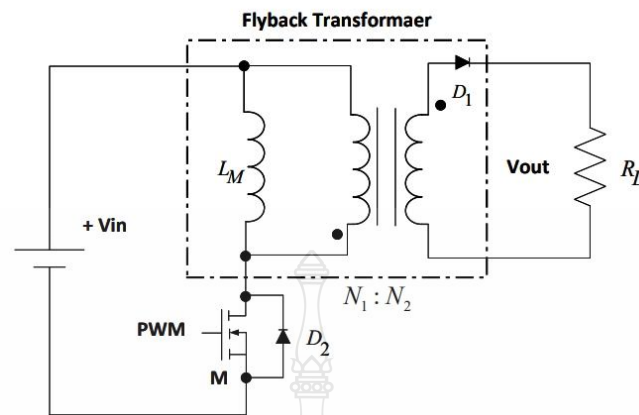
V_{sat} คือ แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว

V_p คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ไดโอดขณะนำกระแส

หาค่าประมาณโดยใช้สมการที่ (3.4) ได้ค่า V_{sat} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ -6 โวลต์นำค่า V_{sat} มาแทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{12,500}{10}\right) \times (12 - (-6)) \times (20 \times 10^{-6})}{[(50 \times 10^{-6}) - (20 \times 10^{-4})] - 1}$$

ดังนั้นค่าช่วงเวลาพัลส์ที่ทำงาน $V_{out} = 14,999 \text{ V}$ หรือ ประมาณที่ 15 kV



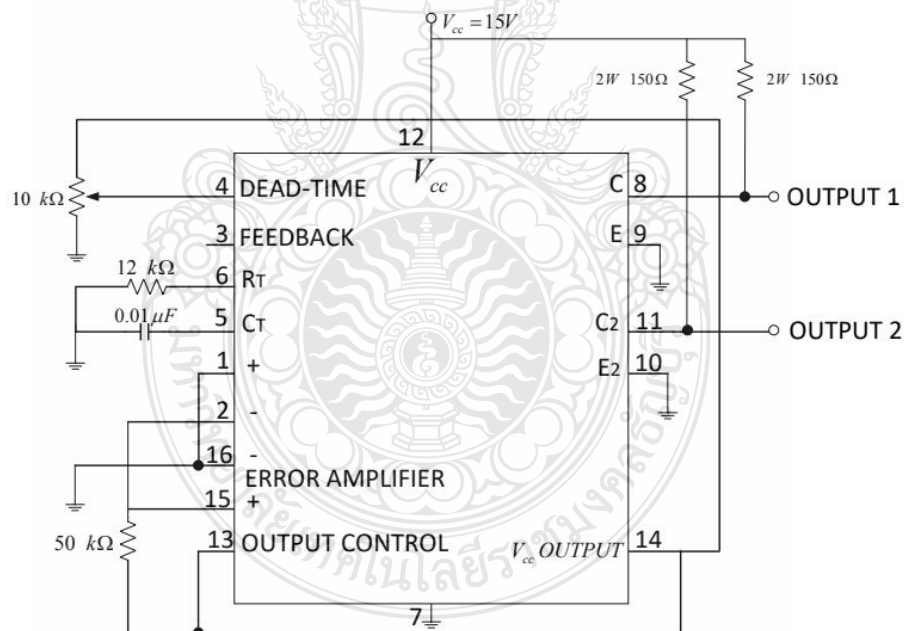
รูปที่ 3.1 วงจรทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบ็ค

3.2.2 การออกแบบวงจรพัลส์วิตโมดูลเลชั่นด้วย IC TL494 Pulse Width Modulation ภาคควบคุมสัญญาณพัลส์ เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์วิตโมดูลเลชั่นควบคุมการทำงานของวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์ ซึ่ง ทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าตามไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยการทำงานจะอาศัย การป้อนกลับค่าแรงดันเอาต์พุตเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ผลของค่าความแตกต่างที่ได้จะถูก ขยายด้วยวงจรขยายความต่าง Error Amplifier ก่อนที่จะส่งไปยังวงจรพัลส์วิตโมดูลเลชั่นเพื่อกำเนิด สัญญาณที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมสำหรับใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติของไอซี TL494 ดังแสดงที่ตาราง 3.2

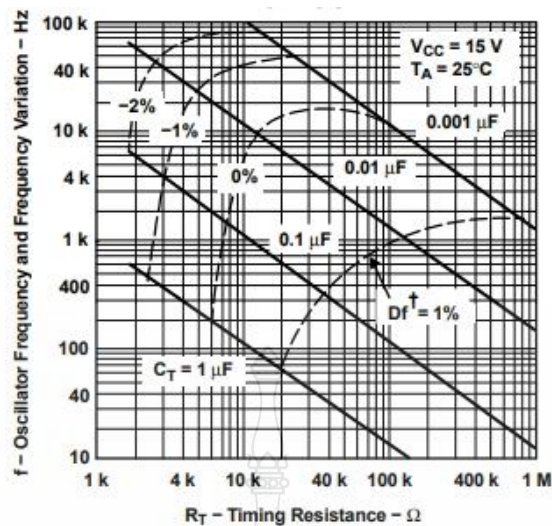
ตารางที่ 3.2 ลักษณะสมบัติของ ไอซีเบอร์ TL494

องค์ประกอบ	ขนาดพิกัดใช้งาน
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V_{CC})	กระแสตรง 7 ถึง 40 โวลต์
กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o)	40 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o)	200 มิลลิแอมป์
ความต้านทาน (R_t)	1.8 ถึง 500 กิโลโอห์ม
ค่าคาปาซิเตอร์ (C_t)	0.47 ถึง 10,000 นาโนฟารัด
ความถี่สวิตช์ (f_{osc})	1 ถึง 300 กิโลเฮิรตซ์

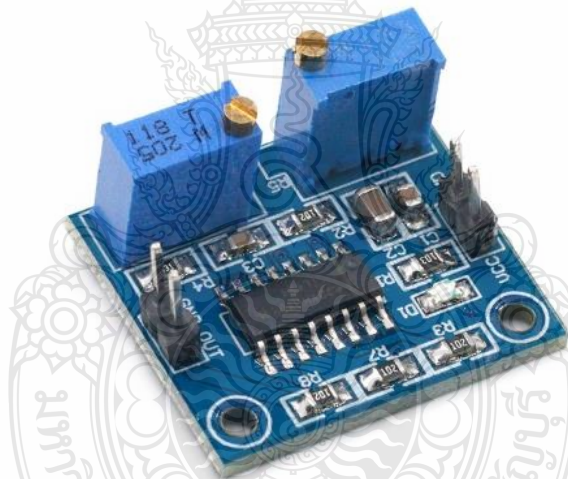
อุปกรณ์สำคัญสำหรับควบคุมการป้อนกลับสำหรับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิงจะอยู่ในรูปแบบ วงจรรวมของไอซีสำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้ามาใช้ในการออกแบบสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีโครงสร้างภายในและขาใช้งานของไอซี TL49 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การทำงานของวงจรภายในของไอซีได้นำหลักการโหมดควบคุมจาก แรงดันมาใช้งาน จะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันเอาต์พุตและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจร ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความต่าง Error Amp ก่อนที่จะส่งไปยังวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความต่างจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยอีกครั้ง ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่นจะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม มีคาบเวลา คงที่เท่ากับคาบเวลาแรงดันฟันเลื่อยและความกว้างตามการเปลี่ยนแปลงผลโมดูลเลชั่นของค่า แรงดันที่ขาเข้าสู่พัลส์วิดโมดูลเลชั่น จากการคำนวณหาค่า R_t ที่ขา 6 และ C_t ที่ขา 5 เพื่อออกแบบความถี่ที่ต้องการที่ 40 kHz จากสูตร $f = 1/(2R_t C_t)$ จะได้ค่าความต้านทานของวงจรที่ 2.5 กิโลโอห์ม และจากตารางความสัมพันธ์ของความต้านทานและตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่นที่ 0.01 ไมโครฟารัด



รูปที่ 3.2 วงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น (Pulse Width Modulation) ของ IC TL494



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ในการออกแบบความถี่จอร์พัลส์วิตโมดูลเลชั่น โดยใช้ IC TL494 (Texas Instruments)



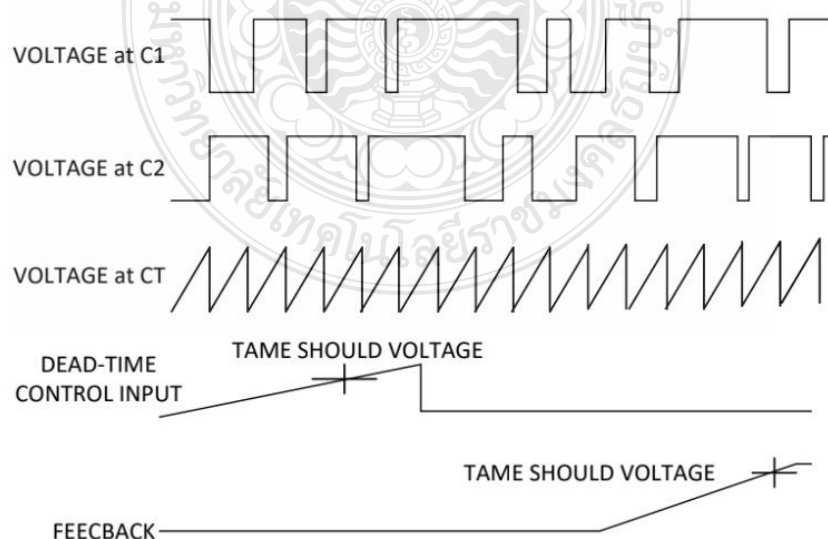
รูปที่ 3.4 วงจร PWM ของ IC TL494 ที่ความถี่ปรับค่าได้ที่ 40 kHz (MT Technology)

1) การกำหนดคาบเวลาการทำงานวงจรของ ไอซีเบอร์ TL494 เป็นวงจรพัลส์วิตโมดูลเลชั่นที่มี ความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์จะถูกกำหนดโดยค่าของความต้านทาน T_R และค่า ของคาปาซิเตอร์ T_C จากภายนอกที่ขา 9 และขา 5 ของไอซี คาบเวลาการทำงานกำหนดได้จากการ คำนวณตามสมการดังนี้

$T = (3.9) \text{ เมื่อ } T \text{ คือ คาบเวลาทำงาน}$

$\frac{1}{fT} = RT \text{ คือ ความต้านทานใช้งาน}$

2) การทำงานของไอซีสำหรับคงค่าแรงดันไฟฟ้า ของไอซีเบอร์ TL494 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์โดยความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะได้มาจากการเปรียบเทียบของ สัญญาณฟันเลื่อยที่ขา S กับแรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากวงจรขยายความต่าง Error Amp ทั้งสองตัวผ่านทาง PWM Comparator ส่วน NOR Gate ที่ควบคุมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q1 และ Q2 จะทำงาน ก็ต่อเมื่อขา Ck ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ Low ซึ่ง Ck จะมีสถานะ Low ได้เมื่อแรงดันของ สัญญาณ ฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้งสองตัวนั้นคือ แรงดันป้อนกลับจาก เอาต์พุตหากมี ค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะมีค่าลดลง ในทางกลับกันแรงดันป้อนกลับหากมีค่าลดลง ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีนี้อาจกำหนดให้มีค่า มากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขา 3 จาก 0.5 ถึง 3.5 โวลต์ ส่วน วงจรขยายความต่าง Error Amp ทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมดตั้งแต่ -0.3 ถึง -2 โวลต์ และสามารถใช้ในการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ได้วงจรขยาย ความต่าง Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะให้สถานะ High (Active high) โดยต่อกันอยู่ใน ลักษณะ OR ที่ขา Non Inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้วงจรขยายความ ต่าง Error Amp ตัวที่ ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาต์พุต พัลส์ของไอซี เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความต่าง Error Amp ผลต่าง ของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงจึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180 องศา เมื่อแรงดัน เอาต์พุตมีค่า มากขึ้นความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่น จะมีค่าลดลง และช่วง นำกระแสของ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ก็จะลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุต ของวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ได้



รูปที่ 3.5 คลื่นสัญญาณเอาต์พุต ของพัลส์วิดโมดูลเลชั่น (Pulse Width Modulation)

3) การกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ของไอซีเบอร์ TL494 สามารถออกแบบกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี หากแรงดันไฟฟ้า ที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เพอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ต่ออยู่ภายในวงจรของไอซี ดังนั้นช่วงเวลาทำงาน t_{ON} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีเมื่อต่อขา 13 (Output Control) เข้ากับขาที่ 14 ที่เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (+5 Vref) จะให้ค่าเท่ากับ 48 เพอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลา และเมื่อต่อขาที่ 13 ลงกราวด์จะให้ค่าเท่ากับ 96 เพอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลา

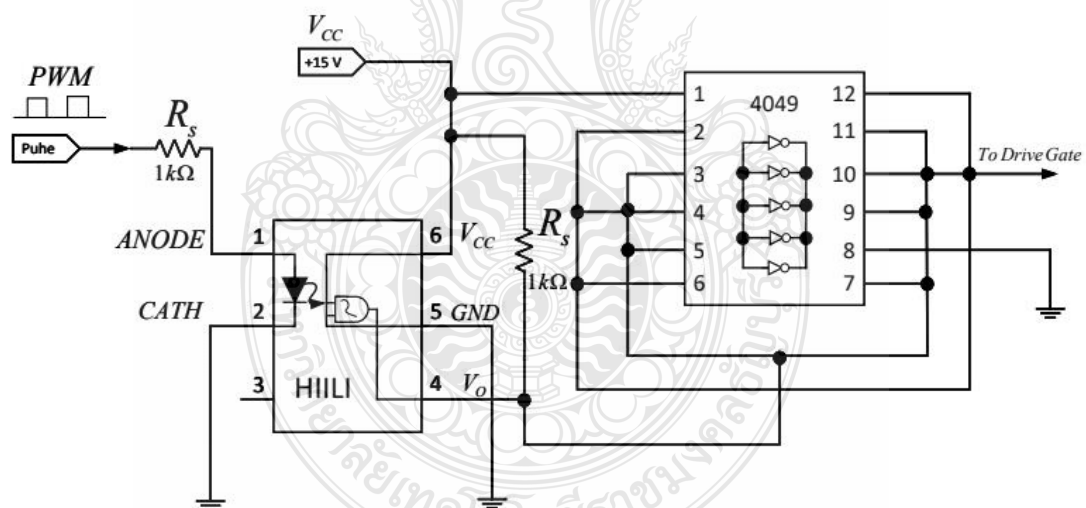
4) การเลือกใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ที่เอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากเอาต์พุต Q1 และ Q2 สามารถทำงานได้ 2 โหมดคือ ทำงานพร้อมกันหรือสลับกัน ได้ ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 โดยขณะที่คาปาซิเตอร์ CT ดิสชาร์จเอาต์พุตของ Dead-Time Comparator จะให้สัญญาณพัลส์ออกมา Ck จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High ต่อเข้ากับขา 4 ที่เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (+5 Vref) เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานตาม การควบคุมของ Flip-Flop ในกรณีนี้คาบ เวลาการทำงานจะเป็นสองเท่าของค่าคาบเวลาสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี แต่ถ้าทำงานพร้อมกันจะสามารถทำการขนานเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 เข้าด้วยกันได้ ซึ่งทำให้นำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของ ไอซี ที่ได้ทำการสร้างขึ้น สำหรับไอซีเบอร์ TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $7 \leq V_{CC} \leq 40$ โวลต์ มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ภายใน V_{ref} เท่ากับ 5 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง ± 1.5 เพอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อย กว่า 50 มิลลิโวลต์เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส การออกแบบโดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้งานในวงจร 15 โวลต์จ่ายให้กับไอซีเบอร์ TL494 ที่เป็นตัวกำหนดและสร้างสัญญาณพัลส์วิดโมดูลเลชั่น โดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้ (R-adjust) ขนาด 10 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่สำหรับปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ และมีตัวเก็บประจุ (CT) ขนาด 0.01 ไมโครฟารัด เป็นตัวกำหนดความถี่ประมาณ 0 ถึง 40 กิโลเฮิรตซ์ โดยความถี่ที่ต้องการจะอาศัยการปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (R-trim) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงวงจรภาคควบคุม สัญญาณพัลส์ เมื่อได้สัญญาณพัลส์วิดโมดูลเลชั่น ตามค่าความถี่ที่ต้องการแล้วจะส่งสัญญาณดังกล่าวไป ยังขา 9 และขา 10 ของไอซีเบอร์ TL494 ไปยังวงจรภาคขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ต่อไป

ภาควงจรขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) มีการออกแบบให้ใช้ไอซี Optocoupler เบอร์ H11L1 เพื่อทำหน้าที่สำหรับช่วยแยกส่วนที่เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงสูงออกจากส่วนที่เป็น

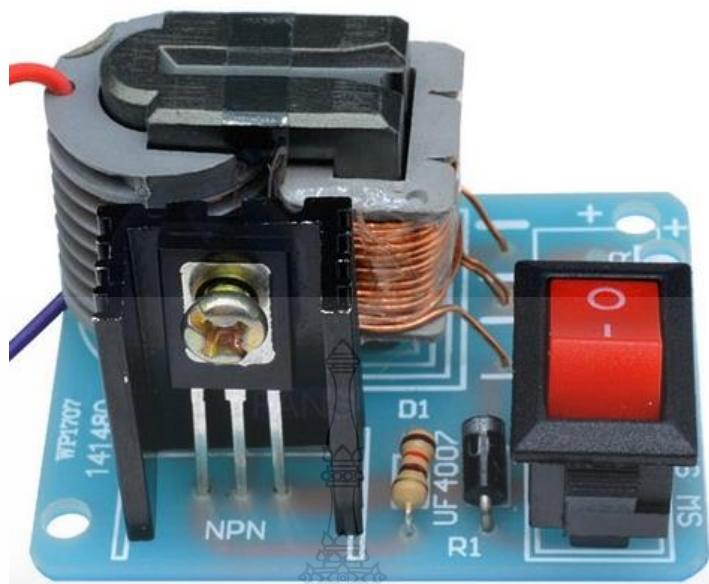
แรงดันไฟฟ้าแรงต่ำออกจากกันโดยสิ้นเชิง หากส่วนใดเกิดการลัดวงจรจะไม่สร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์อีกด้านหนึ่งคุณสมบัติในการใช้งานของไอซีแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติการใช้งานของไอซี Octocoupler H11L1

องค์ประกอบ	ขนาดพิกัดใช้งาน
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V_{CC})	กระแสตรง 3 ถึง 15 โวลต์
กระแสไฟฟ้าอินพุตเพื่อขับวงจร	10 มิลลิแอมป์
กินกระแส	5 มิลลิแอมป์
กระแสต้านขาออกเพื่อขับเกต	1.6 มิลลิแอมป์
ความถี่สวิทช์สูงสุด	100 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 3.6 วงจรภาคขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)



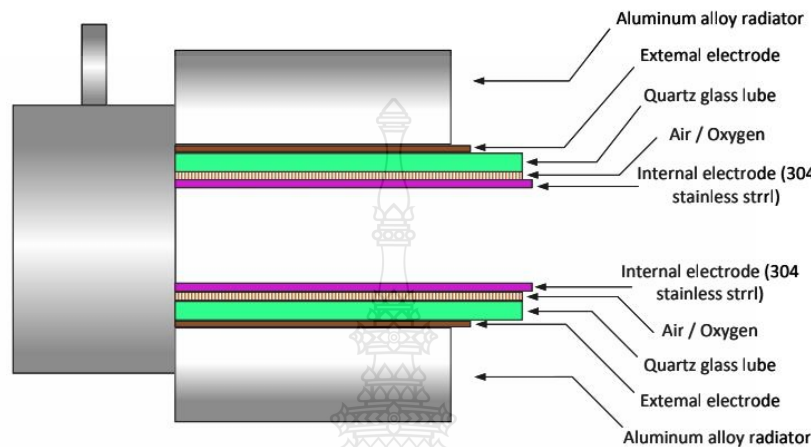
รูปที่ 3.7 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุต 15 kV วงจรขับพาวเวอร์มอสเฟต (Electronic-db)

การออกแบบวงจรภาคขับมอสเฟตกำลัง ที่สามารถแยกส่วนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงออกจากแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.6 เนื่องจากคุณสมบัติใช้งานของไอซี Optocoupler นั้นมีข้อจำกัดของกระแสไฟฟ้านำเข้าเอาต์พุตที่ได้จะไม่สามารถขับเกตมอสเฟตกำลังที่ต้องการกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงออกแบบให้ใช้ไอซี Optocoupler เบอร์ H11L1 ทำงานร่วมกับไอซี CMOS เบอร์ 4049 ที่มีคุณลักษณะการทำงานเป็นบัฟเฟอร์อินเวอร์ตให้กับวงจรในภาคขับเกตผ่านทางขาที่ 4 และ 6 โดยการทำงานของไอซีเบอร์ 4049 จะต่อขาของ CMOS ในลักษณะการต่อแบบขนานกัน จึงสามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อ นำไปสู่ที่ขาเกตของมอสเฟตกำลังที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงๆได้ และการทำงานร่วมกับไอซี CMOS ยังส่งผลทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟตกำลังได้รวดเร็วเพิ่มขึ้น

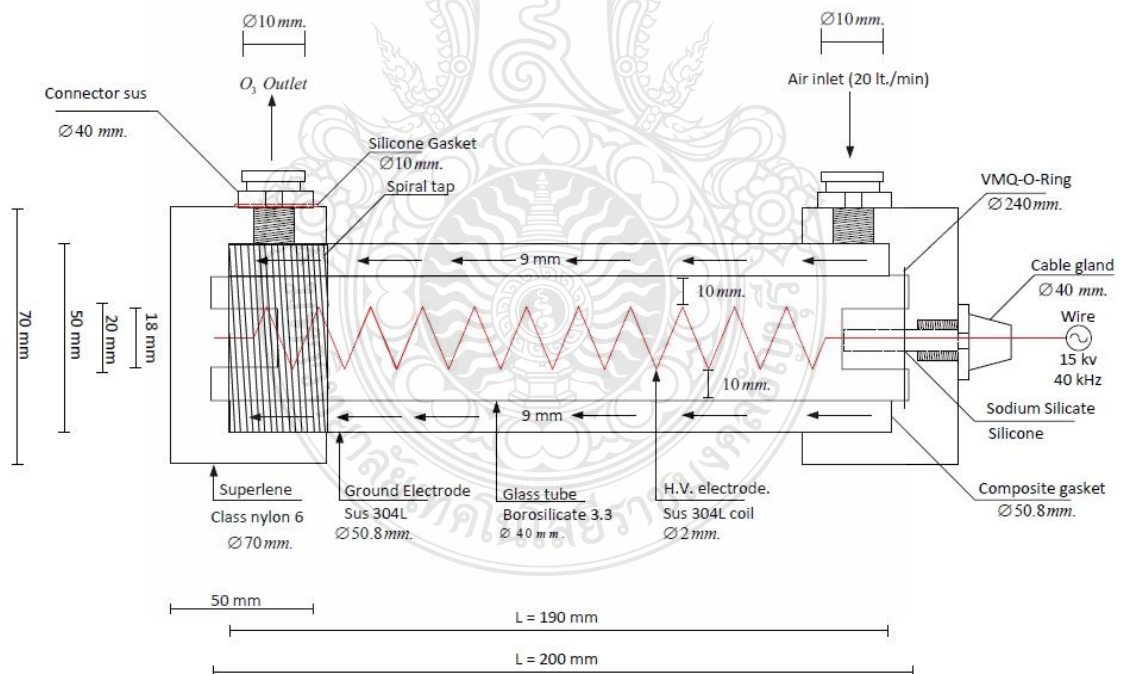
3.3 การออกแบบหลอดอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว การหยุดการผลิตจากเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เป็นผู้ประกอบไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะทำให้เกิดความเสียหายตั้งแต่ ค่าแรง ค่าพลังงาน เป็นต้นทุนในการทำธุรกิจ ดังนั้นการออกแบบชุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ทางผู้วิจัยจึงคำนึงถึงเหตุผลในข้อนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ต้องสามารถถอดเปลี่ยนรวดเร็ว เป็นอุปกรณ์ที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาดและเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อความร้อน ทนต่อการทำปฏิกิริยากับสารเคมี ชำรุดเสียหายได้ยาก โดยหลายละเอียดตัวชุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ได้ทำการออกแบบดังนี้

3.3.1 ทำการออกแบบโดยเลือกใช้ตัวหลอดอิเล็กโทรดลักษณะทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม เนื่องจากสามารถสร้างปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนได้สูงและเป็นรูปแบบที่ทนต่อแรงดันของอากาศได้ดี ระหว่างการสร้างปฏิกิริยาโคโรนาดีสชาร์จกับออกซิเจน ตัวหลอดอิเล็กโทรดจะให้ความร้อน และ สารเคมีกลุ่มโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นเป็นสารเคมีกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม



รูปที่ 3.9 ชุดหลอดผลิตก๊าซโอโซนที่จะดำเนินการออกแบบ

3.3.2. ตัวอิเล็กโทรดภายในเลือกใช้ลักษณะแบบขดลวด เป็นวัสดุที่ทำมาจากสแตนเลสชนิด 304L ที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ 0.03% มีคุณสมบัติความทนทาน มีความเหนียวสูง ต้านทานต่อการกัด

กร้อนของสารเคมี ทนความร้อนสูงมากกว่า 1,400 องศาเซลเซียส ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาโคโรนา ดิสชาร์จขณะเครื่องกำเนิดโอโซนทำงานที่ให้ความร้อน และ ปฏิกิริยาทางเคมีได้ ขนาดพื้นที่หน้าตัด ขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความยาวขดลวดขณะม้วน 190 mm รัศมีวงนอก 10 mm รัศมีวงใน 9 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อิเล็กโทรดภายในแบบขดลวดสแตนเลสชนิด 304L

3.3.3 ตัวไดอิเล็กตริกที่เลือกใช้เป็นวัสดุที่ทำมาจากหลอดแก้วชนิดโบโรซิลิเกต เนื่องจากตัววัสดุที่ใช้ทำแก้วโบโรซิลิเกต กลาส 3.3 จะมีทนความสามารถทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 400 กิโลโวลต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นหลอดแก้วที่ทนความร้อนได้ 1400 C สามารถใช้งานกับการอบหรือใช้งานกับเครื่องไมโครเวฟได้ ซึ่งแก้วประเภทนี้นิยมใช้ในงานห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์สารเคมี ขนาดความหนา 1 mm ความยาวของตัวหลอดแก้วไดอิเล็กตริก 200 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอก 40 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขอบใน 38 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 หลอดแก้วไดอิเล็กตริกแบบแก้วโบโรซิลิเกต กลาส 3.3(Graduated cylinder)

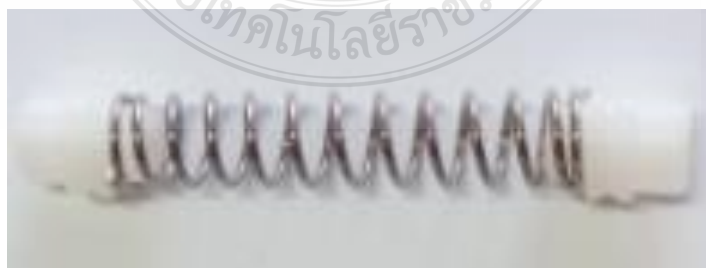
3.3.4 กราว์นอิเล็กโทรดที่เลือกใช้เป็นวัสดุที่ทำมาจาก ท่อสแตนเลสชนิด 304L ชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดภายในแบบขดลวด มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ 0.03 % มีคุณสมบัติความทนทาน

มีความเหนียวสูง ด้านทานต่อกัดกร่อนของสารเคมี ทนความร้อนสูงมากกว่า 1,400 องศาเซลเซียส ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาโคโรนาดีสชาร์จขณะเครื่องกำเนิดโอโซนทำงานที่ให้ความร้อน และ ปฏิกิริยาทางเคมีได้ ความยาว 190 mm ความหนา 2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอก 50.8 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขอบใน 56.8 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟต์อเล็กโทรแบบท่อสแตนเลสชนิด 304L(ศรีไทย สแตนเลส)

3.3.5 ฝาครอบชุดอเล็กโทร ทำจากวัสดุที่เรียกว่าซูปเปอร์ลีน Class Nylon6 ที่มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนสูง ทนสารเคมี ทนแรงกระแทก แรงเสียดทาน เสียดสี แรงเฉือน มีน้ำหนักเบา ใช้งานในความร้อนได้สูงขึ้น มีความเหนียว แต่ยืดหยุ่นตัวได้ดี การนำเอาซูปเปอร์ลีนมาเป็นฝาครอบปิดหัวท้ายเนื่องจากมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงถึง 40 kV/mm ทนความร้อนได้ที่ 165 องศาเซลเซียส นำมาใช้ในการป้องกันลัดวงจรต่อถึงกันของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอเล็กโทรกับกราฟต์อเล็กโทร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm กว้าง 50 mm กลึงเจาะขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.6 มีเซาะบ่าเพื่อใส่ o-ring และประเก็นชนิด composite gasket รองรับการรั่วซึมรวมถึงการขยับตัวของชุดหลอดอเล็กโทรและเจาะรูร้อยด้วยนอตยาวขันยึดทั้ง 4 มุมเพื่อรั้งตัวฝาครอบอเล็กโทรให้แน่นกระชับป้องกันการรั่วซึมของก๊าซโอโซน ดังแสดงในรูป 3.13



รูปที่ 3.13 ฝาครอบอเล็กโทรทำจากซูปเปอร์ลีนคาสไนลอน

3.3.6 ท่อยางส่งก๊าซโอโซน EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) เป็นยางชนิดที่ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ จากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี จึงใช้กับงานที่ต้องทนความร้อน และความเย็น ท่อยางทนการสึกกร่อนเสียดสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 10 mm ความหนาท่อยาง 2 mm สามารถตัดโค้งงอเข้ากับอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักรในการติดตั้งได้เป็นอย่างดี สามารถรองรับช่วงอุณหภูมิการใช้งาน -50 ถึง +160 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ท่อยางส่งก๊าซโอโซน EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)

3.3.7 ข้อต่อท่อส่งก๊าซโอโซน ใช้วัสดุที่ทำมาจากสแตนเลส 304 ที่ไม่ปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดข้อต่อตรงเกลียวนอก ขนาด 10 mm สามารถถอดเปลี่ยนได้หากมีการรั่วซึมของก๊าซโอโซนตัวเกลียวนอกนอกยาว 12 mm พันเกลียวด้วยเทปพันเกลียวแล้วทาด้วยน้ำยาเปอร์มาเทคเพื่อป้องกันการคลายตัวของข้อต่อและกันการรั่วซึมของก๊าซโอโซน โดยขันยัดเข้ากับฝาครอบชุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำเกลียวในไว้ รวมถึงทำเกลียวในที่ตัวกราวนอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 2 mm เพื่อรับอากาศที่จ่ายจากตัวปั๊มอากาศ และ ส่งจ่ายก๊าซโอโซนให้กับระบบการเติมน้ำลดอุณหภูมิเบื้องต้นของโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ข้อต่อท่อส่งก๊าซโอโซน

3.3.8 ยางโอริงกันรั่วซึม ทนความร้อนสูง ยาง VMQ (Silicones) มีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนความเย็นสูงอุณหภูมิสูงสุดที่รับได้ (Max Temperature) -100°C to 300°C Elongation : 100-900% Tensile Strength : 1.4 - 10 MPa ตัวคุณสมบัติของลูกยางจริง ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมัน

กันของเหลวและอากาศรั่วซึม การใช้ลูกยางโอริงในวัสดุหลากหลายประเภท เช่น ลูกสูบ ฝาปิด เครื่องยนต์ เกียร์ ชุดเบรค ข้อต่อลม ข้อต่อน้ำมัน จุกน้ำมัน ข้อต่ออุด และสามารถทนการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี โดยติดตั้งโดยทำการเจาะร่องทำเป็นบารองเพื่อให้เกิดรั่วไหลดกราวดือเล็กโตรด รวมถึง หลอดแก้วไดอิเล็กทริก กระชับแน่นไม่ให้เกิดการให้ตัวขยับตัวและกันการรั่วซึมของก๊าซไอโซนที่ ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ยางโอริงกันรั่วซึม ทนความร้อนสูง ยาง VMQ (Silicones)

3.3.9 ระบบจ่ายลม ใช้ปั๊มอากาศป้อนให้กับชุดหลอดอิเล็กโตรด โดยอากาศจะมีออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 21 ต่อหน่วยปริมาตร และความชื้นในอากาศ ซึ่งต้องใช้ตัวเรกูเรเตอร์เพื่อปรับแรงดันลมที่ 3 ลิตรต่อนาที และเพื่อกรองแยกเอาความชื้นออกจากตัวอากาศก่อนป้อนเข้าสู่เพื่อทำการทำปฏิกิริยาแตกตัวของออกซิเจนในหลอดอิเล็กโตรดสมบูรณ์มากที่สุดและลดความชื้นควบแน่นสะสมภายในหลอดอิเล็กโตรดจนทำให้เกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ระบบจ่ายลมออกซิเจนบริสุทธิ์และแห้ง

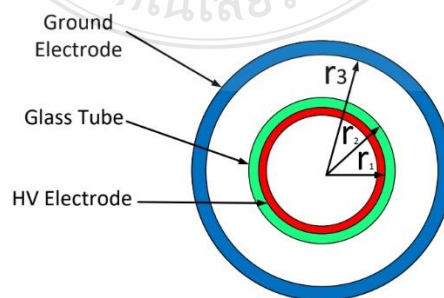
3.3.10 ระบบระบายความร้อนวงจรเครื่องกำเนิดไอออน เลือกใช้ขนาดกว้าง 100 mm ยาว 100 mm หนา 50 mm ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที และใส่ตัวซิลิกาเจล เพื่อป้องกันความชื้นสะสมในชุดเครื่องกำเนิดไอออนที่ออกแบบและสร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ระบบระบายความร้อนวงจรเครื่องกำเนิดไอออน

3.4 การคำนวณสนามไฟฟ้า

จากทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์ในแต่ละชั้นฉนวน โดยที่ r_1 เป็นรัศมีของอิเล็กโทรดภายในมีค่าเท่ากับ 1.7 ซม. r_2 เป็นรัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2.0 ซม. และ r_3 เป็นรัศมีของฉนวนชั้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.54 ซม. ระยะช่องว่างอากาศสำหรับดิสชาร์จ 0.54 ซม. ความยาวหลอดแก้ว 20 ซม. ค่าเปอร์มิติวิตีของแก้วเท่ากับ 3.5 ค่าเปอร์มิติวิตีของอากาศเท่ากับ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.27) และสมการ (2.31) ดังตัวอย่างการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 1 (E1) คือ หลอดแก้ว และสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 (E2) คือ อากาศ ที่ระดับแรงดัน 0-15 kV จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า [15]



รูปที่ 3.19 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวม

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 1 (E_1) คือ หลอดแก้ว ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 kV

$$E_{1\max} = \frac{\varepsilon_2 U}{r_1 \left(\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$= \frac{1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 15 \times 10^3}{1 \times \left[\left(3.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{2.54}{2} \right) + \left(1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{2}{1.7} \right) \right]}$$

$$= 15.01 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 (E_2) คือ อากาศ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 kV

$$E_{2\max} = \frac{\varepsilon_1 U}{r_2 \left(\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$= \frac{3.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 15 \times 10^3 \times \sqrt{2}}{2 \times \left[\left(3.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{2.54}{2} \right) + \left(1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{2}{1.7} \right) \right]}$$

$$= 37.17 \text{ kV/cm}$$

ค่าคาปาซิแตนซ์รวม

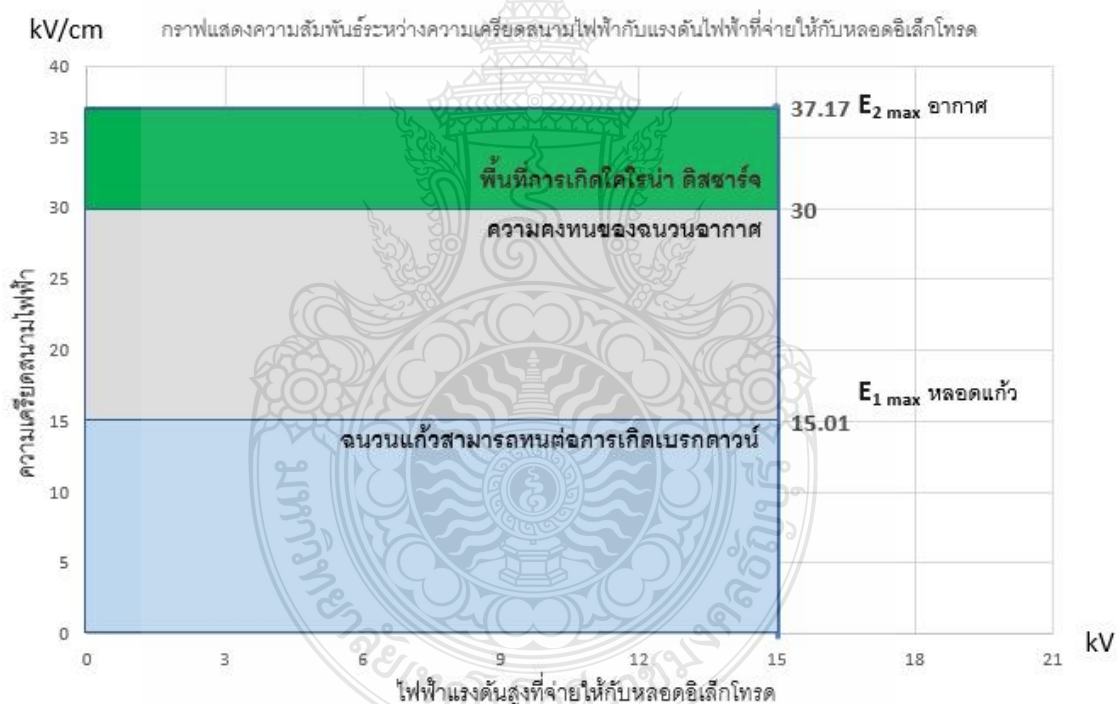
$$C_t = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$= \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times 1 \times 3.5}{(1 \times \ln \frac{2.54}{2}) + (3.5 \times \ln \frac{2}{1.7})}$$

$$= 2.4 \text{ nF}$$

เมื่อ	C_t	คือ	ค่าคาปาซิแตนซ์รวม (F/m)
	C_1	คือ	ค่าคาปาซิแตนซ์ของลวดแก้ว (F/m)
	C_2	คือ	ค่าคาปาซิแตนซ์ของอากาศ (F/m)
	ϵ_1	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของลวดแก้ว มีค่าอยู่ในช่วง 3.5-9 (เลือกใช้ 3.5)
	ϵ_2	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 F/m
	ϵ_0	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ หรือที่ว่าง มีค่าเท่ากับ 8.845×10^{-12} (F/m)

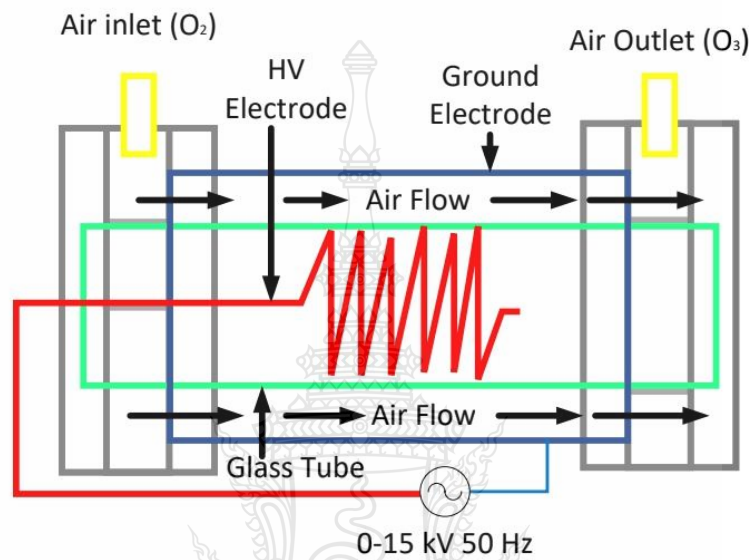
ในการเลือกใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของลวดแก้วเท่ากับ 3.5 เพื่อเป็นขีดจำกัดต่ำสุดในความทนทานของฉนวนที่เป็นแก้วที่นำไปในการคำนวณ



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-15 kV

จากรูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-15 kV จะเห็นได้ว่าในฉนวนชั้นที่ 2 ที่เป็นอากาศจะเกิดการเบรกดาวน์ที่ระดับแรงดันประมาณ 15 kV เนื่องจากอากาศมีค่าความคงทนของอากาศประมาณ 30 kV/cm เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ในอากาศแล้วแรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมฉนวนชั้นที่ 1 ซึ่งฉนวนแก้วมีค่าความคงทนประมาณ 100-400 kV/cm โดยนำค่าที่

น้อยที่สุดของฉนวนประเภทแก้วที่ 100 kV/cm มาเปรียบเทียบกับอีกครั้งกับค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่าสามารถทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ยังจึงไม่เกิดการเบรกดาวนที่ฉนวนแก้ว แต่จะมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (โคโรนาดิสชาร์จ) ในฉนวน ส่วนที่เป็นอากาศ ย่านแรงดันไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดก๊าซโอโซน คือ ย่านแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 15 kV ขึ้นไป ดังนั้นสามารถใช้หม้อแปลงแรงดันสูง 15 kV ในการทดลองนี้ได้ [15]



รูปที่ 3.21 กระบวนการกำเนิดก๊าซโอโซนที่มีอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

3.5 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

เนื่องจากสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้นเมื่อได้รับเงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงจะไม่เกิดเบรกดาวนแต่จะเป็นแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ถ้าจะให้เกิดเบรกดาวนจะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไปอีก ซึ่งแรงดันเบรกดาวนนี้นี้ไม่สามารถคำนวณได้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้ำจุนเป็นอย่างไร แต่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ [16]

ค่าค่าปาสซีแตนซีในฉนวนแก้ว

$$C_d = \frac{2\pi\ell\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$C_d = \frac{2\pi \times 0.2 \times (8.845 \times 10^{-12} \times 1)}{\ln \frac{0.02}{0.017}} = 68.35 \text{ pF}$$

ค่าคาปาซิแตนซ์ในฉนวนอากาศ

$$C_g = \frac{2\pi\ell\epsilon}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

$$C_g = \frac{2\pi \times 0.2 \times (8.8545 \times 10^{-12} \times 1)}{\ln \frac{0.0254}{0.02}} = 23.23 \text{ pF}$$

ค่าแรงดันที่เกิดในช่องว่างอากาศ

$$U_s = 29.64 p_t g + 1350 (\text{air})$$

$$U_s = [29.64 \times (101.325 \times 10^3) \times 0.0054] + 1350$$

$$U_s = 16.36 \text{ kV}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

$$U_{cs} = \frac{C_d + C_g}{C_d} U_s$$

$$U_{cs} = \left(\frac{68.35 \text{ pF} + 23.23 \text{ pF}}{68.35 \text{ pF}} \right) \times 16.36 \times 10^3 \text{ V}$$

$$U_{cs} = 21.92 \text{ kV}$$

- เมื่อ U_{cs} คือ แรงดันไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด (kV)
- U_s คือ แรงดันที่เกิดในช่องว่างอากาศ (kV)
- C_d คือ คาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กทริก (F/m)
- C_g คือ คาปาซิแตนซ์ของช่องว่างระหว่างอากาศ (F/m)
- ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนแต่ละชั้น (F/m)
- ℓ คือ ความยาวของหลอดแก้วทรงกระบอก (m)
- t_g คือ ระยะห่างระหว่างอากาศ (mm)
- p คือ ความดันก๊าซสัมบูรณ์ (101.325 kPa)

3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม

สำหรับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นด้วยน้ำเย็นเบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นขั้นตอนในการขจัดเชื้อให้ลดลงหรือเหลือรอดน้อยที่สุดและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อซัลโมเนลล่าให้เป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับสินค้าเนื้อไก่เพื่อการส่งออกของกรมปศุสัตว์ และเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารจึงต้องวัสดุอุปกรณ์ที่สัมผัสซากไก่โดยตรง จะต้องมีความสะอาด ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ไม่ขึ้นสนิม วัสดุส่วนใหญ่จึงใช้เป็น สแตนเลสชนิด 304L เป็นหลัก โดยอุปกรณ์ในขั้นตอนนี้จะประกอบได้ด้วย

3.6.1 ถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น ทำจากวัสดุสแตนเลส 304L ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ขนาดความจุน้ำเย็นที่ใช้ลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นอยู่ที่ 32 ลูกบาศก์เมตร มีใบพัดกวนซากไก่ให้ได้รับการล้างทำความสะอาดและลดอุณหภูมิซากไก่ให้ทั่วถึง ขับเคลื่อนด้วยเกียร์ทดรอบความเร็ว ปรับความเร็วใบพัดด้วยอินเวอร์เตอร์ขนาด 5.5 kW ใช้ระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดความจุ 32 ลูกบาศก์เมตร

3.6.2 ระบบทำน้ำเย็น ใช้เป็นแผ่นพลาสติกความเย็นให้น้ำสะอาดอุณหภูมิปกติไหลผ่าน สามารถผลิตได้ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้อยู่ที่ 0.1-2 องศาเซลเซียส ลำเลียงน้ำเย็นโดยใช้ท่อพลาสติกชนิด ABS ที่มีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และจุลินทรีย์ไม่สามารถสะสมต่อได้ภายในเส้นท่อ หุ้มรักษาอุณหภูมิด้วยสแตนเลสชนิดขัดตลอดแนวเส้นท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ระบบทำน้ำเย็นชนิด Ripple plate กำลังการผลิต 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

3.6.3 น้ำสะอาดใช้ในโรงงาน ผลิตจากระบบการผลิตน้ำประปา ที่ใช้แหล่งจากจากน้ำผิวดิน ทำการตกตะกอน กรองตามระบบมาตรฐานการผลิตน้ำประปา ควบคุมค่าปริมาณคลอรีนอิสระที่ 0.5 ถึง 1 ppm สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น จะอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 น้ำสะอาดที่ใช้ในโรงงานหลังจากทำอุณหภูมิเย็นแล้ว

3.6.4 ระบบระบายอากาศใช้พัดลมระบายอากาศขนาด 18 นิ้ว เพื่อให้อากาศภายในห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นเกิดการหมุนเวียนและไม่เกิดการควบแน่นซึ่งจะทำให้เชื้อจุลินทรีย์สะสมตัวและเกิดเชื้อราภายในห้องได้ โดยควบคุมปริมาณอากาศหมุนเวียนที่ 20 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.25

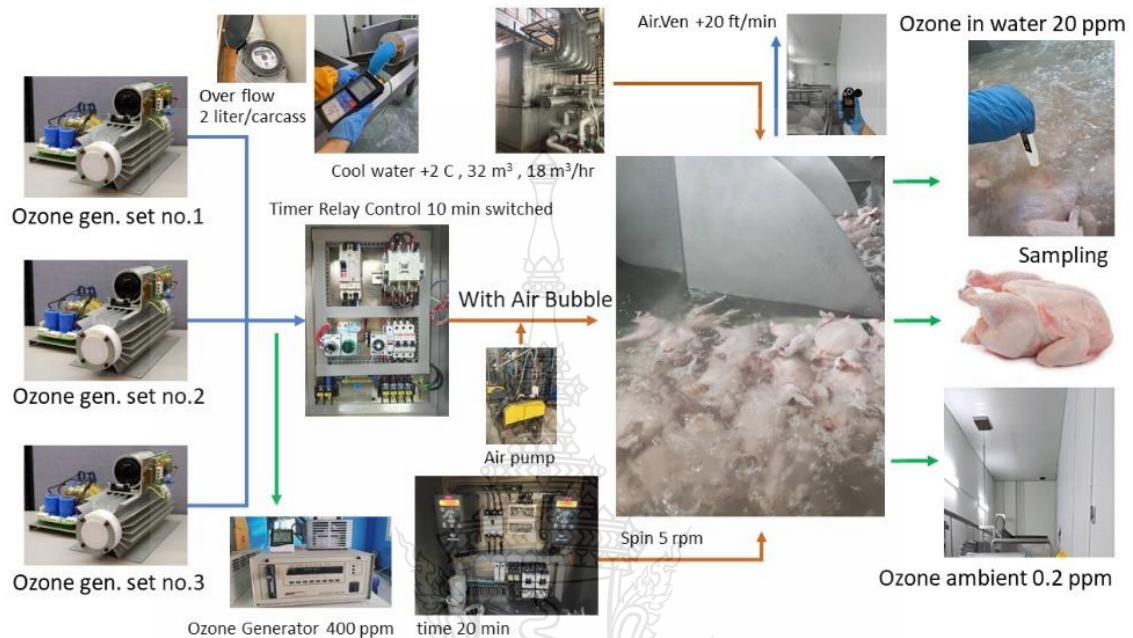


รูปที่ 3.25 ระบบระบายอากาศในโรงงาน ควบคุมการหมุนเวียนอากาศที่ 40 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

3.7 การทดสอบค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนเพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่า ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

นำเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบโดยการหลักการโคโรนาดีสชาร์จโดยใช้งานวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและใช้ร่วมกับเทคนิคสวิตชิงแบบพัลส์วิดโมดูเลชัน ในการควบคุมการทำงานผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ขนาด 15 กิโลโวลต์ ความถี่สูงที่ 40 kHz สามารถผลิตโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงถึง 400 ppm [8] โดยนำมาทำการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยหลักการทำงานจะทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟที่ 220 V 50 Hz ให้กับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ จ่ายเข้าสู่วงจรสร้างความถี่พัลส์วิดโมดูเลชันเพื่อนำไปควบคุมการทำงานสวิตชิงพาวเวอร์มอสเฟต ที่ความถี่ 40 kHz และส่งต่อไปที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบ็ค โอโซนจะทำลายผนังของเชื้อโดยการดึงออกซิเจน รูปแบบการทดสอบค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนเพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น โดยนิยามคำว่าซากไก่คือ เรียก ส่วนของร่างกายของไก่ทั้งหมดที่เอาเลือด ขน และอวัยวะภายในออกหมดแล้ว [5] และข้อกำหนดในการทำงานทางกำหนดปศุสัตว์ได้กำหนดคู่มือเพื่อเป็นระเบียบให้โรงงานปฏิบัติงานในโรงงานฆ่าสัตว์และชำแหละเนื้อสัตว์ปีกเพื่อการส่งออก ระบุใน

ขั้นตอนการล้างซากไก่ในระบบ ออณหภูมิซากไก่หลังออกจากขั้นตอนนี้ ไม่สูงกว่า 4 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำล้างถึงมากกว่า 1.5 ลิตรต่อซาก เปอร์เซ็นต์การอมน้ำในซากสำหรับระบบลดอุณหภูมิมากกว่าหนึ่งระบบ อยู่ที่ 0% [2] ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 กระบวนการล้างซากไก่ในโรงงานอุตสาหกรรม

ควบคุมอุณหภูมิน้ำเต็มที่ใช้ล้างซากไก่ที่ 2 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำล้างถึง อยู่ที่ 2.0 ลิตรต่อซาก และทำการต่อเครื่องกำเนิดโอโซนให้กับน้ำลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น อุณหภูมิห้องควบคุมที่ ไม่เกิน 20 องศาเซลเซียส อากาศหมุนเวียนในห้องควบคุมที่ บวก 20 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที น้ำหนักเฉลี่ยซากไก่ควบคุมที่ 2.2 กิโลกรัมต่อตัว ตามมาตรฐานน้ำใช้ในโรงงาน ใช้ น้ำสะอาดสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม อาหารเพื่อแปรรูปเนื้อสัตว์ปีกไม่มีปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในน้ำการใช้ลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น ก่อนเติมโอโซน และควบคุมระยะเวลาในการล้างซากต่อตัวที่ 20 นาที โดยอุณหภูมิหลังออกจากขั้นตอนลดอุณหภูมิซากไก่ก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไปควบคุมไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส [8]

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอโซนหลักการโครน่า ดิสชาร์จเพื่อลดจำนวนเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้หลักการโครน่า ดิสชาร์จ ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ปลายแปดด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชันแรงดันสูงความถี่สูง เพื่อให้เกิดโครน่า ดิสชาร์จ สนามไฟฟ้าที่หลุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบ และใช้อากาศไหลผ่านชุดหลอดอิเล็กโทรด เพื่อทำให้เกิดก๊าซไอโซนอย่างต่อเนื่องเพื่อนำก๊าซไอโซนดังกล่าวไปใช้งานในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยเก็บค่าที่เครื่องกำเนิดไอโซนผลิตและจ่ายให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อลดเชื้อซัลโมเนลล่าดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้จะได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไอโซนที่สามารถใช้งานทดแทนสารเคมีในการล้างทำความสะอาดและฆ่าเชื้อได้ เพื่อเป็นทางเลือกที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ผู้ประกอบการธุรกิจโรงงานอุตสาหกรรมไก่ได้นำไปพิจารณาใช้งานในโรงงาน และเป็นเทคโนโลยีสะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.2 ขั้นตอนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

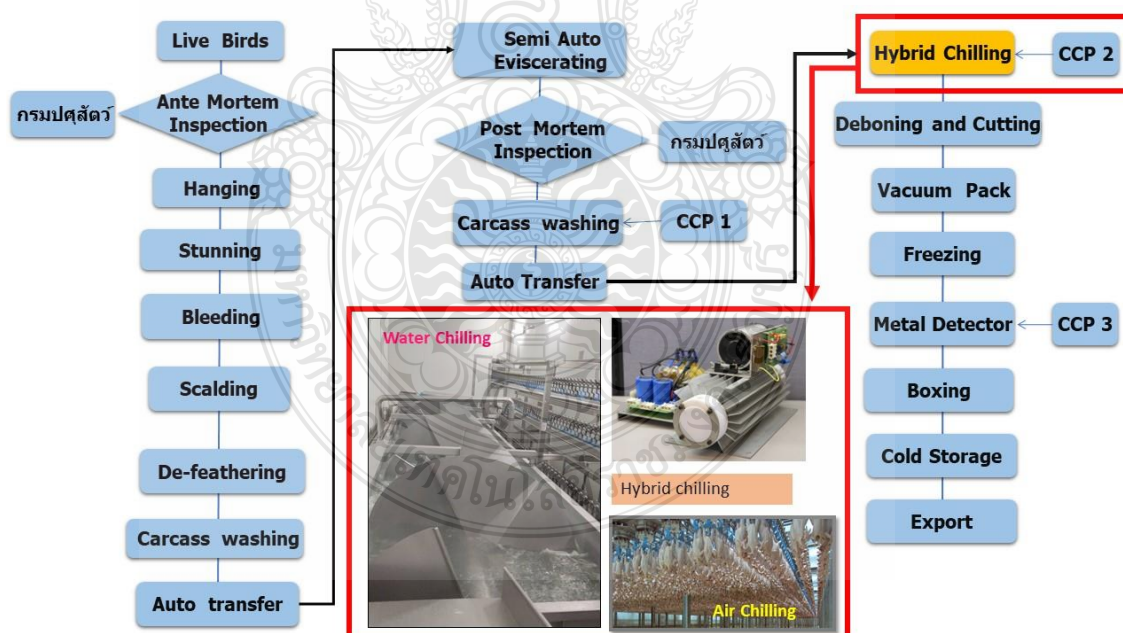
ขั้นตอนหลักๆที่ใช้ในการผลิตสินค้าของโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาเป็นกรณีศึกษามีทั้งหมด 25 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พิจารณาจากแผนภูมิการผลิตและในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น ซึ่งจะมีการใช้น้ำเป็นส่วนหนึ่งที่สามารถใช้ไอโซนผสมเข้าไปและสามารถสัมผัสซากไก่ได้อย่างทั่วถึงในการลดเชื้อ และเป็นห้องแบบปิด สามารถควบคุมการฟุ้งกระจายของก๊าซไอโซนได้ดี มีระบบระบายอากาศที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตในส่วนอื่นๆ จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการเลือกมาใช้ในกรณีศึกษา นี้ โดยขั้นตอนอื่นๆซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 พื้นที่ ดังนี้

พื้นที่แรกรับเข้าไก่เป็น ตรวจสอบสุขภาพไก่ การแขวน การสลบไก่ การเชือด การเอาเลือดออก การลอก การถอนขน การล้างซากภายนอก ยังเป็นไก่ที่มีชีวิตและมีความสกปรกต่างๆจึงไม่เหมาะที่จะเลือกการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องกำเนิดไอโซนที่ออกแบบ

พื้นที่การล้างเครื่องในสำหรับโรงงานที่ใช้ทำกรณีศึกษาใช้เครื่องจักรทั้งหมดในการล้างเครื่องใน ตั้งแต่ การส่งต่อระบบซากไก่อัตโนมัติ การล้างเครื่องในอัตโนมัติ การตรวจสอบซากโดยเจ้าหน้าที่กรมปศุสัตว์ การล้างซากอัตโนมัติ เป็นห้องที่มีพนักงานปฏิบัติงานอยู่และไม่สามารถใช้ก๊าซไอโซนทั้งแบบโดยตรงหรือโดยผ่านน้ำเป็นตัวกลางในการฆ่าเชื้อได้

พื้นที่การผลิตสินค้า การล้างซากแบบผสมผสาน การล้างซากเบื้องต้น การลดอุณหภูมิซากแบบลมเย็นแห้ง การตัดแต่ง การบรรจุ การปิดผนึก การแช่เยือกแข็งสินค้า การตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การบรรจุสินค้าลงกล่อง การจัดเก็บเข้าคลัง รอการจัดส่ง ซึ่งในขั้นตอนเหล่านี้จะมีการใช้พนักงานจำนวนในการทำงาน มีเพียง 2 ขั้นตอนเท่านั้นที่สามารถนำมาพิจารณาในการทำกรณีศึกษา คือ การล้างซากเบื้องต้น และการลดอุณหภูมิ สำหรับขั้นตอนการลดอุณหภูมิแบบลมเย็นแห้งนั้นเป็นห้องที่ควบคุมอากาศแบบปิด แต่ยังมีการทำงานของพนักงานอยู่ ซึ่งหากใช้ก๊าซไอโซนในขั้นตอนนี้จะส่งผลต่อผู้ปฏิบัติงานโดยตรง จึงยังไม่มีความเหมาะสมในการศึกษาในครั้งนี้

ดังนั้น จากที่กล่าวมาข้างต้น ขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากเบื้องต้น จึงเป็นขั้นตอนที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีน้ำเป็นตัวกลางในการสัมผัสกับซากไก่ได้อย่างทั่วถึงในการล้างและฆ่าเชื้อด้วยก๊าซไอโซน มีระยะสัมผัสได้นานถึง 20 นาที อีกทั้งไม่มีพนักงานปฏิบัติงานในพื้นที่นี้ จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.1 รูปแสดงแผนภูมิการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

4.3 วิธีการส่งผ่านก๊าซโอโซนให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่

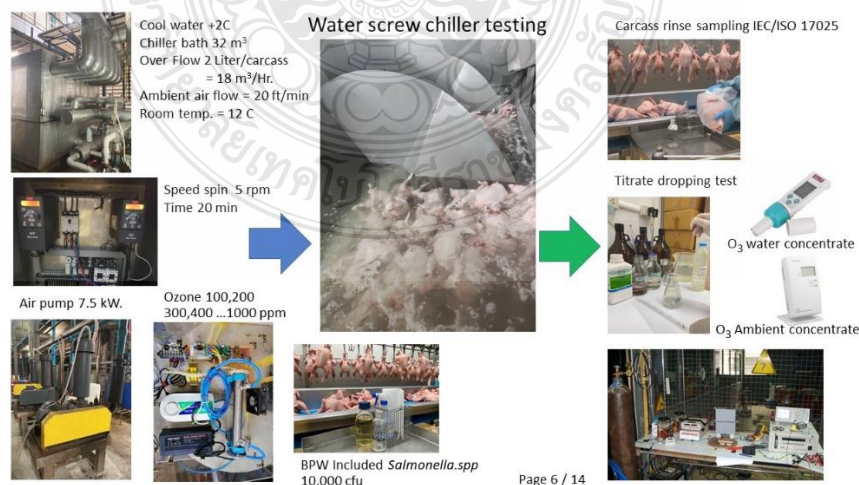
วิธีการจ่ายก๊าซโอโซนให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนแรก คือ ชุดเครื่องกำเนิดโอโซน จำนวน 3 เครื่อง โดยใช้งานสลับกันทุกๆ 10 นาที เพื่อรักษา ระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งการสลับการใช้งานทุกๆ 10 นาที จะเป็นป้องกัน ความร้อนสะสมที่จะเกิดขึ้นกับหลอดอิเล็กโทรดจนทำให้เกิดความเสียหาย และเป็นการยืดอายุการใช้งาน ของเครื่องกำเนิดโอโซน รวมถึงสามารถใช้ทดแทนกันได้ทันทีหากมีความเสียหายเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ชุด เครื่องกำเนิด โดยเครื่องกำเนิดที่ออกแบบเป็นแบบใช้อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนทดแทน ซ่อมแซมได้ง่าย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ทั่วไปในท้องตลาด สามารถหาเปลี่ยนทดแทนได้ทันที หากมีอุปกรณ์ เปลี่ยนสำรองไว้

ส่วนที่สอง คือ การนำก๊าซโอโซนผสมเข้ากับระบบเติมน้ำเย็นลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น โดยใช้ เครื่องกำเนิดโอโซนต่อเข้ากับ Venturi valve ผ่านระบบน้ำเติมเพื่อล้างซากไก่ที่ 300 ลิตรต่อนาที โดยต่อ เข้ากับที่จุดเติมน้ำโดยตรง

ส่วนที่สาม คือ การกระจายก๊าซโอโซนในถังล้างซากไก่เบื้องต้นให้ทั่วถึง โดยการใช้ Loop pump ขนาด 5 แรงม้า ที่แรงดันลม 3 bar เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำที่อยู่ในถังที่มีก๊าซโอโซนผสมอยู่จากการ จ่ายโดยเครื่องกำเนิดโอโซน

โดยระบบการจ่ายก๊าซโอโซนในขั้นตอนลดอุณหภูมิในขั้นตอนปกติของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็น กรณีศึกษา มีรูปแบบและรายละเอียดในการทำงานดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบระบบการผลิตก๊าซโอโซนให้กับขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการการศึกษา

เพื่อให้การหาค่าที่มีความแม่นยำถูกต้อง และสามารถสอบกลับไปยังมาตรฐานสากลยอมรับ เครื่องมือต่างๆที่นำมาใช้ในกรณีศึกษาต้องได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานที่ยอมรับตามหลักสากลโดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

4.4.1 เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซโอโซน (Teledyne Instrument Ozone Monitor Model 450M) โดยแสดงผลในหน่วยของ ppm (Part Per Million) ได้รับความอนุเคราะห์จากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

4.4.2 นาฬิกาจับเวลาในการสลับเครื่องกำเนิดโอโซนเพื่อป้องกันตัวหลอดอิเล็กทรอนิกส์เสียหายด้วย Stopwatch SEIKO brand model S23589P1 แสดงผลในหน่วยของนาที่ ทำการสอบเทียบกับเวลามาตรฐานประเทศไทย ของกรมอุทกศาสตร์ทหารเรือ

4.4.3 มาตรวัดปริมาณน้ำ เพื่อควบคุมปริมาณน้ำล้นถังเพื่อให้ น้ำมีความสะอาดไม่เกิดการสะสมของตะกอนไขมันด้วย Flow meter brand ASAHI model PN10 แสดงผลในหน่วยของลิตรต่อนาที มาตรวัดน้ำ ตามหลักเกณฑ์การ การตรวจสอบและให้คำรับรอง มาตรวัดน้ำ ตามระเบียบสำนักงานกลางซึ่งดวง วัด กระทรวงพาณิชย์ควบคุมอนุมัติของน้ำเย็นที่ใช้

4.4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ใช้ล้างซากด้วย Digital Thermometer Anritsu Brand model HD-1200K แสดงผลในหน่วยของ องศาเซลเซียส โดยสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น

4.4.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก ควบคุมน้ำหนักเฉลี่ยซากไก่ด้วยเครื่องชั่ง Weight scales Brand Mettler Toledo Model Cub (3000g) แสดงผลในหน่วยของ กรัมต่อซาก โดยสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น

4.4.6 ควบคุมความเร็วในการกวและพาสากไก่ในถังลดอุณหภูมิโดยใช้ FLUKE 931 ESP, COMBO TACHOMETER แสดงผลในหน่วย รอบต่อนาที

4.4.7 สำหรับการปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่ใช้ล้างซากไก่เบื้องต้นควบคุมด้วย Water Ozone concentrate Brand TWINNO Model DOZ30 โดยแสดงผลในหน่วยของ ppm (Part Per Million) โดยบริษัท METTLER TELED

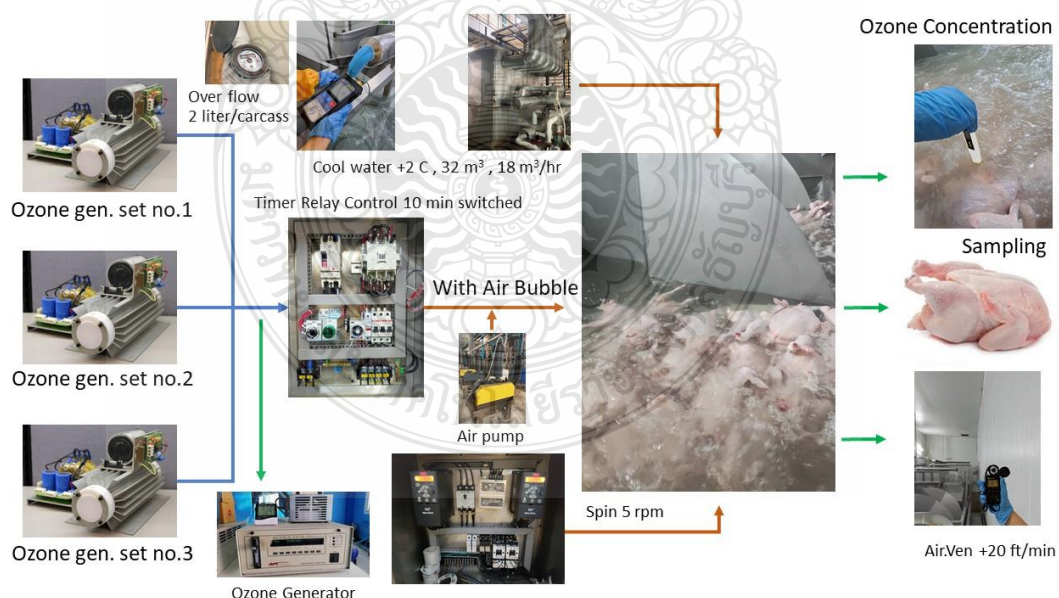
4.4.8 การตรวจหาเชื้อซัลโมเนลล่า สำหรับการขจัดเชื้อ *Salmonella.spp* หลังการใช้ก๊าซโอโซน ในการล้างซากไก่ใช้การส่งตัวอย่างตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 17025 ด้วยวิธีการ carcass rinse sampling Method ISO/IEC 6579:2018 Lab. Accredited ISO/IEC 17025:2019 แสดงผลในหน่วย Detected หรือ Not Detected

4.4.9 เครื่องความเร็วลม เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมในการทำงานให้เกิดความปลอดภัยไม่ระคายเคืองต่อผู้ปฏิบัติงานด้วย ระบบเครื่องดูดอากาศ ควบคุมโดย Air flow meter brand Kestrel Model 5000 แสดงผลในหน่วย ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที จาก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น

4.4.10 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในพื้นที่ที่ทำการศึกษาด้วย Hygro-Thermometer DIGICON brand model TH-03A แสดงผลในหน่วย เปอร์เซนต์ความชื้นสัมพัทธ์ จาก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น

4.5 รูปแบบการทดสอบในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อทำการศึกษา

นำเครื่องกำเนิดโอโซนโดยการหลักการโคโรนาดิสชาร์จโดยใช้งานวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและใช้ร่วมกับเทคนิคสวิตชิงแบบพัลส์วิดโมดูเลชัน ตัวหลอดอิเล็กโทรดทรงกระบอกที่ได้ออกแบบและสร้างแล้วเสร็จจำนวน 3 ชุด มาทำการต่อใช้งานเข้ากับระบบการทำงานของโรงงานเพื่อทำการศึกษากิจกรรมการที่เหมาะสมในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเพื่อใช้ในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เปื่องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีรูปแบบและรายละเอียดในการทำงานดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแบบการทดสอบในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อทำการศึกษาระบบการที่เหมาะสม

ในการศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของไอโซนเพื่อใช้ในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้สภาพการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม ดำเนินการในขั้นตอนหลักดังนี้

1. ปรับค่าสภาพการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมตามที่มาตรฐานของโรงงาน ดังนี้

- 1.1 อุณหภูมิน้ำล้างซาก ไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส
- 1.2 ปริมาณน้ำล้างถึง ไม่น้อยกว่า 300 ลิตรต่ออนาที่
- 1.3 อุณหภูมิห้อง ไม่เกิน 12 องศาเซลเซียส
- 1.4 ความเร็วรอบของใบพัดในถังลดอุณหภูมิที่ 5 รอบต่ออนาที่
- 1.5 แร่งดันอากาศไหลเวียนในห้องลดอุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 20 ft³/min
- 1.6 น้ำหนักเฉลี่ยซากไก่ 2200 กรัม ที่ลงในถังลดอุณหภูมิ ที่ 150 ตัวต่ออนาที่
- 1.7 ปริมาณน้ำในถังลดอุณหภูมิ 32 ลูกบาศก์เมตร

2. ปรับค่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้ได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไอโซนที่ออกแบบ วัดค่าปริมาณก๊าซไอโซนที่หลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรดขาออกให้ได้ที่ 100 ppm , 200 ppm , 300 ppm . 400 ppm , 500 ppm . 600 ppm และ 700 ppm ตามลำดับ บันทึกค่าที่ได้จากการปรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พร้อมบันทึกค่า ดังนี้

- 2.1 ค่าความถี่จากวงจรที่ออกแบบ 40 kHz
- 2.2 ค่าแรงดันขาเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 220 V / 50 Hz
- 2.3 ปริมาณอากาศเข้าหลอดอิเล็กทรอนิกส์โทรดจาก Air pump ที่ 3 ลิตรต่ออนาที่

3. จ่ายก๊าซไอโซนต่อเข้ากับ venturi valve และ Loop Pump ขนาด 5 แรงม้า เพื่อส่งก๊าซไอโซนในการเติมอากาศในถังน้ำลดอุณหภูมิซากไก่ เพื่อให้กระจายไอโซนในน้ำอย่างทั่วถึง

4. นำซากไก่มาทำการใส่เชื้อซัลโมเนลล่าให้ไอโซน 10,000 cfu/g หรือ 4 log โดยผู้ควบคุมเชื้ออันตรายจากห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 จำนวน 5 ตัวอย่าง ให้สัญลักษณ์แล้วนำเข้าสู่กระบวนการลดอุณหภูมิตามการทำงานปกติของโรงงาน

5. นำซากไก่ที่เชื้อซัลโมเนลล่าและผ่านกระบวนการล้างซากโดยมีความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่จ่ายให้กับกระบวนการล้างซากไก่แล้ว ส่งตรวจเพื่อทราบผลจุลชีววิทยา

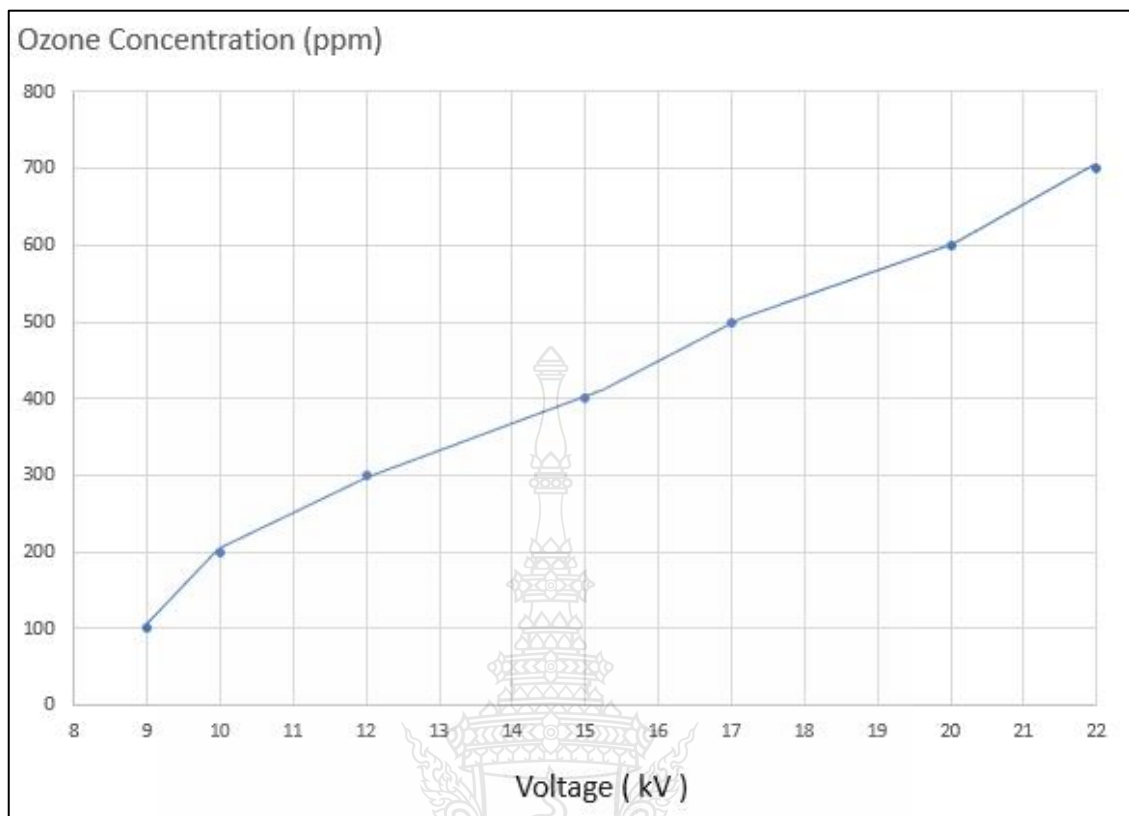
6. ทดลองซ้ำข้อ 2-5 โดยปรับค่าความเข้มข้นจนครบ ตามค่าที่ได้ทำการปรับค่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 ppm ในแต่ละรอบการทดสอบ จนได้ค่าที่ไม่พบการหลงเหลือของเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ที่ทำการทดสอบ

7. นำค่าที่ได้มาประมวลผลนำค่าที่จัดเชื้อซัลโมเนลล่าได้ มาทำซ้ำทั้งกระบวนการโดยใช้ไก่ฟาร์มของโรงงานจำนวน 100 ฟาร์ม คิดเป็น 41 เปอร์เซนต์จากปริมาณไก่ต่อรอบของโรงงาน

4.6 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับระดับแรงดัน 9-22 kV ที่อัตราการไหลของอากาศเข้า 3 ลิตรต่อนาที ความถี่ 40 kHz

Transformer (kV)	Ozone Generator (ppm)	Source (Vac)	Source (Hz)	Frequency (kHz)	Dry air flow rate (LTM)
9	105	220	50	40	3
10	203	220	50	40	3
12	309	220	50	40	3
15	400	220	50	40	3
17	511	220	50	40	3
20	604	220	50	40	3
22	706	220	50	40	3



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับระดับแรงดัน 9-22 kV ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 ลิตรต่อนาที ความถี่ 40 kHz

จากรูปที่ 4.4 ได้ทำการกำหนดอัตราการไหลของอากาศที่ 3 ลิตรต่อนาที และกำหนดความถี่ที่ 40 kHz แรงดันขาเข้าเครื่องกำเนิดโอโซนที่ 220 V 50 Hz ตามวงจรที่ได้ออกแบบเพื่อทำการศึกษาในการหาค่าที่เหมาะสม และป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-22 kV เพื่อกำหนดปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ต้องการจ่ายให้กับกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม ช่วงละ 100 ppm โดยประมาณ และทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ทำการกำหนดค่ากระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้เป็นมาตรฐานของการผลิตสินค้าดังแสดงค่าที่วัดได้เพื่อกำหนดกระบวนการในการทำการศึกษตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 กระบวนการที่กำหนดเพื่อใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานการผลิตของโรงงาน

Water Temp (°C)	Over flow (ลิตรต่อ นาที)	Room Temp (°C)	Air Ventilation (Ft ³ ./min)	Avg. Chicken (g)	O3 Water Concentrate (ppm)	Spin chiller (RPM)
1.9	300	16.3	+20.2	2251	0	5

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษาเทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 105 ppm

Farms	ใส่เชื้อ	Ex.01	Ex.02	Ex.03	Ex.04	Ex.05
<i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)						
Sam'1	10,000	ND	ND	ND	D	D
Sam'2	10,000	D	ND	ND	D	ND
Sam'3	10,000	ND	D	D	ND	ND
Sam'4	10,000	ND	D	ND	D	ND
Sam'5	10,000	ND	D	ND	ND	D

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.3 เมื่อจ่ายก๊าซโอโซนเข้ากระบวนการกลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ระดับความเข้มข้น 105 ppm ค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 9 kV ความถี่ 40 kHz ให้กับซากไก่จากฟาร์มไก่ตัวอย่างจำนวน 5 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวม 25 ตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการเพื่อหาการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลังใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppm พบมีการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลงเหลืออยู่จำนวน 10 ตัวอย่างจาก 25 ตัวอย่าง คิดเป็น 40% จึงยังไม่ใช่ค่าเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษาเทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 203 ppm

Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex.01	Ex.02	Ex.03	Ex.04	Ex.05
Sam'1	10,000	ND	ND	ND	ND	D
Sam'2	10,000	D	ND	ND	D	ND
Sam'3	10,000	ND	D	D	ND	ND
Sam'4	10,000	ND	D	ND	D	ND
Sam'5	10,000	ND	D	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.4 เมื่อจ่ายก๊าซโอโซนเข้ากระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ระดับความเข้มข้น 203 ppm ค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 10 kV ความถี่ 40 kHz ให้กับซากไก่จาก ฟาร์มไก่ตัวอย่างจำนวน 5 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวม 25 ตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการเพื่อหาการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลังใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ที่ระดับความเข้มข้น 203 ppm พบมีการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลงเหลืออยู่จำนวน 8 ตัวอย่างจาก 25 ตัวอย่าง คิดเป็น 32% จึงยังไม่ใช้ค่าเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษาเทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 309 ppm

Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex.01	Ex.02	Ex.03	Ex.04	Ex.05
Sam'1	10,000	ND	ND	ND	ND	D
Sam'2	10,000	D	ND	ND	ND	ND
Sam'3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam'4	10,000	ND	ND	ND	D	ND
Sam'5	10,000	ND	D	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

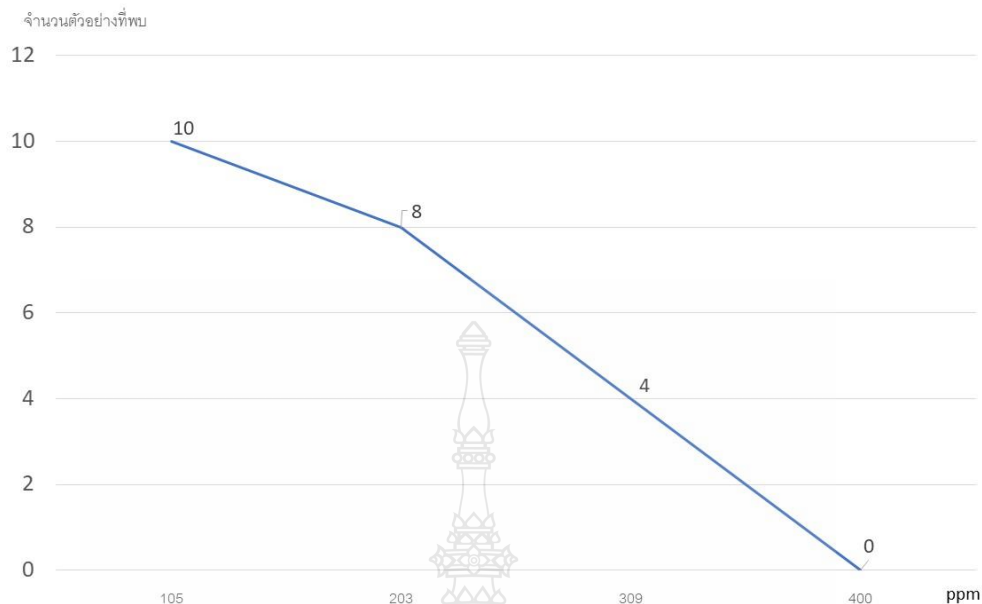
จากตารางที่ 4.5 เมื่อจ่ายก๊าซโอโซนเข้ากระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ระดับความเข้มข้น 309 ppm ค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 12 kV ความถี่ 40 kHz ให้กับซากไก่จาก ฟาร์ม ไก่ตัวอย่างจำนวน 5 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวม 25 ตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการเพื่อหาการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลังใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ที่ระดับความเข้มข้น 309 ppm พบมีการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonell.spp* หลงเหลืออยู่จำนวน 4 ตัวอย่างจาก 25 ตัวอย่าง คิดเป็น 16% จึงยังไม่ใช้ค่าเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่จ่ายให้กระบวนการที่ทำการศึกษาเทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการ ที่โอโซนความเข้มข้น 400 ppm

Farms	ใส่เชื้อ	Ex.01	Ex.02	Ex.03	Ex.04	Ex.05
<i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)						
Sam'1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam'2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam'3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam'4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam'5	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.6 เมื่อจ่ายก๊าซโอโซนเข้ากระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ระดับความเข้มข้น 400 ppm ค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 15 kV ความถี่ 40 kHz ให้กับซากไก่จากฟาร์ม ไก่ตัวอย่างจำนวน 5 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวม 25 ตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการเพื่อหาการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonella.spp* หลังใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ที่ระดับความเข้มข้น 203 ppm ไม่พบมีการปนเปื้อนเชื้อ *Salmonell.spp* หลงเหลืออยู่จาก 25 ตัวอย่าง ที่เก็บทดสอบ จึงเป็นค่าเหมาะสมในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนเทียบกับปริมาณเชื้อ *Salmonella.spp* ที่พบในตัวอย่างซากไก่ที่ทดสอบ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าที่มีความเหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในโรงงานที่ใช้เป็นกรณีศึกษาจะใช้งานที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 400 ppm โดยปรับระดับแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 15 kV ความถี่ 40 kHz ให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ ไม่พบการหลงเหลือของเชื้อ *Salmonella.spp* ในตัวอย่างที่ใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g จึงเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้ทดสอบในกระบวนการผลิตของโรงงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาต่อไป

ทำการต่อระบบเครื่องกำเนิดโอโซนเข้ากับกระบวนการผลิตขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นตามรูปที่ 4.3 โดยควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิต ตามตารางที่ 4.2 โดยปรับค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 15 kV ความถี่สูงที่ 40 kHz ตามตารางที่ 4.1 เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ 400 ppm ตามที่ทำการทดสอบในตารางที่ 4.6 ซึ่งไม่พบการหลงเหลือของเชื้อ *Salmonella.spp* ที่การใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยทดสอบกับฟาร์มที่เข้ามายังโรงงาน จำนวน 100 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวมจำนวน 500 ตัวอย่าง คิดเป็น 41% จากจำนวนฟาร์มไก่ทั้งหมดที่มีของโรงงานที่ใช้เป็นกรณีศึกษา นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ดังนี้

ทำการชั่งน้ำหนักซากไก่ที่จะใช้ทดสอบ จำนวน 5 ซากก่อนทำการใส่เชื้อ *Salmonella.spp* โดย น้ำหนักซากไก่จะอยู่ที่ 2,250 กรัมต่อซาก ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงค่าน้ำหนักซากไก่ที่ใช้ในการทดสอบของโรงงานกรณีศึกษา

ทำการเตรียมน้ำเติมลงในถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น โดยมีความจุ 32 ลูกบาศก์เมตร และวัดอุณหภูมิน้ำเย็นได้ที่ 1.9 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่ใช้ลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ทำการศึกษา

ทำการเปิดระบบหมุนเวียนน้ำให้มีความสะอาดต่อเนื่อง โดยควบคุมปริมาณน้ำล้นถัง ที่ 300 ลิตรต่อซาก ที่จำนวนตัว 150 ตัวต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงมาตรวัดน้ำที่ใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำล้นถังลดอุณหภูมิซากไก่เปื่องตันที่ทำการศึกษา

ทำการควบคุมความเร็วการหมุนในการหมุนของใบพัด ในการพลิกซากไก่ให้สัมผัสกับน้ำและโอโซน ที่เติมในถัง โดยควบคุมด้วย อินเวอร์เตอร์ที่ 5 รอบต่อนาที 11.6 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงการควบคุมความเร็วการหมุนใบพัดในถังลดอุณหภูมิซากไก่เปื่องตันโดย อินเวอร์เตอร์

ทำการควบคุมอุณหภูมิห้องที่ใช้ในการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นโดยควบคุมอยู่ที่ 16.3 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.10



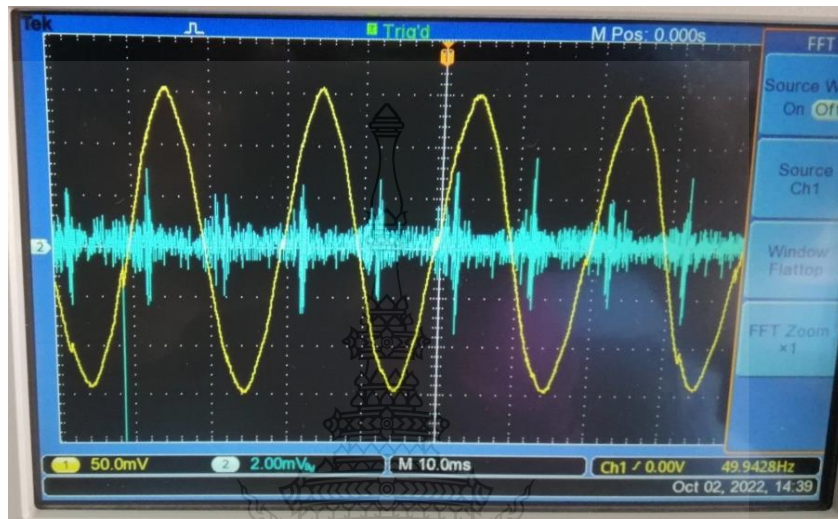
รูปที่ 4.10 แสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา

ทำการควบคุมระบบการถ่ายเทอากาศในห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นโดยควบคุมอยู่ที่ 20.2 ft²/min ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงค่าของระบบการถ่ายเทอากาศในห้องลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ใช้ศึกษา

ทำการปรับค่าแรงดันที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 15 kV เพื่อให้เครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ที่ 400 ppm เพื่อนำไปใช้ในการทำการศึกษาค่าและกระบวนการที่เหมาะสมในการลดเชื้อ *Salmonella.spp* ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงค่าแรงดันที่วัดวัดได้ที่ 15 kV ที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ

ทำการปรับค่าความถี่ที่ 40 kHz เพื่อให้เครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ที่ 400 ppm เพื่อนำไปใช้ในการทำการศึกษาค่าและกระบวนการที่เหมาะสมในการลดเชื้อ *Salmonella.spp* ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความถี่ที่วัดวัดได้ที่ 40 kHz ที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ

ทำการไตเตรทวัดค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่อยู่ในน้ำลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น โดยหยดสารละลาย Potassium iodide สารละลาย Sodium thiosulfate และน้ำแป้ง โดยหยดสารละลายเพื่อดูการเปลี่ยนสี แล้วนำมาคำนวณหาค่า โดยปริมาณความเข้มข้นของไอโซนในน้ำจะอยู่ที่ 20 ppm ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงการไตเตรทเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอโซนในน้ำที่ใช้ในการศึกษา

ทำการเตรียมเชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g ในห้องปฏิบัติการโดยผู้ควบคุมเชื้อ อันตรายตามกระบวนการวิธี Maintenance and Preservative of Microbial Culture in a Laboratory Culture Collection. 1992. Australia (NATA) Technical Note 14 (LPB-LM-072) ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การเจริญของเชื้อที่มีลักษณะเดี่ยว และเป็น single colony หรือโคโลนีเดี่ยวบนอาหารเลี้ยงเชื้อ *Salmonella.spp*

ทำการถ่ายเชื้อลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดน้ำ BPW เพื่อนำไปคลุกเคล้ากับซากไก่ที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g

ทำการใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ลงในซากไก่ที่ต้องการทำการการศึกษา โดยนำซากไก่ใส่ลงในถุงแล้วเทอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดน้ำที่ใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ที่เตรียมไว้แล้วหลังจากนั้นเขย่าให้ทั่วซากไก่แล้วจึงในซากไก่เข้าสู่ขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น โดยใช้น้ำที่มีความเข้มข้นของไอโซนที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การใส่เชื้อ *Salmonella.spp* ในตัวซากไก่เพื่อทำการการศึกษา

เมื่อล้างซากไก่โดยผ่านน้ำที่มีความเข้มข้นโอโซนอยู่ที่ 20 ppm โดยโอโซนที่เครื่องกำเนิดจ่ายให้ ขั้นตอนการล้างซากไก่เบื้องต้นอยู่ที่ 400 ppm แล้ว นำซากไก่ที่ให้สัญลักษณ์ไว้มาทำการเทอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วเขย่าให้ทั่วอีกครั้ง แล้วจึงนำน้ำที่ได้จากการเขย่าซากไก่เทใส่ขวดเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจหาปริมาณ เชื้อ *Salmonella, spp* ที่หลงเหลือหลังจากขั้นตอนดังกล่าวแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างน้ำล้างซากไก่ หลังการผ่านกระบวนการครบถ้วนเพื่อส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผล การตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam A H1 ถึง Sam A H9

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam A H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H5	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H6	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H7	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H8	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam A H9	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.7 พบว่าฟาร์ม Sam A H1 ถึง Sam A H9 หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ให้กับการทดลองเพื่อเป็นกรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บ ตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง จำนวน 45 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น100% ผ่านตามมาตรฐานเชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการ ตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam B H1 ถึง Sam B H12

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam B H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H5	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H6	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H7	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H8	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H9	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H10	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H11	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam B H12	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.8 พบว่าฟาร์ม Sam B H1 ถึง Sam B H12 หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้กับการทดลองเพื่อเป็นกรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง จำนวน 60 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น100% ผ่านตามมาตรฐานเชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam C H1 ถึง Sam C H7

Chicken	ใส่เชื้อ	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Farms	<i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)					
Sam C H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H5	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H6	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam C H7	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.9 พบว่าฟาร์ม Sam C H1 ถึง Sam C H7 หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้กับการทดลองเพื่อเป็นกรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง จำนวน 35 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น100% ผ่านตามมาตรฐานเชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผล
การตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam D H1 ฟาร์ม Sam E
H1 ฟาร์ม Sam F H1 และ ฟาร์ม Sam G H1 ถึง Sam G H3

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam D H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam E H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam F H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam G H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam G H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam G H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.10 พบว่า หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้กับการทดลองเพื่อเป็น
กรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง
จำนวน 30 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น100% ผ่านตามมาตรฐาน
เชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผล
การตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam H H1 ถึง Sam H
H3 และ ฟาร์ม Sam I H1 ถึง Sam I H4

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam H H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam H H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam H H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam I H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam I H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam I H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam I H4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.11 พบว่า หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้กับการทดลองเพื่อเป็นกรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง จำนวน 35 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น100% ผ่านตามมาตรฐานเชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผลการตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam J H1 ถึง Sam J H49

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam J H1	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H2	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H3	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H4	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H5	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H6	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H7	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H8	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H9	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H10	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H11	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H12	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H13	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H14	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H15	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H16	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผล
การตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam J H1 ถึง Sam J H49

Chicken	ใส่เชื้อ	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Farms	<i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)					
Sam J H17	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H18	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H19	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H20	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H21	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H22	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H23	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H24	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H25	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H26	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H27	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H28	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H29	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H30	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H31	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H32	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ความเข้มข้น 400 ppm เทียบกับผล
การตรวจทางจุลชีววิทยาของห้องปฏิบัติการของซากไก่ฟาร์ม Sam J H1 ถึง Sam J H49

Chicken Farms	ใส่เชื้อ <i>Salmonella.spp</i> (cfu/g)	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Sam J H33	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H34	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H35	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H36	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H37	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H38	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H39	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H40	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H41	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H42	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H43	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H44	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H45	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H46	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H47	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H48	10,000	ND	ND	ND	ND	ND
Sam J H49	10,000	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = ไม่พบเชื้อ Not Detected D = พบเชื้อ Detected

จากตารางที่ 4.12 พบว่า หลังจากจ่ายความเข้มข้นของก๊าซโอโซนให้กับการทดลองเพื่อเป็น
กรณีศึกษา โดยใส่เชื้อ *Salmonella.spp* จำนวน 10,000 cfu/g โดยเก็บตัวอย่าง ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง
จำนวน 245 ตัวอย่าง ไม่พบการหลงเหลือเชื้อ *Salmonella.spp* ในซากไก่ คิดเป็น 0% ผ่านตามมาตรฐาน
เชื้อที่กรมปศุสัตว์กำหนด

เมื่อนำเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบโดยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ขดลวดปฐมภูมิ 10 รอบ ขดลวดทุติยภูมิ 12,500 รอบ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงขาออกที่ 14.99 kV ในส่วนของวงจรสร้างความถี่ใช้หลักการ Boots Converter ด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชันแรงดันสูงความถี่สูง ด้วย IC TL 494 และใช้ Power MOSFET IRFP 460 ค่าความต้านทานของวงจรใช้ที่ 2.5 กิโลโอห์ม ตัวเก็บประจุขนาด 0.01 ไมโครฟารัด จะได้ความถี่สูงที่ 40 kHz เพื่อจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบ ในส่วนของหลอดอิเล็กโทรดออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกแกนวัสดุทำจากสแตนเลสประเภท 316L ซ้อนร่วมค่าความต้านทานที่ฉนวนอากาศ เท่ากับ 0.76 กิโลโอห์ม ค่าความต้านทานที่ฉนวนแก้ว เท่ากับ 1.90 กิโลโอห์ม ค่าประจุฉนวนอากาศ เท่ากับ 23.23 ไมโครฟารัด ค่าประจุฉนวนแก้ว เท่ากับ 68.35 ไมโครฟารัด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนสูงสุด เท่ากับ 37.17 kV.cm ซึ่งวัสดุที่ใช้งานสามารถรองรับการเกิด Break down ของตัวหลอดอิเล็กโทรดได้ดี ค่าแรงดันที่เกิดในช่องว่างอากาศ เท่ากับ 21.92 kV จ่ายลมออกซิเจนบริสุทธิ์และแห้งที่ 3 ลิตรต่อนาที จะทำให้เกิดก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นที่ 400 ppm ขาออกจากเครื่องกำเนิดโอโซน

เมื่อนำมาค่าที่ได้มาทำการศึกษาในการฆ่าเชื้อซัลโมเนลล่า โดยการใส่เชื้อดังกล่าวจำนวน 10,000 cfu/g ที่จำนวนตัวอย่าง 500 ตัวอย่าง จาก 100 ฟาร์ม โดยกระจายตัวอย่างทุกฟาร์ม คิดเป็น 41% จากจำนวนฟาร์มทั้งหมดของบริษัทที่ทำการศึกษาพบว่าสามารถฆ่าเชื้อได้ทั้งหมดคิดเป็น 100%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 บทสรุป

การหากระบวนการที่เหมาะสมหากระบวนการที่เหมาะสมในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเพื่อใช้ในการลดเชื้อซัลโมเนลล่าในกระบวนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จต้นแบบโดยหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบ็คด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่นแรงดันสูงความถี่สูง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมนั้น โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งได้แก่ กระบวนการที่เหมาะสม เครื่องกำเนิดโอโซนหลักการโคโรนาดีสชาร์จที่ใช้เพื่อการวิจัย และค่าที่เหมาะสมของปริมาณความเข้มข้นของโอโซน ตามลำดับ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

5.2 กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับโรงงานในขั้นตอนลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น

ค่าควบคุมกระบวนการที่ใช้ในการวิจัยที่ขั้นตอนการลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น ประกอบไปด้วยขนาดของถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นจะมีความจุปริมาตรน้ำที่ 32 ลูกบาศก์เมตร ใช้ใบพัดพัดกวนพัดซากไก่เข้าจนถึงขาออกที่ 20 นาที ความเร็วรอบการพาซากไก่ เท่ากับ 5 รอบต่อนาที จำนวนซากไก่ที่ลงถังได้ 3,00 ตัว เข้าออกต่อเนื่องที่ 150 ตัวต่อนาที น้ำหนักเฉลี่ยซากไก่ เท่ากับ 2,250 กรัม ควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นเพื่อใช้ลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้นที่ 1.9 องศาเซลเซียส ควบคุมปริมาณน้ำล้นไหลทิ้งลดความสกปรกของน้ำที่ 300 ลิตรต่อนาที จ่ายอากาศเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของโอโซนโดยใช้ Loop pump ที่ควบคุมแรงดันลม เท่ากับ 5 บาร์ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 กระบวนการที่กำหนดเพื่อใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานการผลิตของโรงงานที่ใช้วิจัย

Water	Over flow	Room	Air	Avg.	O3 Water	Spin
Temp	(ลิตรต่อ	Temp	Ventilation	Chicken	Concentrate	chiller
(⁰ C)	นาที)	(⁰ C)	(Ft ³ ./min)	(g)	(ppm)	(RPM)
1.9	300	16.3	+20.2	2251	0	5

5.3 เครื่องกำเนิดไอออนที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทำการวิจัย

ในส่วนเครื่องกำเนิดไอออนหลักการโคโรนาดีสชาร์จที่ออกแบบ โดยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ขดลวดปฐมภูมิ 10 รอบ ขดลวดทุติยภูมิ 12,500 รอบ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงขาออกที่ 14.99 kV ในส่วนของวงจรสร้างความถี่ใช้หลักการ Boots Converter ด้วยวงจรพัลส์วิดโมดูลเลชั่นแรงดันสูงความถี่สูง ด้วย IC TL 494 และใช้ Power MOSFET IRFP 460 ค่าความต้านทานของวงจรใช้ที่ 2.5 กิโลโอห์ม ตัวเก็บประจุขนาด 0.01 ไมโครฟารัด จะได้ความถี่สูงที่ 40 kHz เพื่อจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไอออนที่ออกแบบ ในส่วนของหลอดอิเล็กโตรดออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกแกนวัสดุทำจากสแตนเลสประเภท 316L ซ้อนรวมค่าความต้านทานที่ฉนวนอากาศ เท่ากับ 0.76 กิโลโอห์ม ค่าความต้านทานที่ฉนวนแก้ว เท่ากับ 1.90 กิโลโอห์ม ค่าประจุฉนวนอากาศ เท่ากับ 23.23 ไมโครฟารัด ค่าประจุฉนวนแก้ว เท่ากับ 68.35 ไมโครฟารัด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนสูงสุด เท่ากับ 37.17 kV/cm ซึ่งวัสดุที่ใช้งานสามารถรองรับการเกิด Break down ของตัวหลอดอิเล็กโตรดได้ดี ค่าแรงดันที่เกิดในช่องว่างอากาศ เท่ากับ 21.92 kV จ่ายลมออกซิเจนบริสุทธิ์และแห้งที่ 3 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เครื่องกำเนิดไอออนที่ออกแบบที่ใช้ในการวิจัย

ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า	Flyback แรงดันสูง		
Np = 10 รอบ	Ns = 12,900 รอบ	Vin = 220 V/50 Hz	Vout = 15 kV
ชุดกำเนิดความถี่	PWM	Power MOSFET	
TL 494	IRFP 460	R = 2.5 Ω ที่ขา 6	C = 0.01 μ F ที่ขา 5
ชุดหลอดอิเล็กโตรด	ทรงกระบอก	แกนซ้อนรวม	L = 130 mm
H.V. Electrode	ขดลวดสแตนเลส	304L L = 130 mm	Dimeter = 2 mm
Di Electrode	แก้วโบโลซิลิเกต 3.3	ขอบใน = 38 mm	ขอบนอก = 40 mm
Ground Electrode	สแตนเลส 304L	ขอบใน = 50.8 mm	ขอบนอก = 56.8 mm
Ct = 2.44 nF			
Ucs = 21.92 kV			
E1max = 15.01 kV/cm (ความเครียดสนามไฟฟ้าชั้นที่ 1)			
E2max = 37.17 kV/cm (ความเครียดสนามไฟฟ้าชั้นที่ 2)			

5.4 ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย

ในส่วนของคุณค่าความเข้มข้นก๊าซโอโซนที่ระดับ 400 ppm ขาออกจากเครื่องกำเนิดโอโซน จำหน่ายให้กับถังลดอุณหภูมิซากไก่เบื้องต้น เป็นค่าที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการเก็บตัวอย่างจำนวน 100 ฟาร์ม ฟาร์มละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 500 ตัวอย่าง คิดเป็น 41% สามารถลดเชื้อจำนวน 10,000 cfu/g ที่ใส่เข้าไปในซากไก่ตัวอย่าง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถลดเชื้อ *Salmonella.spp* ได้ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่เหมาะสมในการวิจัย

Ozone Generator (ppm)	Source (Vac)	Source (Hz)	Frequency (kHz)	Variable transformer (kV)	ใส่เชื้อ 10,000 cfu/g <i>Salmonella.spp</i> Result
105	220	50	40	9	Detected
203	220	50	40	10	Detected
309	220	50	40	12	Detected
400	220	50	40	15	Not Detected

5.5 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถสร้างมูลค่า ลดความเสียหายและความสูญเสียจากการผลิต รวมถึงลดการใช้สารเคมี ซึ่งการวิจัยนี้ได้นำความเข้มข้นของโอโซนนำมาลดเชื้อซัลโมเนลล่าได้ดี จึงควรขยายผลการใช้โอโซนกับขั้นตอนอื่นๆในโรงงานอุตสาหกรรม และ ฟาร์มเลี้ยงไก่ หรือ การขนส่ง เพื่อให้เป็นการพัฒนาทั้งระบบของโรงงานอุตสาหกรรม

ปัจจุบันเทคโนโลยีการลดเชื้อด้วยหลักการนาโนบัพเบิลมีการทำวิจัยแพร่หลายมากขึ้น หากสามารถนำมาใช้ใช้ร่วมกับระบบอุตสาหกรรมโรงงาน หรือ หาข้อดีข้อเสียเปรียบเทียบระหว่าง โอโซน เทียบกับนาโนบัพเบิลได้ จะเป็นการพัฒนามาตรฐานการผลิตสินค้าส่งออกด้านปศุสัตว์สัตว์ปีกของประเทศไทยได้อีกทางหนึ่ง

บรรณานุกรม

- [1] ปิยะวิทย์ ทิพรส. คุณสมบัติทางเคมีและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาวผลิตภัณฑ์เนื้อปลา. (น.105-120) ในบทความสหวิทยาการ. คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
- [2] [สมศักดิ์ สุภสิทธิ์มงคล. (2565,กุมภาพันธ์). เครื่องผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อด้วยวิธีการผลิตทางไฟฟ้าเคมี. ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- [3] ปรียาภัทร ไตรสนธิ.(2561, กันยายน). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของไหลวิกฤตยิ่งยวดในอุตสาหกรรมอาหาร. ในบทความทางวิชาการอาหาร. (น.45-52) สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] นิพัฒน์ ลิ้มสงวน.(2563, มีนาคม).เทคโนโลยีใหม่ในการแปรรูปและถนอมอาหาร เทคโนโลยีโคลด์พลาสมา. ในบทความทางวิชาการอาหาร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] อำนาจ สุขศรี, พร้อมศักดิ์ อภริติกุล.(2544). การศึกษาเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโอโซน. ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [6] ศิริโรจน์ เกตุแก้ว.(2546, กุมภาพันธ์). เครื่องผลิตโอโซนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูงแบบสวิตชิง. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41. (น.268-275) สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] บุญเลิศ สือเคย, ชัยพิสิษฐ์ ผิวอ่อน.(2559, ธันวาคม). การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แก๊สอิเล็กโตรด สเตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง เงิน และตะกั่ว ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงแบบสวิตชิง. ในบทความวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต. (น.34-49) คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต.
- [8] คมแข พิลาสมบัติ, (2556), การลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์บนเนื้อไก่โดยการล้างด้วยน้ำโอโซน สารละลายกรดแลกติกและสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์. ในบทความสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ วช. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง:กรุงเทพฯ.
- [9] อีระ วงศ์สมุทร. (2552, มิถุนายน). แก๊ซซิโอมาตรฐานสินค้าเกษตร ที่เป็นมาตรฐานทั่วไป ตามพระราชบัญญัติมาตรฐานสินค้าเกษตร. (น.1-10). ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, สำนักรับรองมาตรฐานสินค้าเกษตรแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร.
- [10] ยุคล ลิ้มแหลมทอง.(2551, ธันวาคม). เกณฑ์ด้านจุลชีววิทยาสินค้าปศุสัตว์เพื่อการส่งออก. ประกาศกรมปศุสัตว์. (น.1-3) กรมปศุสัตว์. กรุงเทพมหานคร.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



2022 International Conference on Eco-Energy and Materials
Science

and Engineering Symposium

(EMSES 2022). Pattaya, THAILAND, 2022

Karoon Suntharo, Promsak Apiratikul, and Nathabhat Phankong,
“Optimal Process for Reduced Pathogen in Carcass Chicken with
Ozone Generator for Industrial Plants,” EMSES. Pattaya,
THAILAND, pp. December 2022 7-10, 2022 [2022 International
Conference on Eco-Energy and Materials Science and Engineering
Symposium (EMSES 2022). Pattaya, THAILAND, pp. 53-56, 2022].

Optimal Process for Reduced Pathogen in Carcass Chicken with Ozone Generator for Industrial Plants

Karoon Suntharo¹, Promsak Apiratikul², and Nathabhat Phankong^{3*}

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

Email: karoon_s@mail.rmutt.ac.th¹, promsak.a@en.rmutt.ac.th², nathabhat_p@rmutt.ac.th³

Abstract—This paper proposed the optimum value of ozone for washing chickens to reduce pathogens *Salmonella* spp in poultry industrial plants. The ozone generator was designed with a high voltage variable transformer at 15 kV and a pulse power converter at 40 kHz using the corona discharge technique. It was used on a co-axial cylindrical coil. High voltage brush electrode, ground electrode made of 316L stainless steel, glass tube insulation, measuring 0.55 mm diameter in high voltage electrode consists of 0.7 mm diameter in glass tube insulation, 1.17 mm diameter in ground electrode, measuring 250 mm in length, 2 mm thick with an aluminum cooling system and air-dry flow rate 3 LPM. It can produce ozone at a concentration of roughly 400 ppm. According to the experimental results, the designed ozone generator for usage in this industrial plant should produce ozone at an optimal level of roughly 20 ppm in water and 0.2 ppm in ambient air. It can lower infections and conform to the Department of Livestock Development's 4 log product criteria. It can be used as a substitute in the poultry business for sterilizing. In addition, the use of imported food contact chemical consumables to minimize infections can be replaced by ozone, which is also good for the environment.

Keywords—ozone generator, high voltage, pathogen, poultry industrial plant.

1. INTRODUCTION

Chicken is well known as the most crucial animal for food production and export aspects in Thailand, producing an economic impact in the agricultural term of over 300 billion baht per year. However, a pathogen called "Salmonella" bacteria can be contaminated the chicken carcass, resulting in health issues such as diarrhea, and gastrointestinal infection and extremely harmful to humans, who get infected with lots of these bacteria. For solving this problem, hence, Chlorine hypochlorite, sodium dioxide, and peracetic acid, which can be used for a food decontamination process, are considered to apply in each step of the process from a chicken farm to a processing plant with an appropriate quantity of the chemical portion. The decontamination using chemical substances with food-grade properties is combined with clean water to cleanse the chicken carcass, resulting in unbeneficial in terms of the cost production in the poultry industrial plants.

For improving the cost-effectiveness of the poultry industrial plants and reducing the chemical to satisfy a bio-circular-green (BCG) economy policy of the world's economic development module as announced in APEC 2022 by 21 leaders, which is held in Bangkok, Thailand, ozone technology for the decontamination process is considered as the most interesting method for solving this application. There were several kinds of literature that ozone production and applications in the disinfection process were proposed. As demonstrated by the experimental results, which were verified by testing with the decontamination procedure, it could be concluded that the pathogens were disinfected by ozone with an effective result. Nevertheless, the decontamination of the pathogen using ozone in the previous work was not verified by the large-scale application, especially for an industrial term, and guaranteed that the ozone generator was able to apply in real-world

aspects.

Therefore, this paper proposes a pathogen reduction in chicken carcasses with an optimal solution process for poultry industrial plants using the ozone generator, which is designed for the large-scale industrial plant system. The ozone is generated by the corona discharge phenomena using a layered coaxial cylindrical coil with a dry air controller for the ozone tube. The ozone flow rate is constantly regulated at 3 liters per minute. The high voltage brush electrode consists of 316L stainless steel ground electrode and glass tube insulation. The 15 kV high voltage variable transformer is designed by using a pulse power converter at 40 kHz switching frequency for stabilizing the ozone quantities in the cleansing water to cleanse the chicken carcasses in the decontamination process [1]-[2]. The proposed ozone generator is verified in a washing chicken carcasses process on a large-scale poultry industrial process under the controlled section for optimal ozone quantities to reduce salmonella bacteria of 150 chicken carcasses per minute with 2 liters per carcass of overflow water at 2°C, 20 cubic feet per minute of airflow, and 5 rpm of fan blade for washing tank's water flow [3].

The generated ozone is supplied through the airflow to combine with the washing water. The appropriate intensity of generated ozone is regulated by varying the voltage transformer as the input of the pulse power converter. The experimental results reveal that the proposed ozone generator can reduce salmonella bacteria with effectiveness at 400 ppm of ozone intensity, 20 ppm of ozone water, and 0.2 ppm of ozone in the air of the environmental area that the ozone quantities are safe for worker's health in this industrial section. The optimal solution for the washing process of chicken carcasses in the poultry industrial plant to reduce the pathogen is also investigated in this paper.

II. DESIGN OF OZONE GENERATOR FOR THE POULTRY INDUSTRIAL PLANT

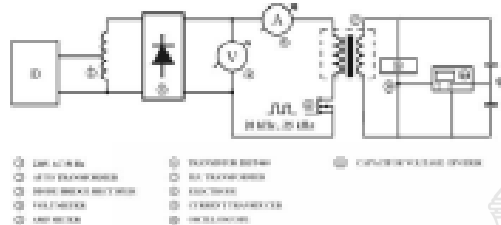


Fig. 1. High voltage circuit of ozone generator.

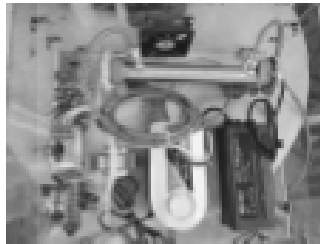


Fig. 2. Ozone generator design for testing.



Fig. 3. The process experiment for washing the chicken carcass.

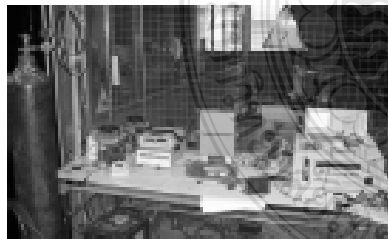


Fig. 4. The instrument for experimental measurements.

The proposed ozone generator scheme for utilization in the poultry industrial plant is illustrated in Fig. 1. The ozone generator consists of 0-230 V_{ac} at a 50 Hz variable voltage source, the voltage transformer at 0-20 kV, the pulse controller at 40 kHz, and a 0.55 mm radius of stainless steel, which is shown in Fig. 2. The high voltage brush electrode supports the continued operation of the industrial process while taking into account a chemical reaction and corrosion tolerance in accordance with ozone. The di-electrode radius is 0.7 mm using the glass as the inorganic thermoplastic [4]. The permittivity and the voltage tolerance are 3.5 and 100-

400 kV, respectively. The 316L stainless steel is used for the circular cylindrical shape of the ground electrode with a 1.17 mm radius, 250 mm length, and 2 mm thickness [5]. The appropriate airgap is designed at 0.47 mm and the air permittivity is equal to 1. The airflow rate at 3 liters per minute is controlled by the air pump regulation process to supply dry and clean air for the electrode.

The process experiment for washing the chicken carcass is regulated at 2 liters per carcass of the overflow water rate as shown in Fig. 3. The temperature of the feeding water for the 32 cubic-meter washing tank is controlled at 2 °C. The airflow rate of the ventilation system in this room is designed at 20 cubic feet per minute at 12 °C. The washing time is set at 20 minutes with 5 rpm of fan blade rotational speed. The average weight of the chicken carcass is 2.2 kg. The production speed process constraint is fixed at 150 carcasses per minute.

The experimental results are measured by the instruments as described in the followings: 1. Tektronix model TBS 1052B-EDU digital oscilloscope; 2. Tektronix model P 605A high voltage probe; 3. APT model 405M zone concentration meter; 4. TWINNO model DOZ30 water ozone concentrate; 5. TONGDY G09-03-B31 ambient ozone model; 6. Anritsu model HD-1200K thermometer; 7. SEIKO model S23589P1 stopwatch; 8. Air flow meter; and 9. Tacho meter. The method of examination of carcass samples is examined by Central Laboratory (Thailand) Co., Ltd. The sample carcass washing is verified by method ISO 6579-1:2017/Am1:2020. The instruments for experimental measurements are shown in Fig. 4.

The optimal solution process for determining the appropriate chicken carcass decontamination is described by the following process. First, the ozone generator is supplied by tuning the determining value using the voltage transformer, and then the ozone is generated in this process. After that, the generated ozone value is observed by the ozone measurement. With the appropriate ozone value generated by the proposed ozone generator, it can be tested for the poultry industrial plant, determining the controlling process in the chicken carcass washing process. The ozone intensity in the washing process is also measured to trade-off between the quantities and disinfection quality. The chicken samples after the washing process with the proposed ozone scheme are verified by the laboratory test for observing *Salmonella* spp reduction to obtain the optimal washing carcasses process.

III. EXPERIMENTAL RESULTS



Fig. 5. Ozone generator testing.

TABLE V. SALMONELLA OF CHICKEN WASHING WATER FOR LABORATORY SPECIMENS ISO/IEC 17025

Chicken Farms	Included <i>Salmonella</i> spp	Ex.01	Ex.02	Ex.03	Ex.04	Ex.05
1	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
2	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
3	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
4	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
5	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
6	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
7	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
8	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
9	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND
10	10,000 cfu	ND	ND	ND	ND	ND

The three ozone generator prototypes with the designed values are installed in the poultry industrial plant as demonstrated in Fig. 9 to operate at different schedules during the machine cleaning process during chicken production for extending the lifetime of the electrode. Furthermore, the prototypes are operated as a primary-backup scheme using the protective and timer relays during a contingency occurrence, which can lead to the out-of-service of the industrial plant, improving the industrial stability and reliability.

For testing and evaluating the proposed ozone generator in the industrial plant, the designed parameters and constraints of the process are summarized in Table IV. The laboratory testing results, which are certified by ISO/IEC 17025, under the different cases are compared as demonstrated in Table V. The results are obtained from 10 chicken farms with 5 samples, which are fed to the industry, and are included with 10,000 cfu of *Salmonella* spp. After the washing carcass process with the proposed ozone decontamination, each sample is collected for laboratory testing. From the experimental results, it can be concluded that the proposed ozone generator prototypes with appropriate values design methods show superior performance associated with *Salmonella* spp reduction, which can be described as "Not Detect" in all cases of samples with 10 different chicken farms.

IV. CONCLUSION

This paper proposed the ozone generator using the corona discharge technique and the appropriate design values to

construct the prototypes for a large-scale poultry industrial plant. The solutions were obtained by considering the environmental and industrial constraints under the human safety standard. As the appropriate design method and suitable values of the ozone generator associated with the intensity of ozone with the experimental results and testing from the laboratory, it could observe that the optimal values of generated ozone, ozone water, and ozone in air intensities were 400, 20, and 0.2 ppm. The experimental results were obtained from 10 chicken farms, where the chickens were included with 10,000 cfu. With the proposed ozone decontamination process for washing the carcass, *Salmonella* spp from laboratory testing could not be detected in all cases. It could reduce *Salmonella* spp, which conformed to 4 log criteria. Moreover, it was environmentally friendly in comparison with the chemical utilization in the washing carcass process.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their deep gratitude to Golden Line Business Co., Ltd. for the equipment and financially supporting this research.

REFERENCES

- [1] A. Sakai, K. Kanchanadacha, K. Torimitsu and P. Apiratikul, "A comparative study on suitable high voltage sources for ozone generation," 2019 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2019, pp. 296-299, doi: 10.1109/ECTECON.2019.93157012.
- [2] Y. Chang, W. Meng, "An Isolated High-Voltage High-Frequency Pulsed Power Converter for Non-Thermal Plasma Ozone Generation," IEEE ECCE, 7 Nov 2017, p.6
- [3] P. Kanchan, B. Phosphan and P. Yuthagorn, "Design and Construction of An Ozone Generator Based on A Resonant Converter," 2019 5th International University Power Engineering Conference (UIPEC), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UIPEC.2019.9093494.
- [4] T. Xiongmin, L. Zhongtao, and Z. Mao, "A Wide-Range Frequency Model for Dielectric Barrier Discharge Type Ozone Generators Powered by Series Resonant Inverters," IEEE ACCESS V.7, 4 Mar 2019, p.124308-124314
- [5] Boussier Stachey and Chapuisat Fieu-on, "Comparison Of Ozone Gas Generation via The Use Of Electrode Tube Stainless Aluminum Copper Silver and Lead Using High Voltage AC Switching Power Supply," Kasorn Bundit Engineering Journal, vol. 6, no. 2, July-December, 2016.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นามสกุล	การุณย์ สุนทโร
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤศจิกายน 2518
ที่อยู่	1/75 หมู่ 2 ถนน สระบุรี-หล่มสัก ตำบล ชับสมอทอด อำเภอ บึงสามพัน จังหวัด เพชรบูรณ์ รหัสไปรษณีย์ 67160
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ(ศูนย์นนทบุรี) ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ.2566-2567 ตำแหน่ง ผู้บริหารของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง

