

บทที่ 1

บทนำ

กระบวนการ โคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และของแข็ง อีกทั้งสารแขวนลอยด้วยการเติมสารเคมี (โคแอกกูแลนต์) ที่ให้ออนที่มีประจุตรงข้าม เช่น สารส้ม หรือเฟอริกคลอไรด์ซึ่งทำให้ประจุของคอลลอยด์เป็นกลางและเกิดการรวมตัวกัน กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) นั้นใช้หลักการเดียวกันในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยการใส่สารโคแอกกูแลนต์ในรูปของอ็อนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากอิเล็กโทรด ด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วบวก (Anode) และคอลลอยด์ยังถูกกำจัดได้ด้วยเกลือไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ไม่ละลายน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาต่อเนื่องของอ็อนโลหะในน้ำ นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) จะช่วยทำให้คอลลอยด์ที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้นและสามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้งจากผิวน้ำซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation)

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับ โอโซน เพื่อบำบัดน้ำเสียและกลิ่น โดยการออกแบบเครื่องบำบัดในส่วนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการออกแบบด้วยวงจรเรียงกระแส เพื่อใช้ในส่วนควบคุมแรงดัน 0-30V ที่กระแส 10A และทำการออกแบบอิเล็กโทรดสำหรับใช้ในส่วนที่เติมอิเล็กตรอนให้กับน้ำมีสองแบบคืออิเล็กโทรดแบบขนาน และ อิเล็กโทรดแบบอนุกรมที่เป็นการทำให้เกิดกระบวนการจับตะกอน หรือการเกิดฟองด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นการใช้หลักของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เป็นการเกิดการแลกเปลี่ยนคู่ของอิเล็กตรอนที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ขั้วแอโนดจะเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแผ่นขั้วแคโทดจะเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน

ก๊าซโอโซนเกิดจากกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจนจากโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนในอากาศหลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน ซึ่งจะนำไปใช้ในระบบบำบัดทางอุตสาหกรรม ส่วนที่ใช้ผลิตก๊าซโอโซน จะเป็นการใช้หลักการของวงจรสวิทช์ความถี่สูงร่วมกับวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง 30kV ที่ความถี่สูง 30 kHz เพื่อผลิตก๊าซโอโซนสำหรับบำบัดกลิ่นจากน้ำเสีย

1.1 หลักการและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนี้ น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในชีวิตประจำวันมากแทบจะขาดไม่ได้แต่ในขณะเดียวกันจำนวนประชากรมีมากขึ้นความต้องการที่จะใช้น้ำจึงมีมากขึ้น เช่น ใช้น้ำในชีวิตประจำวันใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งในอุตสาหกรรมนั้นได้ก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นอย่างมาก

ดังนั้นโครงการนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยพลังงานไฟฟ้าโดยการทำให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำเป็นตัวการทำให้น้ำเสียถูกทำลายก่อนจะปล่อยน้ำลงแม่น้ำลำคลองซึ่งหลักการโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านขั้วของอิเล็กโทรด และร่วมกับการบำบัดกลิ่นด้วยก๊าซโอโซนซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 4 ซึ่งเป็นส่วนของการทดลอง เราสามารถนำเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยพลังงานไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้กลายเป็นน้ำที่ดื่มได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการแตกตัวและตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาหลักการเกิดก๊าซโอโซนด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงความถี่สูง
3. เพื่อประยุกต์ใช้ไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียและกลิ่น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

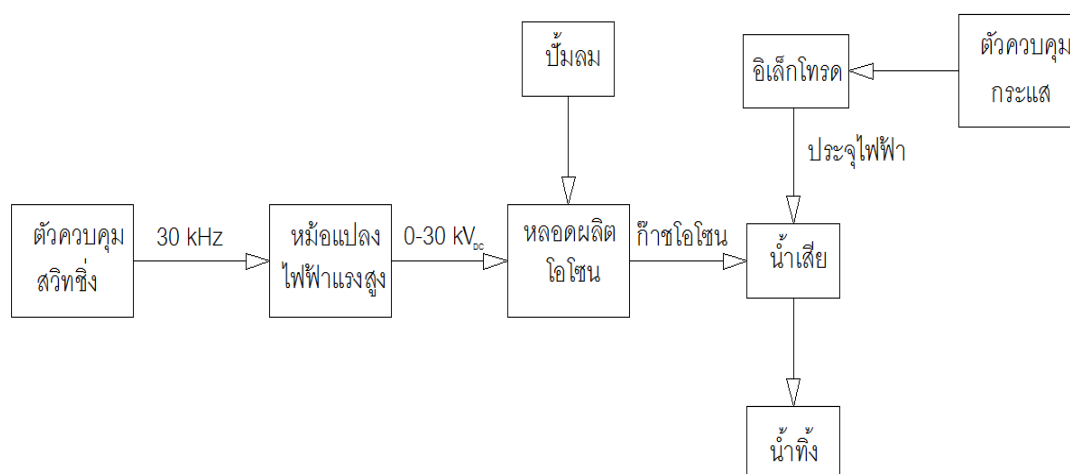
1. สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 0-30 kV, 30 kHz.
2. สร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 0-30V, 10A.

1.4 ประโยชน์ของโครงการ

1. สามารถนำเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับโอโซนเพื่อมาใช้ศึกษาวิจัยการลดมลภาวะทางน้ำได้ต่อไป
2. สามารถนำเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับโอโซนเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในครัวเรือน หรือ สถานประกอบการต่างๆ

1.5 ส่วนประกอบของโครงการ

1. ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูงที่ใช้ผลิตโอโซน
 - วงจรสร้างพัลส์ความถี่สูงด้วย IC #SG3525
 - หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง
 - สร้างหลอดผลิตโอโซนแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
2. ชุดเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย
 - วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วย IC LM723
 - แผ่น Electrode



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างระบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับโอโซน

1.6 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงการที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและออกแบบ
3. จัดซื้ออุปกรณ์
4. ประกอบวงจรและทำการทดสอบ
5. ตรวจสอบข้อผิดพลาด
6. ทดลองและสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ [1], [3], [7]

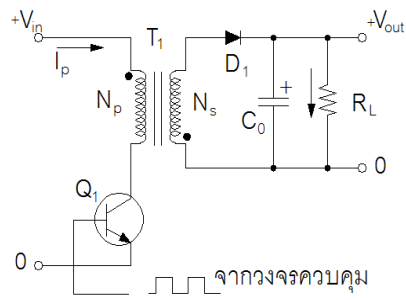
คอนเวอร์เตอร์นับเป็นส่วนสำคัญที่สุดในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าตรงค่าสูงมาเป็นไฟตรงค่าต่ำและสามารถคงค่าแรงดันได้ คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจับวงจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายนั้นมีข้อพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบดังนี้คือ

- ลักษณะการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
- ค่าแรงอินพุตที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
- ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีเอาต์พุตหลายค่าแรงดัน
- การกำเนิดสัญญาณรบกวน RFI/EMI ของตัวคอนเวอร์เตอร์

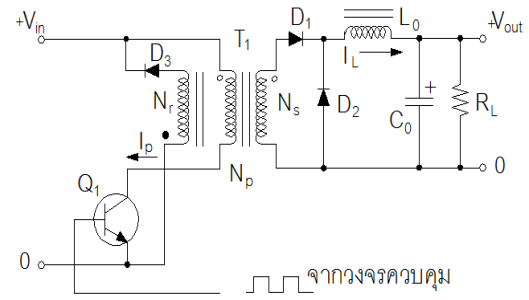
จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะทำให้ผู้ออกแบบทราบขีดจำกัดของคอนเวอร์เตอร์และประเมินราคาเพื่อตัดสินใจเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดได้

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyblack Converter)
2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
3. พูช – พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push – Pull Converter)
4. ฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half – Bridge Converter)
5. ฟูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full – Bridge Converter)

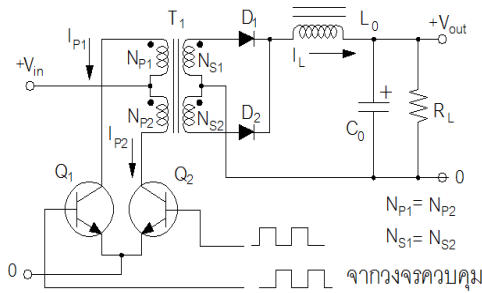
คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบนี้มีลักษณะการทำงานที่ไม่แตกต่างกันจนเกินไปนัก และค่อนข้างง่ายต่อการทำความเข้าใจและศึกษาคอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นคอนเวอร์เตอร์อีกหลายประเภทด้วยการเพิ่มเทคนิคบางประการให้กับคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบไม่ยกกล่าวถึงเช่นเดียวกัน วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ที่ 5 แสดงไว้ในภาพที่ 2.1



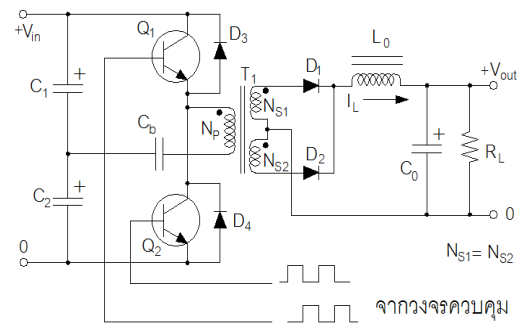
(ก)



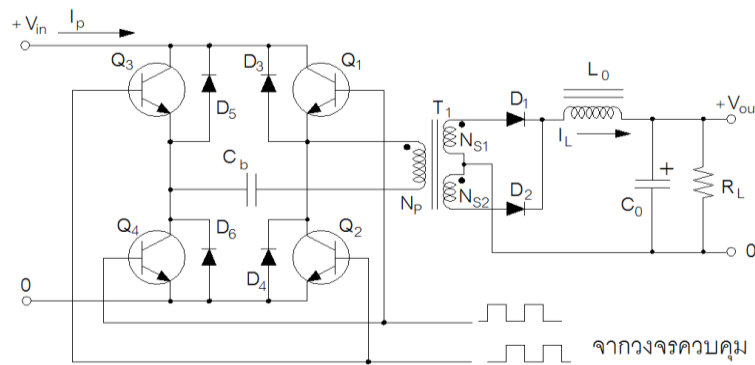
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ

- (ก) ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)
- (ข) ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
- (ค) พูช – พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push – Pull Converter)
- (ง) ฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half – Bridge Converter)
- (จ) ฟูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full – Bridge Converter)

2.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ จากภาพที่ 2.1(ก) เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็นสวิตช์และจะนำกระแสตามคำสั่งพัลส์สี่เหลี่ยมที่ป้อนให้กับขาเบสเนื่องจากหม้อแปลง T_1 จะกำหนดขดไฟรมารีและเซคันดารีให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแสไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแสจึงมีการสะสมพลังงานที่ขดไฟรมารีของหม้อแปลง T_1 แทน เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็ก T_1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วไฟรมารีและเซคันดารี D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงพลังงานที่ถูกสะสมในขดไฟรมารีของหม้อแปลงจะถูกถ่ายทอดออกไปยังขดเซคันดารีและมีกระแสไหลผ่าน ไดโอด D_1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และโหลดได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของการทำงาน Q_1 ช่วงเวลานำกระแสของ Q_1 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงและค่าแรงดันอินพุต

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ และให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI/EMI ข้อนข้างสูงแต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อยและมีราคาถูก

2.1.2 ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์ จากภาพที่ 2.1(ข) จะเห็นได้ว่าฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับ ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แต่หม้อแปลง T_1 ในฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์จะกำหนดขดไฟรมารีและเซคันดารีให้มีเฟสตรงกัน ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแสไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงแต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส กระแสจึงไหลผ่าน ไดโอด D_1 และตัวนำ L_0 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และโหลดได้ ขณะที่กระแสไหลผ่าน L_0 จะมีการสะสมพลังงานไว้ในตัวด้วย เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะไบแอสกลับ จึงไม่มีกระแสไหลจากขดเซคันดารีสนามแม่เหล็กใน L_0 จะยุบตัวทำให้มีการกลับขั้วแรงดันที่ตกคร่อมคั้งนั้นอยู่ไดโอด D_2 ก็จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง L_0 จะถ่ายเทพลังงานออกมาทำให้มีกระแสไหลผ่านตัว L_0 และ D_2 ออกไปยังโหลดได้จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงที่ Q_1 นำกระแสและหยุดนำกระแสทำให้มีการกระเพื่อมขอแรงดันที่เอาต์พุตต่ำกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกันกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่าอย่างไรก็ตามตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์นั้นมีราคาสูงกว่า

2.1.3 พุช – พูลคอนเวอร์เตอร์ พุช – พูลคอนเวอร์เตอร์ เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงตั้งแต่ 500 วัตต์ ขึ้นไปแต่มีข้อเสียคือมักเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของแกน

หม้อแปลงซึ่งจะมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่ายอย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมกระแสจะทำให้ลดปัญหานี้ลงได้ ดังนั้น พุช – พูลคอนเวอร์เตอร์จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังสูงๆ

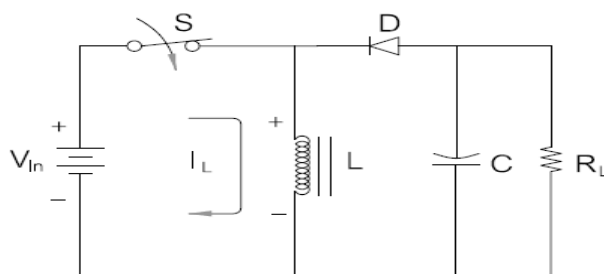
จากภาพที่ 2.1(ค) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลาการทำงานเมื่อ Q_1 นำกระแส D_1 จะอยู่ในลักษณะไบแอสกลับแต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงและนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส Q_2 จะเริ่มนำกระแส D_2 จะอยู่ในลักษณะไบแอสกลับและ D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงและนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้เช่นกันดังนั้น โหลดจึงมีกระแสไหลต่อเนื่องได้ตลอดเวลากระแสที่ได้ทางเอาท์พุตจึงค่อนข้างเรียบอย่างไรก็ตามเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการสร้างพุช – พูลคอนเวอร์เตอร์

2.1.4 ฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ในตระกูลเดียวกับพุช – พูลคอนเวอร์เตอร์และให้กำลังที่ค่อนข้างสูงข้อดีของฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ก็คือเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะไม่นำกระแสต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาแล้วและลดการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ได้

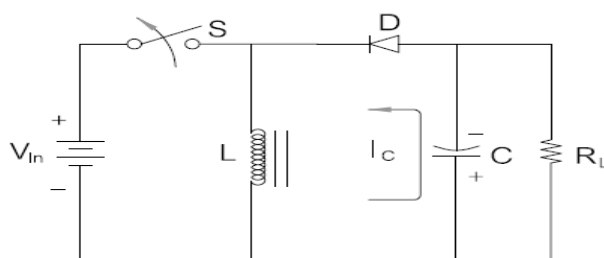
จากภาพที่ 2.1(ง) จะเห็นได้ว่าหากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวที่เหลือจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้นเมื่อ Q_1 และ Q_2 สลับกันนำกระแสผลที่ได้จะมีทำนองเดียวกันกับพุช – พูลคอนเวอร์เตอร์ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อม ขณะทำงานขดของไพรมารีจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตเนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เพื่อแบ่งครึ่งแรงดันกระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารีจึงมีค่าสูงซึ่งเป็นการกำหนดกำลังงานสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์โดยกำลังงานสูงสุดที่ฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์

2.1.5 พูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จากภาพที่ 2.1(จ) จะเห็นได้ว่ามีเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรทั้งหมด 4 ตัวแต่ละตัวจะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ โดย Q_1 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_4 และ Q_2 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_3 กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารีของหม้อแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาล์ฟ – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แต่ข้อได้เปรียบของ พูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ก็คือขณะทำงานที่ขดไพรมารีจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับค่าแรงดันอินพุตที่กระแสไหลผ่านขดไพรมารีจึงมีค่าต่ำกว่า พูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จึงสามารถจ่ายกำลังได้สูงกว่าดังนั้นสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังสูงๆ ตั้งแต่ 500 วัตต์ ถึง 1,000 วัตต์ จึงมักนิยมใช้คอนเวอร์เตอร์แบบพูล – บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

2.2 พื้นฐานการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2 แสดงวงจร FLYBACK CONVERTER หรือ BUCK – BOOST CONVERTER

(ก) เมื่อสวิตช์ปิดวงจร

(ข) เมื่อสวิตช์เปิดวงจร

ภาพที่ 2.2 แสดงวงจร FLYBACK CONVERTER ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อสวิตช์ S ปิดวงจร ภาพที่ 2.2(ก) กระแสจะไหลผ่านขดลวด L เพื่อสะสมพลังงาน ในขณะที่ไดโอด D ได้รับความไบแอสกลับจึงทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่ R_L จนกระทั่งเมื่อสวิตช์ S เปิดวงจร ภาพที่ 2.2(ข) ที่ขดลวด L เกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็กรอบขดลวดจ่ายพลังงานที่ถูกสะสมไว้ให้กับไดโอด D ซึ่งไดโอด D ได้รับความไบแอสตรงเกิดกระแสไหลมีทิศทางดังรูปและเป็นผลทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่ R_L ในลักษณะที่มีชั่วครู่กันข้ามกับชั่วแรงดันอินพุตจากการทำงานของวงจรจะเห็นได้ว่าเกิดกระแสเหนี่ยวนำทั้งที่ด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตซึ่งถ้าสวิตช์ S ปิด-เปิดวงจรอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้กระแสทั้งสองนี้มีลักษณะเป็นพัลส์ (PULSATING) สังเกตได้ว่าขดลวดจะเก็บสะสมพลังงานในช่วงเวลาที่สวิตช์ S เปิดวงจรมันเอง

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรลักษณะบูสต์คอนเวอร์ชันชนิดหนึ่งทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสให้มีระดับแรงดันสูงขึ้น โดยใช้หลักการเก็บสะสม

พลังงานในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะสวิตช์นำกระแส (DT) และจะคายพลังงานไปยังโหลดขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $(1-D)T$ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบมีการแยกกันทางไฟฟ้า คือใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ทำหน้าที่เหมือนตัวเหนี่ยวนำและยังแยกการเชื่อมโยงกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรย้อนกลับไปพิจารณา ภาพที่ 2.2(ก) เป็นวงจร FLYBACK CONVERTER ซึ่งไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตแต่ถ้าพิจารณาที่ภาพที่ 2.2(ข) จะพบว่ามี การแยกกันทางไฟฟ้ากันระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตโดยใช้หม้อแปลงและยังมีการแสดงรูปคลื่นที่สำคัญต่างๆซึ่งมีการทำงานดังนี้คือ เมื่อ Q_1 ปิดวงจร จะเกิดกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิสะสมพลังงานและไดโอด D ถูกไบแอสกลับ เนื่องจากการจัดเรียงขั้วระหว่างขดลวดหม้อแปลง/โช้ค (Transformer/Chock) ด้านอินพุตและเอาต์พุตตรงข้ามกัน เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจร ขั้วของขดลวดทั้งสองจะกลับขั้วเนื่องจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก ไดโอด D นำกระแสตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุและจ่ายกระแสไปยังโหลด จากวงจรสังเกตพบว่า นอกจากจะใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกระบบทางไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่ เป็นโช้ค (CHOKE) อีกด้วย ดังนั้นภาคเอาต์พุตของ FLYBACK CONVERTER จึงไม่จำเป็นต้องมีขดลวดอีก ในทางปฏิบัติ บางครั้งอาจจำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำๆต่อระหว่างขดลวดเรียงกระแสกับตัวเก็บประจุเอาต์พุตเพื่อลดสัญญาณรบกวนในการสวิตซ์ที่ความถี่สูงๆ

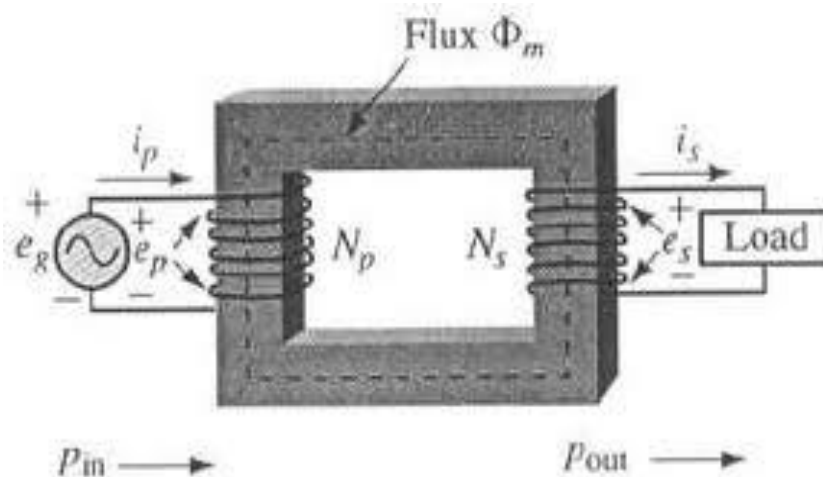
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [2], [3]

หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่เหนี่ยวนำสัญญาณพัลส์สร้างไฟแรงดันสูงหลักการของการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นการนำสัญญาณพัลส์ความถี่สูงส่งเข้าที่อินพุตของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพิ่มแรงดัน จะเหนี่ยวนำแรงดันของสัญญาณพัลส์ให้มีแรงดันสูงขึ้นเป็นหมื่น โวลต์ ส่งผ่านไดโอดทนต่อแรงดันสูงแปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงที่มีแรงดันสูง โดยไดโอดทนแรงดันสูงที่ตั้งอยู่ในหม้อแปลงฟลายแบคจะหันด้านแอนโอดเข้าหาไฟสลับแรงดันสูงซึ่งเหนี่ยวนำมาโดยยอมให้แรงดันสูงด้านซีบวกรวนไปได้ ดังนั้นจะมีแรงดันไฟฟ้าระดับหมื่น โวลต์ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดของหม้อแปลงแต่ละตัวและจากคุณสมบัติของหม้อแปลงฟลายแบคจึงได้แรงดันไฟฟ้าสูงไปประยุกต์ใช้กับแท่งอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปผลิตไอโซน

2.3.1 ทฤษฎีหม้อแปลงพื้นฐาน

พื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ขดลวดทองแดงสองขดพันรอบแกนแม่เหล็กโดยขดลวดทองแดงด้านที่รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานจะเรียกว่า ขดปฐมภูมิ ขณะที่ขดลวดทองแดงที่ต่ออยู่กับด้าน โหลดเรียกว่า ขดทุติยภูมิ

นอกจากนั้นการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากด้านแหล่งจ่ายไปยังโหลดจะอาศัยสนามแม่เหล็กเป็นตัวกลางในการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าดังกล่าว



ภาพที่ 2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงจะมีแรงดันเอาต์พุตสูงหรือต่ำเกิดจากสัดส่วนการพัน โดยกำหนดให้

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (2.1)$$

ดังนั้นหม้อแปลงก็จะสามารถทำงานเป็น Step – Up หรือ Step – Down ได้โดยสามารถทำให้แรงดันที่ขดทุติยภูมินั้นสูงกว่าขดปฐมภูมิและถ้าเพิ่มขดลวดที่ทุติยภูมิอีกหลายๆขดเราก็จะได้แรงดันเอาต์พุตอีกหลายระดับตามสัดส่วนการพันเช่นกัน ประโยชน์ที่สำคัญอีกข้อหนึ่งโดยใช้ลักษณะสมบัติของหม้อแปลงดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นคือการแยกกันทางไฟฟ้า (Electronic Isolation) ที่เกิดขึ้นระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

จากความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

$$e = NA_e \left(\frac{dB}{dt} \right) 10^{-8} \quad (2.2)$$

เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์ B ที่แน่นอนได้โดยกำหนดการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในส่วนที่เป็นเชิงเส้นของกราฟ ดังสมการ

$$B_{\max} = \frac{(V_p) \times 10^8}{KfN_pA_e} \quad (2.3)$$

เมื่อ	V_p	=	แรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิ, V
	N_p	=	จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ
	f	=	ความถี่, Hz
	A_e	=	พื้นที่ของแกน, cm^2
	K	=	4.44 สำหรับภาคคลื่นไซน์ และ 4.0 สำหรับภาคคลื่นสี่เหลี่ยม
	B_{\max}	=	ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด, G

ปกติแล้วผู้ออกแบบหม้อแปลงมักจะกำหนด B_{\max} ด้วยตนเอง ดังนั้นภายในบริเวณเชิงเส้นตรงของกราฟ B – H จุดที่เหมาะสมที่สุดก็คือ B_{\max} จากสมการที่ (2.3) จะได้จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ ดังนี้

$$N_p = \frac{(V_p) \times 10^8}{4fB_{\max}A_e} \quad (2.4)$$

ในการเลือกแกนนั้นก็ยังมีตัวพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ อีก 2 ตัว ตัวแรกก็คือพื้นที่การพันของแกน (หรือบอบบิ้น) ซึ่งจะต้องเลือกให้กว้างพอขนาดของเส้นลวดเพื่อให้เกิด Winding Loss น้อยที่สุดและข้อที่สองคือ Core ‘ Power Handling Capability

$$P_{out} = (1.16B_{\max}fdA_eA_c)10^{-9} \quad (2.5)$$

เมื่อ	P_{out}	=	Power Handling of Core, W
	B_{\max}	=	ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด, G
	f	=	ความถี่, Hz
	d	=	ความหนาแน่นกระแสของเส้นลวด, $\frac{A}{m^2}$
	A_e	=	พื้นที่ของแกน, cm^2
	A_c	=	พื้นที่การพันของบอบบิ้น, cm^2

ผู้ผลิตบางรายใช้สัญลักษณ์ W_a สำหรับพื้นที่หน้าตัดของบอบบิ้น แทนสัญลักษณ์ A_c โดยปกติแล้วความหนาแน่นกระแสมีหน่วยใน Circular Mills Per Ampere ใช้สัญลักษณ์เป็น D , โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์กับ d ได้ดังนี้

$$N_p = \frac{1.27 \times 10^6}{D} \quad (2.6)$$

แทนสมการ 2.6 ลงในสมการ 2.5 จะได้

$$P_{out} = \frac{(0.68A_e A_c D) 10^3}{f B_{max}} \text{ cm}^4 \quad (2.7)$$

สมการ 2.7 เป็นสมการที่ใช้กันมากในการคำนวณ และเลือกขนาดของแกนหม้อแปลง

$$A_e A_c = \frac{(0.68 P_{out} D) 10^3}{f B_{max}} \text{ cm}^4 \quad (2.8)$$

หากระแสด้านปฐมภูมิ I_{pp}

$$I_{pp} = \frac{2P_{out}}{\eta V_{in} \delta_{max}} \quad (2.9)$$

เมื่อ

P_{out} = Power Handling of Core, W

δ_{max} = ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM

หาขนาดลวด

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นลวด} &= \text{ความหนาแน่นกระแส} \times \text{กระแส} \\ &= D \times I \quad (\text{cm/A}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

ความหนาแน่นกระแส D จะถูกกำหนดโดยผู้ผลิตเส้นลวดที่ความหนาแน่นกระแส 1,000 Circular Mills Per Ampere (cm/A) ในทางปฏิบัติจะใช้ความหนาแน่นกระแส ค่าที่ได้คือ 400 cm/A เพื่อความปลอดภัย

2.3.2 การเลือกลักษณะแกนและวัสดุ ถึงแม้จะมีวัสดุเหล็กมากมาย ที่จะสามารถนำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงได้นั้น วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแกนหม้อแปลงมากที่สุดก็คือวัสดุเฟอร์ไรต์ เนื่องจากวัสดุเฟอร์ไรต์ มีความหนาแน่นฟลักซ์ไม่สูงไปนักและวัสดุเฟอร์ไรต์ส่วนมากจะมี B_{sat} อยู่ในย่าน 3,000 – 5,000 G แต่มี Core Loss ค่าที่ความถี่สูงง่ายในการพัน Coupling

และง่ายในการประกอบ ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์ที่นิยมใช้กับงานที่ต้องการกำลังสูงๆ ได้แก่ E-E, E-I, E-C และแกนพอท (Pot) ซึ่งแกนพอทนั้น เหมาะกับงานที่ต้องการกำลังงานต่ำไปจนถึงปานกลาง (20 – 200 W) และแกนทั้งหมดที่กล่าวมานั้นมีคุณสมบัติฟลักซ์รั่วไหล (Flux Leakage) ต่ำ สำหรับงานที่ต้องการกำลังสูงๆ มักจะนิยมใช้แกน E-E , E-I และ E-C ซึ่งแกน E-C เป็นการออกแบบรวมกันระหว่าง แกน E-E และแกนพอทโดยคำนึงถึงประโยชน์ร่วมกันผู้ผลิตนั้นๆ จะต้องแจกแจงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ในการออกแบบวัสดุเฟอร์ไรต์หม้อแปลงและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นลวด AWG (American Wire Gauge) และความหนาแน่นกระแส

2.3.3 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Cores) กรรมวิธีการผลิตเฟอร์ไรต์จะมีความแตกต่างจากสารแม่เหล็กอื่นๆ เพราะวัตถุดิบที่ใช้ (raw materials) จะมาจากออกไซด์ของโลหะชนิดต่างๆ (Oxides of Various Metals) เช่น เหล็ก (Iron) แมงกานีส (Manganese) สังกะสี (Zinc) ซึ่งโดยทั่วไปออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นฉนวนเป็นผลทำให้เฟอร์ไรต์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ทำให้เหมาะกับงานที่ใช้กับความถี่ย่านเมกะเฮิรตซ์ และด้วยกรรมวิธีการผลิตโดยการเผาส่วนผสมจากออกไซด์ของเหล็ก (Iron Oxide) ร่วมกับออกไซด์หรือคาร์บอนของแมงกานีสและสังกะสี หรืออาจจะร่วมกับออกไซด์หรือคาร์บอนของนิเกิลและสังกะสี เป็นต้น ทำให้แกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นสารเซรามิกซ์ (Ceramic Material) โดยที่ MnZn Ferrite จะใช้กับงานที่มีความถี่ใช้งานสูงถึง 1-2 MHz ซึ่งหมายรวมถึง Mower Ferrite Materials ที่นิยมใช้ในแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง ในขณะที่ NiZn Ferrite ซึ่งมีความซึมซาบได้ต่ำและมีความต้านทานไฟฟ้าสูงทำให้มีกำลังกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนต่ำซึ่งนิยมใช้ตั้งแต่ความถี่ 1 MHz จนกระทั่งถึงหลายร้อยเมกะเฮิรตซ์โดยทั่วไป ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของเฟอร์ไรต์ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1,500 - 3,000 G นอกจากนั้น แกนเฟอร์ไรต์ยังสามารถประยุกต์ใช้งานเป็น ได้ทั้งตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้าเหตุผลที่แกนเฟอร์ไรต์เป็นที่นิยมใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็เพราะว่า มีราคาถูกกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนจะมีค่าต่ำกว่าแกนที่ทำจากสารแม่เหล็กชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักของแกนเฟอร์ไรต์คือการเป็นเซรามิกซ์นั้นก็หมายถึงโครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์จะเปราะและแตกหักง่ายและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวมีค่าต่ำกว่าแกนแม่เหล็กชนิดอื่นๆ

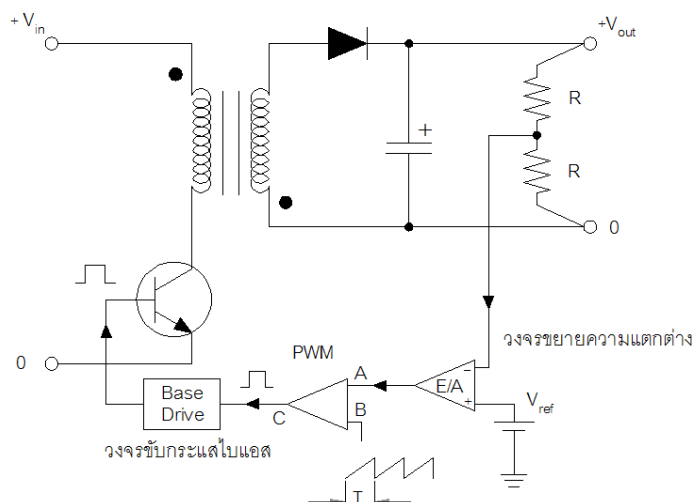


ภาพที่ 2.4 แกนแม่เหล็กแบบเฟอร์ไรต์

2.4 วงจรควบคุมสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์เกือบทุกแบบจะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลา นำกระแส (t_{ON}) ของ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปจึงมักนิยมใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation - PWM) เป็นหลักการ ใช้ PWM เพื่อควบคุมช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้สองลักษณะ คือ ควบคุมจากแรงดันและควบคุมจากกระแส

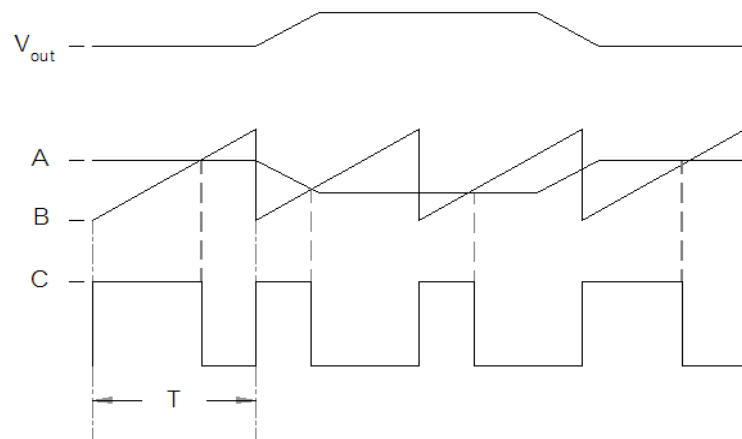
2.4.1 วงจรควบคุมในโหมดแรงดัน การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดแรงดัน (Voltage Mode Control) จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันที่เอาต์พุตมาควบคุมช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพื่อการคงค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นหลักวงจรพื้นฐานเป็นดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงวงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน

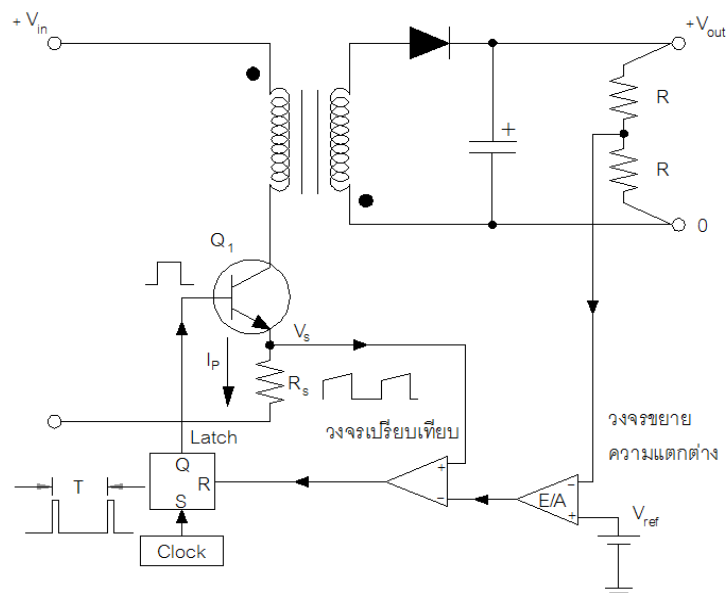
จากรูป วงจรควบคุมจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุตและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ของวงจร เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุตค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความแตกต่าง E/A ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีความกว้างที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดูเลชันของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ขาอินเวอร์ตซึ่งผลต่างของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180 องศา กล่าวคือเมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้นแรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วยและช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ t_{ON} ก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงแรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้นความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น t_{ON} ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันขณะวงจรทำงานจะเป็นดังภาพที่ 2.6 ตัวอย่าง ไอซีที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดันได้แก่ MC34060, MC34166 และ TL494 เป็นต้น



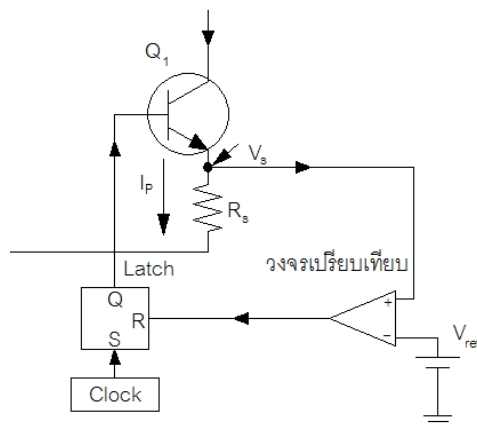
ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะความกว้างของพัลส์จาก PWM

2.4.2 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส การคงค่าแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส (Current Mode Control) มีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่าโหมดควบคุมจากแรงดันจึงเป็นวงจรควบคุมที่นิยมใช้กันมากวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแสเนี่ยังคงใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชันเช่นกัน วงจรพื้นฐานแสดงในรูป 2.7



ภาพที่ 2.7 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา เราจะแยกคิดการทำงานของวงจรถวลุมด้วยการตัดวงจรขยายความแตกต่าง E/A ออกไปก่อนและกำหนดขาอินเวอร์ตติงของวงจรถวลุมเปรียบเทียบให้ต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิง V_{cr} ดังรูป 2.9 วงจร Latch จะทำงานโดยขา Q ของวงจรถวลุม จะมีสถานะเป็น High เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา S และขา Q จะมีสถานะเป็น Low เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา R

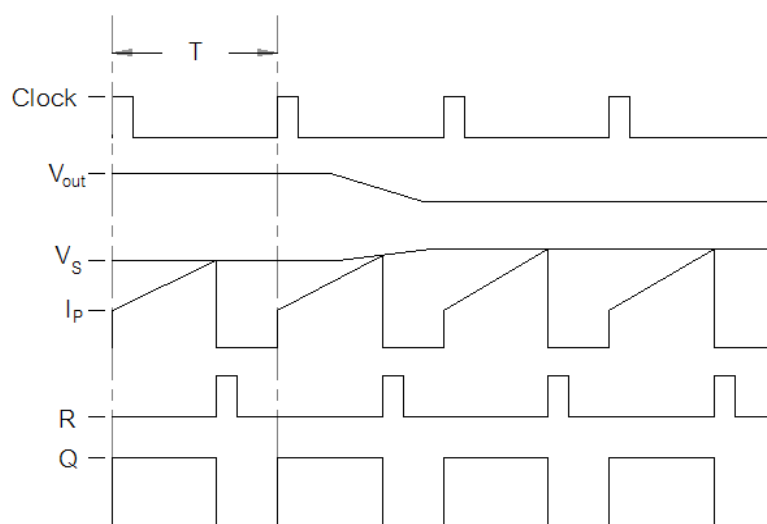


ภาพที่ 2.8 วงจรถวลุมเมื่อตัดตัวขยายความแตกต่างออก

เมื่ วงจรทำงานวงจรถวลุมกำเนิดสัญญาณนาฬิกาจะให้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่มีคาบเวลาคงที่ไปกระตุ้นที่ขา S ของ Latch ขา Q จึงมีสถานะเป็น High เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเริ่มนำกระแส เมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดโรมารีและตัวต้านทาน R_s ที่ต่ออนุกรมไว้กับ Q_1 ทำให้เกิดแรงดัน V_s ตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_s ด้วยแรงดันตกคร่อม R_s ที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{cr} โดยวงจรถวลุมเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อค่าของ V_s เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าค่าของแรงดันอ้างอิง V_{cr} เอาต์พุตของวงจรถวลุมเปรียบเทียบจะมีสถานะเป็น High และไปกระตุ้นที่ขา R ของวงจรถวลุม ทำให้ขา Q มีสถานะเป็น Low และเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแส จนกว่าที่ขา S ของวงจรถวลุม จะได้รับการกระตุ้นจากสัญญาณนาฬิกาอีกครั้ง

จะเห็นได้ว่าความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ที่ขา Q ของวงจรถวลุม จะถูกควบคุมโดยค่าของแรงดัน V_s ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_s ถ้าค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แรงดัน V_s จะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง V_{cr} ได้เร็วขึ้นด้วยทำให้ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ลดลง เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีช่วงเวลานำกระแสน้อยลงไปในทางกลับกัน ถ้าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลงแรงดัน V_s จะเพิ่มขึ้นได้ช้า ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์จึงเพิ่มขึ้น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีช่วงเวลานำกระแสมากขึ้นด้วยจะเห็นได้ว่าเมื่อโพลดลงที่คอนเวอร์เตอร์จะ

สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้โดยไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับแรงดันที่เอาต์พุตเลยทำให้คอนเวอร์เตอร์ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้อย่างรวดเร็วพิจารณาวงจรควบคุมอีกครั้งตามวงจรในภาพที่ 2.7 เมื่อต่อวงจรขยายความแตกต่าง E/A เพิ่มเข้ามา วงจรในลักษณะนี้เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A จะมีค่ามากขึ้นเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะใช้เวลานานกว่าจะกลับคืนค่าด้วยเพื่อให้ค่าแรงดัน V_S มากกว่าแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A ในทางกลับกันเมื่อแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A จะมีค่าลดลงเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จึงใช้เวลาในการกลับค่าด้วยดังนั้นคอนเวอร์เตอร์จะสามารถคงค่าแรงดันที่เอาต์พุตเอาไว้ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่โหลดลักษณะรูปคลื่นและแรงดันขณะที่วงจรทำงานเป็นดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจร

จากลักษณะการทำงานดังกล่าวทำให้วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแสมีข้อดีมากกว่าวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันดังนี้

- ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้รวดเร็วกว่า ทำให้ลดปัญหาการคงค่าแรงดันที่เอาต์พุตเมื่อเกิดทรานเซียนส์และการกระเพื่อมของแรงดันสูงที่แรงดันอินพุตเพราะไม่ต้องรอสัญญาณป้อนกลับจากเอาต์พุต
- สามารถป้องกันกระแสไหลเกินได้ด้วยการจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ขดไฟโรมารี่ในลักษณะพัลส์ต่อพัลส์อย่างรวดเร็ว

- ให้ค่าไลน์เรกูเลชันที่ต่ำมาก
- โดยการจำกัดกระแสสูงสุดที่ขดไฟพรมารี ปัญหาการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของ พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จะไม่เกิดขึ้น
- สามารถต่อขานานคอนเวอร์เตอร์หลายชุดเข้าด้วยกันได้ เพื่อให้จ่ายกระแสได้มากขึ้น และ กระแสเฉลี่ยที่คอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะมีค่าเท่ากัน

2.5 หลักการกระบวนการแตกตัวของก๊าซโอโซน [8]

อากาศมีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) 79% และก๊าซออกซิเจน (O_2) 21% โดยประมาณนอกจากนั้นเป็นก๊าซเฉื่อยและไอน้ำ โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบไปด้วยออกซิเจน 3 อะตอม จับตัวกันอยู่ในสถานะไม่เสถียรสลายตัวได้ง่ายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณที่ผลิต ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจนจากโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนในอากาศหลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซนซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดทางอุตสาหกรรมต่อไป กระบวนการเกิดโอโซนได้จากกระบวนการ 2 ชนิด คือ กระบวนการ “ไอออไนเซชัน” หรือ กระบวนการแยกตัวในการแยกตัวของก๊าซนั้น ไอออไนเซชัน คือ การเพิ่มของประจุ แบบทวีคูณนำไปสู่เบรคดาวน์ในฉนวนที่พิจารณาทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งทะลุผ่านฉนวนสิ่งที่เกิดตามมาคือความร้อนเนื่องจากกระแสไหลจากการเบรคดาวน์ที่เกิดขึ้นทำให้โอโซนมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัวดังนั้นในการผลิตโอโซนจึงไม่ควรเกิดเบรคดาวน์ขึ้น นั่นคือ พลังงานที่อิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (W_p) แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของออกซิเจนออกจากกัน

ระดับพลังงานของออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับด้วยกัน แต่ออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นโอโซนได้มี 2 ระดับด้วยกัน คือ

1. การแตกตัวของโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ คือ ปฏิริยาจุดพลังงานแหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าปฏิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับพลังงานของออกซิเจน
2. การจับตัวของอะตอมอิสระกับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นโอโซน ดังสมการที่ 2.11



เมื่อ M คือก๊าซอื่นอาจเป็น O_2 หรือ N_2 ซึ่งเป็น 3rd Collision Partner ช่วงเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยานี้อยู่ในย่าน 1 – 2 us แต่ข้อควรระวัง คือ ในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการผลิตด้วย

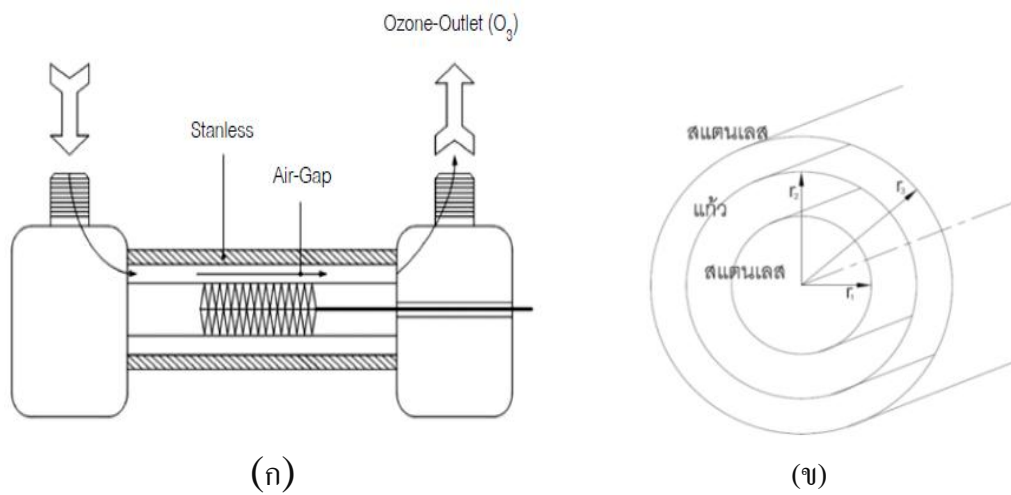


เมื่อ O_3 คือโอโซนที่สภาวะถูกกระตุ้นชั่วคราว ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มของการจับตัวระหว่าง O กับ O_2 จากสมการที่ 2.11 ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.12 เกิดเนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมออกซิเจนอิสระมากเกินไปในอากาศที่ผ่านกระบวนการ เพื่อผลิตโอโซนจะได้สารผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในก๊าซหลังการแตกตัวที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 300 K (79% N_2 + 21% O_2) นอกจากโอโซนแล้วยังพบออกไซด์ประเภท N_2O และ N_2O_5 ด้วยซึ่งระดับความหนาแน่นต่ำกว่าโอโซนแต่ปริมาณที่ตรวจพบจะเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่คุณภาพก๊าซที่ใช้ไม่เหมาะสม คือ ความชื้นสูง ออกไซด์เหล่านี้ส่งผลเสียต่อชุดและปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ดังนั้นระบบเตรียมก๊าซก่อนกระบวนการจึงเป็นส่วนสำคัญของระบบส่วนหนึ่งด้วย เมื่อ พิจารณาแหล่งพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.12 แล้วพบว่าพลังงานเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างอะตอมมูลฐานของการผลิตโอโซน การเลือกย่านพลังงานที่เลือกใช้อย่างเหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการสร้างดีขึ้น นั่นคือการออกแบบส่วนผลิตของก๊าซจึงต้องใช้ความรู้เบื้องต้นเรื่องทฤษฎีจลน์ของก๊าซและสนามไฟฟ้าแรงสูง

2.6 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดโอโซน

ส่วนที่พิจารณาเป็นอันดับที่แรก คือ ส่วนของเครื่องกำเนิดโอโซน เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่กำหนดขนาดและความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบที่ออกแบบ นอกจากนี้การออกแบบส่วนกำเนิดโอโซนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาหลายๆข้อด้วยกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ลักษณะสนามไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ งานผลของความถี่ และประเภทการแตกตัวของก๊าซแล้วยังต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมได้แก่อุณหภูมิ-ความชื้นและอัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องด้วยซึ่งในบทความนี้ได้เลือกใช้เล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน 2 ชั้น ดังภาพที่ 2.10 โดยขั้นตอนการออกแบบเครื่องผลิตโอโซนเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานพันธะและความต้องการ

พลังงานของปฏิกิริยาเคมีในการผลิตโอโซนส่วนการออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการแตกตัวของก๊าซเพื่อสามารถพิสูจน์ทฤษฎีจากการคำนวณทางเคมี และสามารถผลิตโอโซนโดยควบคุมเงื่อนไขการเกิดได้



(ค)

ภาพที่ 2.10 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน

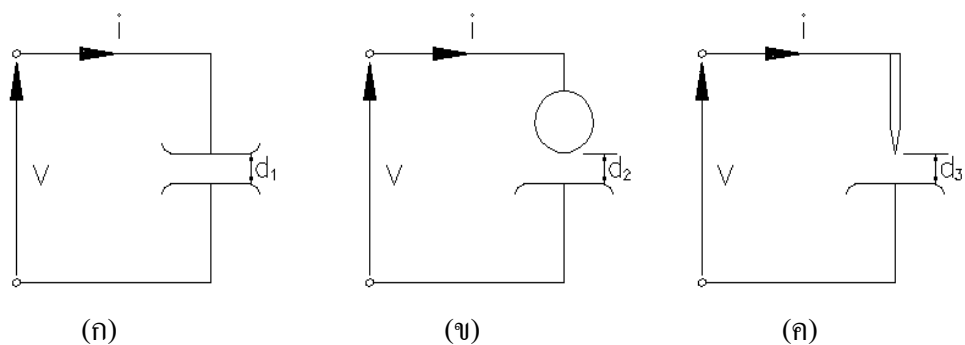
(ก) โครงสร้างภายในขั้วอิเล็กโทรด

(ข) พื้นหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด

(ค) ขั้วอิเล็กโทรด

2.7 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า [2], [4]

โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและแบบไม่สม่ำเสมอสูง



ภาพที่ 2.11 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

2.7.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าที่เท่ากันทุกจุดดังเช่น ช่องว่างในช่องระหว่างอิเล็กโตรด ระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = E = \frac{V}{d} \quad (2.13)$$

- เมื่อ
- V = แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด
 - d = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
 - E = ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด
 - E_{\max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

2.7.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (ข, ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อย

ก็ขึ้นกับลักษณะแห่งเรขาคณิต ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14

$$E_{\max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.14)$$

โดยที่ η^* = แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.15)$$

โดยที่ E_{av} = ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{V}{d}$

ค่าของ η^* คือ ครอบคลุมให้ทราบว่าลักษณะของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมีมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าจึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรคควาน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.16)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา หรือ ปริติสซาร์จเกิดก่อนเบรคควาน์ กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรคควาน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหล และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรคควาน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ (E_b)

ในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะเช่นนี้แม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรคควาน์แต่จะเกิดโคโรนา ในบริเวณใกล้เคียง ๆ ผิว คือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่น ๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา

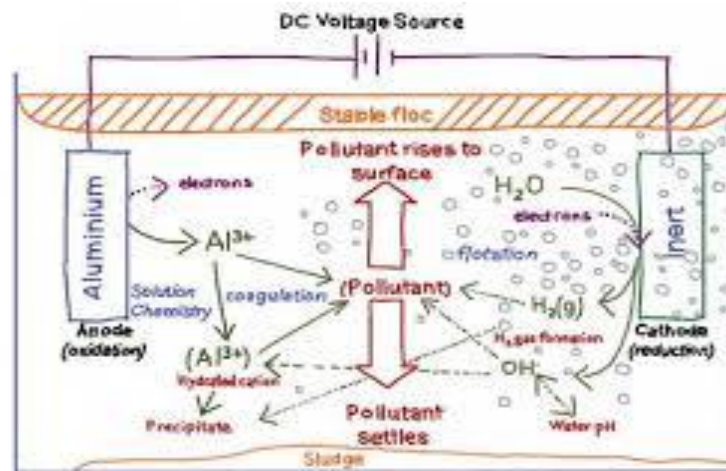
ฉะนั้นในช่องว่างอากาศจะเกิดดิซซาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่าง) เรียกว่า ดิซซาร์จบางส่วนปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วง ๆ การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ ดังสมการที่ 2.16

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

โดยที่ E_i = ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดขึ้น
 V_i = แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิดขึ้น
 d = ระยะแกป

2.8 การจับก้อนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) [5], [6]

กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าสร้างปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำลายเสถียรภาพการเกาะตัวของโมเลกุลสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำให้แยกตัวออกไปดังภาพที่ 2.12 และสิ่งเจือปนเหล่านี้จะค่อยๆ จับกลุ่มรวมตัวกันเองใหม่กลายเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการเลี้ยงตะกอนให้ลอยขึ้นและเมื่อตกตะกอนก็สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ในที่สุดกระบวนการจับก้อนด้วยไฟฟ้าหรือกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นเทคนิคไฟฟ้าเคมีชนิดอิเล็กโทรลิซิสหรือการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้ เช่น การกำจัดสารปนเปื้อนหรือสารแขวนลอยบางชนิดที่ปะปนอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส คือกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ที่ปกติเกิดขึ้นเองไม่ได้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทอิเล็กตรอน ต่ออยู่กับอิเล็กโทรดคู่หนึ่งคือแอโนดซึ่งแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น และแคโทดซึ่งมีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นโดยทั่วไปจะใช้ สังกะสี เหล็ก ทองแดง หรืออลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด อิเล็กโทรดทั้งสองนี้จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นสารละลายเพราะไอออนองค์ประกอบไม่ทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรดทำหน้าที่สร้างอิเล็กตรอนให้ครบวงจรอิเล็กโทรไลต์เสริมที่ใช้ทั่วไปคือ KCl $NaCl$ NH_4NO_3 H_2SO_4 เป็นต้น



ภาพที่ 2.12 การแยกตะกอนน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

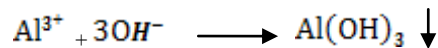
ปฏิกิริยาเคมีและกลไกการเกิดโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำ ได้แก่ การนำไฟฟ้า pH ขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำ กลไกการเกิดอออนจะขึ้นกับชนิดของอิเล็กโทรดที่ใช้ดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) มีดังต่อไปนี้

สำหรับอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม :



ในสารละลายที่เป็นด่าง :



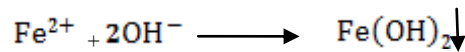
ในสารละลายที่เป็นกรด :



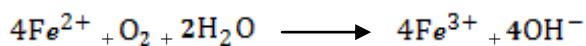
สำหรับอิเล็กโทรดเหล็ก :



ในสารละลายที่เป็นด่าง :



ในสารละลายที่เป็นกรด :

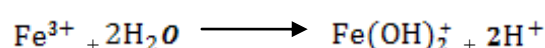
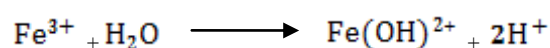


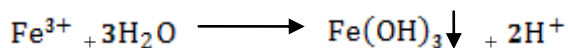
และ ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซออกซิเจน $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4e^{-}$

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) มีดังต่อไปนี้

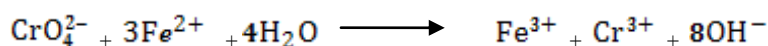
ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจน $2\text{H}_2\text{O} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^{-}$

ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะไปเกาะติดกับของแข็งแขวนลอย และลอยตัวขึ้นผิวน้ำ Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อน้ำโดยขึ้นกับค่า pH ในสภาวะที่เป็นกรดจะได้ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดังสมการต่อไปนี้

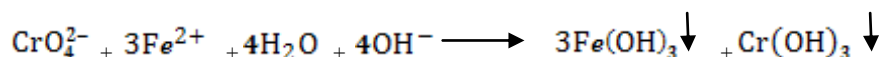




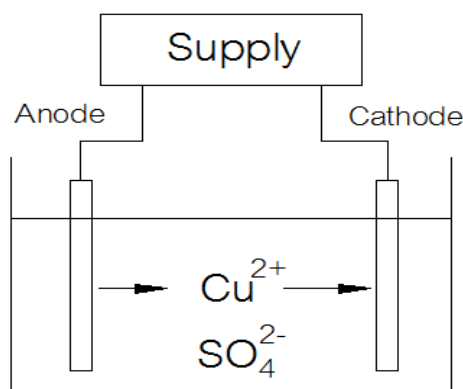
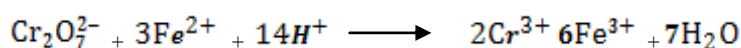
ในสถานะเป็นด่างจะได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และอาจพบ $\text{Fe}(\text{OH})_6^-$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ร่วมด้วย สำหรับน้ำเสียที่มี Cr^{6+} หรือ CrO_4^{2-} เป็นองค์ประกอบสามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการ EC ที่ใช้เหล็กโทรดที่เป็นเหล็ก โดยอ็อกไซด์ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นสามารถรีดิวซ์ Cr^{6+} ให้เป็น Cr^{3+} ในสถานะที่เป็นด่าง ดังสมการต่อไปนี้



หรือ



Cr^{3+} จะถูกกำจัดได้ด้วยการตกผลึกเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เมื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำเสีย นอกจากนี้ Fe^{2+} ยังสามารถรีดิวซ์ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ในสถานะที่เป็นกรดดังสมการต่อไปนี้

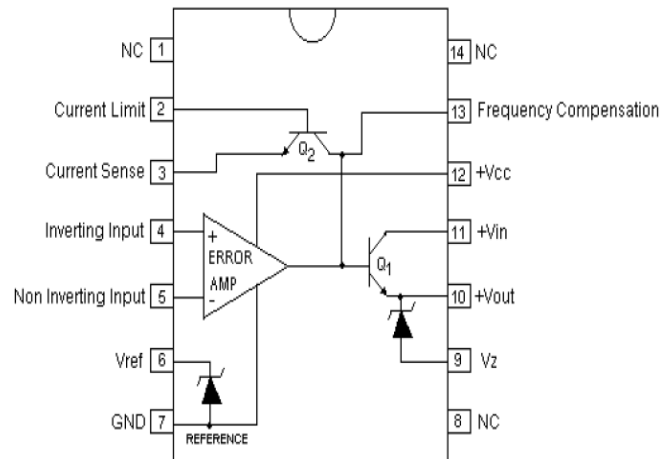


ภาพที่ 2.13 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำอิเล็กโทรลิซิส

2.9 วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วย IC LM723 [9]

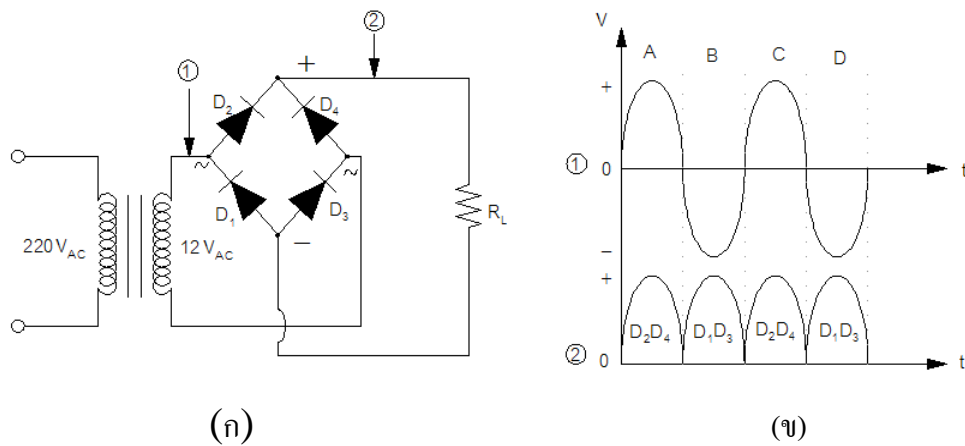
ไอซี LM723 จะมีลักษณะ 2 แบบ คือ แบบตัวถัง TO-100 มี 10 ขา และแบบตัวถัง DIP ซึ่งมี 14 ขา สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 150 mA และสามารถขยายกระแสได้มากกว่า 10 A โดยใช้ทรานซิสเตอร์มาต่อภายนอกที่สำคัญสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 2 V ถึง 37 V และสามารถใช้ทำเป็นวงจรเรียงกระแสแบบเชิงเส้นและแบบสวิตซ์ซึ่งได้ด้วยลักษณะวงจรสมมูลภายในของไอซี LM723C จะประกอบด้วยออปแอมป์ที่ใช้ทำวงจรเรียงกระแสหลายตัวซึ่งสามารถแยกออก

ได้ 4 ส่วน คือ แรงดันอ้างอิงวงจรถ่ายค่าผิดพลาดทรานซิสเตอร์ขยายกระแสและการจำกัดค่ากระแส ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 วงจรสมมูลภายใน IC LM723

วงจรวอร์เรจกระแสดำเนิน ใช้ไดโอดในการเรียงกระแส 4 ตัว การทำงานแต่ละครั้งไดโอดทำงานเป็นชุด 2 ตัว ลักษณะวงจรและแรงดันที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.15 วงจรวอร์เรจกระแสดำเนินแบบบริดจ์ภาพที่ 2.15(ก) เป็นวงจรวอร์เรจกระแสดำเนินแบบบริดจ์มีไดโอด D_1 - D_4 เป็นวงจรวอร์เรจกระแสดำเนิน T_1 เป็นชนิดธรรมดาไม่มีแทปกกลาง (CT) วัตต์สัญญาณที่จุด 1 และจุด 2 ออกมาได้เหมือนกับเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงแทปกกลางทุกประการการทำงานของวงจรตามภาพที่ 2.15(ข) อธิบายได้ดังนี้ ที่จุด 1 เมื่อมีแรงดันไฟสลับชั๊ปกวักตำแหน่ง A ป้อนเข้ามาไดโอด D_2 - D_4 ได้รับไบอัสตรงมีกระแสไหลผ่าน D_2 , RL และผ่าน D_4 ครบวงจรได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง A ส่วนไดโอด D_1 , D_3 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแสเมื่อมีแรงดันไฟสลับชั๊กลบตำแหน่ง B ของจุด 1 ป้อนเข้ามาไดโอด D_1 , D_3 ได้รับไบอัสตรงนำกระแสมีกระแสไหลผ่าน D_3 , RL และผ่าน D_1 ครบวงจรได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง B ส่วนไดโอดไดโอด D_2 , D_4 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแสเมื่อมีแรงดันไฟสลับชั๊ปกวักตำแหน่ง C ของจุด 1 ป้อนเข้ามาอีกครั้งไดโอด D_2 , D_4 ได้รับไบอัสตรงนำกระแสเป็นการทำงานเหมือนกับที่ตำแหน่ง A ทุกประการได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง C และเมื่อมีแรงดันไฟสลับชั๊กลบของจุด 1 ที่ตำแหน่ง D ป้อนเข้ามาอีกครั้งไดโอด D_1 , D_3 ได้รับไบอัสตรงนำกระแสเป็นการทำงานซ้ำเหมือนกับที่ตำแหน่ง B ทุกประการได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง D

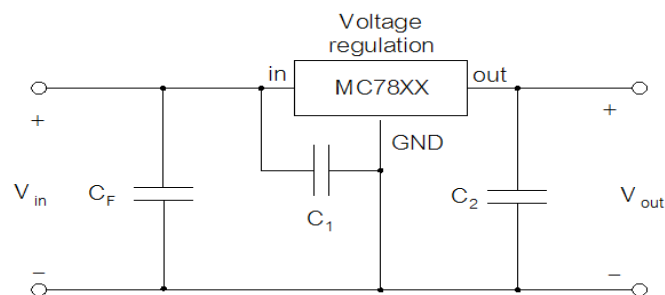


ภาพที่ 2.15 เรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

(ก) เรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

(ข) สัญญาณจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง

วงจรเรกกูเรเตอร์โดยใช้ไอซี 3 ขาแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่ วงจรมาตรฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ใช้ MC78xx เป็นวงจรเรกกูเรเตอร์ดังภาพที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าขา In ของ MC78xx จะต่อกับไฟบวกส่วนขา GND จะต่อกับไฟลบ C₁ ใส่ไว้เพื่อลดความเหนี่ยวนำภายในไอซีซึ่งมักใช้ค่า 1 μF แบบแทนทาลัมหรือ 0.1 μF แบบเซรามิก ส่วน C₂ มีไว้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนซึ่งมักใช้ค่า 1 μFแบบแทนทาลัม หรือ 0.1 μF แบบเซรามิก การป้องกันแรงดันที่ขา in และขา Out ของ MC78xx จะต้องมีค่าต่างกันพอสมควร โดยดูจากค่า V_{in} -V_{out} ใน Data Sheet เช่น MC7805 ค่า V_{in} -V_{out} = 2 V ฉะนั้นแรงดันที่ขา in ต้องป้อนมากกว่า 7 V ขึ้นไป แต่ต้องน้อยกว่าค่า I_n(Max)Vซึ่งจาก Data Sheet มีค่าเท่ากับ 35 V



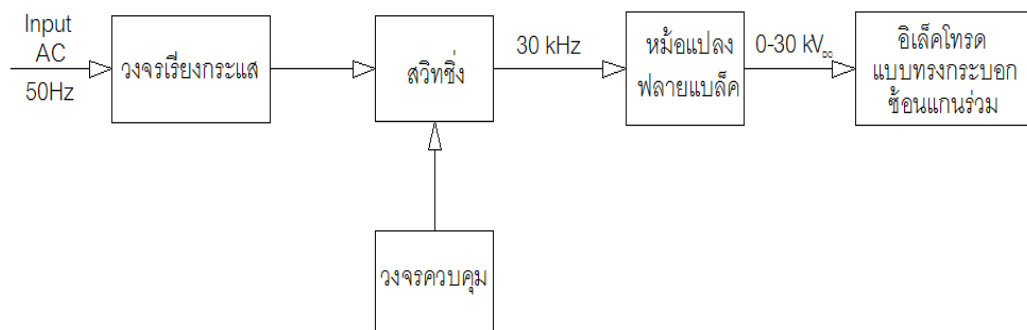
ภาพที่ 2.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC78xx

บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

3.1 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง

หลักการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง ใช้หลักการเพิ่มแรงดันทางด้านเอาต์พุตด้วยวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ โดยในโครงงานนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำในวงจร ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง ได้ดังภาพที่ 3.1



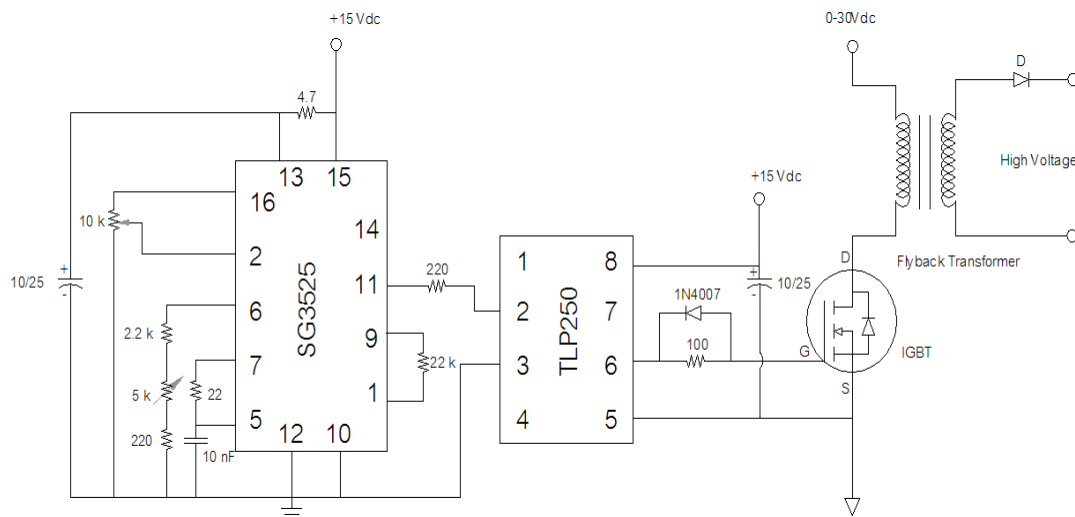
ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{ac} ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์
2. วงจรการสวิตซ์ชิ่งความถี่สูง (High Frequency Switching) ประกอบไปด้วยวงจรควบคุมการขับเคลื่อน (Gate Drive) ที่สร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ 30 kHz. และวงจรการสวิตซ์ชิ่งด้วยเพาเวอร์มอสเฟต (Power Mosfet) ทำหน้าที่สวิตซ์ชิ่งวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์
3. วงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงความถี่สูงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเหนี่ยวนำในวงจร โดยมีแรงดันทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-30 kV.

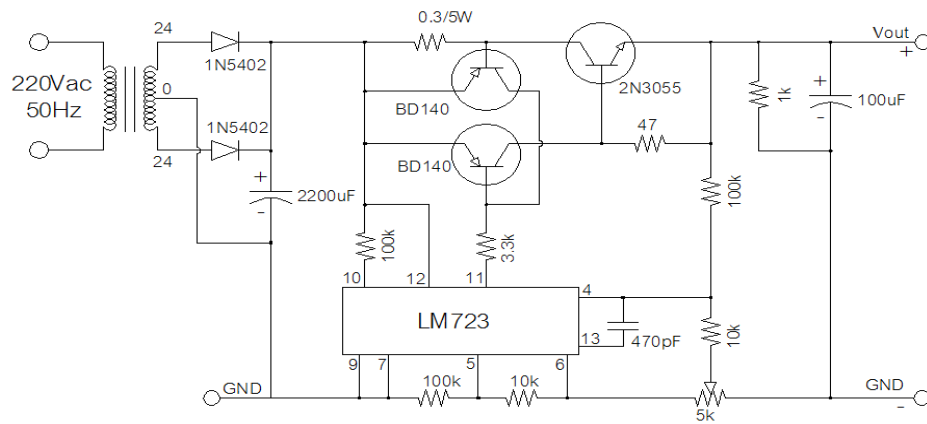
4. ชุดอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนรับแรงดันสูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดการดิซชาร์จเป็นไอโซนในการบำบัดกลิ่นจากน้ำเสีย

รายละเอียดในการออกแบบวงจรแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง สามารถอธิบายและเขียนเป็นวงจรทั้งหมดได้ดังภาพที่ 3.2 โดยมีเนื้อหาต่อไปนี้

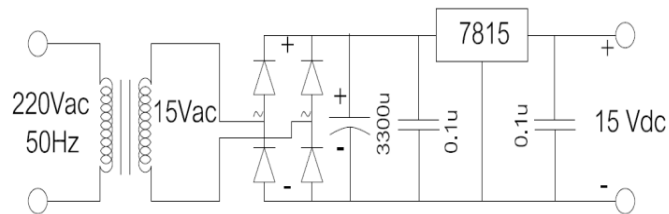


ภาพที่ 3.2 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงความถี่สูง

3.1.1 วงจรเรียงกระแส วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220Vac. และแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันได้ 0-37 V. โดยภายในวงจรเรียงกระแสแสดงดังภาพที่ 3.3(ก) จะรับแรงดันจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V. ให้เป็น 24 V. และชุดไดโอดบริดจ์เรียงกระแสแปลงไฟกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงและส่งเข้าวงจรเร็กกูเรเตอร์ (U4 # LM723CM) โดยสามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามต้องการที่ความต้านทาน (VR) โดยรูปการประกอบวงจรส่วนเรียงกระแสแสดงดังภาพที่ 3.4(ก) ส่วนวงจรเรียงกระแสในภาพที่ 3.3(ข) ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับ ไอซี SG3525 และ TLP 250 รูปของวงจรเรียงกระแสแสดงดังภาพที่ 3.4(ข)



(ก)

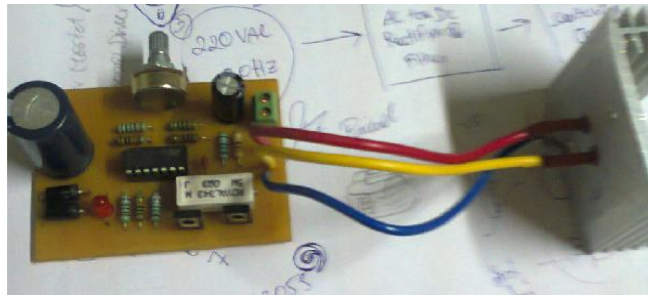


(ข)

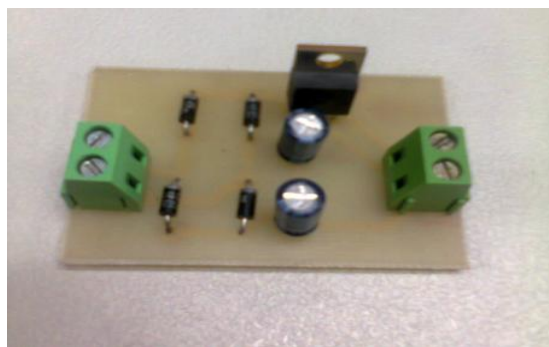
ภาพที่ 3.3 วงจรเรียงกระแส

(ก) วงจรควบคุมกระแสด้วย ไอซี LM723

(ข) วงจรเรียงกระแส 15 V โดยใช้ไอซี 3 ขา



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 รูปการประกอบวงจรเรียงกระแส

(ก) วงจรควบคุมกระแสด้วย ไอซี LM723

(ข) วงจรเรียงกระแส 15 V โดยใช้ไอซี 3 ขา

3.1.2 วงจรควบคุมการขับเคลื่อน ในวงจรควบคุมการขับเคลื่อนเป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการสวิตช์ซึ่งของไอจีบีที ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ IC # SG3525 ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ (f) ของสัญญาณสามารถกำหนดได้จากค่าความต้านทาน R_T และค่าคาปาซิเตอร์ C_T ดังสมการต่อไปนี้

$$T = R_T \times C_T \quad (3.1)$$

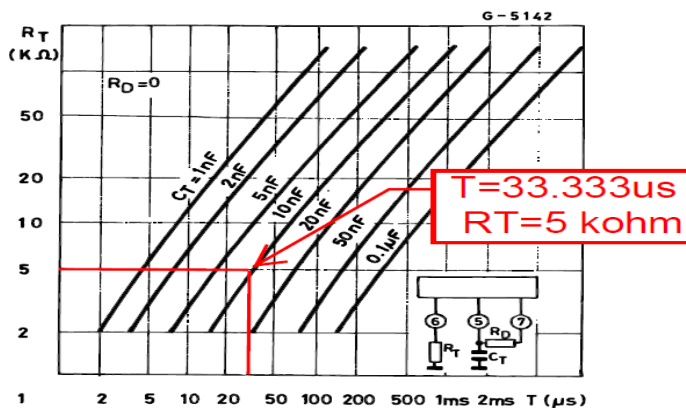
เมื่อ T คือคาบของสัญญาณดังนั้น

$$f = 1/T$$

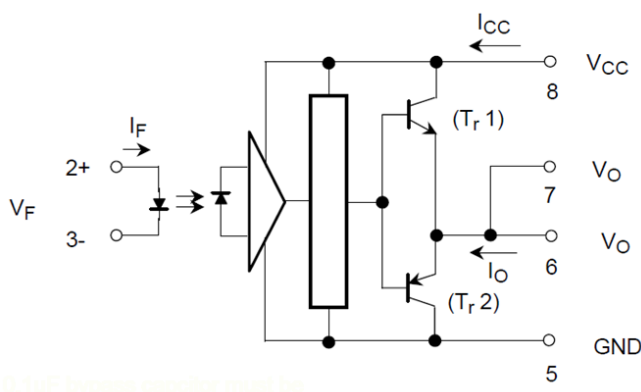
(3.2)

หรือทำการเลือกค่าความต้านทาน R_T และค่าคาปาซิเตอร์ C_T จากตารางใน Data Sheet ของไอซี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดค่าความถี่ที่เหมาะสมกับการสร้างกระแสตรงแรงดันสูงไว้ที่ 30kHz. ($T = 33.333 \mu s$.) และทำการคำนวณหาค่าความต้านทาน R_T และค่าคาปาซิเตอร์ C_T ด้วยวิธีการเปิดตารางใน Data Sheet ของไอซี ซึ่งจะได้ค่า $R_T = 5 k\Omega$ และค่า $C_T = 10 \mu F$ ดังแสดง

ได้ดังรูปที่ 3.5 ส่วน IC # TLP250 เป็นวงจรที่ใช้ขับ ไอจีบีที ให้ On – Off ตามสัญญาณ Output ของ วงจร Driver.



ภาพที่ 3.5 การเลือกค่าความต้านทาน R_T และค่าคาปาซิเตอร์ C_T จากตารางใน Data Sheet



ภาพที่ 3.6 วงจรภายใน IC TLP250

3.1.3 ไอจีบีที (Isulated Gate Bipolar Transistors: IGBT) IGBT คือ ทรานซิสเตอร์กำลัง ที่ควบคุมด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน เป็นผลทำให้มีความถี่ในการสวิตช์สูงกว่าทรานซิสเตอร์กำลัง แต่ก็ไม่สูงไปกว่ากรณี MOSFETs อย่างไรก็ตาม IGBT จะมีคุณลักษณะของการขับและคุณลักษณะด้านออกดีกว่าแบบ BJTs (Superior Drive and Output Characteristics) IGBT จะเหมาะกับงานที่ต้องการพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงๆ ที่ความถี่สวิตช์ซึ่งสูงถึง 20 kHz พิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ IGBT จะมีค่าประมาณเท่ากับ 1,700 โวลต์ และ 2,400 แอมแปร์ ตามลำดับ

ไอจีบีทีเหมาะสำหรับการใช้งานหลากหลายที่คล้ายกับมอสเฟสกำลังแต่มีพิกัดที่ใหญ่กว่า และสามารถออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งด้านบวกและด้านลบสามารถทนกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้มากจนอาจไม่จำเป็นต้องมีวงจรถักเก็บเบอร์

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้งาน

อุปกรณ์	ความสามารถ ส่งผ่านกำลัง	ความเร็วในการ สวิตซ์	ความสามาถทน แรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการ ควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางและค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟสกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

3.1.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงหรือหม้อแปลงฟลายแบ็ค ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ และเพิ่มระดับแรงดัน (Step-Up Transformer)

หม้อแปลง Flyback พิกัดหม้อแปลง $V_{in} = 30 \text{ V}$, $V_{out} = 30 \text{ kV}$, $f = 30 \text{ kHz}$ ใช้แกน UR40DA. 4 แกนประกบกับดั่งนั้นพื้นที่ของบอบบิ้น $A_c = 6.44 \text{ cm}^2$

คำนวณขดลวดด้านปฐมภูมิ N_p

$$N_p = \frac{V_p \times 10^8}{4fB_{max}A_c} \quad (3.3)$$

$$= \frac{30 \times 10^8}{4(30000)(3000)(6.44)}$$

$$= 1.30 \text{ รอบ, เลือกพันที่ 2 รอบ \#}$$

คำนวณขดลวดด้านทุติยภูมิ N_s

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 N_s &= N_p \times \frac{V_s}{V_p} \\
 &= 2 \times \left(\frac{30000}{30} \right) \\
 &= 2,000 \text{ รอบ} \quad \#
 \end{aligned}$$

หากระแสค้ำานปฐมภูมิ I_{pp}

$$\begin{aligned}
 (3.5) \quad I_{pp} &= \frac{2P_{out}}{\eta V_{in} \delta_{max}} \\
 I_{pp} &= \frac{2(150)}{0.8(30)(0.5)} \\
 &= 25 \text{ A}
 \end{aligned}$$

หากระแสค้ำานทุติยภูมิ I_s

$$\begin{aligned}
 (3.6) \quad \frac{I_s}{I_p} &= \frac{E_p}{E_s} \\
 I_s &= \frac{E_p}{E_s} \times I_p \\
 &= \left(\frac{30}{30000} \right) \times 25 \\
 &= 0.025 \text{ A}
 \end{aligned}$$

หาขนาดลวดค้ำานปฐมภูมิ

$$\text{ขนาดเส้นลวด} = \text{ความหนาแน่นกระแส} \times \text{กระแส} \quad (3.7)$$

$$= (400) \times (25)$$

$$= 10,000 \text{ Circular mils.}$$

เลือกค่าที่ใกล้เคียง ดังนั้นใช้ลวด AWG เบอร์ 10 #

หาขนาดลวดด้านทุติยภูมิ

$$\text{ขนาดเส้นลวด} = \text{ความหนาแน่นกระแส} \times \text{กระแส}$$

$$= (400) \times (0.025)$$

$$= 10 \text{ Circular mils.}$$

เลือกค่าที่ใกล้เคียง ดังนั้นใช้ลวด AWG เบอร์ 40 #

หมายเหตุ * ขนาดของลวดพันหม้อแปลงสามารถหาได้จากตารางเทียบขนาดลวดสายไฟฟ้าจากภาคผนวก ก



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.7 หม้อแปลงที่ได้จากการออกแบบ

(ก) ภาพการพันหม้อแปลง

(ข) หม้อแปลงที่ได้หลังจากการพัน

3.1.5 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับผลิตก๊าซไอโซน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง ออกแบบและจัดสร้างอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและใช้ทดสอบ การบำบัดกลิ่นที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดจากน้ำเสีย โดยได้ออกแบบเป็นลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ ทรงแทงกระบอกซ้อนกันแน่น ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 หลอดอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

ลักษณะของชุดสร้างไอโซนทรงกระบอกซ้อนกันแน่นจำนวน 2 ชั้น จะมีสมการ สนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันคือ

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.8)$$

โดยที่

- E_{\max} = ค่าเกรเดียนต์สูงสุด (โวลต์ / เซนติเมตร)
- V = แรงดันไฟฟ้าระหว่างแท่งตัวนำภายในและนอกกระบอก (โวลต์)
- r_2 = รัศมีภายนอก (ขั้วแอโนด) (เซนติเมตร)
- r_1 = รัศมีของแท่งตัวนำ (ขั้วแคโทด) (เซนติเมตร)

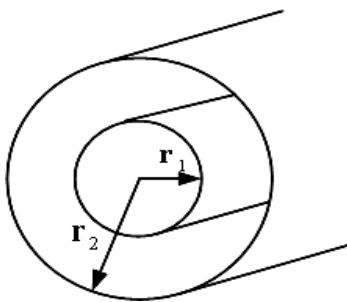
การพิจารณาค่ารัศมี ของชุดสร้างไอโซนต้องคำนึงถึงค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของ ฉนวนไฟฟ้า

ทำการออกแบบแท่งไอโซนยาว l มีรูปร่างเป็นทรงบอกซ้อนแกนร่วมรัศมีตัวนำในและรัศมีชั้นโลหะเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ เมื่อป้อนแรงดัน U ให้กับแท่งไอโซนนี้แล้ว ให้

ก.) พิสัยงานหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระยะ r ใดๆ ภายในแท่งไอโซน

ข.) หาค่าอัตราส่วน r_1/r_2 ที่เหมาะสมเพื่อให้แท่งไอโซนนี้สามารถรับแรงดันเบรกคานานี้ได้

สูงสุด



ภาพที่ 3.9 พื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ก.) จากกฎของ Gauss Law

$$Q = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$$

$$Q = \oint_S (E_\rho a_\rho \cdot \rho d\phi dz a_\rho)$$

$$= \varepsilon E_\rho \rho \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^l d\phi dz$$

$$Q = \varepsilon E_\rho \rho (\phi|_0^{2\pi}) (z|_0^l)$$

$$Q = \varepsilon E_\rho \rho 2\pi l \quad \text{โดย } \rho = r$$

$$\therefore E_r = \frac{Q}{2\pi \varepsilon r l} \quad (3.9)$$

หาความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$V = -\int_{r_2}^{r_1} E_r dr = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln r \Big|_{r_1}^{r_2}$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\therefore Q = \frac{2\pi\epsilon l V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

นำค่า Q ไปแทนในสมการ (3.9)

$$E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon r l} \cdot \frac{2\pi\epsilon l V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$\therefore E_r = \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

ข.) หาอัตราส่วน จาก

$$U_b = E_b r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\frac{dU_b}{dr_1} = E_b \frac{d}{dr_1} r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

คริฟผลคูณ หน้าคริฟหลัง + หลังคริฟหน้า

$$0 = E_b \left\{ r_1 \left(\frac{1}{r_2/r_1} \right) \frac{d}{dr_1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right\}$$

$$\frac{0}{E_b} = \left\{ \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{r_1^2}{r_2} \cdot r_2 \left(\frac{-1}{r_1^2} \right) \right\}$$

$$0 = \left\{ \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - 1 \right\}$$

ดังนั้น จะได้

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 1$$

แปลงเป็น e

$$e^{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = e^1$$

$$\therefore \frac{r_2}{r_1} = e$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{e} = 0.368$$

ดังนั้น อัตราส่วน r_1/r_2 ที่พอเหมาะเพื่อให้แท่งไอโซนนี้สามารถรับแรงดันเบรกคานนี้ได้ สูงสุดคือ 0.368

ทำการออกแบบโดยทำการกำหนด $r_2 = 19$ mm. แล้วทำการหามิติที่พอเหมาะของแท่ง อิเล็กโทรดจากอัตราส่วน r_1/r_2 ที่พอเหมาะ เพื่อให้แท่งไอโซนนี้สามารถรับแรงดันเบรกคานนี้ได้ สูงสุด

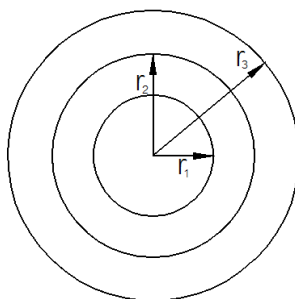
หา r_1 ได้จาก $\frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{e} = 0.368$

กำหนด $r_2 = 19$ mm. $\frac{r_1}{19} = 0.368$

$$r_1 = 0.368 (19)$$

ดังนั้นจะได้

$$r_1 = 6.992 \text{ mm.} \quad \#$$



ภาพที่ 3.10 รัศมีชุดสร้างไอโซน

กำหนดให้ $r_1 = 6.992 \text{ mm}$, $r_2 = 17 \text{ mm}$, $r_3 = 19 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ cm}$ ปริมาตรอากาศภายใน
แคปคือ

$$\pi(r_3^2 - r_2^2) \times l = \pi(0.019^2 - 0.017^2) \times 0.3 = 6.7858 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (3.10)$$

ย่านพลังงานที่ใช้ คือ $1.172 \times 10^3 \times 6.7858 \times 10^{-5} = 0.07953 \text{ W-h}$

ถึง $1.62 \times 10^3 \times 6.7858 \times 10^{-5} = 0.10993 \text{ W-h}$ (ย่านพลังงานที่ใช้ในแท่ง
อิเล็กโตรดเพื่อผลิตก๊าซไอโซน)

โดยประมาณพลังงานในการผลิตเกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$w = \frac{1}{2} \int e E^2 dv \quad (3.11)$$

$$E = \sqrt{\frac{2w}{eV}} \quad (3.12)$$

ที่ย่านพลังงาน 0.07953 W-h

$$E = \sqrt{\frac{2(0.07953)}{(8.854 \times 10^{-12})(67.858)}} = 16.271 \text{ kV/cm}$$

ที่ย่านพลังงาน 0.10993 W-h

$$E = \sqrt{\frac{2(0.10993)}{(8.854 \times 10^{-12})(67.858)}} = 19.129 \text{ kV/cm}$$

ที่ $E_{\max} = 16.271 \text{ kV/cm}$

$$V = \frac{E r_2 \left(e_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + e_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{e_1}$$

$$V = \frac{[(16.271 \times 10^3)^3] (1.70) \left(7 \ln 1. \frac{90}{1} .70 + m 1. \frac{70}{0} .6992\right)}{7}$$

$$= 6.587 \text{ kV/cm}$$

ที่ $E_{\max} = 19.129 \text{ kV/cm}$

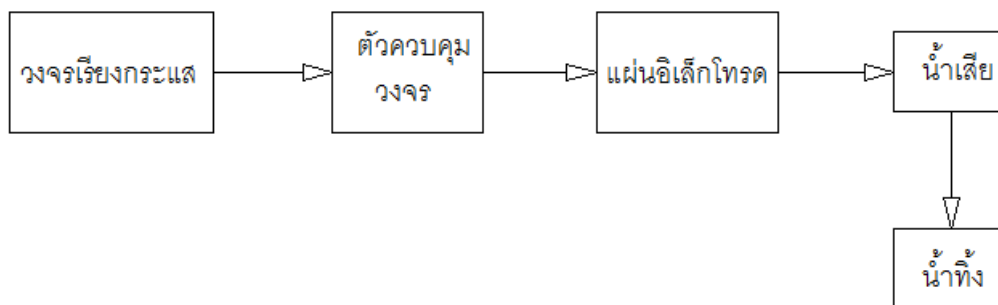
$$V = \frac{Er_2 \left(e_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + e_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{e_1}$$

$$V = \frac{[(19.129 \times 10^3)^3] (1.70) \left(7 \ln 1. \frac{90}{1} .70 + m 1. \frac{70}{0} .6992\right)}{7}$$

$$= 7.7443 \text{ kV/cm}$$

3.2 การออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการการทำงานของเครื่องบำบัดน้ำเสียเมื่อจ่ายแรงดันไฟ AC 220V เข้าวงจรจะผ่านชุดไดโอดเรกติไฟร์ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ต่อแบบบริดจ์แปลงไฟ AC ให้เป็น DC มี C ทำหน้าที่ฟิลเตอร์ไฟให้เรียบแล้วส่งเข้าวงจรรีกเตอร์ R 0.3 โอห์ม 30 วัตต์ ใช้เป็นตัวจับกระแสเกินเมื่อมีแรงดันไฟที่ตกคร่อม R ประมาณ 0.6V ทำให้ Q_1 นำกระแสส่งผลให้แรงดันระหว่างขา B กับขา E ของ Q_2 ลดลงทำให้ Q_2 นำกระแสลดลงส่งผลให้แรงดันที่ขา B ของ Q_3 ลดลงตามทำให้การนำกระแสของ Q_3 ลดลงวงจรไม่เกิดการเสียหายโดยมี VR ทำหน้าที่ปรับแรงดันที่ขา I/P ของ LM723 เพื่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟที่ Output



ภาพที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.1 การออกแบบวงจรเรกติเพอเรเตอร์ 10 A โดยใช้ LM723 จากภาพ 3.12 ใช้วงจร Rectifier แปลง AC-DC โดยใช้หม้อแปลง Step Down ขนาด 20V/15A เพื่อใช้เลี้ยงวงจร LM723

$$V_{DC} = 20 \times \sqrt{2} = 28.28 \text{ V}$$

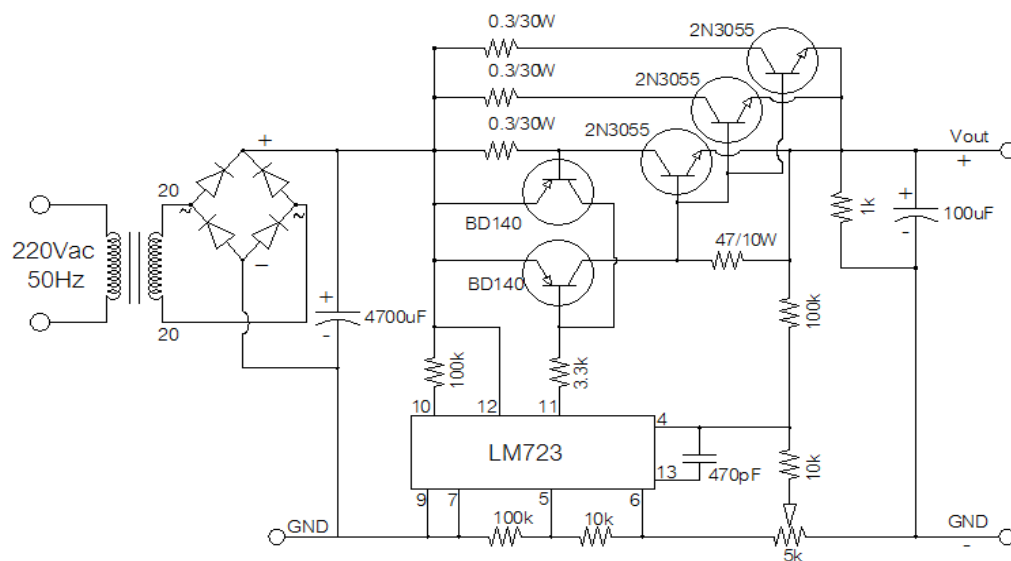
(3.13)

$$V_{out} = \left(\frac{V_{ref}}{2} \times \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right)$$

(3.14)

$$= \left(7.5 \times \frac{100k\Omega - 10k\Omega}{10k\Omega} \right)$$

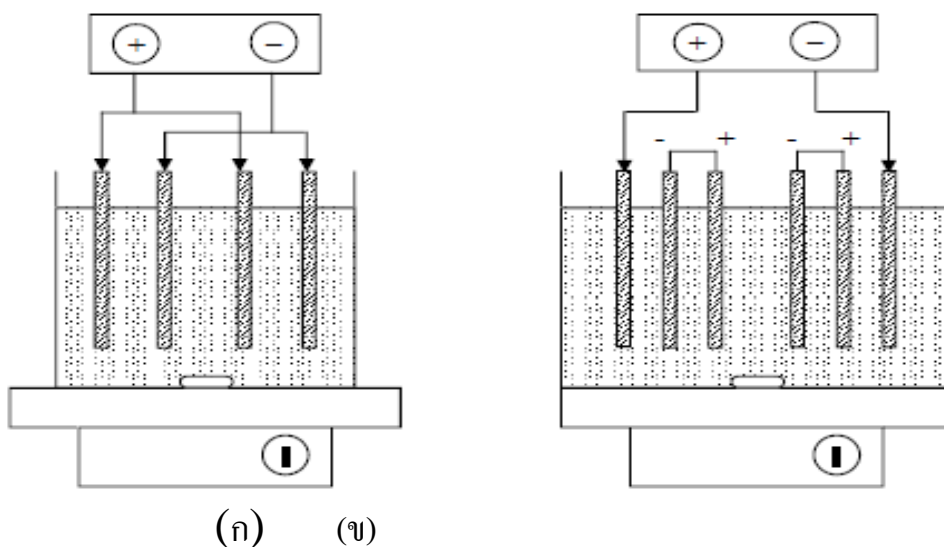
$$= 33.75 \text{ V}$$



ภาพที่ 3.12 วงจรเรกติเพอเรเตอร์ 10 A

3.2.3 การออกแบบขั้วอิเล็กโทรดสำหรับการทดลอง ระบบของการจับก้อนด้วยไฟฟ้า (EC) ที่เป็นเซลล์ไฟฟ้าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยมีขั้วบวกและขั้วลบต่อเข้ากับแหล่งพลังงานภายนอกที่มีกระแสสูง ซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) จะทำให้

เกิดการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขณะที่อิเล็กโทรดที่ขั้วลบ (Cathode) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งจะไม่เกิดการสึกกร่อนสำหรับการใช้ระบบ EC ในการบำบัดน้ำเสียจะต้องใช้ปริมาณอโลหะที่ละลายออกมาจากแผ่นอิเล็กโทรดจำนวนมากเพียงพอต่อปริมาณมวลสารที่ต้องการกำจัด ดังนั้นจึงต้องใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวจำนวนมาก ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการออกแบบใช้อิเล็กโทรดขั้วเดียว (Monopolar Electrodes) ต่อแบบอนุกรมหรือแบบขนาน โดยที่เป็นชุดทดลองเซลล์ไฟฟ้าแบบง่าย ๆ ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบอย่างละคู่ต่อแบบขนาน ระหว่างกัน และเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในภาพที่ 3.13(ก) นอกจากนี้จะต้องมีกล่องปรับความต้านทานเพื่อควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมทั้งมีมาตรวัดเพื่ออ่านค่ากระแสไฟฟ้าและสวิตช์ขาดันไฟฟ้าในที่นี่แผ่นโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและเกิดการสึกกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเรียกว่าแผ่นอิเล็กโทรดสังววย (Sacrificial Electrode) ซึ่งอาจใช้โลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันเป็นอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบ



ภาพที่ 3.13 ขั้วอิเล็กโทรดสำหรับบำบัดน้ำเสีย

(ก) อิเล็กโทรดขั้วเดียวต่อแบบขนาน

(ข) อิเล็กโทรดขั้วเดียวต่อแบบอนุกรม

สำหรับรูปที่ 3.13(ข) แสดงเซลล์ไฟฟ้าขั้วเดียวต่อแบบอนุกรมอิเล็กโทรดที่วางอยู่ด้านในเป็นแผ่นอิเล็กโทรดสังววยซึ่งเชื่อมต่อระหว่างกันแต่ไม่เชื่อมต่อกับแผ่นอิเล็กโทรดด้านนอก การจัดเซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้จะเปรียบเสมือนเซลล์ไฟฟ้าเดียวที่มีหลายอิเล็กโทรดที่ต่อเชื่อมกัน และการจัด

เซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้จะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นอิเล็กโทรดทั้งหมดในปริมาณเท่ากันเนื่องจากการต่อแบบอนุกรมจะทำให้ความต้านทานมีค่าสูงขึ้นโดยทั่วไปนิยมใช้แผ่นโลหะที่เป็นขั้วอิเล็กโทรด เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดตั้งเวก เพื่อผลิตไฮดรอกไซด์อย่างต่อเนื่อง ไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นจะไปทำให้ประจุบนคอลลอยด์เป็นกลาง และทำให้คอลลอยด์รวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นนี้อาจกำจัดมลสารในน้ำด้วยวิธีอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาเคมีและการตกผลึกหรือเกิดจากการรวมตัวกันของมลสารแล้วลอยขึ้นผิวน้ำโดยก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นนอกจากนี้ น้ำที่มีของแข็งแขวนลอย น้ำมันหรือมลสารอื่น ๆ เมื่อไหลผ่านสนามไฟฟ้าและอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาไอออนไนเซชัน (Ionization) อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) หรือการเกิดอนุมูลอิสระ (Free-Radical) ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำและมลสารเกิดการเปลี่ยนแปลง และมีผลต่อการกำจัดมลสารออกจากน้ำ เพื่อให้สามารถกำจัดมลสารได้มากขึ้นอาจกำหนดให้น้ำเสียไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้าหลาย ๆ เซลล์อย่างต่อเนื่องโดยใช้อิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะต่างชนิดกัน และสำหรับการกำจัดมลสารจำเพาะอาจต้องทำการปรับค่า pH และค่าการความต้านทานไฟฟ้าหรือค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียก่อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีขึ้น

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับโอโซนจะทำการทดลอง 2 ส่วนดังนี้

1. การทดลองวงจรสวิตซ์ความถี่สูง
2. การทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า

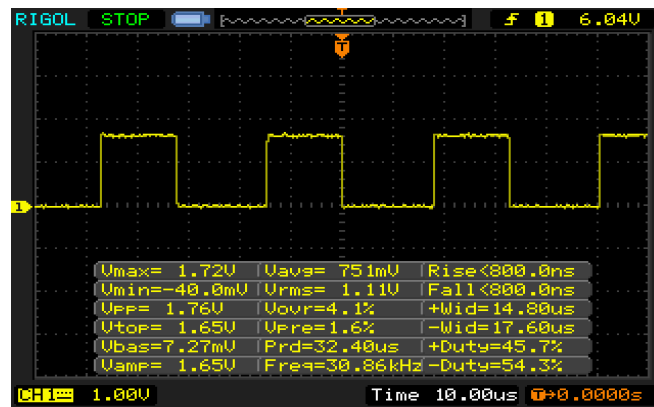
4.1 การทดลองวงจรสวิตซ์ความถี่สูง

4.1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

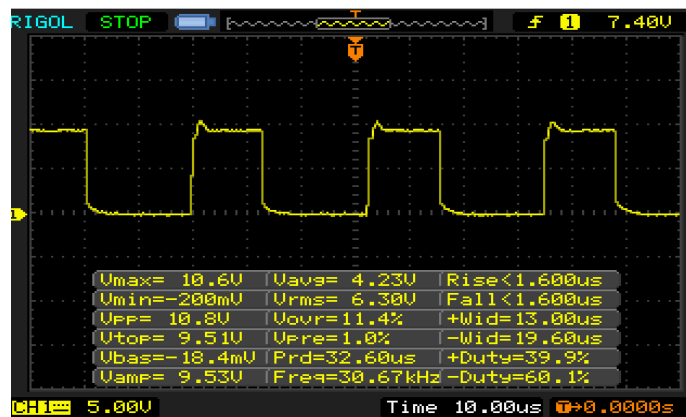
1. เพื่อทำการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าในส่วนของวงจรควบคุมการขับเคลื่อนที่ความถี่ 30 kHz
2. เพื่อทำการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าในส่วนของวงจรการสวิตซ์ของไอจีบีที
3. เพื่อทำการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตและค่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่องสร้างไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

4.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

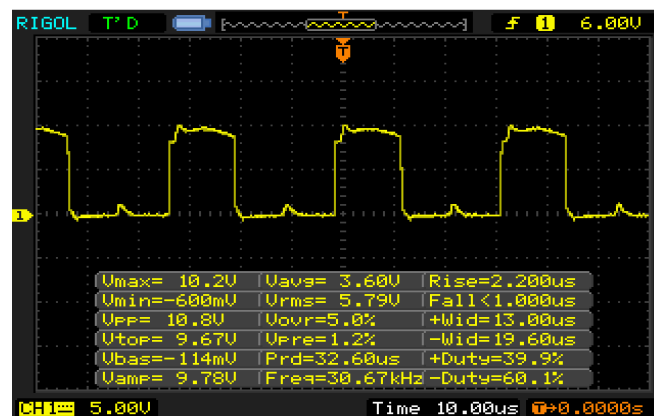
1. ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรควบคุมการขับเคลื่อนโดยทำการทดลองปรับค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ให้ได้ที่ 30 kHz แสดงผลการทดสอบโดยบันทึกสัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่ขา 14 ของไอซี SG3525 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และแสดงผลการทดสอบโดยบันทึก สัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่ขาเกตของไอจีบีที ที่ 30kHz ขณะไม่มีโหลด ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และขณะจ่ายโหลด ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.1 ภาพสัญญาณที่ขา 14 ของไอซี SG3525



ภาพที่ 4.2 ภาพสัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่ขาเกตของไอจีบีที ที่ 30kHz ขณะไม่มีโหลด



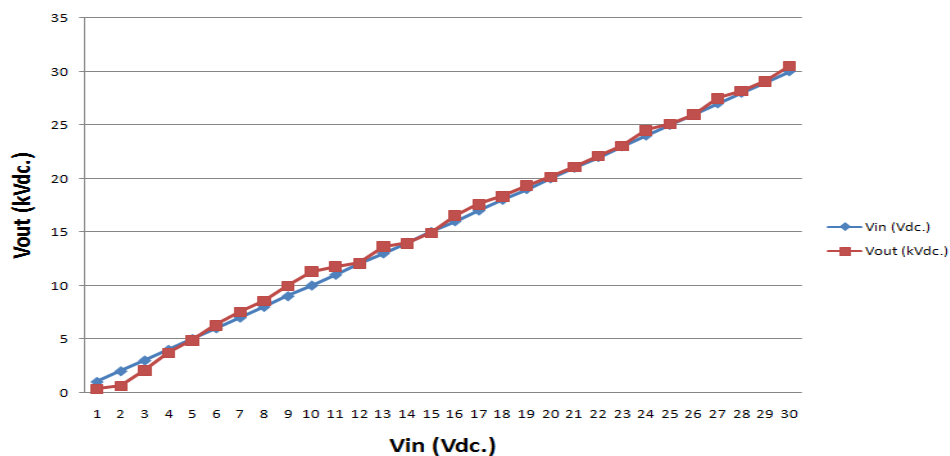
ภาพที่ 4.3 ภาพสัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่ขาเกตของไอจีบีที ที่ 30kHz ขณะจ่ายโหลด

2. ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุทและค่าแรงดันเอาต์พุทของเครื่องสร้างไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ความถี่ 30 kHz ด้วย High Voltage Probe ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ วาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง V_{in} กับ V_{out} ที่ความถี่ 30kHz ดังแสดงในภาพที่ 4.4

ตาราง 4.1 ตารางแสดงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง V_{in} กับ V_{out} ที่ความถี่ 30kHz

V_{in} (V _{dc.})	V_{out} (kV _{dc.})
1	0.39
2	0.67
3	2.11
4	3.72
5	4.92
6	6.32
7	7.54
8	8.57
9	9.98
10	11.34
11	11.82
12	12.11
13	13.67
14	13.98
15	14.95

V_{in} (V _{dc.})	V_{out} (kV _{dc.})
16	16.57
17	17.61
18	18.37
19	19.37
20	20.18
21	21.12
22	22.12
23	23.09
24	24.52
25	25.10
26	26.00
27	27.50
28	28.24
29	29.10
30	30.53

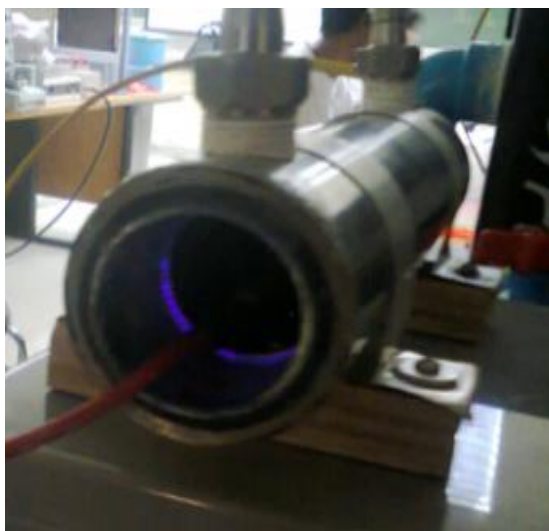


ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง V_{in} กับ V_{out} ที่ความถี่ 30 kHz



ภาพที่ 4.5 วัดแรงดันอินพุต ที่ $V_{in} = 27 V_{dc}$ ได้แรงดันเอาต์พุต $V_{out} = 27.50 kV_{dc}$

3. ทดสอบการแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วผ่านฉนวนแก้วของขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอก ซ้อนแกนร่วม จะสังเกตเห็นว่าเกิด โครโมนาดิจชาร์จ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดผ่านฉนวนแก้ว ดังแสดง ในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ทดสอบการแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วผ่านฉนวนแก้วของขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน

สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง V_{in} กับ V_{out} ที่ความถี่ 30kHz จะเห็นว่าค่าความสัมพันธ์เป็นไปตามทฤษฎีจากการคำนวณใน บทที่ 3 การออกแบบโครงการ

4.2 การทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า

4.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

ทำการวัดค่า pH โดยวัดที่ค่าเริ่มต้นก่อนการทดลองและในระยะเวลาที่กำหนด คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีของน้ำและฟองที่เกิดขึ้นของตะกอนและสารแขวนลอย และทำการวัดผลของความต้านทานของน้ำเปรียบเทียบก่อนการบำบัดและภายหลังการบำบัดจากตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างด้วยการวัดค่า pH ด้วย 4.7(ก) น้ำกลั่น 4.7(ข) น้ำซักผ้า และ 4.7(ค) น้ำล้างจาน

4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของความเป็น กรด-ด่าง ด้วย pH Meter ของน้ำที่สภาวะก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าดังแสดงดังภาพที่ 4.7

2. ทำการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่แผ่นขั้วอิเล็กโทรดแบบอนุกรมและแบบขนานที่ได้ออกแบบไว้ เป็นเวลา 10, 20, และ 30 นาที ดังแสดงดังภาพที่ 4.8

3. บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของน้ำหรือการนำไฟฟ้าของน้ำภายหลังจากบำบัดดังแสดงดังภาพที่ 4.9



(ก)



(ข)



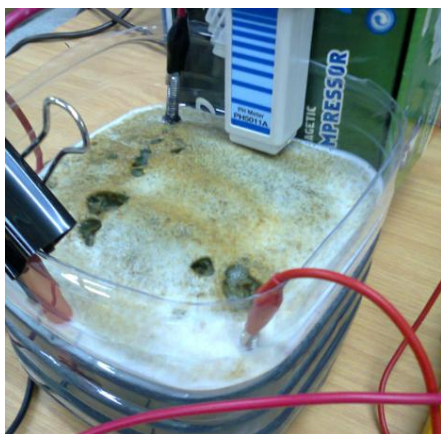
(ค)

ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบความเป็นกรดต่างด้วยการวัดค่า pH ด้วย

(ก) น้ำกลั่น

(ข) น้ำซักผ้า

(ค) น้ำล้างจาน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.8 ภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าในถังใสสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของน้ำ

(ก) ใช้เวลา 10 นาที

(ข) ใช้เวลา 20 นาที

(ค) ใช้เวลา 30 นาที

4.2.3 ผลการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโทรดแบบอนุกรมและแบบขนาน จากการทดสอบวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วย pH Meter ของน้ำตัวอย่าง (ก) น้ำซักผ้า และ(ข) น้ำล้างจาน โดยมีค่า pH ของน้ำกลั่นเป็นค่าเปรียบเทียบ แล้วทำการบันทึกผลการทดลองในระยะเวลาที่กำหนด คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ด้วยอิเล็กโทรดแบบอนุกรม และแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 จะพบว่า ที่เวลาเริ่มต้น ด้วยแรงดัน 20 โวลต์ กระแส 4.11 แอมป์นั้น จนถึงเวลาเวลา 30 นาที นั้นจะ

พบว่าแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลองนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยารีด็อกซ์โดยมีฟองของสารแขวนลอย หรือสไลด์จ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิดการแยกชั้นของสารแขวนลอยอย่างเห็นได้ชัด โดยในการทดสอบนี้จะทำการบันทึกค่า pH และวัดค่าความต้านทานของน้ำด้วย Ohm Meter ด้วยระบบการวัดดังภาพที่ 4.9 ที่เป็นการวัดความต้านทานน้ำเสียก่อน และหลังการบำบัด จากนั้นบันทึกผลการทดสอบลงในตารางที่ 4.2 ที่เป็นการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยแผ่นอิเล็กโทรดแบบอนุกรม (ก) นำเสียจากการซักผ้า (ข) นำเสียจากการล้างจาน ต่อจากนั้นทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - ด่าง กับเวลาและค่าความต้านทาน - เวลา เพื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.10 จะพบว่าค่า pH ของที่บอกถึงคุณภาพของน้ำเสียก่อนการบำบัดนั้นจากการซักผ้าจะอยู่ที่ 9.07 และจากการล้างจานจะอยู่ที่ 6.43 ซึ่งภายหลังการบำบัดจะอยู่ที่ 8.88 และ 8.25 ตามลำดับ ส่วนค่าความต้านทานของน้ำก่อน และหลังการบำบัดจากการซักผ้าอยู่ที่ 3.35 เมกกะโอห์ม และ เป็น 1.74 เมกกะโอห์ม สำหรับน้ำจากการล้างจานอยู่ที่ 3.51 เมกกะโอห์ม และ เป็น 0.20 เมกกะโอห์ม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้กระแสไฟฟ้าที่ปริมาณสูงเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียกระแสไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่น้ำ และทำให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าลดลง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทำวิจัยของโครงการนี้มีกาลลดต่ำลง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.9 วัดค่าความต้านทานน้ำ

(ก) วัดค่าความต้านทานก่อนการทดลอง

(ข) วัดค่าความต้านทานหลังการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

(ก) นำเสียจากการซักผ้า

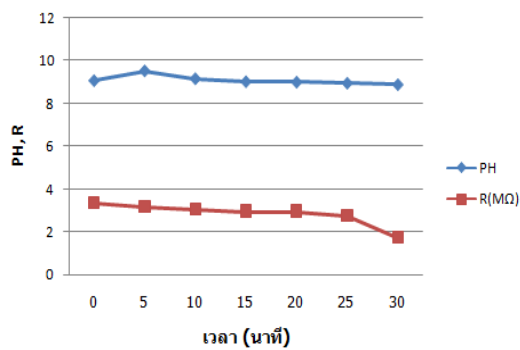
(ข) นำเสียจากการล้างจาน

เวลา (นาที)	PH	I (A)	V (V)	R(Ω)
0	9.07	4.11	20.32	3.35M
5	9.53	1.56	22.31	3.17M
10	9.16	1.43	23.92	3.03M
15	9.02	1.37	24.17	2.96M
20	9.00	1.37	24.04	2.96M
25	8.95	1.36	24.06	2.75M
30	8.88	1.29	24.24	1.74M

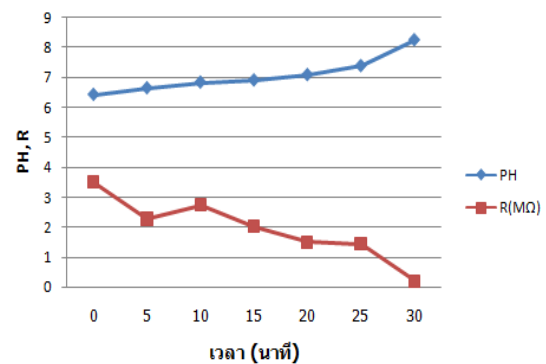
(ก)

เวลา (นาที)	PH	I (A)	V (V)	R(Ω)
0	6.43	2.44	21.63	3.51M
5	6.65	1.632	23.83	2.98M
10	6.84	1.520	23.86	2.74M
15	6.91	1.450	23.54	2.03M
20	7.09	1.40	23.36	1.50M
25	7.39	1.29	23.17	1.44M
30	8.25	1.196	23.29	0.20M

(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า pH , R ด้วยอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

ของการทดลองการบำบัดน้ำเสีย

(ก) จากการซักผ้า

(ข) จากการล้างจาน

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากการทดลองระยะเวลา 30 นาที
ด้วยอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำก่อนบำบัด		คุณภาพน้ำเสียหลังบำบัด		ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย (%)		มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม
	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	
pH	9.07	6.43	8.88	8.25	-	-	5.5-9.0
I (A)	4.11	2.44	1.29	1.196	-	-	-
V (V)	20.32	21.63	24.24	23.29	-	-	-
R(Ω)	3.35M	3.51M	1.74M	0.20M	-	-	-

สำหรับการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรดแบบขนานกับ (ก) นำเสียจากการซักผ้า (ข) นำเสียจากการล้างจานซึ่งผลการทดสอบลงในตารางที่ 4.4 ที่เป็นการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยแผ่นอิเล็กโทรดแบบอนุกรม (ก) นำเสียจากการซักผ้า (ข) นำเสียจากการล้างจาน ต่อจากนั้นทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับเวลา และ ค่าความต้านทาน – เวลา เพื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.11

สำหรับการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรดแบบขนาน (ก) นำเสียจากการซักผ้า (ข) นำเสียจากการล้างจานดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้กระแสไฟฟ้าที่ปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH และค่าความต้านทานของน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและทำให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดที่ใช้ในของโครงการแบบขนานนี้มีขนาดที่สูงกว่าแบบอนุกรม ดังนั้นในโครงการนี้การศึกษาผลกระทบของกระแส และแรงดัน เวลาที่ทำการบำบัด เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้จะขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสีย เช่นค่า pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของมลสาร เป็นต้น คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณไอออนที่ละลายออกจากอิเล็กโทรด ซึ่งเท่ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้และเวลาสัมผัสของน้ำที่บำบัด

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรดแบบขนาน

(ก) นำเสียจากการซักผ้า

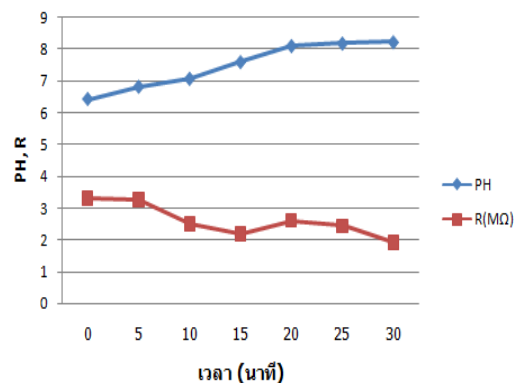
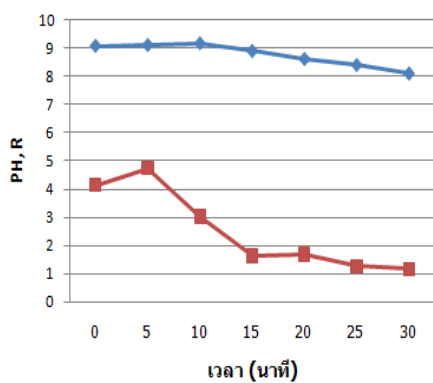
(ข) นำเสียจากการล้างจาน

เวลา (นาที)	PH	I (A)	V (V)	R(Ω)
0	9.07	7.59	14.58	4.14M
5	9.10	6.35	10.32	4.73M
10	9.16	3.52	7.46	3.03M
15	8.89	3.409	7.08	1.63M
20	8.61	3.281	6.90	1.68M
25	8.40	3.265	6.97	1.27M
30	8.10	3.112	7.45	1.17M

(ก)

เวลา (นาที)	PH	I (A)	V (V)	R(Ω)
0	6.43	3.02	20.73	3.31M
5	6.82	3.107	21.02	3.26M
10	7.07	2.47	22.10	2.50M
15	7.60	1.81	23.14	2.20M
20	8.11	1.305	24.06	2.61M
25	8.19	1.314	23.90	2.44M
30	8.23	1.145	24.29	1.92M

(ข)



(ก)(ข)

ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า pH , R ด้วยอิเล็กโทรดแบบขนาน

ของการทดลองการบำบัดน้ำเสีย

(ก) จากการซักผ้า

(ข) จากการล้างจาน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากการทดลอง ระยะเวลา 30 นาที
ด้วยอิเล็กโทรดแบบขนาน

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำก่อนบำบัด		คุณภาพน้ำเสียหลังบำบัด		ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย (%)		มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม
	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	น้ำเสียจากการซักผ้า	น้ำเสียจากการล้างจาน	
pH	9.07	6.43	8.10	8.23	-	-	5.5-9.0
I (A)	7.59	3.02	3.112	1.145	-	-	-
V (V)	14.58	20.73	7.45	24.29	-	-	-
R(Ω)	4.14M	3.31M	1.17M	1.92M	-	-	-

ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด เป็นเบสของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของน้ำและน้ำเสียในระบบ EC มีผลต่อประสิทธิภาพการจ่ายกระแสไฟฟ้าและค่าการละลายน้ำของเกลือไฮดรอกไซด์ของโลหะ ประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นกับคุณลักษณะของสารที่ต้องการกำจัดและส่วนใหญ่จะถูกกำจัดได้ดีที่ค่า pH เป็นกลาง อย่างไรก็ตามอัตราการใช้พลังงานจะมีค่าสูงสุดที่ค่า pH เป็นกลาง แต่ถ้าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงเพียงพอผลกระทบจากค่า pH จะไม่มีความสำคัญ

ค่า pH (อังกฤษ: pH ย่อมาจาก Potential of Hydrogen Ion) เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด เป็นเบสของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) สามารถทดสอบได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมและง่ายที่สุด คือ ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัสจากการเปลี่ยนสี สำหรับตัวเลขที่แสดงค่า pH ถ้าพิจารณาอย่างง่ายที่อุณหภูมิห้อง ค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารนั้นเป็นกลางไม่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส เช่น น้ำบริสุทธิ์ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกรด และถ้ามากกว่า 7 แสดงว่าเป็นเบส

สาร	pH
กรดสารพิษจากเหมืองร้าง	-3.6 - 1.0
กรดจากแบตเตอรี่	-0.5
กรดในกระเพาะอาหาร	1.5 - 2.0
เลมอน	2.4
Coke	2.5
น้ำส้มสายชู	2.9
ส้ม หรือ แอปเปิ้ล	3.5
เบียร์	4.5
ฝนกรด	< 5.0
กาแฟ	5.0
ชา	5.5
นม	6.5
น้ำบริสุทธิ์	7.0
น้ำลายมนุษย์	6.5 - 7.4
เลือด	7.34 - 7.45
น้ำทะเล	8.0
สบู่ล้างมือ	9.0 - 10.0
แอมโมเนีย (ยาสามัญประจำบ้าน)	11.5
น้ำยาปรับผ้านุ่ม	12.5
โซดาไฟ	13.5

ภาพที่ 4.12 ตัวอย่างค่าพีเอชของสารต่าง ๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองบำบัดน้ำจากการซักผ้าและน้ำล้างจานด้วยอิเล็กโทรดแบบอนุกรมและแบบขนาน เมื่อเปรียบเทียบค่า pH และ ค่า กระแสที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดโดยปรับขนาดของแรงดัน จากเครื่องบำบัดน้ำเสียไปที่ค่าสูงสุดทั้งสองแบบ จะเห็นว่ากระแสที่จ่ายให้อิเล็กโทรดแบบอนุกรมมีค่าที่น้อยกว่ากระแสที่จ่ายให้อิเล็กโทรดแบบขนานอีกทั้งการพิจารณาจากสีของน้ำที่แยกสไลด์ออกมาจะพบว่าการแยกตะกอนด้วยแผ่นอิเล็กโทรดแบบขนานนั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งดูได้จากความใสของน้ำหลังการบำบัดเป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งสรุปได้ว่า ขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อแบบอนุกรมมีค่าความต้านทานมากกว่าแบบขนาน และจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดแบบขนานดีกว่าอิเล็กโทรดแบบอนุกรมเมื่อจ่ายไฟเท่ากัน



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบก่อนและหลังการบำบัดของอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

(ก) น้ำซักผ้า

(ข) น้ำล้างจาน



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบก่อนและหลังการบำบัดของอิเล็กโทรดแบบขนาน

(ก) น้ำซักผ้า

(ข) น้ำล้างจาน

ข้อดีของการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า

การตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้านี้จะเหมาะกับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมี ยังสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอื่นๆ ได้ โดยมีข้อดีดังนี้

1. โดยที่มีความสามารถทำลายพันธะเคมีทำให้สารประกอบ เช่น ไขมัน กลายเป็นสารละลายน้ำและตกตะกอนได้
2. สามารถทำให้เกิดอออนและมีสภาพนำไฟฟ้าและจับตัวกันเป็นสารที่มีความเหนียวตัวอื่นจนนำมาซึ่งการตกตะกอน
3. สลัดจ์จากการตกตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดได้ง่ายทำให้น้ำที่คั่งขึ้นสะอาดขึ้น ซึ่งเหมาะกับสารปนเปื้อนที่ไม่สามารถกรองได้
4. โลหะหนักและสารอันตราย เช่น Arsenic และ Cadmium กลายเป็นสารที่ไม่อันตรายหรือเป็นสารละลาย
5. เป็นทางเลือกที่ปลอดภัย เพราะไม่ต้องใช้สารตกตะกอนที่เป็นอันตราย ดังนั้นจึงสามารถทิ้งและกำจัดได้ง่ายซึ่งเป็นขบวนการที่รวดเร็วจึงไม่เสียพื้นที่สำหรับบำบัดมากนัก

ข้อจำกัดของการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า

1. ไม่เหมาะกับการกำจัดสารที่ไม่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า เช่น เกลือ ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้ในขบวนการบำบัดความเค็มได้
2. ต้องมีการกำจัดเอาวัตถุขนาดใหญ่ออกก่อนเริ่มขบวนการ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้จัดสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับโอโซน สำหรับบำบัดน้ำเสียและกลั่นด้วยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการเติมอิเล็กตรอนในน้ำเสียเพื่อให้ประจุไฟฟ้าช่วยในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย และการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแรงดันสูงในการผลิตก๊าซโอโซนเพื่อบำบัดกลั่นโดยใช้หลักการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (Flyback Transformer) และทำการสวิตช์วงจรด้วยไอจีบีที สัญญาณพัลส์ในการสวิตช์ควบคุมด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ (IC # SG3525) ในการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อให้ได้ค่าระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตได้สูงสุด 30 kV. ตามวัตถุประสงค์ จึงได้ทำการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงขึ้นเองโดยทำการออกแบบทางวิศวกรรมดังที่กล่าวมาจาก บทที่ 3 และจากการทดสอบวงจรฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์ ทำการสวิตช์ที่ความถี่ 30 kHz เครื่องผลิตก๊าซโอโซนสามารถจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงด้านเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 0 - 30 kV. โดยทำการปรับค่าแรงดันทางด้านอินพุตที่ 0 - 30 Vdc. ทั้งนี้จะได้มีการนำเอาเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าร่วมกับโอโซนที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรม โรงแรม คริวเรือน และอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อเป็นน้ำทิ้งต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [2] ตำราวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [3] ศิริโรตม์ เกตุแก้ว. “การศึกษาการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตซ์แรงดันสูงความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์”, วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง.8(1) : 55-63 ; มกราคม - เมษายน, 2548
- [4] Chang M.B. and Tseng T.D. “Gas - phase removal of H₂S and NH₃ with dielectric barrier discharges”, Journal of Environmental Engineering. 122(1) ; 1996.
- [5] สุภาพร พงศ์ธรพฤษย์. (2547). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีและปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งสีย้อมผ้าโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.อุตรดิตถ์.
- [6] นกคณ เจริญวัฒน์ชัย และคณะ. (2540). การปรับปรุงการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ SBR. งานวิจัยปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/switching_regulator/converter.html
- [8] http://www.physics.kmutt.ac.th/researchgroup_4.html
- [9] http://elecpcnt.rmutl.ac.th/attachments/014_el_lesson3.pdf

ภาคผนวก ก
ตารางเทียบขนาดลวดสายไฟฟ้า

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูล (Data Sheet) SG3525, TLP250, Ferrite Core, IGBT, LM723 และ 2N3055