

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมาเพื่อให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ผู้วิจัยจึงได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยดังนี้

- 3.1 ศึกษาข้อมูลการพัฒนาบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา
- 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 การออกแบบและการพัฒนาบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา
- 3.4 การทดสอบและปรับแต่งเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา

3.1 ศึกษาข้อมูลการพัฒนาบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษาระบบและรูปแบบของเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมาที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่าโดยส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปแบบการใช้งานสาเหตุมาจากการออกแบบตัวเครื่องให้เป็นภาชนะขนาดเล็ก ได้จำนวนน้อยเกินไปในแต่ละครั้งการใช้งาน และยังพบอีกว่าแผงอุปกรณ์วงจรกำเนิดไอโซนภายในเครื่องมักจะถูกหล่อทับด้วยเรซินสังเคราะห์ เมื่อนำมาใช้งานหากเกิดการเสื่อมสภาพหรือมีอุปกรณ์ภายในแผงวงจรชำรุดเสียหายก็ไม่สามารถซ่อมหรือถอดเปลี่ยนตัวอุปกรณ์อะไหล่ได้ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองมากเพราะถ้าเครื่องเสียก็ต้องทิ้งทั้งเครื่อง ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการแก้ไขข้อเสียหรือข้อจำกัดดังกล่าวในช่วงต้น โดยการออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมาให้มีแผงวงจรที่สามารถซ่อมหรือถอดเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ที่ชำรุดได้ ส่วนข้อจำกัดเรื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมาได้จำนวนน้อยเกินไปในแต่ละครั้งการใช้งานก็แก้ไขโดยการออกแบบให้เครื่องเป็นระบบที่เมื่อผลิตไอโซน โดยใช้ปริมาณขนาดเล็กป้อนอากาศผ่านอิเล็กโตรดแบบไม่สม่ำเสมอสูงที่อยู่ภายในกล่องฉนวน นำก๊าซไอโซน ที่ผลิตได้ออกมาภายนอกตัวเครื่องผ่านทางซิลิโคนและหัวทรายแบบละเอียดละลายลงน้ำ ได้น้ำที่สะอาดซึ่งสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่างๆได้ จากการทดสอบการใช้งานพบว่าสามารถใช้ร่วมกับภาชนะได้หลากหลายชนิดและหลายขนาด เช่นอ่างล้างผัก อ่างล้างจาน กะละมัง ถังน้ำ ฯลฯ ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งานเป็นอย่างมากได้ในปริมาณที่มากพอในแต่ละรอบการทำงาน

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 Digital Phosphor Oscilloscopes



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องวัด Digital Phosphor Oscilloscopes

3.2.2 High Voltage Probe



รูปที่ 3.2 แสดง High Voltage Probe วัดแรงดันสูงใช้ร่วมกับ Digital Phosphor Oscilloscopes

3.2.3 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า แบบแรงดันสูง



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องวัดแรงดันสูง

3.2.4 เครื่องวัดปริมาณโอโซน



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวัดปริมาณโอโซน

3.2.5 ชุดวัดค่าโอโซนในน้ำ

ชุดวัดค่าโอโซนในน้ำ ozone testkit checkit comparator LOVIBOND Ozone (DPD)

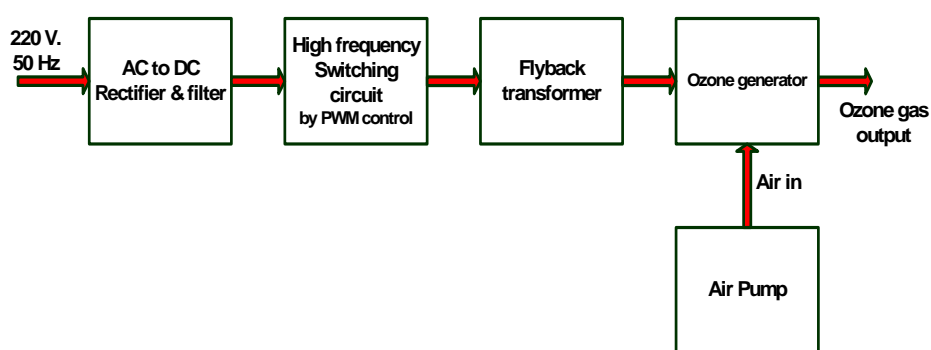
range: 0.0-0.7 mg/l(ppm)



รูปที่ 3.5 แสดงชุดวัดค่าโอโซนในน้ำ

3.3 การออกแบบและการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา

3.3.1 ออกแบบบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างเครื่องพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา



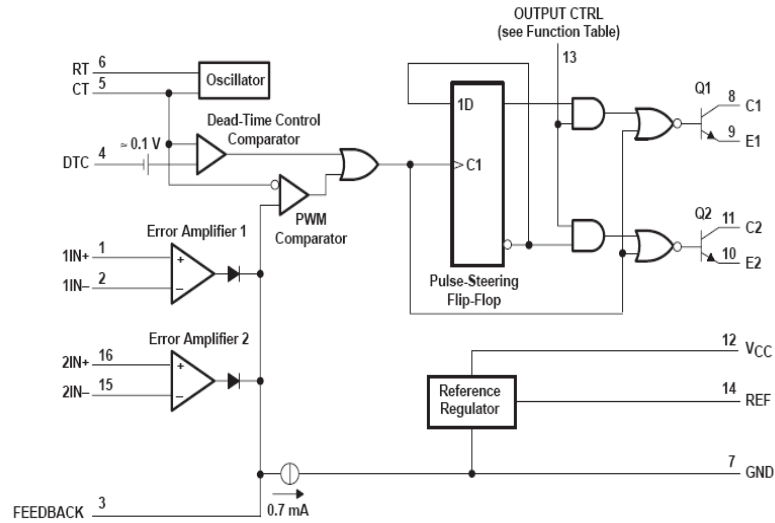
รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมของเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา

การออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา ตามบล็อกไดอะแกรม โดยการประยุกต์ใช้ สวิตชิงแรงดันสูงความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แปลงเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง 2 กิโลโวลต์ ถึง 7 กิโลโวลต์ สำหรับผลิตรังสีโคโรนา ควบคุมการทำงานโดยใช้เทคนิคแบบพัลส์วิดมอดูเลชันและสวิตชิงที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปที่อิเล็กโทรดในเวลา 10, 15, 20 นาที ที่ปริมาณออกซิเจน 21 % จากอากาศแห้งปกติ โดยใช้ปริมาณเล็กป้อนอากาศผ่านอิเล็กโทรดแบบไม่สม่ำเสมอสูงที่อยู่ภายในกล่องฉนวนเพื่อผลิตก๊าซโอโซนได้เท่ากับและนำก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ผ่านท่ออย่างซิลิโคนและหัวทรายแบบละเอียดละลายลงน้ำปริมาณ 5-10 ลิตร ให้ได้น้ำพลาสมาที่มีความเข้มข้น โอโซน 0.3 ppm ถึง 0.4 ppm สำหรับนำไปใช้บำบัดน้ำเสียเพื่อสลายมลพิษต่างๆ ที่ปะปนมาให้สลายตัวไปภายในเวลา 10 ถึง 30 นาที

3.3.2 การออกแบบวงจรกำเนิดไฟแรงดันสูงควบคุมสัญญาณ PWM โดยใช้ไอซีเบอร์ TL 494

ไอซีเบอร์ TL 494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของพวง-พูล อินเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมคควบคุมจากแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นตัวอย่างการทำงานสำหรับวงจรควบคุมด้วยวิธีควบคุมจากแรงดัน โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ TL 494 แสดงในรูปที่ 3.3

functional block diagram

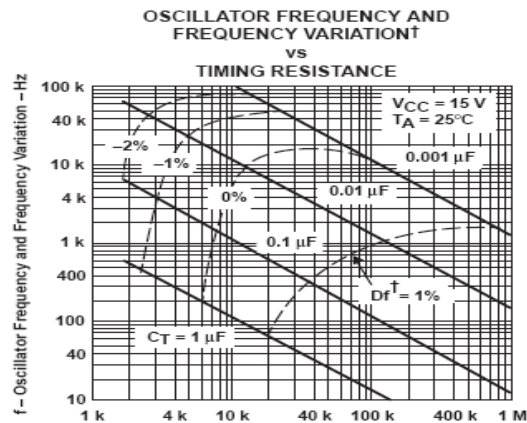


รูปที่ 3.7 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL 494 (ที่มา: Motorola)

3.3.2.1 การกำหนดคาบเวลาในการทำงานของ TL 494

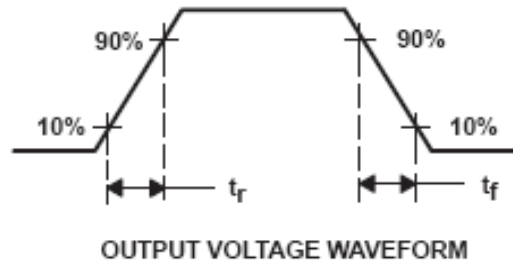
วงจรของไอซี TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่ที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์กำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

$$T = \frac{R_T C_T}{1.1}$$



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_T TIMING RESISTANCE (Ω) (ที่มา: Motorola)

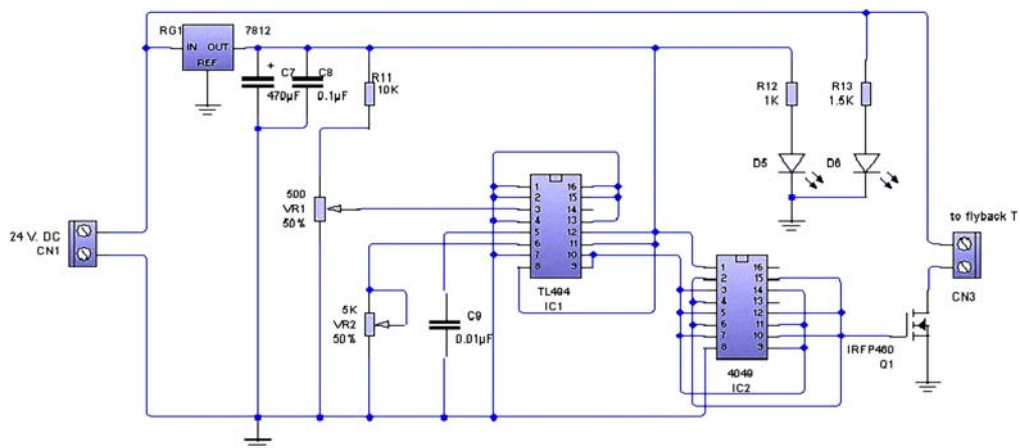
ในการกำหนดความถี่เอาต์พุตที่ต้องการหาค่าตัวความต้านทานในการปรับความถี่ จะต้องกำหนดค่าความถี่และค่าความจุของคาปาซิเตอร์แล้วนำมาคำนวณ จากสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นสัญญาณคาบเวลาเอาท์พุท (ที่มา: Motorola)

3.3.2.2 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ T_D

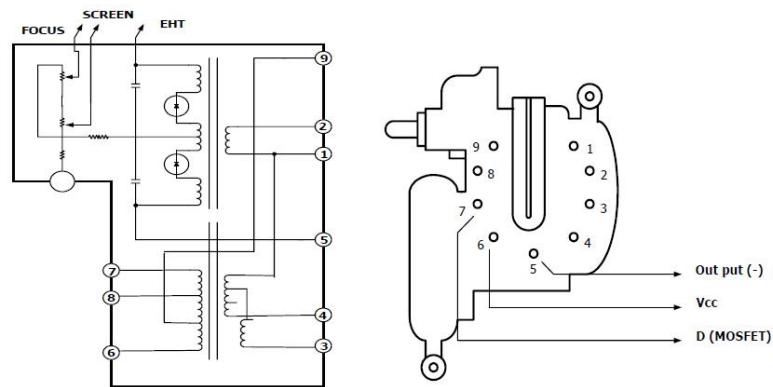
ไอซี TL494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ของวงจรถัดเองด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตามหากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ ต่ออยู่ใน ดังนั้นช่วงเวลา t_{ON} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48% ของค่าคาบเวลา เมื่อต่อขา 13 (output control) เข้ากับขา 14 (+5Vref) และมีค่าเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา เมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์ ไอซี TL494 ต้องการไฟเลี้ยง VCC ในช่วงระหว่าง 7 ถึง 40 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน Vref 5 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์ เพื่อใช้กับวงจรถัดนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง $\pm 1.5\%$ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์ เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 °C



รูปที่ 3.10 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงความถี่สูง

3.3.3 หม้อแปลงฟลายแบคที่นำมาใช้จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์

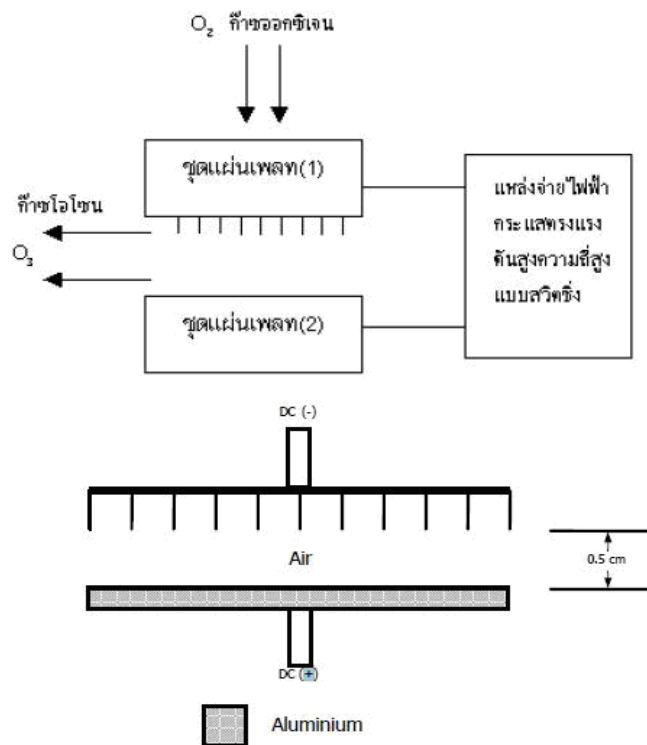
เนื่องจากใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปจึงไม่สามารถหาอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงได้จาก $(N1 / N2) = (V1 / V2)$ ทำให้สามารถประมาณอัตราส่วนของแรงดัน $(V1 / V2)$ ได้โดยจะใช้ค่าในผลการทดลอง ขณะ No – load คิดที่ Duty cycle 10% สามารถคำนวณอัตราส่วนแรงดัน $(V1 / V2)$ ได้เท่ากับ 1:325.19 V นั้นหมายความว่าจ่าย V_{in} เท่ากับ 1 V จะได้ V_{out} เท่ากับ 325.19 V ที่ (Duty cycle 10%) โดยหม้อแปลงฟลายแบคเบอร์ TLF 14690 จะมีลักษณะการต่อวงจร ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะการต่อวงจรภายในและการนับขาของหม้อแปลงฟลายแบคเบอร์ TLF14690

3.3.4 การออกแบบแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในเครื่องผลิตไอโซน

ในการออกแบบได้เลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สม่ำเสมอสูงกับอิเล็กทรอนิกส์ระนาบ ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สม่ำเสมอสูงคือกระดาษปรับให้เป็นปลายแหลม และวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ระนาบได้แก่อลูมิเนียม ในการสร้างเครื่องผลิตไอโซน ข้อดีของอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สม่ำเสมอสูงคือมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณปลายแหลม การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงและความถี่สูง โดยความถี่ถูกควบคุมโดยชุดวงจรควบคุมความถี่เอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงที่เป็นแรงดันสูง ถูกนำมาจ่ายให้แก่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สม่ำเสมอสูงข้างหนึ่ง และอีกส่วนจะจ่ายให้กับแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ ซึ่งจะจ่ายแรงดันสูงแต่ไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวนนี้แต่ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นในระบบจึงไม่ควรเกิดความร้อนขึ้นภายในเกินไปมากเกินไปเพราะจะทำให้ไม่เกิดไอโซน และจากการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ พอจะสรุปได้ว่ารูปร่างอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง กับอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบให้ผลผลิตสูงสุด ดังนั้นจึงนำอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สม่ำเสมอสูง และอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบทำการออกแบบเครื่องผลิตไอโซนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสูงแบบสวิตชิง



รูปที่ 3.12 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องผลิตโอโซน และลักษณะแผ่นอิเล็กโทรดที่เลือกใช้

พลังงานที่ใช้ของชุดอิเล็กโทรด

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรอากาศในแกป} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \\
 &= (0.01\text{m} \times 0.10\text{m} \times 0.13\text{m}) \times 2 \text{ ชุด} \\
 &= 260 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \\
 &= 2600 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

ความต้องการพลังงาน / ปริมาตร คือ 1.172 kWh/ m³

$$\text{ที่ปริมาตร} = 2600 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความต้องการของพลังงานที่ต้องใช้} &= 1.172 \times 10^3 \times 260 \times 10^{-5} \\
 &= 3.0472 \text{ W-h}
 \end{aligned}$$

จนถึงย่านพลังงานที่ต้องการ/ ปริมาตร คือ 1.62 kWh/ m³

$$\text{ที่ปริมาตร} = 2600 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความต้องการของพลังงานที่ต้องใช้} &= 1.62 \times 10^3 \times 260 \times 10^{-5} \\
 &= 4.212 \text{ W-h โดยประมาณ}
 \end{aligned}$$

พลังงานในการผลิตเกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้า E สามารถหาได้จาก

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dv$$

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

$$E = \sqrt{\frac{2(3.0472)}{(8.854 \times 10^{-12})(2600)}}$$

$$E = 16.27 \text{ kV / cm}$$

$$E = \sqrt{\frac{2(4.212)}{(8.854 \times 10^{-12})(2600)}}$$

$$E = 19.129 \text{ kV / cm}$$

กำหนดให้ $d = 0.5 \text{ cm}$, $\eta^* = 20\%$

$$V_i = E_i d \eta^*$$

$$\text{ที่ } E_{\max} = 16.27 \text{ kV/cm}$$

$$V_i = (16.27 \text{ kV})(0.5)(0.2)$$

$$V_i = 1.627 \text{ kV}$$

$$\text{ที่ } E_{\max} = 19.129 \text{ kV/cm}$$

$$V_i = (19.129 \text{ kV})(0.5)(0.2)$$

$$V_i = 1.927 \text{ kV}$$

ดังนั้นย่านแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการโคโรนาในการผลิตคือ 1.627 – 1.927 kV ย่านสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 16.27 – 19.129 kV/cm. ย่านพลังงานคือ 3.0472 – 4.212 W-h

d = ระยะห่างระหว่างแกป

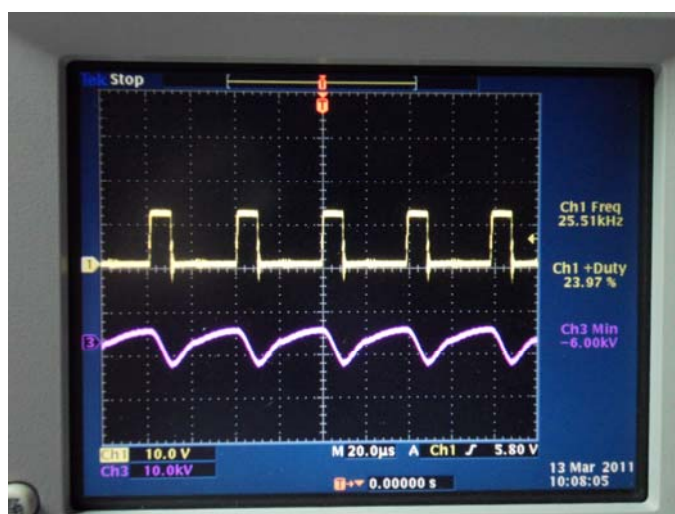
E_{\max} = ความเค้นสนามไฟฟ้าสูงสุดในแกประหว่างอิเล็กโทรด

η^* = แฟกเตอร์ของสนามไฟฟ้า

3.4 การทดสอบและปรับแต่งเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพลาสมา

3.4.1 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงความถี่สูง

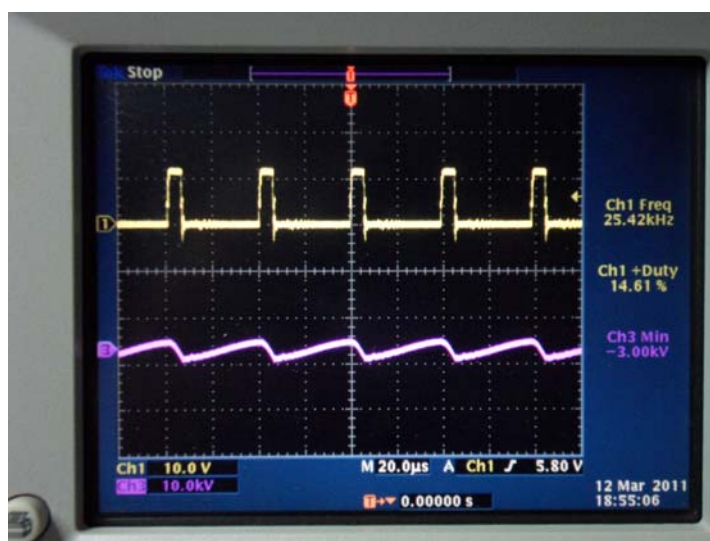
แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิ่ง โดยใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นตัวสร้างพัลส์วิดมอดูเลชัน เป็นวงจรควบคุมการสวิตชิ่ง ซึ่งใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ในการนำกระแสซึ่งมีความถี่ในการสวิตชิ่ง คือ 10 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์ สุดท้ายจะผ่านหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ขนาด 6 กิโลโวลต์ เพื่อจ่ายให้กับชุดผลิตก๊าซโอโซน



รูปที่ 3.15 สัญญาณกระแสที่ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟตและแรงดันเอาต์พุต -6 kVdc ของหม้อแปลงสวิตชิ่งแรงดันสูงความถี่สูง ขณะจ่ายไฟฟ้าที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์

3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น

จากการทดลองได้ปรับความถี่ที่วงจรควบคุมตั้งแต่ 10 kHz ถึง 40 kHz จะเห็นผลว่าปริมาณโอโซนที่ได้จะมีปริมาณที่ต่างกันออกไป ปริมาณ โอโซนที่เกิดในช่วงที่ดีที่สุดคือที่ความถี่ 25 kHz แรงดัน V_{out} เท่ากับ 3 kVdc และ Duty Cycle เท่ากับ 23.97 % ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.16 แสดงการปรับ Duty Cycle เท่ากับ 23.97 %

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับปริมาณ โอโซนที่เกิดขึ้น

Frequency	Ozone (mgO ₃ /hr)
10kHz	160
15kHz	230
20kHz	240
25kHz	216
30kHz	192
35kHz	186
40kHz	162

3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและโอโซนที่เกิดขึ้น

จากการทดลองได้นำอิเล็กโตรดแบบต่างๆ มาทำการทดสอบสรุปได้ว่าอิเล็กโตรดที่สามารถผลิตโอโซนได้ดีที่สุดคือ อิเล็กโตรดปลายแหลม กับ อิเล็กโตรดระนาบ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและโอโซนที่เกิดขึ้น

V _{out(DC)}	The ability of voltage and ozone quantity (mgO ₃ /hr)			
	Plate			
	Sharp point	wire	Wire-netting	plate
1kV	-	-	-	-
2kV	143	70	14	-
3kV	166	90	16	-
4kV	220	110	Breakdown	-
5kV	238	142	Breakdown	14
6kV	286	166	Breakdown	14
7kV	300	180	Breakdown	14

3.4.4 ความสัมพันธ์ของระยะช่องว่างอากาศและการผลิตโอโซนที่ได้เป็น (mgO₃/hr)

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 ความสามารถในการรับแรงดันเพิ่มตามระยะห่างของช่องว่างอากาศ (Gap) ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ช่องว่างอากาศกว้างค่าแรงดันที่ใช้ในการผลิตโอโซนก็สูงขึ้นตามไปด้วย ปริมาณโอโซนที่ได้หน่วยเป็น (mgO₃/hr) ที่ใช้มีค่าลดลงตามระยะห่างของช่องว่างอากาศ (Gap) ที่เพิ่มขึ้นที่ช่องว่างอากาศ 0.5 cm. ปริมาณโอโซนที่ได้ค่อนข้างสูง อิเล็กโตรดปลายแหลมปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดมาก และลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไป การกำหนดช่องอากาศแคบๆ คือการกำหนดย่านของค่าสนามไฟฟ้าภายในช่องอากาศที่เพียงพอต่อการผลิตโอโซน แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณปลายแหลมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เท่ากับเป็นการเพิ่มกระแสโคโรนาที่ไหลภายในแก๊ปทำให้ปริมาณโอโซนที่สร้างได้ลดลงจากการเบรกดาวน์ในที่สุด จากการทดลองปรับช่องว่างอากาศ (Gap) ที่แรงดัน 1 ค่าจะตั้งค่าแรงดัน, ความถี่ เดียวกันในการปรับระยะช่องว่างอากาศทั้ง 3 ช่วง เพื่อให้ได้ค่าปริมาณโอโซนออกมาแน่นอนที่สุด ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงในการปรับช่องว่างอากาศคือปริมาณโอโซนที่ได้ในแต่ละช่องว่างอากาศ

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของระยะช่องว่างอากาศและการผลิตโอโซนที่ได้เป็น (mgO₃/hr)

Voltage (kV _{DC})	ozone quantity (mgO ₃ /hr)		
	0.5 cm.	1.0 cm.	1.5 cm.
1	-	-	-
2	143	56	-
3	166	103	24
4	220	150	50
5	238	190	53
6	286	196	60
7	300	230	62