

บทที่ 3

อุปกรณ์เครื่องมือ

3.1 บทนำ

การผลิตไอออนของเครื่องกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ นั้นอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะ 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (cathode) ทำจากโลหะบริสุทธิ์ที่ต้องการผลิตเป็นไอออน กับขั้วทริกเกอร์อิเล็กโทรด (trigger electrode) ทำจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ที่วางห่างกันด้วยระยะเพียงเล็กน้อย เพื่อให้บริเวณผิวของแคโทดเกิดการอาร์คเป็นพลาสมา (plasma) ภายใต้ความดันสุญญากาศ (ความดัน 10^{-6} - 10^{-8} Torr) ดังนั้นระบบที่มีความจำเป็นต่อการให้กำเนิดไอออนสามารถแสดงด้วยไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วย

3.1.1 หัวกำเนิดไอออน (ion gun) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ตัว คือ แคโทด โลหะบริสุทธิ์ ขั้วทริกเกอร์ และ แอโนด (anode) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีส่วนร่วมในการศึกษาการทำงานของหัวจ่ายพลาสมาตั้งแต่เริ่มต้น ดังนั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

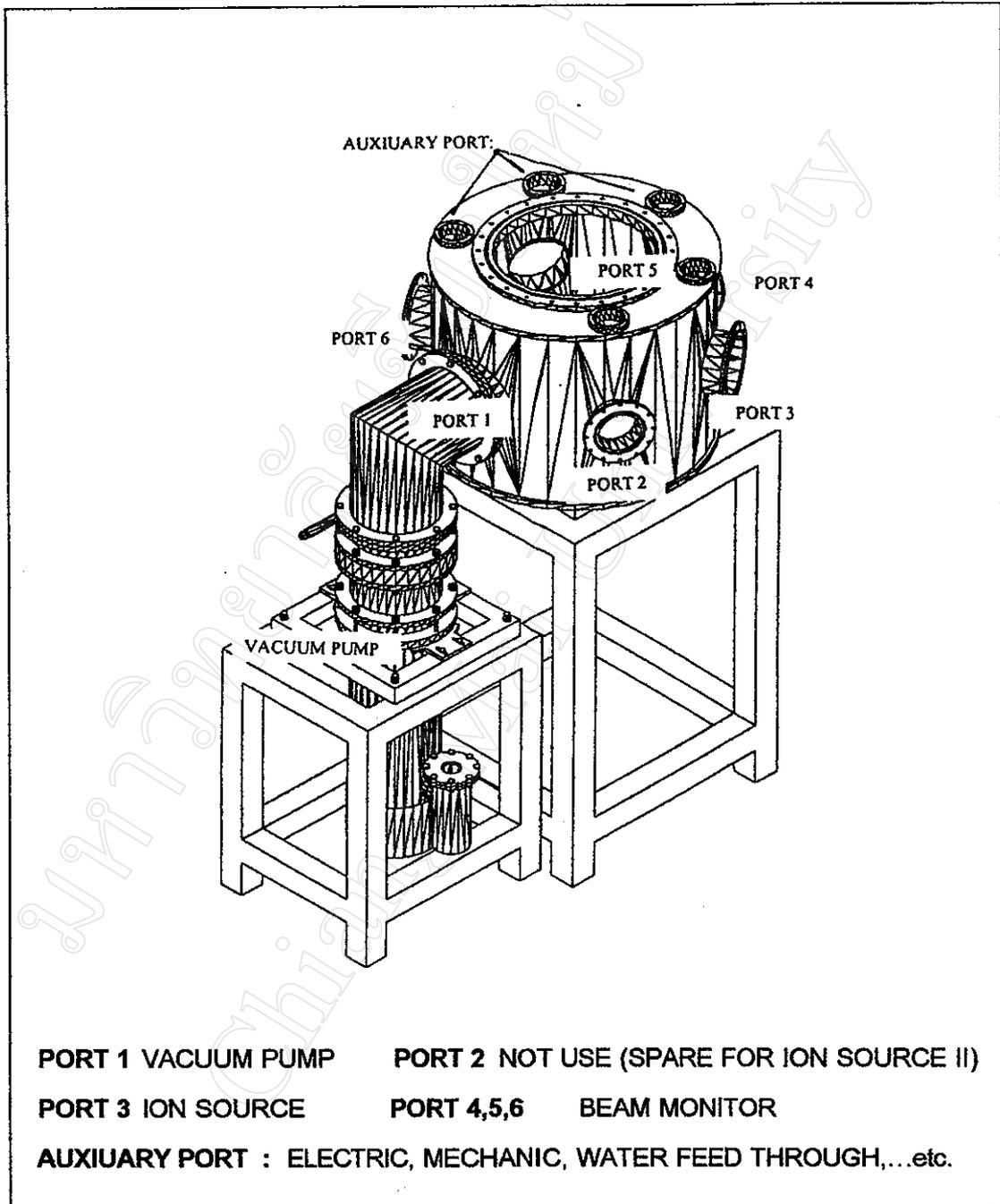
3.1.2 แคมเบอร์เป้า (target chamber)

แคมเบอร์เป้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญตัวหนึ่ง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ไม่ได้เกี่ยวข้องกับ การออกแบบแคมเบอร์เป้า ดังนั้นจึงจะอธิบายลักษณะของแคมเบอร์เป้านี้พอสังเขป ดังนี้ คือ ได้ออกแบบแคมเบอร์เอนกประสงค์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 cm. สูงประมาณ 60 cm. มีฝาด้านบนซึ่งมีขนาด 50 cm. ใช้สำหรับติดตั้งชิ้นงาน และด้านข้างมีพอร์ตอีก 6 พอร์ตขนาด 15 cm. ดังรูปที่ 3.1 โดยมีการใช้งานพอร์ตต่างๆ ดังนี้

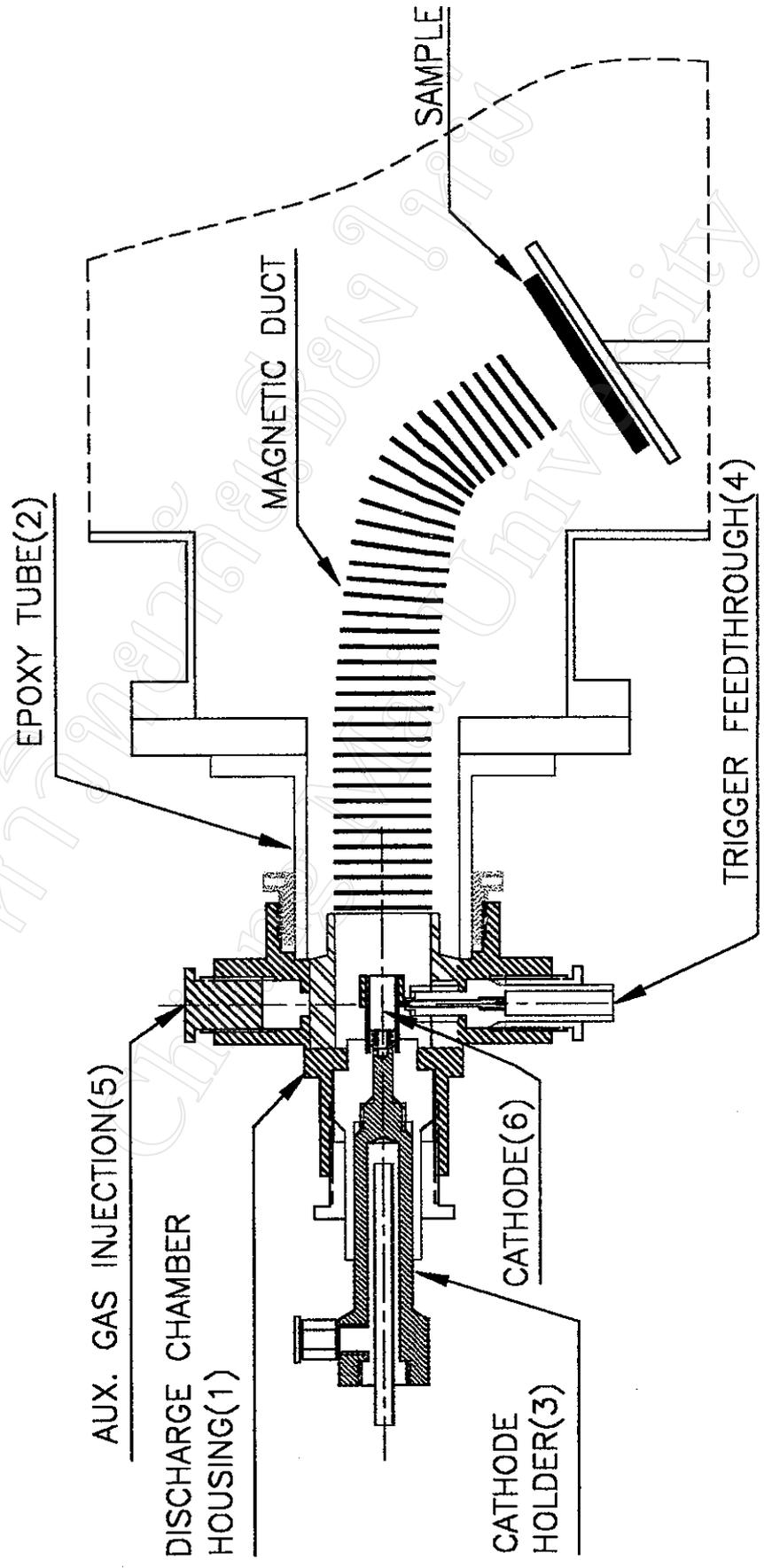
พอร์ตที่ 1 ติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศ เพื่อปรับความดันภายในแคมเบอร์เป้าให้ มีค่าประมาณ 10^{-6} Torr

พอร์ตที่ 3 ติดตั้งหัวกำเนิดไอออน (Ion source)

ส่วนพอร์ตอื่น ไม่ได้มีการใช้งานจะประยุกต์พอร์ตที่ 4, 5, 6 ไว้เป็นพอร์ตสำหรับสังเกตการทดลอง (beam monitor) นอกจากนี้ยังมีพอร์ตขนาดใหญ่อยู่ด้านล่างสำหรับติดตั้งระบบยึดเป้าและระบบระบายความร้อนของเป้าในอนาคต และมีพอร์ตเล็กๆ อีกจำนวนมากบริเวณด้านบนเพื่อความสะดวกในการพัฒนาและการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของพลาสมาที่เกิดขึ้น เช่น การวัดกระแส (plasma current measurement) เป็นต้น



รูปที่ 3.1 แสดงภาพสเก็ทแชมเบอร์เป็าเอนกประสงค์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี เอ สำหรับการทำฟิล์ม

3.1.3 ระบบจ่ายไฟและส่วนควบคุมการทำงาน เป็นส่วนประกอบหลักและงานหลักของงานวิจัยนี้ จึงจะได้มีการอธิบายอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

- ระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ (trigger power supply)
- ระบบจ่ายไฟอาร์ค (arc power supply)

3.1.4 ระบบสนับสนุนอื่นๆ เช่น ระบบสุญญากาศ และระบบน้ำที่ช่วยในการระบายความร้อนของระบบ

ในระยะแรกเริ่มของงานวิจัยนั้น ทางห้องปฏิบัติการโซลิดสเตทและอิเล็กทรอนิกส์ได้ออกแบบส่วนประกอบของระบบต่างๆ ให้สามารถทดลองทำฟิล์มบางโดยวิธี deposition ก่อน เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายกว่าการทำไอออนนิมเพลนเตชัน เพราะไม่ต้องมีระบบขั้วตั้งด้วย และในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ ระบบจ่ายไฟอาร์ค และออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดอนุภาคขนาดใหญ่ (macroparticle) เป็นหลัก

3.2. เครื่องมือที่ออกแบบสร้าง

3.2.1 หัวจ่ายไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ (MEVVA ion source)

การออกแบบหัวจ่ายพลาสมาของเครื่องกำเนิดชนิด เอ็ม อี วี วี เอ เริ่มต้นจากการอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูง (high field electron emission) ระหว่างขั้วแคโทดโลหะบริสุทธิ์กับขั้วทริกเกอร์ที่ใช้เป็นโลหะปลายแหลม ที่วางแยกห่างจากกันด้วยระยะเพียงเล็กน้อยภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นกลไกที่ทำให้พื้นเล็กๆ ที่ไม่เรียบของแคโทดในระดับไมครอนหรือไมโครทิปเกิดการไอออไนซ์กลายเป็นพลาสมา ซึ่งอาจเรียกกระบวนการนี้ว่า "กระบวนการพรีอาร์ค (pre-arc)" และอาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเป็นตัวทำให้เกิดการไอออไนซ์ต่อจากกระบวนการพรีอาร์ค ทำให้เกิดพลาสมาจำนวนมากขึ้น และมีช่วงระยะเวลาในการเกิดที่ยาวนานขึ้น ซึ่งหน้าที่และคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าหลักทั้ง 3 ขั้ว มีดังนี้ คือ

ก. ขั้วแคโทด เป็นขั้วที่ทำมาจากแท่งโลหะบริสุทธิ์ที่ต้องการผลิตเป็นไอออน และการจุดอาร์คให้ผิวแคโทดเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมานั้น จะขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดด้วย คือ ถ้าโลหะที่นำมาใช้เป็นแคโทดมีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ไททาเนียม (1933 K) ก็จะทำให้เกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาได้ยากกว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวลดลงอย่างต่ำ เช่น ทองแดง (922 K) และ อลูมิเนียม (933 K)

เพราะต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีปริมาณมากขึ้นด้วยในการทริกและจุดอาร์คในแต่ละครั้ง แต่ในขณะที่เดียวกันก็พบว่า สำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำก็จะมีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีความจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นตอนในการช่วยกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ด้วยสำหรับแคโทด ซึ่งทำจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น การเพิ่มท่อแม่เหล็กของงานวิจัยนี้

ข. ขั้วทริกเกอร์ เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ซึ่งหน้าที่ของทริกเกอร์ คือ กระตุ้นให้เกิดการจุดอาร์คเริ่มต้นขึ้นในสภาวะสุญญากาศได้ ด้วยการป้อนพลังงานแบบพัลส์ที่มีอัตรากำลังสูงในช่วงเวลาสั้นๆ จนทำให้เกิดความร้อนเฉพาะที่ (local heat) และเกิดการขยายสภาพของไอโลหะ ที่ประกอบไปด้วยอะตอมที่ถูกไอออไนซ์จำนวนมากมาบริเวรรอบๆ แคโทดและแอโนดเป็นอันสิ้นสุดหน้าที่ของทริกเกอร์ หากผลจากการทริกเกอร์มีอะตอมที่ถูกไอออไนซ์จำนวนมากพอจะก่อให้เกิดการอาร์คด้วยกระแสปริมาณมากผ่านทางวงจรแอโนดและแคโทดได้

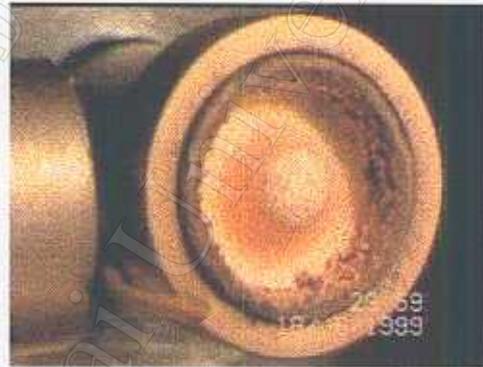
ค. ขั้วแอโนด เป็นขั้วอิเล็กโตรดไฟฟ้าอีกขั้วที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการอาร์ค โดยทำหน้าที่อาร์คไอของโลหะต่อจากทริกเกอร์ เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณหรือความหนาแน่นของพลาสมาให้มากขึ้น การอาร์คของขั้วแอโนดนี้จะคล้ายกับการอาร์คที่เกิดจากทริกเกอร์ กล่าวคือ เป็นการอาร์คที่เกิดจากการจ่ายกระแสให้ขั้วแอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมีความต่างศักย์สูงในเรอินหลายร้อยกิโลโวลต์ เทียบกับแคโทดในลักษณะที่เป็นพัลส์เช่นกัน โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการทริกจะเคลื่อนที่จากผิวแคโทดไปยังแอโนดและทำให้ไอของโลหะเกิดการไอออนไนซ์เป็นพลาสมามากขึ้น และพลาสมาที่เกิดขึ้นจะพุ่งออกในทิศตั้งฉากกับผิวแคโทดด้วยแรงระเบิดผ่านช่องแอโนด เคลื่อนที่ออกไปในทิศทางเข้าหาเป้า

แต่เนื่องจากโครงสร้างลักษณะดังกล่าว ยังมีข้อเสียคือ การอาร์คจะทำให้ผิวของแคโทดมีการสึกเป็นพื้นที่จำกัดเล็กๆ ดังรูปที่ 3.3 ก ทำให้สิ้นเปลือง ดังนั้นหัวจ่ายไอออนที่ออกแบบขึ้นมาใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการนั้น จะใช้ทริกเกอร์เป็นชนิดวงแหวนและถูกแยกออกจากแคโทดด้วยวงแหวนเซรามิกซ์ (ceramic) บาง ดังรูปที่ 3.4 และกลไกการอาร์คที่เกิดขึ้นจริงจึงเป็นกลไกของ surface ionization ซึ่งเป็นกลไกที่สามารถจุดอาร์คได้ง่ายและทำให้แคโทดโลหะมีการสึกหรอสม่ำเสมอว่าการใช้ทริกเกอร์ปลายแหลม แต่ก็ยังคงเรียกว่าเครื่องกำเนิดไอออนชนิดอาร์คในสุญญากาศ เช่นกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ทองแดง

บริสุทธิ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm. เป็นวัสดุแคโทด ส่วนทริกเกอร์อิเล็กโตรดนั้นอยู่ล้อมรอบแคโทดโดยมีแผ่นฉนวนบางประมาณ 1 mm. วางคั่นขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งภายหลังจากการใช้พบว่าขั้วแคโทดมีการสึกในลักษณะวงแหวน ดังรูปที่ 3.3 ข จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแคโทดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 6 mm. หลังจากขบวนการทริกแล้ว พลาสมาที่เกิดขึ้นที่ผิวแคโทดและมีทิศพุ่งออกจากผิวแคโทดนี้จะมีจำนวนหรือความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อมีกระแสอาร์คระหว่างแคโทดและแอโนดรูปทรงกระบอก แล้วเคลื่อนตัวผ่านช่องของอาโนดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 mm. ออกมา ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำ film deposition ที่ต้องการได้

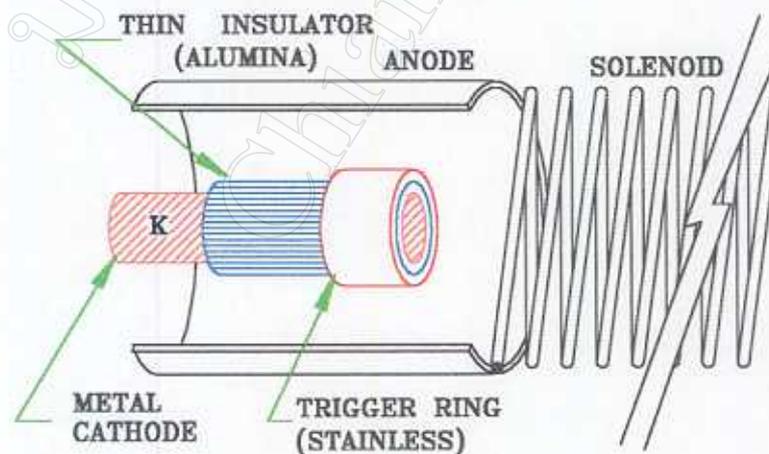


ก. กรณีใช้ทริกเกอร์ปลายแหลม

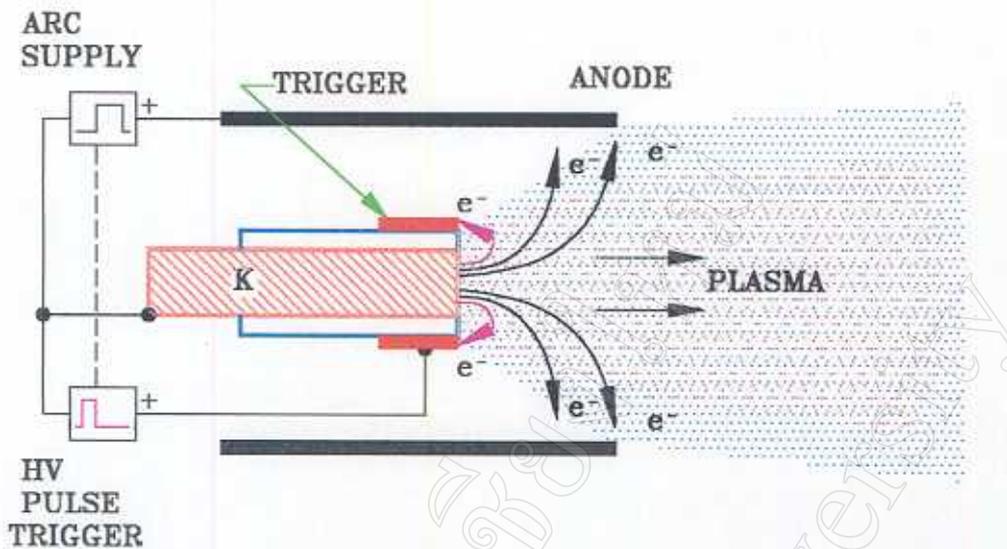


ข. กรณีใช้ทริกเกอร์วงแหวน

รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการสึกบริเวณผิวแคโทดที่ผ่านการใช้งานระหว่างทริกเกอร์ชนิดปลายแหลม และชนิดวงแหวน



รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างภายในหัวกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ



รูปที่ 3.5 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะอาร์คของหัวจ่ายพลาสมา

3.2.2 ระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ (trigger power supply)¹³

ในทางเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดการอาร์คในสุญญากาศสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น

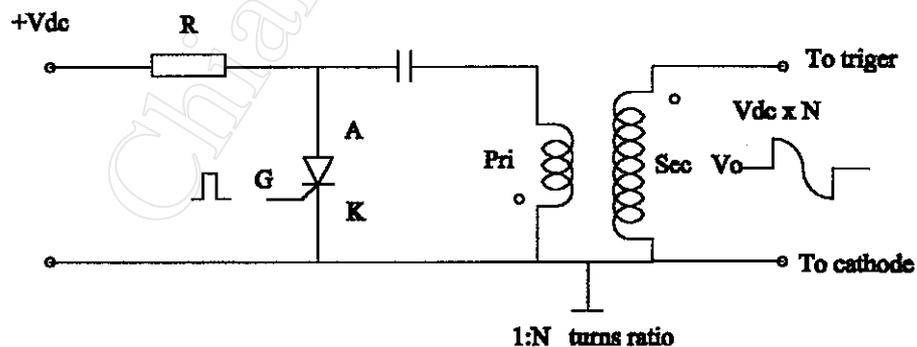
- วิธี HV vacuum breakdown ซึ่งต้องการสนามไฟฟ้าที่ผิวแคโทดในเรอณ 10^7 - 10^8 V/m
- วิธี Fuse wire explosion
- วิธี plasma injection trigger

แต่วิธีดังกล่าวนี้อาจมีข้อจำกัดด้านอัตราเร็วในการทริก และบางวิธีก็ค่อนข้างยุ่งยากและสิ้นเปลือง ดังนั้นทางห้องปฏิบัติการจึงเลือกใช้วิธี high voltage surface discharge ซึ่งสามารถทริกด้วยอัตราเร็วค่อนข้างสูงได้ และใช้ค่าความต่างศักย์วงจรมืด (open circuit voltage) ต่ำกว่ากรณีของ HV vacuum breakdown เล็กน้อย สำหรับเครื่องจ่ายไฟทริกเกอร์ชนิดกำลังสูงได้ออกแบบขึ้นก่อนหน้านี้ โดยอาศัยหลักการคายประจุจากตัวเก็บประจุความต่างศักย์สูงในเรอณ >10 kV ผ่านช่องสปาร์ก (spark gap) ซึ่งบรรจุไว้ในระบบปิดที่มีแก๊สไนโตรเจน ความดันบรรยากาศประมาณ 2 บรรยากาศ ระบบดังกล่าวให้กำลังทริกได้สูงมาก แต่ค่อนข้างยุ่งยาก จึงได้มีการออกแบบพัฒนาเครื่องจ่ายไฟทริกเกอร์กำลังปานกลางขึ้นใหม่ โดยอาศัยการคายประจุจากตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์ต่ำในเรอณ 200 V ผ่านวงจรหม้อแปลงเพิ่มความต่างศักย์ (step up transformer) ซึ่งใช้งานได้ง่ายและราคาถูก เพราะสามารถใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานควบคุมการทำงานได้โดยง่าย

เครื่องจ่ายไฟทริกเกอร์ (trigger power supply) กำลังปานกลาง ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีค่าความต่างศักย์สูงเพียงพอที่จะทำหน้าที่ทริกให้เกิดการอาร์คของวัสดุแคโทดประเภทที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ อาทิเช่น ทองแดง (Cu), อลูมิเนียม (Al), โครเมียม (Cr) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ที่เป็นการศึกษาเกี่ยวข้องกับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจากวัสดุแคโทดที่ทำจากทองแดง ซึ่งพบว่าเครื่องจ่ายไฟทริกเกอร์จะต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

1. ความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (open circuit voltage) มีค่าสูงอย่างต่ำประมาณ 5-10 kV
2. กระแสขณะวงจรปิด (short circuit current) มีค่า หลายสิบล้านแอมแปร์
3. ความกว้างพัลส์มีค่าปานกลาง คือ ในช่วงหลาย μs ไปจนถึง ms
4. Repetition rate ประมาณ 5 pps หรือสูงกว่า

จากคุณสมบัติดังกล่าวและจากการสำรวจอุปกรณ์แรงดันสูงแบบพัลส์ พบว่าคอยล์จุดระเบิดรถยนต์ (ignition coil) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นหม้อแปลงเพิ่มความต่างศักย์ที่มีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบโดยประมาณ 1:80 และค่าศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดมีค่าสูง กับกระแสขณะลัดวงจรขาออกมีค่าสูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจ่ายไฟทริกเกอร์ได้ จึงได้มีการนำคอยล์จุดระเบิดรถยนต์มาประยุกต์ใช้เป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับขั้วทริกเกอร์ โดยนำมาใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์หรือไทรสเตอร์ (Thyristor) เพื่อควบคุมความต่างศักย์ของคอยล์จุดระเบิดรถยนต์ที่เกิดขึ้น ด้วยการควบคุมการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ ผ่านทางขาเกตของไทรสเตอร์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรอย่างง่ายของทริกเกอร์ที่ใช้คอยล์จุดระเบิดรถยนต์เป็นหม้อแปลงเพิ่มความต่างศักย์ ($N \approx 80$)

จากวงจรอย่างง่ายในรูปที่ 3.6 สามารถอธิบายการทำงานโดยสังเขป ดังนี้ คือ ด้านวงจรขาเข้า (ด้านซ้ายมือของวงจรปฐมภูมิของคอยล์จุกะเบ็ดรถยนต์) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน R กับ ตัวเก็บประจุ C และแหล่งไฟตรง V_{DC} สำหรับสวิตช์ไทรสเตอร์ที่ต่อคร่อมตัวเก็บประจุกับขดลวดปฐมภูมิ จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุมการจ่ายกระแส (switch current, I_C) ให้กับคอยล์ทางวงจรปฐมภูมิ ซึ่งไทรสเตอร์จะมีสภาวะปกติเป็น "OFF" และขณะที่อยู่ในสภาวะ "OFF" จะมีการอัดประจุของตัวเก็บประจุจาก V_{DC} ผ่านความต้านทาน R เมื่อมีการทริกทางขาเกทของไทรสเตอร์ หรือไทรสเตอร์มีสภาวะ "ON" ตัวเก็บประจุจะคายประจุให้กับขดลวดปฐมภูมิของคอยล์ ทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ และเมื่อคายประจุหมดก็จะกลับสู่สภาวะปกติ "OFF" ก็จะเกิดการอัดประจุตัวเก็บประจุผ่านตัวต้านทาน R อีกครั้งเพื่อรอการทริกครั้งต่อไป ซึ่งอัตราเร็วการทริกของระบบจะแปรผกผันกับค่าคงที่ของเวลา (time constant) ของ RC ในวงจร เช่น สมมติว่าถ้ามีเงื่อนไขการประจุ $0.98V_{DC}$ หรือ 98% ซึ่งจะสอดคล้องกับเวลาอัดประจุ (charging time) $t_{charge} \approx 4RC$ จะได้ว่าอัตราเร็วของการทริกสูงสุดจะเป็น $1/4RC$ พัลส์ต่อวินาที (pulse per second, pps) ตามสมการ

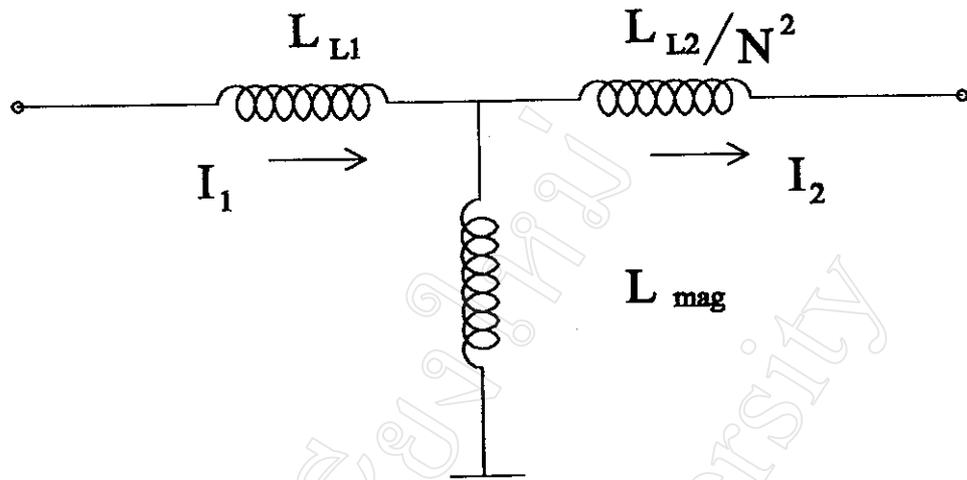
$$\frac{V_C(t)}{V_{DC}} = 1 - e^{-t/RC} \quad (3.1)$$

$$\text{เมื่อ } t_{charge} \approx 4RC \quad (3.2)$$

ค่าความจุ C ใช้กำหนดพลังงานที่ต้องการในการทริกแต่ละครั้ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U = \frac{1}{2} V_{DC}^2 C \quad (3.3)$$

ดังนั้น วัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูงก็ต้องการตัวเก็บประจุที่มีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับตัวต้านทาน (R) ที่ใช้ จะเป็นตัวกำหนดอัตราการอัดประจุของตัวเก็บประจุ กล่าวคือ ถ้าค่า R น้อยจะสามารถอัดประจุได้เร็ว แต่ค่าความต้านทานนี้จะมีค่าน้อยมากไม่ได้ เพราะถูกจำกัดค่าจากไทรสเตอร์ด้วย คือ ต้องเป็นค่าทำให้ค่ากระแสเมื่อเริ่มชาร์จประจุ ($I_{t=0} = V_{DC}/R$) มีค่าน้อยกว่ากระแสโฮล (hold on current) เพราะ ถ้าค่าความต้านทานที่ใช้ทำให้เกิดมีกระแสไหลในวงจรมีค่ามากกว่ากระแสโฮล จะทำให้ไทรสเตอร์มีสถานะเป็น ON ก็จะไม่สามารถอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุได้



Transformer equivalent circuit

รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงในคอยล์จุดระเบิดทรานซิสเตอร์

สำหรับวงจรขาออกสามารถแยกวิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี คือ ศักย์ไฟฟ้าขาออกของวงจรเปิด (open circuit output voltage; V_{oo}) หรือขณะที่ยังไม่เกิดการอาร์ค และกระแสไหลตรงขาออก (output short circuit current, I_{co}) หรือขณะเกิดการอาร์ค โดยการแทนวงจรคอยล์ด้วยวงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้าขาออกวงจรเปิดขณะที่ไม่เกิดการอาร์ค V_{oo} และขณะอาร์คเป็น V_{co} และกระแสเข้าปฐมภูมิ I_{pk} และจากการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ตามรายละเอียด ดังต่อไปนี้

การออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์ของเครื่องทริกเกอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย อุปกรณ์หลักที่มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| - แหล่งจ่ายไฟตรง | $V_{DC} = 200 \text{ V}$ |
| - ตัวเก็บประจุ | $C \geq 5 \mu\text{F}$ |
| - ตัวต้านทาน | $R \geq 10 \text{ k}\Omega$ |
| - ไทริสเตอร์ชนิด | Triac 15 A 600 V |
| - หม้อแปลงไฟฟ้า (คอยล์) | |
| อัตราส่วนรอบ | $1:N = 1:80$ |
| ค่าความเหนี่ยวนำ* | $L_L = 1.2 \text{ mH}$ |
| | $L_{mag} = 5.0 \text{ mH}$ |

* ค่าความเหนี่ยวนำได้จากการวิเคราะห์¹⁴

สมบัติทางไฟฟ้าของเครื่อง เมื่อใช้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ $5 \mu\text{F}$ และตัวต้านทานมีค่า $10 \text{ k}\Omega$ (อัตราเร็วในการทริกสูงสุด 5 pps) จากการวิเคราะห์ห้อย่างง่าย (ภาคผนวก ก) สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งมีค่าเพียงพอที่จะใช้ทริกเพื่อจุดอาร์ควัสดุ

แคโทดทองแดง ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ จะสังเกตว่ากระแสขาออก I_{CO} ที่ต้องการมีค่าน้อยกว่า 1 A กระแสนี้จะต้องมากขึ้นสำหรับวัสดุแคโทดที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทังสเตน (W) ซึ่งสามารถเพิ่มค่า I_{CO} ได้โดยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ

| Electrical Parameters | Wave shape | Formula (peak) | Value (peak) |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------|
| Open circuit output voltage V_{OO} | Half cosine | $V_{DC} \times N$ | 16 kV |
| Switch current when :- | | | |
| - secondary open I_{pk} | Half sine | $V_{DC} / \sqrt{L_{mag}/C}$ | 6 A |
| - secondary close I_{cpk} | Half sine | $V_{DC} / \sqrt{L_L/C}$ | 12.5 A |
| Close circuit output current I_{CO} | Half sine | I_{cpk} / N | 0.16 A |
| Current period output open T_{ZO} | - | $\pi \sqrt{L_{mag} C}$ | 0.5 ms |
| Current period output close T_{ZC} | - | $\pi \sqrt{L_L C}$ | 77 μ s |

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องทริกเกอร์ที่ออกแบบขึ้นใช้งาน

วงจรทริกเกอร์ของเครื่องทริกเกอร์ที่รวมวงจรควบคุมต่างๆเข้าด้วยกันแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยวงจรควบคุมขาเกตที่สร้างจากไอซีตั้งเวลาเบอร์ 555 สองตัว ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเกตในโหมด "single" คือ สามารถทริกทีละนัด และโหมด "multi" คือ สามารถทริกต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วที่ตั้งค่าได้ ส่วนไอซีเชื่อมโยงด้วยแสง (Opto coupler) เบอร์ 4N26 และ MDC3020 ใช้เพื่อป้องกันสนามไฟฟ้าต้านเอาท์พุทย้อนกลับไปรบกวนอินพุท ได้เพิ่มวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ทั้งชนิด ลอจิกบวกและลอจิกลบไว้ควบคุมอุปกรณ์ภายนอก เช่น วงจรนับพัลส์ เป็นต้น สำหรับสวิทช์ไทรสเตอร์ได้เลือกใช้ ไทรแอค (Triac) ซึ่งทำงานได้เช่นเดียวกับ SCR แต่จัดทำได้งานกว่าในวงจร จะเห็นว่าใช้ไทรแอคสองตัว โดยตัวแรกทำหน้าที่เป็นภาคขับ (driver) โดยวิธีนี้จะทำให้อุปกรณ์ขับที่เชื่อมโยงด้วยแสง (Opto coupler) ทำงานเบาลง

3.2.3 ระบบจ่ายไฟอาร์ค (Arc power supply)

เครื่องจ่ายไฟอาร์คเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อการผลิตพลาสมาโดยตรง ดังนั้นเครื่องจ่ายไฟอาร์คที่มีกำลังสูงมากก็จะสามารถผลิตพลาสมาความหนาแน่นสูง และให้กระแสไอออนในปริมาณสูงได้ ในด้านวงจรไฟฟ้านั้นเครื่องจ่ายไฟอาร์คมีหน้าที่จ่ายกำลังในรูปของกระแสอาร์คแบบพัลส์ให้กับขั้วแอโนด โดยจะเริ่มทำงานเมื่อมีการจุดทริกให้พลาสมาก่อตัวขึ้นแล้วในช่วงต้น พัลส์อาร์คที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งจะมีกระแสขณะอาร์คหรือความกว้างพัลส์เท่าใดนั้นจะขึ้นกับคุณสมบัติของเครื่องจ่ายไฟอาร์คและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องจ่ายไฟอาร์ค

การอาร์คสามารถทำให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ ถ้าเครื่องจ่ายไฟอาร์คสามารถจ่ายกระแสได้ตลอดช่วงการทำงาน แต่ในทางปฏิบัตินั้นมีข้อจำกัด 2 ประการ คือ เครื่องจ่ายไฟอาร์คจะต้องมีกำลังสูงมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และการระบายความร้อนของระบบในสุญญากาศจะต้องมีประสิทธิภาพเพียงพอ เพราะการอาร์คที่ต่อเนื่องจะเกิดความร้อนสูงมาก จากข้อจำกัดดังกล่าว ในปัจจุบันจึงนิยมทำการอาร์คในแบบพัลส์ โดยมีการระบายความร้อนของระบบเป็นตัวแปรสำคัญในการจำกัดการใช้กำลังอาร์ค ซึ่งจะมีค่าขึ้นกับ กระแสอาร์ค ความกว้างของพัลส์ที่อาร์ค และอัตราการจุดอาร์ค (เป็นพัลส์ต่อวินาที) สำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกขณะวงจรถูกเปิดของเครื่องจ่ายไฟอาร์คนั้นมีค่าไม่สูงมากเหมือนในทริกเกอร์ แต่ต้องสามารถจ่ายกระแสในการอาร์คได้มากในเรือนหลายร้อยแอมแปร์ เป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้เพราะในระหว่างการอาร์ค ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดจะมีค่าประมาณ 30 V หรือประมาณเท่ากับศักย์พลาสมา (plasma potential; V_p) แต่ในขณะที่เริ่มอาร์คจะต้องมีศักย์ไฟฟ้าขาออกของวงจรถูกเปิดมากกว่า V_p เล็กน้อย ในระบบที่ใช้อยู่พบว่า ถ้าต้องการให้การอาร์คมีเสถียรภาพที่ดี ควรมีศักย์ขาออกขณะวงจรถูกเปิดมากกว่า 100 V ดังนั้นหัวใจสำคัญสำหรับเครื่องจ่ายไฟอาร์คจะเป็นเรื่องของกำลัง ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องจ่ายไฟอาร์คที่เหมาะสม มีดังนี้

1. สามารถจ่ายกระแสอาร์คได้ในเรือนหลายร้อยแอมแปร์
2. ความกว้างพัลส์ปรับได้ ในเรือนหลายร้อย μs ถึง ms
3. อัตราเร็วการจุดอาร์ค ควรมีค่าประมาณหลายสิบพัลส์ต่อวินาที (pulse per second; pps) แต่สำหรับงานวิจัยสามารถใช้เพียงไม่ถึง 10 pps
4. มีศักย์ไฟฟ้าขาออกขณะวงจรถูกเปิดมากกว่า 100 V

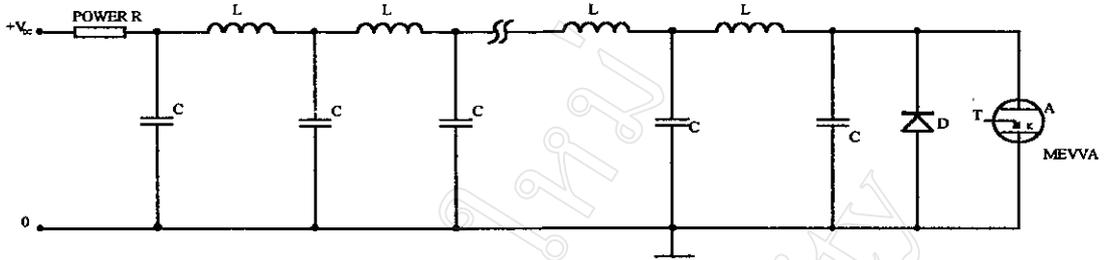
ขณะวงจรถูกปิดประมาณ 20-40 V

สมบัติ 3 ข้อแรกมีผลโดยตรงต่อกำลังของเครื่องจ่ายไฟ ส่วนข้อสุดท้ายเป็นเพียงคุณสมบัติสนับสนุน โดยทั่วไปการออกแบบจะเริ่มด้วยการกำหนดกำลังสูงสุดที่ต้องการก่อนแล้วจึงกำหนดคุณสมบัติเด่น คือ ข้อหนึ่งข้อใดในสามข้อ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นตัว

เลือกเทคโนโลยีหรือเทคนิคด้านวงจรที่เหมาะสม ตัวอย่าง เช่น ถ้าเลือกให้มีอัตราเร็วเป็น pps มีค่าสูงมาก กระแสและความกว้างพัลส์จะต้องมีค่าต่ำ เทคนิควงจรจะต้องเป็นชนิดทรานซิสเตอร์สวิตช์ความไวสูง เป็นต้น โดยพื้นฐานของเครื่องจ่ายไฟอาร์คจะทำงานด้วยกระแสอาร์ค ดังนั้นการออกแบบทั่วไปมักจะพิจารณาให้กระแสอาร์คเป็นลักษณะเด่นไว้ก่อนแล้วจึงใช้ 3 ปัจจัยที่เหลือเป็นตัวเลือกเทคโนโลยี แต่ถึงอย่างไรก็ตามสำหรับกระแสอาร์คมีความจำเป็นต้องสูงกว่าลิมิตขั้นต่ำ คือ ประมาณ 100 A หากต่ำกว่านี้การอาร์คจะเริ่มไม่เสถียร ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกระแสอาร์คเป็นลักษณะเด่น ซึ่งจะมีข้อด้อยทางด้านความกว้างและอัตราเร็วในการทริก เทคนิควงจรที่เลือกใช้เป็นชนิด LC delay line เป็นวงจรพาสซีฟที่สามารถจ่ายกระแสอาร์คได้สูงถึง 400 A ความกว้างพัลส์ประมาณ 500 μs สำหรับอัตราเร็วมีค่าค่อนข้างต่ำ < 5 pps ซึ่งเป็นวงจรที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุดสามารถสร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่จัดหาได้ภายในประเทศทั้งสิ้น โดยวงจรชนิด LC delay line ที่ออกแบบขึ้นใช้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

| | | |
|---------------------|-----------------------------------|--|
| Major parameters | Circuit type | LC delay line |
| | No. of section n | 8 |
| | Inductance L (each) | 47 μH |
| | Capacitance C (each) | 22.7 μF 1200 V |
| | Power resistor R | 800 Ω 250 W |
| Minor parameters | Power diode D | 1200 V 300 A |
| | Adjustable V_{DC} | 0-800 V |
| Circuit performance | Arc current I_A | 400 A_{max} at $V_{DC}=800$ V |
| | Pulse width $\tau = 2n\sqrt{LC}$ | 550 μs |
| | Repetition rate $\gamma = 1/4nRC$ | \approx 2 pps max (air cool) |
| | Impedance $Z = \sqrt{L/C}$ | 1.4 Ω |

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องจ่ายไฟอาร์คที่ออกแบบขึ้นใช้งาน



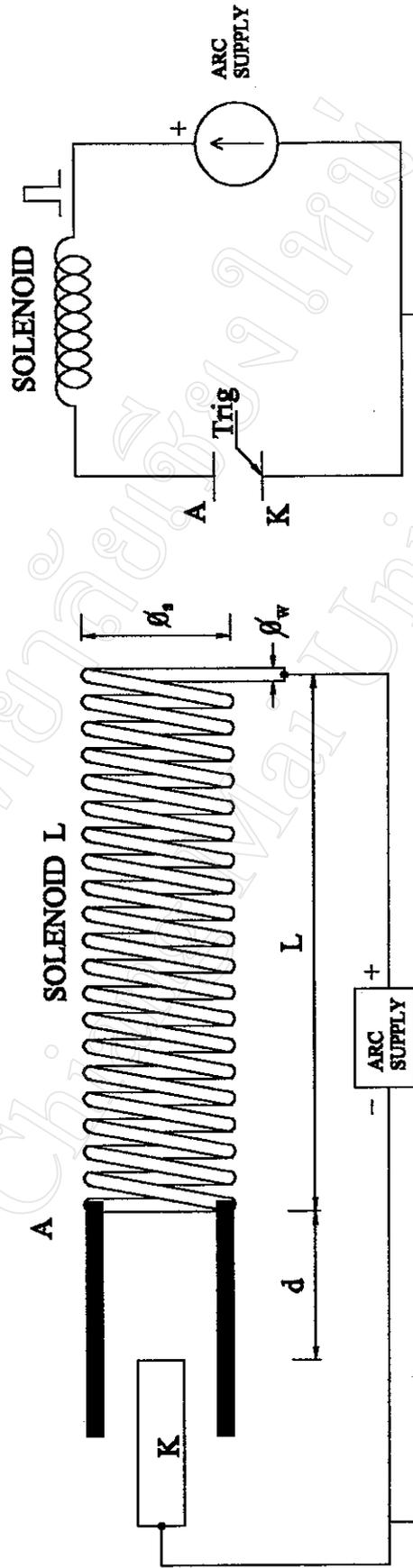
รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างวงจรพื้นฐานของเครื่องจ่ายไฟอาร์ค

การทำงานโดยสังเขปของวงจรในรูปที่ 3.9 มีดังนี้ คือ แหล่งจ่ายไฟตรง V_{DC} ได้มาจากวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (slide regulator transformer) หม้อแปลงเพิ่มความต่างศักย์กับวงจรเรียงและกรองกระแสที่ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-800 โวลต์ คัทดาออกที่เอาพุทขณะวงจรเปิดจะมีค่าเท่ากับ V_{DC} เมื่อหัวจ่ายไอออนของเครื่องกำเนิดไอออนถูกทริกวงจรรีอาร์คจะจ่ายกระแสอาร์คเป็นพัลส์ที่มีความกว้าง (τ) ตามตารางที่ 3.2 และแต่ละครั้งที่อาร์คประจุจะถูกใช้จนหมด และอัดประจุใหม่ผ่านตัวต้านทาน (R) ในช่วงเวลาอันสั้นที่สุดก่อนการทริกครั้งต่อไป (γ) สำหรับไดโอดมีหน้าที่สำหรับขลิบขณะสัญญาณไฟฟ้าขาออกที่มีค่าเป็นลบ

3.2.4 ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid)

ขดลวดโซลินอยด์เป็นอุปกรณ์สำคัญอีกชิ้นหนึ่งในงานวิจัยนี้เพราะเป็นส่วนที่ใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการอาร์คของเครื่องกำเนิดไอออนชนิดเอ็ม อี วี เอ โดยหน้าที่ของขดลวดโซลินอยด์ คือ สร้างสนามแม่เหล็กในแนวแกน เพื่อใช้ในการลำเลียงพลาสมาจากหัวกำเนิดไอออนออกมาที่วัสดุเป้า

เพื่อลดความยุ่งยากในการจัดหาเครื่องจ่ายไฟและขั้นตอนในการติดตั้งภายในระบบสุญญากาศ จึงทำการเชื่อมต่อขดลวดโซลินอยด์เข้ากับวงจรของขั้วแอโนดแบบอนุกรม (ดังรูป 3.10 ก) คือ เมื่อแอโนดมีกระแสไฟฟ้าไหลก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ด้วย ทำให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในแนวแกนภายในขดลวดและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าแปรผันตามค่าของกระแสอาร์ค แล้วจากการต่อขดลวดโซลินอยด์อนุกรมเข้ากับแอโนด ทำให้ขดลวดโซลินอยด์เป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรอาร์คด้วยดังรูป 3.10 ข แต่เนื่องจากมีจำนวนรอบไม่มากนัก ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อวงจรอาร์คโดยรวม



ก. แสดงการต่อโซลีนอยด์เข้ากับแอโนด

ข. แสดงการเชื่อมต่อโมโยวงจรทางไฟฟ้า

รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะการต่อขดลวดโซลีนอยด์ตรงอนุกรมเข้ากับแอโนด

ในขณะที่เกิดการอาร์ค กระแสอาร์คจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้ง
กราฟรูป 3.12 โดยลักษณะและคุณสมบัติของขดลวดโซลินอยด์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

ลักษณะทั่วไปของโซลินอยด์ (รูปที่ 3.11)

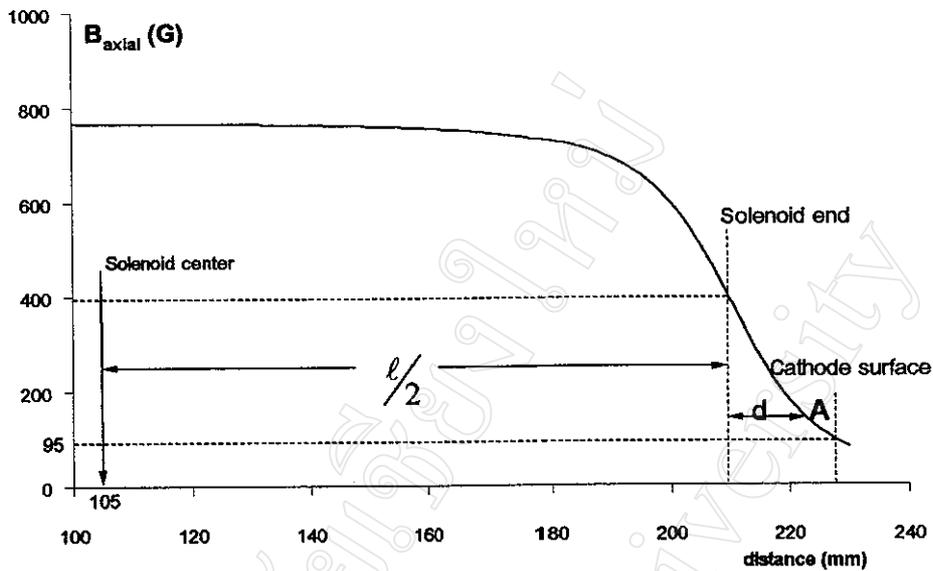
| | | |
|--|-----|-----|
| วัสดุที่ใช้ (Material) | Cu | |
| เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (ϕ_w) | 2.5 | mm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่อโซลินอยด์ (ϕ_s) | 30 | mm |
| ความยาวของท่อโซลินอยด์ (l) | 210 | mm |
| จำนวนรอบ | 43 | รอบ |

คุณสมบัติ เมื่อค่ากระแสอาร์ค (I_{ARC}) = 300 A

| | | | |
|----------------|-----------------|------|----|
| B_{axial} at | Solenoid center | 760 | G |
| | Solenoid end | 390 | G |
| Lamor radius | ion | 180 | mm |
| | electron | 1.25 | mm |



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงขดลวดโซลินอยด์ที่ใช้ในการลำเลียงพลาสมา



รูปที่ 3.12 แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกนของโซลินอยด์

$$\text{เมื่อ } I_{ARC} = 300 \text{ A}$$

ขณะที่พลาสมาเดินทางในท่อแม่เหล็ก พลาสมาจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในแนวแกนของโซลินอยด์ (\vec{B}) และสนามไฟฟ้า (\vec{E}) อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนและไอออนซึ่งมีทิศพุ่งเข้าแกนกลางของท่อโซลินอยด์ ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนเกิดการหมุนควงในทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า (\vec{E}) และสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) หรือในลักษณะ $\vec{E} \times \vec{B}$ drift motion นั้นเอง ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่มีประจุจะเคลื่อนในแนวเส้นตรง

สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์บริเวณผิวแคโทด (ตำแหน่ง A) มีบทบาทสำคัญต่อการแตกตัวของไอออน จากกราฟ พบว่า สนามแม่เหล็กบริเวณผิวแคโทดมีค่าประมาณ 95 Gauss ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวของพลาสมาให้สูงขึ้นด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบวงให้ขดลวดโซลินอยด์โค้งทำมุมประมาณ 60° กับแนวการเคลื่อนที่เดิมของพลาสมา ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในขดลวดนี้จะไปเหนี่ยวนำให้อนุภาคที่มีประจุ คือ อิเล็กตรอนเกิดการควงด้วยรัศมีค่าน้อยๆ รอบเส้นแรงแม่เหล็กและไปเหนี่ยวนำไอออนให้เคลื่อนที่ตามออกมาที่ปลายท่อ ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะยังคงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงต่อไป ไม่สามารถเคลื่อนที่มาถึงวัสดุเป้าได้ ทำให้พลาสมาที่มาถึงปลายท่อมีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ลดลง