

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องกำเนิดโอโซน

OZONE GENERATOR



นายโกวิทย์ พันธุ์บัว
นายชำนาญ ตังสมบูรณ์
นางสาวปราณี ชีพพิงวณา
นายยศสันต์ ดิเรกศรี

พ.ศ.
๒๕๔๕
๕๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 50246
วัน,เดือน,ปี 2.8. ๕๕.ย. 2547

b.....
i.....

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงปีการศึกษา ๒๕๔๕ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๑๑๑๑๑๑๑

OZONE GENERATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


2002

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท เครื่องกำเนิดโอโซน
OZONE GENERATOR

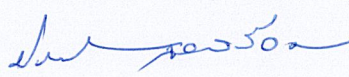
นักศึกษาผู้จัดทำ นายโกวิท พันธ์บัว รหัสประจำตัว 43015455
นายชำนาญ ตั้งสมบูรณ์ รหัสประจำตัว 43015459
นางสาวปราณี ชีพพิงวณา รหัสประจำตัว 43015472
นายยศสันต์ คิเรกศรี รหัสประจำตัว 43015480

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2545

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
อาจารย์ พิทยา ปานนิล	
อาจารย์ อนุชิต จารุณาวัดณ์	
อาจารย์ วิชัย ตันติจริยางกูร	

วันเดือนปี ที่สอบ วัน อังคารที่ 22 เมษายน 2546
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปขอเอาไปใช้ไปทำประโยชน์อื่นการค่า
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องกำเนิด โอโซน OZONE GENERATOR	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายโกวิทย์	พันธู์บัว
	นายชำนาญ	ตั้งสมบูรณ์
	นางสาวปราณี	ชีพพึงวงนา
	นายยศสันต์	ดิเรกศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์พิทยา	ปานนิล
	อาจารย์อนุชิต	จารุณาวัดมน
	อาจารย์วิชัย	ตันติจริยางกูร
ปีการศึกษา	2545	

บทคัดย่อ

การออกแบบเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนเครื่องนี้ ใช้หลักการของปรากฏการณ์ โคลโรน่า ดิสชาร์จ ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่อิเล็กโตรด ขนแปลงใช้แหล่งจ่ายจากหม้อแปลง ปลายเบค แรงดันสูงความถี่สูงทำให้โมเลกุลของออกซิเจน(O_2) ในอากาศแตกตัวและรวมตัวกันใหม่เป็นโมเลกุลของโอโซน (O_3) โดยออกซิเจนที่ส่งเข้าไปในระบบจะมาจากอากาศซึ่งถูกดูดด้วยปั๊มดูดอากาศ อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที และส่งต่อไปที่ชุดอุ่นอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดความร้อน (Heater) ทำหน้าที่ทำให้อากาศแห้ง จากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านซิลิกาเจล เพื่อดูดความชื้นที่ยังหลงเหลืออยู่

จากการทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนเครื่องนี้สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ปริมาณเฉลี่ย 3.03 ppm. จากปริมาณที่ได้นี้ สามารถนำก๊าซโอโซน ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย ยกตัวอย่างเช่น การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดสี กลิ่น ฟอกอากาศ รวมถึงการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและไวรัสบางชนิดที่ปนอยู่ในน้ำ แต่ทั้งนี้ในการใช้ก๊าซโอโซนจะต้องคำนึงถึงปริมาณของการใช้ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้โดย(IOA: International Ozone Association) เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Ozone Generator	
Authors	Mr.Kowit	Phanbua
	Mr.Chamnan	Tangsomboon
	Ms.Pranee	Cheepphungwana
	Mr.Yossan	Direksri
Thesis Advisor	Mr.Pittaya	Pannil
	Mr.Anuchit	Jaruvanawat
	Mr.Wichi	Tantichariyangkul
Year	2002	

ABSTRACT

Construction of ozone generation is design on corona discharge phenomena produces high strain in electric field at brush electrode from flyback switching transformer that has high voltage 5 kV at frequency 15-20 kHz. Oxygen molecule (O_2) is fission and become to ozone gas (O_3). Flow oxygen (O_2) to system by pump 2 L / Min through air filter , heater size 220 V / 300 W and silica gel to make dry air and then through this air to system .

From the result test with ozone generator, the ozone generator can produce average ozone 3.03 ppm. Ozone can applied in many purpose such as wastewater treatment, particularly to remove heavy metal, color and kill germs in water etc.

And should be use under the IOA Standard (International Ozone Association, USA) in order to safe user.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริยฐานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ พิทยา ปานนิล อาจารย์ วิชัย ตันตจิรียงกูร และ อาจารย์อนุชิต จารุวนารัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริยฐานิพนธ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการวัดปริมาณไอโซนของเครื่องกำเนิดไอโซนที่ได้สร้างขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และ ความช่วยเหลือ จนสามารถทำปริยฐานิพนธ์นี้เสร็จสิ้นลงตามวัตถุประสงค์

รวมทั้งทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยเหลือ แต่ไม่มีโอกาสได้กล่าวนามในที่นี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริยฐานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่บิดา มารดา ภาควิชา และอาจารย์ทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการกำเนิดโอโซน.....	3
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโอโซน.....	3
2.1.1 การทำให้เกิดโอโซน.....	3
2.1.2 เครื่องกำเนิดโอโซน.....	4
2.1.3 สมบัติทางเคมีของโอโซน.....	7
2.2 การนำโอโซน ไปประยุกต์ใช้งาน	8
2.2.1 บทบาทของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย.....	8
2.2.2 บทบาทของโอโซนในการฆ่าเชื้อโรค	9
2.2.3 การออกซิเดชัน.....	10
2.3 วิธีการวัดปริมาณโอโซน.....	17
2.3.1 การเก็บตัวอย่างก๊าซโอโซน.....	17
2.3.2 วิธีการทดลอง.....	17
2.3.3 การคำนวณความเข้มข้นของโอโซนด้วยวิธีทางเคมี.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 เครื่องกำเนิดไอโซน.....	20
3.1 การหาค่าพลังงานและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน.....	20
3.2 การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิด ไอโซน.....	23
3.3 ระบบเตรียมอากาศแห้ง.....	23
3.4 การออกแบบชุดหลอดผลิตไอโซน.....	24
3.4.1 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	26
3.4.2 การกระจายของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่ออกแบบ.....	26
3.5 การเลือกประเภทของ BRUSH ELECTRODES.....	28
3.6 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไอโซน.....	29
3.6.1 ชุดเตรียมอากาศแห้ง.....	29
3.6.2 ชุดหลอดผลิตไอโซน.....	30
บทที่ 4 สวิตซ์เพาเวอร์ซีฟฟลาย.....	31
4.1 กล่าวนำ.....	31
4.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	32
4.1.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์.....	32
4.1.3 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์.....	33
4.1.4 ฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	34
4.1.5 ฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	34
4.2 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	35
4.2.1 พื้นฐานการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	35
4.2.2 ลักษณะกระแสและแรงดันภายในวงจร.....	36
4.2.3 การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแส ไม่ต่อเนื่อง.....	38
4.3 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์.....	38
4.3.1 การเลือกใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์.....	39
4.3.2 การใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.3.3 ถ้าจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง (โพลิตیکنิกความต้านทาน) จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 ความสัมพันธ์กับโหลดความเหนี่ยวนำ (Inductive load).....	41
4.3.5 ปรากฏการณ์ Secondary breakdownของทรานซิสเตอร์.....	42
4.4 หม้อแปลงสวิตซ์.....	47
4.4.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตซ์.....	47
4.4.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core).....	47
4.4.3 บอบบี้ (Bobbin).....	48
4.4.4 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire).....	49
4.4.5 เทปฉนวน (Insulation Tape).....	49
4.4.6 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้.....	49
4.4.7 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ในแกนหม้อแปลง.....	53
4.4.8 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	58
4.4.9 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์.....	61
4.4.10 แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงฟลายแบคและเอาต์พุตโkick.....	62
4.5 วงจรกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง.....	63
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องกำเนิดไอโซน.....	65
5.1 การทดสอบที่ 1.....	65
5.2 การทดสอบที่ 2.....	65
บทที่ 6 สรุป.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคระหว่างการใช้คลอรีนและโอโซน.....	10
2.2 สมบัติของก๊าซโอโซนบริสุทธิ์.....	13
2.3 แสดงระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น.....	14
2.4 ข้อมูลปริมาณการใช้โอโซนในลักษณะต่างๆ.....	15
2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางโอโซนกับคลอรีน.....	16
4.1 แสดงตัวอย่างขนาดของบอบบิ้น.....	48
4.2 ตัวอย่างขนาดแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ.....	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง Schematic Diagram ของการทำให้เกิดโอโซนด้วยวิธี Corona discharge	4
2.2 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบออกโตเพลต	5
2.3 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบท่อ	6
2.4 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบโลว์เธอร์เพลต.....	6
2.5 แสดงปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน	7
2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Indirect และ Direct Ozonation	10
2.7 แสดงแบบการทดลอง Ozonation	11
2.8 แสดงอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซโอโซน.....	18
3.1 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน	21
3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องผลิตโอโซน	23
3.3 ระบบเตรียมอากาศแห้ง.....	23
3.4 หลอดผลิตโอโซน.....	24
3.5 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งความเครียดสนามไฟฟ้า.....	27
3.6 อีเล็กโตรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (III).....	28
3.7 ชุดอีเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ.....	29
3.8 ชุดเตรียมอากาศแห้ง.....	29
3.9 ชุดหลอดผลิตโอโซน (ก) , (ข).....	30
4.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	32
4.2 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	35
4.3 แสดงลักษณะของกระแสที่ขด ไพรมารี่และเซคคันดารีขณะวงจรทำงาน.....	37
4.4 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของ ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	37
4.5 แสดงลักษณะของกระแสเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง.....	38
4.6 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์.....	40
4.7 แสดงรูปคลื่นของทรานซิสเตอร์สวิตชิง.....	41
4.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันกับกระแสของทรานซิสเตอร์เมื่อขับโหลดความเหนี่ยวนำ.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดง SOA ของทรานซิสเตอร์.....	43
4.10 การป้องกัน Secondary breakdown โดยต่อ JFET อนุกรมกับเบส ของทรานซิสเตอร์.....	44
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์.....	45
4.12 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA.....	46
4.13 แสดงส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงสวิตชิง.....	47
4.14 ตัวอย่างขนาดของบอบบี้.....	48
4.15 ตัวอย่างของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ.....	50
4.16 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสารชนิด 3C8และ3C6A	51
4.17 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส.....	52
4.18 แสดงการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสาร 3C8 และ 3C6A.....	53
4.19 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด.....	55
4.20 แสดงกำลังงานที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้กับฮัลฟบริดจ์และฟลูบริดจ์.....	59
4.21 แสดงการกำหนดช่องอากาศชั้น 1g ที่คั่นกลาง	61
4.22 วงจรกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง.....	63
4.23 ผลการวัดแรงดันเอาต์พุตที่ 10 kV.....	64
5.1 เครื่องยิวีวีเอสทีเบิลสเปคโพลีโตนีเตอร์.....	66
5.2 การต่ออุปกรณ์วัดปริมาณ โอโซน.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจ

ในปัจจุบันก๊าซโอโซนเริ่มเข้ามามีบทบาทและเป็นที่รู้จักมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซโอโซนที่หลังจากทำการบำบัดน้ำหรืออากาศแล้ว ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้าง จึงได้มีการนำก๊าซโอโซนเข้าไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ฟอกสี กำจัดกลิ่น บำบัดน้ำเสีย รวมถึงทำน้ำดื่มและยังได้มีการนำก๊าซโอโซนมาใช้กับชีวิตประจำวันอีกด้วยเช่น ฟอกอากาศ ล้างผัก ผลไม้ และใช้ฆ่าเชื้อในสระว่ายน้ำแทนการใช้คลอรีน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีอยู่ในปัจจุบันมีราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับปริมาณที่ผลิตได้ คณะผู้จัดทำจึงได้คิดและทำโครงการงานเครื่องกำเนิดโอโซน เพื่อศึกษาถึงวิธีการผลิตและปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโอโซนเพื่อสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนให้ได้ปริมาณที่มากพอกับการนำไปใช้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษากระบวนการกำเนิดโอโซน ด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ
2. สามารถสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษา
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโอโซน เพื่อนำไปใช้พัฒนาหาวิธีที่สามารถเพิ่มปริมาณการเกิดของโอโซน
4. สามารถสร้างส่วนของชุดเตรียมอากาศเพื่อลดความชื้นที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโอโซนได้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาข้อมูลการเกิดของก๊าซโอโซน ประโยชน์ และโทษ รวมถึงการนำก๊าซโอโซนไปประยุกต์ใช้งาน
2. สร้างเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีปริมาณการผลิตโอโซนที่มากพอที่จะนำไปใช้งานได้
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเกิดของโอโซน
4. ศึกษาและออกแบบวงจรต่างๆ ที่สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในเครื่องกำเนิดโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการศึกษาโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการกำเนิดโอโซน

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโอโซน

โอโซน (Ozone : O_3) ถูกค้นพบโดย Van Marom ในปี ค.ศ. 1785 โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรมีสีน้ำเงิน และมีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ซึ่งก๊าซนี้ มีแนวโน้มที่จะสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจน (O_2) ได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซโอโซนให้มีความหนาแน่นสูง ๆ ได้ และเก็บไว้นานๆ ไม่ได้ โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักและมีผู้สนใจมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติของโอโซน ที่ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้าง เมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น และประโยชน์ของโอโซนยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับชีวิตประจำวันและในแวดวงอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น ใช้ฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีนในสระว่ายน้ำ รวมถึงการใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

โอโซน เป็นก๊าซธรรมชาติ ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง การนำไปใช้งานต้องใช้งานทันที เนื่องจากคุณสมบัติสลายตัวได้ง่าย โดยข้อบ่งชี้ในการสลายตัวขึ้นอยู่กับ

- ระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน
- อุณหภูมิ
- ความบริสุทธิ์ของอากาศจากฝุ่น
- ความชื้น
- การกระจายตัวของแสงแดด

2.1.1 การทำให้เกิดโอโซน

โอโซนสามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต(Ultraviolet) ซึ่งเกิดจากธรรมชาติโดยเฉพาะในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) ซึ่งอยู่สูงจากพื้น โลกประมาณ 20 กิโลเมตร มีจำนวนมากถึง 90 %
- จากปฏิกิริยาเคมี เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ
- จากสนามไฟฟ้า ทั้งจากธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า และเครื่องกำเนิดโอโซน

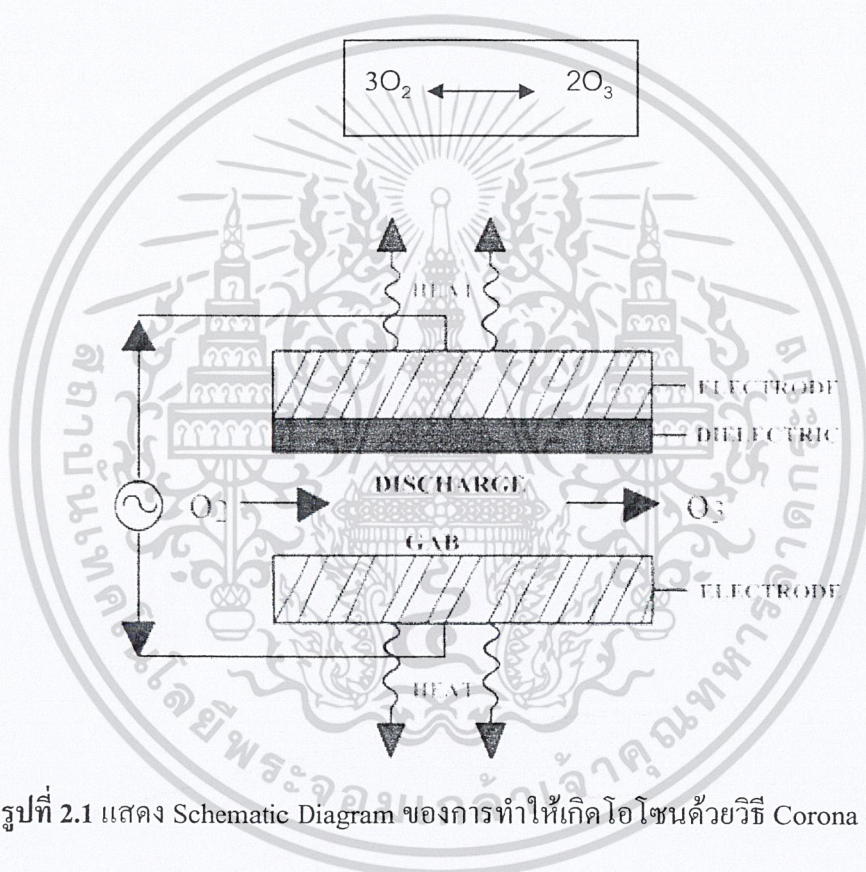
ซึ่งวิธีที่นิยมที่สุดคือ การทำเครื่องกำเนิดโอโซนเพราะสามารถควบคุมปริมาณการเกิดและปริมาณที่ได้มากพอที่จะนำโอโซนไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เครื่องกำเนิดโอโซน [8]

วิธี Corona Discharge เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีนี้สามารถผลิตความเข้มข้นของโอโซน ได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากัน

อากาศแห้งที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (ปกติใช้อากาศเป็นสารป้อนสำหรับระบบบำบัดน้ำดื่มแต่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารป้อนสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย) ถูกผ่านเข้ามาระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น ซึ่งแยกออกจากกันด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกที่เป็นเซรามิก และมีการเชื่อมต่อของแผ่นอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดความต่างศักย์สูง ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ ออกซิเจนที่ผ่านเข้ามาบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น โอโซน



รูปที่ 2.1 แสดง Schematic Diagram ของการทำให้เกิด โอโซนด้วยวิธี Corona discharge [8]

การสังเคราะห์โอโซนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องซึ่งควบคุมโดยสมดุลของปฏิกิริยา แต่จะเกิดปฏิกิริยาผันกลับอย่างรวดเร็วถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ในระหว่างการผลิตโอโซนนั้น ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาจึงต้องมีการให้ความเย็นแก่เครื่องผลิตโอโซนด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะให้ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้สูงสุด โดยปกติแล้วการให้ความเย็นนี้อาจใช้น้ำเย็นหรืออากาศก็ได้จากการผลิตโอโซนด้วยวิธี นี้ พบว่า หากให้อากาศเป็นสารป้อน ความเข้มข้นที่ผลิตได้คิดเป็น 1-3 % แต่ถ้าใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นสารป้อน ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้คิดเป็น 2-6 %

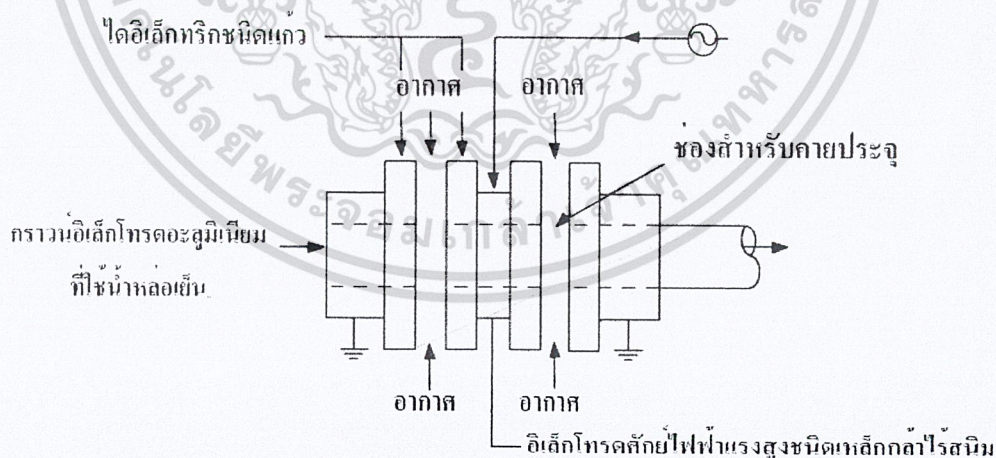
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในปัจจุบันเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนที่ใช้หลักการนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ แบบ ออตโตเพลต (Otto plate) แบบท่อ (Tube) และแบบโลว์เธอร์เพลต (Lowther Plate)

1) เครื่องสังเคราะห์แบบออตโตเพลต ถูกออกแบบขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1905 ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพไม่มากนักแต่ก็ยังมีใช้ในบางส่วนของยุโรปตะวันตก เพราะใช้ขนาดของแรงดันต่ำ เครื่องสังเคราะห์แบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.2

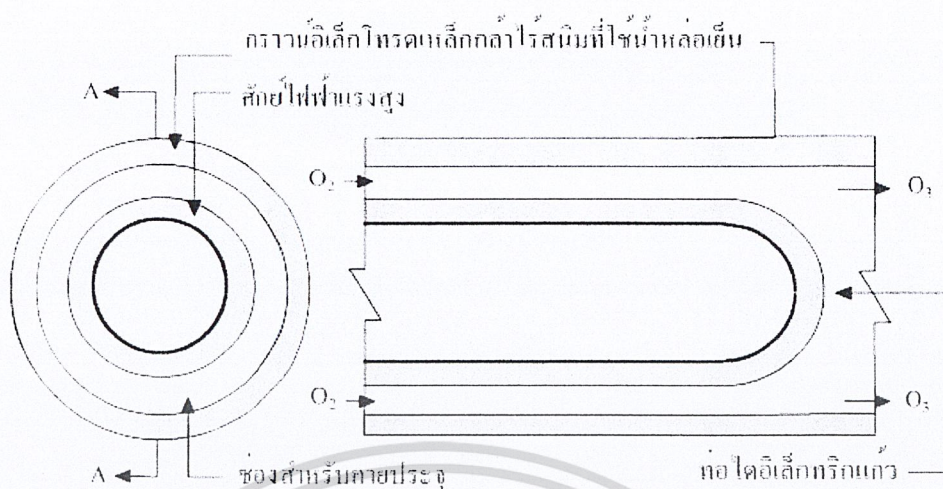
2) เครื่องสังเคราะห์แบบท่อ จะประกอบไปด้วยจำนวนท่อหลายๆ ท่อรวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อิเล็กโทรดข้างนอกจะทำด้วยท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และการระบายความร้อนด้วยน้ำที่อยู่รอบๆ ท่อ ส่วนของท่อแก้วที่อยู่ตรงกลาง จะถูกเคลือบผิวด้วยตัวนำไฟฟ้า ไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกป้อนเข้าระหว่างตัวนำที่เคลือบอยู่ด้านนอกตลอดแก้วกับท่อเหล็กด้านนอก อากาศหรือก๊าซออกซิเจนจะถูกส่งผ่านระหว่างช่องนั้น การสังเคราะห์ก๊าซไอโซนโดยวิธีนี้สามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

3) เครื่องสังเคราะห์แบบโลว์เธอร์เพลต เป็นแบบใหม่ที่ถูกปรับปรุงขึ้น เครื่องสังเคราะห์แบบนี้จะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งต่างจากสองแบบแรกที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำ อิเล็กโทรดถูกเคลือบด้วยเซรามิกหรือยางซิลิโคน โดยเคลือบทั้งด้านนอกและด้านในท่อ ซึ่งจะทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพสูง เครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.4

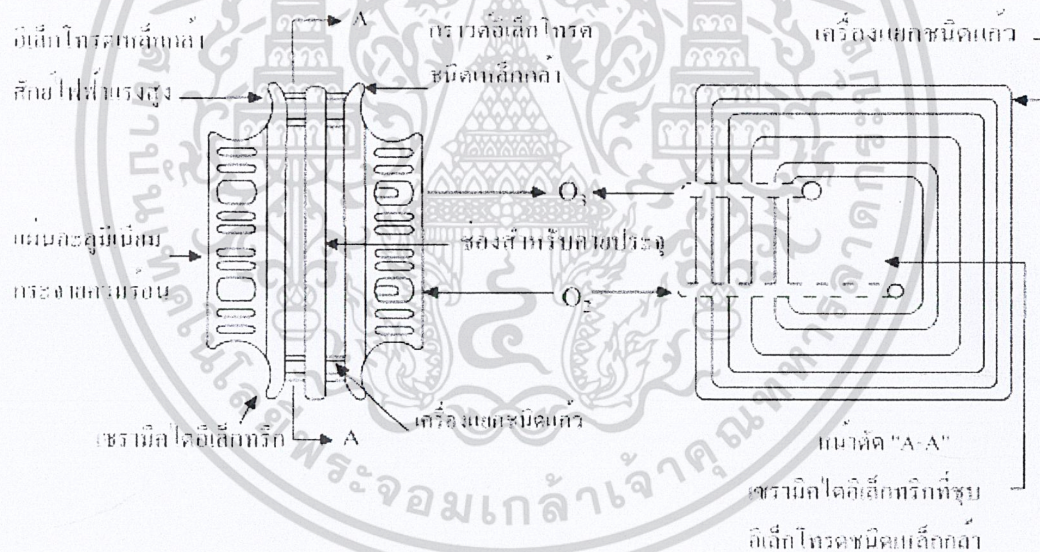


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบออตโตเพลต [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบทอ [9]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบโลว์เซอร์เพลต [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สมบัติทางเคมีของโอโซน [8]

การละลายของโอโซนในน้ำ จาก Henry's Law

$$Y = HX$$

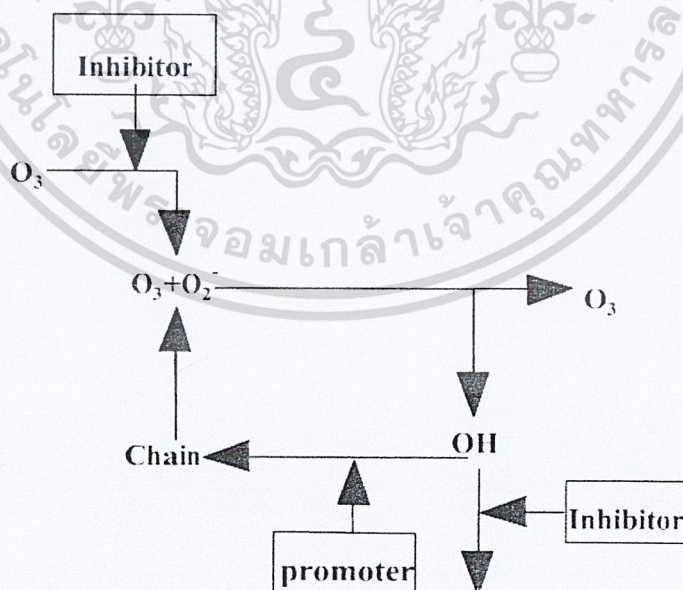
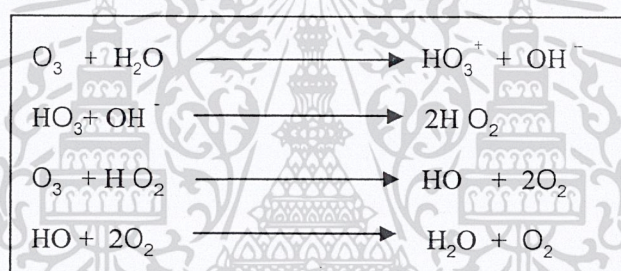
โดย Y คือ ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวซึ่งสมดุลกับก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลว (mg/l)

X คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวซึ่งสมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว (mg/l)

H คือ (mg gas/L gas) (mg gas/L Liquid)

จากการพิจารณาค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's Constant) นั้น โอโซนจะมีความสามารถในการละลายสูงกว่าออกซิเจนถึง 13 เท่า ที่อุณหภูมิและความดันปกติ

ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์เป็นดังสมการ



รูปที่ 2.5 แสดงปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 มี 2 ปฏิกิริยาการที่มีผลต่อวัฏจักรดังกล่าวคือการสนับสนุน(Promotion) และการยับยั้ง(Inhibition) โดยสารสนับสนุน(Promotion Agent) คือ O_3 ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับ O_2 อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สารยับยั้ง (Inhibition Agent) จะทำปฏิกิริยา เกิด OH เป็นผลิตภัณฑ์อื่นสารยับยั้งนั้นรวมถึงคาร์บอนเนต และไบคาร์บอนเนต จากการที่ ระดับคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตมีปริมาณสูงจะช่วยให้โอโซนที่เหลืออยู่คงสภาพต่อไปอีก ซึ่งก็เป็นข้อดีสำหรับการประยุกต์ใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อ เนื่องจากโอโซนที่เหลือจะมีระยะเวลาเพิ่มขึ้น ในการหยุดยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ (Microbial Inactivation)

2.2 การนำโอโซนไปประยุกต์ใช้งาน

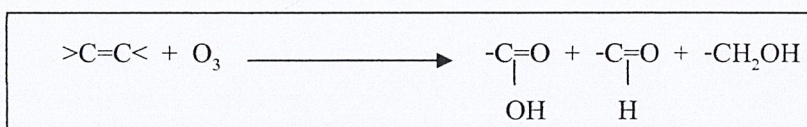
2.2.1 บทบาทของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

คุณสมบัติของ โอโซนที่สำคัญคือ มีความสามารถในการออกซิเดชันและมีค่าศักย์ไฟฟ้าของการรีดักชัน เท่ากับ 2.07 โวลต์จึงสามารถออกซิไดซ์หรือเติมออกซิเจนให้กับสารเคมีได้หลายชนิด การนำก๊าซโอโซนไปใช้ในการบำบัดน้ำแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) การบำบัดน้ำเสียที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ปกติน้ำเสียดังกล่าวจะมีสารปนเปื้อนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนจึงปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้
- 2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดี เช่น น้ำดื่ม เมื่อต้องการน้ำที่สะอาด และปราศจากสารตกค้าง

สำหรับสารอินทรีย์ โอโซนจะออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว เช่น ซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต เฟอร์ริออนเป็นเฟอร์ริก ไอโอไดด์เป็นไอโอดีน เป็นต้น

สำหรับสารอินทรีย์ โอโซนจะออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์นัก และมีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าสารอินทรีย์ สารประกอบอะโรมาติกและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว และพันธะคู่จะแตกออกไปเป็นกรดคาร์บอกซิลิก และคีโตนดังสมการ



โดยโอโซนจะลดค่า Total Organic Carbon (TOC) จากการออกซิเดชันได้ 10-20% แต่จะลดค่า COD และ BOD ได้ ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่า สารอินทรีย์ บางชนิดจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนอย่างช้าสารอินทรีย์เหล่านี้ได้แก่ สารทำความสะอาด ยาฆ่าแมลง สารประกอบออร์แกนิกที่ไม่ว่องไวต่อออกซิเจนสูง และสารประกอบที่มีพันธะคู่หรือพันธะสาม ซึ่งโอโซนจะออกซิไดซ์สารเหล่านี้ได้ช้ากว่าสารอินทรีย์ที่ว่องไวต่อออกซิเจนสูง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โนโนโตรเจน และสาหร่ายบางชนิด นอกจากนี้โอโซนยังสามารถทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นและรส รวมทั้งรสที่เกิดจากสารฟีนอลได้

ข้อดีของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ [9]

- 1) โอโซนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนักที่เจือปนในน้ำ ได้อย่างรวดเร็ว
- 2) โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่แรงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้น สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ภายในเวลาเพียง 2-3 วินาที
- 3) ใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาค่ำ โดยทั่วไปโอโซนจะละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิด โอโซน จึงเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานกระตุ้น ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา
- 4) โอโซนสามารถสลายได้ง่าย จึงไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในระบบ
- 5) สามารถแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำได้ ด้วยการทำให้ผิวน้ำมีคุณสมบัติเป็นกลาง ทำให้โมเลกุลของสารแขวนลอยรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น จึงสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย
- 6) ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Algae) โดยการออกซิไดซ์อาหารของพืชน้ำ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอาหารและหยุดการเจริญเติบโต หลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะได้ก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น
- 7) กำจัดสี รส และ กลิ่นของของน้ำได้

2.2.2 บทบาทของโอโซนในการฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรค คือ การทำลายความสามารถของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ การฆ่าเชื่อนั้นเป็นขั้นตอนที่จำเป็นขั้นสุดท้ายที่จะป้องกันมนุษย์จากจุลินทรีย์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดโรค โดยโอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างรวดเร็ว แม้กรณีที่เติมคลอรีนลงไป ปริมาณสูงสุดที่กำหนดให้แล้ว ก็ยังไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้นจึงสามารถทำน้ำให้ปราศจากเชื้อโรคได้ภายในไม่กี่วินาที ไม่ว่าจะค่า พีเอช ของน้ำจะเป็นเท่าไร

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจากการใช้โอโซนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในระบบน้ำ นับเป็นวิธีการที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีตัวอื่นๆ ดังเปรียบเทียบตามตารางที่ 2.1

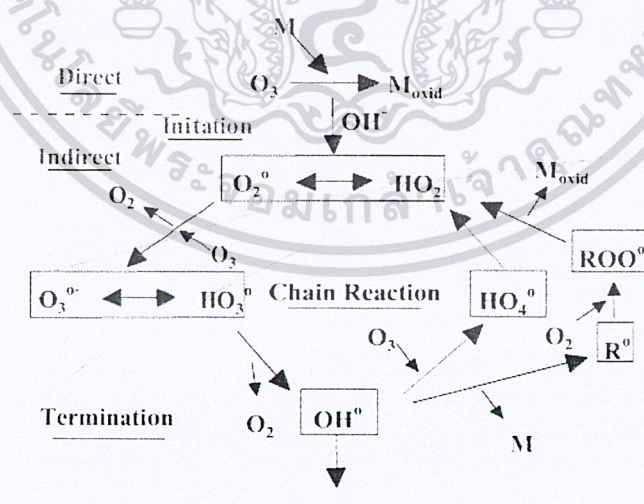
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคระหว่างการใช้คลอรีนและโอโซน

Gem Load	Disinfectant	Vol.Applied mg/l	Lethal effect
60000 coliform/ml	Chlorine	0.1	15000 sec
	Ozone	0.1	5 sec
350 spores B.Suvtitis/ml	Cholorine	1.4	9000 sec
	Ozone	0.05	30 sec
PM virus MV parent Solution and Le Virus suspension of 1:1000	Cholorine	0.25 – 1.5	Inactivation within 180 min
	Ozone	0.05 – 0.5	

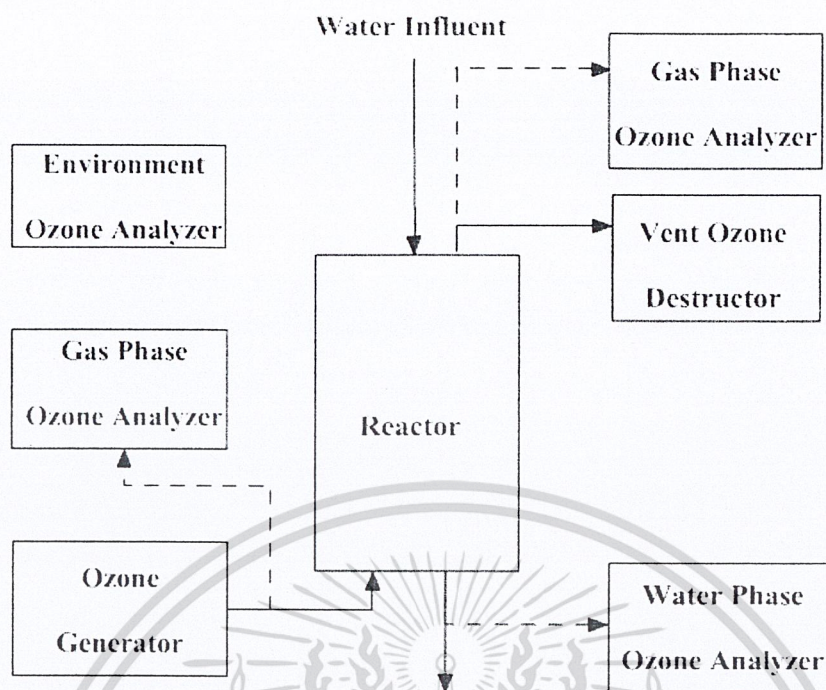
2.2.3 การออกซิเดชัน

โอโซนเป็นก๊าซที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สูงสุดในการบำบัดน้ำเสีย โดยปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ระหว่างโอโซนกับสารประกอบทางเคมี เรียกว่า โอโซนไนเซชัน (Ozonization) ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 ทางคือ ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารประกอบทางเคมี (Direct Ozonization) และอาจเกิดการสลายตัวเป็น radical ก่อนแล้วค่อยทำปฏิกิริยาโดยอ้อม (Indirect Ozonization) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสามารถแสดงแบบการทดลอง Ozonization ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Indirect และ Direct Ozonization [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงแบบการทดลอง Ozonation [1]

นอกจากการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้วยังสามารถนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่าง ดังต่อไปนี้

1) ใช้ในระบบบำบัดน้ำดื่ม แต่เดิมการใช้โอโซนนั้นมีเป้าหมายเพื่อการฆ่าเชื้อโรคเป็นหลัก ต่อมาพบว่า นอกจากใช้ฆ่าเชื้อโรคแล้วโอโซนยังสามารถฟอกน้ำเพื่อขจัดกลิ่น สี รส รวมทั้งช่วยปรับความสมดุลของน้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงถือได้ว่าการใช้โอโซนเพียงชนิดเดียวก็เพียงพอสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำดื่ม ทั้งนี้มีเป้าหมาย คือ

- ขจัดโลหะหนัก เช่น เหล็ก แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำ
- ขจัดสารที่ก่อให้เกิดกลิ่น สี รส
- ช่วยรวมสารแขวนลอยเล็ก ๆ ในน้ำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
- ขจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

2) ปรับปรุงคุณภาพของน้ำในสระว่ายน้ำ ซึ่งมีจุดหมายดังต่อไปนี้

- ขจัดสารอินทรีย์และรวมตะกอนเล็ก ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งมาจากผู้ใช้
- ขจัดและฟอกยูเรีย(มากับปัสสาวะ)ให้อยู่ในรูปสารธรรมดาและรวมตัวกับคลอรีนเป็นสารประกอบรวมกับคลอรีน
- ลดปัญหาเรื่องกลิ่นของสระในกรณีเป็นสระว่ายน้ำในร่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะที่ (ไวรัสชนิดหนึ่ง) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำน้ำในสระให้ใสเป็นประกาย เนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนในน้ำมากเพียงพอ
- ให้ความสบายกับผิวหนังและลดการเกิดอาการระคายเคืองอันเนื่องมาจากมีสิ่งมีชีวิตปนเปื้อนน้อย

3) ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำโซดา

- เปลี่ยนรูปของแร่ธาตุเหล็กและแมงกานีส และกรองออกด้วยตัวกรองถ่าน ถึงแม้ว่าจะมีก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO₂) อยู่ด้วย
- ช่วยทำการฆ่าเชื้อโรคและช่วยรักษาความปลอดภัย โดยที่ไม่ต้องมีการนำสารเคมีตัวอื่นมาใช้เพิ่ม

4) การประมง ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ใช้ในการขจัดสารอินทรีย์ และช่วยเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ ตัวอย่างเช่น บ่อเลี้ยงปลา กุ้ง โลมา ปลาคราฟ เป็นต้น การประยุกต์ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นการฆ่าเชื้อโรคของระบบบำบัดน้ำขาออกและนำมาใช้ในระบบ เพื่อลดปริมาณเชื้อโรค ฆ่าเชื้อโรค ลดความขุ่น สี และกลิ่น

5) การกรองอากาศ กำจัดกลิ่นและกำจัดเชื้อโรคที่อยู่ในอากาศ ในสถานที่ เช่น โรงบำบัดน้ำเสีย โรงฆ่าสัตว์ โรงฟอกหนัง โรงงานกำจัดขยะ เป็นต้น

6) การสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรม [9] การใช้ก๊าซออกซิเจนเพื่อสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรมที่สำคัญได้แก่ การสังเคราะห์กรดอะซีลาอิก (Azelaic acid) โดยปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนของกรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดโอเลอิก ส่วนใหญ่มาจากไขมันของสัตว์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของโรงงานบรรจุเนื้อสัตว์และโรงงานผลิตกระดาษ กระบวนการเริ่มจากการละลายกรดโอเลอิก (ประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนัก) ด้วยกรดเพลาโกนิก (Pelargonic acid) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง ภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย 2 เปอร์เซนต์ของออกซิเจนในออกซิเจน ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เวลานานมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งไปแยกกรดอะซีลาอิกและกรดเพลาโกนิกออกจากกันด้วยกระบวนการกลั่นแบบสูญญากาศ กรดเพลาโกนิกที่แยกได้ จะนำกลับมาใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของก๊าซไอโซนบริสุทธิ์

จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)		-192.5±0.4
จุดเดือด(องศาเซลเซียส)		-111.9±0.3
อุณหภูมิวิกฤติ(องศาเซลเซียส)		-12.1
ความดันวิกฤติ(บรรยากาศ)		54.6
ปริมาตรวิกฤติ(ลบ.ซม./โมล)		111
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นของของเหลว (กรัม/ลบ.ซม.)	ความดันไอของของเหลว (ทอร์)
-183	1574	0.11
-180	1566	0.21
-170	1535	1.41
-160	1504	6.73
-150	1473	24.8
-140	1442	74.2
-130	1410	190
-120	1378	427
-110	1347	865
-100	1316	1605
ความหนาแน่นของไอโซนของแข็งที่ 77.4 เคลวิน (กรัม/ลบ.ซม)		1.728
ความหนืดของของเหลว(เซนติพอยต์) ที่ 77.6 และ 90.2 เคลวิน		4.17 , 1.56
แรงตึงผิว(ดาเยน-เซนติเมตร) ที่ 77.6 และ 90.2 เคลวิน		43.8 , 38.4
พาราเซอร์ ที่ 90.2 เคลวิน		75.7
ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของของเหลว ที่ 90.2 เคลวิน		4.79
แรงระหว่างขั้ว(เดบาย)		0.555
ความไวต่อสารแม่เหล็ก(ซีจีเอส) ของก๊าซ และ ของเหลว		0.002*106 , 0.15
ความจุความร้อนของของเหลวจาก 90 ถึง 150 เคลวิน (เซนติพอยต์)		0.425+0.0014(T-90)
ความร้อนของการกลายเป็นไอ(กิโลแคลอรี/โมล) ที่ -111.9oC และ -183 oC		3410 , 3650

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของก๊าซโอโซนบริสุทธิ์ (ต่อ)

	ความร้อนของการเกิด (กิโลแคลอรี/โมล)	พลังงานอิสระของการเกิด (กิโลแคลอรี/โมล)
ก๊าซที่ 298.15 เคลวิน	34.15	38.89
ของเหลวที่ 90.15 เคลวิน	30	
Hypothetical Gas ที่ 0 เคลวิน	34.74	

ตารางที่ 2.3 แสดงระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น(ข้อมูลจาก IOA : International Ozone Association)

ระดับโอโซน (ppm.=Part per million)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
0.001-0.0125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ คำนี้อาจแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศ
0.05	ความเข้มข้น โอโซนสูงสุดที่ผลิตได้จาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ความเข้มข้น โอโซนสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณที่ทำงานทางอุตสาหกรรม
0.3	ระดับโอโซนเริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วย คือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.40-5.60	การทดสอบกับต้นถั่ว พบว่าในเวลา 70 นาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยรุนแรง
2500 up	ความเข้มข้นของโอโซนเป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตในการทดสอบกับสัตว์ พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลปริมาณการใช้ไอโซนในลักษณะต่าง ๆ

ลักษณะและพื้นที่ของการใช้งาน	ปริมาณที่ใช้(มิลลิกรัม/ชั่วโมง)
1. ในรถยนต์	10-15
2. ในห้อง 10 ตารางเมตร	20
- ในห้อง 20 ตารางเมตร	40
- ในห้อง 33 ตารางเมตร	70
- ในห้อง 55 ตารางเมตร	100
3. ทำน้ำดื่ม 10-30 ลิตร	100-125
4. สลายสารพิษในผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์	100
- ทำความสะอาดภาชนะ	
- ซักล้างสารที่ตกค้างบนเสื้อผ้า	
- เสริมความงาม	
5. ในอ่างอาบน้ำ 150 ลิตร	200
6. สลายสารเคมี ทำลายและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรค และกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ต่างๆ	250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทาง โอ โโซนกับคลอรีน[7]

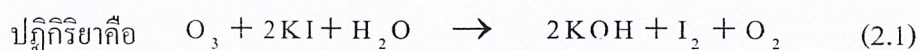
Chlorine	Ozone
1. มีความเป็นพิษสูง และเป็นก๊าซพิษ	1. ระดับความเป็นพิษ อยู่ที่ 1 mg/l (ระบุโดย EPA สหรัฐอเมริกา) มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/l ที่ระดับสูงกว่านี้มีการระคายเคืองสูงมาก
2. คลอรีนจะถูกเก็บในภาชนะบรรจุกวามดันสูงและสามารถเป็นอันตรายได้เมื่อมีการรั่วไหลเกิดขึ้น	2. โอโซนต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้งาน ไม่สามารถเก็บได้
3. คลอรีนเมื่อผสมกับยูรีนและเหงื่อจะทำให้เกิดสารประกอบโครเจน ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองตาและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	3. โอโซนมีวงชีวิตสั้น หลังทำปฏิกิริยาจะสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. ราคาแพง	4. ราคาโอโซนต่ำลงเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีและการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิตในปัจจุบัน
5. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาสูงสุดเนื่องจากค่า (Oxidation potential) 2.07 V
6. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าคลอรีน 600-3000 เท่า
7. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงตกค้างหลังการบำบัด	7. โอโซนไม่มีกลิ่นตกค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของ ยูรีน ,ควีน ,อาหาร และสีได้
8. คลอรีนทำงานกับตะไคร่น้ำได้ผลดีมาก กำจัดตะไคร่น้ำได้ดี	8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำต้องใช้คลอรีนช่วยโดยการทำให้ Shock Treatment
9. คลอรีนทำงานได้ดีต้องควบคุม pH ให้อยู่ในย่าน 7.0 - 7.4	9. โอโซนไม่ต้องการควบคุม pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิธีการวัดปริมาณไอโซน

2.3.1 การเก็บตัวอย่างก๊าซไอโซน

ในการเก็บตัวอย่างของไอโซนทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลและเวลาที่ใช้ในการเก็บสาร ที่ผ่านลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI 1%) ซึ่งควบคุมค่า พีเอช(PH) โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ช่วง 6.8 ± 0.2 ปริมาณไอโอไดด์ที่ใช้มากเกินพอที่จะทำให้ไอโอไดด์ที่เกิดมาเป็นไตรไอโอไดด์ไอออน ซึ่งดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตรดังสมการที่ (2.1) – (2.2)



การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้ในกรณีที่มีความเข้มข้นของการออกซิไดซ์อยู่ระหว่าง 0.1 – 10 พีพีเอ็ม (PPM) (0.01 - 10 μ l/l) ในรูปไอโซน การวัดการดูดกลืนแสงควรวัดปริมาณสารละลายที่ใช้ดูดซึมสารออกซิไดซ์ 10 มิลลิลิตร ต่อปริมาณ ไอโซน 1-10 ไมโครลิตร ซึ่งจะให้ค่าแอบซอร์บแนนซ์ อยู่ในช่วง 0.1 – 1 เมื่อใช้ความกว้างช่องแสง 1 เซนติเมตร

สารรบกวนการวิเคราะห์ที่มีได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เพอร์ออกไซด์อะเซตทิลไนเตรต ฮาโลเจน สารประกอบเพอร์ออกไซด์ สารอินทรีย์ไนไตรด์ เนื่องจากเป็นสารออกซิไดซ์เช่นเดียวกับ ไอโซน ความคลาดเคลื่อนในช่วงการวิเคราะห์ส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียของไอโอไดด์เมื่อเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลานาน ทำให้ไอโซนที่ได้สลายไปก่อนเป็นบางส่วน

2.3.2 วิธีการทดลอง

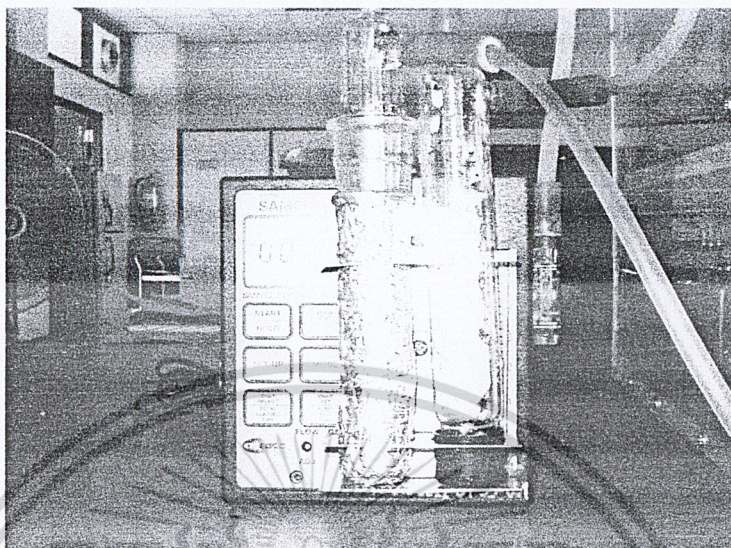
2.3.2.1 ประกอบอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างอากาศเข้าด้วยกัน โดยมีเกตอิมพิงเจอร์ (Midget impinger) และปั๊มในการเก็บอากาศเข้ากับอิมพิงเจอร์ ต้องแนบสนิทหรือใช้ข้อต่อที่มีหลอดพอลิไวนิล (Polyvinyl tubing) ใช้วาสลินหรือกิลิส (Fluorosilicon or Fluorocarbon grease) ทาตามรอยต่อ

2.3.2.2 ทำการปรับเทียบอัตราการไหลของปั๊ม ปีเปตสารละลายออกซิเจนเข้ามา 10 มิลลิลิตร ลงในมิดเกตอิมพิงเจอร์ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษฟอยด์เพื่อป้องกันแสงโดยมีอัตราการไหลของตัวอย่างอากาศ 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทำการวัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่าง

2.3.2.3 เติมน้ำกลั่นจนถึงปริมาตร 10 มิลลิเมตร ในกรณีที่สารละลายที่ใช้ดูดซึมในอิมพิงเจอร์มีปริมาณลดลง จากนั้นนำไปวัดค่าแอบซอร์บแนนซ์ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวีวิสทิเบิลสเปกโฟโตมิเตอร์ นำค่าแอบซอร์บแนนซ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน(ภาคผนวก ก) การวัดค่าแอบซอร์บแนนซ์ควรทำภายใน 30-60 นาที หลังการเก็บตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.4 การปรับแก้ของเบลงค์ ให้วัดค่าแอมชอร์รับเบนซ์ของสารละลายที่ดูดซึมที่ไม่ได้ผ่านตัวอย่างอากาศ และนำไปลบออกจากค่าแอมชอร์รับเบนซ์ของข้อ 2.3.2.3



รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซไอโซน

2.3.3 การคำนวณความเข้มข้นของไอโซนด้วยวิธีทางเคมี

1.1 ในสภาวะมาตรฐาน (ความดัน 760 มิลลิเมตร ปรอท 25°C) ถือว่าแก๊สมีปริมาตร (molar volume) 24.47 ลิตร

1.2 ปริมาตรตัวอย่างอากาศที่เก็บภาวะจริง โดยทั่วไปจะอนุโลมให้เหมือนสภาวะมาตรฐาน จึงไม่ได้ปรับแก้ แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากควรคำนวณหาปริมาตรอากาศที่ภาวะมาตรฐาน โดยใช้กฎของก๊าซอุดมคติ (The perfect gas laws)

1.3 การปรับเทียบสารละลายไอโอดีน คำนวณจากปริมาณสัมพันธ์ของไอโซนกับไอโอดีน (อัตราส่วนโมล 1:1) ใน 100 มิลลิลิตร ของสารละลายสต็อกไอโอดีน 0.025 M เทียบเท่า 1 ไมโครลิตรของ O_3 / มิลลิลิตร จะมีไอโอดีนดังนี้

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{[100 \times 10^{-6}]}{24.47} \\ &= 4.087 \times 10^{-6} \\ &= 4.09 \text{ มิลลิลิตร ของ } 0.001 \text{ ของสารละลาย } I_2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ปริมาณโอโซนทั้งหมด (ไมโครลิตร) ใน 10 มิลลิลิตร อ่านจากกราฟมาตรฐาน

1.5 ความเข้มข้นของ O_3 ในสถานะแก๊ส (ไมโครลิตร/ลิตร, พีพีเอ็ม)

$$O_3 = \frac{\text{ปริมาณ } O_3 \text{ ทั้งหมด ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร} \times 10 \text{ มิลลิลิตรของสารดูดซึม}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างอากาศ (ลิตร)}} \quad (2.3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

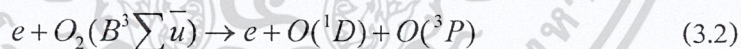
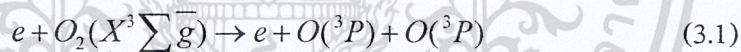
เครื่องกำเนิดโอโซน

3.1 การหาค่าพลังงานและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน [2],[7]

ก๊าซโอโซนก็คือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวของออกซิเจน 3 อะตอม ดังนั้นการที่จะสร้างโอโซนก็คือ การให้พลังงานจากภายนอก เพื่อไปกระตุ้นให้อะตอมของออกซิเจน (Oxygen Gas : O_2) แยกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมกับ ก๊าซออกซิเจน (O_2) กลายเป็น โอโซน (O_3)

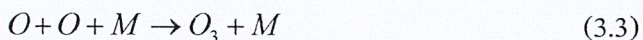
เมื่อพิจารณาจากระดับพลังงานของออกซิเจนในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็น โอโซน ได้มี 2 ระดับ ด้วยกันคือ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ด้วยกันคือ

a) การแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือ ปฏิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานในงานวิจัยที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ปฏิริยาที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับระดับพลังงานของออกซิเจนแล้วแสดงในสมการที่ 3.1 และ 3.2



อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานพันธะของโมเลกุลก๊าซจากรูปที่ 3.1 โดยประมาณคือ อยู่ในช่วงที่ 6-9 eV หรือ 595.4 kJ/mol ถึงกว่า 700 kJ/mol

b) การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ a) กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็น โอโซน (Ozone Generation)



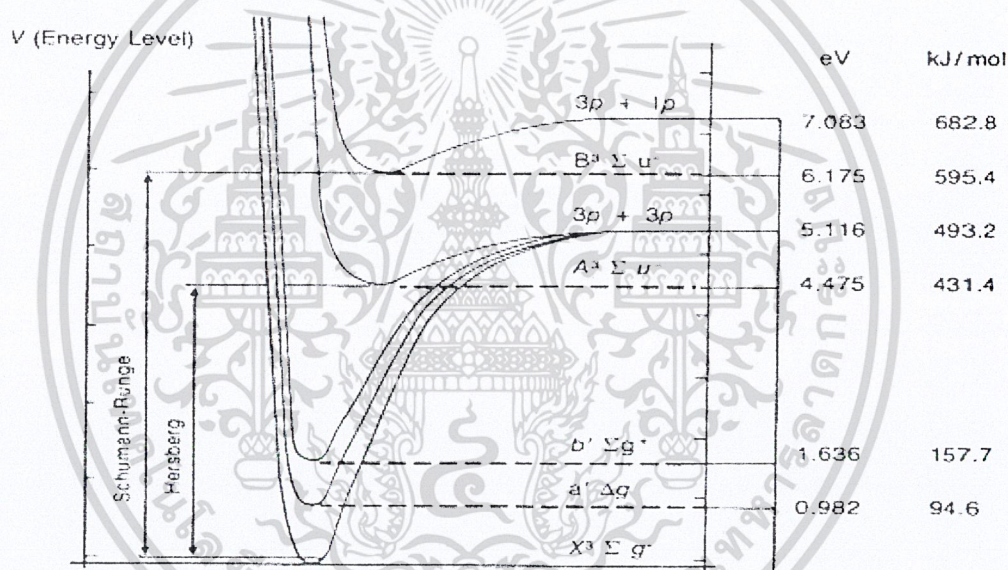
เมื่อ M คือ ก๊าซอื่นอาจเป็น O_2 หรือ N_2 ซึ่งเป็น 3rd Collision partner ช่วงเวลาสำหรับการเกิดปฏิริยานี้อยู่ในย่าน 1-2 μs แต่ข้อควรระวังคือ ในช่วงเวลาสั้น ๆ นี้เอง สามารถเกิดปฏิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการผลิตด้วยเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ O_3^* คือ โอโซนที่สภาวะถูกกระตุ้นชั่วขณะ ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มของการจับตัวระหว่าง O กับ O_2 จากสมการที่ 3.3 ปฏิกิริยาในสมการที่ 3.4 และ 3.6 เกิดเนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมออกซิเจนอิสระมากเกินไป

จากเส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าย่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ 493.2 KJ/mol ถึง 682.8 KJ/mol [2]



รูปที่ 3.1 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน [2]

จากสมการของแวนเดอวาล์

$$\left[P + \frac{a}{V^2}\right][V - b] = Rt$$

P = ความดันบรรยากาศ (mm.Hg)

V = ปริมาตรอากาศ ($m^3/Kmol$)

R = เลขอาโวกาโดร์ (8314.3 Pascal, $m^3/kmol K$)

T = อุณหภูมิ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการได้ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error) เมื่อแปลงขนาดหน่วยโมลไปสู่ ปริมาตรตามหลักการทางเคมีได้อย่างถูกต้อง จะได้ [7]

$$1 \text{ โมล} = 0.02455 \text{ m}^3$$

จากเส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน [2] ในการสลายพันธะของออกซิเจน ออกเป็น O_3 ต้องใช้พลังงาน 493.2 kJ/mol ถึง 682.8 kJ/mol

$$\text{จาก } 3.6 \times 10^3 \text{ J} = 1 \text{ Wh}$$

เพราะฉะนั้นในการสลายพันธะออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ (O) ต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น

$$137 \text{ Wh/mol ถึง } 189.67 \text{ Wh/mol}$$

$$\text{จาก } 1 \text{ โมล} = 0.02455 \text{ m}^3$$

เพราะฉะนั้นในการสลายพันธะออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ (O) ต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น

$$5.5804 \text{ K Wh/m}^3 \text{ ถึง } 7.7258 \text{ K Wh/m}^3$$

แต่เนื่องจากอากาศมีปริมาณออกซิเจนประมาณ 20.95 %

เพราะฉะนั้นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น 1.619 K Wh/m^3 ถึง 1.6185 K Wh/m^3

จึงเพียงพอต่อการเกิดไอออนในแก๊ปอากาศ

$$\text{จาก } W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV$$

$$\text{จะได้ } E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon V}}$$

$$\text{จาก } W = 1.619 \times 10^3 \times V \times 10^{-6} \text{ Wh} ; V = \text{ปริมาตรของอากาศ หน่วย cm}^3$$

$$\text{และ } \epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$$

$$E = \sqrt{\frac{1.619 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-6}}{8.854 \times 10^{-12}}}$$

$$= 16.25 \text{ kV/cm}$$

$$\text{และ จาก } W = 1.6185 \times 10^3 \times V \times 10^{-6} \text{ Wh}$$

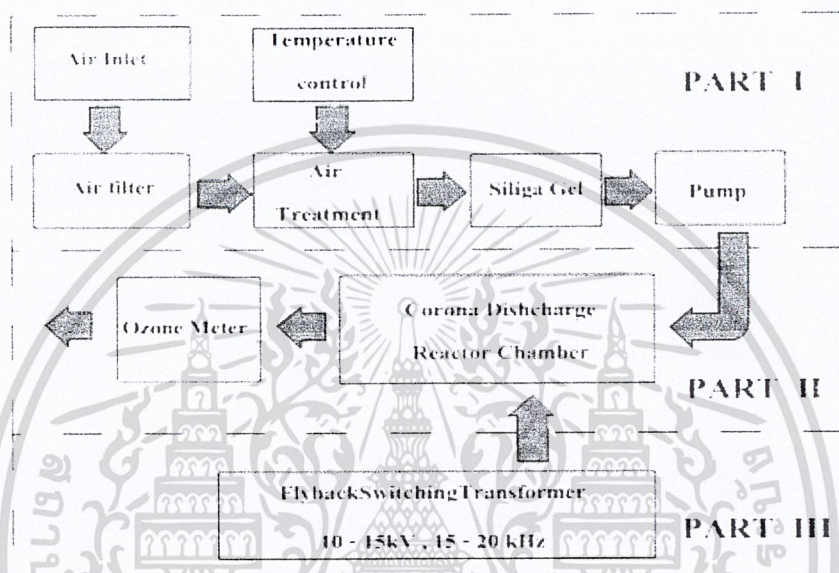
$$E = \sqrt{\frac{1.6185 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-6}}{8.854 \times 10^{-12}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นต้องใช้สนามไฟฟ้า 16.25 kV/cm ถึง 19.12 kV/cm

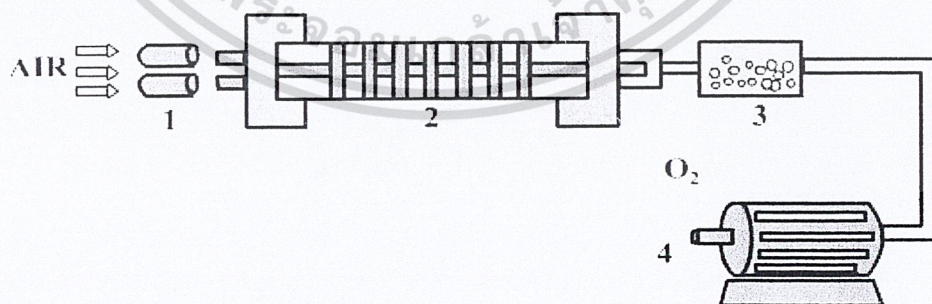
3.2 การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน

ในส่วนของเครื่องผลิตโอโซนแบ่งเป็น 3 ชุด คือ การออกแบบระบบ การเตรียมอากาศแห้ง ส่วนที่สองคือการออกแบบสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูงความถี่สูง และส่วนที่สามคือการออกแบบชุดหลอดผลิตโอโซน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องผลิตโอโซน [6]

3.3 ระบบเตรียมอากาศแห้ง



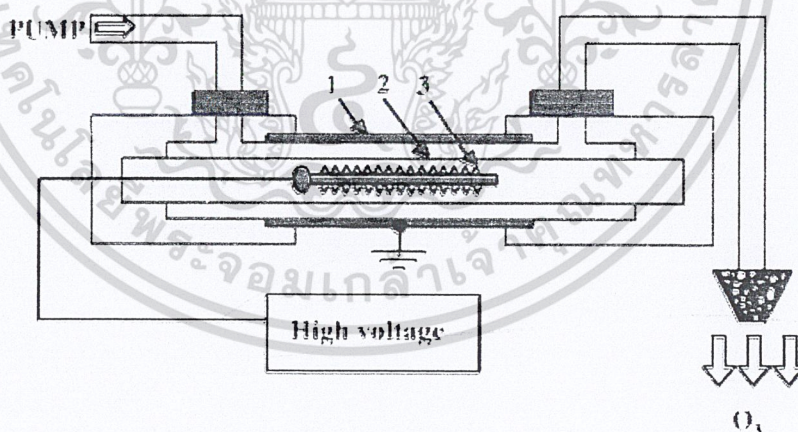
รูปที่ 3.3 ระบบเตรียมอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Air Filter
2. Heater 220 V / 500 W
3. Silica gel
4. Air pump 2 L / min

การออกแบบระบบเตรียมอากาศแห้งเพื่อกำจัดฝุ่นละออง ความชื้นที่มีมากับอากาศ เนื่องจากทั้งสองอย่างนี้มีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นรวมถึงควบคุมอุณหภูมิของอากาศเพื่อทำให้อุณหภูมิที่ได้มีปริมาณที่คงที่ โดยการทำงานเริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านอุปกรณ์กรองอากาศ (Air Filter) เพื่อกำจัดฝุ่นและให้อากาศไหลผ่านขดลวดทำความร้อนขนาด 220V/ 500W ที่อยู่ภายในท่อสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร โดยการควบคุมให้อากาศไหลผ่านท่อสแตนเลส มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยการควบคุมด้วยเทอร์โมสตัทท์ ในการควบคุมการตัดการทำงานของขดลวดทำความร้อนเมื่อมีอุณหภูมิถึงระดับที่ได้กำหนดไว้ เทอร์โมสตัทท์จะตัดวงจรการทำงาน จากนั้นอากาศจะไหลผ่านซิลิกาเจล ซึ่งซิลิกาเจลจะทำหน้าที่ดูดความชื้น เมื่อผ่านมาถึงจุดนี้เราจะได้อากาศที่มีอุณหภูมิคงที่และไม่มี ความชื้น และได้อากาศที่มีอัตราการไหลคงที่ เนื่องจากได้ป้อนอากาศด้วยปั๊มอากาศที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ในการดูดอากาศซึ่งอากาศที่ได้จากระบบเตรียมอากาศแห้งจะถูกส่งผ่านท่อซิลิโคนไปยังชุดผลิตโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จ

3.4 การออกแบบชุดหลอดผลิตโอโซน



รูปที่ 3.4 หลอดผลิตโอโซน

ชุด OZONE GENERATOR ประกอบด้วย

1. STAINLESS STEEL
2. GLASS DIELECTRIC
3. BRUSH ELCTRODES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

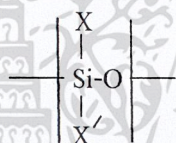
ในการออกแบบชุดหลอดผลิตโอโซน ใช้การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม แต่การออกแบบจะต้องคำนึงถึงวัสดุที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม และที่สำคัญต้องคำนึงถึงขนาดที่มีใช้ในอุตสาหกรรม วัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างชุดหลอดผลิตโอโซนคือ แก้ว และสแตนเลส เมื่อเลือกวัสดุได้แล้วจึงนำมาคำนวณเพื่อออกแบบให้เข้ากับวัสดุที่ได้เลือกมาใช้

วัสดุที่เลือกได้

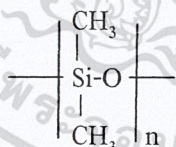
- แก้ว [7] เพราะแก้วเป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติก ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ ทนความร้อนได้สูง ประกอบด้วยออกไซด์ SiO_2 ที่ซับซ้อน ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ (ϵ_r) อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 9 มีค่าพลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริก 0.005 – 0.01 จะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนไฟฟ้า 3000 ถึง 5000 kV/cm และลดลงเหลือครึ่งหนึ่งที่อุณหภูมิ 100°C

- สแตนเลส เพราะ สแตนเลสสามารถทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี

- ยางซิลิโคน ซิลิกอนอะตอมมีวาเลนซ์ 4 คล้ายกับคาร์บอนอะตอมจึงสามารถเกิดพอลิเมอร์ได้โดยใช้พันธะโคเวเลนต์ ซิลิโคน พอลิเมอร์ มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็น



เมื่อ x และ x' อาจเป็นอะตอมของ ไฮโดรเจน หรือหมู่ธาตุ เช่น หมู่เมทิล (CH_3) หรือหมู่ฟีนิล (C_6H_5) ที่เรียกว่าพอลิเมอร์ ซิลิโคน หรือซิลิโคนนั้นถือเอาซิลิกอนและออกซิเจนในโครงสร้างเป็นหลัก ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ที่ธรรมดาที่สุดในบรรดาสิลิโคนอีลาสโตเมอร์ทั้งหลายคือ พอลิไดเมทิล (polydimethyl siloxane) โดยที่ x' และ x เป็นหมู่เมทิล ดังสูตร



พอลิเมอร์สามารถเกิด cross - link ได้ที่อุณหภูมิห้องด้วยการเติมอินซิเอเตอร์ (initiator) เช่น เป็นโซลิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่เมทิลทั้งสองด้วยการให้แก๊สไฮโดรเจนออกมา เกิดเป็นตัวเชื่อม $\text{Si-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Si}$ ซิลิโคนตัวอื่นๆ สามารถบ่มให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ($50\text{-}150^\circ\text{C}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการใช้ ยางซิลิโคนมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (-100 ถึง 250°C) ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ยางซิลิโคนใช้สำหรับทำซีล แหวน ปะเก็น ฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

- Teflon มีความทนต่อการสึกหรอ ความถี่สูง และใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง

- Superlene-ultra high ใช้ในงานที่ต้องการความถี่สูง เหนียว และทนต่อการเสียดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้เลือกใช้ Superlene-ultra high มาเป็นฝาครอบกระบอกผลิตโอโซนเนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่ายกว่าแต่ในความเป็นจริงแล้วควรใช้ Teflon เพราะทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่า superlene-ultra high

3.4.1 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม [4],[5]

การออกแบบอิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมพิจารณาจากการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Option dimension) ของรัศมี r_1 และ r_2 แต่การออกแบบเครื่องผลิตโอโซนจะได้หลักการคือ ต้องการได้แรงดันต่ำ (V_0 ซึ่งคือ V_i) เพื่อสร้างความเครียดสูง (E_c) จนเพียงพอทำให้อากาศแตกตัว สิ่งที่เป็นเงื่อนไขคงตัวในการออกแบบคือรัศมีทรงกระบอกนอก (r_3) เนื่องจากทรงกระบอกรอบนอกที่กรวดทำจากท่อสแตนเลส ซึ่งมีความจำกัดในด้านขนาดที่มีผลิตในทางอุตสาหกรรม การเลือกมิติของทรงกระบอก จะต้องคำนึงถึงการออกแบบฉนวน 2 ชั้นด้วย จึงต้องเลือกทรงกระบอกนอก ฉนวนของแข็งและทรงกระบอกในที่เหมาะสมกัน ให้มีความกว้างของช่องอากาศมากกว่า 1 mm. เล็กน้อยในขณะเดียวกัน ต้องให้ย่านความเครียดที่ตกคร่อมบริเวณช่องว่างอากาศมีค่าสูงด้วย

3.4.2 การกระจายของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่ออกแบบ

วิธีที่ใช้ในการออกแบบคือนำฉนวน 2 ชั้น ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกันมาเพิ่มค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณฉนวนที่มีค่าคงที่ต่ำกว่าให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติ [7] ซึ่งการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าในฉนวนเราสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{rx} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{r_x \epsilon_x \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \quad (3.7)$$

กำหนดให้

E_{rx} = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง X หน่วย kV/cm.

ϵ_x = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนในชั้นของฉนวนที่ต้องการ

ϵ_1 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแก้ว

ϵ_2 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ

V = แรงดันไฟฟ้า (a.c.) หน่วย Volt

r_x = รัศมี X หน่วย mm.

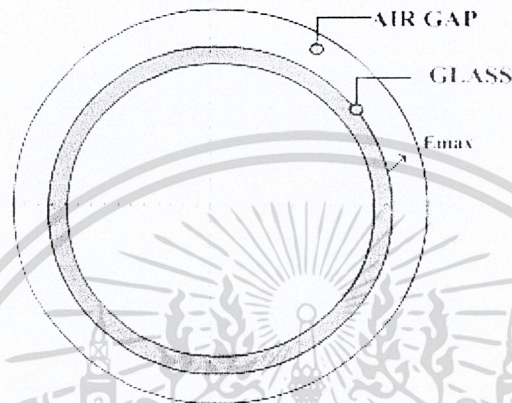
r_1 = รัศมีของแก้ว (วงใน) หน่วย mm.

r_2 = รัศมีของแก้ว (วงนอก) หน่วย mm.

r_3 = รัศมีของสแตนเลส (วงใน) หน่วย mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบคำนึงถึงวัสดุที่มีอยู่ มาคำนวณ เพื่อทำการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยหลักการไฟฟ้าแรงสูงภายใน เพื่อให้ง่ายต่อการหาวัสดุมาให้ตรงกับที่เราคำนวณได้โดยกำหนดให้ อิเล็กโตรดมีรัศมีภายใน 1.2 cm. รัศมีภายนอก 1.485 cm. ความหนาของฉนวนแข็ง 0.1 cm. ความหนาของฉนวนอากาศ 0.185 cm. ฉนวนของแข็งที่ใช้คือแก้ว ($\epsilon_r = 9$)



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งความเครียดสนามไฟฟ้า

อิเล็กโตรด ($D_1 = 2.4$ cm. , $D_2 = 2.6$ cm. , $D_3 = 2.97$ cm.) ยาว 29.5 cm.

ปริมาตรอากาศภายในแก๊ปคือ $\pi(r_3^2 - r_2^2) \times L = \pi(1.485^2 - 1.3^2) \times 29.5$
 $= 47.74$ cm³

ย่านพลังงาน $1.169 \times 10^3 \times 47.74 \times 10^{-6} = 0.0558$ W-h

ถึง $1.6185 \times 10^3 \times 47.74 \times 10^{-6} = 0.07726$ W-h

จาก
$$E_{rx} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{r_x \epsilon_x \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]}$$

ถ้า $E_{MAX} = 16.25$ kV/cm

$$V = \frac{E_r 2r_2 \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]}{\epsilon_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{(16.25 \times 10^3)(1.3) \left[9 \ln \frac{1.489}{1.3} + \ln \frac{1.3}{1.2} \right]}{9}$$

$$= 2.998 \text{ kV/cm}$$

ถ้า $E_{\text{MAX}} = 19.12 \text{ kV/cm}$

$$= \frac{(19.12 \times 10^3)(1.3) \left[9 \ln \frac{1.489}{1.3} + \ln \frac{1.3}{1.2} \right]}{9}$$

$$= 3.528 \text{ kV/cm}$$

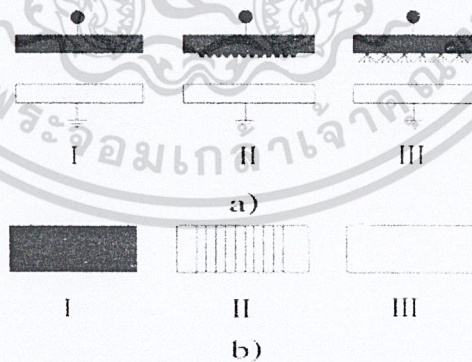
ดังนั้นย่านแรงดันที่อยู่ในย่านการผลิตคือ 2.998 kV ถึง 3.528 kV

ย่านกระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ 16.25 kV/cm ถึง 19.12 kV/cm

ย่านพลังงานคือ 0.0558 Wh ถึง 0.07726 Wh

3.5 การเลือกประเภทของ BRUSH ELECTRODES [7]

จากการศึกษา [7] ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการผลิตโอโซน ในรูปแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบ ตามชนิดของสนามไฟฟ้าที่เกิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (III) ในรูปที่ 3.6

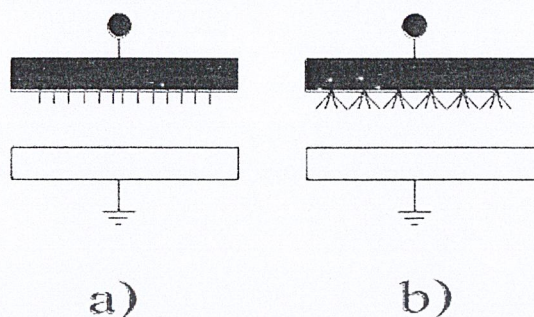


รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (III)

a) แผงอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดในมุมมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ b) แผงอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดในมุมมองจากด้านบน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่ารูปร่างอิเล็กโทรดที่เป็นระนาบขนานกันลักษณะคาโอดแบบปลายแหลมให้ผลผลิตสูงสุด และจากการทดลอง [7] การใช้ชุดอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมเดี่ยว และแบบกลุ่มปลายแหลม



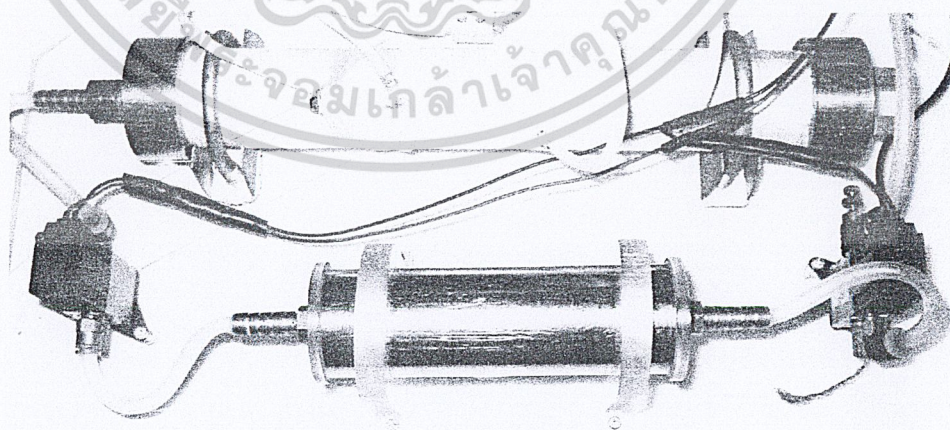
รูปที่ 3.7 ชุดอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมกับระนาบ

พบว่าลักษณะชุดอิเล็กโทรดแบบกลุ่มปลายแหลมจะให้ผลการผลิตโอโซนได้ในปริมาณที่มากกว่าในระดับแรงดันเดียวกันจึงตัดสินใจเลือก **BRUSH ELECTRODES** แบบกลุ่มปลายแหลม

3.6 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดโอโซน

จากทฤษฎีที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.1 และการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2 - 3.5 ทำให้ได้ส่วนของเครื่องกำเนิดโอโซนดังนี้

3.6.1 ชุดเตรียมอากาศแห้ง

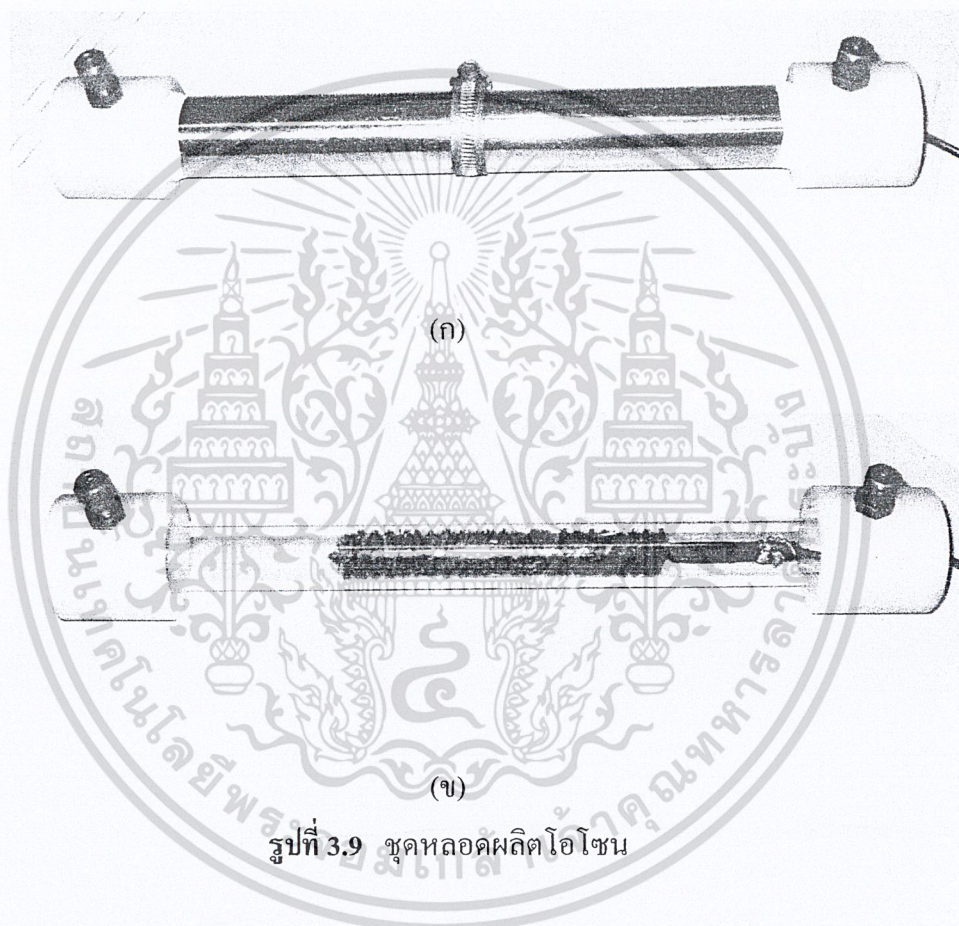


รูปที่ 3.8 ชุดเตรียมอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ท่อสแตนเลส รัศมี = 3.5 cm
2. ฮีตเตอร์ (heater) 220 V / 500 W
3. ซิลิกาเยล
4. ป้อนขนาด 2 ลิตร ต่อ นาที
5. โซลินอยวาล์ว

3.6.2 ชุดหลอดผลิตไอโซน



รูปที่ 3.9 ชุดหลอดผลิตไอโซน

1. อิเล็กโตรดทรงกระบอกกรวดทำจากสแตนเลส รัศมี $r_3 = 1.45$ cm
2. อิเล็กโตรดปลายแหลมที่เป็นฉนวนแก้วหนา 2.2 mm. รัศมีวงนอก $r_2 = 1.3$ cm รัศมีวงใน $r_1 = 1.08$
3. ระยะแกปอากาศ = 0.15 cm
4. ความยาว = 29.5cm
5. ฉนวนของแข็งเป็นแก้ว
6. ท่อนำก๊าซเป็นท่อซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

4.1 กล่าวนำ

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายเป็นแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันแบบหนึ่ง สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายมีขนาดของหม้อแปลงเล็ก มีประสิทธิภาพสูง และมีน้ำหนักเบา เริ่มเข้ามามีบทบาทมากในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภท ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟที่ให้กำลังงานได้สูงและมีขนาดเล็กด้วย

วงจรที่มีการตัดตอนแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงๆ นั้นอาจเรียกกันว่า “วงจรชอปเปอร์” (Chopper) คอนเวอร์เตอร์ก็มีการทำงานในลักษณะตัดต่อกระแสและแรงดันในวงจร เพื่อให้เกิดการถ่ายเทพลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ และคงค่าแรงดันได้ตามต้องการจึงอาจพบเห็นการเรียก “คอนเวอร์เตอร์” ว่า “ชอปเปอร์” ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม คำว่า “ชอปเปอร์” จะไม่เป็นที่นิยมนัก

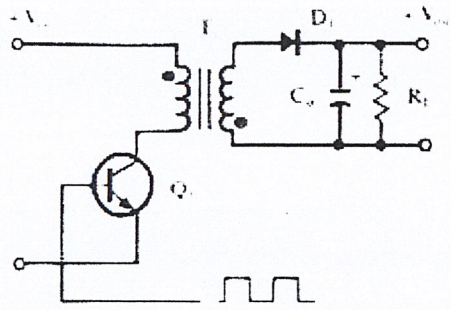
คอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่จะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่สวิตช์ เพื่อตัดต่อกระแสในวงจรและเป็นการตัดต่อที่มีความถี่ในการตัดต่อสูงตั้งแต่ 20-200 กิโลเฮิร์ตซ์ การที่จะทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ในลักษณะเช่นนี้จำเป็นต้องให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแสได้อย่างเต็มที่ในสถานะอิ่มตัว (“ON”) และหยุดกระแสไบแอสเพื่อให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส (“OFF”) สลับกันไป คอนเวอร์เตอร์อาจมีการจัดวางเพื่อให้ไบแอสและหยุดไบแอสได้ด้วยตัวของมันเองโดยไม่ต้องพึ่งวงจรออสซิลเลเตอร์ และจะเรียกคอนเวอร์เตอร์ในลักษณะนี้ว่า “เซลล์ออสซิลเลตติ้ง คอนเวอร์เตอร์” (Self Oscillating Converter) หรือ เรียกสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบนี้ว่า “เซลล์ออสซิลเลตติ้ง เพาเวอร์ซัพพลาย” (Self Oscillating Power Supply : SOPS) การจัดคอนเวอร์เตอร์ให้เกิดเซลล์ออสซิลเลตติ้งจะทำให้คอนเวอร์เตอร์มีราคาถูก และสามารถใช้งานได้ดีสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่ต้องจ่ายกำลังสูงนัก จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก

คอนเวอร์เตอร์มีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายในซึ่งมีหลายแบบ คือ

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly back Converter)
2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
3. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-pull Converter)
4. ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-Bridge Converter)
5. ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

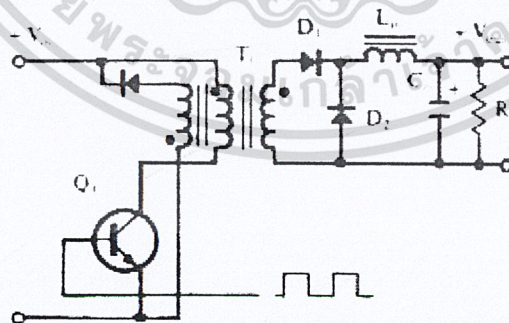
4.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



จากรูปเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็นสวิตช์ และจะนำกระแสตามคำสั่งของพัลส์ที่เปลี่ยนที่ป้อนให้เข้ากับขาเบส เนื่องจากหม้อแปลง T1 จะกำหนดขดไฟรมารีและเซคันดารีให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส จึงมีการสะสมพลังงานที่ขดไฟรมารีของหม้อแปลง T1 แทน เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส สนามแม่เหล็ก T1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วแรงดันที่ขดไฟรมารีและเซคันดารี และมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และโหลดได้ ค่าของแรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่การทำงานของ Q_1 ช่วงเวลานำกระแสของ Q_1 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงและค่าของแรงดันที่อินพุต

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนักโดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ และให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI/EMI ค่อนข้างสูงแต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย และมีราคาถูก

4.1.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

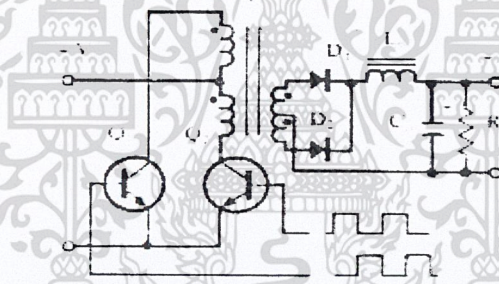


ในรูปจะเห็นได้ว่าฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ มีลักษณะใกล้เคียงกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่หม้อแปลง T1 ในฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์จะกำหนดขดไฟรมารีและเซคันดารีให้มีเฟสตรงกัน ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง แต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกเอกซาร์นเป็นเอกซาร์นที่สวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบแอสกลับและไม่นำกระแส กระแสจึงไหลผ่านไดโอด D_1 และ ตัวเหนี่ยวนำ L_0 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และไหลกลับ ขณะที่มีการกระแสไหลผ่าน L_0 จะมีการสะสมพลังงานไว้ในตัวมันด้วยเมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับจึงไม่มีกระแสไหลจากขดเซคันดารีสนามแม่เหล็กใน L_0 จะยุบตัวทำให้มีการกลับขั้วแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันอยู่ไดโอด D_2 ก็จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง L_0 จะถ่ายเทพลังงานออกมาทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวมันและ D_2 ออกไปยังโหลดได้ จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงที่ Q_1 นำกระแส และหยุดนำกระแสทำให้มีการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาต์พุตต่ำกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟอร์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกันกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่า อย่างไรก็ตามกับอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้ฟอร์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์นั้นมีราคาสูงกว่า

4.1.3 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

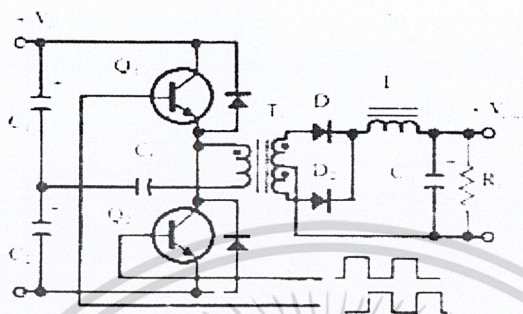


พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังงาน ได้สูงตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไป แต่มีข้อเสียคือ มักเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลงซึ่งจะมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่าย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมกระแสจะทำให้ลดปัญหานี้ลงได้ ดังนั้น พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จึงเห็นคอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังงานสูงๆ

จากรูป Q_1 และ Q_2 จะสลับกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลาการทำงานเมื่อ Q_1 นำกระแส D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ แต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง และนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้ เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส Q_2 จะเริ่มนำกระแส D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ และ D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง และนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้เช่นเดียวกัน ดังนั้น โหลดจึงมีกระแสไหลต่อเนื่องได้ตลอดเวลา กระแสที่ได้ทางเอาต์พุตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงค่อนข้างเรียบอย่างไรก็ตาม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการสร้าง พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์เช่นกัน

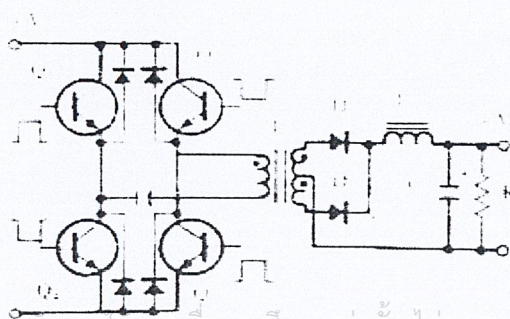
4.1.4 ฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์



ฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ในตระกูลเดียวกับพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ และให้กำลังงานได้ค่อนข้างสูง ข้อดีของฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ก็คือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะไม่นำกระแสต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว และลดการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ได้

จากรูปจะเห็นได้ว่าหากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส ค่าแรงดัน ตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวที่เหลือจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้นเมื่อ Q_1 และ Q_2 สลับกันนำกระแส ผลที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับการทำงานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงานของขดไพรมารีจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุตเนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เพื่อแบ่งครึ่งแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารีจึงมีค่าสูง ซึ่งเป็นการจำกัดกำลังงานสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ โดยกำลังงานสูงสุดที่ฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์

4.1.5 ฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์



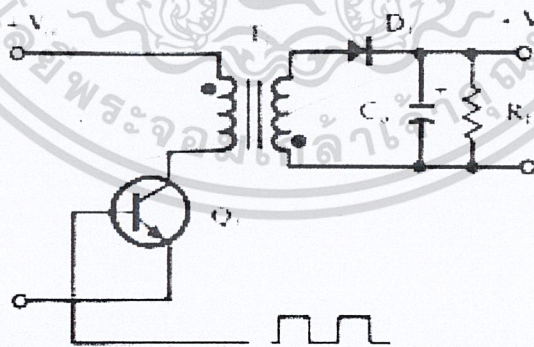
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่จะเห็นได้ว่ามีเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรทั้งหมดถึง 4 ตัว แต่จะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ โดย Q_1 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_4 และ Q_2 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_3 กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารีของหม้อแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ ฮาล์ฟ-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ แต่ข้อได้เปรียบของฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ก็คือ ขณะทำงานที่ขดไพรมารีจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับค่าแรงดันอินพุตกระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารีจึงมีค่าต่ำกว่า ฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์จึงสามารถจ่ายกำลังงานได้สูงกว่า ดังนั้น สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังงานสูงๆ ตั้งแต่ 500 วัตต์ ถึง 1000 วัตต์ จึงมักนิยมใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์เป็นหลัก

4.2 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

4.2.1 พื้นฐานการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 การทำงานของวงจรจะเห็นดังนี้ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานโดยนำกระแส (ON) และหยุดนำกระแส (OFF) สลับกันไป เมื่อ Q_1 นำกระแส จะมีกระแสไหลผ่านขดไพรมารี (I_p) แต่เนื่องจากหม้อแปลงถูกกำหนดให้ขดไพรมารีและขดเซคันดารีพันอยู่ในลักษณะกลับทิศทาง ดังนั้นในขณะที่ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด R_L พลังงานจึงถูกสะสมอยู่ที่ขดไพรมารีของหม้อแปลง เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงยุบตัว ทำให้มีการกลับขั้วของแรงดันที่ขดเซคันดารี ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่ถูกสะสมไว้ที่ขดไพรมารีจะถูกถ่ายเทไปยังขดเซคันดารี และมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลดและตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ได้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวงจรทำงานอยู่ในสถานะคงที่ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามสมการ

$$V_{OUT} = \frac{t_{on} \times (N_s / N_p)(V_{in} - V_{CE(SAT)})}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (4.1)$$

โดยที่	T	คือ	คาบเวลาการทำงานของ Q1 เป็นวินาที
	T _{ON}	คือ	ช่วงเวลาที่ Q1 นำกระแส เป็น วินาที
	N _p	คือ	จำนวนรอบของขดไฟรมารี่ เป็นรอบ
	N _s	คือ	จำนวนรอบของขดเซคันดารี เป็นรอบ
	V _{OUT}	คือ	แรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็น โวลต์
	V _{IN}	คือ	แรงดันที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็น โวลต์
	V _{CE}	คือ	แรงดันตกคร่อม Q1 ขณะนำกระแสที่จุดอิมิตัว เป็น โวลต์
	V _D	คือ	แรงดันตกคร่อม ไดโอด D1 ขณะนำกระแส เป็น โวลต์

จะเห็นได้ว่า วงจรจะสามารถลดค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการเพิ่มหรือลดช่วงเวลานำกระแส (T_{ON}) ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q₁ เท่านั้น ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดก็ตาม

4.2.2 ลักษณะกระแสและแรงดันภายในวงจร

กระแสที่ไหลผ่าน Q₁ และขดไฟรมารี่ ขณะที่ Q₁ นำกระแส นั้น จะเป็นลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะนำไปตามสมการ

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L} \quad (4.2)$$

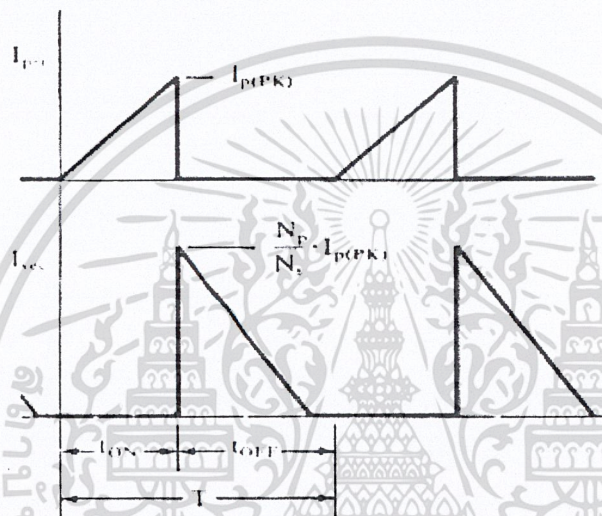
ดังนั้น กระแส I_p จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีค่าสูงสุดเมื่อ Q₁ เริ่มหยุดนำกระแสที่เวลา t = t_{on} ดังนั้นกระแสสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{P(PK)} = \frac{(V_{in} - V_{CE(SAT)})}{L_p} t_{ON} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

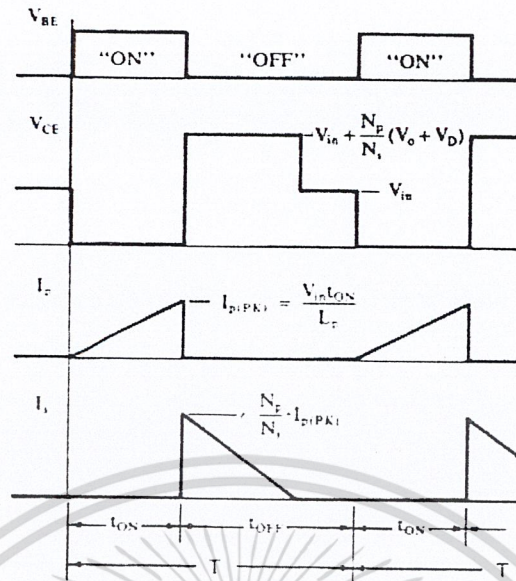
โดยที่ $I_{P(PK)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดไพรมารี เป็น แอมป์
 L_P คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดไพรมารี เป็น แอมป์

เมื่อ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแสเซคันดารีจะเริ่มมีกระแสไหลที่ตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใดไม่ได้ กระแสที่ขดเซคันดารี (I_S) จะต้องเริ่มต้นที่ค่าสูงสุดของกระแสที่ขดไพรมารี $I_{P(PK)}$ โดยมีค่าเป็นสัดส่วนตามอัตราส่วนจำนวนรอบ N_P/N_S ดังนั้นกระแสที่ขดเซคันดารีจะมีค่าเริ่มต้นที่ $I_S = (N_P/N_S)I_{P(PK)}$ และมีค่าลดลงตามเวลาลักษณะของกระแสที่ขดไพรมารีและเซคันดารีตามเวลาจะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของกระแสที่ขดไพรมารีและเซคันดารีขณะวงจรทำงาน

เมื่อมีกระแสไหลที่ขดเซคันดารีในขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดไพรมารีด้วย เนื่องจากแรงดันตกคร่อมของเซคันดารีมีค่าเท่ากับ $V_{OUT} + V_D$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารีจึงมีค่าเท่ากับ $(N_P/N_S)(V_{OUT} + V_D)$ ทำให้แรงดันตกคร่อม Q_1 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเป็น $V_{IN} + (N_P/N_S)(V_{OUT} + V_D)$ จนกระทั่งกระแสที่ไหลในขดเซคันดารีมีค่าลดลงเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อม Q_1 จึงลดลงมามีค่าเท่าแรงดันอินพุต V_{IN} ในรูปที่ 4.4 จะแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เตอร์ขณะทำงาน



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

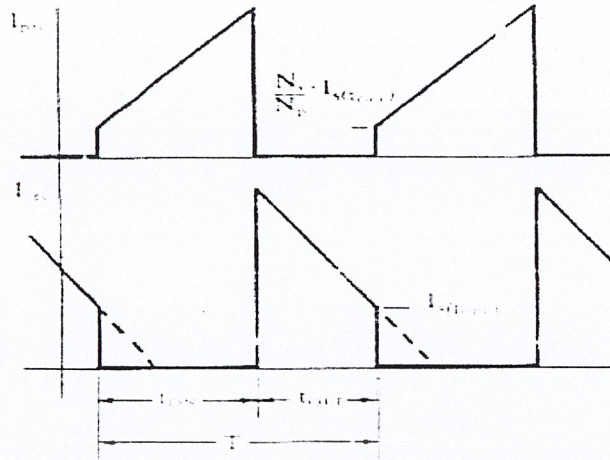
4.2.3 การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

4.2.3.1 โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Mode)

เราจะกล่าวว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ มีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องก็ต่อเมื่อในขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแสพลังงานที่ถูกสะสมไว้ในขดไฟโพรมารีถูกถ่ายเทออกไปยังขดเซคคันดารีจนหมด กล่าวคือกระแสที่เหลือในขดเซคคันดารีมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ก่อนที่ Q_1 จะเริ่มนำกระแสอีกครั้ง (คือลักษณะของกระแสในรูปที่ 4.3)

4.2.3.2 โหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode)

จากรูปที่ 4.3 ถ้าคาบเวลา T มีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ของ Q_1 ให้มากขึ้น ช่วงเวลาหยุดนำกระแส t_{OFF} ก็จะมีค่าน้อยลงและกระแสสูงสุดที่ขดไฟโพรมารีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาไปด้วย แต่เนื่องจากช่วงเวลาหยุดนำกระแส t_{OFF} มีค่าน้อย กระแสที่ขดเซคคันดารีไม่สามารถลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ได้ทันเวลาภายในช่วงเวลา t_{OFF} จึงยังมีพลังงานบางส่วนเหลือค้างอยู่ในขดไฟโพรมารี และเนื่องจากกระแสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด เมื่อ Q_1 เริ่มนำกระแสอีกครั้งกระแสที่ขดไฟโพรมารีจึงต้องเริ่มต้นด้วยค่าของกระแสขดเซคคันดารีสุดท้ายที่ลดลงได้ คุณด้วยอัตราส่วน จำนวนรอบ N_S/N_P (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ) การทำงานในลักษณะนี้เราจะเรียกว่า เอกสการ์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของกระแสเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

4.3 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ในทางปฏิบัติจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่สวิตช์ ในวงจรแต่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เมื่อนำมาใช้เป็นสวิตช์จะมีข้อแตกต่างจากสวิตช์ในอุดมคติ กล่าวคือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนสถานะของตัวมันไปกลั้นำกระแส (turn on) และหยุดนำกระแส (turn off) รวมทั้งเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ยังมีแรงดันตกคร่อมตัวมันขณะนำกระแสอีกด้วย การเปลี่ยนสถานะและแรงดันตกคร่อมในขณะนำกระแสจะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อน (Power Dissipation) ขึ้นในตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ การทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแสในลักษณะสวิตช์จะต้องขยับนำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว (saturation) เพื่อให้นำกระแสได้อย่างเต็มที่ ด้วยการให้กระแสไบแอสที่เหมาะสมเข้าที่ขาเบสในกรณีที่ใช้ไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ และให้แรงดันไบแอสที่เหมาะสมที่ขาเกตและชาจอร์สในกรณีที่ใช้เพาเวอร์มอสเฟต

4.3.1 การเลือกใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์พื้นฐานของทรานซิสเตอร์สำหรับการออกแบบ converter คือ

1. ความสามารถในการทนแรงดันขณะเปิดวงจร
2. ความสามารถในการทนกระแสขณะปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

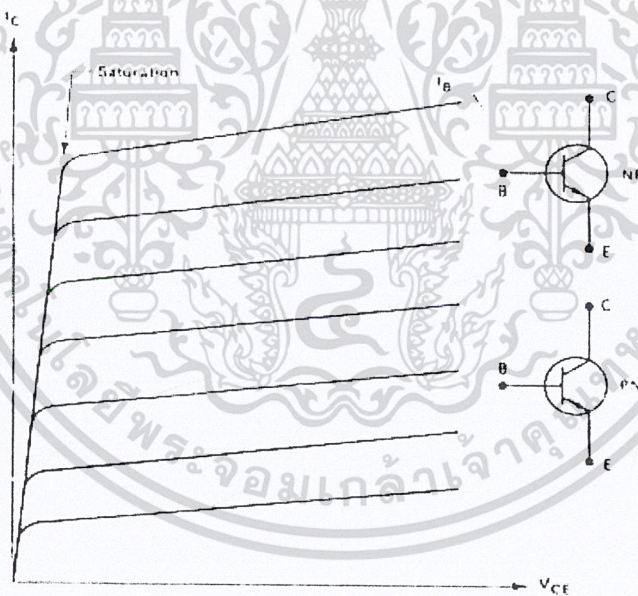
ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้กระแสในการจับเบสเพื่อควบคุมจำนวนการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์ โดยจำนวนการไหลของกระแสจะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสทรานซิสเตอร์ตามความสัมพันธ์

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (4.4)$$

เมื่อ I_c คือ กระแสคอลเลกเตอร์, A
 I_b คือ กระแสเบส, A

การทำงานของทรานซิสเตอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 2 สถานะ

1. สถานะเชิงเส้น (Linear) มักใช้ในงานคำนวณวงจรขยาย
2. สถานะอิ่มตัว (Saturation) มักใช้ในงานเป็นสวิตช์ปิด-เปิดวงจร



รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

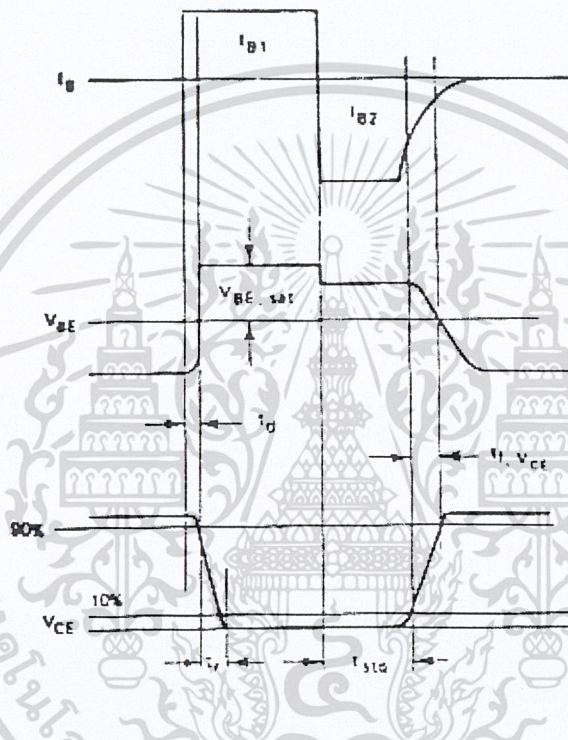
ในรูปที่ 4.6 แสดงกราฟลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสของทรานซิสเตอร์ จากกราฟแสดงถึงบริเวณอิ่มตัว ซึ่ง ณ ที่บริเวณนี้จะพบว่ากระแสเบสจำนวนหนึ่งสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจร (นำกระแสเต็มที่) เกิดกระแสคอลเลกเตอร์จำนวนมากไหลออกผ่าน ในขณะที่แรงดันตกคร่อมคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์มีค่าต่ำมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงแล้วการนำทรานซิสเตอร์มาทำเป็นสวิตช์นั้นสามารถควบคุมได้ที่ ขาเบสของทรานซิสเตอร์ โดยใช้กระแสขั้วที่ขาเบสเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจร และถ้ากลับทิศทางของกระแสเบสก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร

4.3.3 คำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์ (โหลดชนิดความต้านทาน)

พิจารณารูป 4.7 เป็นรูปสัญญาณแรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ (V_{BE}) และคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของทรานซิสเตอร์ NPN โดยควบคุมที่ I_B



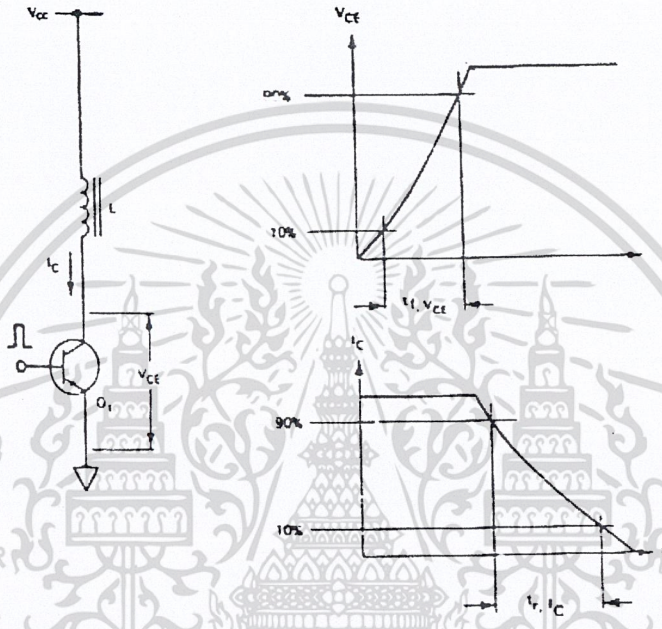
รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของทรานซิสเตอร์สวิตซ์

- เวลาหน่วง (Delay Time, T_d) คือช่วงเวลากจากการจ่ายกระแสเบส I_{B1} ไปยังจุดที่ V_{CE} ตกถึง 90 % ของค่าแรงดันเริ่มต้น
- เวลาของขาขึ้น (Rise Time, T_r) คือช่วงเวลาเมื่อ V_{CE} ตกถึง 10% ของค่าแรงดัน เมื่อ 90%
- เวลาสะสม (Storage Time, T_{stg}) คือช่วงเวลาเริ่มจากการกลับทิศทางของกระแสเป็น ผลทำให้ขนาดของแรงดัน V_{CE} เพิ่มขึ้น 10% ของค่าแรงดันสุดท้ายที่ OFF
- เวลาขอบขาด (Fall Time, T_f, V_{CE}) คือช่วงเวลาเมื่อแรงดัน V_{CE} ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10% จนถึง 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ความสัมพันธ์กับโหลดความเหนี่ยวนำ (Inductive load)

จากที่กล่าวมาแล้วในเรื่องของคำจำกัดความต่างๆ ของช่วงเวลาในการสวิตซ์ชิงของทรานซิสเตอร์ของแรงดัน V_{CE} เมื่อโหลดที่ใช้เป็นความต้านทานอย่างไรก็ดีเมื่อนำทรานซิสเตอร์ไปขับโหลดที่เป็นความเหนี่ยวนำ รูปสัญญาณที่ได้จะย่อมแตกต่างกัน เนื่องจาก คุณสมบัติของความเหนี่ยวนำที่ถึงแม้จะจ่ายแรงดันให้กับความเหนี่ยวนำแล้วก็ตาม กระแสก็ยังไม่สามารถไหลได้ในทันทีทันใด ดังนั้นในช่วงที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร เราจะพบว่าแรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายก่อนที่กระแสจะลดลงดังรูป 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันกับกระแสของทรานซิสเตอร์เมื่อขับ โหลดความเหนี่ยวนำ

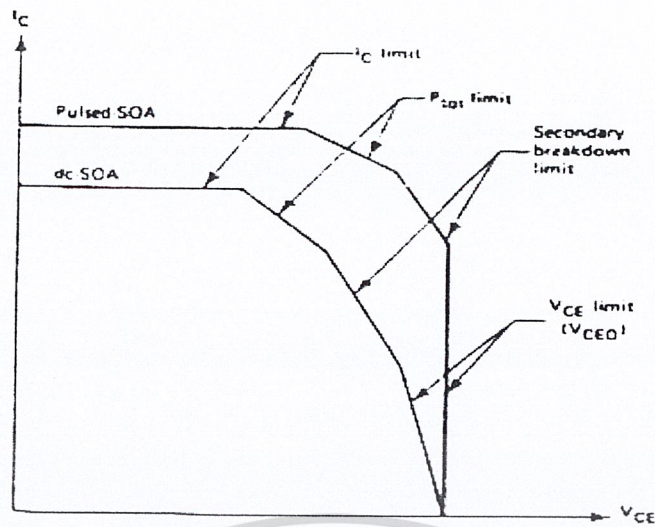
4.3.5 ปรากฏการณ์ Secondary breakdown ของทรานซิสเตอร์

4.3.5.1 Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง

ผู้ออกแบบวงจร Power converter ควรจะต้องพิจารณา และระมัดระวังเกี่ยวกับข้อจำกัดต่างๆของทรานซิสเตอร์สวิตซ์ซึ่งให้รอบคอบเสียก่อน ไม่ว่าจะเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์ปิดหรือเปิด วงจรก็ตาม ปัญหาแรกๆที่ผู้ออกแบบมักพบบ่อยๆ ก็คือ ปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง

โดยปกติแล้วทางโรงงานหรือผู้ผลิตนั้นจะกำหนดกราฟในลักษณะของ พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัย (Safe Operating Area, SOA) ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C กับ แรงดัน V_{CE} รูป 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



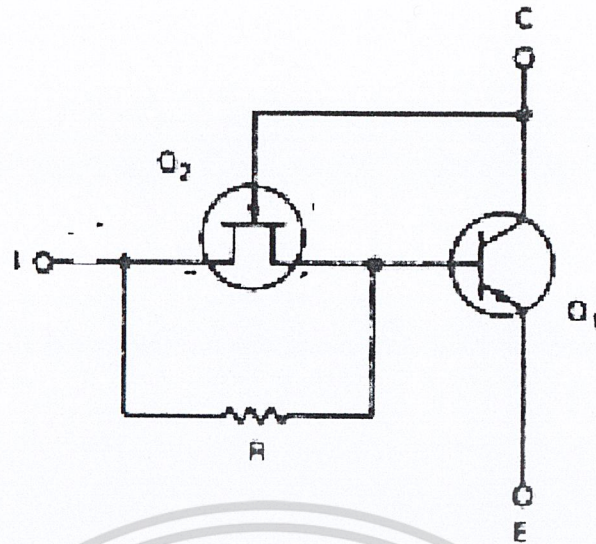
รูปที่ 4.9 แสดง SOA ของทรานซิสเตอร์

ซึ่งพื้นที่ในกราฟนั้นจะบอกให้ผู้ออกแบบทราบว่าขอบเขตในการทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์มีข้อจำกัดสูงสุดในย่านใดบ้าง กราฟนี้จะใช้พิจารณาเมื่อเส้น Load line ขณะได้รับไบแอสตรงอยู่ในพื้นที่ SOA จึงจะปลอดภัย

ปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง ก็จะเกิดผู้ออกแบบกำหนดจุดการทำงานของทรานซิสเตอร์เกิดนอกเหนือจากขอบเขตพื้นที่ SOA ทำให้ความร้อนที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังสูงขึ้น สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (temperature coefficient) ของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์เป็นลบ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดกำลังสูญเสียสูงขึ้นตามจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดัน breakdown ระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์เป็นลบด้วย ถ้าปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ยังไม่มีการแก้ไข จะทำให้รอยต่อระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์พังทลายส่งผลให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีการจำกัด

จากผลเสียที่ได้ของปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรงดังที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้มีผู้คิดค้นวิธีที่จะหลีกเลี่ยงมิให้เกิดขึ้นเช่น โรงงาน National Semiconductor ได้ปรับปรุงขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์ให้สามารถทำงานที่ระดับกำลังงานและ แรงดันคอลเล็กเตอร์ สูงสุดโดยไม่เกิดความเสียหาย ในรูปที่ 4.10 แสดงวงจรรายในของทรานซิสเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การป้องกัน Secondary breakdown โดยต่อ JFET อนุกรมกับเบสของทรานซิสเตอร์

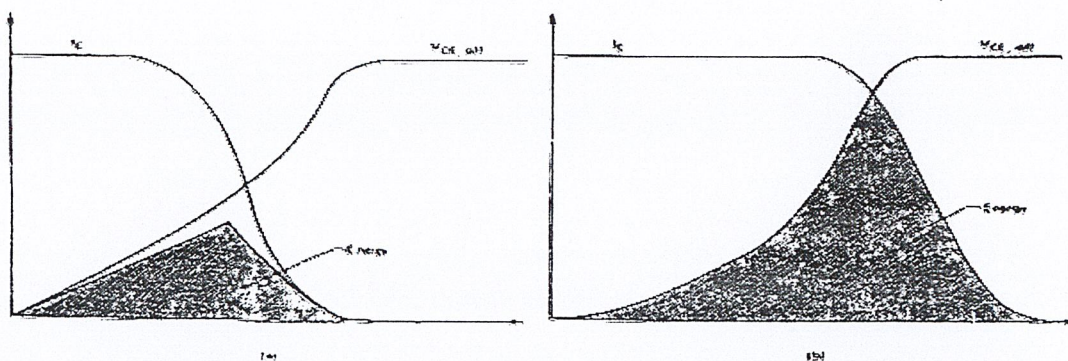
เทคนิคในการแก้ไขนี้จะเพิ่ม JFET อนุกรมกับขาเบสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ โดยที่ JFET จะทำหน้าที่เหมือนกับ ballast resistor ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบส ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะที่ อุณหภูมิที่ตัวทรานซิสเตอร์จึงไม่สูงขึ้น

4.3.5.2 Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในเรื่องช่วงเวลาสะสม และค่าสูญเสียเมื่อนำเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ไปใช้ในงานสวิตช์นั้น ถ้าหากช่วงเวลาสะสมมีค่ามากเกินไปจะทำให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัว เป็นผลให้ยานการเรกกูเลตถูกจำกัดให้แคบลง

สำหรับค่าสูญเสียในการสวิตช์ย่อมจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายทำให้ผู้ออกแบบที่ต้องการแหล่งจ่ายประสิทธิภาพสูง ต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทั้งสองด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์

- เมื่อ โหลดแบบความต้านทาน
- เมื่อ โหลดแบบความเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะสมบัติของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลังที่แรงดันสูง ขณะเปิดวงจรเมื่อใช้กับโหลดความต้านทาน และโหลดความเหนี่ยวนำ สังเกตพบว่เมื่อ โหลดที่ใช้เป็นโหลดความเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดพลังงาน (Energy) สูงกว่า เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทาน (พิจารณาพื้นที่แรเงา แสดงถึงพลังงานที่เกิดขึ้นนั่นเอง) ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary breakdown ได้

กำลังงานขณะเกิด Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ (E_{SB}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{SB} = \frac{1}{2} L_{eff} I^2 C \quad (4.5)$$

เมื่อ

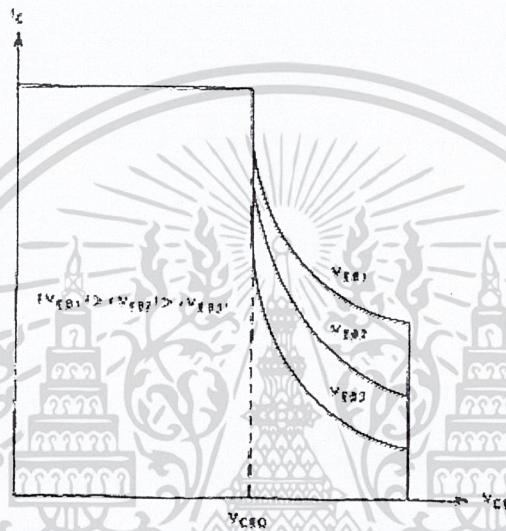
$$L_{eff} = \frac{V_{CEX}}{V_{CEX} - V_{CC}} L \quad (4.6)$$

โดยที่ E_{SB} มีหน่วยเป็นจูล (Joule) ซึ่งในการทดสอบทรานซิสเตอร์จะปลดขาเบสออกหรือเพิ่มความต้านทานขาเบสให้สูงๆ และกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทำงานใกล้กับแรงดัน breakdown, V_{CEX} เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ E_{SB} (E_{SB} จะมีย่านกว้างมากระหว่างมิลลิจูลถึงจูล)

พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ (Reverse-Bias Safe Operating Area, เอกส RBSOA) แสดงในรูป 4.12 คล้ายกับที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของกราฟ SOA สำหรับกราฟค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RBSOA แสดงเมื่อแรงดัน V_{CE} ต่ำกว่าแรงดัน V_{CEO} เป็นพื้นที่ที่ปลอดภัยจากแรงดันไบแอสกลับ V_{EB} แต่ก็ยังถูกจำกัดด้วยอัตราทนกระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ของตัวทรานซิสเตอร์เอง เมื่อใดที่แรงดัน V_{CE} มีค่าสูงเกินกว่าแรงดัน V_{CEO} พบว่ากระแสคอลเล็กเตอร์จะลดลงอย่างสัมพันธ์กับแรงดันไบแอสกลับที่ป้อนเข้าไป

ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าแรงดันไบแอสกลับ V_{EB} ที่มีค่าสูงๆ จะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ขณะเปิดวงจร ผู้ออกแบบมักจะใช้ไดโอด หรือ วงจร snubber (Snubber) เป็นตัวป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าว



รูปที่ 4.12 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA

ย้อนกลับมาพิจารณาวงจรขับเบสอีกครั้ง โดยปกติแล้วกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} นั้นถ้ายังมีค่ามากเท่าใด ก็จะทำให้ช่วงเวลาสะสมน้อยลงเท่านั้น แต่การที่ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับมีค่ามากๆ นั้นย่อมส่งผลอันตรายโดยตรงกับทรานซิสเตอร์ โดยเฉพาะการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ได้ ในทางปฏิบัติแล้วมีวิธีป้องกันมิให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ได้โดย

1. ใช้ค่าแรงดัน V_{CE} ต่ำๆ ขณะที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร
2. ลดกระแสคอลเล็กเตอร์ ขณะที่กระแสคอลเล็กเตอร์เพิ่มขึ้น

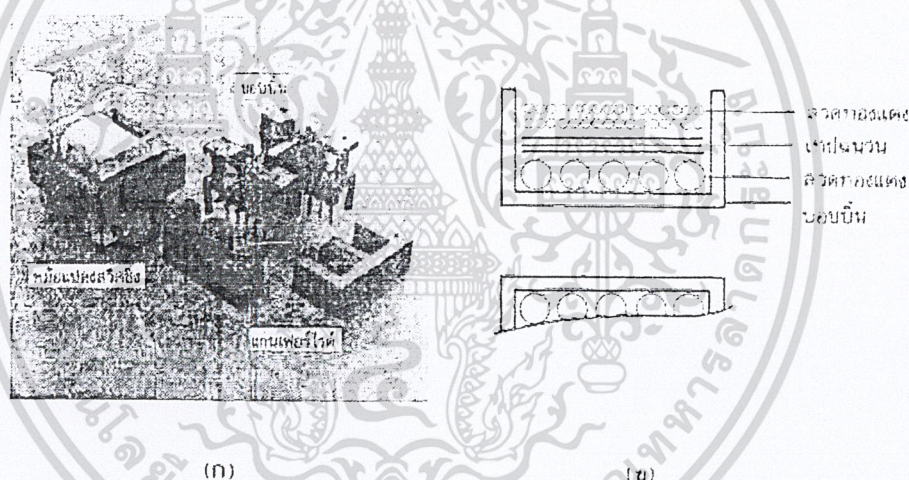
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 หม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิง (Switching Transformer) จัดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ผู้ออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจึงจำเป็นต้องศึกษารูปแบบ ที่เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงสวิตชิง ความเหมาะสมในการใช้งาน การคำนวณขนาดของแกนเฟอร์ไรต์และขนาดขดลวดทองแดง รวมทั้งการกำหนดความปลอดภัยทางไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยและลดกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสวิตชิงขณะทำงาน

4.4.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่หลักในการลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุทของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งอาจมีค่าสูงได้ถึง 310 โวลต์ ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟต่ำที่เอาต์พุต และทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิงแสดงไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงสวิตชิง (ก) และการพันขดลวดทองแดง
อานน้ำยา

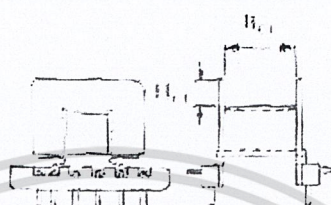
4.4.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทโรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์ จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์จะมีค่าจุดอิ่มตัว ฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณช่วง 3000 ถึง 4000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิงจึงนิยมใช้แกนเป็นเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงสวิตชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกัน

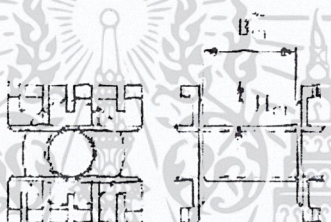
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ หงสิน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 บอบบี้ (Bobbin)

บอบบี้หรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บอบบี้จะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้นและป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ได้ บอบบี้จะมีขนาดมาตรฐานตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ ตัวอย่างขนาดของบอบบี้ดูได้จากรูปที่ 4.14 บอบบี้ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีขาพับลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและบัดกรีติดกับแผ่น PCB



EE Bobbin



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างของบอบบี้

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างขนาดของบอบบี้

CORE TYPE	A_w (cm ²)	B_{CF} (mm)	H_{CF} (mm)	l_{av} (mm)
E 814E250	0.17	6.7	2.1	34.29
E 813E187	0.33	9.3	3.2	36.32
E 813E343	0.36	10.0	3.2	47.50
E 812E250	0.58	10.1	4.9	55.12
E 782E272	0.80	17.3	4.7	55.88
E 375	1.05	16.5	6.6	73.41
E 21	1.14	17.9	6.0	86.36
E 783E608	1.78	26.3	7.1	92.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันลวดทั้ง ไพรมารีและเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตชิงที่มีกำลังไม่สูงมากนัก ปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันแกนบอบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการขนาดของลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้น ขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านขดลวด

4.4.5 เทปฉนวน (Insulation Tape)

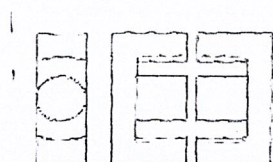
เทปฉนวนที่ใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างนั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิง และมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขด ไพรมารีและขดเซคันดารี ด้วยวัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจจะเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05 – 0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจากหม้อแปลงสวิตชิงเป็นหลัก

4.4.6 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้

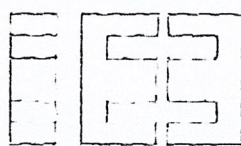
4.4.6.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตชิงโดยทั่วไป จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI, EE, ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะของกลุ่มประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบกับบอบบิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนบอบบิ้นนี้จะทำให้การเดินทางของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ตัวอย่างของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.15

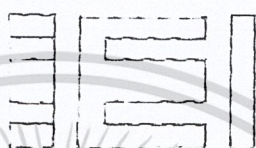
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ETD



EE



EI

รูปที่ 4.15 แสดงแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างขนาดแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ

CORE TYPE	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	V_e (cm ³)	l_e (mm)
ETD 34	0.971	1.220	7.64	78.6
39	1.250	1.740	11.50	92.2
44	1.740	2.130	18.00	103.0
49	2.110	2.710	24.20	114.0

แกนแบบ POT นั้น จะใช้กับหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งที่ไม่ต้องการกำลังสูง (ไม่เกิน 125 วัตต์) และในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวน EMI/RFI ต่ำ เนื่องจากลักษณะรูปทรงของมันสามารถป้องกันการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนได้ดี แต่แกนแบบ POT มีช่องว่างสำหรับให้ขดลวด ลอดออกมาภายนอกได้ค่อนข้างเล็ก จึงเป็นอุปสรรคในการพันลวดทองแดงขนาดใหญ่เมื่อ หม้อแปลงต้องการกำลังสูงๆ แกนที่นิยมใช้กันมากสำหรับหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งที่ต้องการกำลังงานสูง จะเป็นแกนแบบ EI, EE และ ETD เนื่องจากสามารถพันขดลวดรอบแกนบนบอบบิ้นได้สะดวก แกนในกลุ่มนี้จะมีขนาดต่างๆ ให้เลือกใช้งานได้เป็นจำนวนมาก โดยสามารถให้กำลังงานได้ตั้งแต่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

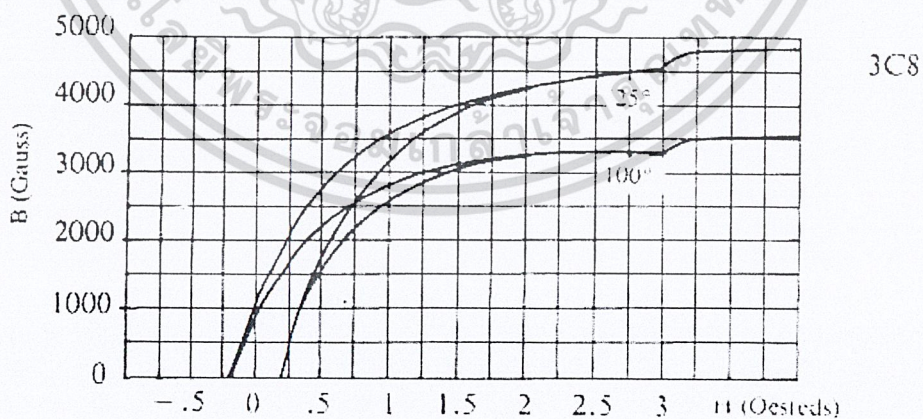
5 วัตต์ ไปจนถึง 10 กิโลวัตต์ อย่างไรก็ตาม สัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าแกนแบบ POT

4.4.6.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์นั้น จะต้องมียุทธศาสตร์คุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลสำคัญที่ควรจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้ก็คือเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis curve) และค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

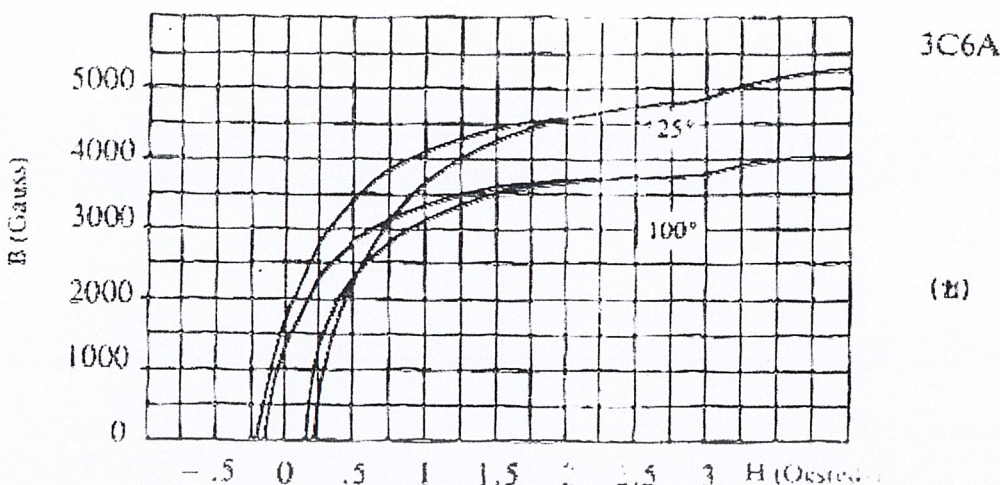
4.4.6.3 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)

โค้งฮิสเตอร์รีซิส จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนในรูปที่ 4.16 (ก) และ 4.16 (ข) จะแสดงลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ตามลำดับ ซึ่งผลิตโดยผู้ผลิตคือ FERROXCUBE จากรูปจะเห็นว่า ค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ก็ตาม จากจุดดังกล่าวเราจะเรียกว่า แกนเริ่มมีการอิ่มตัวของ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)



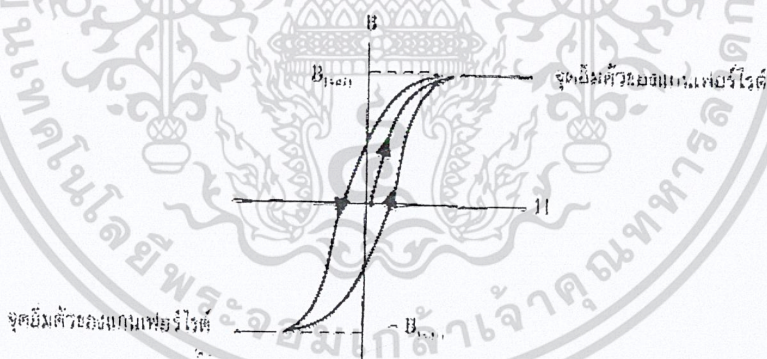
รูปที่ 4.16 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 (ข) แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสารชนิด 3C8(ก) และ 3C6A(ข) (ที่มา : Ferroxcube)

โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส เพียงครั้งเดียว เนื่องจากอีกครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส จะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศกันเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะที่สมมาตรของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งจะมีลักษณะสมมาตรของกราฟซีกบนและซีกล่าง ปกติผู้ผลิตจะให้กราฟซีกบนมาเท่านั้น ดังในรูปที่ 4.16

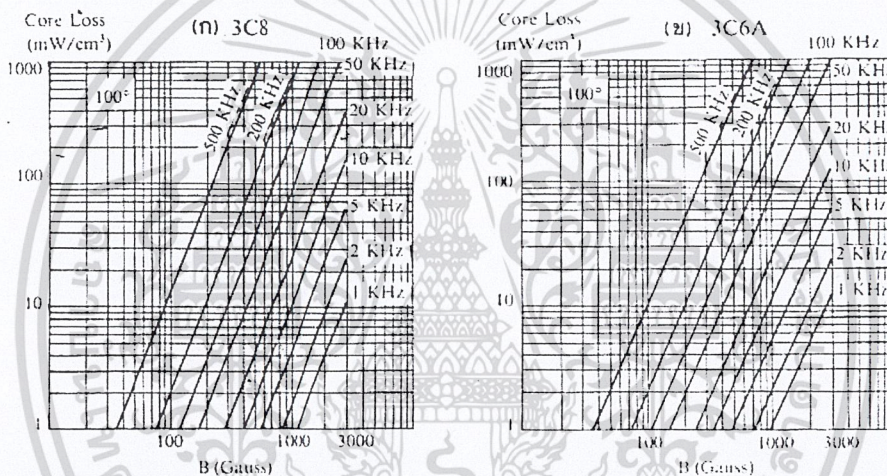
การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์ในหม้อแปลงสวิตช์จะต้องระวังไม่ทำให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลงสวิตช์จึงควรกำหนดค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเพื่อความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6.4 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis) และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss)

ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 (ก) และ 4.18 (ข) ปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 4.18 แสดงการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสาร 3C8(ก) และ 3C6A(ข)
(ที่มา : Ferroxcube)

4.4.7 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับจำนวนของขดลวดไพรมารี และขนาดของแกน จากกฎของฟาราเดย์จะได้ว่า

$$\Delta B = \frac{V \cdot t}{N_p \cdot A_c} \times 10^8 \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ΔB คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน เป็นเกาส์
 v คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี เป็น โวลต์
 N_p คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี เป็นรอบ
 A_c คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน เป็นตารางเซนติเมตร
 t คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น เป็นวินาที

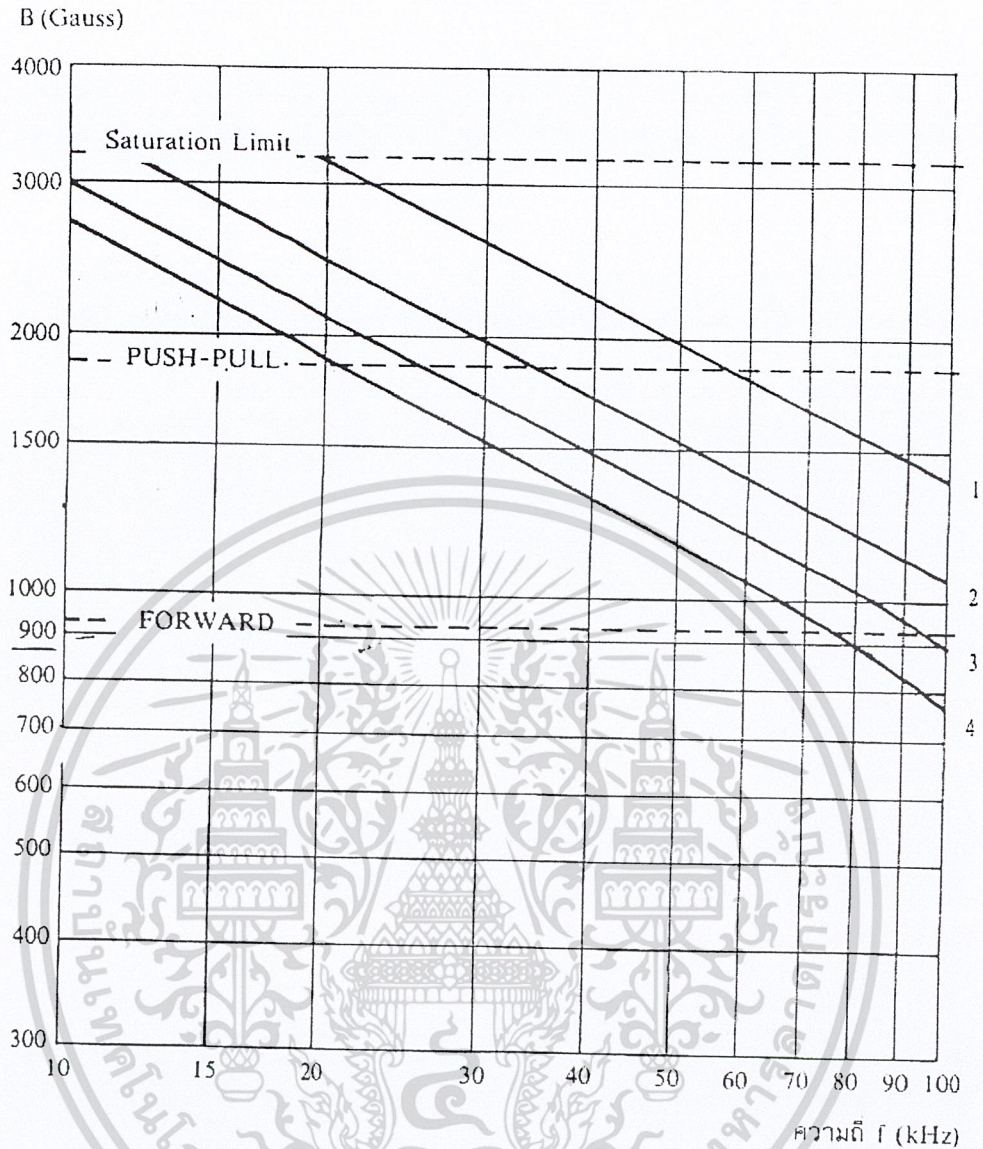
จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีมีค่าน้อยลง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะยังมีค่ามาก ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีลงจะทำให้สามารถใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลงให้กำลังได้สูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม หากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว จะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารี มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุทจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะที่กำลังนำกระแสสูงๆ แทนทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์พังเสียหายได้ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วยดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงานจึงมีข้อควรคำนึงถึง 2 ประการคือ

1. แกนเฟอร์ไรต์ต้องไม่เกิดอิ่มตัวขณะทำงาน
2. ที่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงาน จะต้องเกิดการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่สุด

ในรูปที่ 4.19(ก) และ 4.19(ข) เป็นกราฟแสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เหมาะสมของแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งแนะนำไว้โดย L.M. Bracke ใช้สำหรับพวง-พูลคอนเวอร์เตอร์และฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีค่าการสูญเสียน้อยที่สุดด้วย การใช้กราฟนี้เพื่อกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในขั้นต้นสำหรับการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิง ซึ่งจะทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วขึ้นมาก

หมายเหตุ การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ΔB ให้กำหนดเป็น 2 เท่าของค่าที่อ่านได้จากกราฟ ($2 \times \Delta B$) และค่า ΔB ไม่ควรกำหนดเกินเส้นประในกราฟ ซึ่งแสดงขีดจำกัดของ ΔB สำหรับคอนเวอร์เตอร์

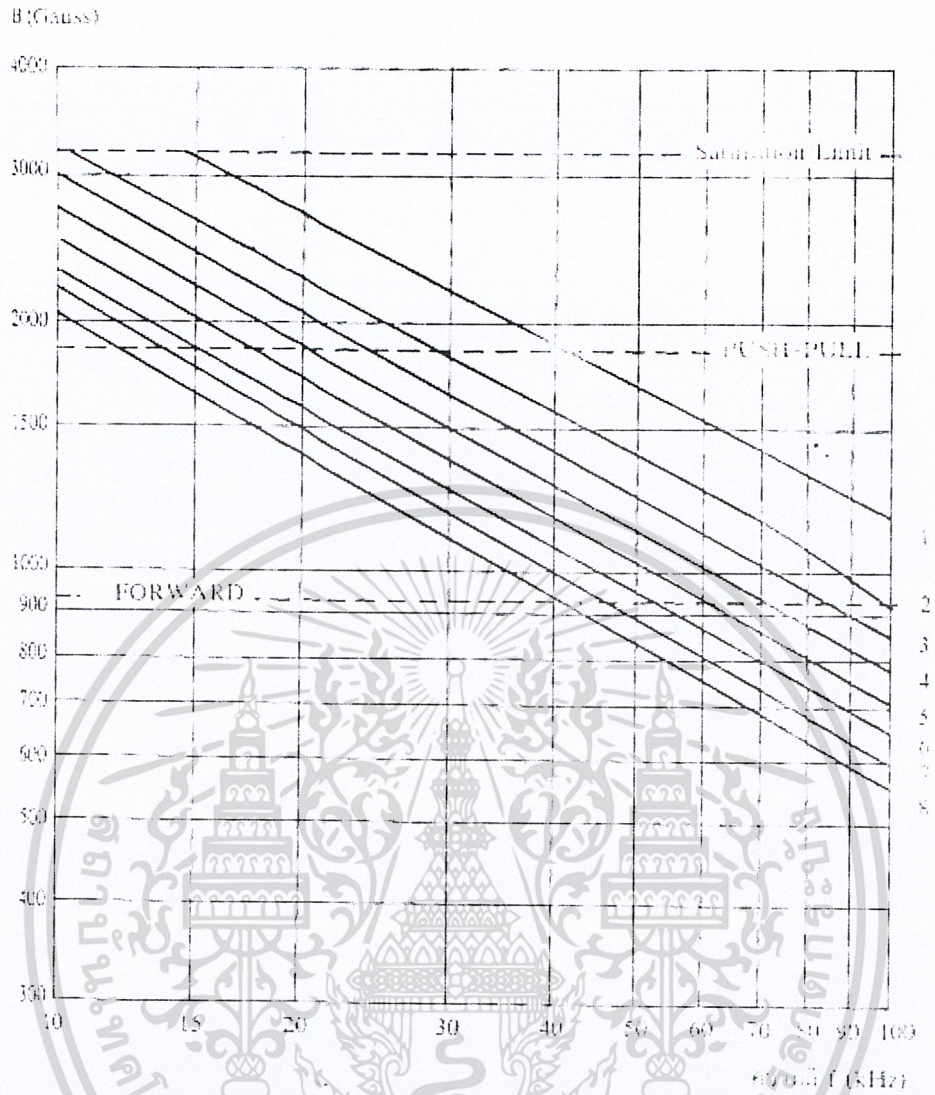


ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ :

- (1) UU 15/22/6, E 20/20/5 (2) UU 20/32/7, EE 25/25/7, EE 30/30/7
 (3) UU 25/40/13 (4) UU 30/15/16

รูปที่ 4.19 (ก)

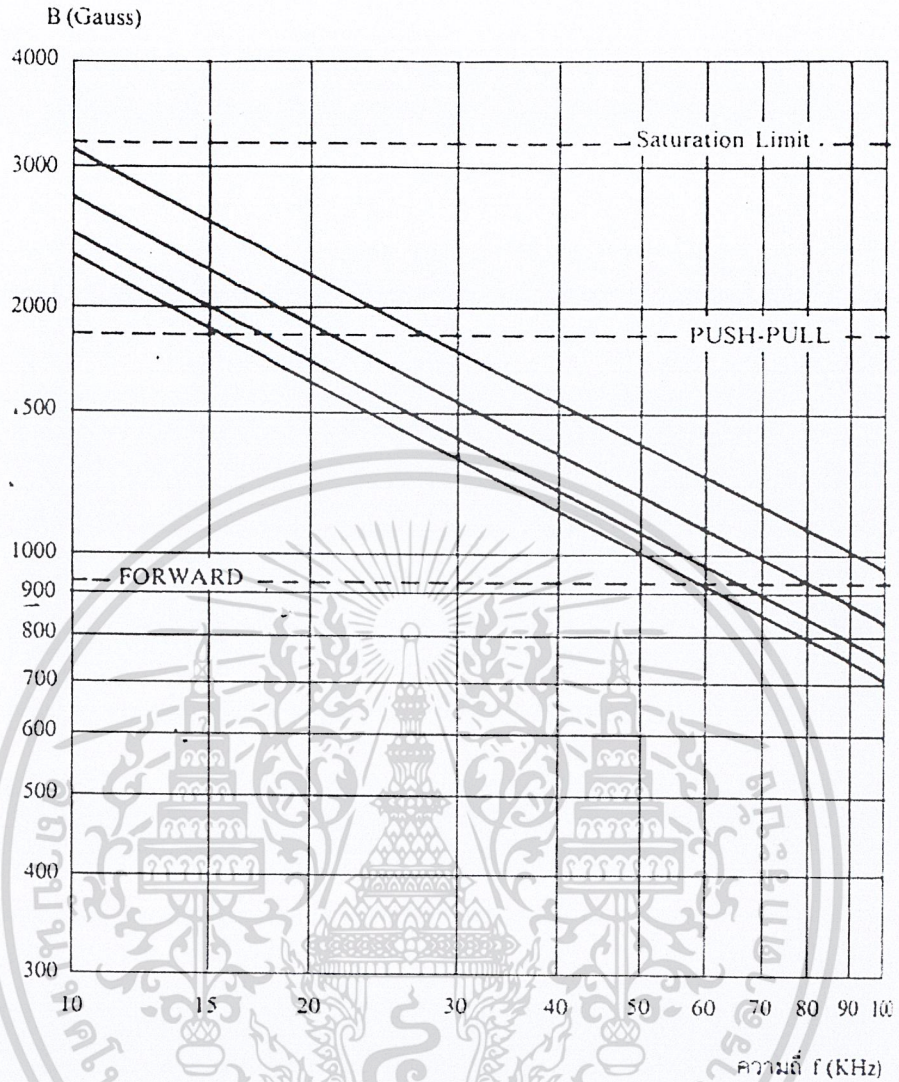
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ :

- (1) EC 35 (2) EC 41, EC 52 (3) EC 70 (4) LE 42 42 15
 (5) EE 42/42/20, EE 42/54/20, EE 42/66/20 (6) EE 55/55 21
 (7) EE 55/55/25, UU 64/70/20 (8) EE 65 66 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.8 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับหม้อแปลงสวิตชิ่ง จะกลายเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน กำลังงานสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ พิจารณาได้จากขนาดหน้าตัดของแกน (A_c) และขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น (A_w) โดยอาจคำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{0.5\Delta B_{(max)} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (4-8)$$

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของพวย-พูลคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{\Delta B_{(max)} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (4-9)$$

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{1.4\Delta B_{(max)} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (4-10)$$

โดยที่ $\Delta B_{(max)}$ = ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นเกาส์

f = ค่าความถี่การทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ เป็นเฮิรตซ์

A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตารางเซนติเมตร

A_w = พื้นที่ช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น เป็นตารางเซนติเมตร

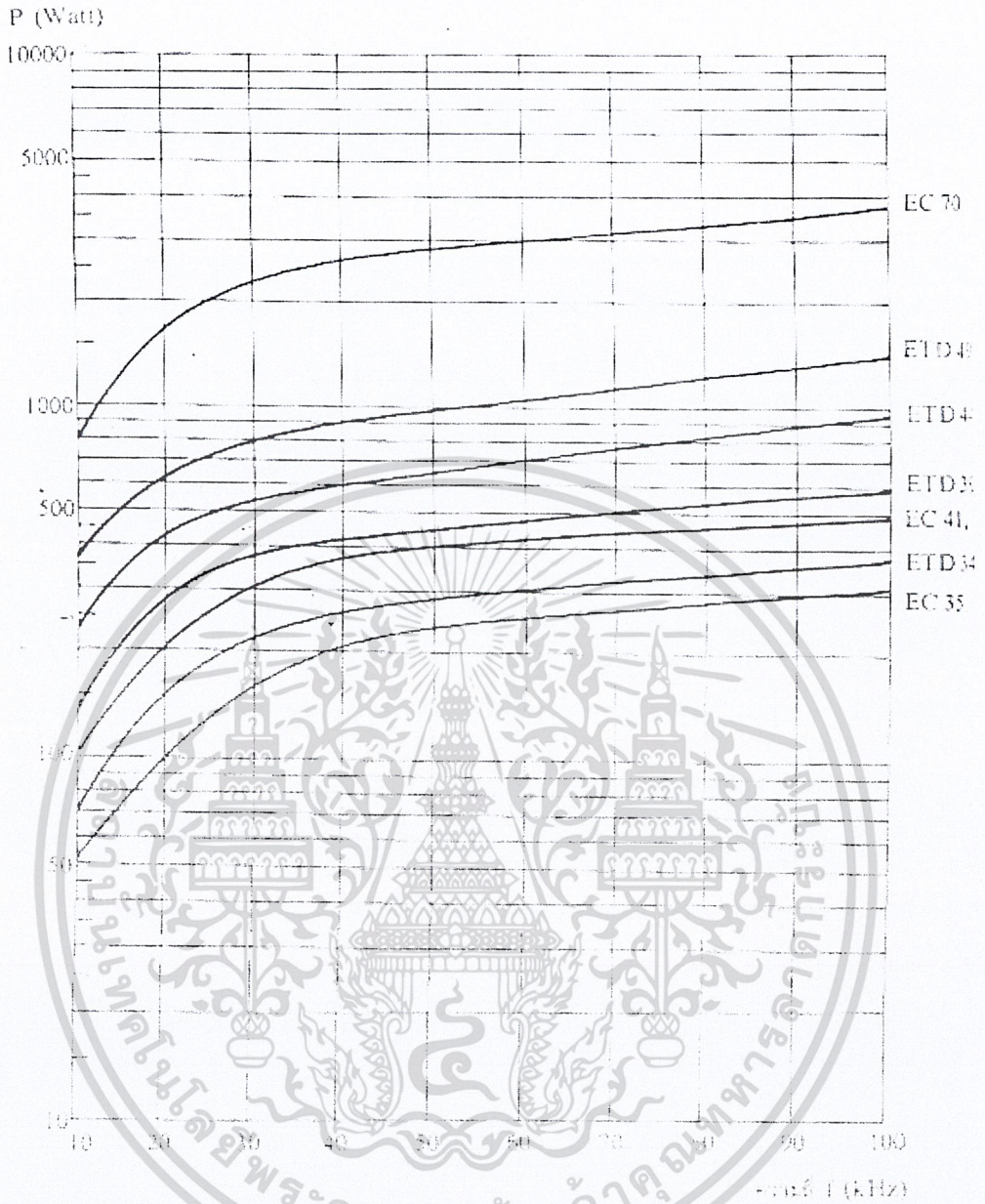
D = ค่าความหนาแน่นกระแสในขดไฟรมารี่ เป็นเซอร์คูลาร์มิลต่อแอมป์

P = กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวัตต์

ค่าของ $\Delta B_{(max)}$ ที่เหมาะสม หาได้จากรูปที่ 4.19 ส่วนค่าของ A_c และ A_w เป็นขนาดมาตรฐานแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ โดยดูได้จากข้อมูลจากผู้ผลิตที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์ ค่าของ D กำหนดได้จากขนาดของลวดทองแดงที่ใช้พัน

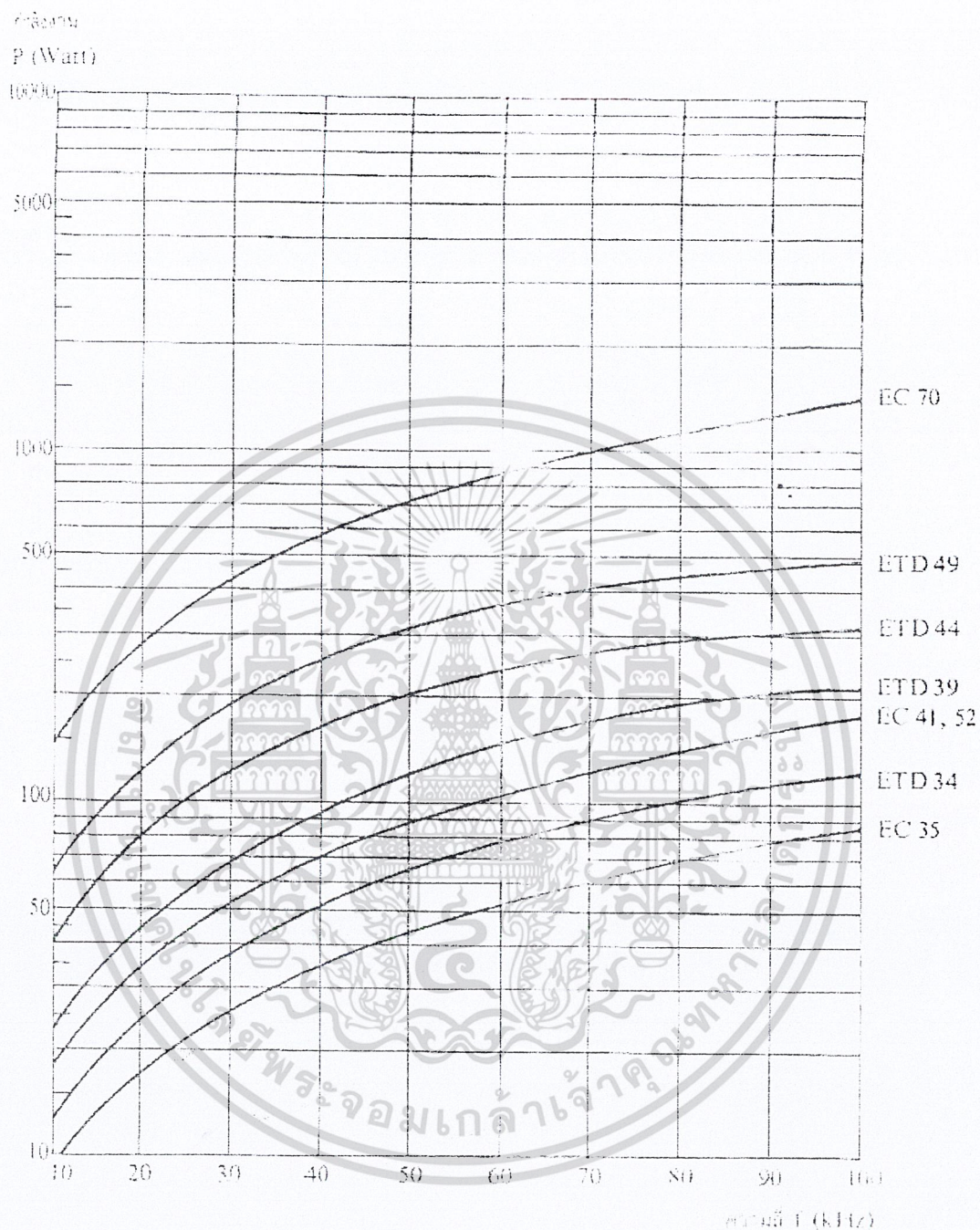
รูปที่ 4.20 แสดงค่ากำลังที่เหมาะสมสำหรับแกนขนาดต่างๆ ในการใช้งานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (4-8) , (4-9) และ (4-10) โดยกำหนดค่า

ความหนาแน่นกระแส D ไว้ที่ 500 เซอร์คูลาร์มิลต่อหนึ่งแอมป์ ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 (ก) แสดงกำลังงานที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้กับ ฮาล์ฟบริดจ์และฟลูบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



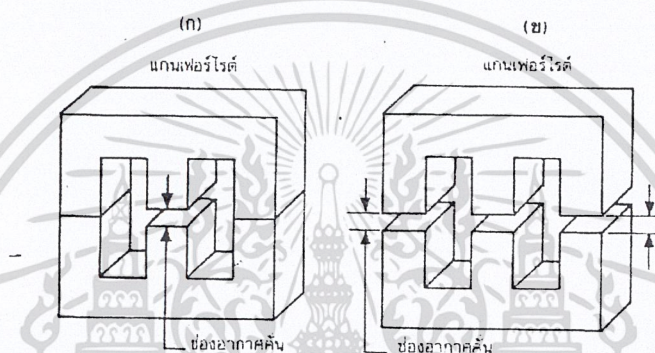
รูปที่ 4.20 (ข) แสดงกำลังงานที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้กับ
ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.9 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์ (Air Gap)

การกำหนดช่องคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air Gap) ในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ และช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดในหม้อแปลง สวิตช์ซึ่งมีค่ามากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ช่องอากาศคั่นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้เกิดการแพร่กระจาย สัญญาณรบกวน EMI ออกมา และอาจรบกวนอุปกรณ์ภายนอกได้เช่นกัน

สำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE, EI, ETD หรือแบบ POT สามารถกำหนดลักษณะของช่อง อากาศคั่นแกนได้ 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 4.21 และ การกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลางอย่างเดียว และการคั่นด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ



รูปที่ 4.21 แสดงการกำหนดช่องอากาศคั่น I_g ที่คั่นกลาง (ก) และการคั่นช่องอากาศ I_g ระหว่างคู่ประกบของแกนเฟอร์ไรต์ (ข)

การคั่นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ สามารถทำได้ง่ายกว่าการคั่นช่องอากาศที่ แกนกลาง ซึ่งทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศคั่นที่ ต้องการ นำมาคั่นระหว่างแกนนอกของคู่ประกบ ส่วนการกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลาง ต้อง ตั้งโดยตรงจากผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์ หรือขีดแกนกลางออกเองเพื่อให้ได้ระยะช่องอากาศตาม ต้องการ

มีข้อสังเกตคือ การคั่นช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ ความหนาของแผ่นฉนวนคั่นที่ใช้จะมี ค่าเพียงครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศที่ต้องการเท่านั้น เนื่องจากช่องอากาศที่เกิดขึ้นจะคั่นทางเดิน ฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองครั้งในแกน ดังนั้นระยะช่องอากาศคั่นที่ได้จึงเป็นผลรวมของระยะช่อง อากาศที่เกิดขึ้นทั้งหมด

การกำหนดให้มีช่องอากาศคั่นแกนเฟอร์ไรต์นั้น มีความจำเป็นมากสำหรับหม้อแปลง ของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และเอาต์พุต ไซค์ที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.10 แคนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงฟลายแบคและเอาต์พุตโซ๊ค

หม้อแปลงสวิตซิ่งสำหรับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และตัวเอาต์พุตโซ๊ค จะทำงานในลักษณะที่ต้องเก็บสะสมพลังงานไว้ก่อนแล้วจึงถ่ายเทพลังงานออกไป จึงอาจกล่าวได้ว่า กำลังงานที่ได้จากหม้อแปลงจะมาจากค่าพลังงานที่หม้อแปลงสามารถสะสมไว้ได้นั่นเอง ในช่วงที่มีการสะสมพลังงานของหม้อแปลงหรือเอาต์พุตโซ๊ค พลังงานที่ถูกสะสมไว้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}LI^2$ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับขนาดของแกนเฟอร์ไรต์สามารถหาได้จาก

$$LI_{P(pk)}^2 = \frac{\Delta B_{(max)}^2 \cdot \ell_g \cdot A_c}{0.4\pi} \times 10^{-8} \quad (\text{จูล}) \quad (4.11)$$

โดยที่	ℓ_g	คือ ระยะห่างช่องอากาศในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นเซนติเมตร
	A_c	คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตารางเซนติเมตร
	$\Delta B_{(max)}$	คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกน เป็นเกาส์
	L	คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดไฟรมารี่ของหม้อแปลงหรือค่าความเหนี่ยวนำของเอาต์พุตโซ๊ค เป็นเฮนรี่
	$I_{P(pk)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ผ่าน เป็นแอมป์

ค่าของ $\Delta B_{(max)}$ โดยทั่วไปจะกำหนดไว้เป็นครึ่งหนึ่งของค่าอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ ($B_{(sat)}/2$) จากสมการที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า เราสามารถเพิ่มค่าพลังงานสะสม (หรือเพิ่มกำลังของหม้อแปลง) ได้โดยการเพิ่มระยะช่องอากาศ ℓ_g หรือโดยการเพิ่มขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ ให้ใหญ่ขึ้น (A_c เพิ่มขึ้น) ในทางปฏิบัติการเพิ่มระยะช่องอากาศนั้นจะเป็นที่นิยมใช้มากกว่า เพราะต้องการให้หม้อแปลงสวิตซิ่งและเอาต์พุตโซ๊คมีขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม แกนเฟอร์ไรต์ที่ขนาดหนึ่งๆ ระยะของช่องอากาศในสูงสุดจะถูกจำกัดด้วยค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดเพราะจำนวนรอบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะช่องอากาศที่เพิ่มขึ้น ดังสมการ

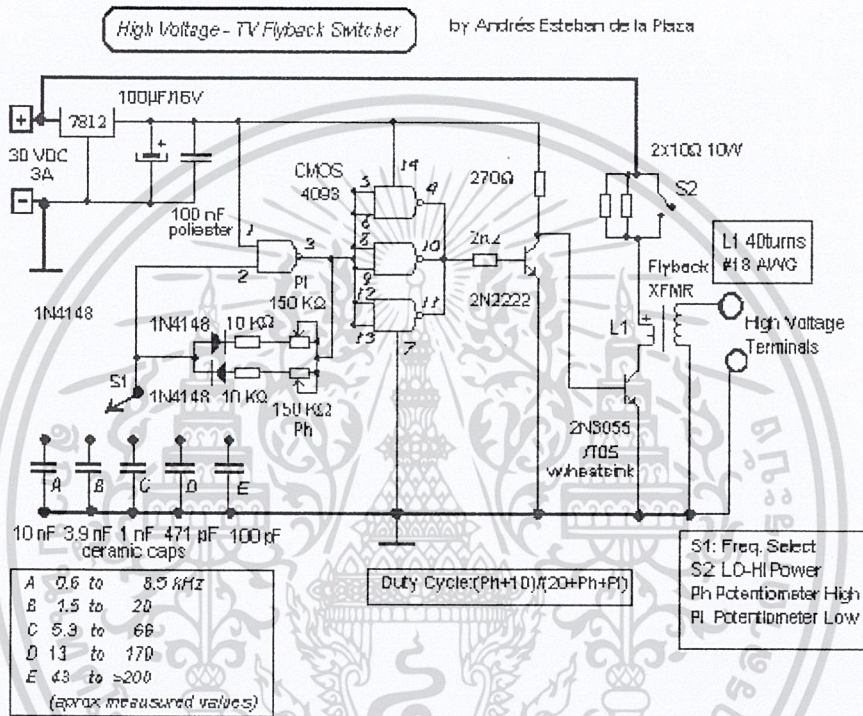
$$N = \frac{\Delta B_{(max)} \ell_g}{0.4\pi I_{P(pk)}} \quad (4.12)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดไฟรมารี่ของหม้อแปลงหรือเอาต์พุตโซ๊ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระยะพินบนบอบบิ้นมีค่าจำกัด และอาจมีเนื้อที่ไม่พอสำหรับจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในลวดทองแดงจะมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงหรือเอาต์พุตใช้ครีออน ผู้ออกแบบจึงต้องพิจารณาจุดที่เหมาะสมระหว่างการเพิ่มระยะช่องอากาศคั่นหรือการเพิ่มขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ด้วย

4.5 วงจรกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง



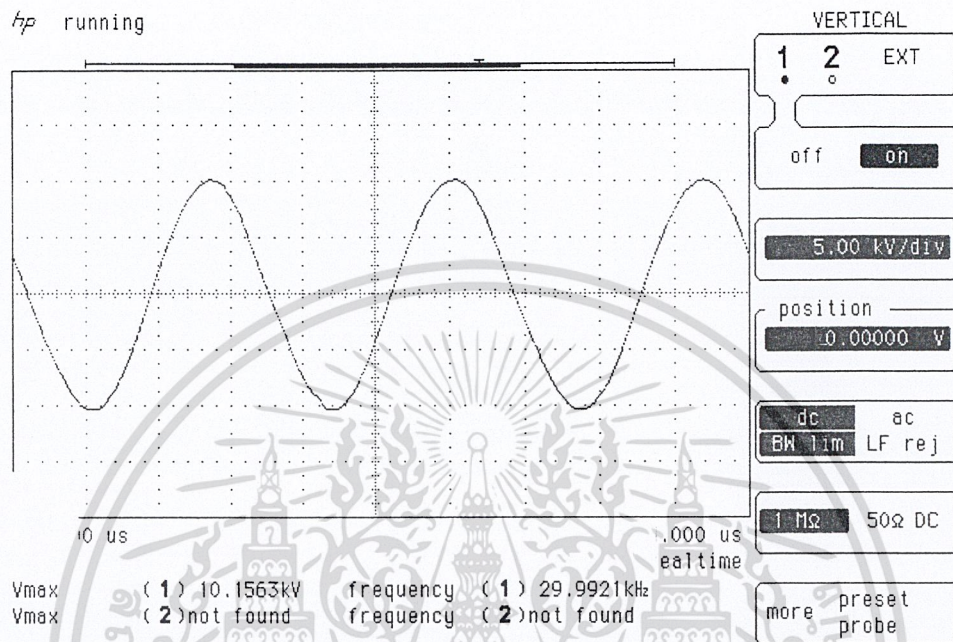
รูปที่ 4.22 วงจรกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปวงจรกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ วงจรกำเนิดความถี่ และชุดขับกำลัง

วงจรกำเนิดความถี่สร้างขึ้นมาจาก IC CMOS 4093 (4 – nand gates) และสามารถควบคุมค่า ดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ได้ โดยกำหนดค่า t_{on} และ t_{off} จากการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ 150 kohm จากวงจรสามารถเลือกใช้ความถี่ในย่านต่างๆ ได้โดยการเลือกค่า C จาก selector switch (S₁) ซึ่งจากการสร้างชุดกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูง ได้ความถี่ที่ 30 kHz ซึ่งทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่ 10 kV_m

ชุดขับกำลังถูกสร้างขึ้นจาก เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3055 ที่ถูกขับโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N2222 ได้รับสัญญาณพัลส์มาจาก ชุดกำเนิดความถี่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกเปิด - ปิด เป็นจำนวนหลายครั้งต่อวินาทีทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟลายแบค และเหนี่ยวนำทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 4.23 ผลการวัดแรงดันเอาต์พุต ที่ 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบเครื่องกำเนิดโอโซน

จากบทที่ผ่านมา เราได้ศึกษาทฤษฎีของการทำให้เกิดโอโซนเบื้องต้นแล้วและได้นำเอาทฤษฎีมาใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนเมื่อได้เครื่องกำเนิดโอโซนตามที่ได้ออกแบบมาแล้วจึงได้นำมาทดสอบถึงปริมาณโอโซนดังการทดลองต่อไปนี้

5.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบปริมาณ โอโซนที่เกิดขึ้นโดยไม่ผ่านชุดเตรียมอากาศ

จากวิธีการวัดด้วยวิธีทางเคมีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าแอมชอร์รับเบนซ์ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวีวิสทิเบิลสเปคโฟโตมิเตอร์ นำค่าแอมชอร์รับเบนซ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน(ภาคผนวก ก)

ค่าแอมชอร์รับเบนซ์ในการทดลองที่ 1 = 0.708

เนื่องจากกราฟมาตรฐานมีค่าค่าแอมชอร์รับเบนซ์สูงสุดเพียง 0.5 เมื่อนำค่าไปเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องเทียบจากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

จากสมการ $Y = 0.1056X - 0.0155$

จะได้

$$X = \frac{Y + 0.0155}{0.1056}$$

$$X = 6.851 \text{ ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร}$$

นำค่าที่ได้นำไปแทนในสมการ (2.3)

$$O_3 = \frac{\text{ปริมาณ } O_3 \text{ ทั้งหมด ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร} \times 10 \text{ มิลลิลิตรของสารดูดซับ}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างอากาศ (ลิตร)}}$$

$$O_3 = \frac{6.851 \times 10}{2 \times 15}$$

$$O_3 = 2.28 \text{ ppm}$$

5.2 การทดลองที่ 2 ทดสอบปริมาณ โอโซนที่เกิดขึ้นโดยผ่านชุดเตรียมอากาศ

จากวิธีการวัดด้วยวิธีทางเคมีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าแอมชอร์รับเบนซ์ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวีวิสทิเบิลสเปคโฟโตมิเตอร์ นำค่าแอมชอร์รับเบนซ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน(ภาคผนวก ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแอมพลิจูดเบนซ์ในการทดลองที่ 1 = 0.939

เนื่องจากกราฟมาตรฐานมีค่าแอมพลิจูดเบนซ์สูงสุดเพียง 0.5 เมื่อนำค่าไปเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องเทียบจากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

$$\text{จากสมการ } Y = 0.1056X - 0.0155$$

จะได้

$$X = \frac{Y + 0.0155}{0.1056}$$

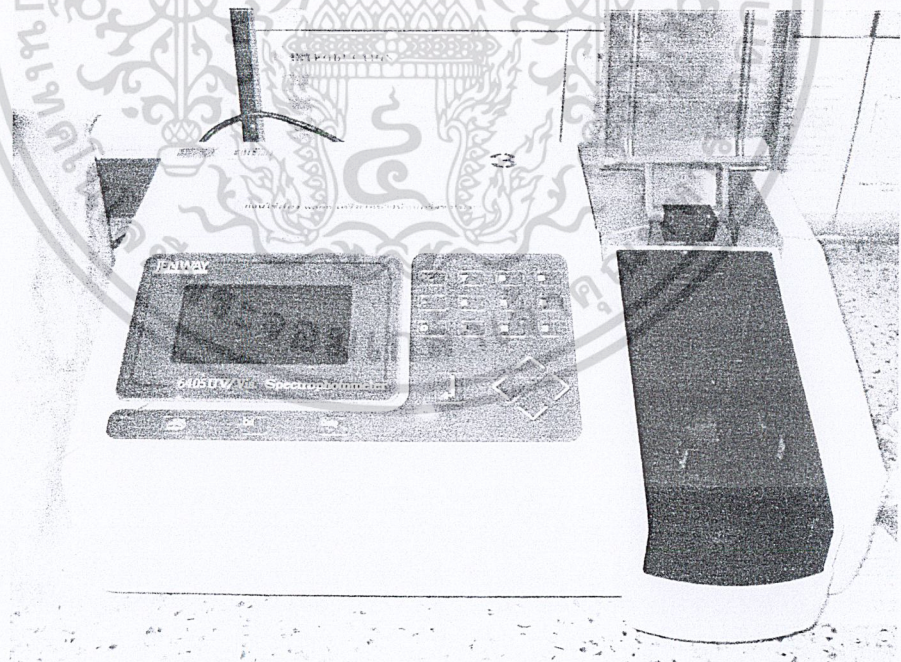
$$X = 9.0388 \text{ ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร}$$

นำค่าที่ได้นำไปแทนในสมการ (2.3)

$$O_3 = \frac{\text{ปริมาณ } O_3 \text{ ทั้งหมด ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร} \times 10 \text{ มิลลิลิตรของสารดูดซึม}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างอากาศ (ลิตร)}}$$

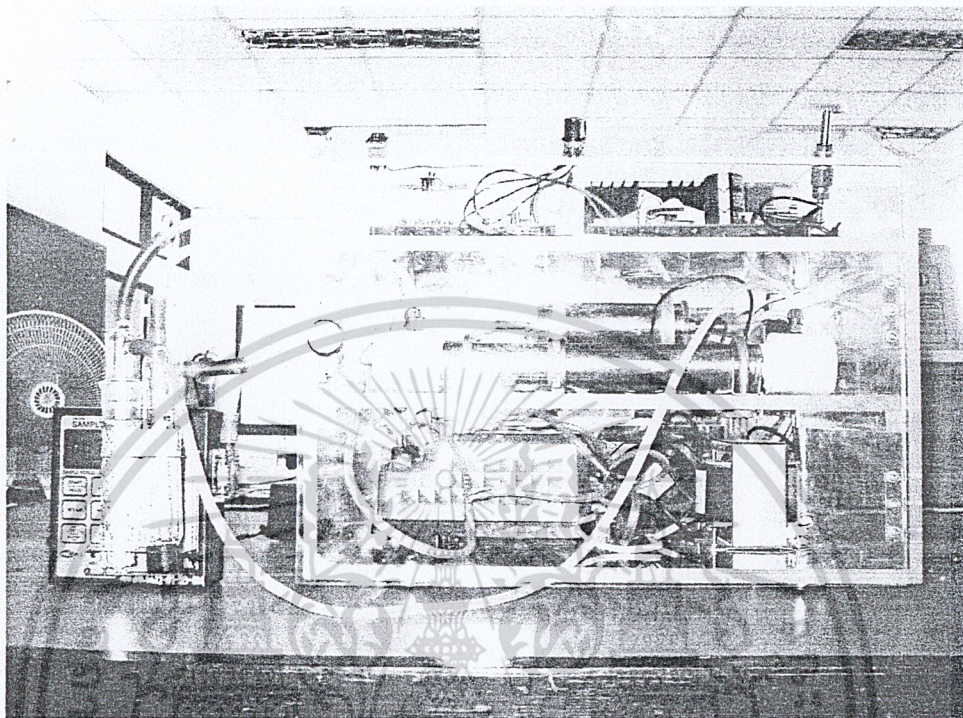
$$O_3 = \frac{9.0388 \times 10}{2 \times 15}$$

$$O_3 = 3.03 \text{ ppm}$$



รูปที่ 5.1 เครื่องยูวีวิสทิเบตสเปกโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การต่ออุปกรณ์วัดปริมาณไอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ 2 ที่มีชุดเตรียมอากาศ มีปริมาณของก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นมากกว่าปริมาณของก๊าซโอโซนที่เกิดจากการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่มีชุดเตรียมอากาศ สรุปได้ว่าชุดเตรียมอากาศที่ได้ออกแบบขึ้นทำให้ความชื้นของอากาศที่เข้ามาในระบบของเครื่องผลิตโอโซนลดลง จึงมีผลทำให้เครื่องผลิตโอโซนผลิตก๊าซโอโซนได้ปริมาณเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

1. จากการทดสอบสรุปได้ว่าปริมาณการไหลของอากาศที่เข้าไปในระบบมีผลต่อปริมาณการเกิดของก๊าซโอโซนจึงควรหาปั๊มที่มีอัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของหลอดผลิตก๊าซโอโซนด้วยว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดที่จะเหมาะสมกับปริมาณนั้นๆ
2. จากการศึกษาและทดลองพบว่าการแตกตัวของออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซนจะเริ่มที่แรงดันไฟฟ้า 3 - 3.5 kV และจะแตกตัวได้ดีขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นจนถึงค่าจุดเบรกควานซ์ของฉนวน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของฉนวนแต่ละชนิด แนวทางในการพัฒนาต่อคือสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.Bottschalk ,J.A. Libra , A. Suape , Ozonation of Water and Wastewater , pp. 20-50,1999.
- [2] Bruno Langlish, et al. Ozone in Water Treatment. 2nd Ed. Lewis Publishers. 1991
- [3] Bryant, E. A. , Futton, G.P. , and Budd, G.C. “Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water” Van Nostrand Reinhold, 1992
- [4] ตำราวย สังข์สะอาด . วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538
- [5] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล . เอกสารประกอบวิชาเรียนเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูง , ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล , จงรักษ์ บุญเส็ง .“การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จเพื่อการบำบัดน้ำเสีย” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ . 2543
- [7] พรพิมล รัตนวิเชียร, “เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์” ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [8] นบชนก ธนพงศธร , การใช้โอโซนร่วมกับการสมานตะกอนทางชีวภาพในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ บนพื้นที่ความเค็มต่ำ , วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , วิศวกรรมเคมี , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 31 – 37 , 2540
- [9] ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์ , ธนัญชัย บุญนะที . การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้โอโซน, ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [10] สุวัฒน์ แซ่ตัน . สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพรายในเครื่องรับโทรทัศน์สี . ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท เอนเทลไทย จำกัด.
- [11] สุวัฒน์ แซ่ตัน . เทคนิคการออกแบบ สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพราย, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท เอนเทลไทย จำกัด.
- [12] พันธุ์ศักดิ์ พุฒิमानิตพงศ์ . วงจรพัลส์ และ สวิตซ์ิ่ง, บ. ซีเอ็ดยุคเซ็น จำกัด (มหาชน) ,กทม. 2539
- [13] สมบูรณ์ มาลานนท์ , สมคิด วิริยประสิทธิ์ชัย . แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ิ่ง ,สนพ. ฟิสิกส์ เซนเตอร์ , กทม.

[14] รศ. แม้นศรี ออมรสิทธิ์ , ผศ.ดร. สมชัย อัครทิวา , วิศวกรรมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายไอโอดีนเข้มข้นเท่าไอโซน 1 ไมโครลิตร/มิลลิลิตร มาตามลำดับดังนี้ 0,5,10,15,20 และ 25 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรและเติมสารละลายที่ใช้ดูดซึบ ปรับปริมาตรจนถึงขีด จะให้ความเข้มข้นเทียบเท่าไอโซน 1,1,2,3,4, และ 5 ไมโครลิตร ต่อ 10 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าแอบซอร์บแนนซ์ จากการปรับแก้ของแบลนค์ก่อน

(หมายเหตุ การใช้สารละลายไอโอดีนเป็นสารมาตรฐานในการทำกราฟมาตรฐาน โดยใช้มวลสารสัมพันธ์จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะมีความสะดวกกว่าการเตรียมแก๊สไอโซนมาตรฐาน)

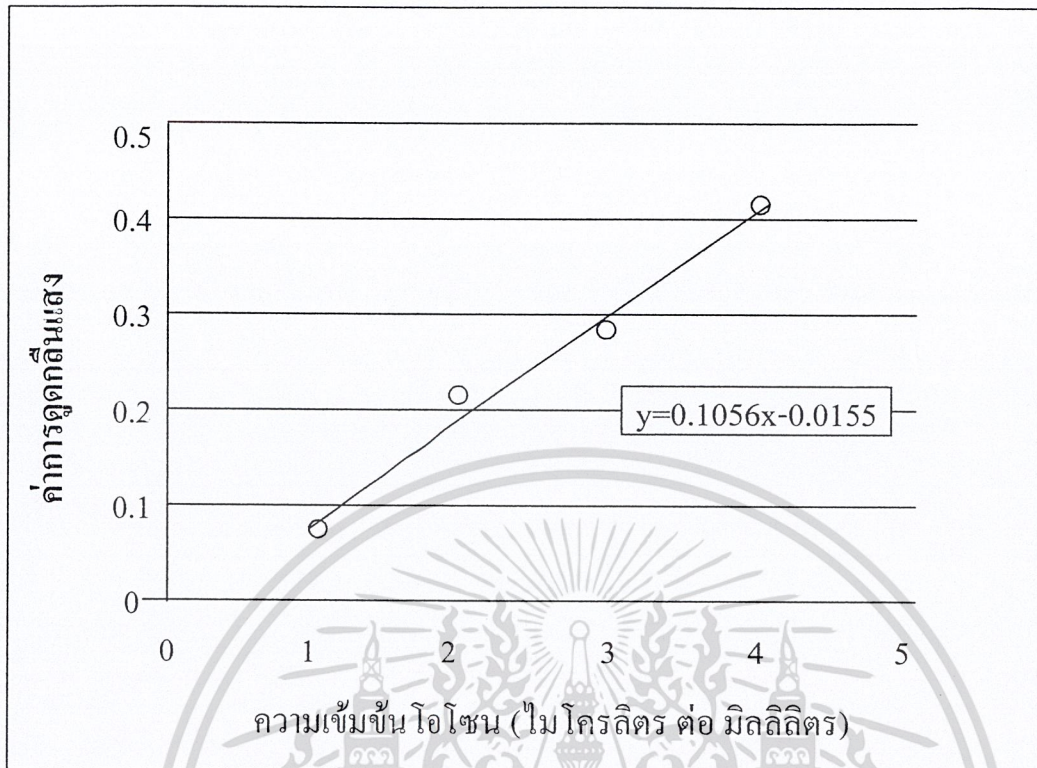
2. พล็อตค่าแอบซอร์บแนนซ์จากสารละลายไอโอดีนเทียบเป็น ไอโซน และปรับแก้ของแบลนค์แล้วจะได้กราฟมาตรฐานเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's Law) จะได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิดให้สอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด (Best Fit)

3. เทียบค่าแอบซอร์บแนนซ์จากข้อ 3 กับกราฟมาตรฐานกรณีที่ค่าแอบซอร์บแนนซ์เกินค่าในกราฟมาตรฐานที่มีไม่ควร extrapolate ควรเตรียมกราฟมาตรฐานให้เข้มข้นใหม่ (ถึง 10 ไมโครลิตร/10 มิลลิลิตร)

ตารางที่ 1- ก แสดงค่าดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานไอโซน

ความเข้มของสารละลายมาตรฐาน ไอโซน (ไมโครลิตร ต่อ มิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.087
2	0.207
3	0.288
4	0.412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-ก แสดงกราฟมาตรฐานไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Complementary Silicon Power Transistors

... designed for general-purpose switching and amplifier applications.

- DC Current Gain — $h_{FE} = 20-70 @ I_C = 4 \text{ Adc}$
- Collector-Emitter Saturation Voltage —
 $V_{CE(sat)} = 1.1 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 4 \text{ Adc}$
- Excellent Safe Operating Area

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CER}	70	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	7	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	15	A dc
Base Current	I_B	7	A dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	115 0.657	Watts W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.52	$^\circ\text{C/W}$

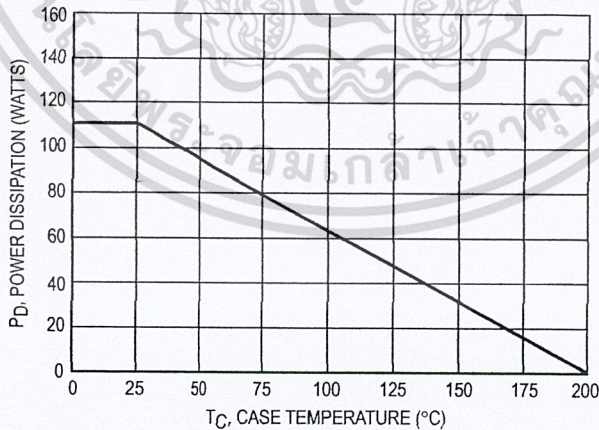
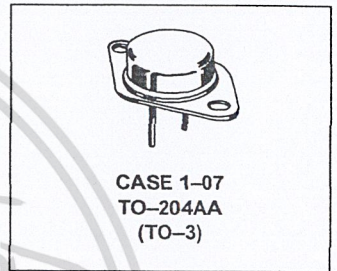
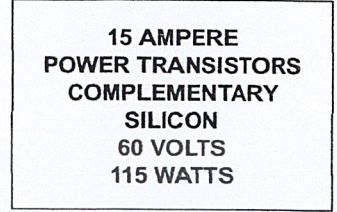


Figure 1. Power Derating

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.



*Motorola Preferred Device



2N3055 MJ2955**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
*OFF CHARACTERISTICS				
Collector–Emitter Sustaining Voltage (1) ($I_C = 200\text{ mA}$, $I_B = 0$)	$V_{CE(sus)}$	60	—	Vdc
Collector–Emitter Sustaining Voltage (1) ($I_C = 200\text{ mA}$, $R_{BE} = 100\text{ Ohms}$)	$V_{CER(sus)}$	70	—	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ Vdc}$, $I_B = 0$)	I_{CEO}	—	0.7	mA
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 100\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$) ($V_{CE} = 100\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$)	I_{CEX}	—	1.0 5.0	mA
Emitter Cutoff Current ($V_{BE} = 7.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	—	5.0	mA

***ON CHARACTERISTICS (1)**

DC Current Gain ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 10\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)	h_{FE}	20 5.0	70 —	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $I_B = 400\text{ mA}$) ($I_C = 10\text{ Adc}$, $I_B = 3.3\text{ Adc}$)	$V_{CE(sat)}$	—	1.1 3.0	Vdc
Base–Emitter On Voltage ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)	$V_{BE(on)}$	—	1.5	Vdc

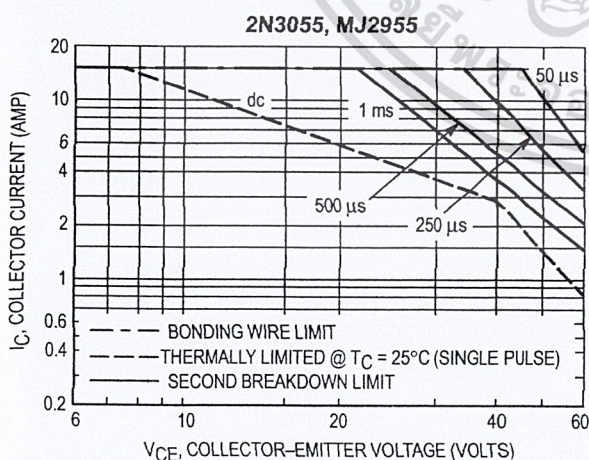
SECOND BREAKDOWN

Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ($V_{CE} = 40\text{ Vdc}$, $t = 1.0\text{ s}$, Nonrepetitive)	$I_{s/b}$	2.87	—	Adc
---	-----------	------	---	-----

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Current Gain — Bandwidth Product ($I_C = 0.5\text{ Adc}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	f_T	2.5	—	MHz
*Small–Signal Current Gain ($I_C = 1.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{fe}	15	120	—
*Small–Signal Current Gain Cutoff Frequency ($V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $I_C = 1.0\text{ Adc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	f_{hfe}	10	—	kHz

* Indicates Within JEDEC Registration. (2N3055)

(1) Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$.**Figure 2. Active Region Safe Operating Area**

There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate $I_C - V_{CE}$ limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 2 is based on $T_C = 25^\circ\text{C}$; $T_{J(pk)}$ is variable depending on power level. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% but must be derated for temperature according to Figure 1.

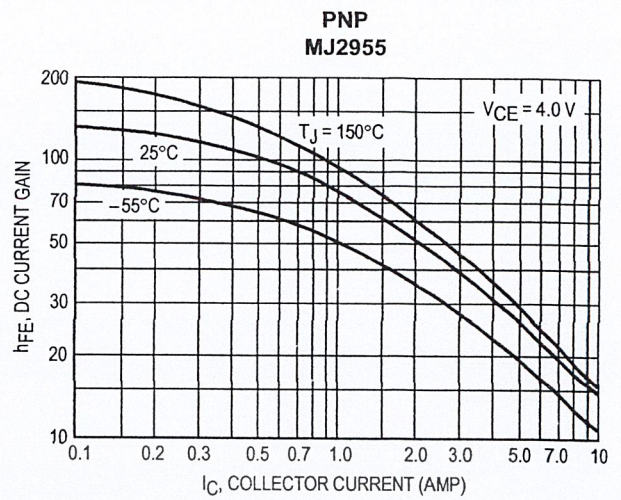
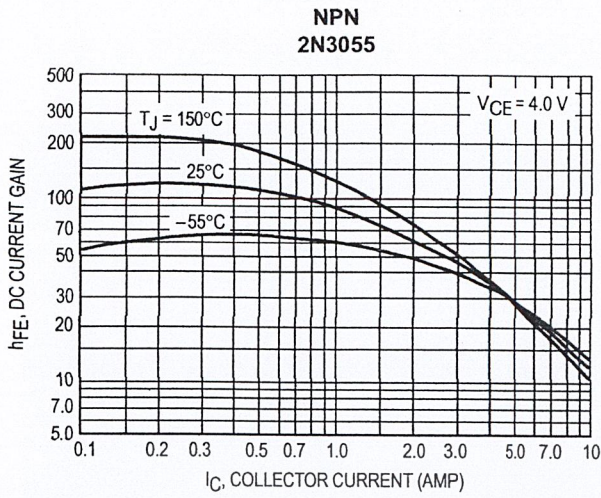


Figure 3. DC Current Gain

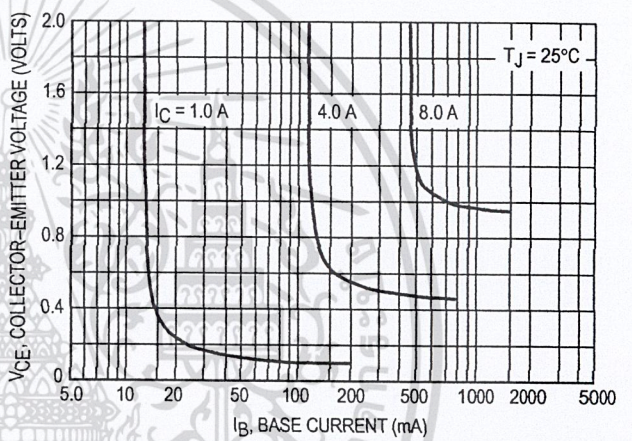
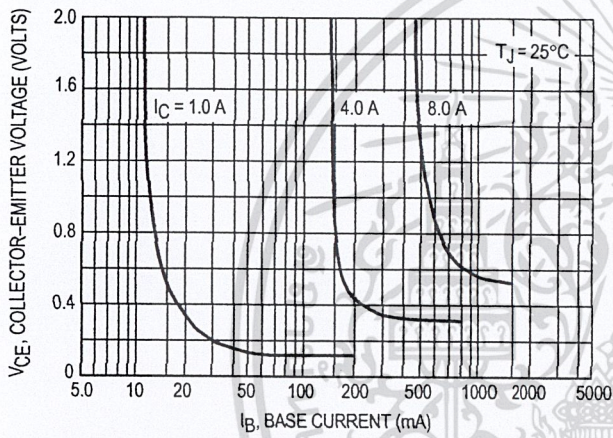


Figure 4. Collector Saturation Region

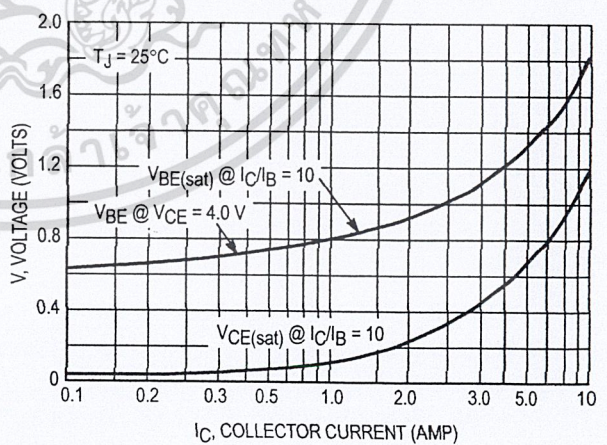
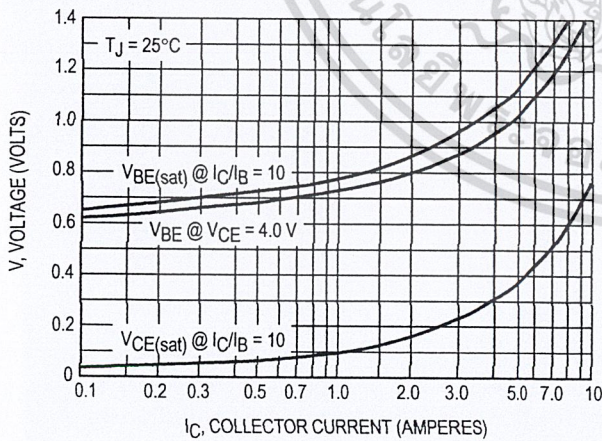
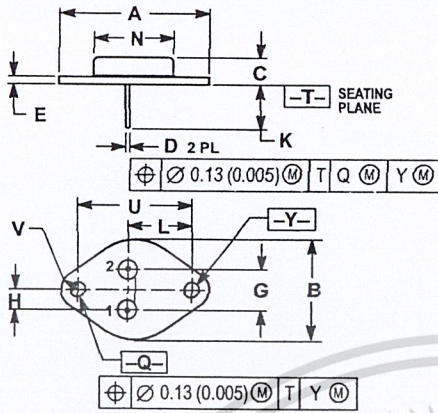


Figure 5. "On" Voltages

PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH REFERENCED TO-204AA OUTLINE SHALL APPLY.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.550 REF	—	39.37 REF	—
B	—	1.050	—	26.67
C	0.250	0.335	6.35	8.51
D	0.036	0.043	0.97	1.09
E	0.055	0.070	1.40	1.77
G	0.430 BSC	—	10.92 BSC	—
H	0.215 BSC	—	5.46 BSC	—
K	0.440	0.480	11.18	12.19
L	0.665 BSC	—	16.89 BSC	—
N	—	0.830	—	21.08
Q	0.151	0.165	3.84	4.19
U	1.167 BSC	—	30.15 BSC	—
V	0.131	0.188	3.33	4.77

STYLE 1:
 PIN 1: BASE
 2: EMITTER
 CASE: COLLECTOR

CASE 1-07
 TO-204AA (TO-3)
 ISSUE Z

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and (M) are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:

USA / EUROPE: Motorola Literature Distribution;
 P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, Toshikatsu Otsuki,
 6F Seibu-Butsuryu-Center, 3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-3521-8315

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE (602) 244-6609
 INTERNET: http://Design-NET.com

HONG KONG: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298



MOTOROLA

2N3055/D

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้า



CD4093BM/CD4093BC Quad 2-Input NAND Schmitt Trigger

General Description

The CD4093B consists of four Schmitt-trigger circuits. Each circuit functions as a 2-input NAND gate with Schmitt-trigger action on both inputs. The gate switches at different points for positive and negative-going signals. The difference between the positive (V_T^+) and the negative voltage (V_T^-) is defined as hysteresis voltage (V_H).

All outputs have equal source and sink currents and conform to standard B-series output drive (see Static Electrical Characteristics).

Features

- Wide supply voltage range 3.0V to 15V
- Schmitt-trigger on each input with no external components
- Noise immunity greater than 50%

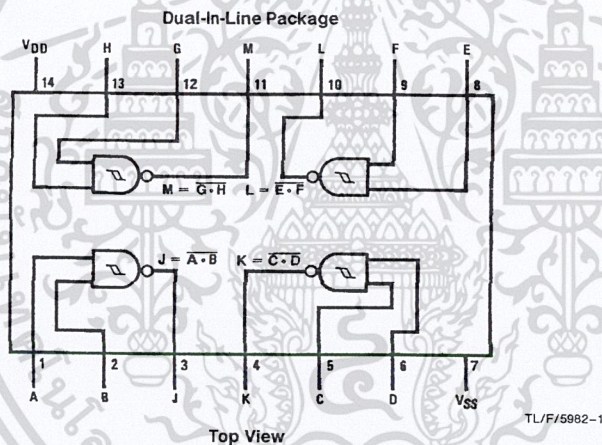
- Equal source and sink currents
- No limit on input rise and fall time
- Standard B-series output drive
- Hysteresis voltage (any input) $T_A = 25^\circ\text{C}$

Typical	$V_{DD} = 5.0\text{V}$	$V_H = 1.5\text{V}$
	$V_{DD} = 10\text{V}$	$V_H = 2.2\text{V}$
	$V_{DD} = 15\text{V}$	$V_H = 2.7\text{V}$
Guaranteed		$V_H = 0.1 V_{DD}$

Applications

- Wave and pulse shapers
- High-noise-environment systems
- Monostable multivibrators
- Astable multivibrators
- NAND logic

Connection Diagram



Absolute Maximum Ratings (Notes 1 & 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

DC Supply Voltage (V_{DD})	-0.5 to +18 V_{DC}
Input Voltage (V_{IN})	-0.5 to V_{DD} +0.5 V_{DC}
Storage Temperature Range (T_S)	-65°C to +150°C
Power Dissipation (P_D)	
Dual-In-Line	700 mW
Small Outline	500 mW
Lead Temperature (T_L)	
(Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

DC Supply Voltage (V_{DD})	3 to 15 V_{DC}
Input Voltage (V_{IN})	0 to V_{DD} V_{DC}
Operating Temperature Range (T_A)	
CD4093BM	-55°C to +125°C
CD4093BC	-40°C to +85°C

DC Electrical Characteristics CD4093BM (Note 2)

Symbol	Parameter	Conditions	-55°C		+25°C			+125°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
I_{DD}	Quiescent Device Current	$V_{DD} = 5V$		0.25			0.25		7.5	μA
		$V_{DD} = 10V$		0.5			0.5		15.0	μA
		$V_{DD} = 15V$		1.0			1.0		30.0	μA
V_{OL}	Low Level Output Voltage	$V_{IN} = V_{DD}, I_{OL} < 1 \mu A$								
		$V_{DD} = 5V$		0.05		0	0.05		0.05	V
		$V_{DD} = 10V$		0.05		0	0.05		0.05	V
		$V_{DD} = 15V$		0.05		0	0.05		0.05	V
V_{OH}	High Level Output Voltage	$V_{IN} = V_{SS}, I_{OH} < 1 \mu A$								
		$V_{DD} = 5V$	4.95		4.95	5		4.95		V
		$V_{DD} = 10V$	9.95		9.95	10		9.95		V
		$V_{DD} = 15V$	14.95		14.95	15		14.95		V
V_{T^-}	Negative-Going Threshold Voltage (Any Input)	$ I_{OL} < 1 \mu A$								
		$V_{DD} = 5V, V_O = 4.5V$	1.3	2.25	1.5	1.8	2.25	1.5	2.3	V
		$V_{DD} = 10V, V_O = 9V$	2.85	4.5	3.0	4.1	4.5	3.0	4.65	V
		$V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$	4.35	6.75	4.5	6.3	6.75	4.5	6.9	V
V_{T^+}	Positive-Going Threshold Voltage (Any Input)	$ I_{OL} < 1 \mu A$								
		$V_{DD} = 5V, V_O = 0.5V$	2.75	3.65	2.75	3.3	3.5	2.65	3.5	V
		$V_{DD} = 10V, V_O = 1V$	5.5	7.15	5.5	6.2	7.0	5.35	7.0	V
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	8.25	10.65	8.25	9.0	10.5	8.1	10.5	V
V_H	Hysteresis ($V_{T^+} - V_{T^-}$) (Any Input)	$V_{DD} = 5V$	0.5	2.35	0.5	1.5	2.0	0.35	2.0	V
		$V_{DD} = 10V$	1.0	4.30	1.0	2.2	4.0	0.70	4.0	V
		$V_{DD} = 15V$	1.5	6.30	1.5	2.7	6.0	1.20	6.0	V
I_{OL}	Low Level Output Current (Note 3)	$V_{IN} = V_{DD}$								
		$V_{DD} = 5V, V_O = 0.4V$	0.64		0.51	0.88		0.36		mA
		$V_{DD} = 10V, V_O = 0.5V$	1.6		1.3	2.25		0.9		mA
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	4.2		3.4	8.8		2.4		mA
I_{OH}	High Level Output Current (Note 3)	$V_{IN} = V_{SS}$								
		$V_{DD} = 5V, V_O = 4.6V$	-0.64		0.51	-0.88		-0.36		mA
		$V_{DD} = 10V, V_O = 9.5V$	-1.6		-1.3	-2.25		-0.9		mA
		$V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$	-4.2		-3.4	-8.8		-2.4		mA
I_{IN}	Input Current	$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 0V$		-0.1		-10^{-5}		-0.1		μA
		$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 15V$		0.1		10^{-5}		0.1		μA

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed; they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Recommended Operating Conditions" and "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: $V_{SS} = 0V$ unless otherwise specified.

Note 3: I_{OH} and I_{OL} are tested one output at a time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Electrical Characteristics CD4093BC (Note 2)											
Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		+25°C			+85°C		Units	
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max		
I _{DD}	Quiescent Device Current	V _{DD} = 5V		1.0				1.0		7.5	μA
		V _{DD} = 10V		2.0				2.0		15.0	μA
		V _{DD} = 15V		4.0				4.0		30.0	μA
V _{OL}	Low Level Output Voltage	V _{IN} = V _{DD} , I _O < 1 μA									
		V _{DD} = 5V		0.05		0		0.05		0.05	V
		V _{DD} = 10V		0.05		0		0.05		0.05	V
		V _{DD} = 15V		0.05		0		0.05		0.05	V
V _{OH}	High Level Output Voltage	V _{IN} = V _{SS} , I _O < 1 μA									
		V _{DD} = 5V	4.95		4.95	5		4.95			V
		V _{DD} = 10V	9.95		9.95	10		9.95			V
		V _{DD} = 15V	14.95		14.95	15		14.95			V
V _{T⁻}	Negative-Going Threshold Voltage (Any Input)	I _O < 1 μA									
		V _{DD} = 5V, V _O = 4.5V	1.3	2.25	1.5	1.8	2.25	1.5	2.3		V
		V _{DD} = 10V, V _O = 9V	2.85	4.5	3.0	4.1	4.5	3.0	4.65		V
		V _{DD} = 15V, V _O = 13.5V	4.35	6.75	4.5	6.3	6.75	4.5	6.9		V
V _{T⁺}	Positive-Going Threshold Voltage (Any Input)	I _O < 1 μA									
		V _{DD} = 5V, V _O = 0.5V	2.75	3.6	2.75	3.3	3.5	2.65	3.5		V
		V _{DD} = 10V, V _O = 1V	5.5	7.15	5.5	6.2	7.0	5.35	7.0		V
		V _{DD} = 15V, V _O = 1.5V	8.25	10.65	8.25	9.0	10.5	8.1	10.5		V
V _H	Hysteresis (V _{T⁺} - V _{T⁻}) (Any Input)	V _{DD} = 5V	0.5	2.35	0.5	1.5	2.0	0.35	2.0		V
		V _{DD} = 10V	1.0	4.3	1.0	2.2	4.0	0.70	4.0		V
		V _{DD} = 15V	1.5	6.3	1.5	2.7	6.0	1.20	6.0		V
I _{OL}	Low Level Output Current (Note 3)	V _{IN} = V _{DD}									
		V _{DD} = 5V, V _O = 0.4V	0.52		0.44	0.88		0.36			mA
		V _{DD} = 10V, V _O = 0.5V	1.3		1.1	2.25		0.9			mA
		V _{DD} = 15V, V _O = 1.5V	3.6		3.0	8.8		2.4		mA	
I _{OH}	High Level Output Current (Note 3)	V _{IN} = V _{SS}									
		V _{DD} = 5V, V _O = 4.6V	-0.52		0.44	-0.88		-0.36			mA
		V _{DD} = 10V, V _O = 9.5V	-1.3		-1.1	-2.25		-0.9			mA
		V _{DD} = 15V, V _O = 13.5V	-3.6		-3.0	-8.8		-2.4		mA	
I _{IN}	Input Current	V _{DD} = 15V, V _{IN} = 0V		-0.3		-10 ⁻⁵		-0.3		-1.0	μA
		V _{DD} = 15V, V _{IN} = 15V		0.3		10 ⁻⁵		0.3		1.0	μA

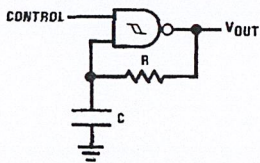
AC Electrical Characteristics*						
T _A = 25°C, C _L = 50 pF, R _L = 200k, Input t _r , t _f = 20 ns, unless otherwise specified						
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
t _{PHL} , t _{PLH}	Propagation Delay Time	V _{DD} = 5V		300	450	ns
		V _{DD} = 10V		120	210	ns
		V _{DD} = 15V		80	160	ns
t _{THL} , t _{TLH}	Transition Time	V _{DD} = 5V		90	145	ns
		V _{DD} = 10V		50	75	ns
		V _{DD} = 15V		40	60	ns
C _{IN}	Input Capacitance	(Any Input)		5.0	7.5	pF
C _{PD}	Power Dissipation Capacitance	(Per Gate)		24		pF

*AC Parameters are guaranteed by DC correlated testing.
Note 2: V_{SS} = 0V unless otherwise specified.
Note 3: I_{OH} and I_{OL} are tested one output at a time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications

Gated Oscillator



TL/F/5982-2

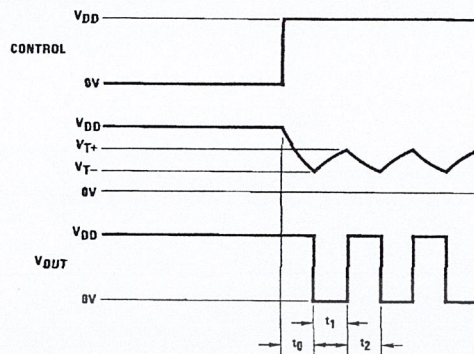
Assume $t_1 + t_2 \gg t_{PHL} + t_{PLH}$ then:

$$t_0 = RC \ln [V_{DD}/V_{T-}]$$

$$t_1 = RC \ln [(V_{DD} - V_{T-})/(V_{DD} - V_{T+})]$$

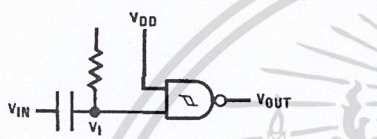
$$t_2 = RC \ln [V_{T+}/V_{T-}]$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{RC \ln \frac{(V_{T+})(V_{DD} - V_{T-})}{(V_{T-})(V_{DD} - V_{T+})}}$$

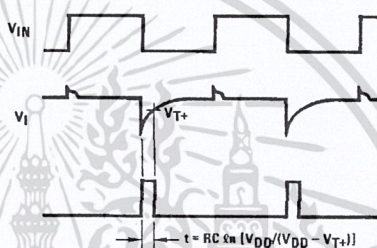


TL/F/5982-3

Gated One-Shot

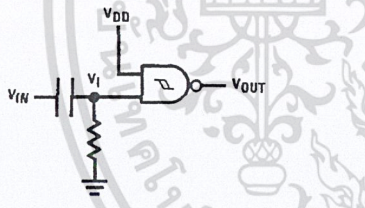


TL/F/5982-4

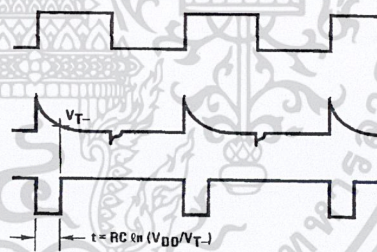


TL/F/5982-5

(a) Negative-Edge Triggered



TL/F/5982-6

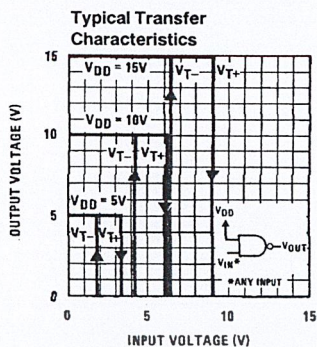


TL/F/5982-7

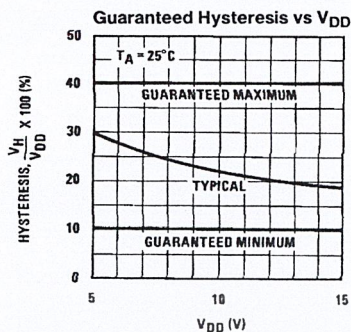
(b) Positive-Edge Triggered

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

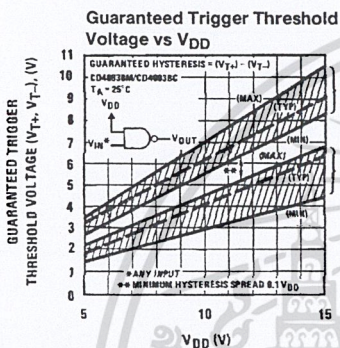
Typical Performance Characteristics



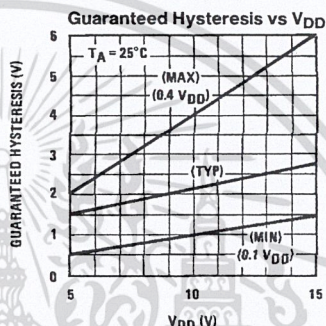
TL/F/5982-8



TL/F/5982-9

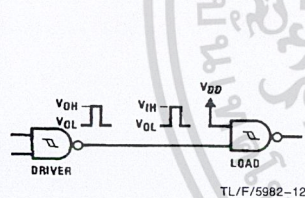


TL/F/5982-10

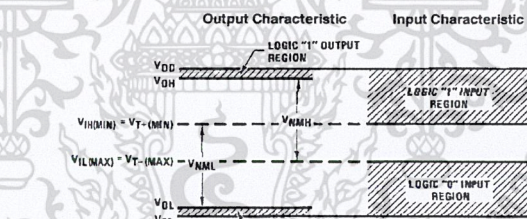


TL/F/5982-11

Input and Output Characteristics



TL/F/5982-12

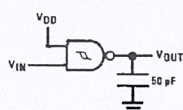


TL/F/5982-13

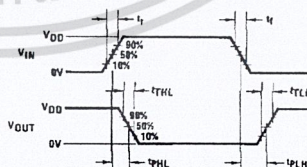
$$V_{NML} = V_{IH(MIN)} - V_{OL} \approx V_{IH(MIN)} - V_{T+ (MIN)}$$

$$V_{NMH} = V_{OH} - V_{IL(MAX)} \approx V_{DD} - V_{IL(MAX)} = V_{DD} - V_{T- (MAX)}$$

AC Test Circuits and Switching Time Waveforms



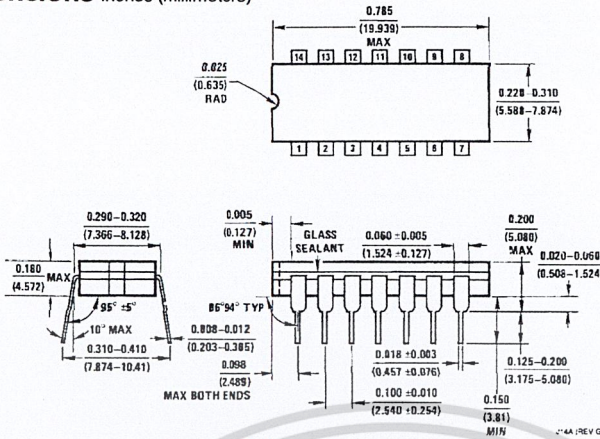
TL/F/5982-14



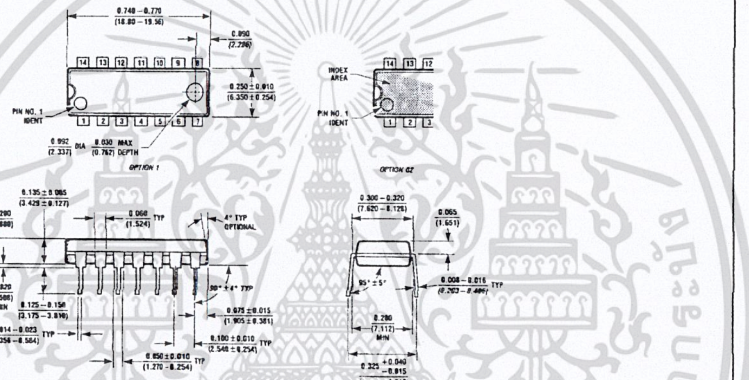
TL/F/5982-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters)



Ceramic Dual-In-Line Package (J)
Order Number CD4093BMJ or CD4093BCJ
NS Package Number J14A



Molded Dual-In-Line Package (N)
Order Number CD4093BM or CD4093BCN
NS Package Number N14A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
1111 West Bardin Road
Arlington, TX 76017
Tel: 1(800) 272-9959
Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
Fax: (+49) 0-180-530 85 85
Email: cnjwge@tevm2.nsc.com
Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
13th Floor, Straight Block,
Ocean Centre, 5 Canton Rd.
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong
Tel: (852) 2737-1600
Fax: (852) 2736-9960

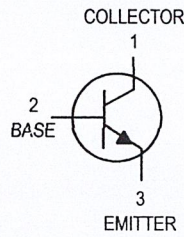
National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-043-299-2309
Fax: 81-043-299-2408

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

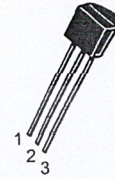
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amplifier Transistors

NPN Silicon



P2N2222A



CASE 29-04, STYLE 17
TO-92 (TO-226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	75	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	6.0	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	600	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5 12	Watts mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 10 \text{ mAdc}, I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	40	—	Vdc
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 10 \text{ } \mu\text{Adc}, I_E = 0$)	$V_{(BR)CBO}$	75	—	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \text{ } \mu\text{Adc}, I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	6.0	—	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 60 \text{ Vdc}, V_{EB(off)} = 3.0 \text{ Vdc}$)	I_{CEX}	—	10	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 60 \text{ Vdc}, I_E = 0$) ($V_{CB} = 60 \text{ Vdc}, I_E = 0, T_A = 150^\circ\text{C}$)	I_{CBO}	— —	0.01 10	μAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 3.0 \text{ Vdc}, I_C = 0$)	I_{EBO}	—	10	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 10 \text{ V}$)	I_{CEO}	—	10	nAdc
Base Cutoff Current ($V_{CE} = 60 \text{ Vdc}, V_{EB(off)} = 3.0 \text{ Vdc}$)	I_{BEX}	—	20	nAdc

P2N2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS				
DC Current Gain ($I_C = 0.1 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $T_A = -55^\circ\text{C}$) ($I_C = 150 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) ⁽¹⁾ ($I_C = 150 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$) ⁽¹⁾ ($I_C = 500 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) ⁽¹⁾	h_{FE}	35 50 75 35 100 50 40	— — — — 300 — —	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ⁽¹⁾ ($I_C = 150 \text{ mA}$, $I_B = 15 \text{ mA}$) ($I_C = 500 \text{ mA}$, $I_B = 50 \text{ mA}$)	$V_{CE(sat)}$	— —	0.3 1.0	Vdc
Base–Emitter Saturation Voltage ⁽¹⁾ ($I_C = 150 \text{ mA}$, $I_B = 15 \text{ mA}$) ($I_C = 500 \text{ mA}$, $I_B = 50 \text{ mA}$)	$V_{BE(sat)}$	0.6 —	1.2 2.0	Vdc

SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS

Current–Gain — Bandwidth Product ⁽²⁾ ($I_C = 20 \text{ mA}$, $V_{CE} = 20 \text{ Vdc}$, $f = 100 \text{ MHz}$)	f_T	300	—	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10 \text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{obo}	—	8.0	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5 \text{ Vdc}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{ibo}	—	25	pF
Input Impedance ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	h_{ie}	2.0 0.25	8.0 1.25	k Ω
Voltage Feedback Ratio ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	h_{re}	— —	8.0 4.0	$\times 10^{-4}$
Small–Signal Current Gain ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	h_{fe}	50 75	300 375	—
Output Admittance ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	h_{oe}	5.0 25	35 200	μmhos
Collector Base Time Constant ($I_E = 20 \text{ mA}$, $V_{CB} = 20 \text{ Vdc}$, $f = 31.8 \text{ MHz}$)	$r_b C_C$	—	150	ps
Noise Figure ($I_C = 100 \mu\text{A}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $R_S = 1.0 \text{ k}\Omega$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	N_F	—	4.0	dB

SWITCHING CHARACTERISTICS

Delay Time	$(V_{CC} = 30 \text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = -2.0 \text{ Vdc}$, $I_C = 150 \text{ mA}$, $I_{B1} = 15 \text{ mA}$) (Figure 1)	t_d	—	10	ns
Rise Time		t_r	—	25	ns
Storage Time	$(V_{CC} = 30 \text{ Vdc}$, $I_C = 150 \text{ mA}$, $I_{B1} = I_{B2} = 15 \text{ mA}$) (Figure 2)	t_s	—	225	ns
Fall Time		t_f	—	60	ns

1. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300 \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$.
2. f_T is defined as the frequency at which $|h_{fe}|$ extrapolates to unity.

SWITCHING TIME EQUIVALENT TEST CIRCUITS

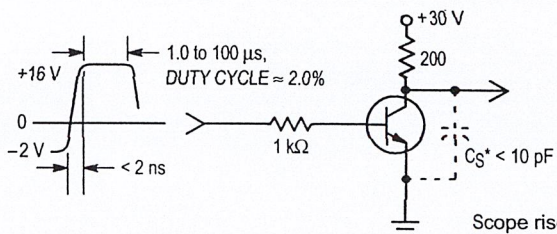


Figure 1. Turn-On Time

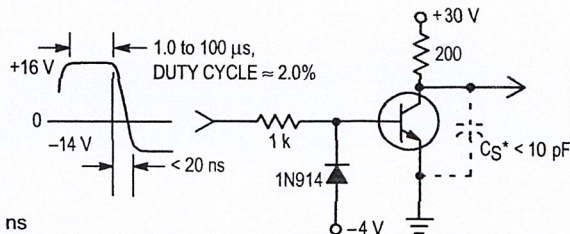


Figure 2. Turn-Off Time

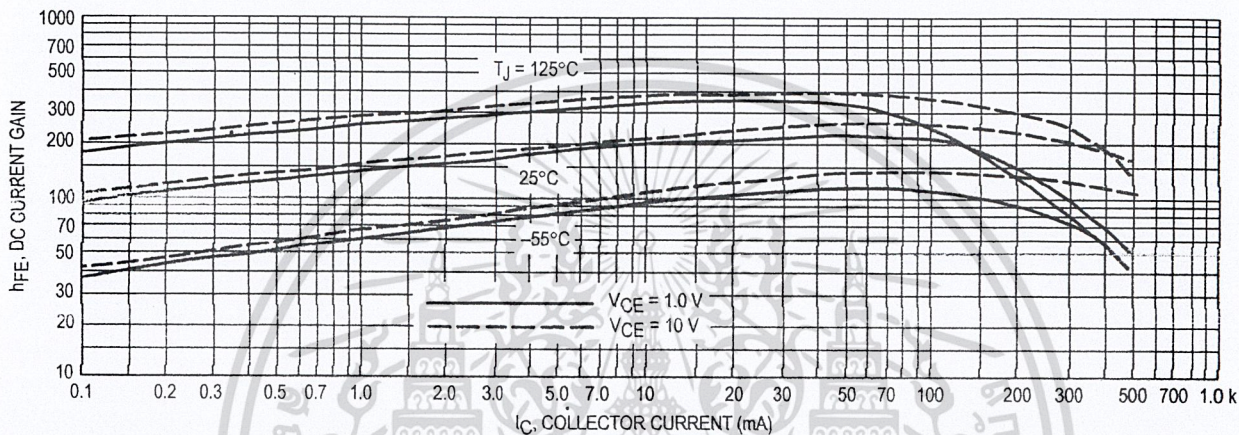


Figure 3. DC Current Gain

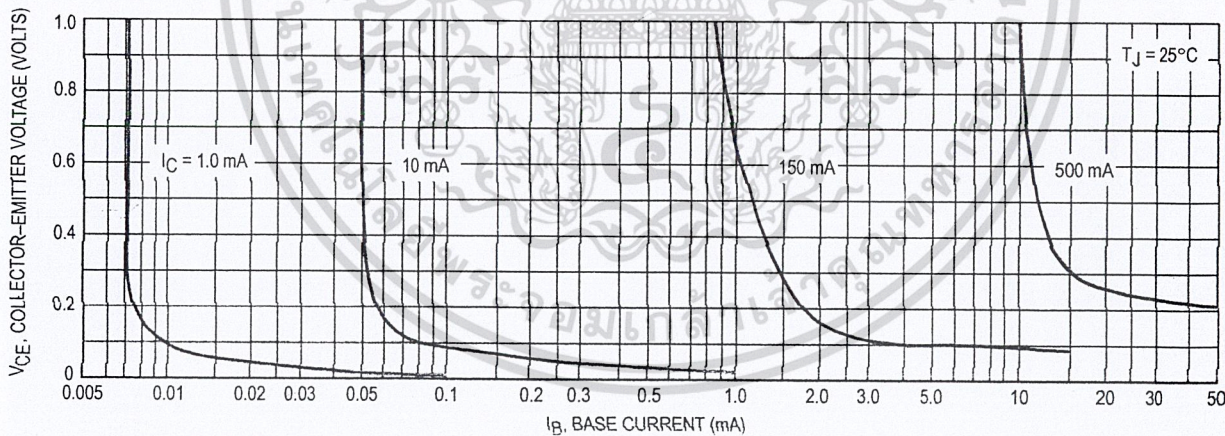


Figure 4. Collector Saturation Region

P2N2222A

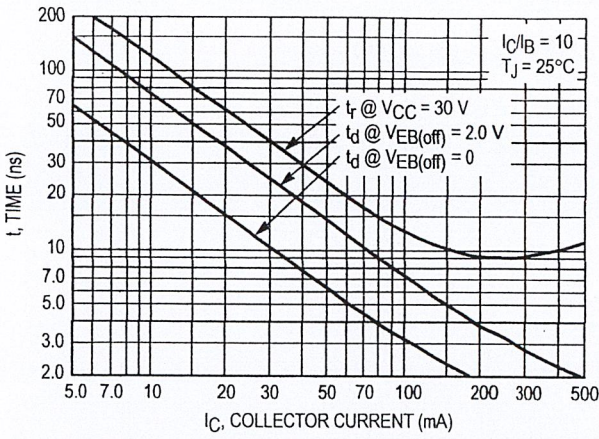


Figure 5. Turn-On Time

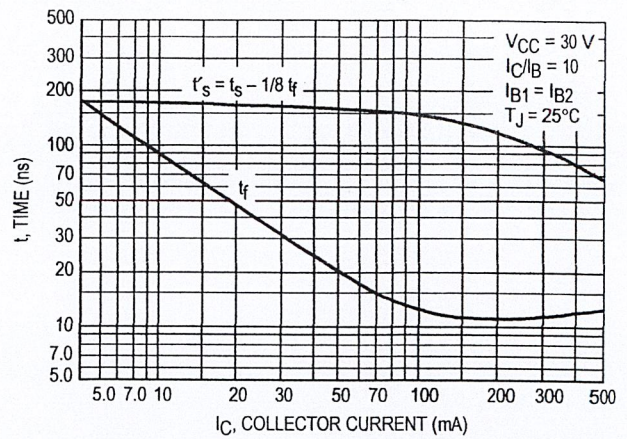


Figure 6. Turn-Off Time

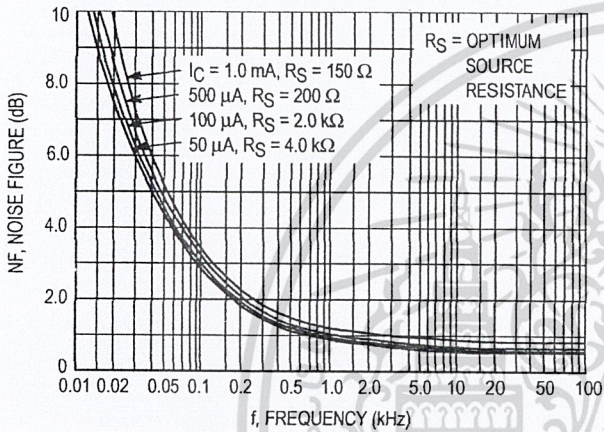


Figure 7. Frequency Effects

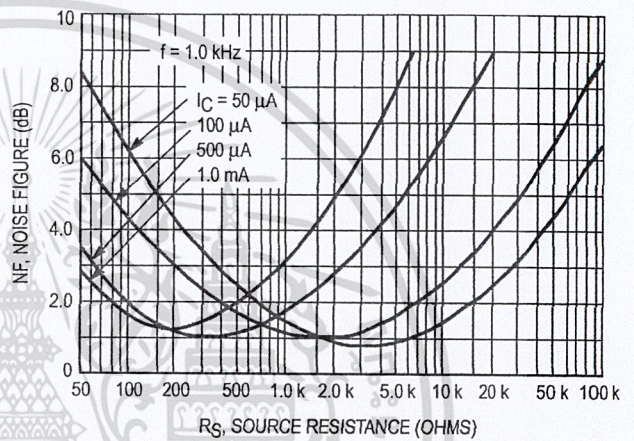


Figure 8. Source Resistance Effects

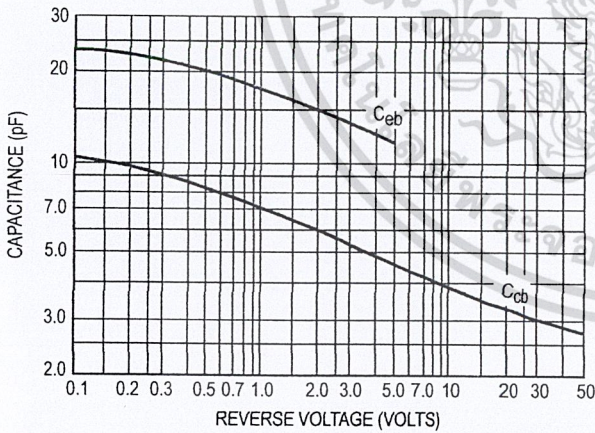


Figure 9. Capacitances

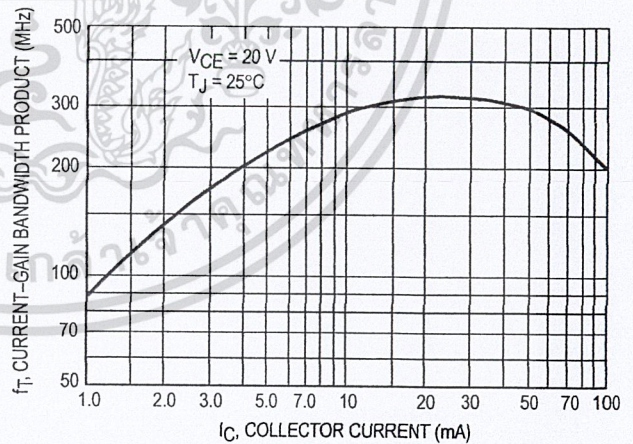


Figure 10. Current-Gain Bandwidth Product

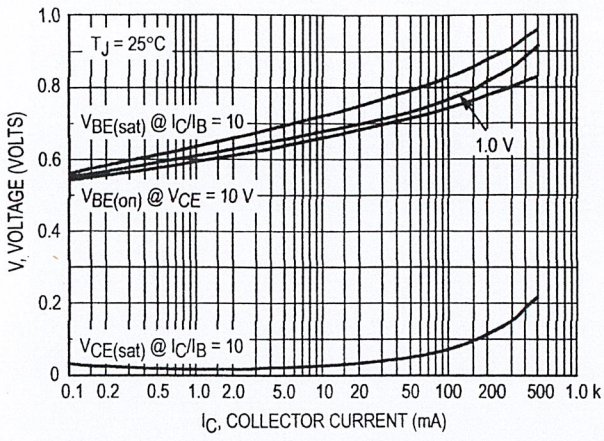


Figure 11. "On" Voltages

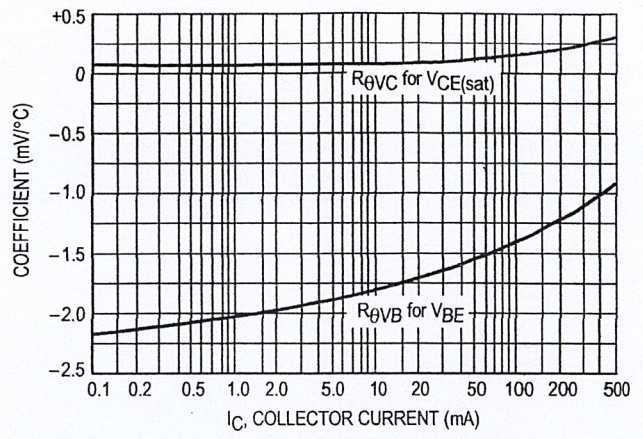


Figure 12. Temperature Coefficients

