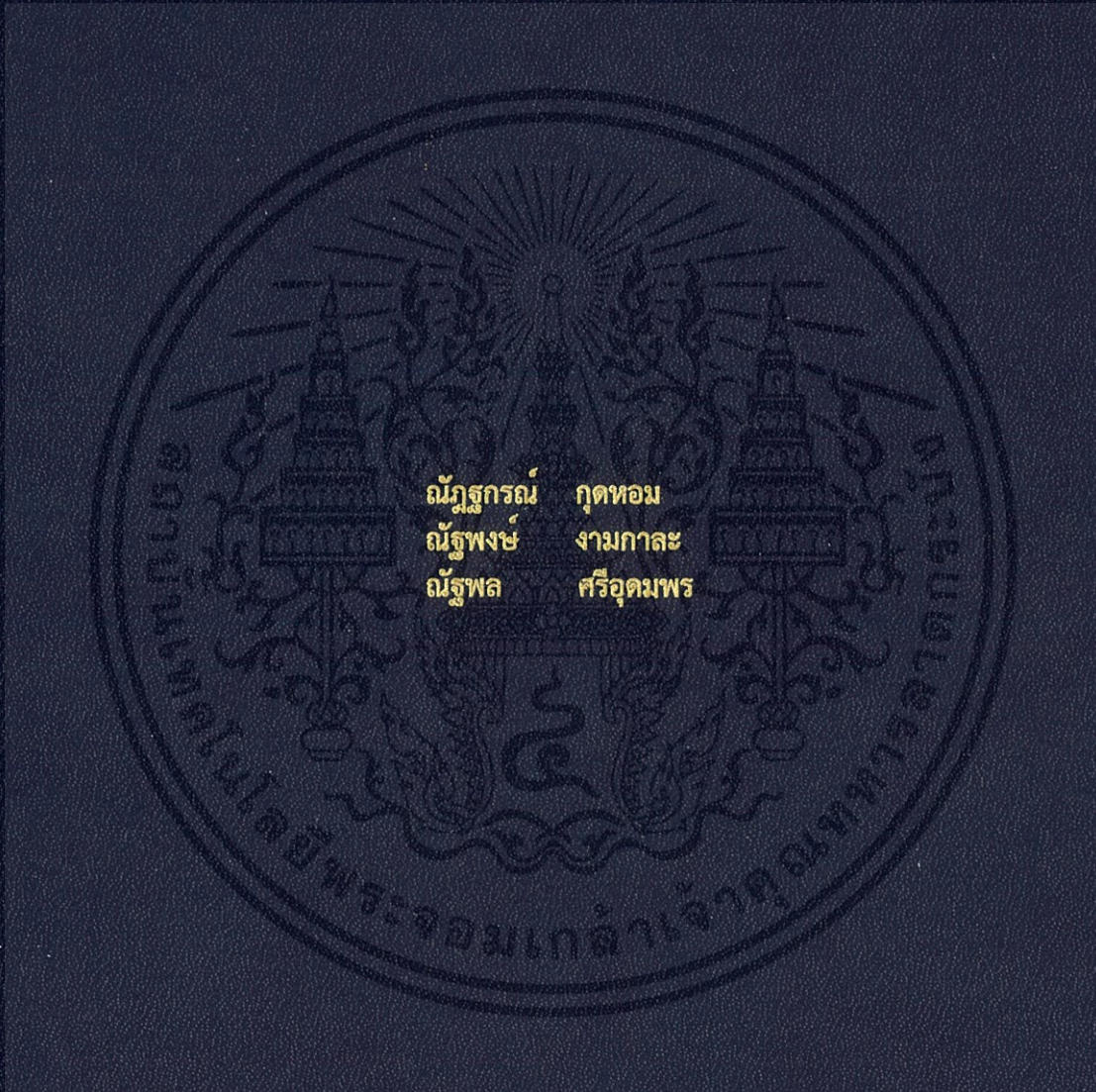


การศึกษาผลกระทบของความถี่การจุดระเบิดต่อการเคลือบผิวโลหะด้วย
กระบวนการพลาสมาไนไตรดในเครื่องโคโรนาโคอิลสามหัว

THE STUDY OF IGNITION FREQUENCY INFLUENCE ON PLASMA NITRIDING
IN THREE DIRECT COILS PROTOTYPE



ณัฐกรณ์ กุดหอม
ณัฐพงษ์ จามกालะ
ณัฐพล ศรีอุดมพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาผลกระทบของความถี่การจุดระเบิดต่อการเคลือบผิวโลหะด้วย
กระบวนการพลาสมาไนไตรดในเครื่องไดเรกต์คอยล์สามหัว

THE STUDY OF IGNITION FREQUENCY INFLUENCE ON PLASMA NITRIDING
IN THREE DIRECT COILS PROTOTYPE



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF IGNITION FREQUENCY INFLUENCE ON PLASMA NITRIDING
IN THREE DIRECT COILS PROTOTYPE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของความถี่การจุดระเบิดต่อการเคลือบผิวโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาไนไตรดในเครื่องโคโรนาโคยล์สามหัว

The study of ignition frequency influence on plasma nitriding in three direct coils prototype

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐกรรณ์ กุดหอม รหัสประจำตัว 56010367
2. นายณัฐพงษ์ งามกาละ รหัสประจำตัว 56010407
3. นายณัฐพล ศรีอุดมพร รหัสประจำตัว 56010417


----- อาจารย์ที่
ปรึกษา
(ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของความถี่การจู่ระเบิดต่อการเคลือบผิวโลหะด้วยกระบวนการ

พลาสมาไนไตรเครื่องโตเร็คท์คอยล์สามหัว

นายณัฐกรรณ์ กุดหอม 56010367

นายณัฐพงษ์ งามกาละ 56010407

นายณัฐพล ศรีอุดมพร 56010417

ผศ. พงษ์ศักดิ์ คำมูล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

เป็นเวลานานแล้วที่อุตสาหกรรมโลหะ ได้นำกระบวนการไนไตรดมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจของผลผลิตที่ผ่านกระบวนการ ทั้งในด้านของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำลง และการป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิวชิ้นงาน โดยกระบวนการไนไตรดที่จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ เป็นกระบวนการพลาสมาไนไตรด ที่จะมีปฏิกิริยาก่อกำเนิดพลาสมาเข้ามาเกี่ยวข้อง ทางผู้จัดทำต้องการทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการจู่ระเบิดกับประสิทธิภาพในการเคลือบผิวของพลาสมาไนไตรด โดยการทดลองจะทำการขึ้นในพลาสมาแชมเบอร์ที่ถูกสู้อากาศออก ในภาวะความดันภายในที่ 150mbar ชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะสแตนเลส 304 (stainless steel 304) ขนาด 20x20mm จำนวน 7 ชิ้น ซึ่งจะผ่านกระบวนการพลาสมาไนไตรดที่ค่าความถี่จู่ระเบิด 5, 10, 15, 20, 30, 40, และ 50 Hz ในแต่ละชิ้น ซึ่งชิ้นงานทั้งหมดจะถูกส่งตรวจวัดค่าความแข็งผิวชิ้นงาน (Hardness) โดยผลที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาประมวลผลใน Microsoft excel ผลที่ได้ออกมาแสดงถึงความสามารถของการเพิ่มความแข็งผิวของสแตนเลส 304 ได้ 21.65% ที่ความถี่ 5 เฮิรตซ์ (Hertz) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของค่าความแข็ง ต่อค่าความถี่การจู่ระเบิดที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The study of ignition frequency influence on plasma nitriding
in three direct coils prototype

Nuttakorn Kudhom 56010367

Nuttapong Ngamkala 56010407

Natapon Sriudomporn 56010417

Asst. Prof. Pongsak Kammul Advisor

Year 2016

ABSTRACT

For a very long time, metal industries had applied the nitriding to put it in used, because of the fascinating properties of the product, for example, the decreasing in friction coefficient and the prevention of oxidative on the surface. In this study, the plasma nitriding process had been chosen, for the plasma nitriding means this process will require the plasma generation. The researchers seek the relation between the ignition frequency and the performance of plasma nitriding. The experiment will be start in the vacuum plasma chamber at 150 mbar, the specimens, seven of 20x20 mm pieces of stainless steel 304 will be through the process at 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50 Hz in one each. All of the specimen will be send to test the surface hardness the result will be put in to Microsoft excel. The result was shown the capability of increase with 21.65% in surface hardness on 5 Hertz of ignition frequency, which conclude to the relation of the decrease in hardness due to the increase of ignition frequency.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ. พงศ์ศักดิ์ คำมูล อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ เสริมศักดิ์ อยู่เย็น รศ.จิรวัดณ์ ปานกลาง Assoc. Prof. Seiki Saito คุณเฉลิมชัย แพทริก ไชยวุฒิ และ พนักงานบริษัท อิเล็กทรอนิกส์ สุดท้ายขอขอบคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกลทุกๆ ท่านที่ช่วยอบรมสั่งสอนความรู้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับสถานที่ บุคลากรและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมทั้ง เพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ ในภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและ กำลังใจที่ดีเสมอมา

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย	ณัฐกรรณ์	กุดหอม
นาย	ณัฐพงษ์	งามกาละ
นาย	ณัฐพล	ศรีอุดมพร

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป	VII
คำทับศัพท์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 Impact of low-energy ions on plasma deposition of cubic boron nitride	3
2.2 On plasma nitriding of steels	4
2.3 STUDY OF PLASMA NITRIDE EQUIPMENT USING HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT	7
2.4 The critical role of hydrogen for physical sputtering with Ar-H ₂ glow discharges.....	8
2.5 The role of hydrogen in plasma nitriding: Hydrogen behavior in the titanium nitride layer.....	8
2.6. Derivation of a continuum model for low temperature plasma flow and its application on arc discharge	9
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 ก๊าซไนโตรเจน	10
3.2 พลาสมา	10
3.2.1. กระบวนการพลาสมาไนไตรด.....	10
3.2.2 การแตกตัวเป็นไอออน	11
3.2.3 ความถี่ของพลาสมา	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4	ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ (breakdown).....	12
3.2.5.	การทำงานของหัวเทียน.....	13
3.2.6.	ภาวะสุญญากาศ (Vacuum)	14
3.3	เครื่องต้นแบบ.....	14
3.4	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
3.4.1.	สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	15
3.5	โลหะที่ใช้ในการทดลอง	16
3.5.1.	stainless steel 304	16
3.6	การทดลอง	16
บทที่ 4	การออกแบบ	17
4.1	การปรับปรุงเครื่องต้นแบบ	17
4.1.1	ประตูเปิดปิดพลาสมาแชมเบอร์(Chamber Plasma)	17
4.1.2	ท่อวัดความดัน	17
4.1.3.	ขาดังหัวเทียนสามขา	18
4.2.	การออกแบบวงจรในเครื่องทดลอง	18
บทที่ 5	การทดลอง	20
5.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
5.1.1	เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)	20
5.1.2.	ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator).....	20
5.1.3	เกจวัดความดัน(Pressure sensor).....	21
5.1.4.	เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า(Oscilloscope)	21
5.1.5	ปั๊มสุญญากาศ(Vacuum Pump).....	21
5.1.6	พลาสมาแชมเบอร์ (Plasma Chamber)	22
บทที่ 6	ผลการทดลองและอภิปราย	23
6.1	วิธีการทดลอง.....	23
6.1.1.	ขั้นตอนการทดลอง	23
6.2	ตารางบันทึกผลการทดลองสแตนเลส 304 (Stainless Steel) ขนาด 20×20mm.....	24

6.2.1 ผลการทดลองครั้งแรก มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1.....	24
6.2.2 ผลการทดลองครั้งที่สอง มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 7 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2.....	24
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	26
7.1 อภิปรายผลการทดลอง.....	26
7.2 สรุปผลการทดลอง.....	28
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก.....	31
1. จากหัวเทียนสู่แผ่นเพลท	31
2. กำลังของหัวเทียน	32
3. ชุดวัดอุณหภูมิ.....	32
4. Mechanical Seal.....	32
5. เอกสารประกอบการนำเสนอการสอบวิทยานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปีการศึกษา 2559.....	33

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบเครื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	3
รูปที่ 2.2 ตารางแสดงความหนาของชั้นเคลือบบนโลหะที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ชนิด.....	4
รูปที่ 2.3 ตารางแสดงการทดลองทั้ง 10 แบบ ของโลหะ 4 ชนิด.....	4
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความลึกในเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับความแข็งพื้นผิวบนโลหะ CS และ NS.....	4
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ(แกนX) และความลึกในการแทรกผ่านของพลาสมา(แกนY).....	5
รูปที่ 2.6 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติกระบวนการพลาสมาไนไตรด บนโลหะ ทั้งสามชนิด.....	5
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความลึกในเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับความแข็งพื้นผิวบนโลหะ SS และ TS.....	5
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับความลึกของชั้นเคลือบ.....	6
รูปที่ 2.9 ภายในพลาสมาแชมเบอร์ของตัวต้นแบบ.....	7
รูปที่ 2.10 เครื่องต้นแบบของรุ่นพี่.....	7
รูปที่ 2.11 สภาวะพลาสมาที่มีผลดีที่สุดของงานวิจัย.....	7
รูปที่ 2.12 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง On plasma nitriding steel.....	8
รูปที่ 2.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	9
รูปที่ 3.1 สถานะต่างๆของสสาร.....	10
รูปที่ 3.2 กระบวนการ Ionization.....	11
รูปที่ 3.3 กราฟอัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ต่อคาบเวลาของพัลส์.....	13
รูปที่ 3.4 Working Pressure Ranges of Vacuum Gauges.....	14
รูปที่ 4.1 ประตูเปิดปิดพลาสมาแชมเบอร์.....	17
รูปที่ 4.2 ท่อวัดความดัน.....	17

รูปที่ 4.3 การออกแบบที่จับยึดไดเร็คคอยล์	18
รูปที่ 4.4 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง	18
รูปที่ 4.5 เครื่องที่ทำการประกอบแล้ว	19
รูปที่ 4.6 แผนผังภายในพลาสติกแชมเบอร์	19
รูปที่ 5.1 พาวเวอร์ซัพพลาย	20
รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์	20
รูปที่ 5.3 ตัวอ่านค่า pressure sensor.....	21
รูปที่ 5.4 Pressure sensor.....	21
รูปที่ 5.5 Vacuum pump.....	21
รูปที่ 5.6 พลาสติกแชมเบอร์ทดลอง.....	22
รูปที่ 6.1 ชั่งงาน 50 Hz.....	24
รูปที่ 6.2 ชั่งงาน 30 Hz.....	24
รูปที่ 6.3 ชั่งงาน 10 Hz.....	24
รูปที่ 6.4 ชั่งงาน 30 Hz.....	25
รูปที่ 6.5 ชั่งงาน 20 Hz.....	25
รูปที่ 6.6 ชั่งงาน 15 Hz.....	25
รูปที่ 6.7 ชั่งงาน 10 Hz.....	25
รูปที่ 6. 8 ชั่งงาน 5 Hz.....	25
รูปที่ 6.9 รูปภาพขณะกำลังปฏิบัติงาน.....	25
รูปที่ 6.10 เครื่องตรวจ Hardness แบบ Vickers.....	25
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การจุดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่1 ...	26
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การจุดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่ 2..	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำทับศัพท์

เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator)

เกจวัดความดัน (Pressure sensor)

เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope)

ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

พลาสมาแชมเบอร์ (Plasma Chamber)

โคโรลัม (Direct coil)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในวงการอุตสาหกรรมโลหะรู้กันดีว่า หากโลหะตัวใดถูกเคลือบผิวด้วยไนโตรเจนแล้ว มันจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น กระบวนการไนโตรดจึงได้ถูกใช้งานกันมาอย่างยาวนาน เพราะเหตุผลนี้ โดยแต่เดิมแล้วกระบวนการไนโตรดได้พึ่งกรรมวิธีทางเคมีที่เรียกว่า Salt bath โดยจะใช้เกลือแอมโมเนียมมาเผาให้ร้อนในอ่าง และนำโลหะไปทำการแช่ในอ่างนั้น แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสร้างมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้กระบวนการไนโตรดจำเป็นต้องถูกพัฒนา ภาวะสุญญากาศได้ถูกนำเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อแก้ไขข้อด้อยดังกล่าว

การเคลือบผิวในภาวะสุญญากาศ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ (1) Chemical Vapor Deposition : CVD อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊ส และเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิวชิ้นวัสดุ (2) Physical Vapor Deposition : PVD อาศัยการทำให้ไอเล็กตรอนสารเคลือบหลุดออกจากอะตอมสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัม แล้วไอออน(สารที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป) จะพุ่งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ

ในกรณีของกระบวนการพลาสมาไนโตรดเป็นการเคลือบผิวในรูปแบบ PVD (Physical Vapor Deposition) กล่าวคือ ก๊าซไนโตรเจน จะถูกนำไอเล็กตรอนออกจากโมเลกุล ในภาวะสุญญากาศ และพุ่งกระจายไปจับกับพื้นผิวโลหะ สร้างเป็นพันธะไนโตรดขึ้นมาเคลือบผิวชิ้นงานไว้

วัสดุที่ผ่านกระบวนการพลาสมาไนโตรดนี้ โดยทั่วไปแล้วจะมีคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง กับชิ้นส่วนเครื่องจักรจำพวก ลูกปืน เพลา ฯลฯ อีกทั้งวัตถุดิบในการประกอบโดยตัวหลักก็มีเพียงก๊าซไนโตรเจน ที่ราคาถูก กระบวนการไนโตรดจึงมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปได้อีกในอนาคต

งานวิจัยชิ้นนี้จะเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการจู่ระเบิดและการเคลือบผิวโลหะด้วยพลาสมาไนโตรด เนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการทดลองคราวนี้ เป็นเครื่องก่อกำเนิดพลาสมาแบบหัวโดเรคท์คอยล์สามหัว กระแสไฟที่ใช้ในการจู่ระเบิดของคอยล์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าสูง โดยโดเรคท์คอยล์ที่ใช้ในการทดลองถูกดัดแปลงมาจากหัวเทียนรถยนต์ เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาถูก หัวโดเรคท์คอยล์ดังกล่าวจะถูกจู่ระเบิดด้วยค่าสัญญาณความถี่จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เกิดเป็นพลาสมาที่มีค่าความถี่จำเพาะขึ้น ซึ่งมีค่าความถี่นี้มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของการเคลือบผิว โดยค่าความถี่การจู่ระเบิดของคอยล์จะถูกปรับแต่งไปถึงจุดที่ชิ้นงาน มีคุณสมบัติที่น่าพึงพอใจมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความถี่การจู่ระเบิดต่อการเคลือบผิว
2. พัฒนาคูณสมบัติของชิ้นงานในด้านของความแข็งผิว(Hardness) ด้วยการหาความถี่ที่เหมาะสมที่สุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เพื่อศึกษา หาสถานะในการกำเนิดพลาสมาที่ดีที่สุดในการทำกระบวนการไนไตรดของเครื่องต้นแบบ เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ภายใต้เงื่อนไขต่างๆดังนี้

1. ปฏิกริยาพลาสมาไนไตรดกับโลหะเหล็ก(Fe) และไนโตรเจนไอออน(N⁺)
2. อุปกรณ์กำเนิดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 10000 – 30000 โวลต์ จากไดเร็คทคอยล์
3. แรงดันไฟฟ้าและความถี่สัญญาณพัลส์ในช่วงที่ไดเร็คทคอยล์สามารถปฏิบัติกรได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

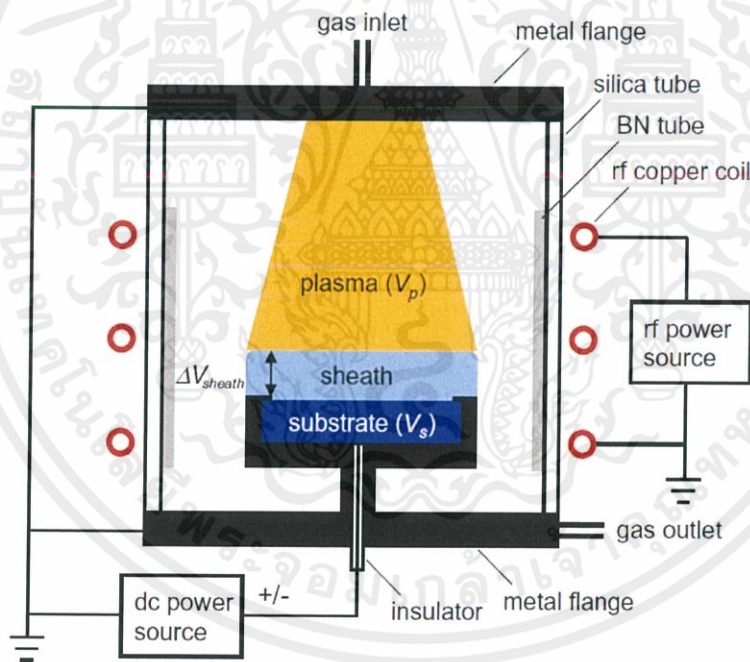
1. ทำให้ทราบค่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพลาสมาไนไตรดของเครื่องต้นแบบ
2. ได้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเชิงกลด้านการเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน(Hardness)
3. เป็นการสร้างทางเลือกใหม่ให้กับอุตสาหกรรมโลหะในด้านการปรับปรุงผิวของโลหะ
4. เป็นแนวทางในการต่อยอดการศึกษา ionize gas ต่างๆต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Impact of low-energy ions on plasma deposition of cubic boron nitride

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์ในการหาผลกระทบอันเกิดจากไอออนพลังงานต่ำ(0-40eV) ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยพลาสมาไนไตรด์ แบบ cBN โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ พลังงานไอออนที่ใช้ ไอออนฟลักซ์ และอัตราส่วนระหว่างไอออนและโบรอนฟลักซ์ โดยการทดลองจะหาผลกระทบทั้งในส่วนของไอออนบวก และไอออนลบ ในส่วนของไอออนลบพบว่ามีผลกระทบน้อยมาก ในช่วงของการทดลองไม่พบว่าชั้นของ cBN ถูกสร้างขึ้นมาด้วยซ้ำ ในขณะที่เดียวกัน ไอออนบวกสามารถที่จะสร้างชั้นเคลือบ cBN ขึ้นมาได้ ในช่วงพลังงานไอออนที่ 0-35eV และอัตราส่วนไอออนต่อโบรอนฟลักซ์ที่ 100-130



รูปที่ 2 1 ส่วนประกอบเครื่องที่ใช้ในการทดลอง

2.2 On plasma nitriding of steels

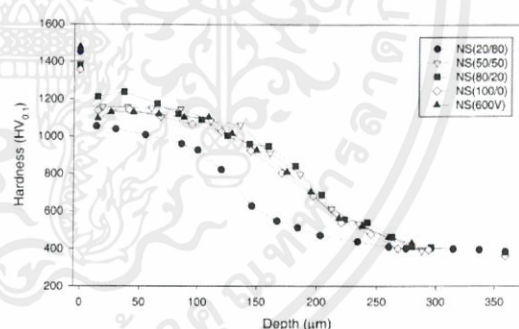
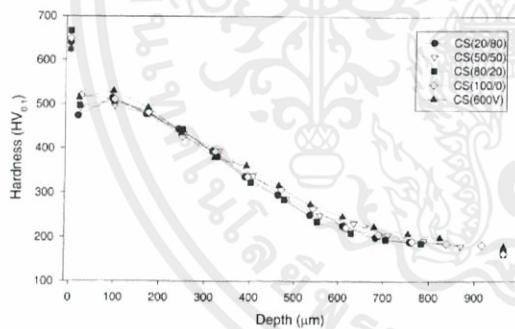
การศึกษาโลหะ 4 ชนิด ภายใต้กระบวนการพลาสมาไนไตรดทั้งหมด 10 แบบ (ดังรูป 2.3) โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ ถูกกระทำภายใต้ความดัน 0.75 torr ชั้นงานทั้งหมดจะถูกตรวจสอบความแข็งผิวและความลึกของชั้นเคลือบ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้ข้อมูลที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อแนวทางในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งในด้านของโลหะที่นำมาใช้ในการทดลองที่ได้เลือกใช้เป็น stainless steel (ในงานวิจัยจะแสดงเป็น SS) เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการรับ Sensitivity มากที่สุด (ดังรูป 2.2)

P (Torr)	N ₂ /H ₂	U (V)	T (°C)	t (h)	Process code
0.75	20/80	500	525	15	20/80, 500V, 525, 15.0
0.75	50/50	500	525	15	50/50
0.75	80/20	500	525	15	80/20
0.75	100/0	500	525	15	100/0
0.75	20/80	600	525	15	600V
0.75	20/80	500	500	15	500
0.75	20/80	500	550	15	550
0.75	20/80	500	560	15	560
0.75	20/80	500	525	7.5	7.5
0.75	20/80	500	525	30	30.0

Process	CS (μm)	NS (μm)	TS (μm)	SS (μm)
20/80, 500V, 525, 15.0	2-5	-	-	40
50/50	2-5	0-5	1-6	55
80/20	2-5	4-12	4-11	62
100/0	3-5	2-8	2-11	66
600V	2-4	0-12	-	46
500	1-4	-	-	9
550	2-5	-	-	43
560	3-6	-	-	49
7.5	1-6	-	-	21
30.0	2-5	0-1	-	56

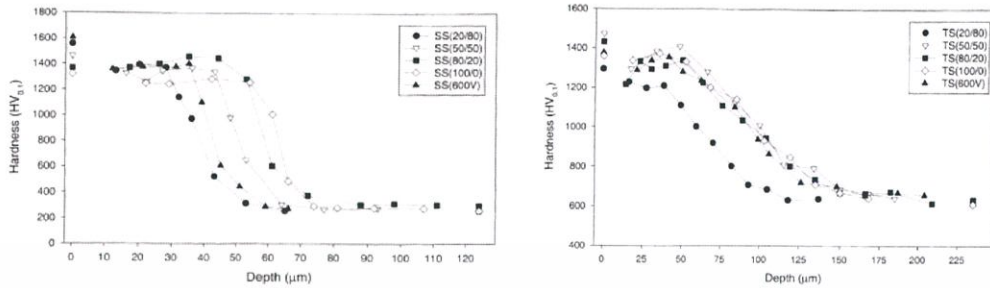
รูปที่ 2.2 ตารางแสดงการทดลองทั้ง 10 แบบ ของโลหะ 4 ชนิด

รูปที่ 2.3 ตารางแสดงความหนาของชั้นเคลือบ บนโลหะที่ในการทดลองทั้ง 4 ชนิด



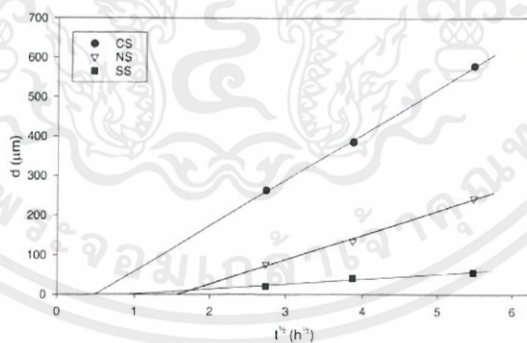
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความลึกในเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับความแข็งพื้นผิวบนโลหะ CS และ NS

นอกจากนี้แล้วจะพบว่าจากรูป 2.4 และ 2.7 ซึ่งเป็นของโลหะ CS, NS, SS และ TS ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาพลาสมาไนไตรดนั้น ไม่จำเป็นต้องมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนอย่างที่ตั้งสมมติฐานกันมาโดยตลอด รวมไปถึงการสังเกตเห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของ N⁺ กับความแข็งของพื้นผิวในช่วงการแพร่อีกด้วย



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความลึกในเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับความแข็งพื้นผิวบนโลหะ SS และ TS

จากผลการทดลองทั้งหมด งานวิจัยชิ้นนี้ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นเคลือบกับเวลาที่ใช้ ออกมาในรูปแบบกราฟ (รูป 2.6) (การทดลองที่ถูกนำมาบันทึกไว้เป็นรูปแบบที่หนึ่งในรูป 2.3 โดยไม่มีโลหะ TS รวมอยู่ด้วยเนื่องจาก ค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปเพราะอุณหภูมิในแคมเบอร์) ซึ่งสรุปออกมาได้เป็นสมการ $d = \sqrt{D_e T} + c$ โดย D_e คือค่าการแพร่ที่ได้จากการทดลอง d คือความลึกในการแทรกผ่านของพลาสมา (หน่วยเป็นไมโครเมตร) และ T คือเวลา (หน่วยเป็นรากของชั่วโมง) จะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 2.5 ว่าแม้ SS จะมีความสามารถในการรับ Sensitivity สูงสุด แต่กลับมีความสามารถในการให้ Responsibility ต่ำที่สุดในกลุ่มโลหะที่ใช้ในการทดลอง โดยจะมีเวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด ส่งผลให้ SS เป็นโลหะที่เหมาะสมจะใช้ทำการทดลองมากที่สุด เนื่องจากความไวต่อการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ ส่งผลให้หลังเวลาเริ่มเกิดปฏิกิริยา (onset time) ที่ $0.8^2 = 0.64$ ชั่วโมงหรือ 48 นาที ปฏิกิริยาไนไตรด์บนโลหะ SS จะไม่เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก



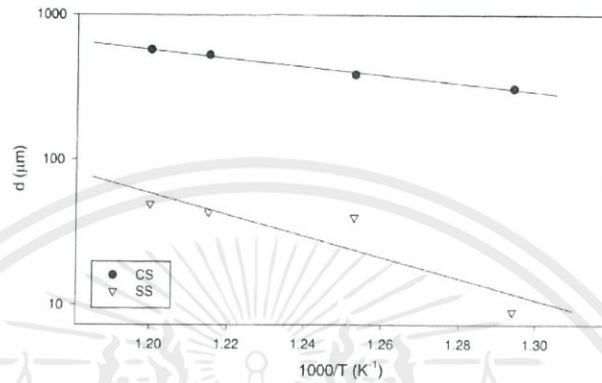
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ(แกน X) และความลึกในการแทรกผ่านของพลาสมา(แกน Y)

Steel	$D_e (\times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$	$t_{\text{onset}} (\text{h})$
CS	374 ± 20	0.25
NS	103 ± 14	2.5
SS	4 ± 2	0.80

รูปที่ 2.6 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับ กระบวนการพลาสมาไนไตรด์ บนโลหะทั้งสามชนิด นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของอุณหภูมิ จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความลึกในการทำปฏิกิริยาจะเป็นไปในทางเดียวกัน โดยสามารถสรุปได้เป็นสมการ $\int_{20eV}^{\infty} f_i(E)E dE$



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับความลึกของชั้นเคลือบ

2.3 STUDY OF PLASMA NITRIDE EQUIPMENT USING HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT

เป็นการศึกษาถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดในเครื่องต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นมานี้ โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกจะให้ความดันในตัวห้องเผาคงที่อยู่ที่ 20 mbar แล้วเพิ่มความถี่สัญญาณจุดระเบิดขึ้นไปจาก 147, 250, 357 และ 447 Hz ตามลำดับ ในส่วนที่สองและสาม ความดันจะถูกเพิ่มเป็น 60 และ 100 mbar ตามลำดับ แล้วทดลองด้วยค่าความถี่จุดระเบิดแบบเดิมอีกครั้ง ผลที่ได้ออกมาพบว่าที่พลาสมามีแนวโน้มที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อความดันในห้องเผาต่ำ และค่าความถี่จุดระเบิดสูงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.9 ภายในพลาสมาแชมเบอร์ของตัวต้นแบบ



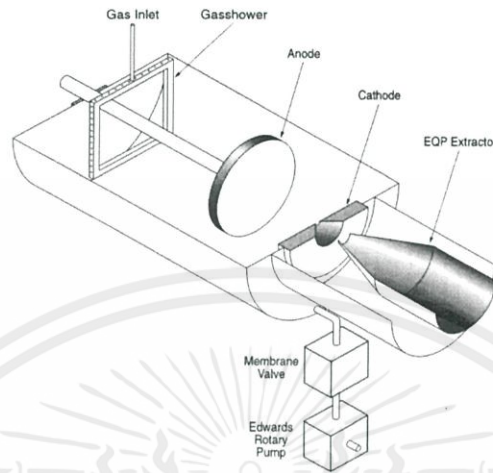
รูปที่ 2.10 เครื่องต้นแบบของรุ่นพี่

ระดับ	ความถี่(Hz)	ความดัน 20 (mbar)
5	147.0	

รูปที่ 2.11 สภาวะพลาสมาที่มีผลดีที่สุดของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 The critical role of hydrogen for physical sputtering with Ar-H₂ glow discharges



รูปที่ 2.12 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง On plasma nitriding steel

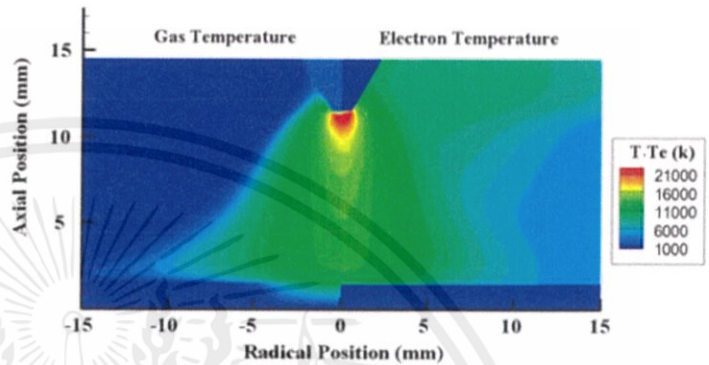
บทความนี้ถูกอ้างถึงเนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องเดียวกันกับเครื่องในหัวข้อ 3.2.4 โดยเครื่องดังกล่าวถูกสร้างจากสแตนเลสทรงกระบอก มีความกว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 30cm และมีขั้วแคโทดทำจากสแตนเลส และมีจุดกราวด์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นแอนโนด ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 12 cm ทั้งคู่ และระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองอยู่ที่ 5cm ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 300 V โดยมีคาบในปล่อยไฟที่ 100 ms เครื่องนี้ทำงานโดยใช้ก๊าซผสมอาร์กอนไฮโดรเจน โดยอัตราการไหลและสัดส่วนของก๊าซจะถูกควบคุมจากกลไกที่ติดตั้งไว้ภายนอก ความดันที่ใช้ในการทำงานของเครื่องอยู่ที่ 0.44 Torr

2.5 The role of hydrogen in plasma nitriding: Hydrogen behavior in the titanium nitride layer

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองเคลือบชั้นไนโตรดด้วยพลาสมา ที่อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อไนโตรเจนต่างกันสามค่าด้วยกัน โดยแบ่งเป็น 60/40, 30/70 และ 0/100 % โดยมวลตามลำดับ โดยผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบโดยตรง มาจากการตรวจสอบชั้นเคลือบ พบว่ามีไฮโดรเจนอยู่ในชั้นเคลือบเป็นปริมาณน้อยมากแม้จะมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนอยู่ที่ 70% ก็ตาม ผลสรุปกล่าวว่าก๊าซไฮโดรเจนไม่ได้ส่งผลต่อชั้นเคลือบโดยการเข้าไปเป็นองค์ประกอบของชั้นแต่จะมีผลต่อคุณสมบัติในทางด้านอื่น

2.6. Derivation of a continuum model for low temperature plasma flow and its application on arc discharge

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้แนวคิดที่สำคัญเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิพลาสมาในห้องสุญญากาศ โดยก๊าซที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีความต้านทานสูง โดยจะมีการกระจายตัวของก๊าซดังรูปที่ ซึ่งการกระจายตัวในลักษณะดังกล่าวจะทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง อันเป็นต้นกำเนิดของพลาสมา มีการไหลไปตามทิศทางแอนโนด-แคโทด ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของชั้นก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของก๊าซ ยิ่งอัตราการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ทิศทางการไหลของก๊าซเชิงมวลจะเลื่อนออกจากผนังของห้องสุญญากาศมากขึ้น โดยในงานวิจัยดังกล่าว อัตราการไหลเชิงมวลได้ถูกปรับให้มีค่าที่ 140, 220 และ 270 mg/s ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

บทที่ 3

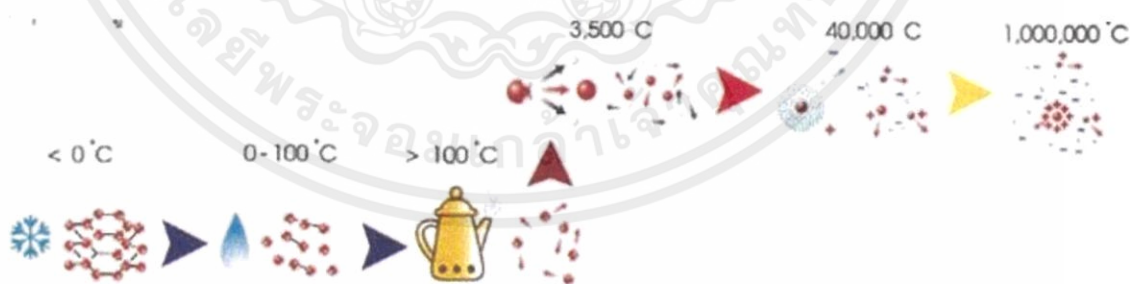
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1 ก๊าซไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับก๊าซเฉื่อย โดยอากาศบนโลกมีส่วนประกอบของไนโตรเจนประมาณ 78 % ของทั้งหมด ไนโตรเจนเป็นก๊าซไร้สี ไร้กลิ่น มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ำและไม่ติดไฟ กระบวนการผลิตของก๊าซไนโตรเจนสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ ส่งผลให้ก๊าซไนโตรเจนมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายกว่าก๊าซชนิดอื่น เนื่องจากคุณสมบัติทั้งหมด ก๊าซไนโตรเจนจึงถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เช่น ใช้ปกคลุมชิ้นงานของอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ เคมีปิโตรเลียม เพื่อป้องกันสิ่งสกปรก ใช้ป้องกันการลุกไหม้สำหรับการถ่ายเทก๊าซไวไฟชนิดเหลว ฯลฯ

3.2 พลาสมา

พลาสมาคือสถานะที่ 4 ของสสาร เป็นสถานะของก๊าซที่สูญเสียอิเล็กตรอนและอยู่ในสภาพ 'ไอออน' พลาสมาจะถือกำเนิดเมื่อสสารใดๆที่อยู่ในสถานะก๊าซได้รับพลังงานสูงเพียงพอ อะตอมของสสารจะแตกตัวออกเป็นประจุบวกและลบ โดยประจุลบในที่นี้คืออิเล็กตรอน และประจุบวกคืออะตอมของสสารแต่เดิมที่เสียอิเล็กตรอนไป ประจุบวกนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าไอออน การจะเกิดกลุ่มก๊าซพลังงานสูงกลุ่มนี้ โมเลกุลของก๊าซต้องมีการสั่นและกระทบกันของโมเลกุล เพื่อให้โมเลกุลแตกตัวออกจากกัน โดยสังเกตได้ว่าสสารจะกลายเป็นพลาสมาได้นั้น อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารจำเป็นจะต้องได้รับพลังงานสูงมาก ซึ่งก๊าซในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงอย่างเนบิวลาที่กำลังจะรวมตัวเป็นดาวฤกษ์ หรือก๊าซที่ระเบิดออกจากดาวฤกษ์ล้วนอยู่ในสถานะพลาสมา ทั้งสิ้น



รูปที่ 3.1 สถานะต่างๆของสสาร

3.2.1. กระบวนการพลาสมาไนโตรด

ในกระบวนการไนโตรด ไนโตรเจนจะถูกทำให้แตกตัวและไปทำปฏิกิริยากับโลหะ หากเป็นกระบวนการไนโตรดแบบเก่า ไนโตรเจนจะถูกทำให้กลายเป็นไอออนโดยกรรมวิธีทางเคมี แต่ในพลาสมาไนโตรดที่มีหลักการของพลาสมาเกี่ยวข้องกับ ไนโตรเจนจะถูกทำให้เป็นไอออนในสถานะพลาสมา พลาสมาที่ใช้ในเครื่อง เป็นประเภทที่เกิดจากการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

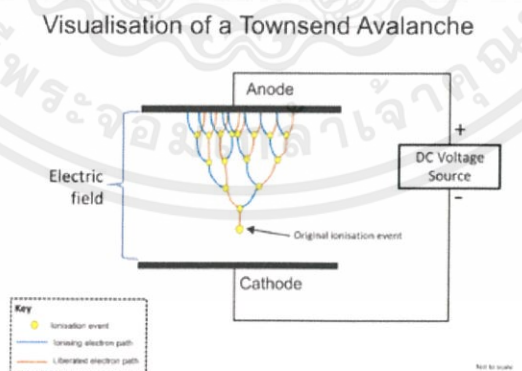
ไฟฟ้า ในกระบวนการพลาสมา ไนโตรที่ผู้จัดทำเลือกที่จะนำมาศึกษา สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถให้พลังงานกับอิเล็กตรอนได้โดยตรง กล่าวคือเป็น non-equivalent plasma จึงมีการสูญเสียไปในรูปแบบความร้อนของอนุภาคต่ำ พลังงานที่ใช้จึงต่ำลงไปด้วย การเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นไอออนของไนโตรเจน สามารถอธิบายในเชิงสมการดังด้านล่าง



e^- ที่แตกตัวออกมาจากก๊าซไนโตรเจนจะวิ่งไปยังขั้วงาน ซึ่ง e^- เหล่านี้จะเหนี่ยวนำไอออนของไนโตรเจนให้ตามมาด้วยแรงทางไฟฟ้า ไอออน N^+ จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเคลือบเป็นฟิล์มไนโตรด รอบขั้วงานไว้ กระบวนการนี้จะดำเนินไปจนขั้วงานจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ในอีกความหมายคือชั้นไนโตรดรอบผิวงานมีความหนาเพียงพอและปกคลุมรอบผิวขั้วงานไว้ทั้งหมด e^- จึงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าหาขั้วงานได้อีก ส่งผลให้ขั้วงานมีความเป็นประจุลบน้อยลงจนเป็นกลางในที่สุด

3.2.2 การแตกตัวเป็นไอออน

การแตกตัวเป็นไอออน (อังกฤษ: Ionization) เป็นกระบวนการหนึ่ง ที่อะตอมหรือโมเลกุล เปลี่ยนสถานะจากความเป็นกลางทางไฟฟ้า เป็นประจุลบหรือประจุบวก จากการได้หรือเสียของอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจึงกลายเป็นไอออน มักจะเกิดขึ้นร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอื่นๆ การแตกตัวเป็นไอออนอาจเป็นผลมาจากการสูญเสียอิเล็กตรอนหลังจากการชนกันของอนุภาคย่อยของอะตอมด้วยกัน การชนกันของอะตอมกับอะตอมอื่นๆ การชนกันของโมเลกุลกับไอออน หรือผ่านการมีปฏิสัมพันธ์กับแสง การแตกตัวเป็นไอออนสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการสลายตัวให้กัมมันตรังสี ซึ่งในกระบวนการนี้ นิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะถ่ายโอนพลังงานของมันให้กับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งภายในเปลือกอิเล็กตรอนวงใน ทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้นหลุดออกมา



รูปที่ 3.2 กระบวนการ Ionization

ไอออนประจุลบจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระ (free electron) พุ่งเข้าชนกับอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนอิสระจะถูกขังอยู่ในกำแพงศักย์ไฟฟ้า และจะมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินในตัวออกมา กระบวนการนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ การแตกตัวเป็นไอออนโดยการจับยึด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน (เป็นการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในชั้นตอนที่เป็นก๊าซโดยการแปะติดอิเล็กตรอนเข้าไปเพื่อสร้างไอออนในรูปแบบของ A^-)

การเกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากการกระทบของไอออน ถือเป็นปฏิกิริยาลดหลั่นที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนในอนุภาคที่อยู่ในสนามไฟฟ้าที่สูงพอ ในตัวกลางสถานะก๊าซที่สามารถถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้เช่นอากาศ(หรือในงานวิจัยชั้นนี้ N_2) การแตกตัวเป็นไอออนอย่างเช่นการแผ่รังสีโดยการแตกตัวเป็นไอออน ไอออนประจุบวกจะลอยไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนอิสระจะลอยไปยังด้านแอโนดของอุปกรณ์ ถ้าสนามไฟฟ้ามีความเข้มเพียงพออิเล็กตรอนอิสระอาจได้รับพลังงานเพียงพอที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนต่อไปอีกในการชนครั้งต่อไปกับโมเลกุลอื่น อิเล็กตรอนอิสระทั้งสองนั้นจะเดินทางไปยังแอโนดและได้รับพลังงานที่เพียงพอจากสนามไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจากการกระทบเมื่อมีการชนครั้งต่อไปเกิดขึ้นและเกิดขึ้นเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ นี่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างมีประสิทธิภาพของการผลิตอิเล็กตรอนและจะขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนอิสระที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอระหว่างการทำงานที่จะรักษาสถานะต่อไป ประสิทธิภาพของการแตกตัวเป็นไอออนคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนของไอออนที่ได้ต่อจำนวนของอิเล็กตรอนหรือโฟตอนที่ใช้

3.2.3 ความถี่ของพลาสมา

พลาสมาหรือสถานะที่ 4 จากข้อมูลทีกล่าวมาในเบื้องต้น พลาสมากล่าวได้ว่าเป็นอนุภาค e^- ที่หลุดออกมาจากอะตอม และจากพลังงานที่ได้รับมา ส่งผลให้มันเคลื่อนที่ในรูปแบบคลื่นที่มีความถี่เฉพาะตัว โดยความถี่เฉพาะตัวนี้จะมีค่าแปรผันขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลักคือ 1. สนามไฟฟ้า 2. ความถี่ของการกระตุ้น ตามสมการ ที่ได้พิสูจน์มาจากสมการการกระจายตัวพลาสมาของ Maxwellian

$$f_e(\vec{v}) = n_e A_e \exp\left(\frac{-m_e v^2}{2kT_e}\right)$$

เมื่อ $f_e(\vec{v})$ อ เลขความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

สมการที่ 2.1 Maxwellian Distribution

n_e คือ ค่าคงตัวของพลาสมา

3.2.4 ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ (breakdown)

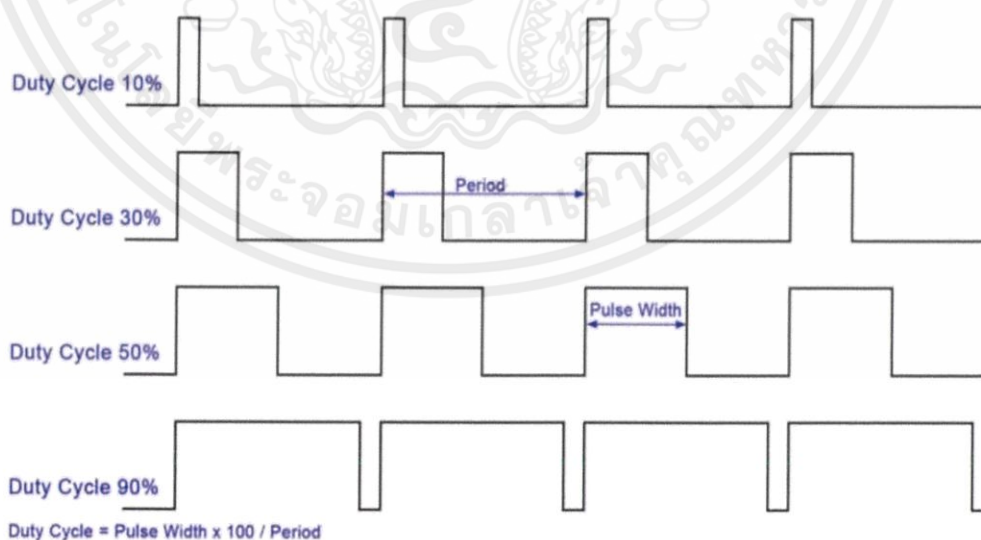
ปรากฏการณ์เบรกดาวน์(breakdown) เกิดจากการเกิด discharge ในก๊าซ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไฟฟ้าสู่ตัวนำไฟฟ้า ซึ่งในระยะเวลาที่เบรกดาวน์นี้ได้เกิดขึ้นนั้น จะส่งผลให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (ionization) เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากหัวเทียนเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้การเบรกดาวน์ในการทดลองของผู้วิจัยเป็นแบบโคโรนา

3.2.5. การทำงานของหัวเทียน

หัวเทียนจะมีการทำงานที่เรียกว่า duty อยู่ ซึ่งการทำงานนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวแปรด้วยกัน อธิบายได้ $DC = \frac{ot \times 100}{T} \%$ ตามสมการโดย DC คือ Duty Cycle ที่ต้องการหาค่า ในขณะที่ ot คือ On time ของ coil และ T คือคาบเวลาของคลื่นการจุดระเบิด หัวคอยล์แต่ละหัวจะมีค่า on time คงที่ โดย on time คือช่วงเวลาที่หัวเทียนจะมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงออกไปจริง ดังนั้นหากจะกล่าวถึง Duty Cycle คือค่าอัตราส่วนของเวลาที่หัวเทียนใช้ในการปล่อยกระแสออกไปจริงกับอัตราส่วนเวลาทั้งหมดในหนึ่งคาบความถี่ก็ย่อมได้ ทั้งนี้ในการทดลองทั้งหมดของผู้วิจัย ผู้วิจัยได้ทำการปรับ Duty Cycle ให้มีความเหมาะสมในแต่ละย่านความถี่ เนื่องจากเหตุผลด้านการบำรุงรักษาอุปกรณ์การทดลอง อ้างอิงจากสมการเบื้องต้น Duty Cycle จะแปรผันไปตามตัวแปรทั้งสองตัวแปร ot และ T แต่เนื่องจากหัวเทียนแต่ละชนิดจะมีค่าเวลา on time เฉพาะตัวที่เหมาะสมในการปฏิบัติการ ดังนั้น ot จึงจำเป็นต้องตั้งค่าให้คงที่ และการทดลองของผู้วิจัยมีหลายย่านความถี่ ดังนั้นจึงเกิดความจำเป็นที่จะต้องปรับ Duty Cycle ของคอยล์ให้มีความเหมาะสม โดยผู้วิจัยมีการปรับค่าตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2.1 แสดงความถี่กับ Duty Cycle

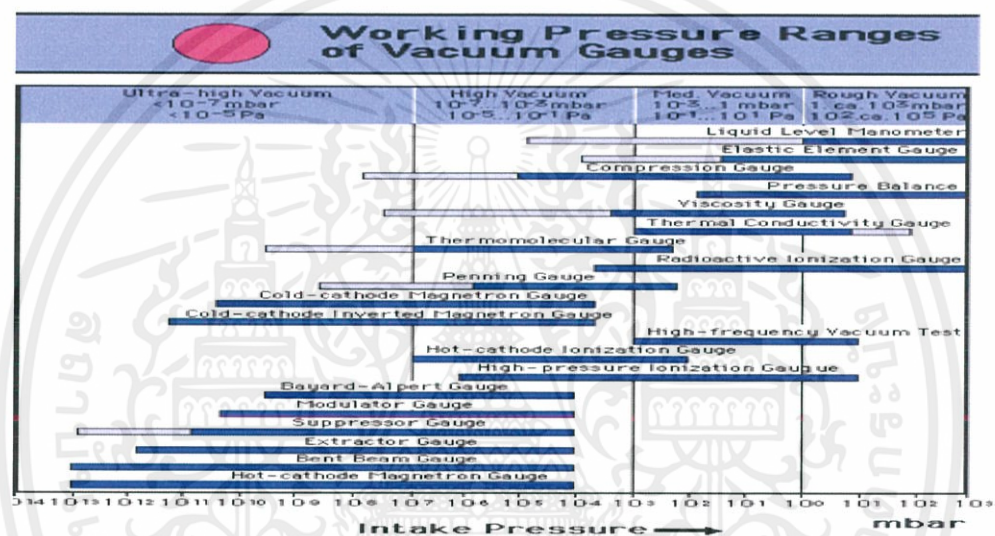
Frequency	Duty cycle
10 Hz	7.3%
30 Hz	21.9%
50 Hz	36.5%



รูปที่ 3.3 กราฟอัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ต่อคาบเวลาของพัลส์

3.2.6. ภาวะสุญญากาศ (Vacuum)

สุญญากาศ (vacuum) คือปริมาตรของช่องว่างซึ่งไม่มีสสารอยู่ภายใน เปรียบเหมือนก๊าซที่มีความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศมาก ๆ ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้ปริมาตรของช่องว่างว่างเปล่าได้อย่างสมบูรณ์ที่เรียกว่า สุญญากาศสมบูรณ์ (perfect vacuum) ซึ่งมีความดันแก๊สเป็นศูนย์ สุญญากาศสมบูรณ์จึงเป็นแนวความคิดที่ไม่สามารถสังเกตการณ์ได้ในทางปฏิบัติ นักฟิสิกส์มักจะถกเถียงเกี่ยวกับผลการทดลองในอุดมคติว่าจะเกิดอะไรขึ้นในสุญญากาศสมบูรณ์ โดยใช้คำว่า สุญญากาศแทนสุญญากาศสมบูรณ์ และใช้คำว่า สุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) แทนความหมายของสุญญากาศที่เกิดขึ้นได้จริง



รูปที่ 3.4 Working Pressure Ranges of Vacuum Gauges

3.3 เครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับการอนุเคราะห์จากรุ่นพี่ที่จบการศึกษาไปในปี 2557 ในงานวิจัยเรื่อง STUDY OF PLASMA NITRIDE EQUIPMENT USING HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT เครื่องต้นแบบนี้สามารถให้กำเนิดพลาสมาโดยอาศัย direct coil เป็นหลัก ในการทดลองครั้งนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำการปรับปรุงเครื่อง โดยการเพิ่มหัว direct coil เข้าไปเพื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนพลาสมา ในส่วนของพลาสมาแชมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองก็ยังคงเป็นตัวเดิม คือมีความสูงที่ และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกที่ ตามลำดับ ประกอบกับมีเครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope) และฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ไว้ในการสังเกตการณ์และควบคุมความถี่ในการจุดระเบิด

3.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation (EM radiation หรือ EMR)) เป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นวิทยุ (Radio waves) คลื่นไมโครเวฟ (Microwaves)

ปัจจุบันมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลาย ๆ ด้าน เช่น การติดต่อสื่อสาร (มือถือ โทรศัพท์ วิทยุ เรดาร์ โยแก้วนำแสง) ทางทหารแพทย์ (รังสีเอกซ์) การทำอาหาร (คลื่นไมโครเวฟ) การควบคุมรีโมท (รังสีอินฟราเรด)

คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือเป็นคลื่นที่เกิดจากคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กตั้งฉากกัน และเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ด้วยความเร็ว 299,792,458 เมตร/วินาที หรือเทียบเท่ากับความเร็วแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้

สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นแสงที่มองเห็น (visible light) รวมไปถึง เหล่าคลื่นที่มองไม่เห็นด้วย (invisible light) เช่น อัลตราไวโอเลตอินฟราเรด, คลื่นวิทยุโทรศัพท์, ไมโครเวฟ, รังสีเอกซ์, รังสีแกมมา เป็นต้น ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีประโยชน์มากในการสื่อสารและโทรคมนาคม และทางการแพทย์และนักดาราศาสตร์ทำการศึกษาวัตถุท้องฟ้า โดยการศึกษาค้นคว้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัตถุแผ่รังสีออกมา สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพของดวงดาว อันได้แก่ อุณหภูมิ และพลังงาน

3.4.1. สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1. อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดในสุญญากาศเท่ากับ 299,792,458 เมตร/วินาที ซึ่งเท่ากับอัตราเร็วของแสง
2. เป็นคลื่นตามขวาง
3. ถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง
4. ถูกปล่อยออกมาและถูกดูดกลืนได้โดยสสาร
5. ไม่มีประจุไฟฟ้า
6. คลื่นสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้
7. ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ (บางชนิด)

3.5 โลหะที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1. stainless steel 304

ส่วนผสมทางเคมี

$$C = 0.050 \quad Cr = 18.32 \quad Ni = 8.10 \quad Mn = 1.17$$

สมบัติทางกล

เป็นสแตนเลสที่มีส่วนผสมของ โครเมียม 18 – 20% และ นิกเกิล อย่างน้อย 8 -10.5 % โครเมียมเป็นส่วนผสมที่ช่วยในการปกป้องการเกิดสนิม และนิกเกิล ช่วยในการปกป้องการกัดกร่อนจากสิ่งต่าง ๆ เกรด 304 เป็นที่นิยมใช้แพร่หลาย ทั่วไป เนื่องจาก ความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมและทนการกัดกร่อน จากสิ่งต่าง ๆ ได้ดี รวมไปถึงการมีราคาต่ำ และเหมาะกับงานเกือบทุกประเภท stainless steel 304 จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก ถือเป็นเกรดมาตรฐานเกรดหนึ่ง เลยทีเดียว

3.6 การทดลอง

ตัวแปรต้นของการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ความถี่ ในการจู่ระเบิด โดยจะกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆเป็นตัวแปรควบคุม เช่นศักย์ไฟฟ้า และแอมพลิจูด เพื่อการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้นตัวนั้น ต่อชิ้นงานโดยตรง โดยทางผู้จัดทำได้วางแผนที่จะทำการทดลองออกมาทั้งหมด 1 ชิ้นงานต่อหนึ่งการทดลอง ผลที่ได้มาจากการทดลองจะถูกนำไปบันทึกไว้ในโปรแกรมคำนวณ excel เพื่อทำการ regression หาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของพลาสมาในการเคลือบผิวออกมา

บทที่ 4

การออกแบบ

4.1 การปรับปรุงเครื่องต้นแบบ

4.1.1 ประตูเปิดปิดพลาสมาแชมเบอร์ (Chamber Plasma)

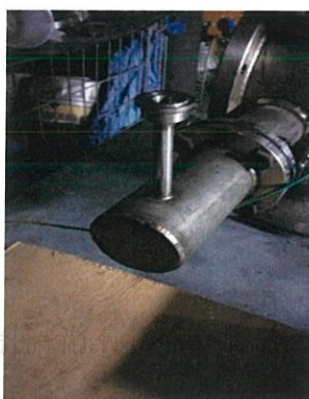
จากของเดิมประตูด้านข้างของพลาสมาแชมเบอร์นั้น ไม่มีบานพับสำหรับการยึดกระจกสังเกตการณ์ไว้กับประตู ในการทดลองของผู้วิจัย ผู้วิจัยจำเป็นต้องทำการทดลองบ่อยครั้ง ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการปรับปรุงในเรื่องนี้เพื่อความสะดวกที่มากขึ้น โดยการทำให้ประตูได้ใช้แผ่นแฟลนกดด้านหน้ามาเชื่อมติดกับบุชเหล็ก



รูปที่ 4.1 ประตูเปิดปิดพลาสมาแชมเบอร์

4.1.2 ท่อวัดความดัน

ตัว sensor ดังกล่าวจะต่อเข้ากับห้องพลาสมาแชมเบอร์ผ่านทางท่อวัดความดันที่ทำขึ้นมาเพิ่มเติม และรัดเข้าหากันด้วยแหวนล็อกกันรั่ว การต่อท่อวัดความดันออกมาจากพลาสมาแชมเบอร์จะส่งผลให้เกิด pressure delay ขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 2 นาที



รูปที่ 4.2 ท่อวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการ... นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3. ขาดังหัวเทียนสามขา

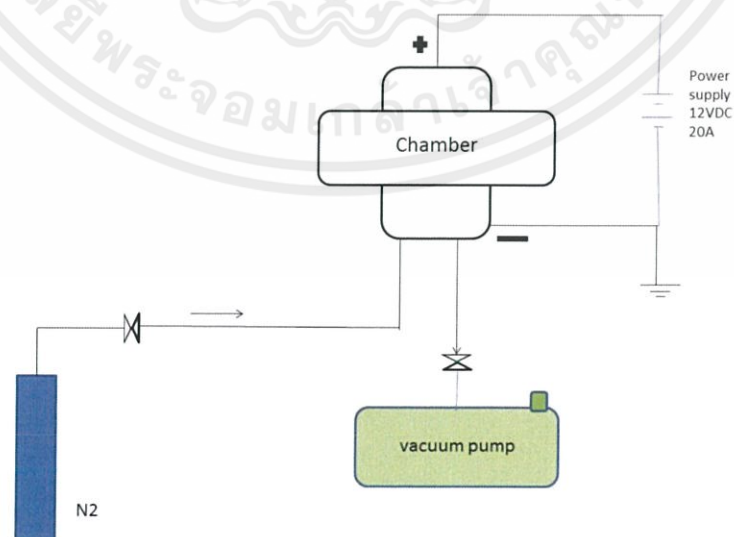
เนื่องจากการเปลี่ยนมาใช้คอยล์สามหัวของทางกลุ่ม มีจุดประสงค์เพื่อกาเพิ่มพื้นที่ในการเคลือบผิว หากวางคอยล์ทั้งสามหัวในลักษณะตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ก็จะทำให้เกิดการเคลือบผิวขึ้นสามจุด ซึ่งไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ จำเป็นจะต้องมีการออกแบบขาดังหัวเทียน ที่สามารถรับรองศาของหัวเทียนให้ลำอาร์คที่ก่อกำเนิดขึ้น มีการรวมศูนย์กันที่จุดเดียว เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา



รูปที่ 4.3 การออกแบบที่จับยึดไดเร็คคอยล์

4.2. การออกแบบวงจรในเครื่องทดลอง

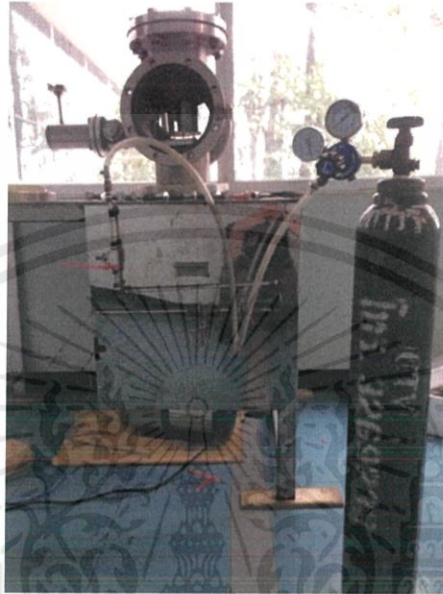
อุปกรณ์การทดลอง จะถูกนำมาประกอบกันเป็นวงจรดังรูป



รูปที่ 4.4 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

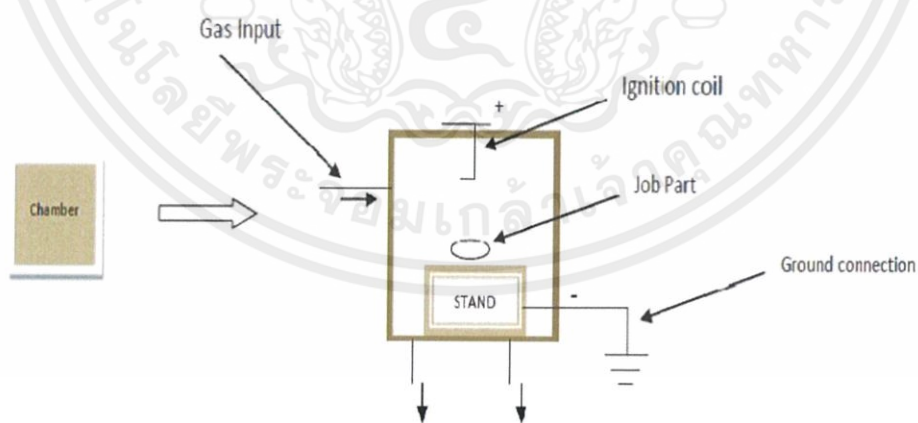
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาดูงานนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการประกอบเครื่องจริงจะเป็นดังรูป 3.5 vacuum pump จะถูกประกอบไว้ด้านล่าง ถึงก๊าซไนโตรเจนจะถูกวางไว้ด้านข้างและมีการต่อท่อก๊าซผ่านทางระบบท่อที่ได้ติดมากับตัวเครื่องทดลอง เพื่อความสามารถในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ให้คงที่



รูปที่ 4.5 เครื่องที่ทำการประกอบแล้ว

ในส่วนของวงจรทางไฟฟ้าในพลาสมาแคมเบอร์ การทดลองจะถูกออกแบบไว้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ขั้วบวกจะเป็นหัวเทียน และในส่วนของขั้วลบจะเป็นแท่นวางชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 แผนผังภายในพลาสมาแคมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

5.1.1 เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply) ที่ได้ใช้ในการทดลองเป็นขนาด 12V อันเป็นขนาดเดียวกับหัวเทียนที่เลือกใช้ในการทดลอง โดยเครื่องจ่ายไฟ (Power Supply) ตัวดังกล่าวมีความสามารถในการจ่ายไฟด้วยกระแส 20 amp



รูปที่ 5.1 เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

5.1.2. ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (Function Generator)

ในส่วนของฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (Function Generator) ทางผู้วิจัยได้เปลี่ยนมาใช้ MHS-3200A ซึ่งมีความสามารถในการจ่ายสัญญาณรูปแบบ TTL อันเป็นรูปแบบเดียวกันกับที่หัวเทียนรองรับ



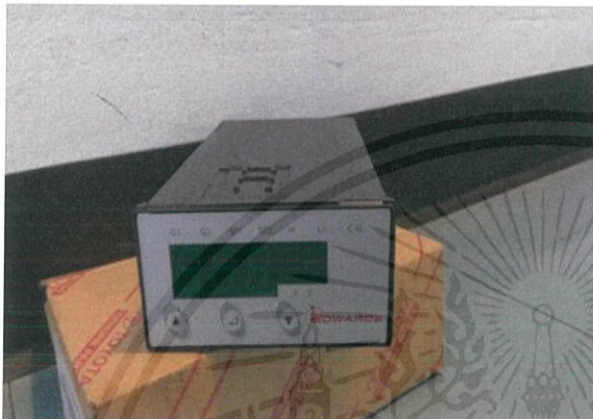
รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระเบียบข้อดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 เกจวัดความดัน(Pressure sensor)

เกจวัดความดัน(Pressure sensor) ที่ได้ใช้ในการทดลอง ทางผู้จัดทำได้เลือกใช้เป็น pressure sensor ของ Edward โมเดล active pirani guage รุ่น APG100-xlc D026-04-000 โดย pressure sensor ตัวนี้สามารถบ่งบอกถึงการรั่วของพลาสติกแชมเบอร์ได้ และมีพิสัยการวัดที่ 10^{-4} ถึง 1000 mbar ผ่านการต่อตัวแปลงสัญญาณดิจิตอล ADC ออกมาเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข



รูปที่ 5.3 ตัวอ่านค่า pressure sensor



รูปที่ 5.4 Pressure sensor

5.1.4. เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า(Oscilloscope)

ในส่วนของเครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope) นั้น สืบเนื่องจากการทดลอง จำเป็นต้องทราบรูปแบบที่แน่ชัดของกระแสจุดระเบิด เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้าจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการมาตรวจสอบ

5.1.5 ปั๊มสุญญากาศ(Vacuum Pump)

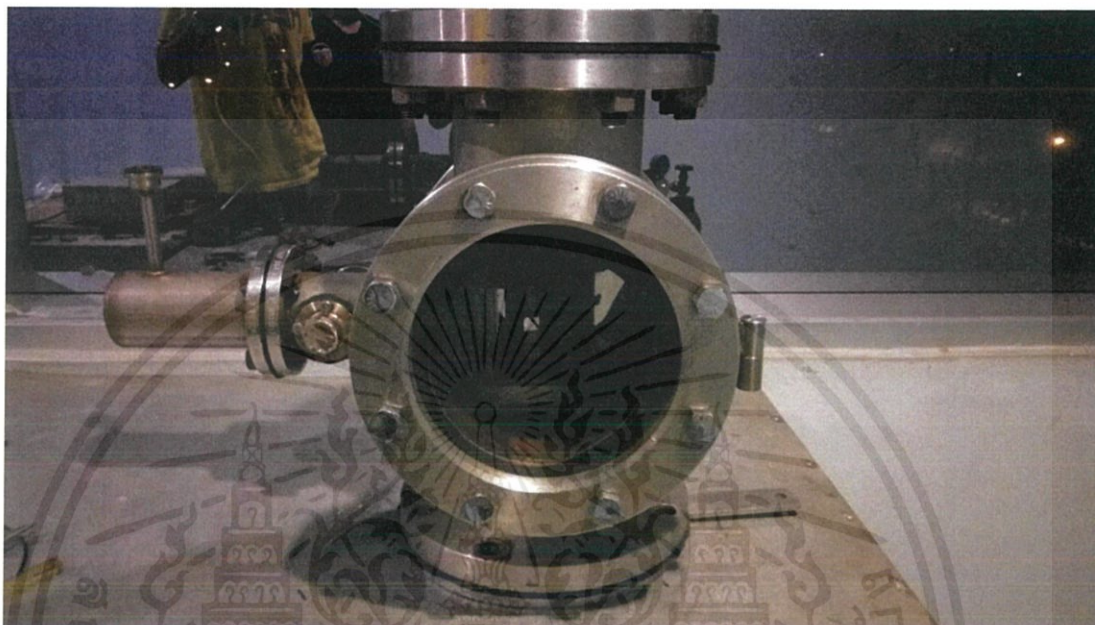
ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary Vacuum Pump) ซึ่งเป็นตัวเดียวกันกับที่รุ่นพีใช้ โดยขีดจำกัดในการทำงานของปั๊มตัวดังกล่าว พบว่าสามารถลดความดันในพลาสติกแชมเบอร์ทดลองไปเหลือ 20 mbar



รูปที่ 5.5 Vacuum pump

5.1.6 พลาสมาแชมเบอร์ (Plasma Chamber)

พลาสมาแชมเบอร์ประกอบจากชิ้นส่วนที่ทำจากสแตนเลส 304 และมีการรองจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดด้วยยางกันรั่ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของป้อนสุญญากาศ



รูปที่ 5.6 พลาสมาแชมเบอร์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลองและอภิปราย

6.1 วิธีการทดลอง

สืบเนื่องจากงานวิจัย[2] ที่ได้กล่าวไปในข้างต้น แต่ในส่วนของความดันที่ใช้ในการปฏิบัติงานที่ 0.75 torr ในการทดลองนี้จะเปลี่ยนเป็น 150mbar แทน เนื่องจากในข้อจำกัดของพลาสมาแชมเบอร์ ค่าความต่างศักย์จะถูกตั้งไว้ที่ 10000-30000Volt อ้างอิงจากการคำนวณสมการ อุนทงูมิที่ C และเวลาดังไว้ที่ 60 นาที โดยจากสมการ ค่าความถี่ที่เริ่มใช้ในการทดลองจะใช้ที่ 10Hz และเพิ่มไปเรื่อยๆที่ละ 20Hz ไปจนถึง 50Hz ในที่สุด

6.1.1. ขั้นตอนการทดลอง

1. นำแผ่นชิ้นงานที่จะทดสอบ (สแตนเลส 304) ขนาด 20*20 mm วางลงบนแท่นวางชิ้นที่ละชิ้น ปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าตัวห้องแชมเบอร์
2. เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อให้ความดันที่อยู่ในห้องแชมเบอร์เหลือเพียง150มิลลิบาร์โดยอ่านค่าจากเกจวัดความดัน (pressure gage)
3. เปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่พลาสมาแชมเบอร์ด้วยอัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลอง
4. เปิดการจู่ระเบิดคอยล์โดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (function generator) ในการกำหนดความถี่ ด้วยแรงดันไฟฟ้า 12V และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 5.เฮิรตซ์ (Hertz)ไปจนถึง 50 เฮิรตซ์(Hertz) ตามลำดับและตรวจเช็คกราฟค่าต่างๆจากเครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า(Oscilloscope)
5. จับเวลา 60 นาทีเพื่อให้กระบวนการพลาสมาไนโตรดทำปฏิกิริยากับแผ่นชิ้นงานสแตนเลส 304 จากนั้นทำการปิดการจู่ระเบิดคอยล์ ปิดถังก๊าซไนโตรเจน และปิดปั๊มสุญญากาศ
6. นำแผ่นชิ้นงานไปตรวจค่าความแข็ง โดยวิธี Rockwell B และ Vickers

6.2 ตารางบันทึกผลการทดลองสแตนเลส 304 (Stainless Steel) ขนาด 20x20mm

6.2.1 ผลการทดลองครั้งแรก มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองครั้งแรก

ความถี่ (Hz)	Hardness (Rockwell b)
Standard (0)	56
10	66.6
30	65.1
50	62.4



รูปที่ 6.3 ชิ้นงาน 10 Hz



รูปที่ 6.2 ชิ้นงาน 30 Hz



รูปที่ 6.1 ชิ้นงาน 50 Hz

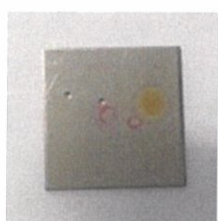
6.2.2 ผลการทดลองครั้งที่สอง มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 7 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองครั้งที่สอง

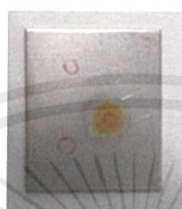
ความถี่ (Hz)	Hardness (Vickers)
Standard (0)	20.14
5	24.5
10	23.8
15	22.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

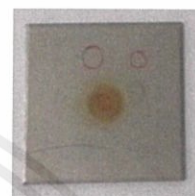
20	22.7
30	21.2
50	21.1



รูปที่ 6.8 ชิ้นงาน 5 Hz



รูปที่ 6.7 ชิ้นงาน 10 Hz



รูปที่ 6.6 ชิ้นงาน 15 Hz



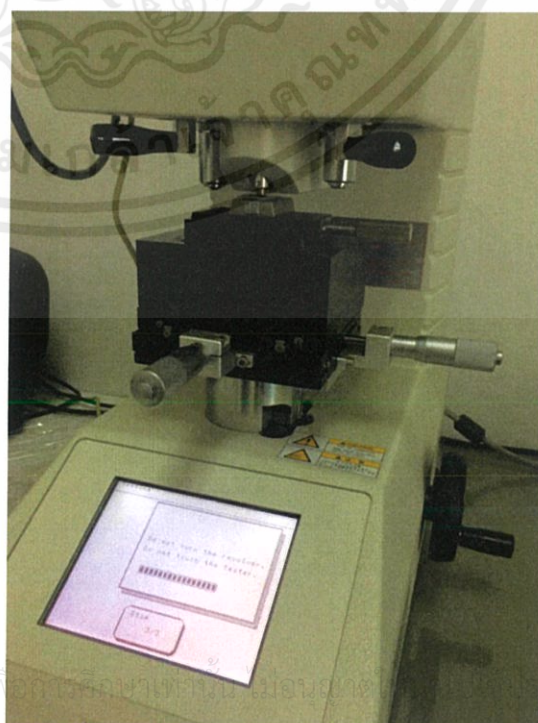
รูปที่ 6.5 ชิ้นงาน 20 Hz



รูปที่ 6.4 ชิ้นงาน 30 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากศูนย์บริการเทคโนโลยีและการคำนวณ



รูปที่ 6.10 เครื่องตรวจ Hardness แบบ

Vickers

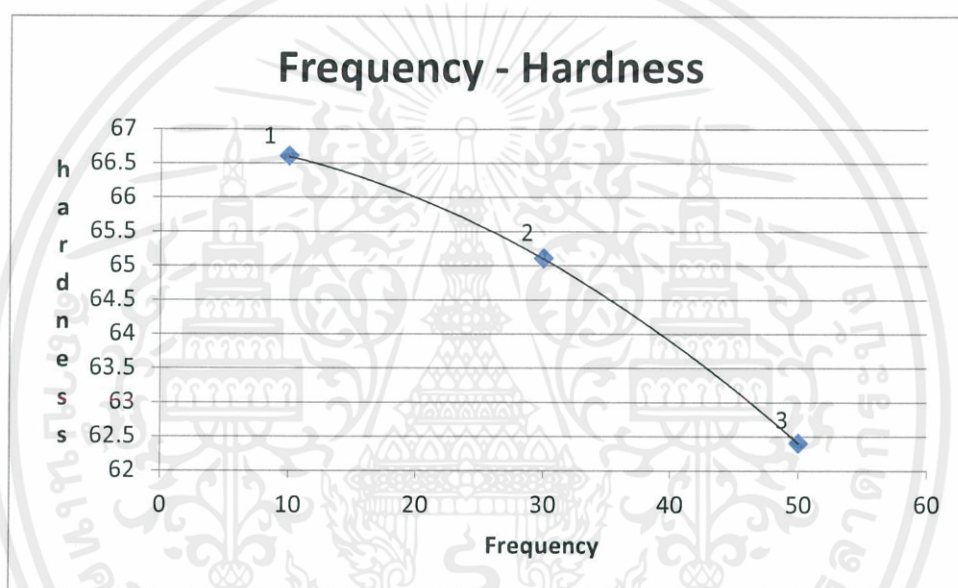
ไม่ว่ารูปที่ 6.9 รูปถ่ายขณะกำลังปฏิบัติงาน แผลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

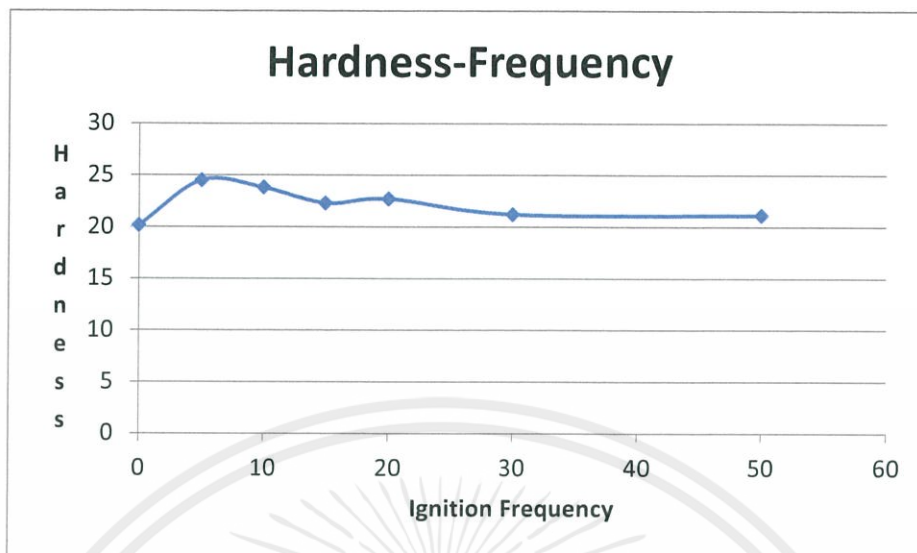
7.1 อภิปรายผลการทดลอง

กราฟที่ได้แสดงถึงค่าความแข็งที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ในการจูดระเบิด ผลที่ได้นี้ขัดแย้งกับสมมติฐานที่ได้กล่าวไปในเบื้องต้น ว่าค่าความแข็งจะมีความสัมพันธ์ในเชิงแปรตามกันกับค่าความถี่ในการจูดระเบิด แต่ผลที่ได้กลับสื่อออกมาในทางตรงกันข้าม จำเป็นต้องมีการทดลองเพิ่มเติม เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่การจูดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่สองเกิดขึ้นจากผลที่ได้จากการทดลองครั้งแรกไม่ชัดเจนดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น ในการทดลองครั้งที่สอง ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มขึ้นส่วนตัวอย่างในการทดลอง โดยในการทดลองครั้งนี้ได้มีชิ้นงานที่ถูกเคลือบในย่านความถี่ 5, 15, และ 20 ในการตรวจสอบชิ้นงานคราวนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องทดสอบแบบ Vickers เนื่องจากเป็นที่นิยมในการใช้งานมากกว่า ผลที่ได้ออกมาแสดงดังกราฟด้านล่าง



รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การจุดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่ 2

จะเห็นได้ว่ากราฟแสดงถึงค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในช่วงย่านความถี่ต่ำ การทดลองทั้งสองครั้งชี้เข้าไปสู่ความสัมพันธ์รูปแบบเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความแข็งพื้นผิวของชิ้นงาน จะมีการลดลงตามค่าความถี่การจุดระเบิด ในช่วงที่ค่าความแข็งของผิวชิ้นงานมากที่สุดคือย่านความถี่ที่ 5 Hz

7.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ผู้วิจัยได้นำมาแสดงเป็นกราฟ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความถี่คอยล์กับความแข็งของผิวชิ้นงานมีค่าดังนี้ ที่ย่านความถี่ที่ต่ำส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้นและค่าความถี่ที่ทำให้ผิวชิ้นงานแข็งที่สุด อยู่ที่ 5 Hz ในหน่วย Vickers ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์พบว่าสามารถเพิ่มความแข็งผิวได้ถึง 21.65% แต่เมื่อเพิ่มความถี่คอยล์สูงขึ้นไปเรื่อยๆ พบว่าค่าความแข็งผิวชิ้นงานจะลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการปรับค่า duty Cycle ของคอยล์ให้เปลี่ยนแปลงไปตามย่านความถี่ที่เพิ่มขึ้น เพื่อคงค่า Ontime ต่อคาบการทำงานคอยล์เอาไว้ ส่งผลให้ Duty Cycle มีค่าสูงเมื่อไปตามย่านความถี่ คอยล์จึงมีการอิมตัวที่เร็วขึ้น กระแสจึงมีการแปรผกผันกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือการเพิ่มความถี่ โดยคง ontime ต่อหนึ่งคาบการทำงานไดเรกต์คอยล์ให้คงที่ จะส่งผลให้ กระแสที่ไหลออกจากขดลวดทุติยภูมิในคอยล์มีค่าน้อยลง ซึ่งนำไปสู่พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยลง ค่าความแข็งผิวงานจึงน้อยลงตามความถี่ที่สูงขึ้น

7.3 ข้อเสนอแนะ

ระบบ Direct Coil แต่เดิมจะถูกต่อเข้ากับกล่องควบคุม (ecu) ซึ่งมีการตั้งค่าให้มีความเหมาะสมกับระบบการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งมีสถานะแตกต่างจากพลาสมาแคมเบอร์ที่ใช้ในการทดลอง จึงก่อให้เกิดอุปสรรคในการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรทางไฟฟ้า โดยการปรับเปลี่ยนจะต้องพึ่งซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม ไม่สามารถปรับการตั้งค่าด้วยมือได้ (manual control) ด้วยเหตุนี้การใช้งาน direct coil ในงานวิจัยจำเป็นต้องมีการตั้งค่า Duty (รอบการทำงานของหัวเทียน) ที่เหมาะสม เพื่อเป็นการรักษาอุปกรณ์ดังกล่าว ทั้งนี้รายละเอียดของการตั้งค่าจะถูกกล่าวอย่างละเอียดในภาคผนวกด้านหลังเล่ม บทที่ 8 การทำงานของหัวเทียน

เนื่องจากผู้วิจัยคงค่า ontime ต่อคาบการทำงานคอยล์ให้มีค่าคงที่ในทุกย่านความถี่ จึงจำเป็นต้องปรับค่า duty ให้สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง duty ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้หัวเทียนเกิดการสะสมจากความร้อนเนื่องจากภาระการทำงานที่หนักขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนในที่สุด

การทำงานของหัวเทียนจึงควรถูกกำหนด duty cycle ให้มีค่าคงที่ในทุกความถี่ อีกทั้งการกำหนดค่า duty cycle ให้คงที่ จะทำให้การอิมตัวของคอยล์ไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้กระแสคงที่อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] นายณภัทร อินตะวิน, นายบุลิน หมิ่นหนู และ นายพีรภัทร์ ศิริเขตต์ (2557) การศึกษาเครื่องกำเนิดพลาสมาไนไตรโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง วิทยานิพนธ์ปี 2557 ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] M. Berg, C.V. Budtz-Jørgensen, H. Reitz, K.O. Schweitz, J. Chevallier, P. Kringhøj, J. Bøttiger **On plasma nitriding of steels**. Institute of Physics and Astronomy University of Aarhus press, Inc. 2000.
- [3] C.V. Budtz-Jørgensen, P. Kringhøj And J. Bøttiger. **The critical role of hydrogen for physical sputtering with Ar-H₂ glow discharges**. Institute of Physics and Astronomy, University of Aarhus, Ny Munkegade, 8000 Aarhus C, Denmark, Inc. 2000.
- [4] Masaya Tamaki, Yoichi Tomii, Naoichi Yamamoto **The role of hydrogen in plasma nitriding: Hydrogen behavior in the titanium nitride layer** Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Yoshida-nihonmatsucho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan, Inc. 2000
- [5] Paul M. B. **Fundamental of plasma physics**. Cambridge university press, Inc 2006. pp.1
- [6] Kungen Teii, Seiichiro Matsumoto, **Impact of low-energy ions on plasma deposition of cubic boron nitride**. Department of Applied Science for Electronics and Materials, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan, Exploratory Materials Research Laboratory for Energy and Environment, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan, Inc. 2014
- [7] Bijie Yang and Quanhua Sun. **Derivation of a continuum model for low temperature plasma flow and its application on arc discharge**. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China, Inc. 1999
- [8] http://mic.eng.ku.ac.th/materials-resources-detail.php?id_sub=28&id=105
- [9] <http://thanapat53a25.wikispaces.com>
- [10] <http://www.dynaweldtrading.com>
- [11] <http://www.siamchemi.com>
- [12] <https://th.wikipedia.org/wiki/การแตกตัวเป็นไอออน>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] http://www.chanasteel.com/spec/bearing_steel.html

[14] <http://www.tandcmetal.com/pre1.html>

[15]

http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/vacuum_equipment/vacuum_gauges



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

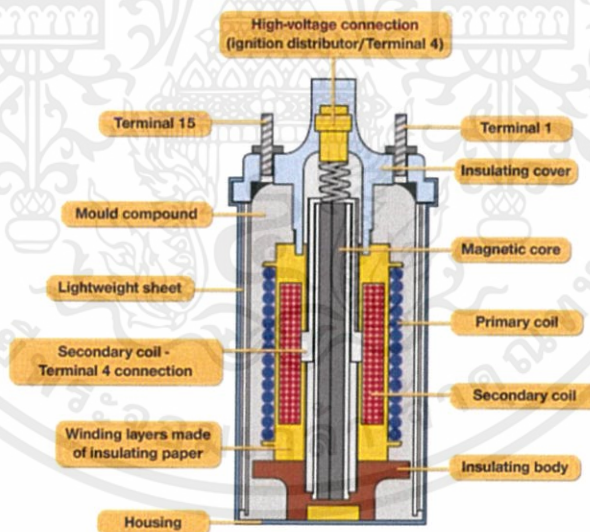
ภาคผนวก

1. จากหัวเทียนสู่แผ่นเพลท

จากที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ในเครื่องต้นแบบที่ทางผู้วิจัยได้กระทำการปรับปรุงและตัดแปลง ได้ใช้หัวเทียนในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาเบรคดาวน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดหลายอย่างของหัวเทียน ทางผู้จัดทำจึงได้มีความคิดที่จะยกระดับขีดความสามารถของเครื่อง โดยเปลี่ยนมาใช้เป็นไดเรกต์คอยล์ที่สามารถรองรับได้หลายย่านความถี่มากกว่า (หัวเทียนทั่วไปสามารถรองรับความถี่การจุดระเบิดได้ถึงแค่ 600Hz) อีกทั้งยังสามารถติดแผ่นเพลทที่ปลายหัว เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าทรงกระบอกออกมาได้

ลำอาร์กที่ได้มาจากหัวเทียนจะมีรูปร่างเป็นลักษณะทรงกรวย ซึ่งส่งผลให้เกิดอุปสรรคในการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ ทางผู้จัดทำจึงมีแนวคิดในการแก้ไขปัญหาโดยการเปลี่ยนรูปทรงสนามไฟฟ้าให้เป็นทรงกระบอกที่กล่าวไว้ด้านบน

จากรูปภาพที่ จะพบว่า หัวเทียนจะมีหลักการทำงานโดยการแปลงไฟความดันต่ำจาก 12V ไปเป็นไฟฟ้าแรงดันสูง ผ่านกระบวนการ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอ้างอิงมาจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of induction) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำทั้งหมดสองชุด เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ นับจากด้านนอกของอุปกรณ์ตามลำดับ



ในส่วนของกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ได้กล่าวไว้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ที่ผ่านวงจรมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าจากอีกวงจรถูกที่อยู่ใกล้ กล่าวคือหัวเทียนจะสามารถปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงออกมาได้ โดยการปรับกระแสไฟให้ต่ำลง

ในท้ายที่สุดแล้ว ผู้วิจัยไม่ได้กระทำตามแนวคิดนี้ เนื่องจากขัดต่อจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ได้วางแผนไว้ตั้งแต่เริ่มต้นว่าจะใช้เป็นหัวเทียน ในการก่อกำเนิดปฏิกิริยาพลาสมา จึงได้ใส่ประสบการณ์ในการค้นคว้าครั้งนี้ลงในภาคผนวกเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องต่อไปในอนาคต

2. กำลังของหัวเทียน

หัวเทียนที่ใช้ในรถยนต์จะมีค่าไฟฟ้าในการปฏิบัติการอยู่ที่แรงดัน 12V และกระแสที่ 10.5 amp ตามหลักการทางไฟฟ้า เนื่องจากหัวเทียนได้มีการต่อกันแบบขนาน ดังที่กล่าวไปกระแสโดยรวมจะถูกประมาณค่าไว้ที่ 31.5 amp หากต้องการให้หัวเทียนจ่ายกำลังออกมาเท่าเดิมในแต่ละหัว

สืบเนื่องมาจากกำลังของหัวเทียนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวจ่ายไฟมีกำลังไม่เพียงพอ ตัวจ่ายไฟที่มีขายกันตามท้องตลาดนั้น จะเป็นประเภทแรงดันไฟ 12V กระแส 20 amp หากหัวเทียนจะใช้เป็นสามหัวจะก่อให้เกิดปัญหาในการหาตัวจ่ายไฟที่เพียงพอ ในท้ายที่สุดหัวเทียนจึงถูกลดจำนวนลงให้เหลือเพียงตัวเดียว

3. ชุดวัดอุณหภูมิ

ชุดวัดอุณหภูมิจะประกอบไปด้วยระบบการทำงานหลัก สองระบบ ได้แก่ 1. ระบบเคลื่อนเข็มทั้งสแตน 2. ระบบหม้อแปลงแรงดัน 100V

ในระบบเคลื่อนเข็มทั้งสแตน สืบเนื่องมาจากงานวิจัย *卒論プレゼン* ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเข็มทั้งสแตนในการวัดอุณหภูมิของพลาสมา โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมความเร็วที่ 0.75 rad/s แต่ในแคมเบอร์ของผู้จัดทำ ประสบปัญหาเรื่องพื้นที่ในการกวาดของเข็มทั้งสแตน ทางผู้จัดทำจึงได้กระทำการดัดแปลง ปรับเปลี่ยนให้เข็มทั้งสแตนมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นแทน โดยการเคลื่อนที่ในรูปแบบใหม่ของเข็มทั้งสแตนจะมีความเร็วอยู่ที่ mm/s ในระยะการเคลื่อนที่ mm ตัวระบบขับเคลื่อนเข็มทั้งสแตนจะมีผังวงจรดังรูป

ในส่วนของระบบหม้อแปลงแรงดัน 100V จะจ่ายไฟในรูปแบบคลื่นสามเหลี่ยม Delta เนื่องจาก โดยตัวหม้อแปลงมีผังวงจรดังรูป

โดยในตัวของชุดวัดอุณหภูมิทั้งหมด ได้เสร็จลงเพียงแค่ตัวเคลื่อนเข็ม จะเห็นได้จากชุดมอเตอร์ที่ถูกติดตั้งเพิ่มเข้ามา แต่ในสุดท้ายแล้ว ตัวหม้อแปลงได้ถูกยกเลิกไป ชุดวัดอุณหภูมิทั้งหมดจึงต้องถูกยกเลิกไป

4. Mechanical Seal

เนื่องจากระบบเคลื่อนเข็มทั้งสแตนที่ได้กล่าวไปข้างต้น มีการติดตั้งมอเตอร์ไว้ด้านนอกแคมเบอร์เนื่องจากเหตุผลด้านพื้นที่ และความสะดวกในการบำรุงรักษา ดังนั้นการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังระบบขับเคลื่อนเข็ม จึงไม่สามารถใช้กลไกเคลื่อนที่แบบปกติได้ เพราะจะเกิดการรั่ว (leaking) ดังนั้นเพลาขับเคลื่อนจึงจำเป็นต้องถูกซีลไว้ด้วยซีลแบบพิเศษตัวนี้

โดยแมคานิคอลซีลนั้น ประกอบไปด้วยส่วนประกอบสำคัญทั้งหมด 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1. Pump Related Component
2. Face Loading Element

3. Secondary Sealing Element
4. Seal Face

ซึ่งในส่วนของซีลที่ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้นั้น ได้ประเมิณถึงความเหมาะสมของวัสดุ และ ตัดสินใจที่จะใช้แมคคานิคอลซีลที่ทำจากวัสดุ ไนลอน ดังรูป

เนื่องจากชุดวัดอุณหภูมิได้ถูกยกเลิกไป mechanical seal ดังกล่าวจึงได้ทำหน้าที่แค่ กันรั่ว ของภาวะสุญญากาศเท่านั้น

5.เอกสารประกอบการนำเสนอการสอบวิทยานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปี การศึกษา 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของความถี่การจุดระเบิดต่อการเคลือบผิวโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาไนไตรดในเครื่องไดเรกต์คอยล์

THE STUDY OF IGNITION FREQUENCY INFLUENCE ON PLASMA NITRIDING IN DIRECT COILS PROTOTYPE

นายณัฐกรณ์ กุดหอม รหัส 56010367, นายณัฐพงษ์ งามกาละ รหัส 56010407

และ นายณัฐพล ศรีอุดมพร รหัส 56010417

____ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

(ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล)

บทคัดย่อ

เป็นเวลานานแล้วที่อุตสาหกรรมโลหะ ได้นำกระบวนการไนไตรดมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจของผลผลิตที่ผ่านกระบวนการ ทั้งในด้านของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำลง และการป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิวชิ้นงาน โดยกระบวนการไนไตรดที่จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ เป็นกระบวนการพลาสมาไนไตรด ที่จะมีปฏิกิริยาก่อเกิดพลาสมาเข้ามาเกี่ยวข้อง ทางผู้จัดทำต้องการทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการจุดระเบิดกับประสิทธิภาพในการเคลือบผิวของพลาสมาไนไตรด โดยการทดลองจะทำการขึ้นในพลาสมาแชมเบอร์ที่ถูกสุบอากาศออก ในภาวะความดันภายในที่ 150mbar ชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะสแตนเลส 304 (stainless steel 304) ขนาด 20x20mm จำนวน 7 ชิ้น ซึ่งจะผ่านกระบวนการพลาสมาไนไตรดที่ค่าความถี่จุดระเบิด 5, 10, 15, 20, 30, 40, และ 50 Hz ในแต่ละชิ้น ซึ่งชิ้นงานทั้งหมดจะถูกส่งตรวจสอบค่าความแข็งผิวชิ้นงาน (Hardness) โดยผลที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาประมวลผลใน Microsoft excel ผลที่ได้ออกมาแสดงถึงความสามารถของการเพิ่มความแข็งผิวของสแตนเลส 304 ได้ 21.65% ที่ความถี่ 5 เฮิร์ตซ์ (Hertz) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของค่าความแข็ง ต่อค่าความถี่การจุดระเบิดที่เพิ่มขึ้น

คำหลัก: พลาสมา, พลาสมาไนไตรด, เทคโนโลยีการเคลือบผิว, ภาวะสุญญากาศ

Abstract

For a very long time, metal industries had applied the nitriding to put it in used, because of the fascinating properties of the product, for example, the decreasing in friction coefficient and the prevention of oxidative on the surface. In this study, the plasma nitriding process had been chosen, for the plasma nitriding means this process will require the plasma generation. The researchers seek the relation between the ignition frequency and the performance of plasma nitriding. The experiment will be start in the vacuum plasma chamber at 150 mbar, the specimens, seven of 20x20 mm pieces of stainless steel 304 will be through the process at 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50 Hz in one each. All of the specimen will be send to test the surface hardness the result will be put in to Microsoft excel. The result was shown the capability of increase with 21.65% in surface hardness on 5 Hertz of ignition frequency, which conclude to the relation of the decrease in hardness due to the increase of ignition frequency.

Keywords: Plasma, Plasma Nitriding, Coating surface technology, Vacuum

1. บทนำ

ในวงการอุตสาหกรรมโลหะรู้กันดีว่า หากโลหะตัวใดถูกเคลือบผิวด้วยไนโตรเจนแล้ว มันจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น กระบวนการไนไตรดจึงได้ถูกใช้งานกันมาอย่างยาวนานเพราะเหตุผลนี้ โดยแต่เดิมแล้วกระบวนการไนไตรดได้พึ่งกรรมวิธีทางเคมีที่เรียกว่า Salt bath โดยจะใช้เกลือแอมโมเนียมมาเผาให้ร้อนในอ่างและนำโลหะไปทำการแช่ในอ่างนั้น แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสร้างมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้กระบวนการไนไตรดจำเป็นต้องถูกพัฒนา ภาวะสูญญากาศได้ถูกนำมาเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อแก้ไขข้อด้อยดังกล่าว

การเคลือบผิวในภาวะสูญญากาศ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ (1) Chemical Vapor Deposition : CVD อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊ส และเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิวชิ้นวัสดุ และ (2) Physical Vapor Deposition : PVD อาศัยการทำให้ไอเล็ดรอนสารเคลือบหลุดออกจากอะตอมสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัม แล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ

PVD (Physical Vapor Deposition) คือการตกตะกอนของไอสาร ที่ได้มาโดยวิธีทางฟิสิกส์ จะกระทำกันในระบบสูญญากาศ สารตั้งต้นจะถูกกระทำให้เป็นไอ ในระบบสูญญากาศ แล้วไอสารตั้งต้นนั้นซึ่งมีทั้งอะตอม ไอออน จะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการ เป็นเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมผิววัสดุ

กระบวนการปรับปรุงผิววัสดุ ด้วยการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่คุณสมบัติเฉพาะในลักษณะของฟิล์มบางนิยมใช้เคลือบผิวเครื่องมือตัดเฉาะ ลูกสูบ เฟือง เพลา ลูกปืน ฯลฯ เพื่อให้มีความแข็งแรง เพื่อลดค่าแรงเสียดทานของผิววัสดุ ยืดอายุการใช้งาน ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้วัสดุด้วย

กระบวนการพลาสมาไนไตรด เป็นการเพิ่มความแข็งแรงแก่ผิวชิ้นงาน โดยการเติมไนโตรเจน เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับผิวชิ้นงานที่เป็นโลหะ เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ที่ผิวชิ้นงาน บริเวณที่ไนโตรเจนไปทำปฏิกิริยากับโลหะจะทำให้ผิวชิ้นงาน มีคุณสมบัติดีขึ้น ในเรื่องของ การเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวชิ้นงาน เพิ่มการต้านทานการสึกหรอ

งานวิจัยนี้จะเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการจู่ระเบิดและการเคลือบผิวโลหะด้วยพลาสมาไนไตรด โดยผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ จากการก่อกำเนิดพลาสมาโดยใช้คอยล์จู่ระเบิดแบบไดเรกต์คอยล์พร้อมหัวเทียนรถยนต์จำนวน 3 ชุด กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการจู่ระเบิดของคอยล์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าสูง ชุดไดเรกต์คอยล์ดังกล่าวจะถูกจู่ระเบิดด้วยค่าสัญญาณความถี่จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เกิดเป็นพลาสมาที่มีค่าความถี่จำเพาะตามต้องการ ซึ่งค่าความถี่นี้มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของการเคลือบผิว โดยค่าความถี่การจู่ระเบิดของคอยล์จะถูกปรับแต่งไปถึงจุดที่ชิ้นงานทดลอง มีคุณสมบัติที่น่าพึงพอใจมากที่สุด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความถี่การจู่ระเบิดต่อการเคลือบผิว
2. พัฒนาคูณสมบัติของชิ้นงานในด้านของความแข็งผิว (Hardness) ด้วยการหาความถี่ที่เหมาะสมที่สุด

3. ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เพื่อศึกษา หาสถานะในการกำเนิดพลาสมาที่ดีที่สุดในการทำกระบวนการไนไตรดของเครื่องต้นแบบ เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1. ปฏิกิริยาพลาสมาไนไตรดกับโลหะเหล็ก(Fe) และไนโตรเจนไอออน(N⁺)
2. อุปกรณ์กำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่ช่วง 10000 – 30000 โวลต์ จากไดเรกต์คอยล์
3. แรงดันไฟฟ้าและความถี่สัญญาณพัลส์ในช่วงที่ไดเรกต์คอยล์สามารถปฏิบัติการได้

เอกสารและกักรักตร้อน รที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

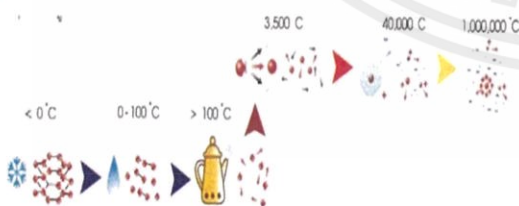
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบค่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพลาสมาไนโตรดของเครื่องต้นแบบ
2. ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลด้านการเพิ่มความแข็งแรงของผิวชิ้นงาน(Hardness)
3. เป็นการสร้างทางเลือกใหม่ให้กับอุตสาหกรรมโลหะในด้านการปรับปรุงผิวของโลหะ
4. เป็นแนวทางในการต่อยอดการศึกษา ionize gas ต่างๆต่อไปในอนาคต

5. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 พลาสมา

พลาสมาคือสถานะที่ 4 ของสสาร เป็นสถานะของก๊าซที่สูญเสียอิเล็กตรอนและอยู่ในสภาพ 'ไอออน' พลาสมาจะถือกำเนิดเมื่อสสารใดๆที่อยู่ในสถานะก๊าซได้รับพลังงานสูงเพียงพอ อะตอมของสสารจะแตกตัวออกเป็นประจุบวกและลบ โดยประจุลบในที่นี้คืออิเล็กตรอน และประจุบวกคืออะตอมของสสารแต่เดิมที่เสียอิเล็กตรอนไป ประจุบวกนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าไอออน การจะเกิดกลุ่มก๊าซพลังงานสูงกลุ่มนี้ โมเลกุลของก๊าซต้องมีการสั่นและกระทบกันของโมเลกุล เพื่อให้โมเลกุลแตกตัวออกจากกัน โดยสังเกตได้ว่าสสารจะกลายเป็นพลาสมาได้นั้น อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารจำเป็นต้องได้รับพลังงานสูงมาก ซึ่งก๊าซในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงอย่างเนบิวลาที่กำลังจะรวมตัวเป็นดาวฤกษ์ หรือก๊าซที่ระเบิดออกจากดาวฤกษ์ล้วนอยู่ในสถานะพลาสมา ทั้งสิ้น [1]



รูปที่ 1 สถานะต่างๆของสสาร

5.1.1 คุณสมบัติของพลาสมา

พลาสมาสามารถอธิบายเป็นภาพรวมได้ เหมือนกับความเป็นกลางของหน่วยทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ไอออนบวก ความเป็นกลางในสถานะของ

แก๊สโดยมีหน่วยความเร็วของ Maxwellian กระจายอยู่สำหรับอิเล็กตรอนดังสมการ

$$f_e(\vec{v}) = n_e A_e \exp\left(\frac{-m_e v^2}{2kT_e}\right)$$

เมื่อ

$f_e(\vec{v}) d(\vec{v})$.ลขความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

n_e คือ ค่าคงตัวของพลาสมา

โดยพลาสมาแต่ละตัวจะมีค่าดังกล่าวแตกต่างกัน

กล่าวคือ $n_e = n_i = n_0$ เป็นค่าความหนาแน่นจำเพาะของพลาสมานั้นเอง[1]

5.1.2 คุณสมบัติของก๊าซไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีคุณสมบัติเป็นคล้ายคลึงกับก๊าซเฉื่อย อากาศบนโลกมีส่วนประกอบของไนโตรเจน 78 % ของทั้งหมด ไนโตรเจนเป็นก๊าซไร้สี ไร้กลิ่น มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ำและไม่ติดไฟ อีกทั้งกระบวนการผลิตของก๊าซไนโตรเจนสามารถทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ ส่งผลให้ก๊าซไนโตรเจนมีราคาต่ำและหาซื้อได้ง่ายกว่าก๊าซชนิดอื่น เนื่องด้วยคุณสมบัติทั้งหมด ก๊าซไนโตรเจนจึงถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เช่น ใช้ปกคลุมชิ้นงานของอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ เคมีปิโตรเลียม เพื่อป้องกันสิ่งสกปรก ใช้ป้องกันการลุกไหม้สำหรับการถ่ายเทก๊าซไวไฟชนิดเหลว ฯลฯ[1]

5.1.3 กระบวนการพลาสมาไนโตรด

กระบวนการไนโตรด เป็นการทำให้ไนโตรเจนแตกตัวและไปทำปฏิกิริยากับโลหะ ไนโตรเจนในกระบวนการแบบเก่าจะถูกทำให้กลายเป็นไอออนจากปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในพลาสมาไนโตรดจะมีหลักการของพลาสมาที่เกี่ยวข้อง ไนโตรเจนจะถูกทำให้เป็นไอออนในสถานะพลาสมา พลาสมาที่ใช้ในเครื่อง เป็นประเภทที่เกิดจากการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยกระบวนการนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถให้พลังงานกับอิเล็กตรอนได้โดยตรง มีการสูญเสียไปในรูปแบบความร้อนให้กับอนุภาคต่ำ พลังงานที่ใช้จึงต่ำลงไปด้วย การเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นไอออนของไนโตรเจนสามารถอธิบายในเชิงสมการดังด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยและพัฒนา โดยผู้ใช้งานต้องรับผิดชอบต่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



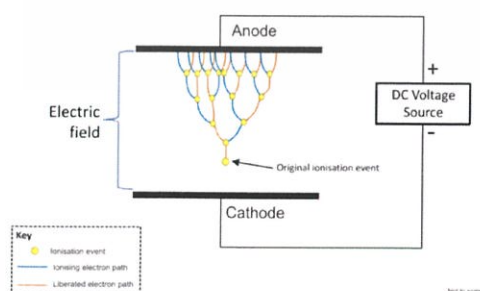
(โดยสมการดังกล่าวสามารถผันกลับได้)

e^- ที่แตกตัวออกมาจากก๊าซไนโตรเจนจะวิ่งไปยังชั้นงาน ซึ่ง e^- เหล่านี้จะเหนี่ยวนำไอออนของไนโตรเจนให้ตามมาด้วยแรงทางไฟฟ้า ไอออน N^+ จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเคลือบเป็นฟิล์มไนโตรด รอบชั้นงานไว้ กระบวนการนี้จะดำเนินไปจนกว่าชั้นงานจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ในอีกความหมายคือชั้นไนโตรดรอบผิวชั้นงานมีความหนาเพียงพอและปกคลุมรอบผิวชั้นงานไว้ทั้งหมด e^- จึงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าหาชั้นงานได้อีก ส่งผลให้ชั้นงานมีความเป็นประจุลบน้อยลงจนเป็นกลางในที่สุด[1]

5.1.4 การแตกตัวเป็นไอออน

การแตกตัวเป็นไอออน เป็นกระบวนการหนึ่ง ที่อะตอมหรือโมเลกุลได้รับประจุลบหรือประจุบวกจากการได้มาหรือการเสียไปของอิเล็กตรอนอะตอมหรือโมเลกุลนั้นจึงกลายเป็นไอออน มักจะเกิดขึ้นร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอื่นๆ การแตกตัวเป็นไอออนอาจเป็นผลมาจากการสูญเสียอิเล็กตรอนหลังจากการชนกันของอนุภาคย่อยของอะตอมด้วยกัน การชนกันของอะตอมกับอะตอมอื่นๆ การชนกันของโมเลกุลกับไอออนหรือผ่านการมีปฏิสัมพันธ์กับแสง การแตกตัวเป็นไอออนสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านการสลายให้กัมมันตรังสีโดยกระบวนการการแปลงภายใน ซึ่งในกระบวนการนี้ นิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะถ่ายโอนพลังงานของมันไปให้กับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งภายในเปลือกอิเล็กตรอนวงในทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้นถูกปล่อยออกมา

Visualisation of a Townsend Avalanche



รูปที่ 2. การแตกตัวเป็นไอออน

ไอออนประจุลบจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระ

(free electron) พุ่งเข้าชนกับอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า[1] เป็น อนุภาคที่นำพาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนอิสระจะถูกขังอยู่ในกำแพงศักย์ไฟฟ้า และจะมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินในตัวออกมา กระบวนการนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ การแตกตัวเป็นไอออนโดยการจับยึดอิเล็กตรอน (เป็นการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในชั้นตอนที่ เป็นก๊าซโดยการปะติดอิเล็กตรอนเข้าไปเพื่อสร้างไอออนในรูปแบบของ A^-

การเกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ เนื่องจากการกระทบของไอออน ถือเป็นปฏิกิริยาลดหล่นที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนในอนุภาคที่มีสนามไฟฟ้าที่สูงพอสมควรในตัวกลางที่เป็นก๊าซที่สามารถถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้เช่นอากาศ หลังเหตุการณ์แตกตัวเป็นไอออนแต่เดิม อย่างเช่นเนื่องจากการแผ่รังสีโดยการแตกตัวเป็นไอออน ไอออนประจุบวกจะลอยไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนอิสระจะลอยไปยัง Anode ของอุปกรณ์ ถ้าสนามไฟฟ้ามีความเข้มเพียงพอ อิเล็กตรอนอิสระอาจได้รับพลังงานเพียงพอที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนต่อไปอีกในการชนครั้งต่อไปกับโมเลกุลอื่น ทั้งสองอิเล็กตรอนอิสระนั้นจะเดินทางไปยัง Anode และได้รับพลังงานที่เพียงพอจากสนามไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจากการกระทบเมื่อมีการชนครั้งต่อไปเกิดขึ้นและเกิดขึ้นเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ นี่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างมีประสิทธิภาพของการผลิตอิเล็กตรอนอิสระและจะขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนอิสระที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอระหว่างกระบวนการชนกันที่จะรักษาสภาวะต่อไป

ประสิทธิภาพของการแตกตัวเป็นไอออนคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนของไอออนที่ได้ต่อจำนวนของอิเล็กตรอนหรือโฟตอนที่ใช้[2]

5.2 เครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับการอนุเคราะห์จากรุ่นพี่ที่จบการศึกษาไปในปี 2557 ในงานวิจัยเรื่อง STUDY OF PLASMA NITRIDE - EQUIPMENT USING HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT โดยเครื่องต้นแบบนี้อาศัยหลักการให้กำเนิดพลาสมาโดยใช้ direct coil เป็นหลัก ในการทดลองครั้งนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำการปรับปรุงเครื่อง โดยการเพิ่มหัว direct coil เข้าไป เพื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจน

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation (EM radiation หรือ EMR)) เป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นวิทยุ (Radio waves) คลื่นไมโครเวฟ(Microwaves)

ปัจจุบันมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลาย ๆ ด้าน เช่น การติดต่อสื่อสาร (มือถือ โทรศัพท์ วิทยุ เรดาร์ ใยแก้วนำแสง) ทางการแพทย์ (รังสีเอกซ์) การทำอาหาร (คลื่นไมโครเวฟ) การควบคุมรีโมท (รังสีอินฟราเรด)-

คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถือเป็นคลื่นที่เกิดจากคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กตั้งฉากกันและเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ด้วยความเร็ว 299,792,458 เมตร/วินาที หรือเทียบเท่ากับความเร็วแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้อสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้

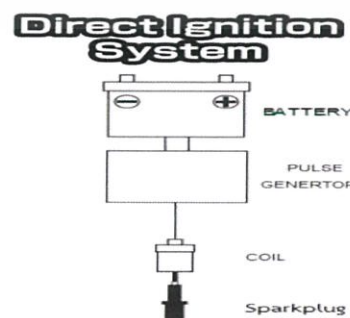
สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นแสงที่มองเห็น (visible light) รวมไปถึง เหล่าคลื่นที่มองไม่เห็นด้วย (invisible light) เช่น อัลตราไวโอเลต, อินฟราเรด, คลื่นวิทยุโทรศัพท์, ไมโครเวฟ, รังสีเอกซ์, รังสีแกมมา เป็นต้น ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีประโยชน์มากในการสื่อสารและโทรคมนาคม และทางการแพทย์ และนักดาราศาสตร์ทำการศึกษาวัตถุท้องฟ้า โดยการศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัตถุแผ่รังสีออกมา สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพของดวงดาว อันได้แก่ อุณหภูมิ แล ะ พ ลั ง ง า น [4]

5.3.1. สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1. อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดในสุญญากาศเท่ากับ 299,792,458 เมตร/วินาที ซึ่งเท่ากับอัตราเร็วของแสง
2. เป็นคลื่นตามขวาง
3. ถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง
4. ถูกปล่อยออกมาและถูกดูดกลืนได้โดยสสาร
5. ไม่มีประจุไฟฟ้า
6. คลื่นสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้
7. ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ (เป็นตัวกลางในตนเองได้)

5.4 Direct coil และระบบจุดระเบิด

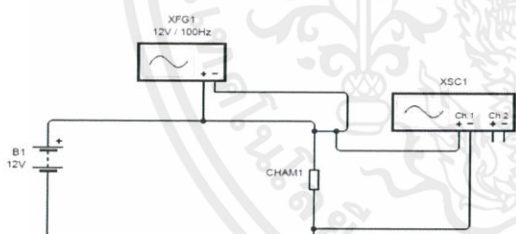
Direct coil เป็นคอยล์จุดระเบิดที่แยกออกจากงานจ่าย โดยในคอยล์แต่ละตัวจะมีตัวจุดระเบิดเป็นชุดเล็ก ๆ ติดตั้งอยู่ตรงบล็อกเสียบหัวเทียนในแต่ละสูบ สายไฟจะต่อจากตัวคอยล์แต่ละตัวไปยังชุดตัวช่วยจุดระเบิด ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณการจุดระเบิดแต่ละสูบของมมมองศาการจุดระเบิดที่ได้จากเซ็นเซอร์มุมเพลลาข้อเหวี่ยงและแครงค์ขาพีท ระบบการจุดระเบิดจะเป็นลักษณะของการจุดโดยตรงไปยังสูบแต่ละสูบ ไม่ผ่านชิ้นส่วนหรืออ้อมไปยังระบบอื่น ซึ่งส่งผลดีในเรื่องของการจ่ายไฟที่ค่อนข้างแม่นยำ เพิ่มความต่อเนื่องในการจ่ายไฟ ลดปัญหากระแสไฟฟ้ารั่วเมื่อเทียบกับระบบงานจ่ายเดิม ลดขั้นตอนการผลิตและชิ้นส่วนในระบบจุดระเบิด การตรวจเช็ค และการซ่อมบำรุงสามารถทำได้ง่ายกว่างานจ่ายแบบเดิม เพราะสามารถตรวจสอบและปรับเปลี่ยนได้เป็นรายตัว ซึ่งแตกต่างจากระบบงานจ่ายที่จะต้องรื้อตัวงานจ่าย



รูปที่ 3 แผนภาพระบบจุดระเบิด Direct coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอยล์จตุระเปิดทาหน้าทีเพิ่มไฟฟ้าแรงดันจาก 12 โวลต์เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงดันสูงถึง 18,000 ถึง 25,000 โวลต์ เพื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถกระโดดข้ามขีดจำกัดที่ทนได้ ภายในคอยล์จตุระเปิดจะประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิพันด้วยลวดทองแดงขนาดใหญ่ โดยพันทับกับขดลวดทุติยภูมิอยู่ประมาณ 150 ถึง 300 รอบ ขดลวดทุติยภูมิพันด้วยลวดทองแดงขนาดเล็ก โดยพันรอบแกนเหล็กอ่อนประมาณ 20,000 รอบ ปลายด้านหนึ่งของขดลวดปฐมภูมิจะต่อเข้ากับขั้วบวก (+) ส่วนปลายอีกข้างจะต่อกับขั้วลบ (-) และขดลวดทุติยภูมิจะต่อปลายด้านหนึ่งเข้ากับขดลวดปฐมภูมิทางขั้วบวก (+) อีกด้านหนึ่งจะต่ออยู่กับขั้วไฟแรงสูง ขดลวดทั้งสองจะพันในทิศทางเดียวกัน ขดลวดทุติยภูมิซึ่งมีขนาดเล็กและมีจำนวนรอบมากจะมีความต้านทานมากกว่าขดลวดปฐมภูมิ และที่ว่างภายในคอยล์จะมีน้ำมันซึ่งจะช่วยเป็นฉนวนและระบายความร้อน หลักการที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกัน 2 หลักการคือ การเหนี่ยวนำตัวเอง (self-induction effect) และการเหนี่ยวนำร่วม (mutual induction effect) [1]



รูปที่ 4 แผนภาพระบบจตุระเปิด Coil

5.5 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านวัตถุหรือสสารที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอทั้งขึ้น กระแสไฟฟ้าจะกระจายทั่วหน้าตัดของวัตถุหรือสสารเหล่านั้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติทางกายภาพและความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุได้เป็น

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A}$$

โดย l (คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร(m))

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ρ (Greek: rho) คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของสสาร มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร($\Omega \cdot m$)

5.6 Mechanical Seal

ในส่วนของ การติดตั้งระบบเคลื่อนซึมทั้งสแตน จำเป็นต้องใช้กลไกการเคลื่อนที่รูปแบบเฉพาะในระบบ vacuum เพื่อป้องกันการรั่ว(leaking) โดยในจุดที่มีความเสี่ยงสูงสุดในการเกิดการรั่ว คือจุดเชื่อมต่อในการส่งกำลังของมอเตอร์เข้าไปขับเคลื่อนทั้งสแตนในแคมเบอร์ทดลอง หากใช้กลไกเพลาส่งกำลังทั่วไปจะไม่สามารถป้องกันให้เกิดการรั่วได้ เทคโนโลยี mechanical seal จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

mechanical seal ที่ทางผู้วิจัยนำมาใช้งาน ไนลอนหรือ POM Rod(ปอมแท่ง) จะมีอยู่ด้วยกันสองทำหน้าที่เป็น Pump Related Component และ Face Loading Element ตามลำดับ โดยในแต่ละชิ้นไนลอนจะทำหน้าที่ Seal face ไปด้วยในตัว ในส่วนของ Secondary Sealing Element ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เป็น O-ring ทำจากวัสดุ Viton

mechanical seal ลักษณะนี้มีขีดจำกัดในการป้องกันการรั่วของของเหลวที่ความดัน 5000psi ตัวอย่างเช่น oscillating shaft seals , reciprocating seal และ rotating seal เป็นต้น

5.7 ชุดวัดความดัน edward

ในส่วนของความดันในแคมเบอร์ ทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องวัดความดันประเภท active pirani guage รุ่น D026-04-000 โดยเครื่องวัดความดันรุ่นนี้ จะใช้ทำงานร่วมกับเครื่องแปลงสัญญาณดิจิตอล ADC เครื่องดังกล่าวสามารถทำงานในพิสัยตั้งแต่ 10^{-4} ไปจนถึง 10^3 mbar ซึ่งขีดจำกัดของปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในงานทดลองอยู่ที่ 2mbar จึงมีความเหมาะสมสำหรับการทำการทดลอง เครื่องวัดความดันจะประกอบเข้ากับตัวแคมเบอร์ผ่านทางท่อที่ทำการขึ้นใหม่เพิ่มเติมเพื่อประกอบเครื่องวัดโดยเฉพาะ



รูปที่ 4 ท่อวัดความดัน

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้รับการอนุเคราะห์จากรุ่นพี่ที่จบการศึกษาไปในปี 2557 ในงานวิจัยเรื่อง โดยเครื่องต้นแบบนี้อาศัยหลักการให้กำเนิดพลาสมาโดยใช้ direct coil เป็นหลัก ในการทดลองครั้งนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำการปรับปรุงเครื่อง โดยการเพิ่มหัว direct coil เข้าไป เพื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนพลาสมา[1]

6.1. Impact of low-energy ions on plasma deposition of cubic boron nitride

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของไอออนในการเคลือบโบรอนไนไตรด์ด้วยกรรมวิธีทางพลาสมา ผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าไอออนบวก หรือเหล่านอนุภาคที่เสียอิเล็กตรอนไป จะมีผลกระทบหลักในการเคลือบผิว ในขณะที่ไอออน-หรืออิเล็กตรอน จะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในส่วนของประจุบวกที่ใช้ในการทดลองมีค่าพลังงานอยู่ไม่เกิน 35 eV และมีอัตราส่วนระหว่างไอออนต่อโบรอนฟลักซ์อยู่ที่ 100 ถึง 130[5]

6.2 On plasma nitriding of steels

การศึกษาโลหะ 4 ชนิด ภายใต้กระบวนการพลาสมาไนไตรด์ทั้งหมด 10 แบบ ดังรูปที่ 4 โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ ถูกกระทำภายใต้ความดัน 0.75 Torr ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกตรวจสอบความแข็งผิวและ

ความลึกของชั้นเคลือบ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้ข้อมูลที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อแนวทางในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งในด้านของโลหะที่นำมาใช้ในการทดลองที่ได้ใช้เป็น stainless steel เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความไวในการตอบสนองสูงสุด ดังรูปที่ 5 ซ้ำยังมีผลลัพธ์ในด้านของความหนาของชั้นเคลือบมากที่สุดอีกด้วย[6]

Process	CS (μm)	NS (μm)	TS (μm)	SS (μm)
20 80, 500V, 525, 15.0	2-5	-	-	40
50/50	2-5	0-5	1-6	55
80/20	2-5	4-12	4-11	62
100/0	3-5	2-8	2-11	66
600V	2-4	0-12	-	46
500	1-4	-	-	9
550	2-5	-	-	43
560	3-6	-	-	49
7.5	1-6	-	-	21
30.0	2-5	0-1	-	56

รูปที่ 5 ตารางการทดลองไนไตร 10 แบบ

Table 1
The process parameters of the various nitriding plasmas

P (Torr)	N ₂ /H ₂	U (V)	T (°C)	t (h)	Process code
0.75	20/80	500	525	15	20/80, 500V, 525, 15.0
0.75	50/50	500	525	15	50/50
0.75	80/20	500	525	15	80/20
0.75	100/0	500	525	15	100/0
0.75	20/80	600	525	15	600V
0.75	20/80	500	500	15	500
0.75	20/80	500	550	15	550
0.75	20/80	500	560	15	560
0.75	20/80	500	525	7.5	7.5
0.75	20/80	500	525	30	30.0

รูปที่ 6 ผลทดลองของพลาสมาไนไตรบนโลหะ
เปรียบเทียบทั้ง 4 ชนิด

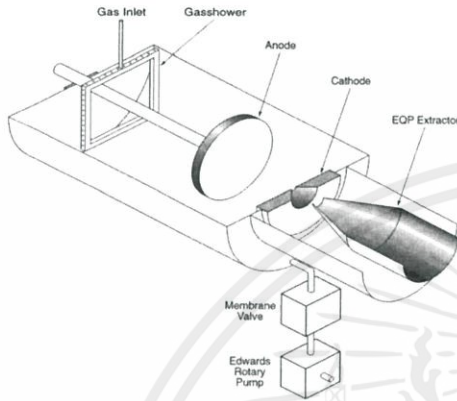
6.3. Study of plasma nitride equipment using high voltage direct current

เป็นการศึกษาถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดในเครื่องต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นมานี้ โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกจะให้ความดันในตัวห้องเผาที่อยู่ที่ 20 mbar แล้วเพิ่มความถี่สัญญาณจุดระเบิดขึ้นไปจาก 147, 250, 357 และ 447 Hz ตามลำดับ ในส่วนที่สองและสาม ความดันจะถูกเพิ่มเป็น 60 และ 100 mbar ตามลำดับ แล้วทดลองด้วยค่าความถี่จุดระเบิดแบบเดิมอีกครั้ง ผลที่ได้ออกมาพบว่าที่พลาสมามีแนวโน้มที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อความดันในห้องเผาต่ำ และค่าความถี่จุดระเบิด[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารทส่งงานไว้ สำหรับการเขียนเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4. The critical role of hydrogen for physical sputtering with Ar-H₂ glow discharges



รูปที่ 7. The chamber

บทความนี้ถูกอ้างถึงเนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องเดียวกันกับเครื่องในหัวข้อ 3.2.4 โดยเครื่องดังกล่าวถูกสร้างจากสแตนเลสทรงกระบอก มีความกว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 30cm และมีขั้วแคโทดทำจากสแตนเลส และมีจูดกราวด์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นแอโนด ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 12 cm ทั้งคู่ และระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองอยู่ที่ 5cm ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 300 V โดยมีคาบในปล่อยไฟที่ 100 ms เครื่องนี้ทำงานโดยใช้ก๊าซผสมอาร์กอนไฮโดรเจน โดยอัตราการไหลและสัดส่วนของก๊าซจะถูกควบคุมจากกลไกที่ติดตั้งไว้ภายนอก ความดันที่ใช้ในการทำงานของเครื่องอยู่ที่ 0.44 Torr[7]

6.5. The role of hydrogen in plasma nitriding: Hydrogen behavior in the titanium nitride layer

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองเคลือบชั้นไนไตรด์ด้วยพลาสมา ที่อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อไนโตรเจนต่างกันสามค่าด้วยกัน โดยแบ่งเป็น 60/40, 30/70 และ 0/100 % โดยมวลตามลำดับ โดยผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบโดยตรง มาจากการตรวจสอบชั้นเคลือบ พบว่ามีไฮโดรเจนอยู่ในชั้นเคลือบเป็นปริมาณน้อยมากแม้จะมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนอยู่ที่ 70% ก็ตาม ผลสรุปกล่าวว่ก๊าซไฮโดรเจนไม่ได้

ส่งผลต่อชั้นเคลือบโดยการเข้าไปเป็นองค์ประกอบของชั้น แต่จะมีผลต่อคุณสมบัติในทางด้านอื่น[8]

7. ขั้นตอนการทดลอง

1. นำแผ่นชิ้นงานที่จะทดสอบ (สแตนเลส 304) ขนาด 20*20 mm วางลงบนแท่นวางชิ้นที่ละชิ้น ปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าตัวห้องแชมเบอร์
2. เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อให้ความดันที่อยู่ในห้องแชมเบอร์เหลือเพียง 150 มิลลิบาร์โดยอ่านค่าจากเกจวัดความดัน (pressure gage)
3. เปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่พลาสมาแชมเบอร์ด้วยอัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลอง
4. เปิดการจู่ระเบิดคอยล์โดยใช้ฟังก์ชันเจเนเรเตอร์ (function generator) ในการกำหนดความถี่ ด้วยแรงดันไฟฟ้า 12V และปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 5 เฮิรตซ์ (Hertz) ไปจนถึง 50 เฮิรตซ์ (Hertz) ตามลำดับและตรวจเช็คกราฟค่าต่างๆจากเครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope)
5. จับเวลา 60 นาทีเพื่อให้กระบวนการพลาสมาไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับแผ่นชิ้นงานสแตนเลส 304 จากนั้นทำการปิดการจู่ระเบิดคอยล์ ปิดถังก๊าซไนโตรเจน และปิดปั๊มสุญญากาศ
6. นำแผ่นชิ้นงานไปตรวจค่าความแข็ง โดยวิธี Rockwell B และ Vickers

8. ผลการทดลอง

8.1 ตารางบันทึกผลการทดลองสแตนเลส 304 (Stainless Steel) ขนาด 20x20mm

8.1.1 ผลการทดลองครั้งแรก มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางด้านล่าง

ความถี่ (Hz)	Hardness (Rockwell b)
Standard (0)	56
10	66.6
30	65.1
50	62.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

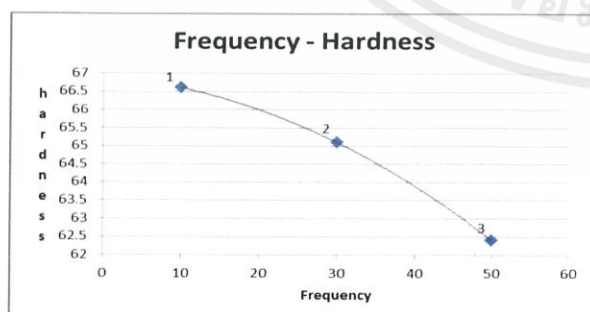
8.1.2 ผลการทดลองครั้งที่สอง มีชิ้นงานทดสอบจำนวน 7 ชิ้น ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางด้านล่าง

ความถี่ (Hz)	Hardness (Vickers)
Standard (0)	20.14
5	24.5
10	23.8
15	22.3
20	22.7
30	21.2
50	21.1

9.สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

9.1 อภิปรายผลการทดลอง

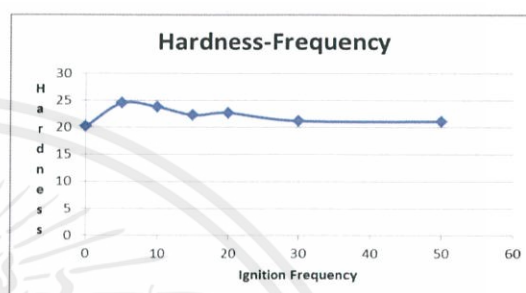
กราฟที่ได้แสดงถึงค่าความแข็งที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ในการจุดระเบิด ผลที่ได้นี้ขัดแย้งกับสมมติฐานที่ได้กล่าวไปในเบื้องต้นว่าค่าความแข็งจะมีความสัมพันธ์ในเชิงแปรตามกันกับค่าความถี่ในการจุดระเบิด แต่ผลที่ได้กลับสื่อออกมาในทางตรงกันข้าม จำเป็นต้องมีการทดลองเพิ่มเติม เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การจุดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่สองเกิดขึ้นจากผลที่ได้จากการทดลองครั้งแรกไม่ชัดเจนดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น ในการทดลองครั้งที่สอง ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มขึ้นส่วนตัวอย่างใน

การทดลอง โดยในการทดลองครั้งนี้ได้มีชิ้นงานที่ถูกเคลือบในย่านความถี่ 5, 15, และ 20 ในการตรวจสอบชิ้นงานคราวนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องทดสอบแบบ Vickers เนื่องจากเป็นที่นิยมในการใช้งานมากกว่า ผลที่ได้ออกมาแสดงดังกราฟด้านล่าง



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การจุดระเบิดกับค่าความแข็ง ครั้งที่ 2

จะเห็นว่ากราฟแสดงถึงค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในช่วงย่านความถี่ต่ำ การทดลองทั้งสองครั้งชี้ไปสู่ความสัมพันธ์รูปแบบเดียวกัน กล่าวคือค่าความแข็งพื้นผิวของชิ้นงาน จะมีการลดลงตามค่าความถี่การจุดระเบิด ในช่วงที่ค่าความแข็งของผิวชิ้นงานมากที่สุดคือย่านความถี่ที่

9.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ผู้วิจัยได้นำมาแสดงเป็นกราฟ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความถี่กับความแข็งของผิวชิ้นงานมีค่าดังนี้ ที่ย่านความถี่ที่ต่ำส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงขึ้นและค่าความถี่ที่ทำให้ผิวชิ้นงานแข็งที่สุด อยู่ที่ 5 Hz ในหน่วย Vickers ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์พบว่าสามารถเพิ่มค่าความแข็งผิวได้ถึง 21.65% แต่เมื่อเพิ่มความถี่คอลลีสูงขึ้นไปเรื่อยๆ ค่าความแข็งผิวชิ้นงานจะลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการปรับค่า duty Cycle ของคอลลีให้เปลี่ยนแปลงไปตามย่านความถี่ที่เพิ่มขึ้น เพื่อคงค่า On-time ต่อคาบการทำงานคอลลีเอาไว้ ส่งผลให้ Duty Cycle มีค่าสูงเมื่อไปตามย่านความถี่ คอลลีจึงมีการอึดตัวที่เร็วขึ้น กระแสจึงมีการแปรผกผันกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือการเพิ่มความถี่ โดยคง ontime ต่อหนึ่งคาบการทำงานไดเร็กต์คอลลีให้คงที่ จะส่งผลให้ กระแสที่ไหลออกจากขดลวดทุติยภูมิในคอลลีมีค่าน้อยลง ซึ่ง

นำไปสู่ พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยลง ค่าความแข็งแรง
งานจึงน้อยลงตามความถี่ที่สูงขึ้น

10. เอกสารอ้างอิง

[1] นายณภัทร อินตะวิน, นายบุลิน หมื่นหนู และ นาย
พีรภัทร์ ศิริเขตต์ (2557) การศึกษาเครื่องกำเนิด
พลาสมาไนโตรโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
วิทยานิพนธ์ปี 2557 ของภาควิชาวิศวกรรม เครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] M. Berg, C.V. Budtz-Jørgensen, H. Reitz, K.O.
Schweitz, J. Chevaller, P. Kringhøj, J. Bøttiger On
plasma nitriding of steels. Institute of Physics
and Astronomy University of Aarhus press, Inc.
2000.

[3] C.V. Budtz-Jørgensen, P. Kringhøj And J.
Bøttiger. The critical role of hydrogen for
physical sputtering with Ar-H₂ glow
discharges. Institute of Physics and Astronomy,
University of Aarhus, Ny Munkegade, 8000
Aarhus C, Denmark, Inc. 2000.

[4] Masaya Tamaki, Yoichi Tomii, Naoichi
Yamamoto The role of hydrogen in plasma
nitriding: Hydrogen behavior in the titanium
nitride layer Graduate School of Human and
Environmental Studies, Kyoto University,
Yoshida-nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-
8501, Japan, Graduate School of Energy Science,
Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku,
Kyoto 606-8501, Japan, Inc. 2000

[5] Paul M. B. Fundamental of plasma physics.
Cambridge university press, Inc 2006. pp.1

[6] Kungen Teii, Seiichiro Matsumoto, Impact of
low-energy ions on plasma deposition of
cubic boron nitride, Department of Applied
Science for Electronics and Materials,
Interdisciplinary Graduate School of Engineering
Sciences, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka
816-8580, Japan, Exploratory Materials Research
Laboratory for Energy and Environment,
National Institute for Materials Science, 1-2-1

Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan, Inc.
2014

[7] Bijie Yang and Quanhua Sun. Derivation of a
continuum model for lowtempera-
ture plasma flow and its application on arc
discharge. State Key Laboratory of High
Temperature Gas Dynamics, Institute of
Mechanics, CAS, Beijing 100190, China, Inc. 1999

[8] [http://mic.eng.ku.ac.th/materials-resources-
detail.php?id_sub=28&id=105](http://mic.eng.ku.ac.th/materials-resources-detail.php?id_sub=28&id=105)

[9] <http://thanapat53a25.wikispaces.com>

[10] <http://www.dynaweldtrading.com>

[11] <http://www.siamchemi.com>

[12] [https://th.wikipedia.org/wiki/การแตกตัวเป็น
ไอออน](https://th.wikipedia.org/wiki/การแตกตัวเป็นไอออน)

[13]

[http://www.chanasteel.com/spec/bearing_ste
el.html](http://www.chanasteel.com/spec/bearing_steel.html)

[14] <http://www.tandcmetal.com/pre1.html>

[15]

[http://www.globalspec.com/learnmore/manufac
turing_process_equipment/vacuum_equipment/
vacuum_gauges](http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/vacuum_equipment/vacuum_gauges)

เอก: National Institute for Materials Science, 1-2-1 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้