

โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2552

การออกแบบระบบไอโซนเพื่อใช้ในระบบคลังทาวเวอร์

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดย

รศ.ศิริวัฒน์

โพธิเวชกุล

หัวหน้าโครงการ

นายปยุตวิริ์

ทองเขียว

ผู้ช่วยนักวิจัย

นายเจษฎา

มัทกิจ

ผู้ช่วยนักวิจัย

นายชาญชัย

โสสีภา

ผู้ช่วยนักวิจัย

นายชวิิน

ช่างทอง

ผู้ช่วยนักวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	I
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	V
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบ Cooling Tower	4
2.1.1 ปัญหาที่พบเสมอในระบบน้ำหล่อเย็น (cooling water system)	5
2.1.2 การใช้ไอเซนบำบัดในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์	6
2.2 ทฤษฎีการเกิดก๊าซไอเซน	6
2.2.1 คุณสมบัติเด่นของ ไอเซน (O ₃)	8
2.2.2 การติดไฟและลุกไหม้	9
2.2.3 ข้อมูลอันตรายต่อสุขภาพ (Health Hazard Data)	9
2.2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของไอเซนกับคลอรีน	11
2.2.5 กระบวนการแตกตัวของก๊าซไอเซนและการผลิตไอเซน	13
2.3 สนามไฟฟ้า	16
2.3.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress)	19
2.3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างกัน	20
2.3.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนเนื้อเดียวกัน	24
2.4 ระบบปรับอากาศ	26
2.4.1 โครงสร้างของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์	27

RCH

TJ

563

๘ ๕๘๗๓

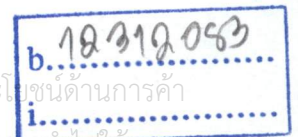
ค. ๑.

สงขพญ.....

115501

เลขทะเบียน.....

วันเดือนปี..... 15 ส.ค. 2554



ไม่ให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สารบัญ(ต่อ)

2.4.2	โครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น	27
2.4.3	หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น	32
2.5	การวิเคราะห์การใช้พลังงานและการหาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น	33
2.5.1	การวัดการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น	33
2.5.2	การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น.	37
บทที่ 3	การออกแบบ	
3.1	การคำนวณประกอบการติดตั้งเครื่องกำเนิดไอโซน ในระบบคลุ่ลิ่งทาวเวอร์	40
3.1.1	การคำนวณปัจจัยต่าง ๆ ของระบบก่อนการติดตั้งไอโซน	40
3.1.2	การคำนวณประกอบการติดตั้งระบบไอโซน	41
3.2	โปรแกรมคำนวณขนาดเครื่องผลิตไอโซน	42
3.3	การติดตั้งระบบ	44
บทที่ 4	ผลการทดลอง	
4.1	ผลการทดลองด้านพลังงาน	49
4.1.1	การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)	50
4.2	ผลการทดลองด้านเคมีวิเคราะห์	52
4.2.1	การวัดค่า TDS (Total Dissolve Solid) และค่า Conductivity	52
4.2.2	การวัดค่า pH	56
4.2.3	การวัดค่าไอโซนในน้ำ	57
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	
5.1	สรุปผลการทดลอง	59
5.2	ข้อเสนอแนะ	61
	เอกสารอ้างอิง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Diagram การทำงานของระบบ Cooling Tower โดยทั่วไป	4
2.2 กระบวนการการใช้ไอโซนบำบัดน้ำในคูลลิ่งทาวเวอร์	6
2.3 การเกิดไอโซนตามธรรมชาติ	7
2.4 วิธีการเกิดไอโซนจากสนามไฟฟ้าแบบ Corona Discharge	7
2.5 กลไกการผลิตไอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry	16
2.6 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม	17
2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	19
2.8 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน	21
2.9 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	21
2.10 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย	23
2.11 ทรงกระบอกซ้อนกันรวม	24
2.12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V , และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่	26
2.13 ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์	27
2.14 โครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น	28
2.15 Evaporator	29
2.16 คอมเพรสเซอร์แบบกันหอย	29
2.17 คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ	30
2.18 คอมเพรสเซอร์แบบสกรู	30
2.19 คอมเพรสเซอร์แบบหอยโข่ง	31
2.20 คอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	31
2.21 การทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น	32
2.22 วัฏจักรกดตันไอ (P-h Diagram)	33
2.23 เปรียบเทียบวัฏจักรกดตันไอกับเครื่องทำน้ำเย็น	34
2.24 การไหลของพลังงานในเครื่องทำความเย็น	36
3.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณขนาดเครื่องผลิตไอโซน	43
3.2 แผนผังการติดตั้งระบบไอโซน	44
3.3 เจาะท่อเพื่อดึงน้ำจากระบบเข้ามายังระบบผสม	45
3.4 หลักการของท่อ Venturi	45
3.5 ท่อ Venturi ต่อร่วมกับ Union ball valve ที่ใช้ในระบบผสม	46
3.6 Ozone Mixing Pump	46
3.7 หลักการทำงานของ Ozone Mixing Pump	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

3.8	กราฟแสดงประสิทธิภาพ (Performance Curve	47
3.9	ติดตั้งปั้มน้ำและเดินท่อของระบบผสม	48
4.1	การติดตั้งเครื่องวัดพลังงาน	49
4.2	กราฟแสดงการใช้พลังงานที่ลดลงที่เปอร์เซ็นต์ไหลตเดียวกัน	50
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิโลวัตต์ต่อต้นกับเวลาช่วงก่อนและหลังการติดตั้ง	51
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Approach Temp กับเวลาช่วงก่อน-หลังการติดตั้ง	52
4.5	ชุด Conductivity meter	53
4.6	Potassium Chloride (KCl) ความเข้มข้น 0.01 mol /l	54
4.7	ใช้ Potassium Chloride (KCl) 0.01 mol/l เป็นสาร Calibrate	54
4.8	วัดค่า TDS และค่า Conductivity	55
4.9	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Conductivity และ TDS	56
4.10	การวัดค่า pH	56
4.11	กราฟแสดงค่า pH	57
4.12	ชุดงานเทียบสีสำหรับวัดค่า Ozone residual	57
4.13	เทียบสีและอ่านค่า	58
4.14	กราฟแสดงค่า Residual Ozone	58
5.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นกับความหนาของตะกอน	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซน	8
2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น	10
2.3 ความสามารถในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีน เทียบกับโอโซนที่ pH 6-7	11
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน	11
2.5 เปรียบเทียบการใช้เคมีกับโอโซนเพื่อแก้ปัญหาตะกรันและตะไคร่ใน ในระบบ Cooling Tower	12
2.6 ระดับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก๊าซ	15
3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดคูลลิ่งทาวเวอร์กับเครื่องผลิตโอโซน	43
3.2 คุณสมบัติของปั๊ม	48
4.1 ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นของเครื่องทำความเย็นชนิด ระบายความร้อนด้วยน้ำ	50
4.2 ผลการวัดค่า TDS และค่า Conductivity	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรม หรืออาคารสำนักงานขนาดใหญ่ใช้หอผึ่งเย็น หรือ คูลลิ่งทาวเวอร์ (Cooling Tower) เพื่อระบายความร้อนของระบบทำความเย็น ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ เช่น การเกิดตะกรัน (Calcium & Magnesium Carbonate) การเกิดเชื้อโรค (Biofilm) การเกิดตะไคร่น้ำ (Algae) การเกิดสนิม และการผุกร่อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ลดลง

โดยทั่วไประบบคูลลิ่งทาวเวอร์จำเป็นต้องใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อบำบัดน้ำ เช่น การใช้คลอรีนเพื่อควบคุมปริมาณเชื้อโรค การใช้กรดซัลฟูริก สารประกอบฟอสฟอรัส และสังกะสีเพื่อควบคุมตะกรัน ตะไคร่น้ำและราเมือก รวมถึงการใช้สารประกอบของไนไตรต์ โบแรกซ์เพื่อป้องกันการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในระบบ สารเคมีเหล่านี้มีประสิทธิภาพหลังเติมเพียง 3-4 วัน (หากไม่ใช้ระบบเติมอัตโนมัติ) ทั้งสิ่งเจือปนตกค้างในระบบทำให้ต้องปล่อยน้ำในระบบทิ้ง (Blow down) บ่อยๆ รวมทั้งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานและสภาพแวดล้อม

ระบบไอโซนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ในน้ำ ทำให้ลดการใช้สารเคมีและความจำเป็นในการโบลว์ดาวน์เพื่อรักษาคุณภาพน้ำของระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ และที่สำคัญช่วยลดการเกิดตะกรัน และการกัดกร่อนทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของคูลลิ่งทาวเวอร์ดีขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นดี อยู่ตลอดเวลา ทำให้การใช้พลังงานของระบบการทำความเย็นลดลงและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบทำความเย็น
2. เพื่อทำการศึกษานำเครื่องผลิตไอโซนไปใช้งานในคูลลิ่งทาวเวอร์
3. เพื่อลดผลกระทบตลอดจนปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบทำความเย็นขนาดใหญ่

4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการวิจัยเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีภายในประเทศ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

การออกแบบระบบบำบัดน้ำในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์โดยใช้เครื่องกำเนิดไอโซน รวมถึงการวัดค่าและวิเคราะห์พลังงานก่อนและหลังการติดตั้ง การตรวจสอบสภาพน้ำทั้งก่อนและหลังติดตั้ง และการตรวจสอบปริมาณของไอโซนที่หมุนเวียนในระบบ

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาลักษณะการทำงาน โครงสร้าง และคุณสมบัติของเครื่องผลิตไอโซน และการทำงานของระบบคูลลิ่งทาวเวอร์
2. ทำการทดลองติดตั้งเครื่องผลิตไอโซนในคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ศึกษาเทคโนโลยีสารสนเทศเป็นเวลา 4 เดือน
3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพและปัญหาที่เกิดขึ้นในคูลลิ่งทาวเวอร์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลมาตรฐานอุปกรณ์ต่างๆ การออกแบบระบบและเครื่องผลิตไอโซน รวมถึงการทดสอบวัดผลทางด้านพลังงาน และทางด้านเคมี
2. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตไอโซนในคูลลิ่งทาวเวอร์ เก็บค่าพลังงานก่อนติดตั้งระบบไอโซนเพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังติดตั้ง
3. ออกแบบระบบเครื่องผลิตไอโซน และติดตั้งระบบ
4. ติดตั้งเครื่องผลิตไอโซนในคูลลิ่งทาวเวอร์ โดยทดลองใช้งานเป็นเวลา 4 เดือน และเก็บค่าพลังงานของระบบตามระยะเวลาที่กำหนด
5. ทดสอบและตรวจสอบน้ำ ปริมาณไอโซนในน้ำ ตะกอน และตะไคร่ของน้ำในคูลลิ่งทาวเวอร์

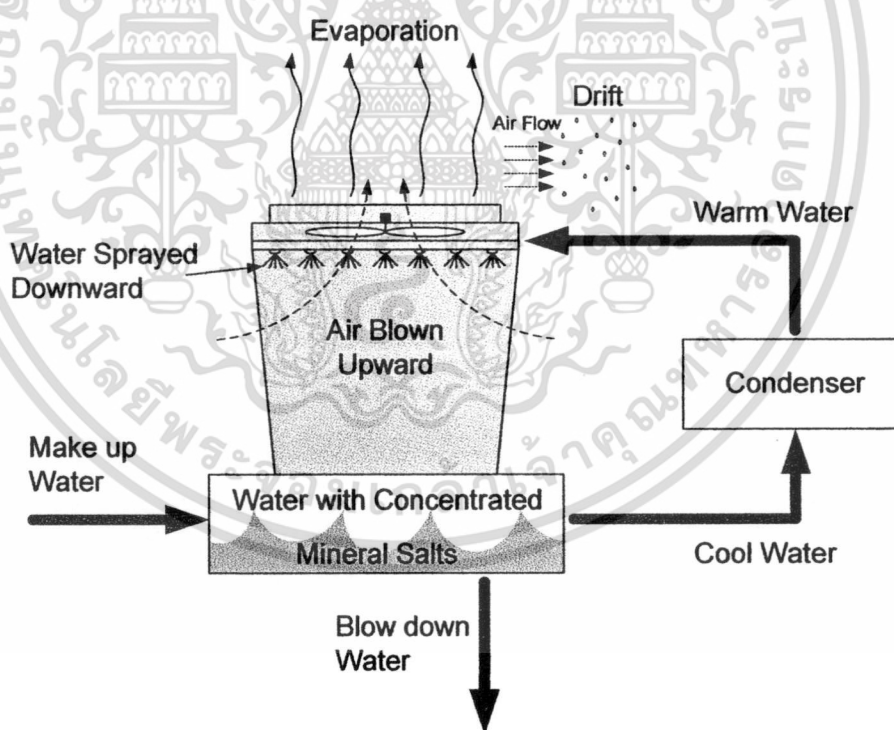
ตารางปฏิบัติงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาข้อมูลอุปกรณ์ต่างๆ การออกแบบระบบและการทดสอบวัดผล										
2. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตไอโซนในคูลลิ่งทาวเวอร์ เก็บค่าพลังงานก่อนติดตั้งระบบไอโซน										

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบ쿨ลิ่งทาวเวอร์ (Cooling Tower) [1]

ระบบ쿨ลิ่งทาวเวอร์ เป็นระบบที่สำคัญมากในการระบายความร้อนของเครื่องจักรต่างๆ เช่น ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ โรงงานพลาสติก ห้องเย็น เป็นต้น การทำงานของระบบ쿨ลิ่งทาวเวอร์เริ่มจากการดึงน้ำเย็นจาก쿨ลิ่งทาวเวอร์มาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) หรือคอนเดนเซอร์ (Condenser) เพื่อให้น้ำเย็นได้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์ระบายความร้อนต่างๆ ของเครื่องจักร จากนั้นน้ำเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นกลายเป็นน้ำอุ่นน้ำอุ่นจะถูกส่งกลับมายัง쿨ลิ่งทาวเวอร์อีกที่หนึ่งเพื่อฉีดลงมาเป็นฝอยในทิศทางสวนทางกันกับการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของอากาศจากพัดลมดูดอากาศ ดังรูปที่ 2.1 เป็นผลให้น้ำอุ่นถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศและน้ำบางส่วนจะกลายเป็นไอซึ่งการกลายเป็นไอนี้จะดูดความร้อนจากน้ำที่เหลือออกไปด้วยทำให้น้ำที่เหลือมีอุณหภูมิลดลงกลายเป็นน้ำเย็นและส่งเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือคอนเดนเซอร์อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.1 ไคอะแกรมการทำงานของระบบ쿨ลิ่งทาวเวอร์โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระหว่างที่น้ำอุณหภูมิลดลงมาเป็นผลจะมีการสูญเสียของน้ำจากลมพัดพา ละอองน้ำออกไปในบริเวณรอบๆ (Drift Losses) และจากการกลายเป็นไอของน้ำ (Evaporation Losses) เมื่อน้ำในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์สูญเสียไปมากๆ ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำจะสูงขึ้น ทำให้โอกาสที่จะเกิดตะกอนมีมากขึ้นจำเป็นต้องปล่อยน้ำในระบบทิ้ง (Blow down) และเติมน้ำ (Make up) เข้ามาใหม่เพื่อให้ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำต่ำลงโดยต้องเติมน้ำเข้ามาใหม่ตามความสัมพันธ์ข้างล่างนี้

$$\text{Make up water} = \text{Drift Losses} + \text{Evaporation Losses} + \text{Blow down water}$$

2.1.1 ปัญหาที่พบเสมอในระบบน้ำหล่อเย็น (cooling water system) [2]

2.1.1.1 ตะกอน

ตะกอนหรือสารจำพวกหินปูนที่เรียกว่า แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมหรือ ซิลิกา ตามปกติจะพบมากในกลุ่มเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเกิดบริเวณพื้นผิวถ่ายเทความร้อนในคูลลิ่งทาวเวอร์ การเกิดตะกอนเหล่านี้จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดน้อยลงและการไหลของน้ำไม่สะดวกเพราะเนื้อที่ภายในท่อน้อยลง บางครั้งถึงขั้นอุดตัน

2.1.1.2 สนิมและการผุกร่อน

สนิมและการผุกร่อนมีสาเหตุได้หลายประการ อาจเป็นเพราะควันและก๊าซต่างๆ ที่อยู่ในอากาศสามารถผ่านเข้ามาในคูลลิ่งทาวเวอร์ และเปลี่ยนเป็นกรดเข้าไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ รวมถึงสารเคมีที่ใช้ก็ทำให้น้ำมีภาวะเป็นด่างได้ บางครั้งก็มากเกินไปก็เกิดการกัดกร่อนได้เช่นกัน เมื่อเกิดการผุกร่อนแล้วจะทำให้ชิ้นส่วนของคูลลิ่งทาวเวอร์กร่อนเป็นสนิมหลุดหายไป โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่เป็นโลหะจะมีปัญหามากขึ้นถ้าส่วนที่เป็นโครงสร้างถูกกัดกร่อนไป

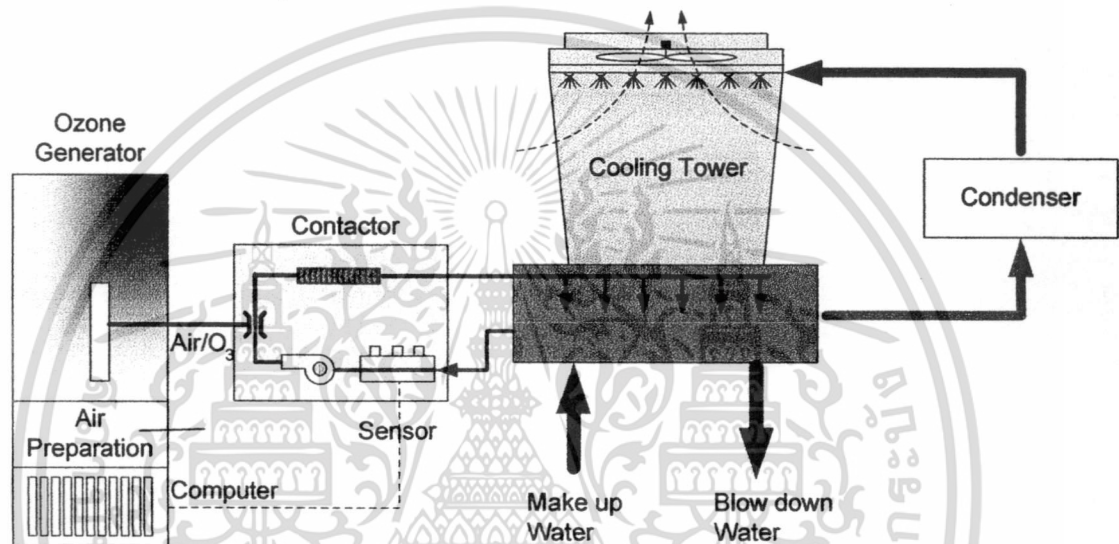
2.1.1.3 จุลชีพ

จุลชีพซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่รับถ่ายเทความร้อนและในอ่างน้ำเย็น จุลชีพที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นพวกสาหร่าย ตะไคร่น้ำหรือพืชอื่นๆ ซึ่งเกิดได้ง่ายตามธรรมชาติเมื่อได้รับแสงสว่างมีอากาศระบายได้ดี โดยเฉพาะสาหร่ายจะทำการสังเคราะห์แสงและปล่อยออกซิเจนออกมาเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้นหรือมีฉะนั้นก็จะเกิดพวกแบคทีเรียในน้ำซึ่งจะเกาะกับตะไคร่น้ำจะเจริญเติบโตขึ้นโดยอาศัยสารเคมีที่อยู่ในน้ำเป็นอาหาร เช่น เกลือซัลเฟต หรือเหล็ก ซึ่งทำให้ส่วนประกอบของสารเคมีที่เติมไว้เพื่อป้องกันการผุกร่อนเสื่อมสภาพไป นอกจากนี้ยังมีพวกเห็ดราซึ่งไม่สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ก็เติบโตและเกาะกับชิ้นส่วนของหอหล่อเย็น ถ้าส่วนประกอบเป็นไม้จะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่ามีเชื้อโรคชื่อ ลีเจียนเนลลา (legionella) ที่ทำให้เกิดโรคลีเจียนแนร์ (Legionnaires' Disease) ซึ่งมีผลต่อระบบทางเดินหายใจส่วนล่างอย่างเฉียบพลัน

2.1.2 การใช้โอโซนบำบัดในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์

จากปัญหาในหัวข้อ 2.1.1 ทำให้มีการใช้โอโซนเข้ามาบำบัดน้ำในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ซึ่งระบบการในการใช้โอโซนบำบัดในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย

1. เครื่องเตรียมอากาศป้อนให้เครื่องผลิตก๊าซโอโซน
2. เครื่องผลิตก๊าซโอโซน
3. ตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนและคูลลิ่งทาวเวอร์
4. ตัวกรองน้ำ
5. ระบบควบคุมการทำงานและการตรวจวัดแสดงผล

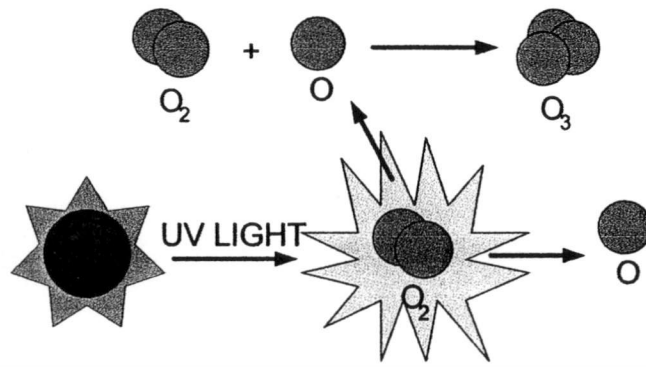


รูปที่ 2.2 กระบวนการการใช้โอโซนบำบัดน้ำในคูลลิ่งทาวเวอร์

2.2 ทฤษฎีการเกิดก๊าซโอโซน [2]

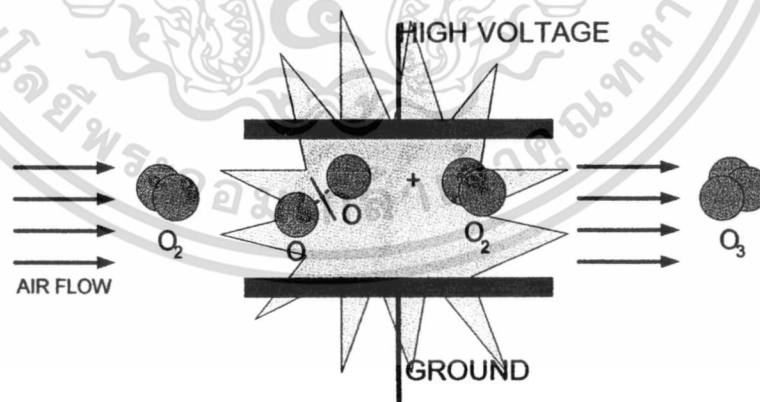
โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นทางการค้าและอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโอโซนที่สามารถแก้ปัญหาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านมลภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประโยชน์ของโอโซนที่รู้จักแล้วโอโซนยังมีโทษรุนแรงด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจในการนำไปใช้งาน โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักกันมากในปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ทำหน้าที่แบบเดียวกันคือเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่อื่นๆ ได้อย่างดี โอโซนเป็นโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนสามอะตอม มีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น O_3 โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรและสลายได้ด้วยตัวเอง โดยปกติโอโซนจะเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจากการที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ที่ระดับความสูง 15-50 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเลแตกตัวออกเป็นอะตอมของออกซิเจนและไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นโอโซน ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเกิดโอโซนตามธรรมชาติ

นอกจากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแล้ว โอโซนยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการผ่านอากาศแห้งและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมเข้าไปยังสนามไฟฟ้าแบบโคโรนาดิสชาร์จทำให้ออกซิเจนในอากาศบางส่วนแตกตัวเกิดอะตอมออกซิเจน ซึ่งจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นโอโซนได้ การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะนั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน (O_2) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ O_2 กลายเป็น O_3 ซึ่งพลังงานของ O_3 จะน้อยกว่า O_2 มากนั่นคือในกรณีที่มีการเพิ่มพลังงานให้กับระบบที่มี O_3 อยู่พลังงานเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถทำให้ O_3 สลายตัวได้ ดังนั้นในระบบจึงไม่ควรเกิดความร้อนขึ้นภายในช่องว่างอากาศมากเกินไป เช่นความร้อนที่เกิดเนื่องจากการเบรกตาวิน นั่นคือพลังงานที่อิเล็กทรอนิกส์รับจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน การเกิดโอโซนจากสนามไฟฟ้าแบบโคโรนาดิสชาร์จแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการเกิดโอโซนจากสนามไฟฟ้าแบบโคโรนาดิสชาร์จ

นอกจากการใช้สนามไฟฟ้าแบบโคโรนาดิสชาร์จ โอโซนยังสามารถถูกผลิตขึ้นได้โดยการใช้รังสี UV เครื่องให้กำเนิดโอโซนชนิดหลอดรังสี UV จะใช้พลังงานจากไฟฟ้า กระแสตรงหรือกระแสสลับ มักใช้ช่วงความยาวคลื่นของรังสีต่ำกว่า 200 nm. ถ้าความยาวคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่านี้จะทำให้ได้ก๊าซโอโซนน้อยลงและกลับมีก๊าซพิษมากขึ้น นิยมใช้กับการผลิตโอโซนขนาดเล็กโดยการใช้รังสี UV นั้นจะทำให้อะตอมของออกซิเจนในอากาศเกิดการแตกตัว เพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นโอโซน ซึ่งวิธีการนี้จะเสียค่าใช้จ่ายต่ำและอากาศที่ใช้ก็ไม่จำเป็นต้องเป็นอากาศแห้งเพื่อนำมาผลิตเป็นโอโซน

2.2.1 คุณสมบัติเด่นของ โอโซน (O₃) [3]

1. โอโซนเป็น Oxidizing agent ที่รุนแรงและสลายตัวเร็ว
2. เป็นก๊าซมีกลิ่น สัมผัสได้ด้วยความเข้มข้นต่ำในอากาศ 0.01 ppm.
3. ความหนาแน่น (Density) 150% ของออกซิเจน
4. สถานะแก๊ส ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นของเหลวที่ -170 °F (-111.9 °C) (มีสีน้ำเงินเข้ม) และเป็นของแข็ง หรือแข็งตัวที่ -420 °F (-251°C) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ -192.7 °C ความสามารถในการละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C มีค่าเท่ากับ 0.003 g/l (3 ppm.) และความหนาแน่นของโอเท่ากับ 1 (เท่ากับอากาศ)
5. สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจน (O₂)
6. มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีน 3,125 เท่า
7. ฆ่าเชื้อโรค อาทิ ไวรัส (Virus), แบคทีเรีย (Bacteria), รา (Fungus), Mold, Yeast
8. ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายน้ำ
9. ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ
10. กำจัดกลิ่นในอากาศ
11. ลด COD, BOD ในน้ำเสีย
12. ช่วยลดเวลาสำหรับกระบวนการตกตะกอน
13. ป้องกันตะกรันและตะไคร่น้ำในระบบท่อฝังเย็น
14. กำจัดเชื้อโรคในน้ำดื่มก่อนบรรจุขวด
15. สามารถย่อยสลายสี กลิ่น ก๊าซพิษ และสารเคมีได้ดี

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซน [2]

Section	Detail	
1.Product Identification	Product Name	OZONE
	Synonyms	Activated Oxygen, Triatomic Oxygen
	Chemical Family	Oxidizer
	Molecular Formula	O ₃
	Molecular Weight	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.Hazardous Ingredients	Component	Ozone Gas
	Concentration	0-4 % by weight
3.Health Hazard Data	Permissible Exposure	0.1 ppm. (in Air)
	Symptoms	Irritation for sensitive tissues as eyes, nose and throat. Pungent smell, notice at 0.04 ppm. High concentration of OZONE destroyed lung.
	Toxicological Property	High concentration of OZONE endanger human respiratory organs. Effect on chromosomes structure. Destroyed the exposed tissues.

2.2.2 การติดไฟและลุกไหม้

โอโซนเป็นก๊าซที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซ์ที่รุนแรง โดยที่การออกซิไดซ์จะเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าการออกซิเดชันของออกซิเจน โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ไม่อิ่มตัวทำให้เกิดโอโซนอินทรีย์ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เสถียร และอาจจะย่อยสลายไปกับการระเบิดที่รุนแรง โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิปกติ โอโซนจะสลายตัวกลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงและอยู่ในกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรเจน เหล็ก และโครเมียม การย่อยสลายอาจเป็นผลทำให้เกิดการระเบิดได้

2.2.3 ข้อมูลอันตรายต่อสุขภาพ (Health Hazard Data)

2.2.3.1 ปริมาณที่เหมาะสม

โดยมาตรฐานแล้วอนุญาตให้มีก๊าซโอโซนอยู่ในอากาศประมาณ 0.1 ppm. โดยเฉลี่ยที่ประมาณ 8 ชั่วโมง หรือประมาณ 0.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ปริมาณโอโซนในน้ำไม่ได้มีมาตรฐานกำหนดไว้

2.2.3.2 ลักษณะอาการเมื่อได้รับก๊าซโอโซน

จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองเมื่อสูดดมกลิ่นที่มีความเข้มข้นของโอโซนประมาณ 0.04 ppm. และเมื่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นกลิ่นของก๊าซโอโซนจะลดลง จะทำให้เกิดการระคายเคืองตาและทำให้จมูกและลำคอแห้งและทำให้ไอ เมื่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นมากๆ อาจทำให้เกิดอาการปวดหัว โรคกระเพาะ อาเจียน เหนื่อยหอบ สูดหายใจกับส่งผลอันตรายต่อปอดและถึงแก่เสียชีวิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 คุณสมบัติความเป็นพิษ

ก๊าซโอโซนจะทำลายระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเราสามารถไต่กลิ่นของโอโซนได้ ที่ความเข้มข้นต่ำประมาณ 0.02 ppm. ถึง 0.05 ppm. ก๊าซโอโซนจะส่งผลถึงตาและเยื่อจมูก ต่าง ๆ และมีผลต่อปอดที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ ในระบบร่างกาย ได้มีรายงานเกี่ยวกับ ผลกระทบจากการแพร่กระจายของประจุไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอันตรายต่อ โครงสร้างโครโมโซม ถึงแม้ว่าผลกระทบจากการได้รับโอโซนจะมีลักษณะที่เกิดอย่างเฉียบพลัน แต่ก็สามารถเกิดอาการเรื้อรังเช่นเกิดกับปอดซึ่งทำให้ร่างกายอ่อนแอลงโอโซนเป็นสารเคมีที่ไม่ เคยตรวจพบในการใช้งานเลยว่าเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมาในขณะที่สาร ผลิตภัณฑ์ของคลอรีนหลายชนิดเป็นพิษอย่างรุนแรง นอกจากนี้โอโซนยังจัดว่าเป็นสารที่มี คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อและปลอดเชื้อที่สมบูรณ์แบบ แต่โดยคุณสมบัติตัวมันแล้ว โอโซนเป็น ก๊าซพิษ ค่าศักย์ออกซิเดชันสูงถึง 2.07 V (สำหรับคลอรีน 1.36 V) ดังนั้น ถ้าปราศจากความรู้ และความเข้าใจ การใช้งานจึงมีอันตรายมาก

ตารางที่ 2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น [2]

Ozone Level (ppm : part per million)	Effect
0.001-0.125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ ค่านี้แปรผันตามตำแหน่งและสภาพ บรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่ สาธารณะ
0.3	เริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบ ตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เกิดอาการปวดศีรษะ ปอดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบการสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วยคือ ปวด ศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยอย่าง รุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการ ป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้ายแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

สารเคมีหลายชนิดมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคโดยเฉพาะสารประกอบคลอรีน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนแล้วจะเห็นข้อแตกต่างทางความสามารถที่ชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีนเทียบกับโอโซนที่ pH 6-7 [2]

Microorganism	Disinfectant (mg * min/L)			
	Free Chlorine	Performed Chloramine	Chlorine Dioxide	Ozone
<i>E.Coli</i>	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
<i>Polio I</i>	1.1-2.5	770-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
<i>Rotavirus</i>	0.01-0.05	3810-6480	0.2-2.1	0.006-0.06
<i>Phage f2</i>	0.08-0.18	-	-	-
<i>G.Lambia cysts</i>	47-150	-	-	0.5-0.6
<i>G.Muris cysts</i>	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน [2]

คลอรีน (Chlorine)	โอโซน (Ozone)
1. มีความเป็นพิษสูง และเป็นก๊าซพิษ	1. ระดับความเป็นพิษอยู่ที่ 1 mg/l มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/l ที่ระดับสูงกว่านี้มีการระคายเคืองมากสูงมาก
2. คลอรีนจะถูกเก็บที่ภาชนะบรรจุความดันสูงและสามารถเป็นอันตรายได้เมื่อมีการรั่วไหลเกิดขึ้น	2. โอโซนต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้งาน ไม่สามารถเก็บได้
3. คลอรีนเมื่อผสมกับยูรีนและเหงื่อจะทำให้เกิดสารประกอบโครเดนซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองตาและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	3. โอโซนมีวงจรชีวิตสั้น หลังทำปฏิกิริยาสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. ราคาสูง	4. ราคาโอโซนต่ำลงเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีและการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิตปัจจุบัน
5. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาสูงที่สุดเนื่องจากค่า (Oxidation potential) 2.07 V
6. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่า

<p>7. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงตกค้างหลังจากการบำบัด</p> <p>8. คลอรีนกำจัดตะไคร่น้ำได้ดีมาก</p> <p>9. คลอรีนทำงานได้ดีต้องควบคุม pH ให้อยู่ในย่าน 7.0 – 7.4</p>	<p>คลอรีน 600 – 3000 เท่า</p> <p>7. โอโซนไม่มีกลิ่นตกค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของยูรีน ควีน อาหาร และสีได้</p> <p>8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำ ต้องใช้คลอรีนช่วยกระทำ Shock treatment</p> <p>9. โอโซนไม่ต้องมีการควบคุม pH</p>
---	---

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบการใช้เคมีกับโอโซนเพื่อแก้ปัญหาตะกรันและตะไคร่น้ำในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ [2]

Ozone	Chemical
<p>1. ลงทุนครั้งเดียว</p> <p>2. ไม่จำเป็นต้องมี Softener จึงไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลา</p> <p>3. สามารถตั้งอัตโนมัติได้</p> <p>4. ไม่ต้องเก็บสต็อกวัสดุ ลดขั้นตอนในการสั่งซื้อและพื้นที่เก็บรักษา</p> <p>5. ไม่เพิ่มค่า TDS (Total Dissolve Solid) จึงทำให้ประหยัดน้ำ</p> <p>6. ไม่ต้องล้างกัณฑ์ตะกรันด้วยกรด และรักษาเส้นท่อ</p> <p>7. ไม่เป็นอันตราย</p> <p>8. รักษาสิ่งแวดล้อม</p> <p>9. สามารถกำจัดตะกรันที่มีอยู่ก่อนแล้วออกมาได้และจะไม่เกิดขึ้นอีก</p> <p>10. สามารถป้องกันการเกิดเชื้อโรคได้อย่างดี โดยเฉพาะโรคที่เกิดจากเชื้อลีสทีโอเนลลาที่กรมอนามัยมี ประกาศข้อปฏิบัติในการควบคุมเชื้อ ในหอผึ่งเย็น</p>	<p>1. ลงทุนตลอดไป</p> <p>2. ต้องใช้ Softener มีความสิ้นเปลืองเพราะต้องทำการล้างเกลือ เปลี่ยนถ่ายสาร Resin</p> <p>3. ต้องคอยดูแลรักษา</p> <p>4. ต้องเก็บสต็อก และต้องสั่งซื้ออยู่เป็นระยะ</p> <p>5. เพิ่มค่า TDS จึงต้องทำการบำบัดดาวน์น้ำบ่อยทำให้สิ้นเปลือง</p> <p>6. ต้องทำการล้างตะกรันทุก 6 – 12 เดือน ทำให้เสียเวลา และค่าใช้จ่ายอีกทั้งทำให้เส้นท่อดึงกร่อนจากการกัดของกรด และการชะด้วยของแข็งและของมีคม</p> <p>7. สารเคมีอาจทำให้ระคายเคือง และเป็นอันตรายต่อร่างกายได้</p> <p>8. สารเคมีที่บำบัดไม่ดีพอแต่ต้องระบายออกภายนอกย่อม มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม</p> <p>9. ไม่สามารถกำจัดตะกรันที่มีอยู่ได้ต้องทำการล้างกัณฑ์ด้วยกรดเท่านั้น และจะเกิดขึ้นอีกเมื่อใช้ไป ระยะเวลาหนึ่ง</p> <p>10. ไม่สามารถป้องกันเชื้อโรคได้</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 กระบวนการแตกตัวของก๊าซโอโซนและการผลิตโอโซน [4]

ในอากาศจะประกอบไปด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) 79% และก๊าซออกซิเจน (O_2) 21 % โดยประมาณ นอกจากนั้นเป็นก๊าซเฉื่อยและไอน้ำ โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบไปด้วยออกซิเจน 3 อะตอม จับกันอยู่ในสถานะไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายขึ้นกับเงื่อนไขสภาพแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณที่ผลิต ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจน (free radical) จากโมเลกุลก๊าซออกซิเจนในอากาศ หลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน O_3 ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ การเกิดก๊าซโอโซนเกิดจากปรากฏการณ์โคโรนา ซึ่งทำให้อากาศเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจาก ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งเพียงพอโดยก๊าซออกซิเจนจะเปลี่ยนเป็นก๊าซโอโซนได้ จากปรากฏการณ์ 2 ชนิดคือกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) และกระบวนการแยกตัว (dissociation) ในกระบวนการแตกตัวของก๊าซนั้น เมื่อเกิดไอออไนเซชัน คือการเพิ่มของประจุแบบทวีคูณ (Electron avalanche) นำไปสู่การเบรกดาวนในฉนวนที่พิจารณา กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากการเกิดเบรกดาวนที่เกิดขึ้น ทำให้อิออนซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัว ดังนั้นการผลิตโอโซนจึงไม่ควรเกิดการเบรกดาวนเกิดขึ้น นั่นคือพลังงานที่อิเล็กตรอนรับจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (W_i) แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน

2.2.5.1 ขั้นตอนการแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ

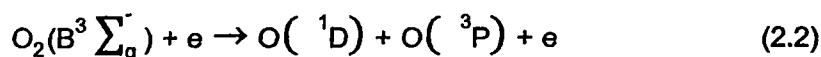
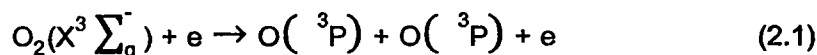
อิสระ

ออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งค่าพลังงานที่สามารถทำให้ออกซิเจนรวมตัวเริ่มเกิดเป็นโอโซนมี 2 ระดับด้วยกันคือ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ

(Dissociation Reaction)

ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แผลงพลังงานในงานวิจัยที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับระดับพลังงานของออกซิเจนแล้วแสดงในสมการ 2.1 และ 2.2



อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานของพันธะของโมเลกุลก๊าซ

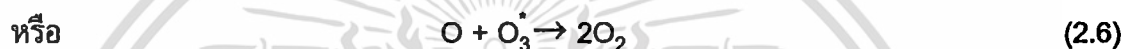
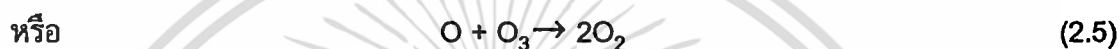
โดยประมาณคืออยู่ในช่วง 6-9 eV หรือ 595.4 kJ/mol หรือ 700 kJ/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เป็นโอโซน (Ozone Generation)



เมื่อ M คือ ก๊าซอื่นอาจเป็น O_2 หรือ N_2 ซึ่งเป็น 3rd Collision partner ช่วงเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยานี้อยู่ในย่าน 1-2 μs แต่ข้อระวังก็คือ ในช่วงเวลาสั้นๆนี้เองสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการผลิตด้วยเช่น



เมื่อ O_3^* คือ โอโซนที่สภาวะถูกกระตุ้นชั่วขณะ (Transient excited state) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มของการจับตัวระหว่าง O กับ O_2 จากสมการที่ 2.3 ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 และ 2.6 เกิดเนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมออกซิเจนอิสระมากเกินไป

ในอากาศที่ผ่านกระบวนการเพื่อผลิตโอโซนจะได้สารผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในก๊าซหลังการแตกตัวที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 300 K (79% N_2 + 21% O_2) นอกจากโอโซนแล้วยังตรวจพบออกไซด์ประเภท N_2O และ N_2O_2 ด้วย ซึ่งระดับความหนาแน่นต่ำกว่าโอโซนแต่ปริมาณที่ตรวจพบจะเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่คุณภาพก๊าซที่ใช้ไม่เหมาะสมคือมีความชื้นสูง ออกไซด์เหล่านี้ส่งผลเสียต่อชุดอิเล็กทรอนิกส์และปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ดังนั้นระบบเตรียมก๊าซก่อนกระบวนการ (Feed gas preparation system) จึงเป็นส่วนสำคัญของระบบส่วนหนึ่งด้วย เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.2 และ 2.3 แล้วพบว่าพลังงานเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างอะตอมมูลฐานของการผลิตโอโซนคือ O การเลือกย่านพลังงานที่เลือกใช้อย่างเหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตดีขึ้น นั่นคือในการออกแบบส่วนผลิตก๊าซจึงต้องใช้ความรู้เบื้องต้นเรื่องทฤษฎีจลน์ของก๊าซและสนามไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงกลไกการเกิดองค์ประกอบทางเคมีในการแตกตัวก๊าซดังจะกล่าวต่อไป

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆหลายชนิดมีทั้งประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้แบบสุ่ม (Random motion) สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แน่นอนแบบมีความเร่ง อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกต่างๆไป จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นส่งถ้ายมาจากการชนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า

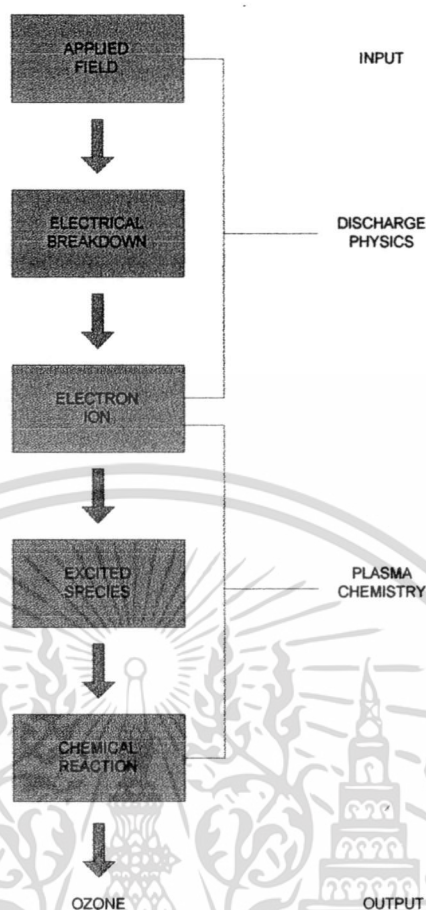
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซ การชนมี 2 ชนิดคือการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) พลังงานจลของอิเล็กตรอนก่อนชนเท่ากับหลังชน และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) คืออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปบางส่วนระหว่างการชนให้กับอนุภาคที่ถูกชนพลังงานที่ถ่ายทอดไปนี้แบ่งออกเป็น 3 ระดับพลังงานคือ พลังงานแตกตัว (Dissociation energy : W_D) พลังงานกระตุ้น (Excited energy : W_E) และพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy : W_I) ตัวอย่างระดับพลังงานเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระดับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก๊าซ [2]

GAS	W_D (eV)	W_E (eV)	W_I (eV)
H ₂	4.46	7	15.4
H	-	10.16	13.59
N ₂	9.76	6.3	15.6
N	-	10.33	14.54
O ₂	5.11	7.9	12.5
O	-	9.15	13.61
H ₂ O	-	7.6	12.59
CO ₂	-	10	14.4

ในการผลิตก๊าซโอโซนนั้นเนื่องจากการใช้ทฤษฎีการแตกตัวก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูงร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อรวมตัวเป็นโอโซน สามารถเขียนแผนภาพกลไกการผลิตก๊าซโอโซนได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการผลิตโอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry

2.3 สนามไฟฟ้า [5]

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของการกระจายสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทคือ

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)
3. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟาระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

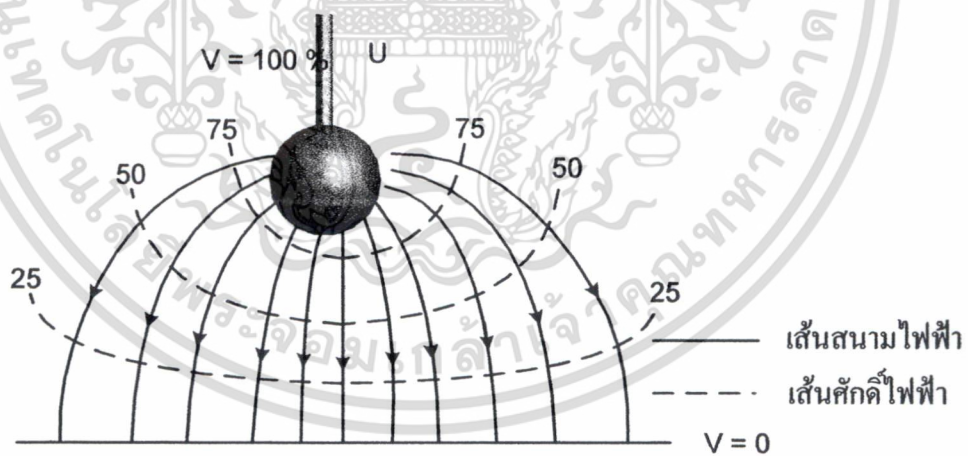
ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่าจะได้ดังภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{2.7}$$

- เมื่อ E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)
 η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \tag{2.8}$$

โดย สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (uniform field) จะมีค่า η^* เท่ากับ 1
 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) จะมีค่า $100\% < \eta^* \leq 40\%$
 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) จะมีค่า $\eta^* \leq 20\%$



รูปที่ 2.6 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโทรดทรงกลม

ภาพที่ 2.6 อิเล็กโทรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวนด์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอิเล็กโทรดคือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 115501 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

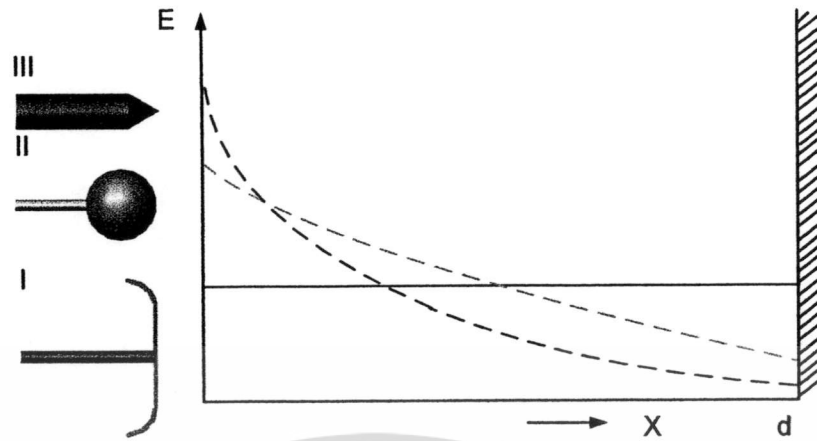
ระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน เรียกว่า “กระแสโคโรนา (corona current) หรือ กระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.7) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวนของฉนวนจะคำนวณจากสมการ(2.7) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ(2.7) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ(2.7) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage U_i , threshold voltage, inception voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียง เล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d\eta^* \quad (2.8)$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวนนี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

2.3.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress) [6]

จากของกฎคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.9)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่าแรงกระทำบนประจุ Q_2 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D/ϵ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.11)$$

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า แรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีเรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm , kV/cm , kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทโรปิกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า จึงเขียนได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.13)$$

เมื่อ \vec{J} คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m^2

σ คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น $S/m = \text{Siemens/meter} = 1/\rho$

ρ คือ สภาพต้านทาน เป็น $\Omega \cdot m$

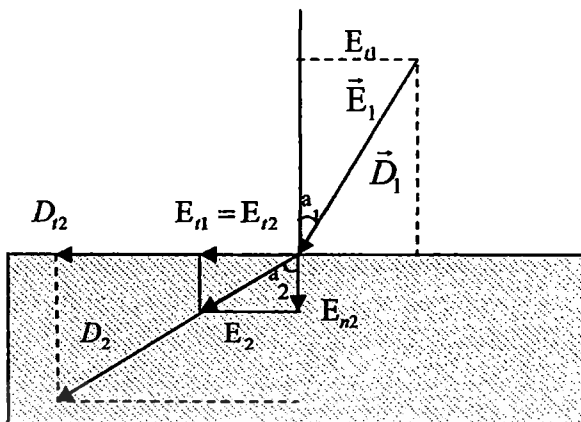
ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง

2.3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างกัน [6]

ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับน้ำหนัก ด้วย นั้นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้กับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นของฉนวนต่าง ๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

2.3.2.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด

การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ $E_{t1} = E_{t2}$ และ $D_{n1} = D_{n2}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

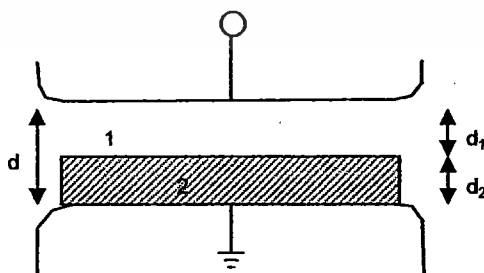
จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \tag{2.14}$$

จึงกล่าวสรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า \vec{D} และสนามไฟฟ้า \vec{E} ในเนื้อสารที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างจากแนวตั้งฉาก หรือหักเหเข้าหารอยต่อนั้นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

2.3.2.2 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้เกิดการหักเหของสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั้น กล่าวคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้า และแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจจะคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสถิต ฉะนั้นจะมีค่าคงตัว D และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามีตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.15)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 \approx \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \text{และ} \quad C_2 \approx \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (2.16)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (2.17)$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1 \quad (2.18)$$

แต่
$$U = U_1 + U_2 \quad (2.19)$$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1 \quad (2.20)$$

$$= U_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (2.21)$$

ฉะนั้น
$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad (2.22)$$

แทนค่า U_1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2 \cdot U}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.23)$$

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

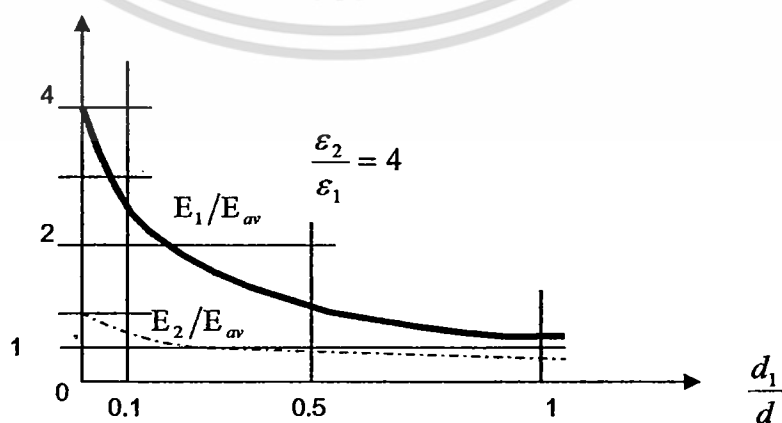
$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.24)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.25)$$

$$E_2 = \frac{U \epsilon_1 / \epsilon_2}{d_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.26)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.27)$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี TM (Transverse Magnetic Waves) ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.10** เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนเนื้อเดียวกัน [6]

การฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัด หรือกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นประการสำคัญ ฉะนั้นการออกแบบการฉนวนจึงควรพิจารณาบุุปลักษณะ และขนาดความเครียดของสนามไฟฟ้า เพื่อเลือกชนิดและรูปร่างแห่งเรขาคณิตของสนามไฟฟ้าได้เหมาะสม

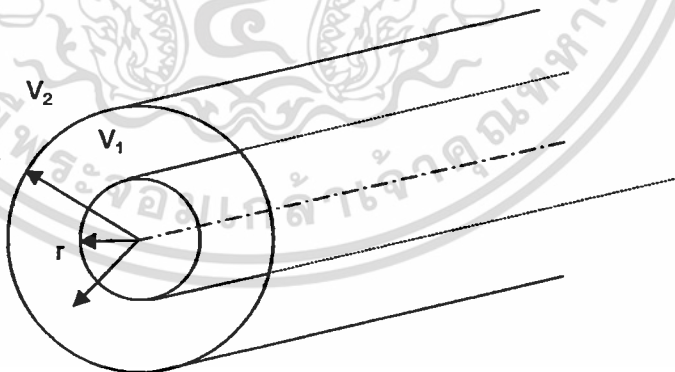
2.3.3.1 ทรงกระบอกซ้อนกัน

ทรงกระบอกซ้อนกัน เมื่ออิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน รวม เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมี และพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ดังนั้นโดยอาศัยอินทิกรัล สมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์

$$Q = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (2.28)$$

สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันมีความยาว l รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$) ดังภาพที่ 2.11 และ $E = D/\epsilon$ จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.11 ทรงกระบอกซ้อนกัน

และเส้นแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสองคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.30)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.31)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ $r_1 < r < r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.32)$$

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดที่ผิวทรงกระบอกอันใน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.33)$$

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

$$E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad (2.34)$$

จะเห็นว่า

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.35)$$

ความจุไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันแฉกคำนวณจาก $Q = CU$ จากสมการที่ (2.31)

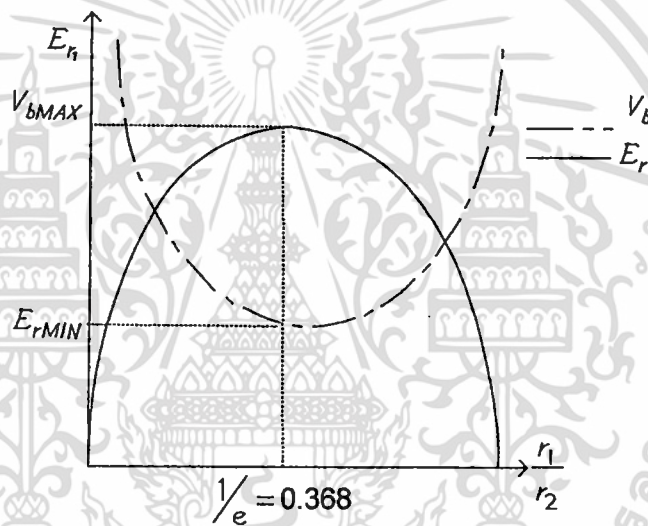
$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่พอเหมาะคือลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่นในกรณีกำหนดรัศมีอิเล็กโตรดนอก r_2 ให้ถ้าอิเล็กโตรดในรัศมี r_1 ใกล้เคียงกับ r_2 มาก ๆ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดนอกและในคือ $d = r_2 - r_1$ มีค่าน้อยเกิดเบรกดาวได้ง่าย แต่การลดรัศมี r_1 ลงเพื่อเพิ่มค่า d จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำเพิ่มสูงขึ้นมาก จนถึงค่าวิกฤติและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาค่าจุดที่พอเหมาะของ r_1 ที่อยู่ระหว่าง $0 - r_2$ ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อน กรณีอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมคือ

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{opt} = e \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_b และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่

2.4 ระบบปรับอากาศ [7]

ระบบปรับอากาศถูกแบ่งออกเป็นสองระบบตามลักษณะการใช้งานได้แก่ ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน และระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

1. ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน เป็นระบบปรับอากาศที่ใช้ตามบ้านและอาคารขนาดเล็ก โดยจะกระจายตามห้อง ต่างๆภายในอาคาร
 2. ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ เป็นระบบปรับอากาศที่ใช้ในอาคารขนาดใหญ่หรือพบตามโรงงานอุตสาหกรรมที่ ต้องการใช้ความเย็นมากๆในกระบวนการผลิต
- เมื่อกล่าวถึงระบบปรับอากาศในปริญญาโทฉบับนี้จะหมายถึงถึงเพียงระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์เท่านั้น

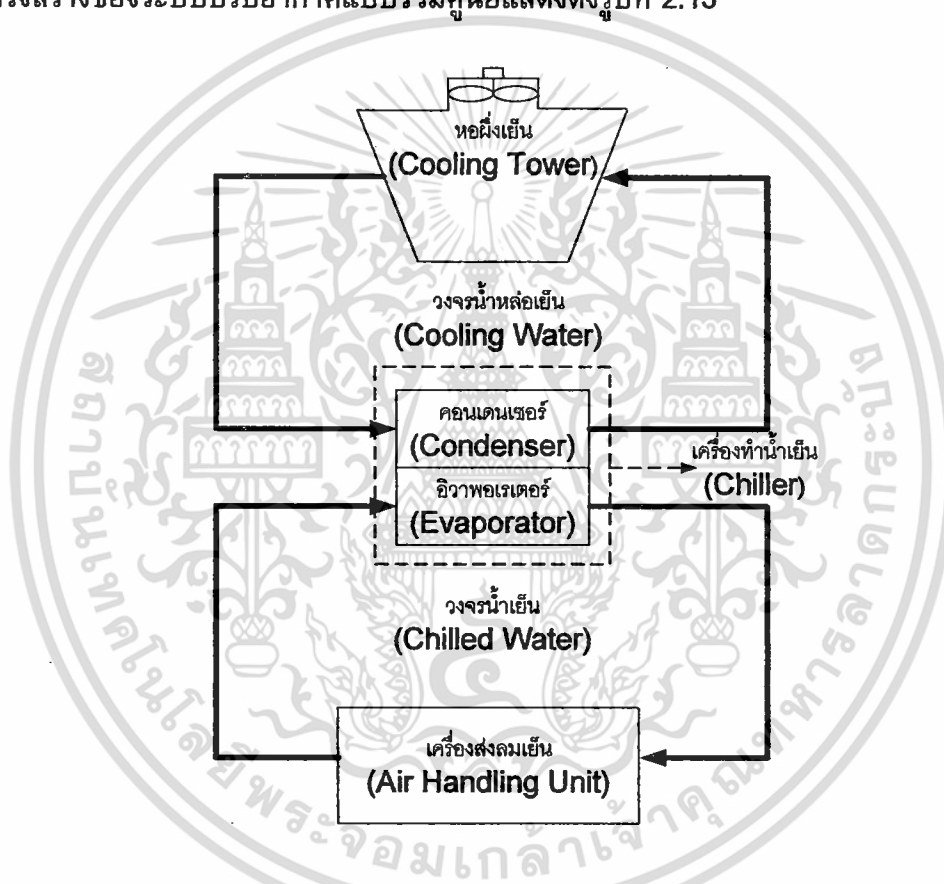
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 โครงสร้างของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์แบ่งประเภทการทำงานและหน้าที่ของอุปกรณ์เป็น 4 ส่วนดังนี้

1. ส่วนที่ทำหน้าที่ทำความเย็น
2. ส่วนที่ทำหน้าที่ระบายความร้อน
3. ส่วนที่ทำหน้าที่นำความร้อน
4. ส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายความเย็น

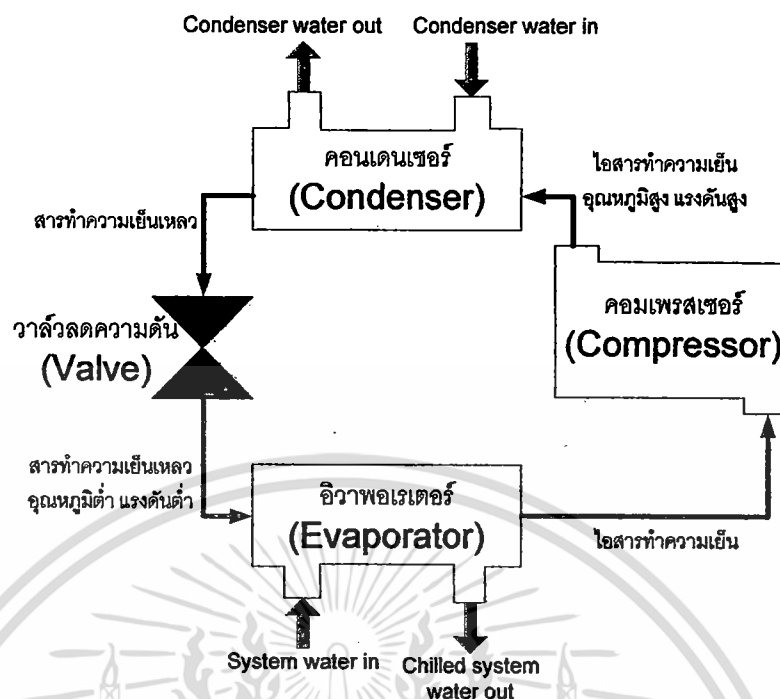
โครงสร้างของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

2.4.2 โครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)

เครื่องทำน้ำเย็นเป็นเครื่องจักรในส่วนทำความเย็นให้กับระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์และเป็นส่วนที่มีการใช้พลังงานสูงที่สุดในระบบปรับอากาศประเภทนี้ มักใช้กับอาคารขนาดใหญ่ที่ต้องการความเย็นตั้งแต่ 500 ตันความเย็นขึ้นไป สมรรถนะของเครื่องมีตั้งแต่ประมาณเครื่องละ 3 ถึง 8000 ตันความเย็น แต่ส่วนใหญ่มักไม่เกิน 2000 ตันความเย็นต่อตัว มีทั้งชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศและด้วยน้ำ ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศมักพบในระบบปรับอากาศขนาดกลางมีขนาดไม่เกิน 400 ตันความเย็น โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



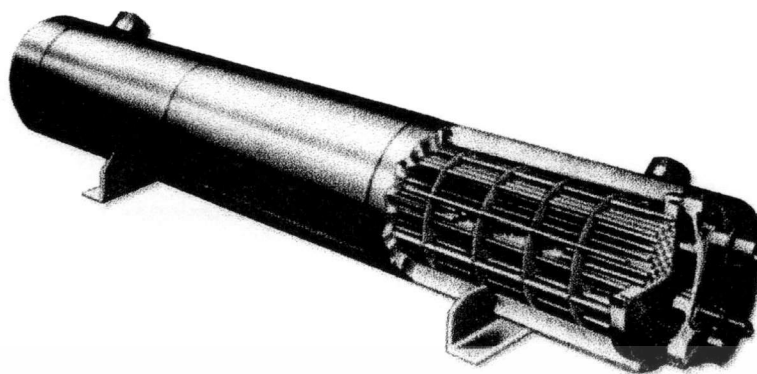
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น

2.4.2.1 อุปกรณ์จ่ายสารทำความเย็น (Valve)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้อนสารทำความเย็นของเหลวอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำในปริมาณที่เหมาะสมเข้าสู่อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) ในกรณีของเครื่องทำน้ำเย็น อัตราการป้อนสารทำความเย็นแปรตามปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร อุปกรณ์นี้มีหลายชนิดได้แก่ วาล์วละเหยสารทำความเย็นชนิดทำงานด้วยอุณหภูมิ (Thermostatic Expansion Valve) ติดตั้งในเครื่องทำน้ำเย็นขนาดเล็กกว่า 200 ตันความเย็น ในกรณีที่ต้องการป้อนสารทำความเย็นอย่างถูกต้องแม่นยำอาจใช้ลิ้นขยายอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Expansion Valve) ที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ แต่ในกรณีเครื่องทำน้ำเย็นขนาดใหญ่กว่า 200 ตันความเย็นจะใช้วาล์วลูกกลอยหรือเรียกว่าแผ่นโลหะรูเล็ก (Orifice Plate)

2.4.2.2 อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

เป็นส่วนที่สารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำไหลอยู่ภายในท่อทองแดง และรับความร้อนจากน้ำเย็น (Chilled water) ที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งไหลอยู่รอบนอกท่อทองแดงเหล่านั้นเพื่อทำให้อุณหภูมิน้ำเย็นลดลง และมักเรียกส่วนนี้ว่าอีวาพอเรเตอร์ ดังรูปที่ 2.15

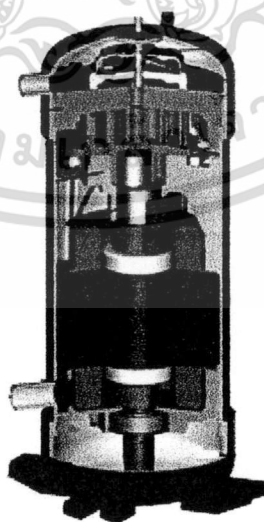


รูปที่ 2.15 Evaporator

2.4.2.2 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

มีหน้าที่ดูดเอาไอสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำจากอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) เข้ามาแล้วอัดออกไปเป็นไอที่มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นเพื่อส่งต่อไปยังคอนเดนเซอร์ (Condenser) คอมเพรสเซอร์มีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามการใช้งานและตามประเภทเครื่องปรับอากาศ ดังนี้

(1) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดเล็ก ซึ่งมีสมรรถนะระหว่าง 15 ถึง 60 ตันความเย็น มักใช้แบบกันหอย (Scroll Compressor) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คอมเพรสเซอร์แบบกันหอย

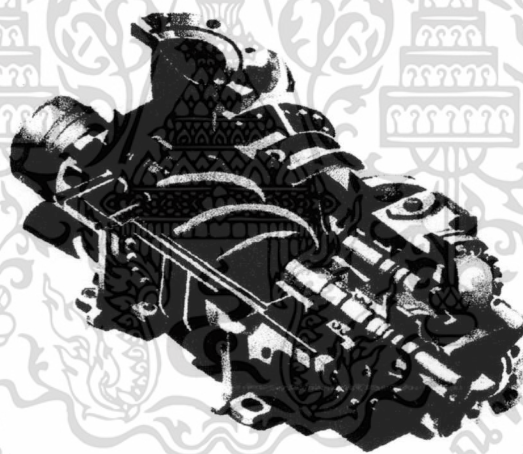
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดไม่เกิน 200 ตันความเย็นมักใช้แบบลูกสูบ
(Reciprocating Compressor) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ

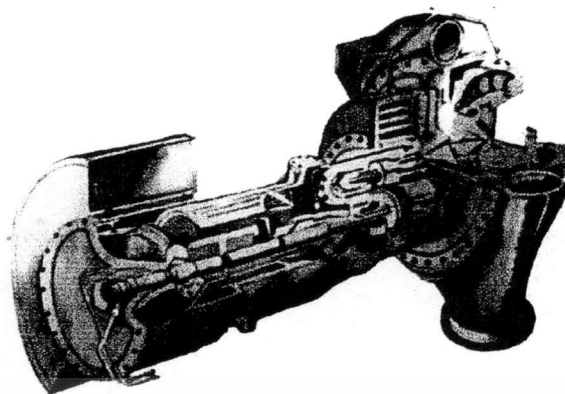
(3) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดระหว่าง 50 ถึง 1300 ตันความเย็น มักใช้แบบสกรู
(Screw compressor) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 คอมเพรสเซอร์แบบสกรู

(4) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดตั้งแต่ 150 ถึง 8000 ตันความเย็น มักใช้แบบหอย
โวง (Centrifugal compressor) ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



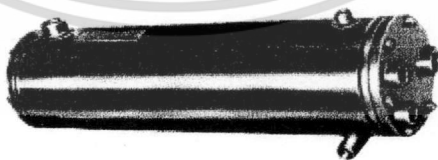
รูปที่ 2.19 คอมเพรสเซอร์แบบหอยโข่ง

2.4.2.4 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

เป็นส่วนที่ระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศออกสู่บรรยากาศภายนอกทำให้ไอสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงจากคอมเพรสเซอร์กลั่นตัวเป็นของเหลวเพื่อป้อนสารให้แก่อุปกรณ์จ่ายสารทำความเย็นอีกครั้งหนึ่ง มีด้วยกัน 2 แบบคือ

(1) แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooled) มักใช้กับเครื่องปรับอากาศตั้งแต่ขนาดตั้งแต่ 1 ตันความเย็นจนถึงขนาดใหญ่แต่ไม่เกิน 400 ตันความเย็น มีลักษณะเป็นแผงคอยล์ทองแดงที่มีตรัมอลูมิเนียมขดอยู่โดยรอบ และมีพัดลมดูดอากาศเย็นจากภายนอก อาคารให้ไหลผ่านแผงคอยล์นี้

(2) แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled) ใช้กับเครื่องปรับอากาศตั้งแต่ ขนาด 3 ถึง 8000 ตันความเย็น มีลักษณะเป็นท่อทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็นไหลอยู่ภายในเพื่อรับความร้อนจากสารทำความเย็นที่อยู่ภายนอก ดังรูปที่ 2.20



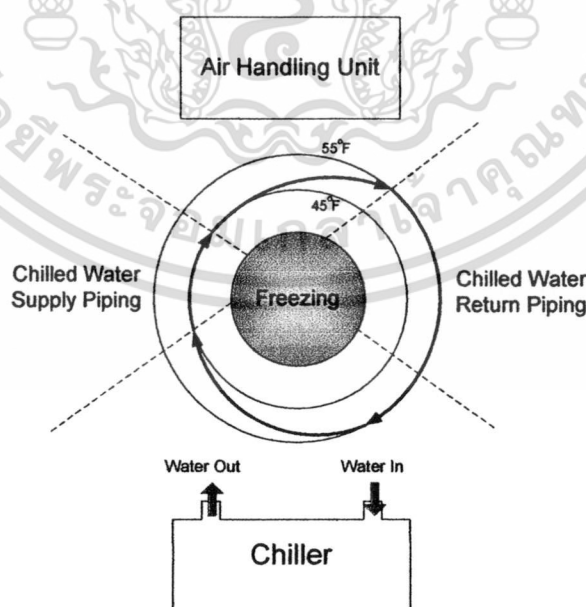
รูปที่ 2.20 คอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

2.4.3 หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) [7]

หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นมีดังนี้ ตัวอีวาพอเรเตอร์ของเครื่องทำน้ำเย็น จะทำความเย็นให้แก่ น้ำเย็น (Chilled Water) ที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์มีอุณหภูมิประมาณ 45 องศาฟาเรนไฮต์ จะถูกเครื่องสูบน้ำเย็น (Chilled Water Pump) ส่งไปยังคอยล์ทำความเย็น (Air Handling Unit) ที่ตั้งอยู่ตามห้องและส่วนต่างๆ ของอาคาร อากาศร้อนชื้นที่สกปรกภายใน อาคารจะถูกเครื่องส่งลมดูดผ่านแผ่นกรองอากาศและคอยล์ทำความเย็นทำให้อากาศสะอาดพร้อมทั้งมีอุณหภูมิและความชื้นลดลง

ในขณะที่เดียวกันน้ำเย็น (Chilled Water) ที่รับความร้อนจากอากาศภายในอาคารจะมี อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 55 องศาฟาเรนไฮต์ จากนั้นถูกเครื่องสูบน้ำเย็นส่งเข้าสู่อีวาพอเรเตอร์เพื่อคายความร้อนนี้ให้แก่สารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำที่ไหลอยู่ภายในตัวอีวาพอเรเตอร์นั้นอีกทอดหนึ่งจนมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 45 องศาฟาเรนไฮต์ดังเดิม อุณหภูมิน้ำเย็นในเครื่องทำน้ำเย็น (Chilled System) จึงมีค่าแปรเปลี่ยนระหว่าง 45 ถึง 55 องศาฟาเรนไฮต์ ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.21

ส่วนสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำภายในอีวาพอเรเตอร์ เมื่อได้รับความ ร้อนจากน้ำเย็นอุณหภูมิ 55 องศาฟาเรนไฮต์ จะระเหยกลายเป็นไอถูกคอมเพรสเซอร์ดูดเข้าไป และอัดออกมาเป็นไอที่อุณหภูมิและความดันสูงส่งเข้าไปในคอนเดนเซอร์ เพื่อระบายความร้อน ออกสู่บรรยากาศภายนอกอาคารทำให้สารทำความเย็นกลั่นตัวเป็นของเหลวไหลผ่านอุปกรณ์ป้อนสารทำความเย็น เพื่อป้อนเข้าสู่อีวาพอเรเตอร์และรับความร้อนจากน้ำเย็นอีกครั้ง หนึ่ง



รูปที่ 2.21 การทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

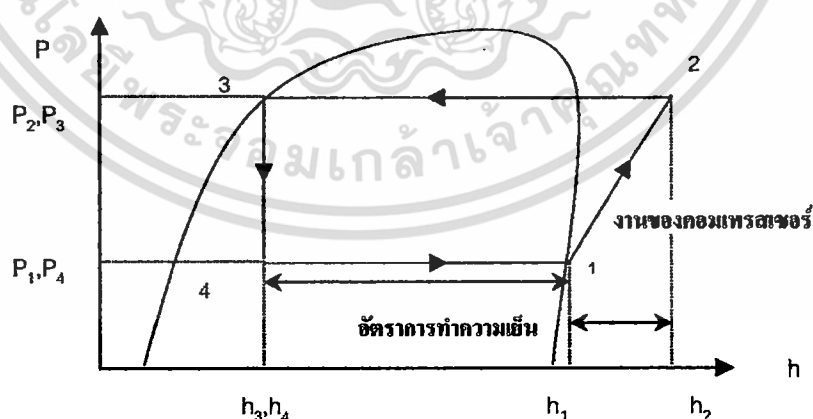
2.5 การวิเคราะห์การใช้พลังงานและการหาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น [7]

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศภายในปริภูมิตั้งขึ้นบนพื้นฐานที่เน้นเฉพาะการวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ ซึ่งได้แก่ เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เท่านั้น

การหาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำเย็นต้องเข้าใจหลักการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นก่อนจึงจะสามารถเข้าใจการหาประสิทธิภาพได้ เนื่องจากการหาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำเย็นนั้น แตกต่างจากการหาประสิทธิภาพเครื่องยนต์ทั่วไป ดังจะกล่าวถึงเป็นลำดับดังนี้

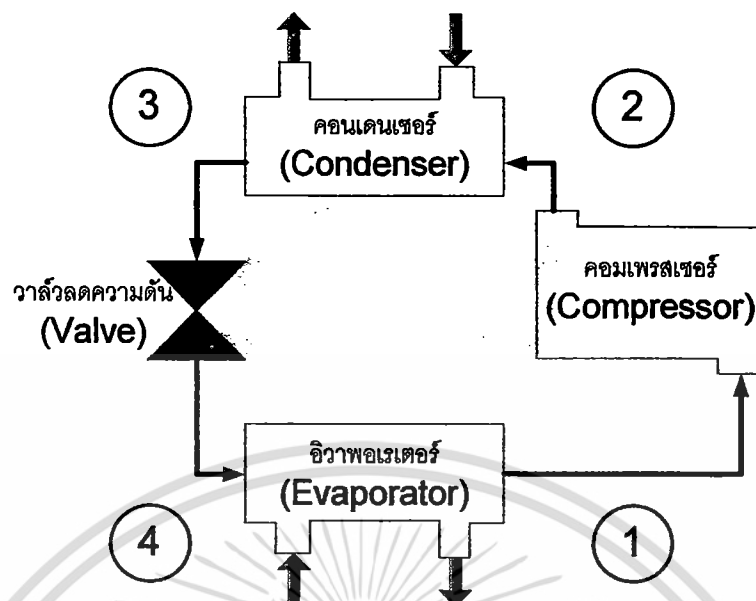
2.5.1 การวัดการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)

บุคคลทั่วไปมักเข้าใจประสิทธิภาพแบบที่ใช้กับเครื่องยนต์ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดพลังงาน เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศต่างจากเครื่องยนต์คือแทนที่จะผลิตกำลังงานแต่กลับใช้กำลังงาน ฉะนั้นจึงไม่สามารถนำนิยามประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มาใช้กับเครื่องใช้พลังงานเหล่านี้ได้ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่บุคคลทั่วไปคุ้นเคยจะคำนวณโดยตรงจากกำลังงานที่ผลิตได้และกำลังงานที่ป้อนเข้าเครื่อง ส่วนการวัดและเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศจะอาศัยค่าอัตราส่วน 3 ค่า ได้แก่สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ COP (Coefficient of Performance), อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน หรือ EER (Energy Efficiency Ratio) และอัตราส่วนกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น การใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นจะอาศัยการวิเคราะห์จากขบวนการทำความเย็นแบบวัฏจักรความกดตันไอ (Vapor Compressor Refrigeration Cycle) ซึ่งขบวนการทางอุณหพลศาสตร์ของวัฏจักรดังกล่าวแสดงบนแผนภาพ P-h ดังรูปที่ 2.22 จากนั้นเปรียบเทียบกับวัฏจักรในเครื่องทำน้ำเย็นได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 วัฏจักรกดตันไอ (P-h Diagram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบวัฏจักรกดดันไอกับเครื่องทำน้ำเย็น

เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.22 และ 2.23 สามารถอธิบายการใช้พลังงานในระบบได้ดังนี้

(ก) ในช่วง 1--->2 คอมเพรสเซอร์จะอัดไอของน้ำยาภายหลังจากที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) ให้มีความดันสูงไปตามกระบวนการไอเซนทรอปิก (Isentropic)

(ข) ในช่วง 2--->3 น้ำยาในช่วงที่ถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ จะมีสภาพเป็นไอคงตัว (Superheated Vapor) ต่อจากนั้นไอน้ำยาจะผ่านเข้าไปในคอนเดนเซอร์ เพื่อระบายความร้อนออก ในช่วงนี้ น้ำยาจะกลั่นตัวเป็นของเหลวความดันสูง ขบวนการในช่วงนี้เป็นขบวนการไอโซบาริก (Isobaric) ตามหลักการทางอุณหพลศาสตร์ การระบายความร้อนจะสิ้นสุดเมื่อน้ำยาอยู่ในสภาพของเหลวอิ่มตัวพอดี (Saturated liquid)

(ค) ในช่วง 3--->4 น้ำยาที่ออกจากคอนเดนเซอร์ในสภาพของเหลวอิ่มตัวความดันสูง ในช่วงก่อนหน้าจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) ขณะที่น้ำยาผ่านวาล์วนี้ ความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วตามขบวนการ Throttling processes ทำให้อุณหภูมิของน้ำยาลดลงตามไปด้วย

(ง) ในช่วง 4--->1 น้ำยาภายหลังจากที่ออกจากวาล์วลดความดัน จะอยู่ในสภาพระลอก ของของเหลวที่ความดันต่ำเมื่อผ่านเข้าไปในอีวาพอเรเตอร์ ระลอกของน้ำยาจะรับเอาความร้อนจากภาระทำความเย็นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นกลายเป็นไอ ขบวนการที่เกิดขึ้นเป็นไปตามขบวนการไอโซบาริก ตามหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ไอของน้ำยาจะหยุดรับความร้อนจากภาระก็ต่อเมื่อไออยู่ในสภาพไออิ่มตัวพอดี (Saturated Vapor) จากนั้นไอน้ำยาอิ่มตัวจะถูกดูดเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าพลังงานหลักที่ใช้ในระบบทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น คือ พลังงานที่ใช้ในการดูดและระบายความร้อนเข้าออกจากเครื่องทำน้ำเย็นเมื่อเปรียบเทียบกับ พลังงานที่ใช้ดูดและระบายความร้อนดังกล่าวกับวัฏจักรทำความเย็นแบบกวดตันไอจะสามารถหา สมการการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นในส่วนนี้ได้ดังนี้

ปริมาณความร้อนที่ไอของน้ำยาได้รับขณะเข้าสู่วัฏจักรในช่วง 4-->1 นั้น ก็คือ ความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรนั่นเอง ความดันไอของน้ำยาในอีวาพอเรเตอร์ จะคงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแผนภาพ P-h ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่วัฏจักรจะเท่ากับ

$$Q_L = h_1 - h_4 \quad (2.38)$$

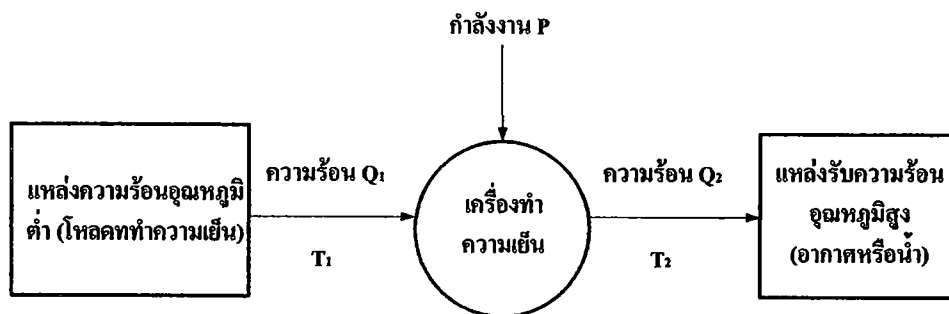
พลังงานที่ใช้ในการขับเพลลาของคอมเพรสเซอร์เพื่ออัดไอน้ำยาให้มีความดันสูง ก่อนที่จะผ่านไปควบแน่นที่คอนเดนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ขับเพลลาดังกล่าวกับ วัฏจักร ทำความเย็นแบบกวดตันไอจะสามารถหาสมการการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นใน ส่วนนี้ได้ดังนี้

งานที่เข้าสู่วัฏจักรในช่วง 1-->2 งานที่เข้าสู่วัฏจักร ก็คือพลังงานที่ใช้ในการขับ เพลลา ของคอมเพรสเซอร์ เพื่ออัดไอน้ำยาไปยังยอดความดันสูงด้วยกระบวนการเอนโทรปีของ น้ำยาจะคงที่ (Isentropic) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแผนภาพ P-h จะได้ว่างานที่เข้าสู่วัฏจักร

$$W = h_2 - h_1 \quad (2.39)$$

ถ้าจะหาความสัมพันธ์ของพลังงานจากรูปที่ 2.24 จะเห็นว่าเครื่องทำความ เย็นต้องใช้กำลังงาน P ในการทำให้ความร้อน Q_1 ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ เข้าเครื่องทำความเย็นและความร้อน Q_2 ไหลจากเครื่องทำความเย็นไปยังแหล่งรับความ ร้อนความร้อน Q_1 คือผลความเย็นที่เป็นประโยชน์ซึ่งจะทำให้แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิลดลง จากสมการพลังงานจะทราบ ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_1 , Q_2 และ P คือ

$$Q_1 + P = Q_2 \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.24 การไหลของพลังงานในเครื่องทำความเย็น

ในการหาสมการทั่วไปที่อาศัยหลักการสมดุลพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.40 มีสมการดังนี้

$$Q_{ev} + W_{input} = Q_{cd} + Q_{hrc} \quad (2.41)$$

โดยความหมายของเทอมต่างๆ ดังนี้

Q_{ev} คือ ความร้อนที่ใช้ที่อิวาพอเรเตอร์

W_{input} คือ งานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพรสเซอร์

Q_{cd} คือ ความร้อนที่คอนเดนเซอร์

Q_{hrc} คือ ความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Heat Reclaim)

ซึ่งสมการความสัมพันธ์ด้านบนจะตัดเทอมความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเกิดขึ้นในส่วนของหอผึ่งเย็น วิเคราะห์สมดุลเครื่องทำน้ำเย็นจากสมการ 2.41 จะได้สมการ 2.42

$$Q_{ev} + W_{input} = Q_{cd} \quad (2.42)$$

การหาค่าร้อยละความไม่สมดุลพลังงานสามารถหาได้จากสมการ 2.43 ดังนี้

$$\% \text{ heat Unbalance} = \frac{Q_{ev} + W_{input} - Q_{cd}}{Q_{cd}} \times 100 \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็นนั้นสามารถหาได้จากการใช้พลังงาน ของเครื่องทำน้ำเย็นตั้งที่กล่าวมาแล้ว ได้แบ่งการหาประสิทธิภาพได้สองลักษณะขึ้นตามภาระการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นได้แก่ ตอนขณะทำงานที่โหลดเต็มพิกัด (Full load) และทำงานที่โหลดบางส่วน (Part load) ซึ่งจะมีวิธีการหาที่แตกต่างกัน โดยในส่วนของ การหาประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัดจะอ้างอิงตามกฎกระทรวง ส่วนการหาประสิทธิภาพที่โหลดบางส่วนจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ARI STANDARD 550-590-98 แต่ก่อนอื่นต้องทราบถึงความสามารถในการทำความเย็น Q_{ev} เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญในการหาประสิทธิภาพแบบต่างๆ โดยความสามารถในการทำความเย็นสามารถหาได้สองแบบ ได้แก่ ความสามารถในการทำความเย็น Q_{ev} ในหน่วยตันทำความเย็น (tons) และความสามารถในการทำความเย็น Q_{ev} ในหน่วยบีทียูต่อชั่วโมง (Btu/h) ซึ่งทั้งสองแบบหาได้จากสมการดังนี้

ความสามารถในการทำความเย็น (Capacity in tons)

$$Q_{ev} = \frac{cm_w \Delta T}{1,200} \quad \text{tons} \quad (2.44)$$

เมื่อ c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\text{kJ} / \text{kg}^{\circ}\text{C}$ มีค่าเท่ากับ $4.187 \text{ kJ} / \text{kg}^{\circ}\text{C}$)

m_w คือ อัตราการไหลของมวลของน้ำเย็น (kg / s)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลเข้าและออกจากเครื่องทำน้ำเย็น ($^{\circ}\text{C}$)

ความสามารถในการทำความเย็น (Btu/h)

$$Q_{ev} = cm_w \Delta T \quad \text{Btu/h} \quad (2.45)$$

จะเห็นว่าได้ความสัมพันธ์สองสมการดังนี้

$$Q_{ev} \text{ (tons)} = \frac{Q_{ev} \text{ (Btu/h)}}{12,000} \quad (2.46)$$

การหาประสิทธิภาพของทั้งสามแบบที่โหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) การหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็นหาจากสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของ ระบบ (Coefficient of Performance) ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของความสามารถในการทำความเย็นต่องานที่เข้าสู่วัฏจักร หรือที่เรียกย่อๆ ว่า COP จากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว ความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรหรือระบบ ก็คือปริมาณความร้อนที่น้ำยารับเข้าสู่ระบบนั่นเอง ในเครื่องทำน้ำเย็นความร้อนที่เข้าสู่ระบบสามารถหาได้จากสมการ 2.38 และในเครื่องทำน้ำเย็นงานเพลลาที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ก็คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์นั่นเอง ซึ่งหาได้จากสมการ 2.39 ดังนั้นจึงสามารถหา COP ของเครื่องทำน้ำเย็นได้จากสมการ 2.38 และ 2.39 ได้ว่า

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.47)$$

$$\text{COP} = \frac{\text{ความสามารถในการทำความเย็นที่ใช้ประโยชน์ได้ (kW)}}{\text{กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ (kW)}} \quad (2.48)$$

$$\text{COP} = \frac{c m_w \Delta T}{W_{kw}} \quad (2.49)$$

เมื่อ m_w คือ อัตราการไหลของมวลของน้ำเย็น (kg / s)

c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ /kg °C มีค่าเท่ากับ 4.187 kJ /kg °C)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลเข้าและออกจากเครื่องทำน้ำเย็น(°C)

W คือ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์ (kW)

โดย COP จะไม่มีหน่วย อาจใช้ค่าอัตราส่วน COP วัดการประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นได้เป็นอย่างดี เพราะต้องการที่จะทำให้เกิดผลความเย็นสูงสุดโดยใช้กำลังงานป้อนเข้าต่ำสุด

(2) การใช้พลังงานของเครื่องทำความเย็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งคล้ายกับ COP มากคือด้วย อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio; EER) นิยามอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานว่าเป็น

$$\text{EER} = \frac{\text{ความสามารถในการทำความเย็นที่ใช้ประโยชน์ได้ (Btu/h)}}{\text{กำลังงานป้อนเข้า (W)}} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$EER = \frac{cm_w \Delta t}{W_w} \quad (2.51)$$

เมื่อ W_w คือ พลังงานที่ใช้ในการขับเพลลาของคอมเพรสเซอร์ (W)

จะเห็นว่าคำนิยามของ EER เหมือนกับของ COP ต่างกันแต่เพียงใช้หน่วยความสามารถในการทำความเย็นเป็น Btu/h และใช้หน่วยกำลังงานป้อนเข้าเป็น W แทนที่จะเป็น kW

การที่นิยาม EER เพิ่มขึ้นจาก COP นั้นมีจุดประสงค์เพื่อให้ลูกค้าเครื่องปรับอากาศเข้าใจและใช้ประโยชน์ในการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องปรับอากาศได้ง่ายขึ้น ปัจจุบันกฎหมายบังคับให้ผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศติดป้ายระบุค่า EER ไว้ที่เครื่องปรับอากาศ เพื่อให้ผู้ซื้อทราบ ค่า EER ที่ติดไว้กับเครื่องปรับอากาศเป็นค่า EER ที่อุณหภูมิมาตรฐานชุดหนึ่ง ดังนั้นลูกค้าจะสามารถเปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศแต่ละเครื่องได้

การหาประสิทธิภาพจากกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น เป็นอัตราส่วนกำลังงานป้อนเข้าทั้งหมดในหน่วยกิโลวัตต์ต่อความสามารถในการทำความเย็นรวม (net refrigerating capacity) ในหน่วยตันความเย็น (kw) โดยหาค่ากิโลวัตต์ต่อตันความเย็นดังนี้

$$\text{กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น} = \frac{\text{กำลังงานป้อนเข้าสุทธิ}}{\text{ตันความเย็นรวม}} \quad (2.52)$$

ค่าอัตราส่วนกิโลวัตต์ต่อตันความเย็นนี้เป็นอัตราส่วนสำคัญที่ถูกนำไปใช้ในซอฟต์แวร์ที่พัฒนาเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็นที่ทำการวัดเนื่องจากมีค่ามาตรฐานปรับอากาศที่ออกโดยกฎกระทรวงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนกิโลวัตต์ต่อตันความเย็น Chp ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะของส่วนทำความเย็นที่คำนวณได้ต่อไปนี้

$$Chp = \frac{\text{kw}}{\text{TON}} \quad (2.53)$$

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การคำนวณประกอบการติดตั้งเครื่องกำเนิดโอโซนในระบบคลอรีนทาวเวอร์ [1]

การเลือกขนาดของเครื่องผลิตโอโซนเป็นขั้นตอนแรกในการออกแบบระบบโอโซน เนื่องจากต้องเลือกขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของระบบคลอรีนทาวเวอร์ เพื่อให้มีความสามารถในการผลิตโอโซนในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการในการช่วยให้ระบบคลอรีนทาวเวอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงต้นทุนในการติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนและระยะเวลาคุ้มทุนอีกด้วย

3.1.1 การคำนวณปัจจัยต่าง ๆ ของระบบก่อนการติดตั้งโอโซน

1. อัตราการไหล = 1,546 gal/min
= 8,851.61 litter/min
2. อัตราการระเหย = $0.008 \times 1,546$ gal/min
= 12.4 gal/min
= 46.9 litter/min
3. อัตราการถูกพัดพา = $0.001 \times 1,546$ gal/min
= 1.546 gal/min
= 5.85 litter/min
4. Concentration Ratio = 5
5. น้ำที่ปล่อยทิ้ง = $0.9 / (5-1)$
= 0.225
6. โหลดแฟคเตอร์ = 0.5
7. อัตราน้ำที่ปล่อยทิ้งเฉลี่ย = $(0.225 \times 1,546) / 100$
= 3.48 gal/min
= 13.17 litter/min
8. น้ำที่เติม = $(12.4 + 1.546 + 3.48) \times (8,760 \times 60 \times 0.5)$
= 4,579,552 gal/yr
= 17,333,604 litter/yr
9. ค่าใช้จ่ายในการเติมน้ำ = $(15.81 / 1000) \times 17,333,604$ litter/yr
= 274,044 baht/yr
10. ค่าใช้จ่ายในการปล่อยน้ำทิ้ง = 0 baht/yr
11. ค่าสารเคมี = ค่าสารเคมี \times ความจุหอผึ่งเย็น \times เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 14 \times 370 \times 12$$

$$= 62,160 \text{ baht/yr}$$

12. ค่าใช้จ่ายในการล้างระบบครั้งละ 15,000 บาท (ปีละ 2 ครั้ง)

$$= 2 \times 15,000$$

$$= 30,000 \text{ baht/yr}$$

13. ค่าใช้จ่ายทั้งหมดประจำปี = 274,044 + 0 + 62,160 + 30,000

$$= 366,204 \text{ baht/yr}$$

3.1.2 การคำนวณประกอบการติดตั้งระบบโอโซน

14. New Concentration Ratio = 10

15. เป้าหมายการปล่อยน้ำทิ้ง = $0.9 / (10 - 1)$

$$= 0.1$$

16. อัตราน้ำที่ปล่อยทิ้งเฉลี่ย = $(0.1 \times 1,546) / 100$

$$= 1.546 \text{ gal/min}$$

$$= 5.85 \text{ litter/min}$$

17. เป้าหมายการเติมน้ำ = $(12.4 + 1.546 + 1.546) \times (8,760 \times 60 \times 0.5)$

$$= 4,071,297 \text{ gal/yr}$$

$$= 15,409,859 \text{ litter/yr}$$

18. ขนาดระบบโอโซน

คูลลิ่งทาวเวอร์มีอัตราการไหล = 1,546 gal/min

$$= 5,851.61 \text{ litter/min}$$

คิดเป็นอัตราการไหล = 351,096,600 g/hr

ต้องการความเข้มข้นของโอโซน 0.1 ppm

$$\frac{351,096,600 \times 0.1}{1,000,000} = 35.12$$

ดังนั้น เลือกใช้เครื่องผลิตโอโซนขนาด 40 กรัม/ชั่วโมง

19. เป้าหมายค่าใช้จ่ายในการเติมน้ำ

$$= (15.81 / 1000) \times 15,409,859$$

$$= 243,629 \text{ baht/yr}$$

20. เป้าหมายค่าใช้จ่ายในการปล่อยน้ำทิ้ง = 0 baht/yr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

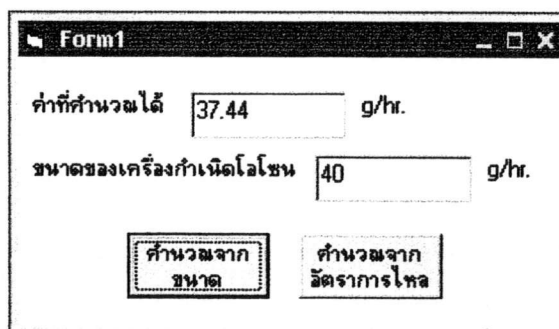
21. ค่าใช้จ่ายโดยประมาณสำหรับระบบโอโซน = 800,000 baht
22. การใช้พลังงานในการผลิตโอโซน $= \frac{660 \times 241 \times 8}{1,000}$
 $= 1,272.48 \text{ kWh/yr}$
23. ค่าไฟในการผลิตโอโซน $= 1,272.48 \times 2.4482$
 $= 3,115.3 \text{ baht/yr}$
24. เป้าหมายค่าใช้จ่ายของระบบโอโซน
 $= 243,629 + 800,000 + 3,115.3$
 $= 1,046,744.3 \text{ baht/yr}$
25. การคำนวณจุดคุ้มทุนในการใช้ระบบโอโซน
 จุดคุ้มทุน $= \frac{1,046,744.3}{(366,204 - 3,115.3)}$
 $= 2.88 \text{ ปี}$

3.2 โปรแกรมคำนวณขนาดเครื่องผลิตโอโซน

จากตัวอย่างการคำนวณประกอบการติดตั้งระบบโอโซนได้แสดงวิธีการคำนวณเพื่อเลือกขนาดเครื่องผลิตโอโซนที่จะติดตั้งในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ โดยมีวิธีการคำนวณได้สองกรณีคือ คำนวณจากค่าต้นความเย็นของคูลลิ่งทาวเวอร์โดยแปลงเป็นอัตราการไหลของระบบซึ่งโดยทั่วไปการคิดค่าอัตราการไหลจากต้นความเย็นในประเทศไทยจะเผื่ออัตราการไหลของระบบจากมาตรฐานประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากความแตกต่างด้านสภาพแวดล้อม กรณีที่สองคือคำนวณจากค่าอัตราการไหลของคูลลิ่งทาวเวอร์โดยตรงซึ่งอัตราการไหลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต

เพื่อความสะดวกในการเลือกขนาดเครื่องผลิตโอโซนให้เหมาะสมกับระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้จึงทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น เพื่อช่วยในการคำนวณและตัดสินใจเลือกขนาดเครื่องผลิตโอโซนที่เหมาะสมกับขนาดของคูลลิ่งทาวเวอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งสองกรณีดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

โดยผู้ใช้งานจะต้องป้อนค่าต้นความเย็นของคูลลิ่งทาวเวอร์หรือค่าอัตราการไหลและค่าความเข้มข้นของโอโซนให้กับโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการแปลงค่าเป็นอัตราการไหลของระบบ และคำนวณร่วมกับค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ผู้ใช้งานต้องการและแสดงผลเป็นขนาดเครื่องผลิตโอโซนที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณขนาดเครื่องผลิตไอโซน

จากการใช้โปรแกรมช่วยคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องผลิตไอโซน สำหรับระบบकुल्लिंगทาวเวอร์ ในปริณญาณินพนธ์ฉบับนี้จึงได้จัดทำตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดकुल्लिंगทาวเวอร์กับขนาดเครื่องผลิตไอโซน เพื่อประกอบการเลือกขนาดเครื่องผลิตไอโซน ซึ่งเป็นขนาดकुल्लिंगทาวเวอร์ที่มีใช้งานในประเทศไทยเพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ โดยเลือกจากขนาดต้นความเย็นของकुल्लिंगทาวเวอร์ ในตารางจะแสดงค่าอัตราการไหลที่ค่าเผื่อประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์จากค่าอัตราการไหลมาตรฐานคือ 3 แกลลอนต่ออนาที และแสดงค่าขนาดเครื่องผลิตไอโซนที่ความเข้มข้นไอโซน 0.1 และ 0.2 ppm

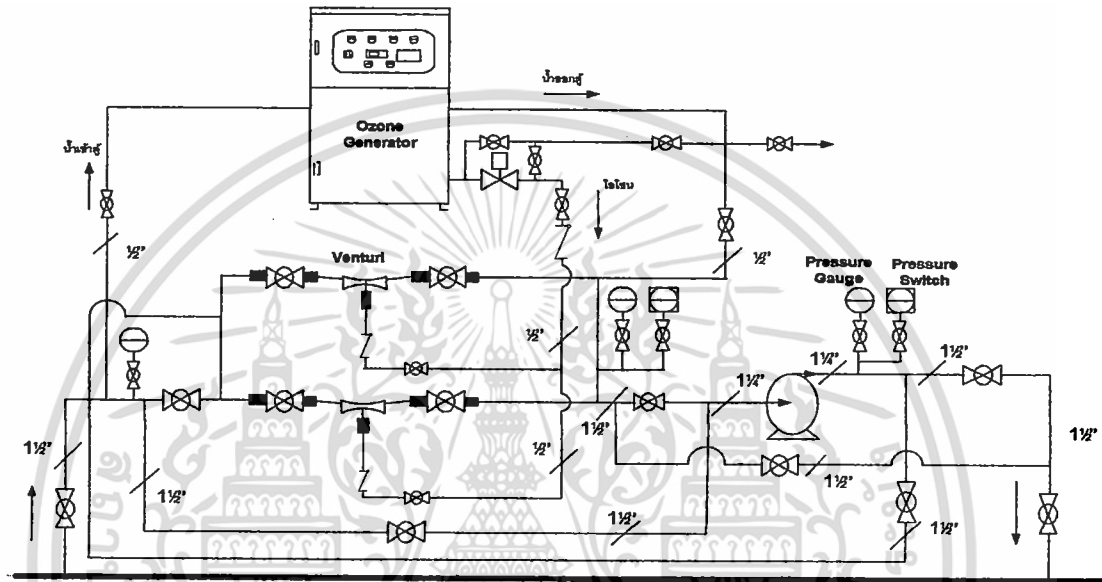
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดकुल्लिंगทาวเวอร์กับขนาดเครื่องผลิตไอโซน

Ton of Refrigeration (TON)	Flow rate (litter/min)	Size (g/hr) 0.1 ppm	Size (g/hr) 0.2 ppm
100	1,300	10	20
150	1,950	20	30
175	2,275	20	30
200	2,600	20	40
250	3,250	20	40
300	3,900	30	50
350	4,550	30	60
400	5,200	40	70
500	6,500	40	80
600	7,800	50	100
700	9,100	60	110
800	10,400	70	130
1,000	13,000	80	160
1,200	15,600	100	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การติดตั้งระบบ

การติดตั้งระบบโอโซนเข้ากับระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ในขั้นต้นต้องทำการสำรวจพื้นที่เพื่อเลือกที่ตั้งที่เหมาะสมในการวางระบบ โดยต้องคำนึงถึงพื้นที่ในการวางเครื่องผลิตโอโซน การเดินท่อ วางปั๊มน้ำ รวมถึงการเชื่อมต่อท่อของระบบผลิตโอโซนเข้ากับระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ และต้องเผื่อระยะเพื่อการซ่อมบำรุงหรือขยายขนาดของระบบในอนาคตด้วย แผนผังการติดตั้งระบบโอโซน ณ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งระบบโอโซน

จากการสำรวจพื้นที่เพื่อติดตั้งระบบโอโซน ได้เลือกบริเวณที่เป็นแท่นวางถังสารเคมีที่ใช้บำบัดน้ำในระบบเดิม ซึ่งเมื่อติดตั้งระบบโอโซนก็จะไม่มีความจำเป็นในการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำในระบบ เนื่องจากโอโซนสามารถทำหน้าที่แทนสารเคมีเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังไม่มีปัญหาด้านสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการใช้สารเคมีอีกด้วย จากนั้นทำการปรับแต่งพื้นที่ให้มีความเหมาะสมในการวางอุปกรณ์ต่าง ๆ และเจาะท่อน้ำสองตำแหน่งเพื่อดึงน้ำจากระบบเข้ามายังระบบผสมเพื่อผสมโอโซนกับน้ำและส่งน้ำที่ผสมกับโอโซนแล้วกลับเข้าระบบ โดยตำแหน่งที่ทำการติดตั้งระบบโอโซนเข้ากับระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ได้ติดตั้งทางฝั่งดูดของคอนเดนเซอร์หรือฝั่งน้ำเย็นจากคูลลิ่งทาวเวอร์ด้วยเหตุผลสองประการคือ โอโซนจะสามารถผสมกับน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เนื่องจากว่าทางฝั่งดูดของคอนเดนเซอร์จะรับเอาน้ำที่ได้รับภาระระบายความร้อนจากคูลลิ่งทาวเวอร์แล้ว ดังนั้นน้ำจึงมีอุณหภูมิต่ำซึ่งจะสามารถผสมกับโอโซนได้ดี เหตุผลประการที่สองคือโอโซนจะเข้าไปสลายตะกอนที่อยู่ในตัวคอนเดนเซอร์ทำให้ตะกอนซึ่งเป็นเสมือนฉนวนกันความร้อนที่เกาะตามผิวท่อหลุดลอกออกไป ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำหล่อเย็นกับสารทำความเย็นดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

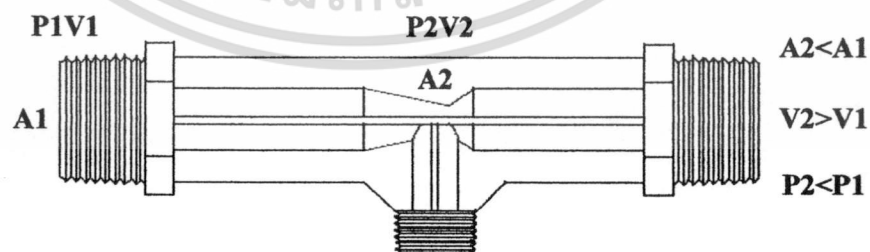


รูปที่ 3.3 เจาะท่อเพื่อดึงน้ำจากระบบเข้ามายังระบบผสม

ขั้นตอนของการผสมก๊าซไอโซนกับน้ำถือเป็นขั้นตอนหลักของระบบไอโซน ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้วิธีการผสมก๊าซไอโซนกับน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากผลที่ตามมาจากการเลือกใช้วิธีที่ไม่เหมาะสมนั้น จะเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาต่างๆได้เช่น ค่าใช้จ่ายที่แพงเกินจริง ประสิทธิภาพของระบบต่ำกว่าที่ควร เป็นต้น

ในปฏิญานีพจน์ฉบับนี้ใช้วิธีการผสมก๊าซไอโซนกับน้ำ 2 วิธีดังนี้

1) **Static Mixing** วิธีนี้เป็นการผสมก๊าซไอโซนกับน้ำด้วยวิธีการใช้ Venturi หรือ Injector ทำงานโดยอาศัยเครื่องสูบน้ำฉีดน้ำผ่านหัวพ่นวนจอร์ที่มีรูปร่างเป็นคอคอดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำ อาศัยหลักการของการสร้างความแตกต่างของแรงดัน จนกระทั่งเกิดแรงดูดไอโซนลงมาผสมกับน้ำทำให้เกิดการถ่ายเทไอโซนลงไปใต้น้ำ



รูปที่ 3.4 หลักการของท่อ Venturi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



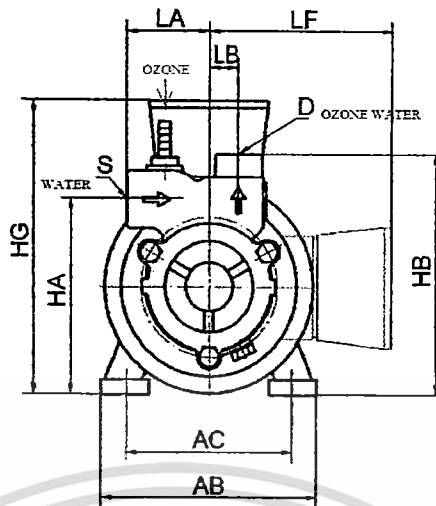
รูปที่ 3.5 ท่อ Venturi ต่อร่วมกับ Union ball valve ที่ใช้ในระบบผสม

2) **Dynamic Mixing** เป็นวิธีการผสมก๊าซโอโซนเข้ากับน้ำด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Ozone Mixing Pump ดังรูปที่ 3.6 บั๊มชนิดนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อการผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำโดยเฉพาะ ดังนั้นประสิทธิภาพของการผสมก๊าซโอโซนเข้ากับน้ำด้วยวิธีนี้จะทำให้อัตราการเข้ากันของก๊าซโอโซนกับน้ำได้ผลดีมาก



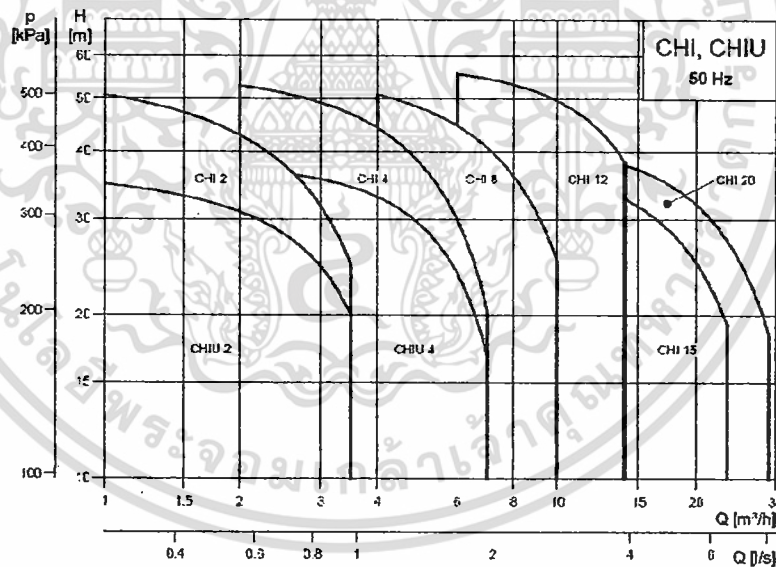
รูปที่ 3.6 Ozone Mixing Pump

โดยหลักการทำงานของบั๊มประเภทนี้นั้น ในตัวเรือนบั๊มถูกออกแบบมาให้เป็นห้องผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ ซึ่งน้ำที่เราต้องการจะเติมโอโซนลงไปนั้นต่อเข้ากับทางท่อดูด ส่วนท่อก๊าซโอโซนนั้นจะเป็นท่อเล็กอยู่บนเรือนบั๊มเมื่อก๊าซโอโซนถูกผสมกับน้ำในตัวเรือนบั๊มจะได้น้ำที่ผสมกับก๊าซโอโซนเรียบร้อยแล้วออกมาทางท่อส่งน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หลักการทำงานของ Ozone Mixing Pump

ในการเลือกขนาดของปั้มน้ำ สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงประสิทธิภาพ (Performance Curve) ซึ่งเป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตปั้มน้ำ โดยพิจารณาอัตราการไหลเทียบกับความดันของปั้มน้ำ จะทำให้สามารถเลือกปั้มน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงประสิทธิภาพ (Performance Curve)

ปั้มน้ำที่เลือกใช้ในระบบผสมโอโซนกับน้ำจะพิจารณาจากกราฟแสดงประสิทธิภาพ โดยปั้มน้ำที่เลือกใช้งานมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของปั๊ม

Type : CHI4	
P	1630 W
V	1 x 220 – 240 V 3 x 380 – 415 V , 50 Hz
ρ_{max}	10 bar
H	41 m
H_{max}	58 m
Q	4.5 m ³ /hr
ท่อทางดูด	1 1/4
ท่อทางส่ง	1 1/4

เมื่อเลือกขนาดปั๊มของระบบผสมแล้ว ทำการวางท่อเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบผสมดังที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีอุปกรณ์สำหรับวัดความดันน้ำ (Pressure Gauge) และอุปกรณ์ควบคุมความดันน้ำ (Pressure Switch) เพื่อควบคุมความดันในระบบให้เหมาะสม และใช้บอลลวาล์วในการกำหนดทิศทางของน้ำที่จะเข้าสู่ระบบผสม



รูปที่ 3.9 ติดตั้งปั๊มน้ำและเดินท่อของระบบผสม

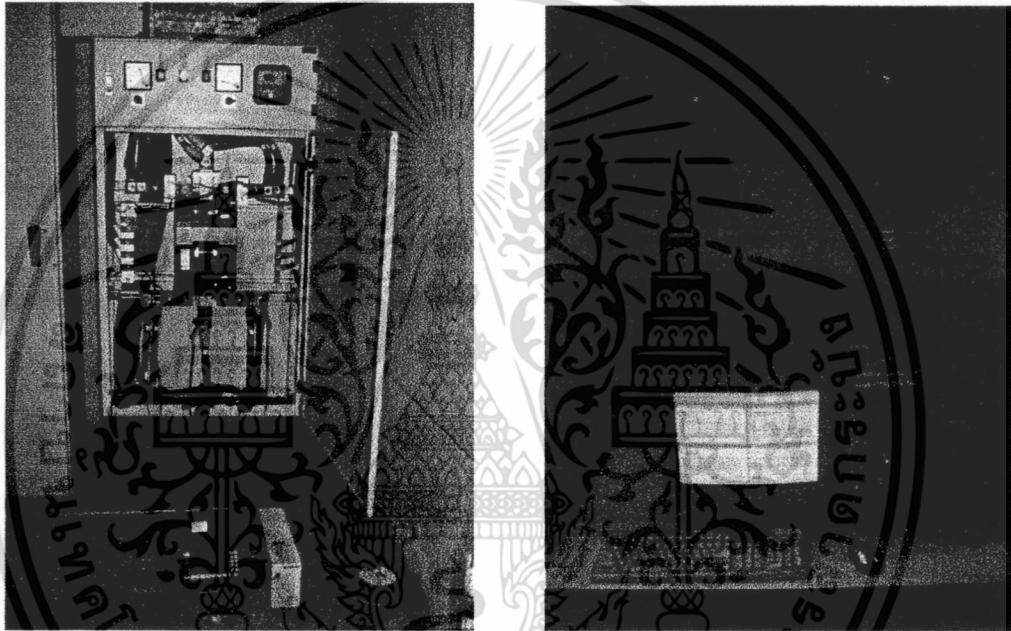
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองด้านพลังงาน

การบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ในระบบकुलिंगทาวเวอร์จะทำการบันทึกสองช่วงเวลา คือก่อนการติดตั้งระบบไอโซนและหลังติดตั้งระบบไอโซนเพื่อเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงาน และนำข้อมูลด้านพลังงานมาวิเคราะห์และแสดงผลในรูปแบบของประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น การติดตั้งเครื่องวัดพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.1



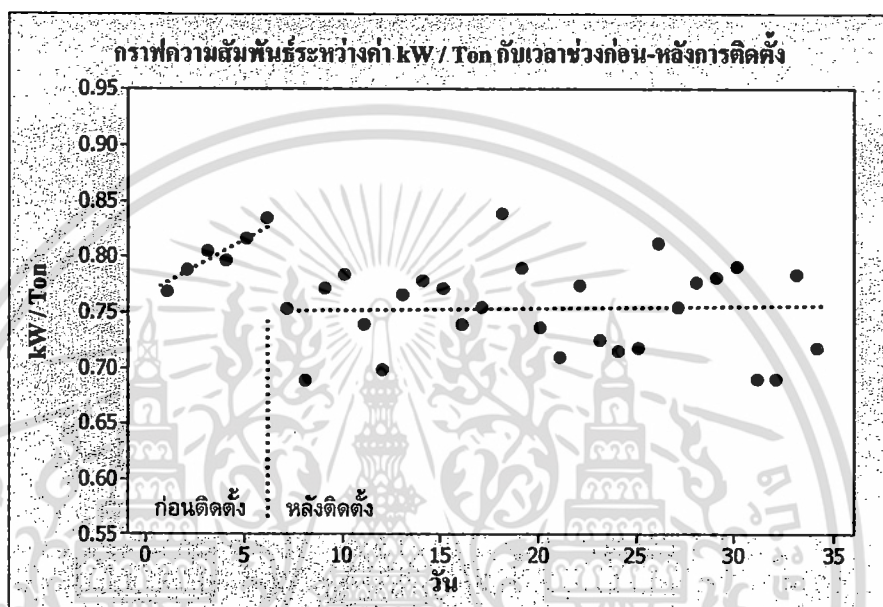
รูปที่ 4.1 การติดตั้งเครื่องวัดพลังงาน

เมื่อได้ค่าพลังงานก่อนและหลังการติดตั้งระบบไอโซนแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Data smart view ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการแสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยในการเปรียบเทียบค่าพลังงานก่อนและหลังติดตั้งระบบไอโซนจะทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่ใกล้เคียงกัน

ในการเก็บค่าพลังงานจะมีการบันทึกค่าทุกๆ 2 วินาที แต่ในการแสดงผลการทดลองได้นำเสนอค่าพลังงานที่ละ 1 นาทีที่มีการเก็บค่าพลังงาน เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้น โดยได้ผลการใช้พลังงานก่อนและหลังติดตั้งระบบไอโซน ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นด้วยค่ากิโลวัตต์ต่อตันความเย็น ซึ่งเป็นอัตราส่วนกำลังงานป้อนเข้าทั้งหมดในหน่วยกิโลวัตต์ต่อความสามารถในการทำความเย็นรวม (net refrigerating capacity)

โดยในการเก็บข้อมูลได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งก่อนและหลังการติดตั้งระบบไอโซน เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลที่ต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3

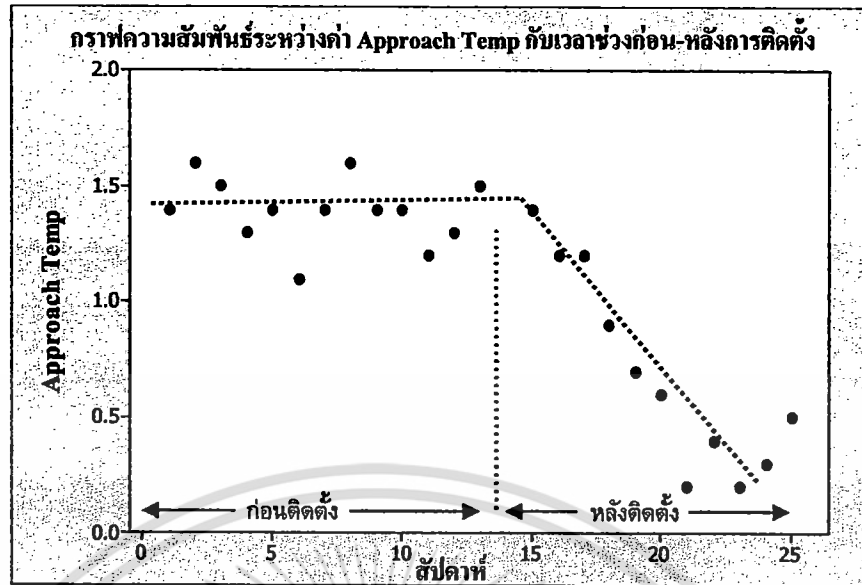


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิโลวัตต์ต่อตันกับเวลาช่วงก่อนและหลังการติดตั้ง

การบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น สามารถแสดงได้อีกวิธีหนึ่งคือ ค่าประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือค่า Approach Temperature

Approach Temperature คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้านออกและอุณหภูมิอิมิตัวของสารทำความเย็นด้านคอนเดนเซอร์หรือด้านจ่าย ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบได้ อีกทั้งยังบอกได้ว่าควรที่จะทำการทำความสะอาดที่คอนเดนเซอร์หรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า Approach Temperature ถ้ามีค่าเกินกว่า 5°F ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานก็ควรที่จะมีการทำความสะอาดที่คอนเดนเซอร์เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น

ก่อนและหลังการติดตั้งระบบไอโซนได้ทำการเก็บค่า Approach Temperature เพื่อถึงชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบที่เปลี่ยนไป ซึ่งได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Approach Temp กับเวลา ช่วงก่อนและหลังการติดตั้ง

โดยในการเก็บค่า Approach Temperature จะทำการเก็บค่าทุกวันจันทร์เป็นเวลา 25 สัปดาห์ เนื่องจากวันจันทร์จะมีการเดินโหลดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการพิจารณาค่า Approach Temperature จำเป็นต้องพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์โหลดที่ใกล้เคียงกัน โดยสัปดาห์ที่ 1 - 13 ของการเก็บค่าเป็นช่วงเวลาก่อนติดตั้ง สัปดาห์ที่ 14 จะไม่ได้ทำการเก็บค่าเนื่องจากอยู่ในช่วงการติดตั้ง และเก็บค่าหลังการติดตั้งตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป

4.2 ผลการทดลองด้านเคมีวิเคราะห์ [9]

การวัดค่าความเปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ก็เป็นอีกช่องทางหนึ่งที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบไอโซนในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบคูลลิ่งทาวเวอร์ได้ โดยค่าทางเคมีที่จะทำการวัดจะประกอบไปด้วยค่า TDS (Total Dissolve Solid), Conductivity, pH และ Ozone residual

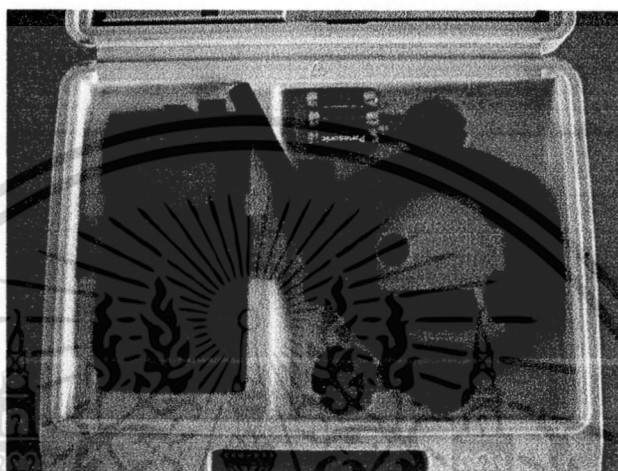
4.2.1 การวัดค่า TDS (Total Dissolve Solid) และค่า Conductivity

Conductivity : เป็นการวัดความสามารถของน้ำที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านคุณสมบัติข้อนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของไอออนที่มีอยู่ในน้ำและอุณหภูมิ ที่ทำการวัดโดยน้ำที่มีไอออนของสารต่างๆ อยู่สามารถนำไฟฟ้าได้ทั้งนั้น ค่า Conductivity ไม่ได้เป็นค่าเฉพาะไอออนของตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ ค่านี้ไม่ได้บอกให้ทราบถึงชนิดของสารที่อยู่ในน้ำนั้น บอกแต่เพียงว่ามีการเพิ่มหรือลดของไอออนที่ละลายในน้ำเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าค่า Conductivity เพิ่มขึ้นก็แสดงว่าสารที่แตกตัวได้ในน้ำมีเพิ่มขึ้น หรือถ้าค่า Conductivity ลดลงก็แสดงว่าสารที่แตกตัวได้ในน้ำลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

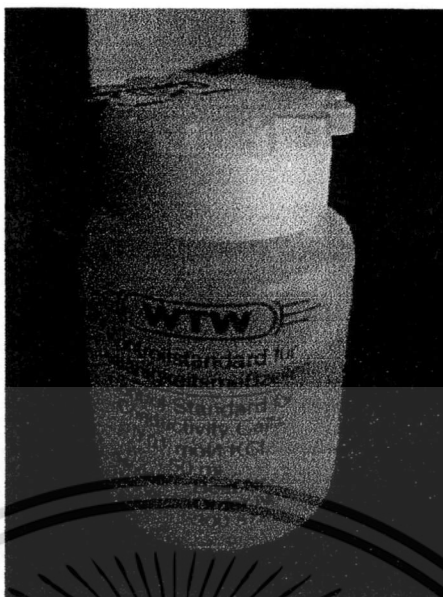
Total Dissolved Solid : ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และสามารถผ่านกระดาษกรองใยแก้วได้ สารแขวนลอย และสารที่ละลายได้ทั้งหมด จะใช้บอกกำลังความสกปรกของน้ำได้ มีหน่วยเป็น มก./ลบม.

ในการวัดจะใช้เครื่องมือชนิดเดียวกันคือชุด Conductivity meter ซึ่งสามารถใช้วัดได้ทั้งค่า TDS (Total Dissolve Solid) และ Conductivity



รูปที่ 4.5 ชุด Conductivity meter

โดยขั้นตอนแรกจะต้องทำการปรับเทียบเครื่องวัดโดยใช้สารละลาย Potassium Chloride (KCl) ความเข้มข้น 0.01 mol/l เป็นสารปรับเทียบ โดยจะต้องล้างโพรบด้วยน้ำกลั่นและเช็ดให้แห้ง จากนั้นเปิดเครื่อง Conductivity meter แล้วจุ่มโพรบลงในสารละลาย Potassium Chloride (KCl) ทำการตั้งค่า Cell constant เท่ากับ 0.614 และตั้งอุณหภูมิโดยให้มีค่า %K เท่ากับ 1.88 เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วล้างโพรบด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งและเช็ดให้แห้ง ก่อนจุ่มในตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัด



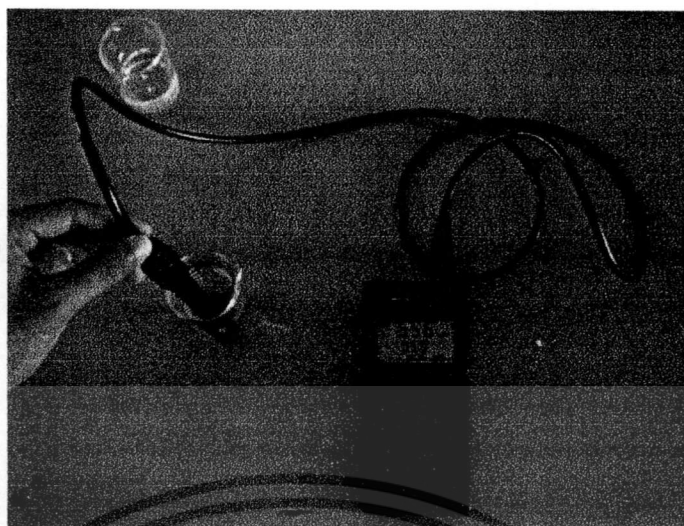
รูปที่ 4.6 Potassium Chloride (KCl) ความเข้มข้น 0.01 mol/l



รูปที่ 4.7 ใช้ Potassium Chloride (KCl) 0.01 mol/l เป็นสาร Calibrate

เมื่อจุ่มโพรบลงในน้ำตัวอย่าง แล้วอ่านค่าโดยต้องรอให้ค่าที่แสดงในเครื่องวัดนิ่งเสียก่อน เมื่ออ่านค่าหนึ่งเสร็จแล้วทำการปรับโหมดของเครื่องวัดเพื่ออ่านค่าอีกค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

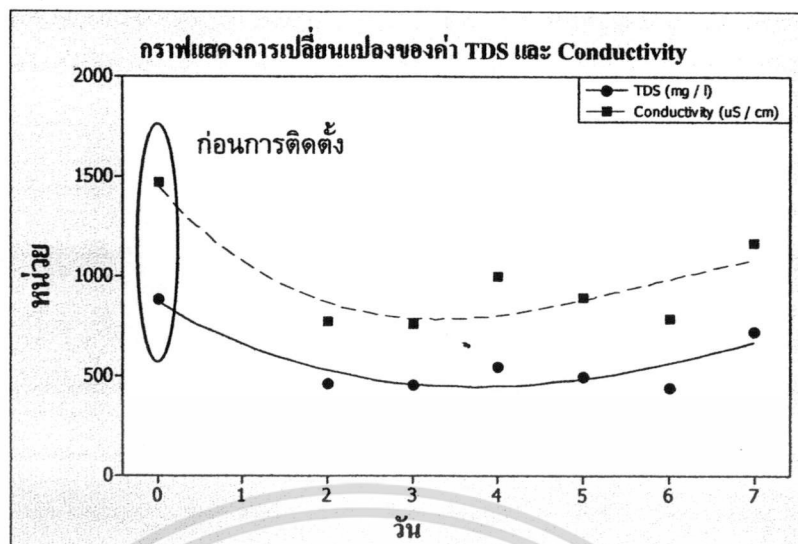


รูปที่ 4.8 วัดค่า TDS และค่า Conductivity

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่า TDS และค่า Conductivity

ระยะเวลา	TDS mg/l (0.56)	Conductivity $\mu\text{S/cm}$	อุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}$
ก่อนติดตั้ง	887	1,473.6	28.3
ระหว่างการติดตั้ง	-	-	-
หลังติดตั้ง 2 สัปดาห์	461.6	772.3	31.4
หลังติดตั้ง 3 สัปดาห์	459.3	759.6	28.56
หลังติดตั้ง 4 สัปดาห์	552.6	1,000	30.96
หลังติดตั้ง 5 สัปดาห์	498.67	895	28.2
หลังติดตั้ง 6 สัปดาห์	443	790	25.6
หลังติดตั้ง 7 สัปดาห์	724	1,169	31.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Conductivity และ TDS

4.2.2 การวัดค่า pH

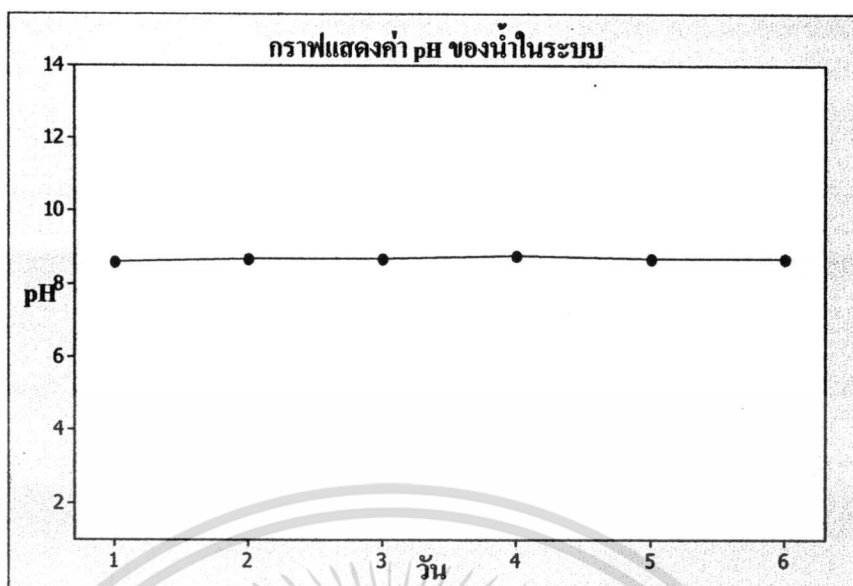
ความเป็นกรด - ด่าง แสดงโดยการวัดค่าพีเอช (pH) ค่าพีเอชเกิดจากการแตกตัวให้อนุมูลกรด - ด่าง มีค่าตั้งแต่ 0-14 ซึ่งค่า $\text{pH} > 7$ หมายถึง ความเป็นด่าง ค่า $\text{pH} < 7$ หมายถึงความเป็นกรด น้ำสะอาดจะมีค่า $\text{pH} = 7$ ค่า pH มีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นต่อการกัดกร่อนของน้ำ วัตถุประสงค์หลักในการกำหนดเกณฑ์ค่า pH เพื่อลดการกัดกร่อนและเสื่อมสภาพของระบบท่อ

การวัดค่า pH ใช้เครื่อง pH Meters ชนิดพกพา รุ่น HI 98107 (pHep) ช่วงการวัด 0.0 to 14.0 pH ค่าความถูกต้อง $\pm 0.1 \text{ pH}$ โดยในการวัดค่าได้ทำการวัดน้ำในคอลิ่งทาวเวอร์โดยตรง ซึ่งวัดค่า pH ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งค่า pH ในระดับนี้มีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นช่วงที่มีอัตราการกัดกร่อนน้อย



รูปที่ 4.10 การวัดค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า pH ของน้ำ

4.2.3 การวัดโอโซนในน้ำ

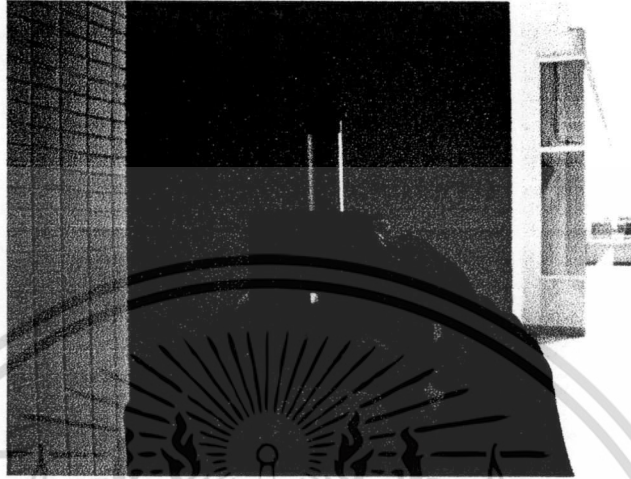
การวัดค่าโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Residual Ozone) เพื่อให้ทราบถึงผลลัพธ์ของการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งแสดงถึงผลลัพธ์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยในปริมาณที่พอเหมาะจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดด้วยหลักการเทียบสี เป็นการใช้สารทดสอบโอโซน (Ozone Reagent) ใส่ลงในน้ำที่มีก๊าซโอโซนผสมอยู่จากนั้นนำมาเทียบสี ซึ่งมีทั้งแบบเทียบสีด้วยตา และแบบ Digital (เทียบสีด้วยเครื่อง Photometer)

การวัดค่า Ozone residual จะใช้จานเทียบสีในการวัด โดยจำเป็นต้องทำการวัดทันที ที่เก็บตัวอย่างน้ำ เนื่องจากโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าไม่ทำการวัดทันทีจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดผิดพลาด



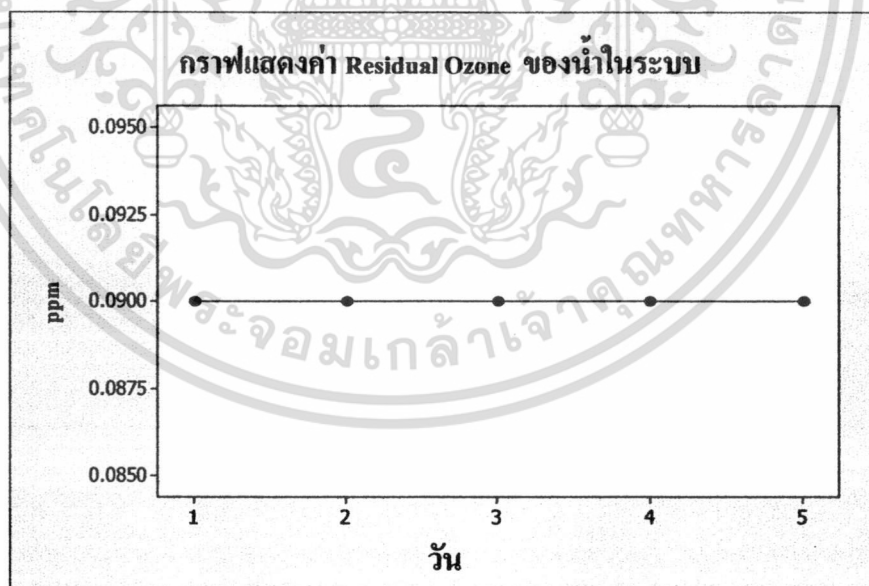
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ **รูปที่ 4.12** ชุดจานเทียบสีสำหรับวัดค่า Ozone residual ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการวัดค่าโอโซนในน้ำ ต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากคอลิ่งทาวเวอร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่สารที่ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาลงไปใต้น้ำตัวอย่าง แล้วเขย่าเป็นเวลา 3 นาทีแล้วทำการเทียบสีทันที โดยอ่านค่า Ozone residual ในหน่วย ppm



รูปที่ 4.13 เทียบสีและอ่านค่า

เมื่อควบคุมค่าคงเหลือ Ozone Residual ในอ่างน้ำหล่อเย็นในระดับ 0.07 ถึง 0.1 ppm จะช่วยสลายตะกอน ยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำ และจุลชีพในน้ำ รวมถึงรักษาคุณภาพน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า Residual Ozone

จากกราฟผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำของระบบคอลิ่งทาวเวอร์อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

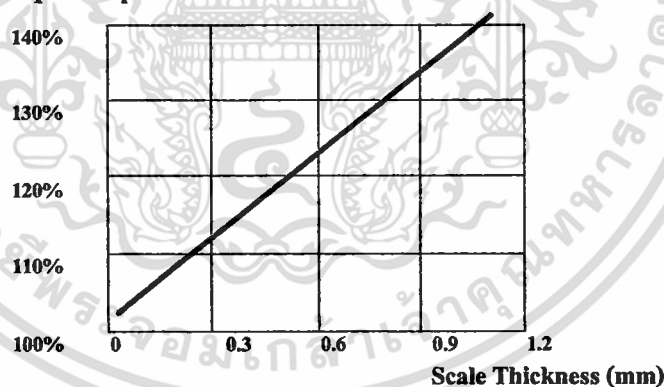
5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้งานก๊าซไอโซนเพื่อลดปัญหาตะกรันและปัญหาสภาพแวดล้อมจากการใช้สารเคมีในระบบทำความเย็น รวมถึงเขียนโปรแกรมและจัดทำตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดครีโอลิ่งทาวเวอร์กับขนาดเครื่องผลิตไอโซน เพื่อช่วยในการเลือกขนาดเครื่องผลิตไอโซนให้เหมาะสมกับขนาดของครีโอลิ่งทาวเวอร์

จากการทดลองติดตั้งเครื่องผลิตไอโซนในระบบทำความเย็น โดยเป้าหมายหลักคือการแก้ปัญหาตะกรัน ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบลดลง พบว่าไอโซนสามารถสลายตะกรันที่เกิดขึ้นในระบบได้ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีผลให้ประสิทธิภาพในด้านอื่น ๆ ดีขึ้นด้วย ได้แก่

- อัตราการใช้พลังงานลดลงประมาณ 8.83% เมื่อตะกรันถูกทำลายทำให้ไม่มีตะกรันเกาะตามผิวท่อหล่อเย็น ดังนั้นการใช้พลังงานในการที่ซิลเลอร์จะส่งน้ำไปยังครีโอลิ่งทาวเวอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะลดลง ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.1

Relative Horsepower per Ton in Percent at 40F Suction



Source : Phillip Kotz

"Clean system Approach to Air Conditioning Heating, Piping and Air Conditioning Journal"

รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มพลังงานที่เพิ่มขึ้นกับความหนาของตะกรัน [8]

- ค่ากิโลวัตต์ต่อตันความเย็นลดลงประมาณ 8.73% ค่ากิโลวัตต์ต่อตันความเย็นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบทำความเย็น ยิ่งมีค่าน้อยนั้นหมายความว่า การใช้พลังงานในการทำความเย็นก็มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า Approach Temperature ลดลงประมาณ 50% ค่านี้เป็นดรรชนีที่ชี้ให้เห็นประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นกับน้ำหล่อเย็น ถ้ามีค่าน้อย แสดงว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นและสารทำความเย็นมีค่าน้อย นั้นหมายความว่า การแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากการ หลุดลอกของตะกอนที่เกาะตามผิวท่อ ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดียิ่งขึ้น

- ค่า Conductivity และค่า TDS มีแนวโน้มที่ลดลง ค่านี้จะเป็นค่าที่บอกระดับ ความสกปรกของน้ำในระบบ โอโซนจะสามารถลดค่าเหล่านี้ได้ แต่เนื่องจากระบบ คลูลิ่งทาวเวอร์เป็นระบบเปิด ฝุ่นผง หรือตะกอนต่างๆ สามารถเข้ามาสู่ระบบได้ทำให้ค่านี้จะไม่ คงที่ สามารถเพิ่มขึ้นได้ตามระยะเวลา

หลังจากติดตั้งระบบโอโซนเข้ากับระบบคลูลิ่งทาวเวอร์แล้ว ได้ทำการตรวจสอบ ค่า Residual Ozone และค่า pH ซึ่งทั้งสองค่านี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโอโซนในการ รักษาคุณภาพของระบบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

- Residual Ozone มีค่าความเข้มข้น 0.09 ppm อยู่ในช่วง 0.07-0.1 ppm ซึ่งเป็นช่วงที่โอโซนสามารถยับยั้งการเกิดตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยรักษาคุณภาพน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นดีขึ้น

- ค่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 8.5 - 9.0 ซึ่งการใช้งานระบบโอโซนในระบบคลูลิ่งทาวเวอร์ ค่า pH ของน้ำควรจะมีการควบคุมให้อยู่ในช่วงนี้ เนื่องจากเป็นช่วงที่มี อัตราการกัดกร่อนน้อยมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำโครงการนี้ปัญหาที่พบคือการขาดแคลนอุปกรณ์วัดพลังงานซึ่งจำเป็นต้องทำการวัดเป็นระยะเวลาอันนานและสามารถบันทึกข้อมูลด้านพลังงานได้ ซึ่งผู้จัดทำต้องติดต่อประสานงานเพื่อขอความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องวัดพลังงานมาใช้ ซึ่งจะมีปัญหาในเรื่องช่วงเวลาเพราะความต้องการใช้เครื่องมือกับความสะดวกในการให้ยืมของบริษัทไม่ตรงกัน

หลังการติดตั้งระบบไอโซนแล้ว จะพบปัญหาในการเก็บผลด้านเคมีวิเคราะห์เนื่องจากทางฝ่ายอาคารสถานที่ของคณะเทคโนโลยีสารสนเทศจะมีการล้างคูลิ่งทาวเวอร์อยู่บ่อยครั้ง ทำให้การเก็บผลด้านเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการติดตั้งไอโซนค่อนข้างคลาดเคลื่อน

และในการเก็บผลด้านพลังงานจะมีปัญหาเนื่องจากการเดินเครื่องของระบบทำความเย็นของคณะเทคโนโลยีสารสนเทศไม่คงที่ ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ไม่คงที่เช่นกัน ในการบันทึกผลพลังงานจึงจำเป็นต้องทราบลักษณะการเดินโหลดในแต่ละวัน โดยจะต้องติดต่อกับฝ่ายอาคารสถานที่เพื่อขอทราบช่วงเวลาในการเรียนการสอนในแต่ละวัน เพื่อเลือกช่วงเวลาที่มีการเดินโหลดใกล้เคียงกันมาวิเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Federal Technology Alert, "Ozone Treatment for Cooling Towers," A publication series designed to speed the adoption of energy efficient and renewable technologies in Federal sector, The U.S. Department of Energy.
- [2] พรพิมล รัตนวิเชียร, "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [3] ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, "การศึกษาเรื่องกำเนิดโอโซนด้วยการกระจายของสนามไฟฟ้า," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [4] ธนะพล สุภรัตน์ศิริ, "แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ความถี่สูง กำลังต่ำ สำหรับผลิตโอโซน," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [5] นรเศรษฐ พัฒนเดช, "วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง, 2550.
- [6] ส้ารวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [7] พิสุทธิ ชัยอมฤต, "โปรแกรมตรวจสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [8] Philip Kotz, "Clean system Approach to Air Conditioning Heating", Piping and Air Conditioning Journal"
- [9] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, American Public Health Association, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้