

อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิว
เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM

INFLUENCE OF ALUMINIUM POWDER ON SKD11 TOOL STEEL
SURFACE ROUGHNESS USING PMEDM PROCESS

วิษณุวัฒน์ เกตุอุ๊ต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยابผิว
เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM

วิชญวัฒน์ เกตุอุต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM
Influence of Aluminium Powder on SKD11 Tool Steel Surface Roughness using PMEDM Process

ชื่อ - นามสกุล นายวิษณุวัฒน์ เกตุอู๊ด
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 28 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิว เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM
ชื่อ- นามสกุล	นายวิษณุวัฒน์ เกตุอุ๊ด
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D. Eng.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

สมบัติของวัสดุมีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือทำให้ยากต่อการแปรรูปด้วยเครื่องจักรทั่วไป จึงต้องใช้กรรมวิธีแปรรูปแบบพิเศษคือกรรมวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า หลังจากกรรมวิธีนี้ต้องมีการขัดผิวเพื่อให้ได้ผิวเรียบมากขึ้น การขัดผิวแม่พิมพ์ต้องใช้ช่างเทคนิคที่มีประสบการณ์และความชำนาญสูง ถ้าขัดผิดพลาดจะทำให้ชิ้นงานเสียหายในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต นอกจากนี้การขัดผิวยังเป็นขั้นตอนที่ล่าช้า ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเพิ่มต้นทุนการผลิต

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนของเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นของเหลวไฮโดรคาร์บอน โดยทำการปรับปรุงความหยาบผิววัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 ทำการทดลองโดยวิธีการของทากูชิแบบไขว้ตัวแปรตามตารางการทดลอง L9 array โดยพิจารณาตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระยะห่างของการสปาร์ค ตลอดจนเวลาเปิด นอกจากนี้ยังควบคุมตัวแปรคงที่ได้แก่ ปัจจัยประสิทธิภาพไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอิเล็กโทรด 10 มิลลิเมตร ขั้วอิเล็กโทรดบวก และแรงดันไหลผ่านของสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ

ผลการทดลองขั้นต้นพบว่า อนุภาคผงอะลูมิเนียมทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยของวัสดุชิ้นงานลดลง 16.10 เปอร์เซ็นต์ ($R_a = 1.658$ ไมโครเมตร) เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียมกับ ปริมาณความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม พบว่าผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร สามารถสร้างผิวงานที่มีความหยาบผิวดำกว่าผงอะลูมิเนียมขนาด 150 ไมโครเมตร ทั้งนี้ความเหมาะสมของปริมาณผงอะลูมิเนียมที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 กรัมต่อลิตร ให้ความหยาบผิวเฉลี่ยที่ดีที่สุดที่ 1.391 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: การกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า เหล็กกล้าเครื่องมือ ผงอะลูมิเนียม การปรับปรุงผิวงาน

Thesis Title	Influence of Aluminium Powder on SKD11 Tool Steel Surface Roughness using PMEDM Process
Name - Surname	Mr. Vichayavat Ket-oot
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Mr. Chaiya Praneetpongprung, D.Eng.
Academic Year	2014

ABSTRACT

The property of materials has been developed continuously in order to be used more properly in metal work. As a result, the problem arising from the difficulty in fabrication with machines can be found. Therefore, a special of electrical discharge process needs to be employed. Later on the discharging process, the material surfaces need to be ground to get the smooth surfaces. Any mistake during the grinding process can cause the damage of materials during the final stage of production. Therefore, skilled and experienced technicians are required. In addition, the disadvantages of time consuming and increasing production costs are taken into consideration.

The research aimed to improve surface roughness of SKD 11 tool steel by an electrical discharge process using a technique of aluminum power mixed into the dielectric hydrocarbon fluid. The experiment was performed by using cross variables based on the Taguchi method design of L9 array experimental table as the reference. The effects of electric variables, on-time and duration of sparking were considered. Additionally, stable variables which were 50 percent efficiency, 10 mm positive electrode and dielectric flowing pressure were controlled.

The results showed that aluminum powder particles affected to the decreasing of surface roughness of materials with an average of 16.10 % ($R_a = 1.658$ micrometers). When the relationship of aluminum powder and aluminum powder concentration was considered, it was found that 45 micrometers aluminum powder can produce surface roughness which was less than 150 micrometers aluminum powder. The most appropriate amount of the aluminum powder was 40 grams/liter and the best average surface roughness was 1.391 micrometers.

Keywords: electrical discharge machining, tool steel, aluminum powder, surface modification

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยะ ปราณิตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล ประธานกรรมการสอบ ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ กรรมการสอบและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทรมณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาดลจดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้ให้ทุนการศึกษาเพื่อใช้เป็นค่าเล่าเรียนในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาบ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ได้จนประสบความสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านในการให้ความร่วมมือ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่อนุญาตให้ใช้อุปกรณ์รวมทั้งสถานที่ ในการทดลองทดสอบวัสดุ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดสอบขั้นสูง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิตจนสำเร็จการศึกษา

วิชญวัฒน์ เกตุอู๊ด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM).....	17
2.2 กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าโดยการเติมผงโลหะ(Powder-mixed EDM)..	28
2.3 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า.....	30
2.4 การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคการไขว้ตัวแปรแบบทาคุชิ (Taguchi)	34
2.5 การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานภายหลังกระบวนการ EDM.....	35
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	42
3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	42
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	48
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์	59
4.1 ผลการทดลองอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน...	59
4.2 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน.....	68
4.3 ผลการทดลองประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน.....	73
4.4 ผลการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันหลังกระบวนการ EDM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS).....	75
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผล	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	86
ภาคผนวก ข รูปแบบการพังทลาย.....	94
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	96
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	สมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น SKD11.....	26
ตารางที่	2.2	ส่วนผสมทางเคมี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	26
ตารางที่	2.3	อิเล็กโตรดจากชนิดของวัสดุ.....	27
ตารางที่	2.4	สมบัติที่สำคัญของทองแดง (Cu).....	27
ตารางที่	2.5	สมบัติของผงอะลูมิเนียม.....	29
ตารางที่	3.1	ค่าตัวแปรคงที่ ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
ตารางที่	3.2	ค่าตัวแปรแปรผันที่ใช้ในการทดลอง.....	49
ตารางที่	3.3	ตัวแปรที่เลือกใช้ 3 ระดับ 3 ตัวแปร.....	50
ตารางที่	3.4	แผนผังการทดลองทั้งหมดของการทดลอง โดยวิธีทากูชิ.....	50
ตารางที่	3.5	แผนผังการทดลอง L9 Orthogonal array.....	51
ตารางที่	3.6	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบไขว้ตัวแปร ทากูชิ L9.....	52
ตารางที่	3.7	การทดลองกระแสไฟฟ้า.....	58
ตารางที่	3.8	การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียม 45, 150 และ 500 ไมโครเมตร.....	58
ตารางที่	4.1	การทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ.....	60
ตารางที่	4.2	การทดลอง L9 โดยการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร เวลาเปิดกระแสไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน โดยการแบ่งออกเป็น 3 ระดับ...	60
ตารางที่	4.3	ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก.....	61
ตารางที่	4.4	ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยการเติมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ลงในสารไดอิเล็กตริก.....	65
ตารางที่	4.5	ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของขั้วอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว..	68
ตารางที่	4.6	ผลการทดลองระดับของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว.....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.7	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อ ค่าความหยาบผิว.....	74
ตารางที่ 4.8	ผลการเปรียบเทียบพื้นผิวชิ้นงานระหว่างก่อนการเติมผงกับหลังเติมผง อะลูมิเนียม.....	76
ตารางที่ 4.9	ผลการเปรียบเทียบพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างก่อนการเติมผงกับหลังเติมผง อะลูมิเนียม.....	79



สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	กระบวนการ EDM.....	18
รูปที่ 2.2	สภาวะการสร้างช่องว่างในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า.....	19
รูปที่ 2.3	สภาวะการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 2.4	สภาวะการหล่อเย็นในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 2.5	ช่วงเวลาเปิดและเวลาปิด ในการปล่อยประจุไฟฟ้า.....	21
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด	21
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด	22
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของ อิเล็กโทรด.....	23
รูปที่ 2.9	คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ.....	23
รูปที่ 2.10	คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง.....	24
รูปที่ 2.11	คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง.....	24
รูปที่ 2.12	อนุภาคของเศษจากการขจัดเนื้องานที่ถูกชะล้างโดยสาร ไดอิเล็กตริก.....	25
รูปที่ 2.13	กระบวนการ EDM ขณะทำการเติมผงโลหะลงในสาร ไดอิเล็กตริก.....	28
รูปที่ 2.14	กระบวนการไหลวนของผงโลหะในกระบวนการ PMEDM.....	29
รูปที่ 2.15	พารามิเตอร์พื้นฐาน ของกระบวนการ PMEDM.....	30
รูปที่ 2.16	การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค.....	31
รูปที่ 2.17	พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน.....	32
รูปที่ 2.18	การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra).....	32
รูปที่ 2.19	การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry).....	33
รูปที่ 2.20	การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz).....	33
รูปที่ 2.21	หลักการเบื้องต้นตามวิธีการของทากูชิ.....	35
รูปที่ 2.22	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	36
รูปที่ 2.23	ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	37
รูปที่ 3.1	แผนภาพการไหลของกระบวนการงานวิจัย.....	43
รูปที่ 3.2	การเตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	3.3	วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลอง.....	44
รูปที่	3.4	วัสดุผงอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง.....	45
รูปที่	3.5	เครื่องกัดเซาะ โลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง Aristech รุ่น 3D-CNC EDM.....	46
รูปที่	3.6	เครื่องชักน้ำหนัก ยี่ห้อ JADEVER รุ่น Sky 150.....	46
รูปที่	3.7	เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1.....	47
รูปที่	3.8	ถังระบบไหลวนสารไดอิเล็กตริก.....	48
รูปที่	3.9	Powder Mixed EDM.....	53
รูปที่	3.10	เครื่องวัดความหยาบผิว Mahr รุ่น PS1.....	53
รูปที่	3.11	การจับยึดถังน้ำมันระบบไหลวนของสารไดอิเล็กตริกกับชิ้นงาน.....	55
รูปที่	3.12	จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ค.....	55
รูปที่	3.13	พิกัดจุดศูนย์กลางของอิเล็กโตรดก่อนการสปาร์คเพื่อเป็นจุดอ้างอิงการสึกหรอของอิเล็กโตรด.....	56
รูปที่	3.14	การสปาร์คชิ้นงาน SKD 11 ด้วยวิธี PMEDM.....	56
รูปที่	3.15	ค่าการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่อ่านจากหน้าจอที่พิกัดจุดศูนย์กลางหลังการสปาร์ค	57
รูปที่	3.16	ทำการชักน้ำหนักของผงอะลูมิเนียมก่อนผสมลงในสารไดอิเล็กตริก.....	57
รูปที่	4.1	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงานที่การทดลองต่างๆ.....	62
รูปที่	4.2	ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่ได้จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9.....	63
รูปที่	4.3	ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ได้จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9.....	64
รูปที่	4.4	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม.	66
รูปที่	4.5	การเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม.....	66
รูปที่	4.6	การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม.....	67

สารบัญญรูป (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	4.7	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของซั้วอเล็กโตรคบอกและลบขนาดอนุภาค ผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร.....	69
รูปที่	4.8	การเปรียบเทียบค่าอัตราการกำจัดเนื้องานซั้วอเล็กโตรคบอกและลบขนาด อนุภาคผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร.....	70
รูปที่	4.9	การเปรียบเทียบค่าอัตราการสึกหรอของอเล็กโตรคซั้วบวกลบและลบขนาด อนุภาคผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร.....	70
รูปที่	4.10	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของซั้วอเล็กโตรคบอกและลบขนาดอนุภาค ผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร.....	72
รูปที่	4.11	การเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการกำจัดเนื้องานของซั้วอเล็กโตรคบอกกับ วิธีการเติมผง และไม่เติมผงอะลูมิเนียม.....	72
รูปที่	4.12	การเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการสึกหรอของอเล็กโตรคซั้วบวกลบกับวิธีการ เติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม.....	73
รูปที่	4.13	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ระดับต่อค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม 5 ระดับ.....	75
รูปที่	4.14	ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานก่อนการเติมผงอะลูมิเนียม ที่ค่าความหยาบผิว 1.658 ไมโครเมตร.....	77
รูปที่	4.15	ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิว 1.391 ไมโครเมตร ภายหลัง การเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อ ลิตร	77
รูปที่	4.16	ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิว 1.625 ไมโครเมตร ภายหลัง การเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 150 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อ ลิตร.....	78
รูปที่	4.17	ภาพการตรวจผิวอเล็กโตรคภายหลังการเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร.....	79
รูปที่	4.18	ภาพการตรวจผิวอเล็กโตรคก่อนการเติมผงอะลูมิเนียม.....	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EDM	Electrical Discharge Machining
PMEDM	Powder Mixed Electrical Discharge Machining
SEM	Scanning Electron Microscope
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
Ra	Roughness average
EWR	Electrod Wear Ratio
MRR	Materials Removal Rate



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การผลิตชิ้นงานในทางวิศวกรรมจะมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยมีรูปแบบการผลิตปริมาณมาก (Mass Production) กระบวนการที่จะช่วยให้การผลิตมีปริมาณมากได้คือแม่พิมพ์ซึ่งทำจากวัสดุที่มีความแข็ง ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอสูง วัสดุเครื่องมือที่มีคุณสมบัติดังกล่าว มักประสบปัญหาในการแปรรูปโดยกรรมวิธีทางเครื่องมือกลเช่น การกลึง การกัด การเจาะ เนื่องจากวัสดุมีความแข็งสูงและมีรูปทรงที่ซับซ้อนยากต่อการแปรรูป จึงต้องใช้กรรมวิธีแปรรูปแบบพิเศษคือกรรมวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) หรือ EDM [1,2] หลักการทำงานของเครื่องจะอาศัยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่ส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่าอิเล็กโทรด (Electrode) ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กภายใต้ของเหลวที่เป็นฉนวน (Dielectric) การหลอมละลายของเนื้อโลหะจะเกิดบริเวณที่เล็กมากๆ ทำให้สามารถควบคุมผิวชิ้นงานที่ถูกขจัดออกให้มีลักษณะเหมือนกับรูปร่างของอิเล็กโทรด การวัดประสิทธิภาพของการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะวัดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน ความหยาบผิวและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด [3]

ผิวของแม่พิมพ์เช่น แม่พิมพ์พลาสติก (Mold) ต้องการความเรียบสูง เพื่อให้ได้ผิวของผลิตภัณฑ์ที่มีความสวยงาม แต่กรรมวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบได้ระดับหนึ่งเท่านั้น หลังจากกรรมวิธีนี้ต้องมีการขัดผิว (Polishing) เพื่อให้ได้ผิวเรียบมากขึ้น การขัดผิวแม่พิมพ์ต้องใช้ช่างเทคนิคที่มีประสบการณ์และความชำนาญสูง ถ้าช่างไม่มีความชำนาญจะทำให้รูปทรงของแม่พิมพ์ผิดเพี้ยนไปจากแบบที่ต้องการและถ้าขัดผิดพลาดจะทำให้ชิ้นงานเสียหายในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต นอกจากนี้การขัดผิวเป็นขั้นตอนที่ล่าช้าทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเพิ่มต้นทุนการผลิต

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาประสิทธิภาพของการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยการเติมผงอะลูมิเนียมลงในน้ำมัน ไดอิเล็กตริก ซึ่งเรียกรรมวิธี PMEDM (Powder mixed EDM) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวงานให้ได้ความเรียบมากกว่าการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าแบบธรรมดา ทำให้อาจจะสามารถลดขั้นตอนการขัดผิวแม่พิมพ์ลงได้ ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอน ลดการใช้แรงงานที่ต้องการทักษะสูง ส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิต เพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรม

แม่พิมพ์ ตลอดจนเป็นการส่งเสริมศักยภาพในการพัฒนางานอุตสาหกรรม และสามารถต่อยอดไปสู่ระดับการพัฒนาความเจริญเติบโตในด้านอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของพละภูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการ PMEDM

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้คือ วัสดุทองแดง 96% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

1.3.2 วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร
หนา 8 มิลลิเมตร

1.3.3 พละภูมิเนียม ขนาด 45, 150, 500 ไมโครเมตร

1.3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ได้แก่

- 1) เวลาเปิด (On-time) คือ 10, 50, 100 ไมโครวินาที
- 2) กระแส (Discharge Current) คือ 2, 4, 6 แอมแปร์
- 3) ความเข้มข้นพละภูมิเนียม(Concentration) คือ 0,10, 20, 30, 40, 50 กรัมต่อลิตร
- 4) ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) คือ 50%
- 5) เวลางาน (Working Time) 35 นาที
- 6) เวลาแช่อิเล็กโทรด คือ 1 วินาที
- 7) ช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด (Gap Current) คือ 5, 10, 15 H.V
- 8) แรงดันฉีดสารไดอิเล็กตริกจากด้านข้าง 1 kg/cm^2 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

6 มิลลิเมตร ด้วยอัตราการไหล 12 ลิตรต่อนาที

1.3.5 ประสิทธิภาพการทำงานโดยการกัดเซาะด้วยวิธี PMEDM ได้แก่

- 1) คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : Roughness average)
- 2) อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Material Removal Rate)
- 3) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

1.3.6 ทำการกัดเซาะชิ้นงานภายใต้สาร Dielectric Shell Fluid 2 A

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยกระบวนการ PMEDM

1.4.2 เป็นแนวทางในการเลือกใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อการแปรรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการ PMEDM

1.4.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้อะลูมิเนียมในการแปรรูปชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดอื่นๆ ต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

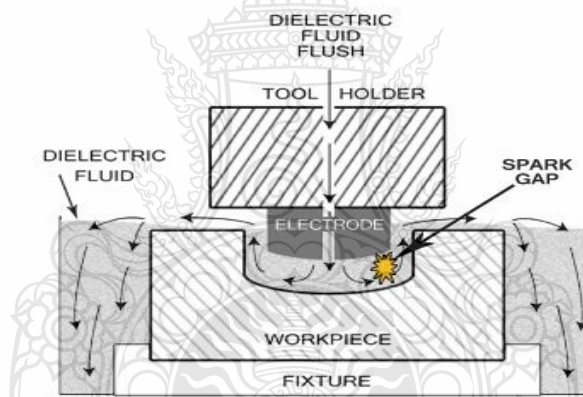
2.1 การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไม่ว่าจะเป็น ในส่วนของแม่พิมพ์โลหะหรือแม่พิมพ์พลาสติกนั้น แม่พิมพ์ต้นแบบซึ่งผลิตจากวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษคือต้องมีความแข็งสูง ความแข็งแรงสูง ความต้านทานการสึกหรอสูง ซึ่งวัสดุเครื่องมือที่มีคุณสมบัติดังกล่าว มักจะประสบปัญหาในการแปรรูปเนื่องจากกรรมวิธีการแปรรูปทางกลเช่น การกลึง การกัด การเจาะ เนื่องจากวัสดุมีความแข็งสูงและรูปทรงที่ยากต่อการขึ้นรูป จึงต้องใช้กรรมวิธีแปรรูปที่พิเศษคือกรรมวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) หรือ EDM รูปแบบการจัดเนื้องานอาศัยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ความถี่สูง โดยที่ชิ้นงาน (Work piece) จะไม่สัมผัสกับอิเล็กโทรด (Electrode) โดยอิเล็กโทรดจะปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านของเหลว (Dielectric fluid) ที่กั้นระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด โดยกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสปาร์คที่อุณหภูมิสูง 8,000 ถึง 12,000 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและระเหยกลายเป็นไอ กระบวนการดังกล่าวจึงนิยมใช้กับวัสดุที่มีความแข็งสูงและขึ้นรูปยากทางกล [1,2] โดย EDM แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Sink-EDM และ Wire-EDM ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมของไทยมีใช้อยู่เป็นจำนวนมาก การกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM) เป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะเป็นกระบวนการดังกล่าวที่ต้องเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน ซึ่งเกือบจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย อีกทั้งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตนานมาก

Sink-EDM ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่วิธีการตัดเฉือนทั่วไปทำได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเข้าของแม่พิมพ์ การตัดเฉือนโลหะ จะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโทรดเป็นตัวนำไฟฟ้า ข้อเสียคือ ในงานที่ต้องการความละเอียดจะต้องใช้ตัวอิเล็กโทรดหลายอัน และงานที่ซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง

Wire-EDM จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับเครื่อง EDM แต่เปลี่ยนจากการใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดทองเหลืองเป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตาม ต้องการในแนวตั้ง Wire-EDM เป็นเครื่องจักรที่ตัดงานด้วยความเที่ยงตรงขนาดสูงมาก มีค่าใช้จ่ายสูงในการทำชิ้นงาน จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

เครื่อง EDM (Electrical Discharge Machining) หมายถึง เครื่องกัดเซาะเนื้อโลหะจากการทำงานของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลผ่านโลหะสองชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานและอิเล็กโตรด เหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรง งานที่ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการตัดเฉือนปกติได้ยาก หรือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง เครื่อง EDM เป็นเครื่องจักรที่ทำงานอย่างอัตโนมัติ โดยอาศัยข้อมูลจากชุดควบคุม เครื่องจักรจะทำงานตามข้อมูลตัวเลขที่ป้อนให้กับชุดควบคุมของเครื่องจักร ในรูปแบบของรหัสที่ชุดควบคุมสามารถเข้าใจได้ ในระบบการขับเคลื่อน จะต้องมีการออกแบบให้รับกับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ควบคุมระบบเชิงตัวเลข โดยอิเล็กโตรดทำจากวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น ทองแดง แกรไฟต์ โดยจะนำอิเล็กโตรดมาต่อเข้ากับเครื่อง EDM ซึ่งเครื่อง EDM จะสร้างความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโตรดเข้าไปใกล้ชิ้นงานจะเกิดการสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่เป็นหลักเกิดความร้อนและละลายออกมาซึ่งจะก่อให้เกิดรูปทรงตามอิเล็กโตรด แสดงกระบวนการ EDM ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการ EDM [4]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง EDM ได้แก่

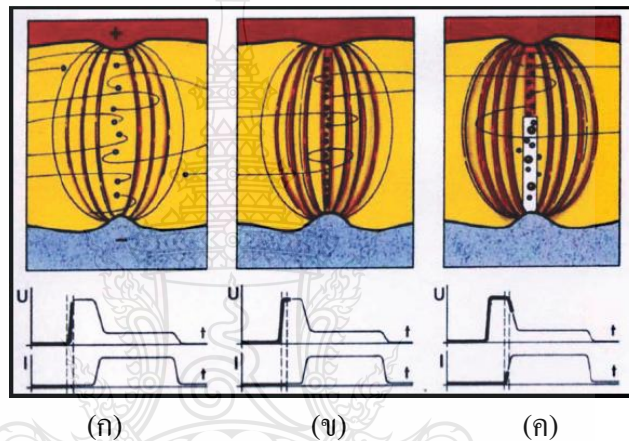
- 1) แหล่งจ่ายพลังงาน ทำหน้าที่ปล่อยประจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในการกัดเซาะชิ้นงาน
- 2) ชุดควบคุม ทำหน้าที่ป้อนข้อมูลเชิงตัวเลข กำหนดเงื่อนไขการทำงานของเครื่อง EDM
- 3) ระบบเซอร์โว ทำหน้าที่ควบคุมการป้อนอิเล็กโตรดเพื่อรักษาระยะช่องว่างของการปล่อยประจุไฟฟ้าไปสู่ชิ้นงานให้คงที่

กระบวนการกักเซาะด้วยไฟฟ้า จะทำงานเป็นวัฏจักร โดยเริ่มจาก

สถานะที่ 1 การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดโดยไม่มีกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดไหลผ่านไปสู่อินงานในสารไดอิเล็กตริกเพื่อสร้างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับอินงาน ดังรูปที่ 2.2 (ก)

สถานะที่ 2 การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electron magnetic) บริเวณพื้นผิวที่จะทำการกัดกร่อนโดยที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรดกับอินงาน ดังรูปที่ 2.2 (ข)

สถานะที่ 3 เกิดการลดลงของแรงดันไฟฟ้าแล้วเริ่มปล่อยกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดผ่านสารไดอิเล็กตริกสู่อินงานเป็นการเริ่มต้นการสปาร์ค ดังรูปที่ 2.2 (ค)

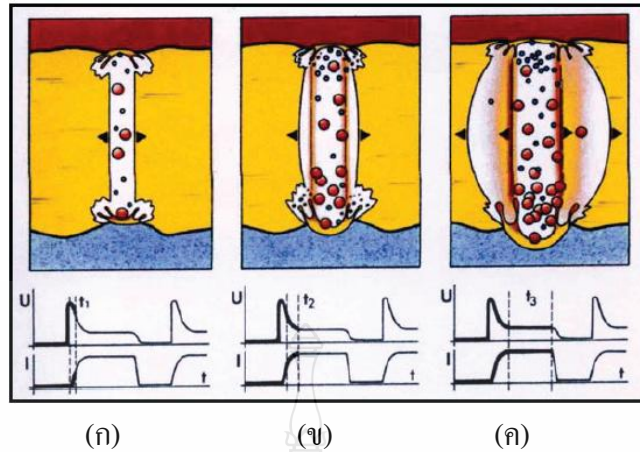


รูปที่ 2.2 สถานะการสร้างช่องว่างในการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

สถานะที่ 4 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดต่ำลง โดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการสปาร์คที่รุนแรง ช่องว่างสูญญากาศเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.3 (ก)

สถานะที่ 5 แรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุด กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุด ทำให้เกิดการสปาร์คที่รุนแรงมากขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้นก่อให้เกิดช่องว่างของสูญญากาศเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.3 (ข)

สถานะที่ 6 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่ เกิดการขจัดเนื้องาน หากเวลายาวนานเกินไปการหลอมละลายจะเป็นหลุมขนาดใหญ่และลึก ช่องว่างของสูญญากาศจะขยายตัวสูงสุด ดังรูปที่ 2.3 (ค)

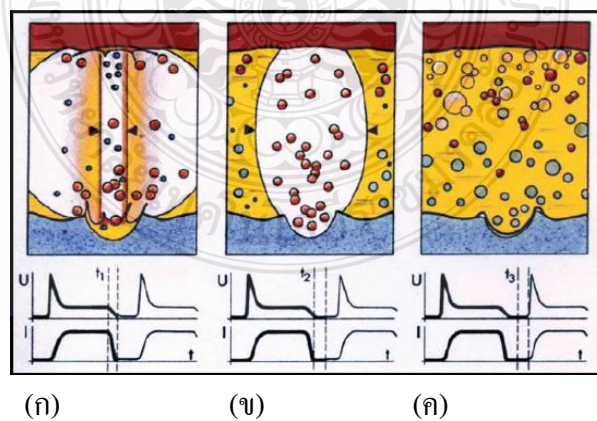


รูปที่ 2.3 สถานะการกักเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

สถานะที่ 7 ลดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เข้าสู่สถานะขั้นสุดท้ายของการสปาร์ค ช่องว่างของสุญญากาศจะเริ่มคังสารไดอิเล็กตริกเข้ามาขจัดเศษชิ้นงานที่หลอมละลายและเป็นการเริ่มต้นเข้าสู่สถานะการหล่อเย็น ดังรูปที่ 2.4 (ก)

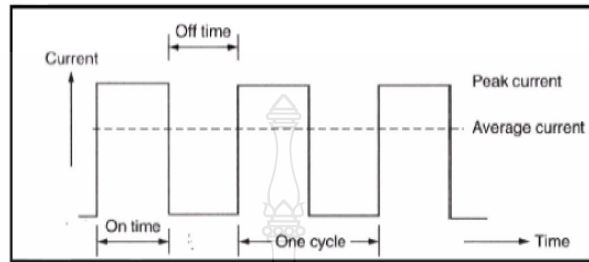
สถานะที่ 8 ไม่มีทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นการสิ้นสุดการสปาร์คช่องว่างของสุญญากาศ เริ่มหดตัวอย่างรวดเร็วคังสารไดอิเล็กตริกเข้ามาขจัดเนื้องานและหล่อเย็นชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.4 (ข)

สถานะที่ 9 เป็นสถานะสุดท้าย โดยการปกคลุมพื้นผิวชิ้นงานด้วยสารไดอิเล็กตริก ก่อนเข้าสู่สถานะเริ่มต้นของวัฏจักรใหม่ ดังรูปที่ 2.4 (ค)



รูปที่ 2.4 สถานะการหล่อเย็นในการกักเซาะด้วยไฟฟ้า [1]

วัฏจักรการทำงาน ดังรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาในการหยุดปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle)



รูปที่ 2.5 ช่วงเวลาเปิดและเวลาปิด ในการปล่อยประจุไฟฟ้า [1]

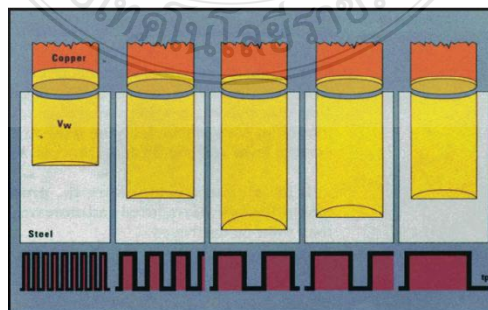
วัฏจักรการทำงานได้จากเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร ดังสมการที่ 2.1 [2]

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}} \right) \times 100(\%) \quad (2.1)$$

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

1) เวลาเปิด (On-Time)

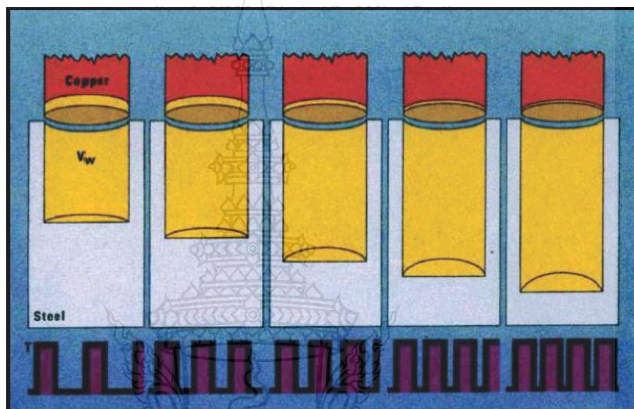
เวลาเปิด คือ เวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าทำให้อิเล็กโตรดเกิดการสปาร์คเนื้องาน ซึ่งระยะเวลาในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่ยาวนานส่งผลต่อการหลอมละลายของเนื้องานให้เป็นหลุมลึกมีความกว้างเป็นแอ่งขนาดใหญ่ ทำให้เนื้องานมีความหนาบางมากกว่าระยะเวลาปล่อยประจุไฟฟ้าที่สั้น [1,2] เวลาเปิดกับการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาเปิดต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

2) เวลาปิด (Off-Time)

เวลาปิด คือ ช่วงเวลาที่หยุดถ่ายเทประจุไฟฟ้า เวลานี้จะไม่มีการจัดเนื่องงาน เวลาปิดมากขึ้นวัฏจักรในการทำงานน้อยลงส่งผลให้ความเร็วในการทำงานช้าลง การระบายความร้อนและการจัดเศษที่หลุดออกมาดีขึ้น ทำให้เกิดการเสถียรในการรักษาค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกซึ่งส่งผลการสร้างช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโตรด เพื่อพร้อมเริ่มวัฏจักรใหม่ [1] เวลาปิดต่อการจัดเนื่องงานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 2.7

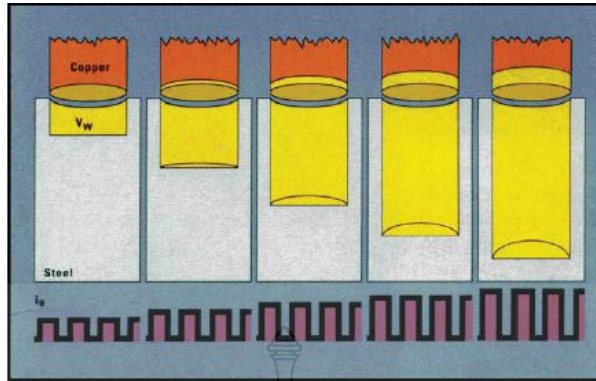


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของเวลาปิดต่อการจัดเนื่องงานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด [1]

3) กระแสไฟฟ้า (Current)

กระแสไฟฟ้า คือ ต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการกัดเซาะชิ้นงาน มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัด (SA : Section Area) ตามหลักการกำหนดค่ากระแส 0.1 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร ตามกฎ Rule of Thumb สำหรับการกัดเซาะแบบหยาบ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังสมการที่ 2.2 [2] และผลของกระแสไฟฟ้าต่อการจัดเนื่องงานและการสึกหรอของอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 2.8

$$\text{กระแสไฟฟ้าสูงสุด} = \text{พื้นที่หน้าตัด (มม.}^2\text{)} \times 0.1 \text{แอมแปร์ / มม.}^2 \quad (2.2)$$



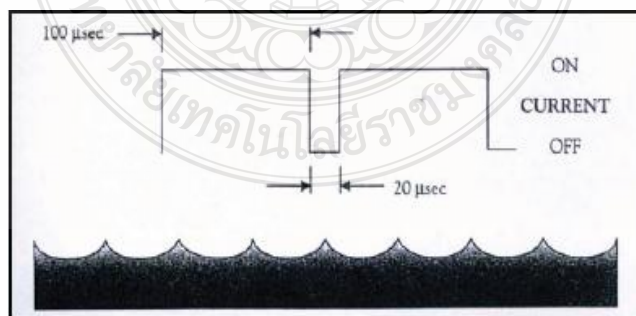
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของอิเล็กโทรด [1]

4) ความถี่ (Frequency)

ความถี่เกิดจากการปรับค่าเวลาเปิดและเวลาปิดโดยการคำนวณวัฏจักรการสปาร์กต่อหน่วยเวลา (Sec) [2] ดังสมการที่ 2.3

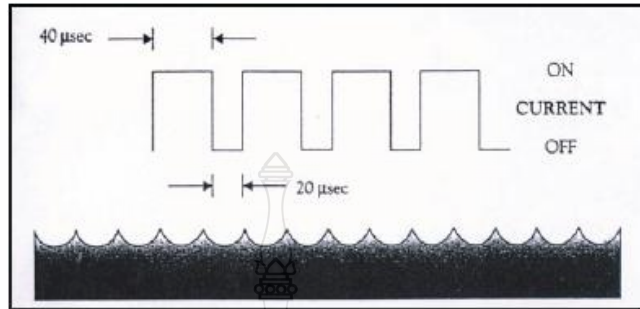
$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (2.3)$$

ความถี่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวของชิ้นงาน เมื่อเวลาเปิดสูงเวลาปิดต่ำทำให้เกิดความถี่ต่ำ มีอัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่ผิวงานหยาบ เนื่องจากเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ยาวนานทำให้เกิดความร้อนจากการสปาร์กกระจายตัวเป็นแอ่งกว้างและลึก ดังรูปที่ 2.9



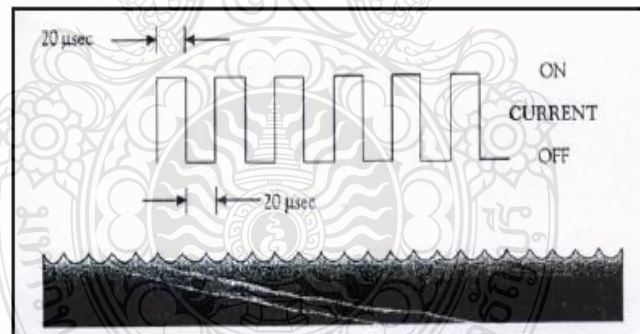
รูปที่ 2.9 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ต่ำ [2]

เมื่อเวลาเปิดลดต่ำลงทำให้ความถี่สูงขึ้น มีอัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวลดลง เนื่องจากการสปาร์กระจายตัวเป็นแอ่งและความถี่น้อยลง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่ปานกลาง [2]

เวลาเปิดลดต่ำลงมากจะทำให้ความถี่สูงขึ้นมาก จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานและความหยาบผิวลดลงอย่างมาก ความถี่สูงมากเหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการผิวละเอียดมาก ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 คุณภาพผิวงานที่เกิดจากความถี่สูง [2]

5) สารไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) จะมีหน้าที่ดังนี้

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กทริกคือการทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน การดิสชาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด

2. ไอออน (Ionisation) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการ discharge ที่เร็วที่สุดและเมื่อสวิตช์ออฟ (Off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทาง discharge เพื่อให้เกิดการ discharge ใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป

3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างจะสูงมาก ภายใต้อายุการใช้งาน ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกันไอของความร้อนจะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย

4. การพัฒนาอนุภาคโลหะ จากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าในช่องว่าง discharge จะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยให้กระบวนการดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าอนุภาคโลหะถูกชะล้างออกไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริกทำให้มีอนุภาคโลหะในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้แล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง เอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป เศษที่เกิดจากการขัดชิ้นงานและถูกชะล้างออกโดยสารไดอิเล็กตริกมีขนาดเล็กมาก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อนุภาคของเศษจากการขัดชิ้นงานที่ถูกชะล้างโดยสารไดอิเล็กตริก [1]

6) วัสดุชิ้นงาน (Work piece materials)

วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น SKD11 นิยมใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับ งานปั๊ม งานตัด งานเพชร งานอัดขึ้นรูปเย็น และงานที่ต้องทนกับการเสียดสีสูงๆ โดยมีสมบัติทางกล ดังตารางที่ 2.1 และส่วนผสมทางเคมีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น SKD11

สมบัติทางกล	รายละเอียด
ความหนาแน่น	7,850 kg/m ³
โมดูลัสความยืดหยุ่น	210 GPa
ความทนต่อแรงดึง	1,158 MPa

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ส่วนผสมทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	1.47
ซิลิคอน (Si)	0.3
แมงกานีส (Mn)	0.35
โครเมียม (Cr)	11.39
โมลิบดีนัม (Mo)	0.85
นิกเกิล (Ni)	0.29
วานาเดียม (V)	0.25
ฟอสฟอรัส (P)	0.24
ทองแดง (Cu)	0.06
กำมะถัน (S)	0.08

7) วัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Materials)

วัสดุอิเล็กโทรดคือตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากวัสดุหลากหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่ต่างกันอิเล็กโทรดที่ดีควรมีสมบัติดังนี้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง ด้านการกัดเซาะหรือการสึกหรอต่ำ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความสามารถทำงานได้ดี ประหยัด อิเล็กโทรดจากชนิดของวัสดุ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อิเล็กโตรดจากชนิดของวัสดุ [5]

Materials	EWR	MRR	Fabrication	Cost	Application
Copper	Low	High	Easy	High	On all metals
Brass	High	High	Easy	Low	On all metals
Tungsten	Lowest	Low	Difficult	High	Small holes
Tungsten Copper Alloy	Low	Low	Difficult	High	Higher accuracy
Cast iron	Low	Low	Easy	Low	Used for few material
Steel	High	Low	Easy	Low	Used for finishing
Zinc based alloy	High	High	Easy die casted	High	On all metals
Copper Graphite	Low	High	Difficult	High	On all metals

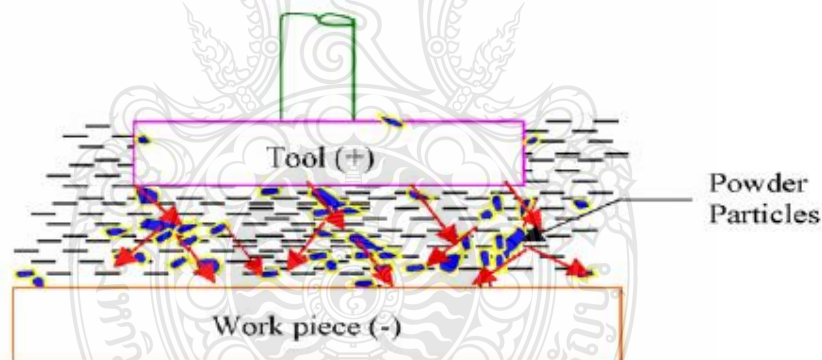
วัสดุอิเล็กโตรด ที่นิยมใช้ในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าสำหรับเหล็กกล้า คือ ทองแดง [1,2] วัสดุทองแดงมีอัตราการสึกหรอต่ำ ขึ้นรูปง่าย และขจัดเนื้องานได้สูง ทองแดง มีสมบัติดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญของทองแดง (Cu)

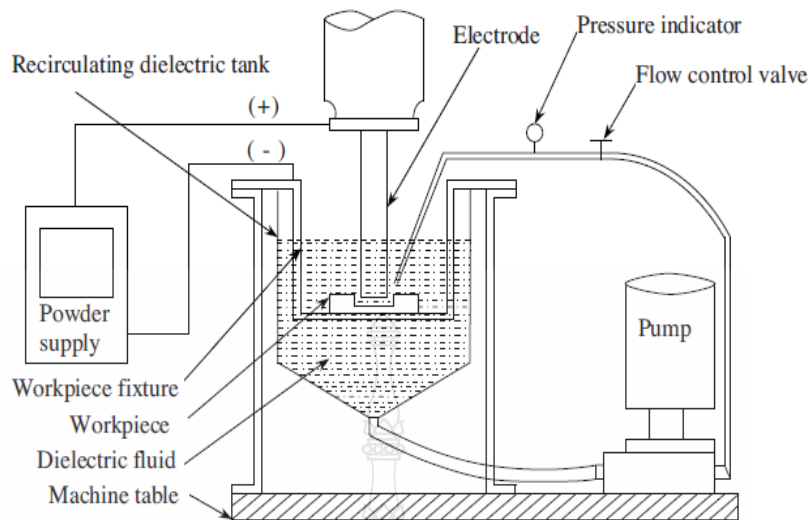
สมบัติ	รายละเอียด
ความหนาแน่น	8.96 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1,084.62 °C
ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 16.78 nΩ·m
การนำความร้อน	(300 K) 401 W/(m·K)
ความแข็งแรงกอร์ส	369 MPa

2.2 กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าโดยการเติมผงโลหะ (Powder-mixed EDM : PMEDM)

กระบวนการ PMEDM เป็นวิธีการที่เหมือนกับกระบวนการ EDM แบบปกติ แต่จะมีข้อแตกต่างจากการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าธรรมดา โดยจะมีการเติมผงโลหะที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทำงาน หรือส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานลงในสารไดอิเล็กตริก โดยจะต้องทำการออกแบบระบบหมุนเวียนขนาดเล็ก เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของอนุภาค เนื่องจากผงอนุภาคของโลหะจะไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารไดอิเล็กตริกได้ และผงโลหะยังมีน้ำหนักมากกว่าน้ำมัน กระบวนการเติมผงโลหะจึงอาจจะไม่ส่งผลใดๆเลยหากกระบวนการไหลวนของสารไดอิเล็กตริกไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ผงโลหะเมื่อผสมอยู่ในสารไดอิเล็กตริกแล้วผ่านกระบวนการ EDM จะทำให้ได้รับพลังงานความร้อนและมีพฤติกรรมแบบการสลับฟันปลาภายใต้พื้นที่การสปาร์ก เมื่ออนุภาคมาใกล้กันจะเรียงตัวกันเหมือนห่วงโซ่จะช่วยในการแกว่งตัวระหว่างสองขั้วไฟฟ้า ทำให้การสปาร์กเร็วขึ้นเกิดการกัดเซาะที่ผิวชิ้นงานด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องาน ลดการสึกหรอของอิเล็กโทรดและความหยابผิวเฉลี่ยลดลง หลักการของกระบวนการ PMEDM ดังรูปที่ 2.13 กระบวนการ PMEDM ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 กระบวนการ EDM ขณะทำการเติมผงโลหะลงในสารไดอิเล็กตริก [6]



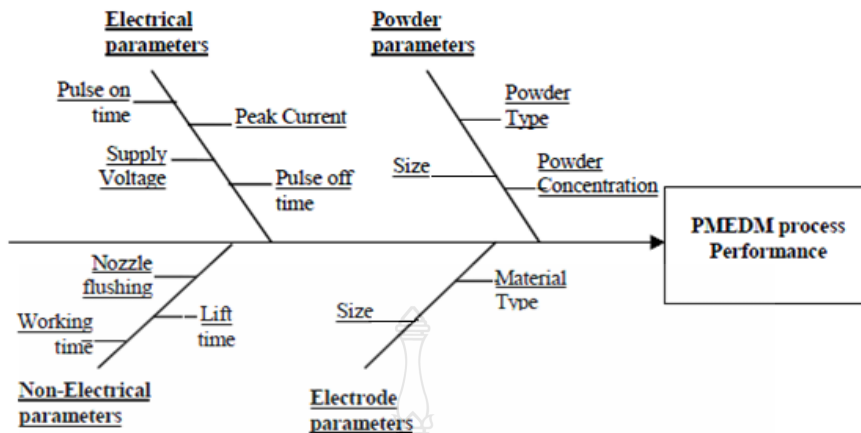
รูปที่ 2.14 กระบวนการไหลวนของผงโลหะในกระบวนการ PMEDM [7]

ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการ PMEDM คือ ผง (Powder) โดยเลือกความเข้มข้น ชนิดของผงและขนาดของผง ใส่ลงในสารไดอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ผงที่ใช้ในกระบวนการ PMEDM มีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม โครเมียม กราไฟต์ ทองแดง ในที่นี้เลือกใช้ผงอะลูมิเนียม สมบัติของผงอะลูมิเนียม ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของผงอะลูมิเนียม

สมบัติ	รายละเอียด
ความหนาแน่น	2.70 g /cm ³
จุดหลอมเหลว	933.47 K (660.32 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 26.50 nΩ·m
การนำความร้อน	(300 K) 237 W/(m·K)

พารามิเตอร์พื้นฐาน ของกระบวนการ PMEDM ที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว อัตราการกัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 พารามิเตอร์พื้นฐาน ของกระบวนการ PMEDM [8]

2.3 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะวัดความสามารถในการกัดเซาะเนื้องานอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และวัดการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดอยู่ในรูปของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนวัดประสิทธิภาพการทำงานที่มีผลต่อวัสดุชิ้นงาน อยู่ในรูปของคุณภาพผิวงาน (Surface quality) โดยส่วนใหญ่จะวัดอยู่ในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) นอกจากนี้แล้วความร้อนที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อผิวชิ้นงาน ซึ่งวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งผิวงาน (Hardness)

2.3.1 อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR : Materials Removal Rate)

การขึ้นรูปด้วยวิธีกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า อัตราการขจัดเนื้องานจะต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น การตัด การกัดและการกลึง ในการใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้น ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานต่ำ แต่ถ้าปรับใช้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงอาจทำให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น อัตราการขจัดเนื้องานจะมีหน่วยเป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 2.4

$$\text{อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)} = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่สึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (2.4)$$

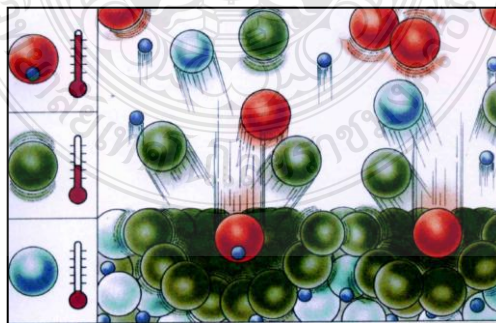
2.3.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR : Electrode Wear Ratio)

การกัดกร่อนวัสดุงานจะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น เงื่อนไขการกัดเซาะ หรือการเลือกใช้วัสดุของอิเล็กโทรด กับวัสดุที่เป็นชิ้นงาน สภาพการไหลของสารละลายนั้น ดังนั้น เราจำเป็นต้องคำนวณการสึกหรอนี้ไว้ล่วงหน้า เพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้ายของขั้วไฟฟ้าสำหรับอัตราการสึกหรอดังกล่าวนี้ ถ้าต่ำกว่า 1% ก็จะไม่เกิดการสึกหรอ และถ้าอยู่ในช่วง 1-10% แสดงว่าอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับการสึกหรอต่ำ หากสูงเกินกว่า 10% แสดงว่ามีการสึกหรอ โดยปกติแล้วการขึ้นรูปหยาบจะไม่เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะอยู่ในเกณฑ์ต่ำโดยอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

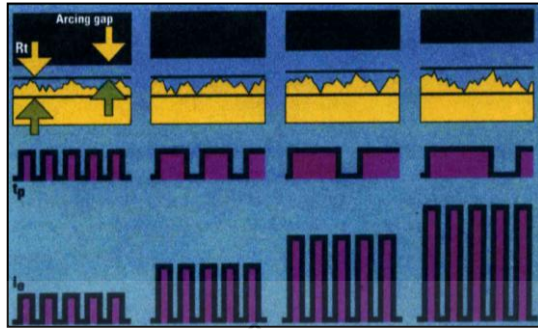
$$\text{อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR)} = \frac{\text{ปริมาตรอิเล็กโทรดที่หายไป} \times 100}{\text{ปริมาตรของเนื้องานที่หายไป}} \quad (2.5)$$

2.3.3 คุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิว

ความหยาบผิวงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเกิดจากกระแสและระยะเวลาเปิดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุส่งผลให้เกิดความร้อนจนเกิดการหลุดร้อนเป็นอนุภาคขนาดเล็กออกจากผิวงานดังรูปที่ 2.16 เมื่ออนุภาคหลุดออกจากชิ้นงานจะเกิดเป็นแอ่งขึ้นบนผิวงาน ความลึกและความกว้างของแอ่งที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสปาร์คดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 ตามลำดับ เมื่อเสร็จสิ้นแล้วความกว้างและความลึกของแอ่งที่หลงเหลือจะกลายเป็นลักษณะของผิวงาน



รูปที่ 2.16 การเกิดหลุมและแอ่งที่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการสปาร์ค [1]



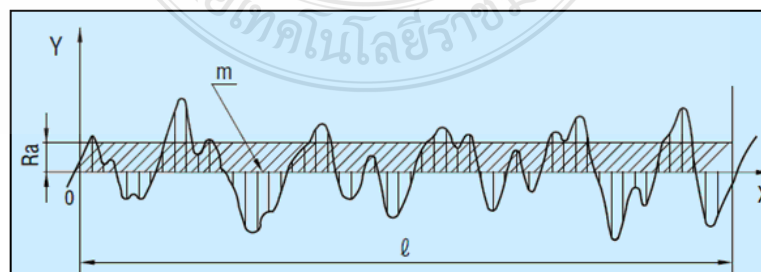
รูปที่ 2.17 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวงาน [1]

ความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้จากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (Ry) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (Rq) ค่าความหยาบในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่มักนิยมกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การอ่านค่าความหยาบผิวที่มีที่มาจากวิธีการคำนวณที่ต่างๆ กันคือ [3]

1) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (2.6)$$

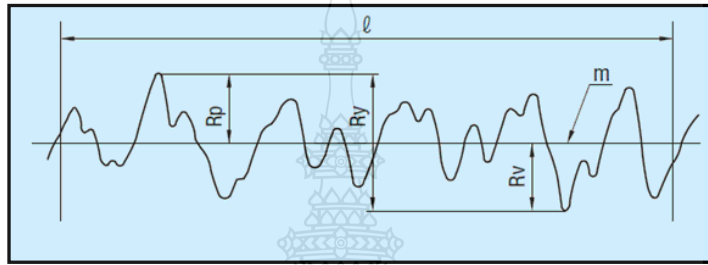


รูปที่ 2.18 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [9]

2) ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry : Maximum Peak)

ค่าความหยาบผิวสูงสุดหมายถึงความต่างสูงสุดระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดของผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยคำนวณค่า Ry จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลาง รวมกับค่าต่ำสุดของจุดก้นแอ่งที่ลึกที่สุดดังสมการที่ 2.7

$$R_y = R_p + R_v \quad (2.7)$$

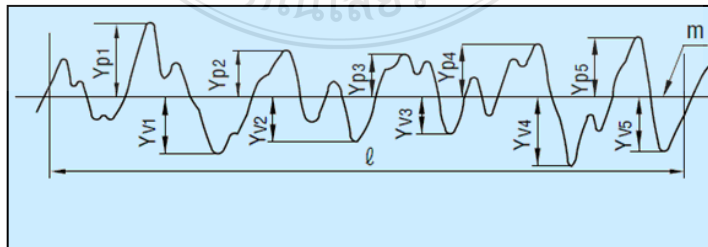


รูปที่ 2.19 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry) [9]

3) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด หมายถึงค่าส่วนต่างสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางทางด้านบน 5 ตำแหน่ง และส่วนต่างจากจุดต่ำสุดถึงเส้นกึ่งกลาง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.20 โดยคำนวณค่า Rz จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางจำนวน 5 ตำแหน่งรวมกับค่าต่ำสุดของจุดที่ลึกที่สุดของผิวอีก 5 ตำแหน่ง ดังสมการที่ 2.8

$$R_z = \frac{(Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}) + (Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5})}{5} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) [9]

2.4 การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคการไขว้ตัวแปรแบบทาคุชิ (Taguchi)

คุณภาพ หมายถึง สินค้าและบริการที่ส่งมอบให้กับลูกค้าแล้วตรงตามมาตรฐานที่ ลูกค้าต้องการ รวมไปถึงการบรรลุถึงความต้องการและความคาดหวังของลูกค้า การประกันคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วจะใช้วิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือ (Statistical Process Control : SPC) SPC พยายาม เข้าถึงคุณภาพโดยการต่อต้านความแปรผันที่เกิดมาจากการผลิต ในบทความนี้จะเป็นการแนะนำ แนวทางใหม่ที่แตกต่างจากแนวทางเดิมๆ ในการประกันคุณภาพ แนวทางนี้เชื่อว่าคุณภาพมาจากการ ออกแบบที่ดี จึงให้ความสำคัญไปที่การออกแบบการทดลอง โดยแนวทางใหม่นี้มีชื่อว่า วิธีการ ทาคุชิ (Taguchi Method) ทาคุชิ มีต้นกำเนิดมาจากการพยายามในการปรับปรุงคุณภาพแนวใหม่ ที่มาจากการออกแบบระบบที่ดี มากกว่าการสุ่มตรวจทั่วไป ในขณะที่มีเงื่อนไขหรือทรัพยากร ที่จำกัด ถูกคิดค้นขึ้นมาในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เสนอโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่นชื่อ ดร. เก็นอิชิ ทาคุชิ (Genichi Taguchi) ซึ่งมีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น ทาคุชิเป็น เครื่องมือคุณภาพที่ช่วยในการปรับปรุงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการช่วยเลือกพารามิเตอร์ อย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดความคงทน (Robustness) ของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เทคนิค ดังกล่าวเป็นที่นิยมในหมู่ของวิศวกรที่มีหน้าที่ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการใหม่ให้มี ระดับคุณภาพที่เหนือคู่แข่ง ดร.ทาคุชิ ได้ให้ความเห็นไว้ว่าค่าเสียหาย เกิดขึ้นได้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการ มีคุณสมบัติหรือลักษณะผิดแผกไปจากค่าเป้าหมาย ดังนั้นคุณูแจสำคัญของการ ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการผลิตคือ การทำให้ความเสียหายมีค่าน้อยที่สุด หลักการเบื้องต้นตามวิธีการของทาคุชิ ดังรูปที่ 2.21

รากฐานของวิธีทาคุชิ เกิดขึ้นมาจากเหตุผลสำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) สังคมจะเกิดความสูญเสียทุกๆ ครั้งที่คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตาม เป้าหมาย ดังนั้น ดร. ทาคุชิ จึงให้เหตุผลว่าการเบี่ยงเบนออกไปจากเป้าหมายเป็นผลให้เกิดความ สูญเสีย ทาคุชิ จึงได้ให้คำจำกัดความคุณภาพใหม่ว่าเป็นความสูญเสียที่ผลิตภัณฑ์ สร้างขึ้นแก่สังคม
- 2) ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต ต้องการระบบที่พัฒนา มีความก้าวหน้าในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การออกแบบระบบ (System design), การกำหนดพารามิเตอร์ (Parametric design) รวมไปถึงการออกแบบค่าเผื่อ (Tolerance design) ซึ่งวิธีการทาคุชิ เป็นวิธีการ ออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพ คลอบคลุมในเรื่องต่างๆ ดังที่กล่าวมา



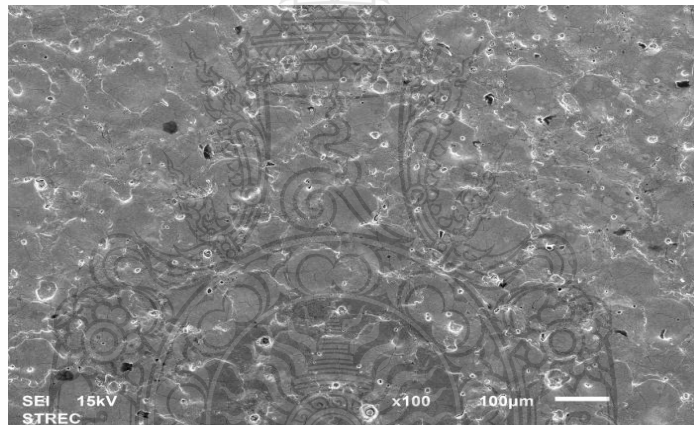
รูปที่ 2.21 หลักการเบื้องต้นตามวิธีการของทากูชิ [10]

2.5 การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานภายหลังกระบวนการ EDM

2.5.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

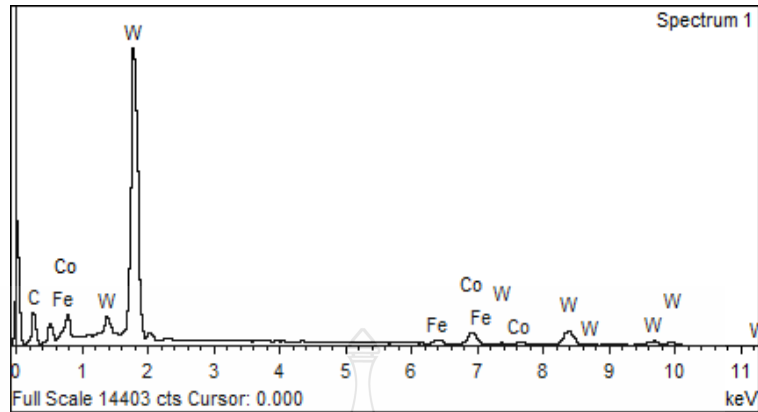
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตว์ทัศน์ได้ แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.5.2 การตรวจสอบส่วนผสมของธาตุที่ตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการอีดีเอ็มด้วยกล้องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) และกราฟแสดงปริมาณธาตุเชิงคุณภาพ ดังรูปที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวงาน โดยการใช้งานมักจะใช้ร่วมกับกระบวนการ SEM ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์และการตรวจสอบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ผงผสมในสารไดอิเล็กตริกช่วยปรับปรุงคุณภาพผิวงานให้ดีขึ้น อัตราการขัดเนื้องานเพิ่มขึ้นและอัตราการสึกหรออิเล็กทรอนิกส์โดยรวมลดลง โดยผงผสมที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ผงอะลูมิเนียม ผงอลูมิน่า ผงกราไฟต์ ผงซิลิคอน ผงไททานเนียมคาร์ไบด์ ผงโครเมียม ตัวแปรที่ใช้คือ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด เวลาปิด Duty Cycle ความเข้มข้นผง ขั้วอิเล็กโตรด ขนาดอนุภาคผง

งานวิจัยที่ผ่านมาเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมกับวัสดุในงานแม่พิมพ์ ได้แก่ Hastelloy Steel, W300 Steel, Die Steel, H11 Steel และ H13 Steel เป็นต้น ขั้วอิเล็กโตรดมีผลต่อการกัดเซาะชิ้นงาน โดยขั้วบวกอัตราการขัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้น ขั้วลบคุณภาพผิวงานที่ดีกว่า การปรับค่าเวลาเปิดสั้นจะให้ผลที่ดีในด้านของความหยาบผิวแต่อัตราการขัดเนื้องานเวลาเปิดยาวจะให้ผลที่ดีกว่า

กระแสไฟฟ้าส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง กระแสไฟสูงจะทำให้อัตราการขัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลง กระแสที่ใช้ในช่วง 2-15 แอมแปร์ ขนาดของผงที่ใช้ในช่วง 100-400 Mesh (37-149 μm) ขนาดที่ให้ผลดีมีขนาดในช่วง 200-300 Mesh (45-75 μm) ส่งผลดีต่อคุณภาพผิวงานและอัตราการขัดเนื้องาน

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
Kuldeep Ojha et al. [11]	2011	- EN-8 Steel - Chromium Powder - กระแสไฟฟ้า - Duty Cycle - ความเข้มข้นผง - Ø อีเล็กโตรด	- กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นผงมากขึ้นส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอีเล็กโตรดสูงขึ้น - Ø อีเล็กโตรดเพิ่มขึ้น มีผลให้อัตราการสึกหรอของอีเล็กโตรดลดลง
Sukhjeet Singh et al. [12]	2011	- ASTM A681 - Al ₂ O ₃ - TiC - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด - เวลาปิด - ความเข้มข้นผง	- PMEDM มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญเกี่ยวกับอัตราการกำจัดเนื้องานที่เพิ่มขึ้นและอัตราการสึกหรอของอีเล็กโตรดลดลง โดย TiC ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า Al ₂ O ₃ ในแง่ของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอีเล็กโตรด
Soumyakant Padhee et al. [13]	2012	- EN 31 Steel - Silicon Powder - เวลาเปิด - Duty Cycle - กระแสไฟฟ้า - ความเข้มข้นผง	- ผงผสมในไดอิเล็กตริกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ EDM โดยเฉพาะคุณภาพผิว แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นควรศึกษาเกี่ยวกับผงเรื่อง ชนิด ขนาด รูปร่างและความเข้มข้นอย่างละเอียด
Gurtej Singh et al. [14]	2012	- H 13 Steel - Aluminium powder - ขั้วอีเล็กโตรด - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด	- ขั้วอีเล็กโตรดลดความหยาบผิว - เวลาเปิดและกระแสที่เพิ่มขึ้นมีผลให้พื้นผิวหยาบมากขึ้น - อนุภาคของผงในสารไดอิเล็กตริกลดความหยาบผิวของชิ้นงานในกระบวนการ PMEDM

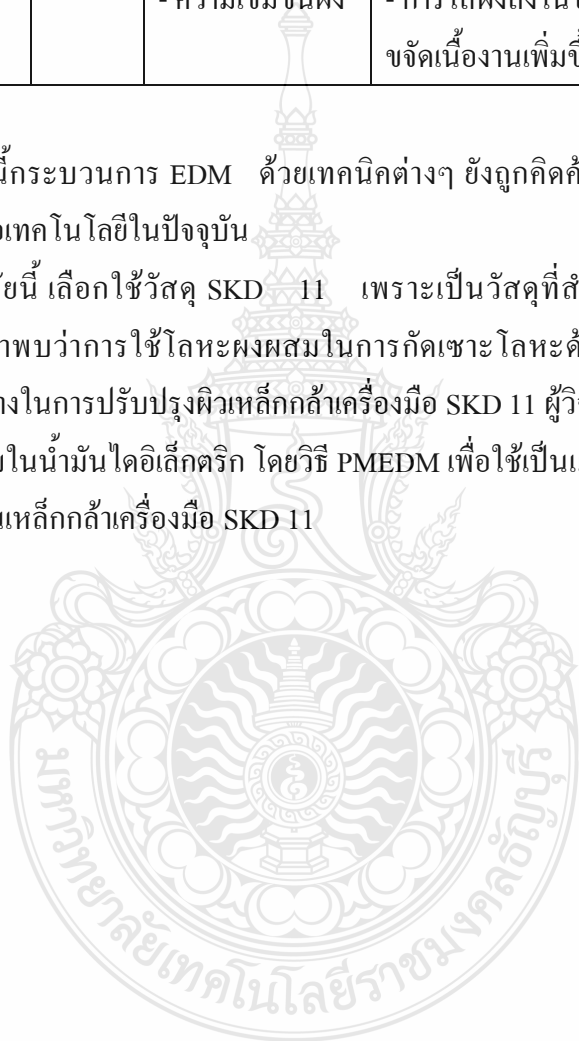
		<ul style="list-style-type: none"> - Duty Cycle - gap Voltage - ความเข้มข้นผง 	
M.Y. Ali et al. [15]	2011	<ul style="list-style-type: none"> - Titanium alloy (Ti-6Al-4V) - Silicon Carbide Powder - ความเข้มข้นผง - กระแสไฟฟ้า 	<ul style="list-style-type: none"> - การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าความเข้มข้นของผงเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อพื้นผิวที่ขรุขระ - การเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้า
S. Singh and M.F Yeh [16]	2012	<ul style="list-style-type: none"> - Aluminum alloy (AA6061) - Alumina (Al₂O₃) - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด - Duty Cycle - Gap Voltage - ความเข้มข้นผง - ขนาดอนุภาคผง 	<ul style="list-style-type: none"> - ระดับที่เหมาะสมของพารามิเตอร์เครื่องจักรกลส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มขึ้น จาก 0.4267 ถึง 0.530 กรัม/นาที่ - อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และคุณภาพผิวงาน (R_{max}) จะลดลง 0.0112-0.0096 กรัม / นาที่ และ 3.64-2.82 μM ตามลำดับ
Paramjit Singh et al. [17]	2010	<ul style="list-style-type: none"> - Hastelloy Steel - Aluminium Powder - กระแสไฟฟ้า - ความต่างศักย์ - เวลาเปิด - Duty Cycle - ความเข้มข้นผง 	<ul style="list-style-type: none"> - ผงอะลูมิเนียมที่ลอยอยู่ในของเหลวไดอิเล็กทริกมีผลกระทบต่อ อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดและความหยาบผิว - ความเข้มข้นของผงและขนาดของผง หากต่ำเกินไปและสูงเกินไปลดอัตราการขจัดเนื้องาน Hastelloy - อัตราการสึกหรอของทองแดงลดลงได้ โดยการลดขนาดของผงอะลูมิเนียม

		- Mesh Size	- ผิวสำเร็จของ Hastelloy จะดีขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นผงและอนุภาคผง
Saurabh Sharma et al. [18]	2011	- Hastelloy Steel - Graphite Powder - ขั้วอิเล็กโตรด - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด - Duty Cycle - Gap Voltage - ความเข้มข้นผง	- ขั้วอิเล็กโตรดมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสึกหรอของอิเล็กโตรด อัตราค่าของอัตราการสึกหรอต่ำที่ขั้วบวก
Baljinder Singh et al. [19]	2012	- H11 steel - Al Powder - ขั้วอิเล็กโตรด - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด - Duty Cycle - Gap Voltage - ความเข้มข้นผง	- ขั้วอิเล็กโตรดลดความหยาบผิว - อนุภาคผงในของเหลวไดอิเล็กตริกช่วยปรับปรุงพื้นผิวที่ขรุขระในกระบวนการ PMEDM - กระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าทำให้พื้นผิวชิ้นงานหยาบมากขึ้น
Gurule N. B. et al. [20]	2012	- Die Steel - Aluminium Powder - กระแสไฟฟ้า - เวลาเปิด - เวลาปิด - ความเข้มข้นผง - ชนิดอิเล็กโตรด	- กระแสไฟฟ้า , เวลาเปิดและ ความเข้มข้นผงมีนัยสำคัญต่อผลกระทบต่ออัตราการขจัดเนื้องาน - ผงอลูมิเนียมที่ลอยในสารไดอิเล็กตริกช่วยเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องาน - อิเล็กโตรดทองแดง อัตราการขจัดเนื้องาน สูงสุดที่ความเข้มข้น 4 g/l

Saurabh Sharma et al. [21]	2010	-Hastelloy Steel - Aluminium Powder - อนุภาคเม็ดผง - ความเข้มข้นผง	- พื้นผิวที่ขรุขระของวัสดุลดลงด้วย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นผงและมีการ เปลี่ยนแปลงอนุภาคเม็ดผง - การเพิ่มความเข้มข้นผงอัตราการ สึกหรือที่ร้อยละลดลงอย่างรวดเร็ว - การใส่ผงลงในของเหลวทำให้อัตราการ จัดเนื้องานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
----------------------------------	------	---	---

นอกจากนี้กระบวนการ EDM ด้วยเทคนิคต่างๆ ยังถูกคิดค้นและพัฒนาพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทันต่อเทคโนโลยีในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้วัสดุ SKD 11 เพราะเป็นวัสดุที่สำคัญในงานแม่พิมพ์และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้โลหะผสมในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ามีไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาโดยการใช้ผงอะลูมิเนียมผสมในน้ำมันไดอิเล็กตริก โดยวิธี PMEDM เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ในการตัดเดือนเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11



บทที่ 3

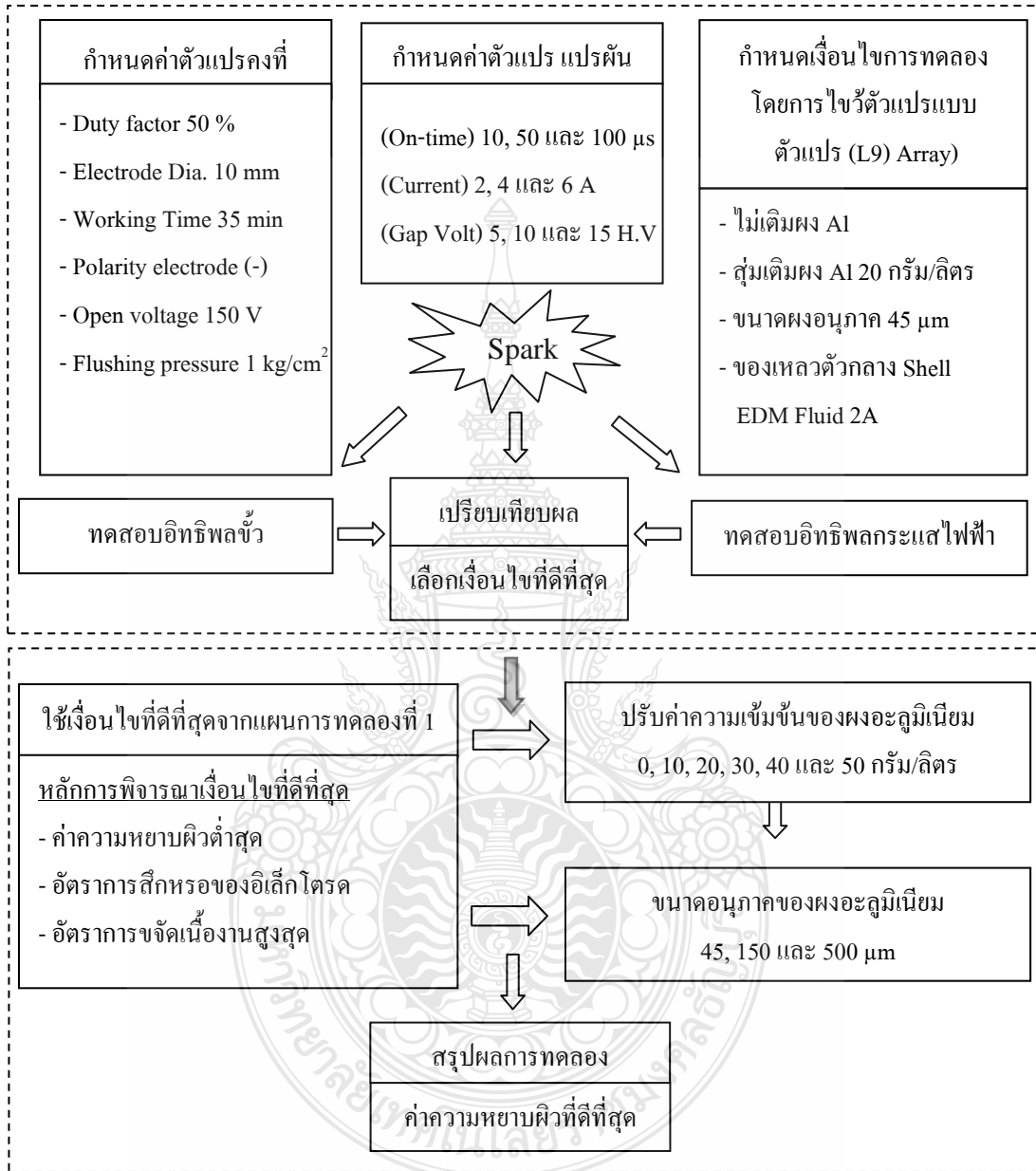
วิธีการดำเนินงาน

3.1 วิธีการดำเนินงาน

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถทราบได้ว่ากระบวนการแปรรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 โดยเครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้านั้น ทำให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็น อัตราการจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และคุณภาพผิวงานที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ทั้งนี้ประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมและปรับปรุงได้ด้วยการกำหนดค่าปัจจัยต่างๆที่เหมาะสม เช่น วัสดุอิเล็กโทรด เวลาเปิด เวลาปิด ความต่างศักย์วงจรเปิด กระแสไฟฟ้า และขั้วประจุอิเล็กโทรด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่ากระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดจากการควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาความร้อนซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก แต่พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูป ได้แก่พารามิเตอร์ เวลาเปิด (On-time), เวลาปิด (Off-time), กระแสไฟฟ้า (Current), แรงดันไฟฟ้า (Voltage) [22] เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสถานะการทำงานในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาคูณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการจัดเนื้องานและ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ซึ่งนิยมใช้สำหรับผลิตแม่พิมพ์และเครื่องมือตัด วัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นวัสดุทองแดง การวางแผนและกำหนดขั้นตอนการดำเนินการจะเป็นไปตามความยากง่ายในแต่ละขั้นตอน งานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาเก็บข้อมูลในการวิจัย และทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการงานวิจัย

3.2.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร โดยกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึง (Turning) แล้วเจียรในผิวราบ (Horizontal surface grinding machine) ให้ได้ขนาดตามต้องการดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

3.2.2 เตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์

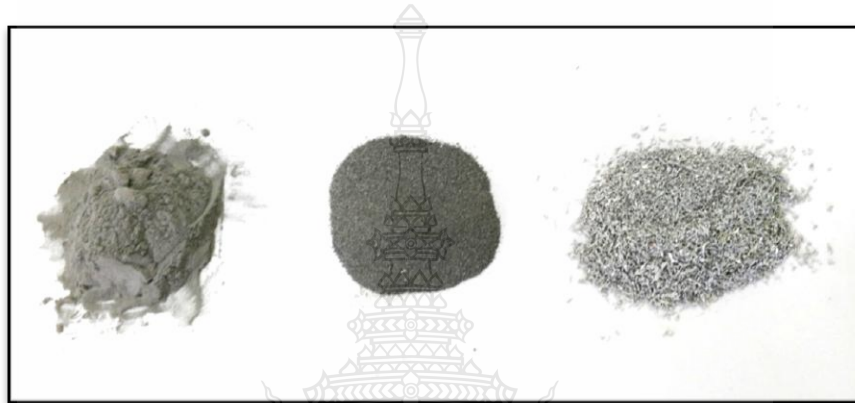
การเตรียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ ทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกลึง (Turning) เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์มีความหยาบผิวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พารามิเตอร์ในการกลึงเป็นค่าเดียวกันทุกชนิดอิเล็กทรอนิกส์) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลอง

3.2.3 เตรียมวัสดุผงอะลูมิเนียมตามขนาดที่กำหนดไว้

การเตรียมวัสดุผงอะลูมิเนียมในงานวิจัยจะเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดความแตกต่างของอนุภาค 3 ระดับ คือ ขนาดอนุภาค 45, 150 และ 500 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดผงอนุภาคที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ทั้งนี้ผงอะลูมิเนียมในขนาดต่างๆ จะต้องมีความสม่ำเสมอในด้านของรูปร่าง เพื่อให้กระบวนการสปาร์คมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังรูปที่ 3.4



(ก) 45 ไมโครเมตร (ข) 150 ไมโครเมตร (ค) 500 ไมโครเมตร

รูปที่ 3.4 วัสดุผงอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง

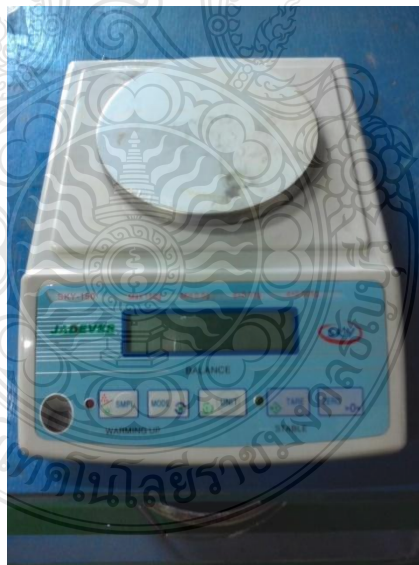
3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องมือกลแบบควบคุมด้วยตัวเลข Aristech รุ่น 3D-CNC EDM สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1 ถึง 60 แอมแปร์, ปรับค่าความต่างศักย์วงจรเปิดได้ 150 โวลต์ ปรับค่าเวลาเปิดและเวลาปิด ได้ตั้งแต่ 2 ถึง 512 μs ซึ่งเป็นเทคโนโลยีจากประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 3.5



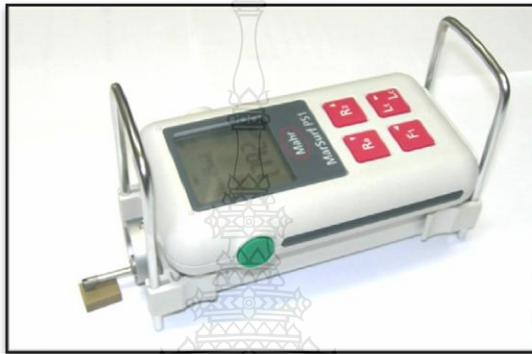
รูปที่ 3.5 เครื่องกัดเซาะ โลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง Aristech รุ่น 3D-CNC EDM

2) เครื่องชั่งน้ำหนัก สำหรับชั่งน้ำหนักผงอะลูมิเนียมเพื่อเติมในสารไดอิเล็กตริก
พิสัย 0.001-320 กรัม ยี่ห้อ JADEVER รุ่น Sky 150 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ JADEVER รุ่น Sky 150

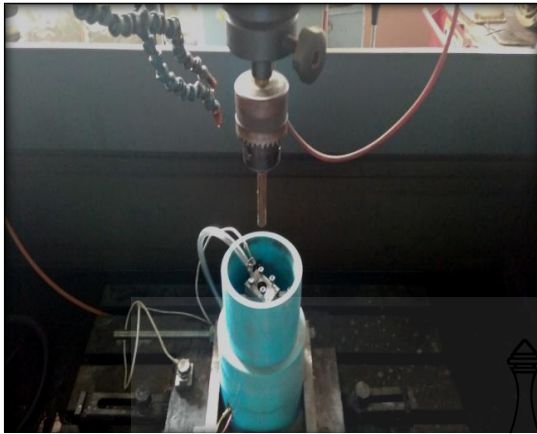
3) เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานแบบหัวลาก โดยใช้เข็มลากเคลื่อนที่เหนือผิวหน้าชิ้นงาน โดยเข็มลากจะยึดกับก้านลื่นไถลอันเนื่องจากความหยาบของผิวชิ้นงาน หลังจากทำการสปาร์กแล้ว จะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น SurfTest PS1 เป็นเทคโนโลยีจากประเทศเยอรมัน แสดงในรูปที่ 3.7 ด้วยฟังก์ชัน Ra โดยใช้ระยะ Cut Off 5 x 0.8 มิลลิเมตร ทำการวัดจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น SurfTest PS1

3.2.5 การออกแบบระบบไหลวนของสารไดอิเล็กตริก

การออกแบบระบบไหลวนของสารไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งที่ผู้ทำการวิจัยจะต้องคำนึงมากที่สุดอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพผิวงานโดยเติมผงโลหะลงในสารไดอิเล็กตริก สิ่งสำคัญคือการทำให้ผงโลหะละลายรวมตัวกับสารไดอิเล็กตริกจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันให้ได้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบระบบไหลวนสารไดอิเล็กตริกที่ผสมผงอะลูมิเนียม โดยใช้แนวคิดให้ชิ้นงานลอยอยู่ใจกลางถังน้ำมัน แล้วใช้การฉีดสารไดอิเล็กตริกผสมผงอะลูมิเนียมจากด้านข้างให้ไหลผ่านหน้าชิ้นงาน จากนั้นใช้ระบบสูบน้ำมันแบบไหลวนตลอดเวลา โดยตัวถังถังน้ำมันจะมีลักษณะทรงกรวยเพื่อป้องกันไม่ให้ผงอะลูมิเนียมตกตะกอน หลักการออกแบบระบบไหลวนแสดงในรูปที่ 3.8



(ก) ตำแหน่งของอิลีคโตรด



(ข) ตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบ



(ค) ลักษณะการทดลอง

รูปที่ 3.8 ถึงระบบไหลวนสารไดอิเล็กตริก

3.3 การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหยาบผิว อัตราการจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิลีคโตรด โดยกำหนดปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50 % ทำการออกแบบการทดลองด้วยการไขว้ตัวแปร L9 array 3 ตัวแปร 3 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยแต่ละการทดลองแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty factor)

กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพโดยปรับเวลาปิด จากสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าปัจจัยประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรของการสปาร์ค

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}} \right) \times 100(\%) \quad (2.1)$$

ในกระบวนการทดลอง กำหนดให้ตัวแปรเวลาเปิดคงที่ 10, 50 และ 100 ไมโครวินาที แล้วทำการปรับค่าเวลาปิดให้แปรผันตามปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50 % ซึ่งตัวแปรคงที่อื่นๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรคงที่ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	ขั้วอิเล็กโตรด	+
2	ความต่างศักย์	150 โวลต์
3	ปัจจัยประสิทธิภาพ	50 %
4	เวลางาน	35 นาที
5	เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรด	10 มิลลิเมตร
6	แรงดันฉีดสารหล่อเย็นจากด้านข้าง	1 kg/cm ²
7	ของเหลวตัวกลาง	Oil (Shell Fluid 2 A)

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรแปรผันที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์	รายละเอียด
1	กระแสไฟฟ้า (V)	2,4,6
2	เวลาเปิด (μs)	10,50,100
3	ช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน (H.V)	5,10,15

3.3.2 ตารางการออกแบบการทดลองแบบไขว้ตัวแปร L9 array

ทำการกำหนดตัวแปรที่จะใช้ในการทดลอง โดยการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด ในที่นี้พบว่า ตัวแปรที่มีผลมากที่สุด 3 อันดับ ได้แก่ ตัวแปรกระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงเลือกตัวแปรดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขในการทดลองแบบ 3 ระดับ 3 ตัวแปร ซึ่งนำหลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่เลือกใช้ 3 ระดับ 3 ตัวแปร

ตัวแปร	ระดับ		
	LV 1	LV 2	LV 3
On-time (μ s)	10	50	100
Current (A)	2	4	6
Gap voltage(H.V)	5	10	15

หลังจากกำหนดค่าตัวแปรในแต่ละระดับแล้วจึงกำหนดแผนผังการทดลอง โดยแผนผังการทดลองที่เลือกใช้นั้นใช้หลักการออกแบบกระบวนการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ซึ่งเป็นตารางมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แผนผังการทดลองทั้งหมดของการทดลองโดยวิธีทากูชิ

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด
L4	3	2
L8	7	2
L12	11	2
L16	15	2
L32	31	2
L9	4	3
L18	1,7	2,3
L27	13	3

ตารางที่ 3.4 แผนผังการทดลองทั้งหมดของการทดลองโดยวิธีทากูชิ (ต่อ)

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด
L16	5	4
L32	1,9	2,4
L64	21	4

จากตารางข้างต้นจำนวนตัวเลขของ L หมายถึงจำนวนครั้งของการทดลองเช่น L9 จะมีการทดลอง 9 ครั้ง หรือ L27 จะมีการทดลอง 27 ครั้ง เป็นต้น จำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมาก ความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การทดลองนั้นยังมีความถูกต้อง โดยปกติแล้วปัจจัยในการเลือกขึ้นอยู่กับ

- 1) จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
- 2) จำนวนระดับของตัวแปรที่ต้องการ
- 3) ความต้องการของผู้ทดลอง, งบประมาณและ ข้อจำกัดในด้านอื่นๆดังนั้น

ผู้วิจัยจึงเลือกแผนผังการทดลองที่มีจำนวนการทดลองมากที่สุด และเลือกแผนผังที่ใช้งบประมาณ และข้อจำกัดที่ต่ำที่สุด ในตัวอย่าง มีตัวแปรอยู่ 3 ตัวแปร มีระดับของตัวแปร 3 ระดับ จากตารางสามารถเลือกใช้ L9, L18, L27, L16, L32 และ L64ได้ ดังนั้นเลือกใช้แผนผังการทดลอง L9 (L9 Orthogonal array) ซึ่งแผนผังของการทดลองแบบ L9 สำหรับ 3 ตัวแปร และ 3 ระดับ แสดงตามตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 แผนผังการทดลอง L9 Orthogonal array

การทดลองที่	ระดับของตัวแปร		
	เวลาเปิด	กระแสไฟฟ้า	ช่องว่าง (gap)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1

ตารางที่ 3.5 แผนผังการทดลอง L9 Orthogonal array (ต่อ)

การทดลองที่	ระดับของตัวแปร		
	เวลาเปิด	กระแสไฟฟ้า	ช่องว่าง (gap)
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

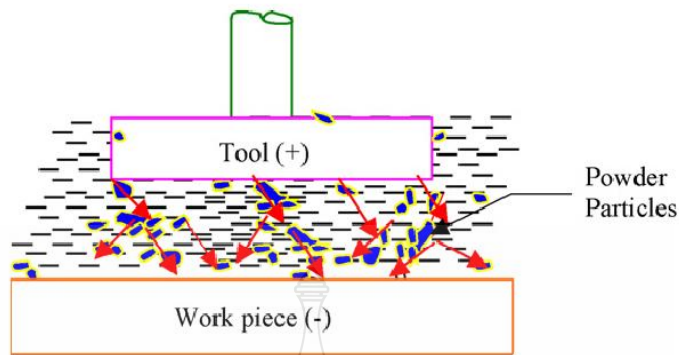
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบไขว้ตัวแปร ทฤษฎี L9

การทดลองที่	เวลาเปิด (μ s)		กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		ช่องว่างอิเล็กโตรด กับชิ้นงาน (H.V)	
	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า
1	1	10	1	2	1	5
2	1	10	2	4	2	10
3	1	10	3	6	3	15
4	2	50	1	2	2	10
5	2	50	2	4	3	15
6	2	50	3	6	1	5
7	3	100	1	2	3	15
8	3	100	2	4	1	5
9	3	100	3	6	2	10

3.4 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองใช้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น 3D-CNC EDM ดังรูปที่ 3.5 ทำการทดลองกัดเซาะชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ด้วยพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1, ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.6 ตามลำดับ โดยในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลอง ดังนี้

3.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 Powder Mixed EDM [6]

1) บันทึกค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

สภาพพื้นผิวที่เกิดจากการสปาร์คจะเป็นแอ่งเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งหลังจากทำการสปาร์คแล้วจะนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Marh รุ่น PS1 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ด้วยฟังก์ชัน Ra โดยใช้ระยะ Cut Off 5 x 0.8 มิลลิเมตร ทำการวัดจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยแล้วจึงคำนวณค่าเฉลี่ยและบันทึกผล



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความหยาบผิว Marh รุ่น PS1

2) บันทึกค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR)

บันทึกอัตราการขจัดเนื้องาน จากสมการที่ 2.4 ซึ่งเกิดจากปริมาตรของเนื้องานที่หายไปต่อหน่วยเวลาที่ใช้

$$MRR = \frac{\text{ปริมาตรของเนื้องานที่หายไป (มม}^3\text{)}}{\text{เวลาที่ใช้ (นาที)}} \quad (2.4)$$

ในการทดลองนี้จึงต้องทำการเก็บค่าข้อมูลความลึกของชิ้นงานที่ถูกสปาร์ค ด้วยไมโครมิเตอร์ค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร (ความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวงานเท่ากับความหนาชิ้นงานก่อนสปาร์คลบด้วยความหนาชิ้นงานหลังสปาร์ค) พร้อมทั้งบันทึกเวลารวมในการสปาร์ค (Machining Time) จากหน้าจอแสดงผล แล้วจึงนำค่ามาคำนวณตามสมการ 2.4 จะได้เป็นค่าอัตราการขจัดเนื้องาน

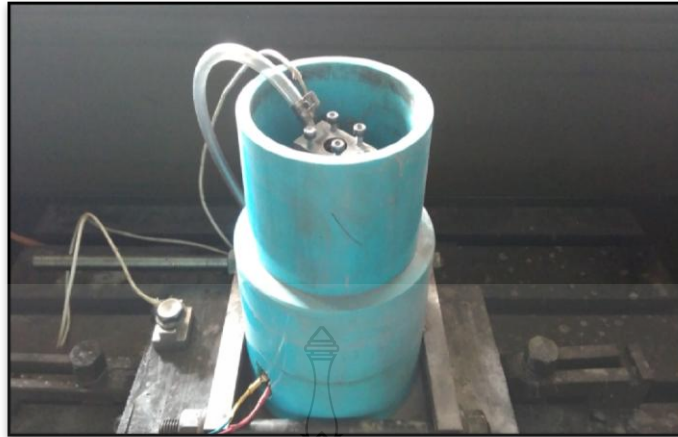
3) บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอเล็กโตรด (EWR)

บันทึกค่าอัตราการสึกหรอของอเล็กโตรด จากสมการที่ 2.5 เป็นการวัดการสึกของขั้วอเล็กโตรดต่อการความลึกของเนื้องานที่ถูกขจัดออก

$$\text{อัตราการสึกหรอของอเล็กโตรด (EWR)} = \frac{\text{ปริมาตรอเล็กโตรดที่หายไป} \times 100}{\text{ปริมาตรของเนื้องานที่หายไป}} \quad (2.5)$$

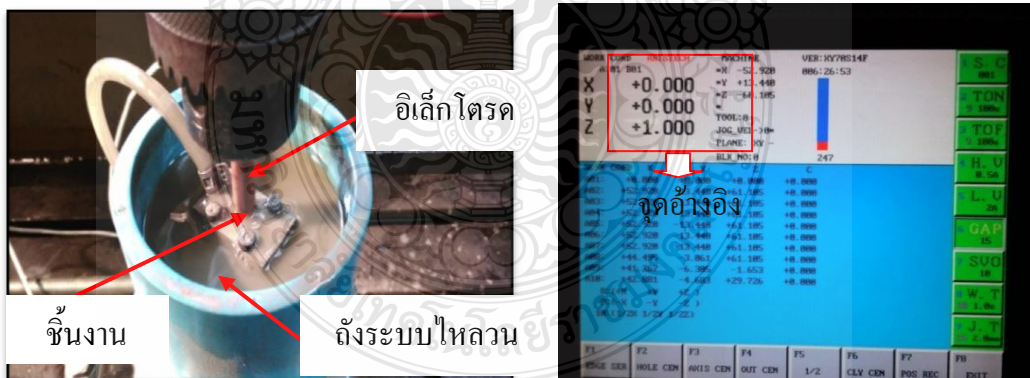
ในที่นี้จะวัดเป็นระยะสึกหรอโดยใช้การอ้างอิงจากเครื่อง เนื่องจากเครื่องเป็นระบบการสั่งการด้วย CNC จึงทำให้สามารถวัดระยะสึกของอเล็กโตรดได้ โดยมีขั้นตอนการวัดระยะสึกของอเล็กโตรดกระทำตามขั้นตอนดังนี้

1. คิดตั้งถังน้ำมันที่ออกแบบระบบไหลวนของสารไดอิเล็กทริกบนแท่นเครื่อง พร้อมกับนำชิ้นงานมาวางแล้วทำการยึดติดกับตัวถังเพื่อไม่ให้เกิดการขยับของชิ้นงานขณะปฏิบัติงาน ดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การจับยึดถังน้ำมันระบบไหลวนของสาร ไดอิเล็กทริกกับชิ้นงาน

2. ทำการสร้างจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอิเล็กโทรด โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานมีค่าเป็นจุดศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เมื่อสร้างจุดศูนย์แล้วจะยกอิเล็กโทรดจากผิวสัมผัสขึ้นมา 1 มิลลิเมตรเพื่อสร้างเป็นจุดอ้างอิงในการสปาร์ก (หากอิเล็กโทรดสัมผัสกับผิวงานจะทำให้ไม่สามารถสปาร์กเนื่องจากกระแสไหลครบวงจรจึงไม่สามารถสร้าง Gap ในการสปาร์กได้)

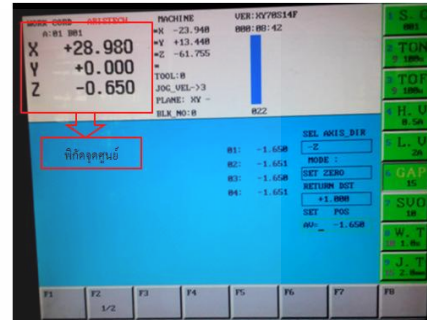
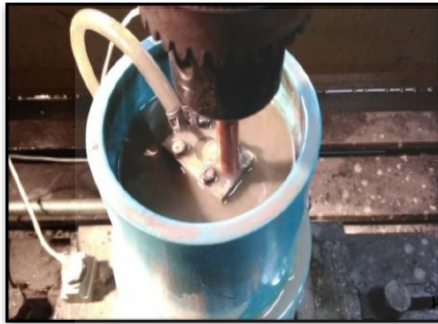


(ก) จุดอ้างอิงในการสปาร์ก

(ข) หน้าจอแสดงจุดอ้างอิงในการสปาร์ก

รูปที่ 3.12 จุดอ้างอิงผิวงานในการสปาร์ก

3. ทำการสร้างจุดอ้างอิงผิวอเล็กโตรดกับผิวชิ้นงานบริเวณที่ไม่ได้ถูกสปาร์ก โดยทำการบันทึกค่าอ้างอิงทั้ง แกน X แกน Y และแกน Z ซึ่งนั่นหมายความว่าระยะลึกของ อเล็กโตรดก่อนการสปาร์กเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้พิกัดค่าศูนย์ของอเล็กโตรดจากหน้าจอ ดังแสดง ในรูปที่ 3.13

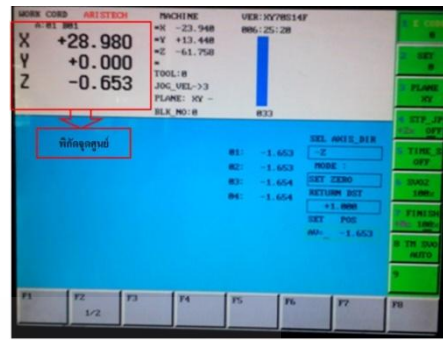


(ก) สร้างจุดอ้างอิงผิวอเล็กโตรดกับผิวชิ้นงาน (ข) พิกัดแสดงค่าศูนย์ของอเล็กโตรดจากหน้าจอ รูปที่ 3.13 พิกัดจุดศูนย์ของอเล็กโตรดก่อนการสปาร์กเพื่อเป็นจุดอ้างอิงการสึกหรอของอเล็กโตรด

4. ย้ายตำแหน่งอเล็กโตรดมายังจุดอ้างอิงระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวอเล็กโตรด ที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วทำการสปาร์กชิ้นงานดังรูปที่ 3.14 จนเสร็จสิ้นกระบวนการ จึงย้ายตำแหน่งของอเล็กโตรดไปยังจุดพิกัดศูนย์ของอเล็กโตรดในบริเวณที่ไม่เกิดการสปาร์ก โดยอ่านค่าจากหน้าจอที่หาไว้ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งอเล็กโตรดจะมาอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมก่อนการสปาร์ก แล้วทำการหาจุดอ้างอิงใหม่ เพราะฉะนั้นค่าที่อ่านได้จากหน้าจอจะเท่ากับระยะลึกของอเล็กโตรดดังรูปที่ 3.15 โดยหากค่าที่อ่านได้บนหน้าจอเป็นบวก แสดงว่าอเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่หากค่าที่อ่านได้จากหน้าจอเป็นลบแสดงว่าอเล็กโตรดสั้นลง



รูปที่ 3.14 การสปาร์กชิ้นงาน SKD 11 ด้วยวิธี PMEDM



(ก) พิกัดแสดงค่าศูนย์กลางของอิเล็กโตรด

(ข) ค่าจากหน้าจอที่พิกัดจุดศูนย์กลางหลังการสปาร์ค

รูปที่ 3.15 ค่าการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่อ่านจากหน้าจอที่พิกัดจุดศูนย์กลางหลังการสปาร์ค



รูปที่ 3.16 ทำการชั่งน้ำหนักของผงอะลูมิเนียมก่อนผสมลงในสารไดอิเล็กตริก

5. เมื่อทดสอบอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวแล้ว หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อความหยาบผิว โดยทำการสุมเติมผงอะลูมิเนียมที่ 20 กรัมต่อลิตร และเลือกใช้วิธีการทดลองเดียวกับการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว หรือในการทดลองเบื้องต้น

6. เมื่อทำการทดลองในขั้นตอนที่ 5 แล้ว ผู้วิจัยก็จะสามารถทราบได้ว่าผงอะลูมิเนียมที่เติมลงไปโดยสารไดอิเล็กตริกนั้น มีผลทำให้ค่าความหยาบผิวลดลงหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบค่าจากการทดลอง แสดงการวัดปริมาณผงอะลูมิเนียมก่อนผสมลงในสารไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 3.16

7. ทำการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าและขั้วอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบ โดย การเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก ควบคู่ไปกับการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า 5 ระดับ และขั้วอิเล็กโตรด ดังแสดงในตารางที่ 3.7

8. ทำการทดลองเปรียบเทียบอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่ให้ค่าความหยาบผิวดำสุด โดยการปรับเปลี่ยน 3 ระดับ คือ 45, 150 และ 500 ไมโครเมตร หลังจากนั้นเมื่อได้ขนาดผงที่ดีที่สุดแล้วจึงทำการปรับค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมในสารไดอิเล็กทริก 6 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.8

3.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโทรดและระดับของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวจีนงาน

ตารางที่ 3.7 การทดลองกระแสไฟฟ้า

พารามิเตอร์	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ขั้วอิเล็กโทรด	ค่าความหยาบผิว
เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวจีนงาน	1	+,-	-
	2	+,-	-
	4	+,-	-
	6	+,-	-
	8	+,-	-

3.4.3 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวจีนงาน

ตารางที่ 3.8 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียม 45, 150 และ 500 ไมโครเมตร

ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม 45,150 และ 500 ไมโครเมตร		
พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม (กรัม/ลิตร)	เวลาดำงาน (นาที)
เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวจีนงาน	0	35
	10	35
	20	35
	30	35
	40	35
	50	35

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

ผลการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยวิธีการเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก (PMEDM) โดยการกำหนดตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดมาพิจารณา ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดตัวแปรคงที่ ตัวแปรแปรผัน และค่าพารามิเตอร์อื่นๆเกี่ยวกับกระบวนการทำงานให้สอดคล้องกัน เพื่อให้ได้ผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ผลการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็นขั้นตอนของการทดสอบค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว หลังจากนั้นทำการทดสอบตัวแปรกระแสไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโตรด ความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมในสารไดอิเล็กตริกและขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม โดยผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลให้ค่าความหยาบผิวลดต่ำลง นอกจากนี้การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดด้วยวิธีการ SEM-EDS ภายหลังการสปาร์คยังถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการสรุปและยืนยันผล ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

4.1.1 ผลการทดลองอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ

การทดลองค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ ซึ่งใช้การออกแบบการทดลองลักษณะเดียวกับการออกแบบด้วยวิธีทากูชิ L9 โดยการเลือกตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสรุปได้ว่า ตัวแปรกระแสไฟฟ้า และเวลาเปิด ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด นอกจากนี้ตัวแปรที่ส่งผลลดลงมาคือช่องว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ก็จะถูกนำมาเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อได้ตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแล้ว ก็ทำการกำหนดระดับในการทดลอง ในที่นี้เลือกใช้ 3 ระดับ ทำให้ได้ผลสรุปการทดลองออกมาคือ L9 โดยเงื่อนไขการทดลองและผลการทดลองแสดงใน ตารางที่ 4.1, ตารางที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ

ตัวแปร	ระดับ		
	LV 1	LV 2	LV 3
On-time (μ s)	10	50	100
Current (A)	2	4	6
Gap voltage(H.V)	5	10	15

ตารางที่ 4.2 การทดลอง L9 โดยการศึกษความสัมพันธ์ของตัวแปร เวลาเปิด กระแสไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน โดยการแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

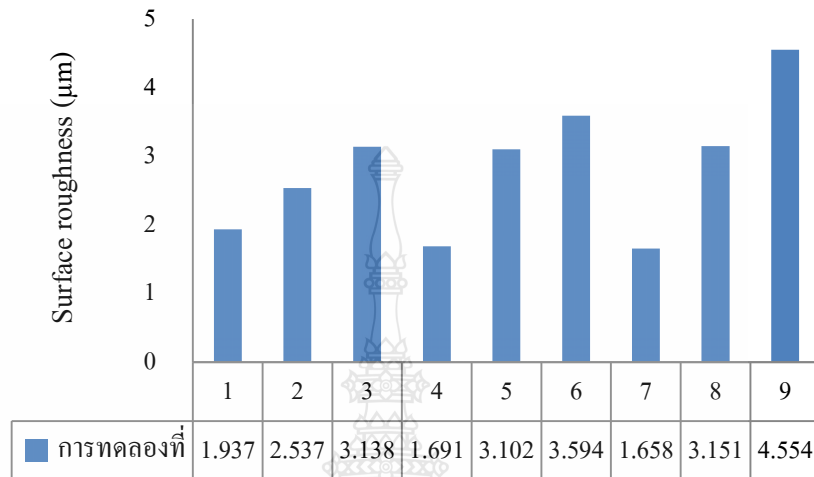
การทดลองที่	เวลาเปิด (μ s)		กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		ช่องว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน (H.V)	
	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า	ระดับ	ค่า
1	1	10	1	2	1	5
2	1	10	2	4	2	10
3	1	10	3	6	3	15
4	2	50	1	2	2	10
5	2	50	2	4	3	15
6	2	50	3	6	1	5
7	3	100	1	2	3	15
8	3	100	2	4	1	5
9	3	100	3	6	2	10

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก

Exp.	MRR(mm ³ /min)	EWR (%)	Ra (µm)
1	0.449	467	1.937
2	0.916	253.187	2.537
3	1.989	109.14	3.138
4	0.081	2.4	1.691
5	0.813	-25.14	3.102
6	5.579	-10.95	3.594
7	0.164	-43.84	1.658
8	1.403	-48.96	3.151
9	1.455	-14	4.554

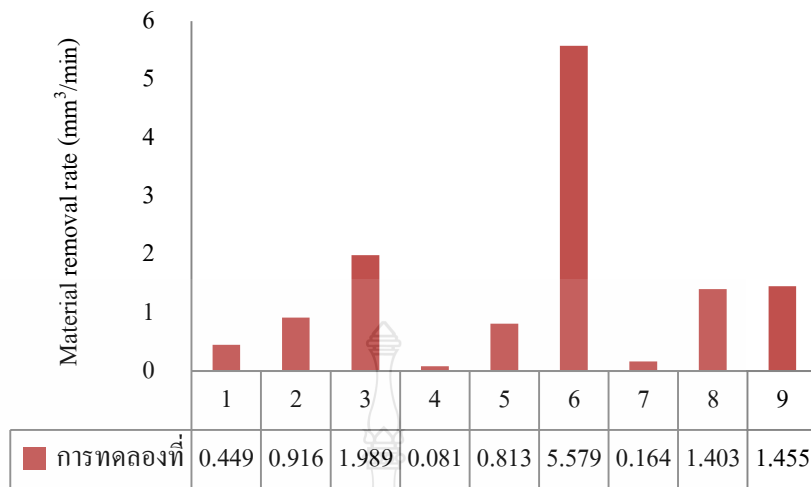
จากผลการทดลองการศึกษาค่าพารามิเตอร์โดยการปรับไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ ด้วยวิธีการทางทฤษฎี L9 พบว่า การทดลองที่ 7 ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำสุดที่ 1.658 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระดับค่าความหยาบผิวที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการทดลองที่ 7 โดยการปรับค่าเวลาเปิด 100 ไมโครวินาที เวลาปิด 100 ไมโครวินาที ซึ่งจะได้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ ที่ 50 % กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์แล้วอาจจะสรุปได้เบื้องต้นว่า กระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวดลดลงหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งหากปรับค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการทดลองพบว่า มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์เวลาเปิดก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากระยะการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ยาวนานส่งผลให้กระบวนการสปาร์คมีเสถียรภาพสูง หรือการสปาร์คที่สมบูรณ์แบบ ทำให้ค่าความหยาบผิว มีความสม่ำเสมอ แต่ในทางกลับกันเมื่อการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ยาวนานบวกกับการปล่อยกระแสไฟฟ้า ที่สูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้นเช่นกัน [1] ตัวแปรของระยะห่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ก็เช่นเดียวกัน เมื่อระยะห่างที่แคบลงการสปาร์คก็จะรุนแรงและมีความเสถียรมากขึ้น [2] เนื่องจากการปล่อยประจุไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าอัตราการขจัดเนื้องาน จะเพิ่มสูงขึ้น [1,2] และอาจจะส่งผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงาน ที่การทดลองต่างๆ ดังกราฟรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงานที่การทดลองต่างๆ

จากกระบวนการกัดเซาะ โลหะด้วยไฟฟ้านั้นผลที่ได้จากการทดลองพื้นฐาน โดยทั่วไปแล้วจะแสดงออกมาใน 3 ลักษณะนอกเหนือจากค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ผู้วิจัยให้ความสนใจ คือ อัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลสำคัญต่ออัตราการขจัดเนื้องาน มีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย แต่ปัจจัยที่มีผลสูงสุดคือกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการขจัดเนื้องานก็จะสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ปัจจัยของเวลาเปิดกับเวลาปิดจะต้องมีความสัมพันธ์กันเพื่อให้ช่วงเวลาของการปล่อยประจุไฟฟ้ามีระยะเวลาที่ยาวนานเพียงพอ อีกทั้งเวลาหยุดปล่อยประจุไฟฟ้ายังมีความสำคัญในขั้นตอนของการปล่อยให้ผิวงานหลุดออกไปแล้วเย็นตัวกลับมาอีกครั้ง (Recasting) เมื่อได้รับการหล่อเย็นจากสารไดอิเล็กตริก [2,9] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะกระทำเป็นวัฏจักรที่ต่อเนื่องกันไปจนจบกระบวนการ



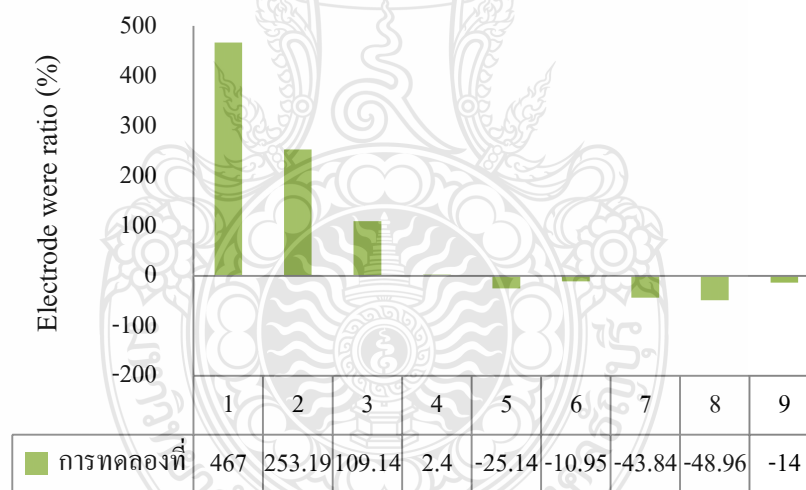
รูปที่ 4.2 ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่ได้จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9

จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9 พบว่า อัตราการขจัดเนื้องานต่ำจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่ออัตราการขจัดเนื้องานสูงค่าความหยาบผิวก็จะสูงขึ้นตาม เนื่องจากตัวแปรที่กล่าวไว้ข้างต้น แสดงค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่ได้จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9 ดังกราฟรูปที่ 4.2 สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะให้ความสำคัญกับค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเป็นสำคัญ อัตราการขจัดเนื้องานจึงเป็นผลที่ได้จากกระบวนการและถูกนำมาพิจารณาเป็นประเด็นถัดไป

นอกเหนือจากอัตราการขจัดเนื้องานแล้ว ผลที่ได้เป็นห่วงโซ่ต่อกันคืออัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดซึ่งได้จากการคำนวณในสมการที่ 2.5 ซึ่งโดยปกติแล้วอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วัสดุอิเล็กโตรดที่เหมาะสมกับชิ้นงาน เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งมากๆ เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ ไทเทเนียมหรือวัสดุกลุ่มแม่พิมพ์ เป็นต้น มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง ด้านทานการสึกหรอ การเลือกใช้วัสดุอิเล็กโตรดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีจุดหลอมเหลวปานกลาง จะช่วยให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดลดต่ำลงได้หรือแทบจะไม่เกิดการสึกหรอเลย ทองแดงจึงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาเป็นอิเล็กโตรดมากที่สุดเนื่องจากคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้า ซึ่งเช่นเดียวกับงานวิจัยฉบับนี้ที่นำเอาวัสดุทองแดงมาเป็นอิเล็กโตรดในการสปาร์คเหล็กกล้าเครื่องมือSKD 11 ซึ่งผลจากการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.3แสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย นอกจากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เนื่องจากในการทดลองดังกล่าวมีช่วงการปล่อยประจุไฟฟ้าและหยุดปล่อยประจุที่สั้นคือ 10 ไมโครวินาที ทำให้ช่วงเวลา

ดังกล่าวมีความร้อนสะสมในกระบวนการต่อเนื่องกัน ผนวกกับช่วงการรักษาเสถียรภาพเกิดขึ้นในเวลาทีรวดเร็วมาก ทำให้อิเล็กโตรดเกิดการสึกหรอได้ [23]

ในกรณีทีวัดค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดแล้วพบว่า อิเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้นอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สามารถอธิบายได้คือ อิเล็กโตรดมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำมากๆ หรือแทบจะไม่เกิดการสึกหรอเลย ระหว่างกระบวนการสปาร์คโดยมีสารของเหลวตัวกลางเป็นน้ำมันไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อได้รับความร้อนและผลของขั้วไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องก็จะเกิดการแตกตัวกลายเป็นคาร์บอน โดยที่ขั้วบวกจะวิ่งเข้าไปจับกับขั้วลบตามทฤษฎีของขั้วไฟฟ้า [1,2] ทำให้อิเล็กโตรดบางส่วนจะไปเคลือบผิวชิ้นงานและบางส่วนจะมากลือบผิวอิเล็กโตรด ทำให้เมื่อทำการวัดค่าออกมาแล้วพบว่าอิเล็กโตรดมีความยาวเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากการทดลองจึงเป็นไปในทิศทางลบ ทั้งนี้จากทฤษฎีของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด หากช่วงการสึกหรอตั้งแต่ 1-10 % ถือว่าอิเล็กโตรดไม่เกิดการสึกหรอ [1,2]



รูปที่ 4.3 ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดที่ได้จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์แบบ L9

4.1.2 ผลการทดลองสุ่มเติมผงอะลูมิเนียมเพื่อเปรียบค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้น

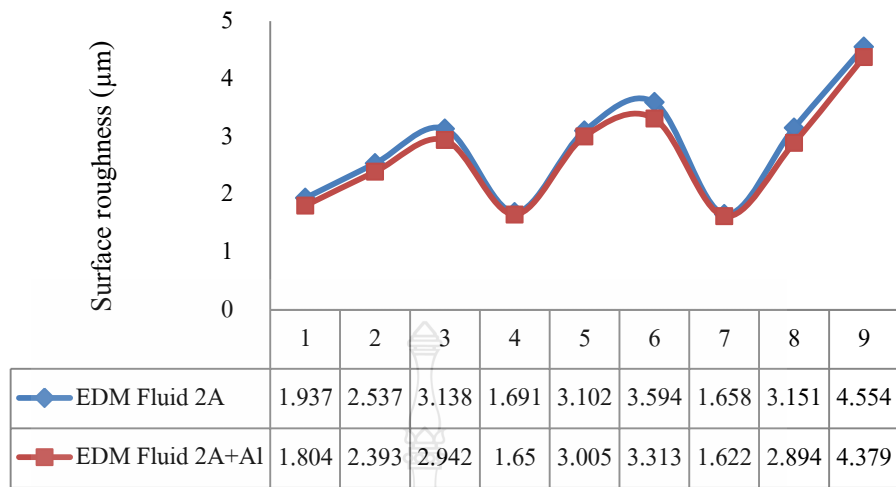
เมื่อสามารถทราบถึงค่าพารามิเตอร์ทีมีผลทำให้ความหยาบผิวลดลงแล้ว จากการทดลองในขั้นต้น ผู้วิจัยจึงทำการสุ่มเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก โดยเลือกเอาผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ค่าความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร และใช้วิธีการทดลอง

ไขว้ตัวแปรแบบ L9 เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของผงอะลูมิเนียม ในการทดลองนี้จะสามารถสรุปได้ว่าผงอะลูมิเนียมที่เติมลงในสารไดอิเล็กตริก สามารถส่งผลให้ค่าความหนาผิวลดลงได้ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยการสุมเติมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ลงในสารไดอิเล็กตริก

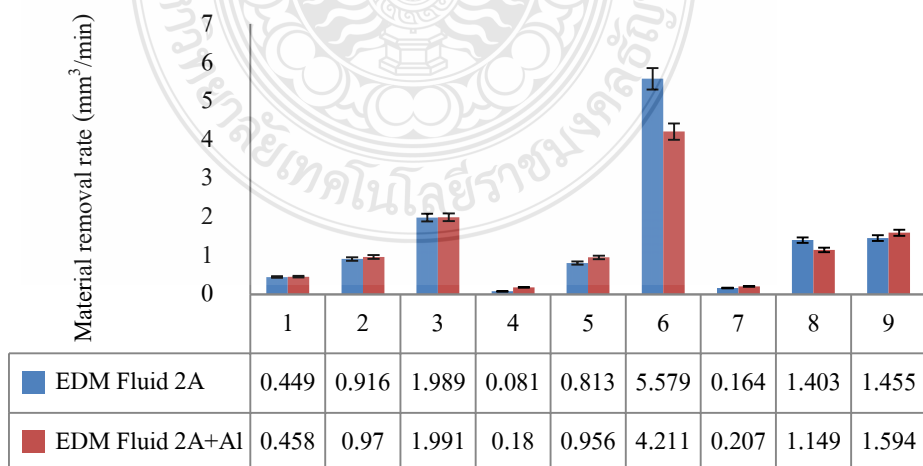
Exp.	MRR(mm ³ /min)	EWR (%)	Ra (μm)
1	0.458	-48	1.804
2	0.97	-7.17	2.393
3	1.991	-0.9	2.942
4	0.18	-10	1.65
5	0.956	-11.26	3.005
6	4.211	-2.5	3.313
7	0.207	-11.96	1.622
8	1.149	-17.19	2.894
9	1.594	-1.97	4.379

จากผลการทดลองสุมเติมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ลงในสารไดอิเล็กตริกพบว่า อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมสามารถทำให้ค่าความหนาผิวลดลงได้ ซึ่งในการทดลองที่ 7 คือ การปรับค่าเวลาเปิด 100 μs กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ให้ค่าความหนาผิวต่ำสุด 1.622 ไมโครเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การทดลองแบบไม่เติมผงอะลูมิเนียมแล้ว ค่าความหนาผิวจะลดลง 2.20 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ดังแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม

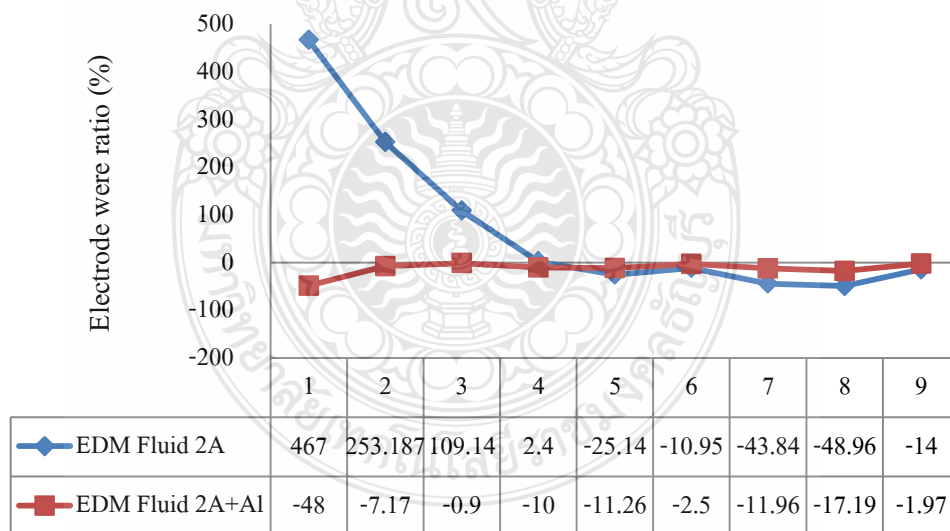
ค่าความหยาบผิวที่ลดลงจากกระบวนการเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก อาจเกิดจากสาเหตุของผงอะลูมิเนียมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการสปาร์ค ซึ่งมีอุณหภูมิสูงทำให้ผงอะลูมิเนียมบางส่วนหลอมละลายมารวมกับผิวชิ้นงานเมื่อได้รับการหล่อเย็นจากสารไดอิเล็กตริกเกิดเป็นชั้นหลอมใหม่ขึ้นกระทำเป็นวัฏจักรซ้ำๆกัน [23,24] นอกจากนี้ผงอะลูมิเนียมยังช่วยขัดขวางการปล่อยกระแสไฟฟ้าไม่ให้งมาสัมผัสผิวชิ้นงานโดยตรง อีกทั้งยังเป็นตัวกระจายกระแสไฟฟ้าให้งมากระทบผิวงานอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความหยาบผิวลดลง [24,25]



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม

อัตราการขจัดเนื้องานที่ได้ภายหลังการทดลองพบว่า มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก เนื่องจากผงอะลูมิเนียมเป็นตัวกระจายกระแสไฟฟ้าให้ลงมากกระทบผิวงานอย่างสม่ำเสมอ มากไปกว่านั้นผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปในสารไดอิเล็กตริก ยังมีบทบาทในการช่วยลดความเป็นฉนวนไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกและส่งผลไปยังการสร้างระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานให้มีความเสถียรยิ่งขึ้น ทำให้การสปาร์คในแต่ละวัฏจักรมีความสมบูรณ์ซึ่งนั่นหมายความว่าอัตราการขจัดเนื้องานก็จะสูงขึ้น แต่ทั้งนี้แล้วประสิทธิภาพสูงสุดที่เกิดขึ้นจะต้องขึ้นอยู่กับสถานะการทำงาน ปริมาณความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมและขนาดอนุภาคที่มีความเหมาะสมและสัมพันธ์กัน จึงจะได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แสดงการเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม ดังกราฟรูปที่ 4.5

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจากผลการทดลองพบว่า อิเล็กโตรดแทบจะไม่เกิดการสึกหรอเลยเมื่อมีผงอะลูมิเนียมผสมอยู่ในสารไดอิเล็กตริก มากไปกว่านั้นอิเล็กโตรดยังมีความยาวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการจับตัวของคาร์บอนและธาตุอะลูมิเนียมมาเคลือบหน้าผิวอิเล็กโตรด ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ผลการเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม แสดงดังกราฟรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดระหว่างการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม

4.2 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

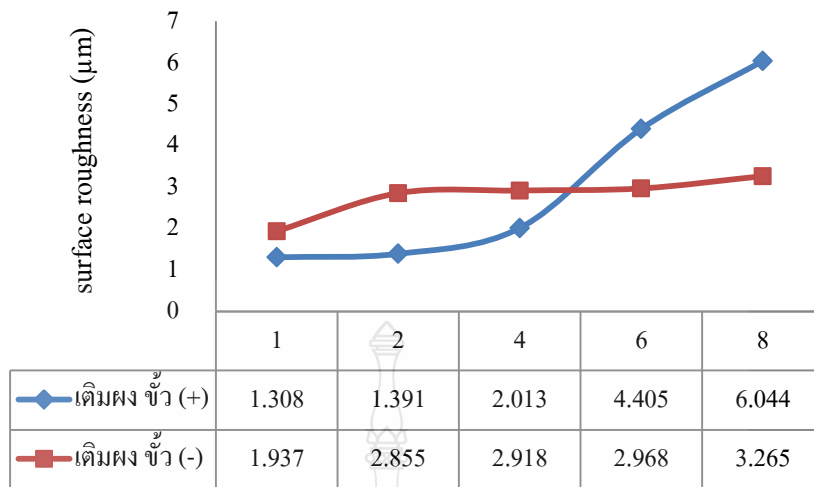
4.2.1 ขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

การทดลองปรับขั้วกระแสไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อต้นกำเนิดพลังงานความร้อนของกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า เพื่อเป็นการศึกษาขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมและส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุด จึงทำการทดสอบปรับขั้วอิเล็กโทรดให้เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยการใช้พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความหยาบผิวดำสุดจากการทดลองเบื้องต้น แล้วนำมาเปรียบเทียบผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

พารามิเตอร์	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความหยาบผิว ขั้วอิเล็กโทรด (+)	ความหยาบผิว ขั้วอิเล็กโทรด (-)
เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด จากการทดลองอิทธิพลของ ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า ความหยาบผิวชิ้นงาน	1	1.308	1.937
	2	1.391	2.855
	4	2.013	2.918
	6	4.405	2.968
	8	6.044	3.265

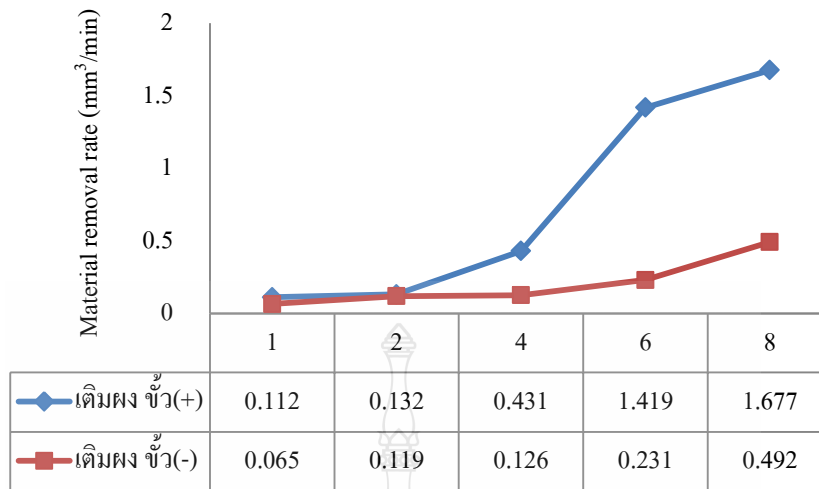
จากผลการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโทรดพบว่า ที่กระแสไฟฟ้าค่าความหยาบผิวของขั้วอิเล็กโทรดบวกจะให้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่าขั้วอิเล็กโทรดลบ แต่เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขั้วอิเล็กโทรดบวกจะมีค่าความหยาบผิวสูงขึ้นตามอย่างชัดเจน ต่างจากขั้วอิเล็กโทรดลบที่เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าค่าความหยาบผิวจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ในงานวิจัยฉบับนี้ เลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2, 4 และ 6 แอมแปร์ ทำให้ค่าความหยาบผิวโดยรวมมีค่าที่ดีกว่าเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดบวก แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของขั้วอิเล็กโทรดบวกและลบ ดังกราฟรูปที่ 4.7



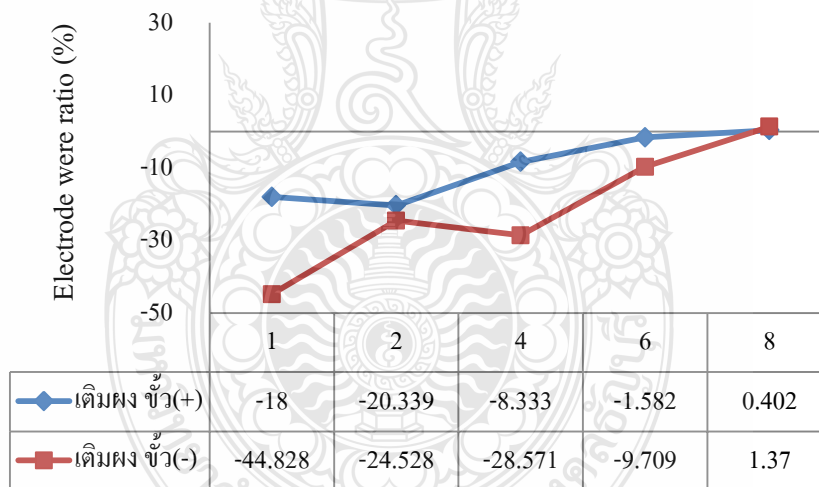
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของขี้วูล็กโตรคบวกและลบ

ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร

โดยปกติแล้วในกระบวนการกัดเซาะ โลหะด้วยไฟฟ้าจะนิยมใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงในการสปาร์คเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยเลือกใช้ขี้วูล็กโตรคบวก เนื่องจากจะให้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่าขี้วูลบ ทั้งนี้ความแตกต่างระหว่างขี้ววกและขี้วูลบในกระบวนการสปาร์ควัสดุที่เป็นเหล็กกล้า อิเล็กโทรดที่เป็นขี้ววกจะทำให้เกิดพลังงานความร้อน 30 เปอร์เซ็นต์ที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการซึมลึกของพลังงานความร้อนน้อยแต่จะเกิดในวงกว้าง จึงทำให้เกิดบริเวณการหลอมละลายของผิวงานเป็นบริเวณวงกว้าง เมื่อสารไดอิเล็กทริกขจัดเศษจึงเกิดการสึกกร่อนของผิวงานมาก [26] แต่หากขี้วูล็กโตรคเป็นลบจะทำให้เกิดพลังงานความร้อน 70 เปอร์เซ็นต์ที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการซึมลึกของพลังงานความร้อนมากแต่จะเกิดขึ้นในวงแคบ ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของผิวงานน้อยแต่จะลึกลงในผิวงานเมื่อสารไดอิเล็กทริกขจัดเศษจึงเกิดการสึกกร่อนของผิวงานต่ำ [15] ดังแสดงดังกราฟรูปที่ 4.8 ทั้งนี้สาเหตุที่พลังงานความร้อนที่ขี้ววกมากกว่าขี้วูลบแต่อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเกิดขึ้นในปริมาณที่ต่ำหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย เนื่องจากการแตกตัวของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นไฮโดรคาร์บอนวิ่งมาจับกับผิวอิเล็กโทรดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดขี้ววกและขี้วูลบ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าอัตราการขจัดเนื้องานขั้วอิเล็กโตรดบวกและลบ
ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดขั้วบวกและลบ
ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร

4.2.2 ระดับของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

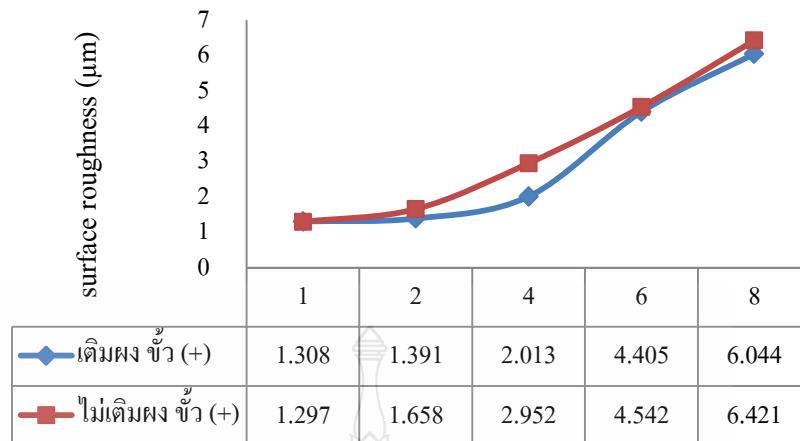
การทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อค่าความหยาบผิว อัตราการจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ในกระบวนการกัดผิวละเอียด (Super finishing) ด้วยเครื่องอีดีเอ็มจะใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำมาก ๆ ตั้งแต่ 0.5 – 2 แอมแปร์ เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด ในงานวิจัยฉบับนี้ จึงทำการทดสอบกระแสไฟฟ้า 5 ระดับคือ 1, 2, 4, 6 และ 8 แอมแปร์ ผลการทดลองในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองระดับของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

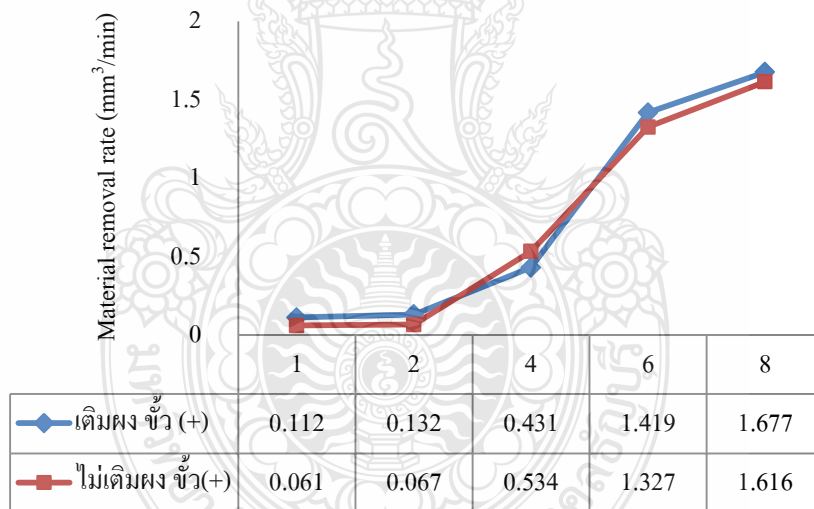
พารามิเตอร์	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความหยาบผิว ขั้ว (+) เต็มผง	ความหยาบผิว ขั้ว (+) ไม่เต็มผง
เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อ ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน	1	1.308	1.297
	2	1.391	1.658
	4	2.013	2.952
	6	4.405	4.542
	8	6.044	6.421

ผลการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าพบว่า กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความหยาบผิวที่เพิ่มสูงขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะส่งพลังงานความร้อนมายังผิวงานเพื่อให้เกิดการจัดเนื้องาน หากกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพลังงานความร้อนจะส่งผลให้ความรุนแรงในการสปาร์คเพิ่มสูงขึ้นตาม ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าความหยาบผิวชิ้นงานก็จะสูงขึ้นตามกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับอัตราการจัดเนื้องานที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้า

ผงอะลูมิเนียมที่เต็มลงไปในสารไดอิเล็กตริกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถช่วยลดค่าความหยาบผิวลงได้ และสามารถช่วยเพิ่มอัตราการจัดเนื้องานได้เล็กน้อย ดังแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของขั้วอิเล็กโทรดบวกลบ ดังกราฟรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ

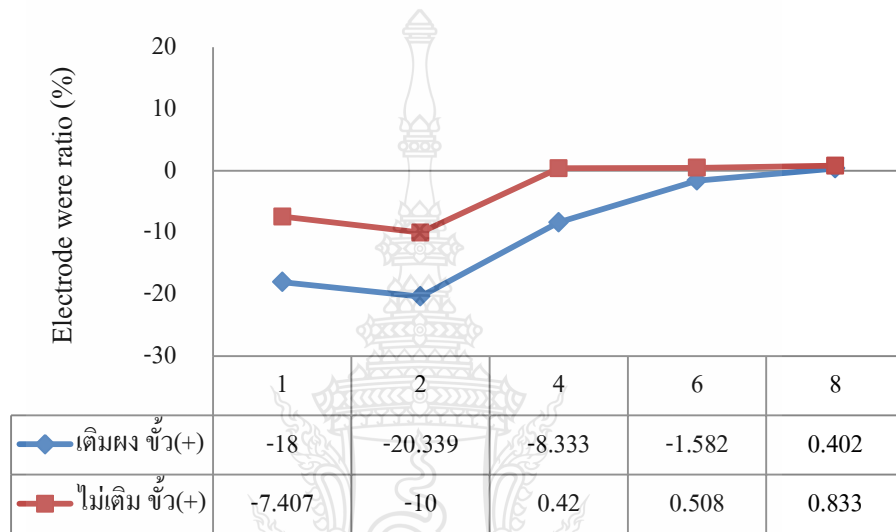


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของกระแสไฟฟ้าโดยการเติมผงอะลูมิเนียม ขนาดอนุภาคผง 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตรกับการไม่เติมผงอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการขจัดเนื้องานของขี้วัวเล็ก โตรคบวกกับวิธีการเติมผง และไม่เติมผงอะลูมิเนียม

จากการทดลองการปรับค่ากระแสไฟฟ้า จะพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากพลังงานความร้อนทำให้อิเล็กโทรดเกิดการหลอมละลาย แต่สารไฮโดรคาร์บอนและอนุภาคของผงอะลูมิเนียมบางส่วนเข้ามาเคลือบผิวหน้าอิเล็กโทรดไว้ทำให้ค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเป็นไปในปริมาณต่ำ ดังแสดงกราฟรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดขี้วกับวิธีการเติมผงและไม่เติมผงอะลูมิเนียม

4.3 ผลการทดลองประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

4.3.1 ผลการทดลองขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

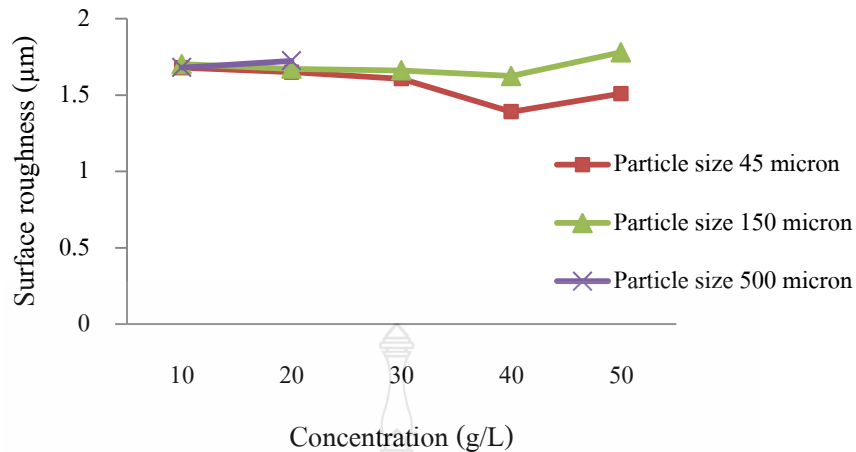
ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่เติมลงในสารไดอิเล็กตริกผนวกกับความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะส่งผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน เนื่องจากประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ในช่วงความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ผู้วิจัยเลือกใช้ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมใน 3 ระดับคือ 45, 150 และ 500 ไมโครเมตร ปรับค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมในสารไดอิเล็กตริก 5 ระดับคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม (กรัม/ลิตร)	ความหยาบผิว ขนาดผง 45 (ไมโครเมตร)	ความหยาบผิว ขนาดผง 150 (ไมโครเมตร)	ความหยาบผิว ขนาดผง 500 (ไมโครเมตร)
เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน	10	1.679	1.703	1.681
	20	1.622	1.672	1.725
	30	1.607	1.662	***
	40	1.391	1.625	***
	50	1.510	2.176	***

ผลการทดลองพบว่า ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่ 45 ไมโครเมตรให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.391 ไมโครเมตร ปริมาณความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V และขั้วอิเล็กโตรดบวก ทั้งนี้จากการทดลองประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานสามารถสรุปได้ว่า ผงอะลูมิเนียมที่เติมลงไปในการไดอิเล็กตริกช่วยให้ค่าความหยาบผิวลดลงได้ 16.10 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ แสดงการเปรียบเทียบ ค่าความหยาบผิวของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคผงต่างกัน 3 ระดับ ค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม 5 ระดับ ดังกราฟรูปที่ 4.13

*** หมายเหตุ ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียม 500 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ขึ้นไปไม่สามารถอยู่ในสถานะที่ทำการทดลองได้ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคและขนาดของผงมีความโตเกินกว่าที่จะสามารถเข้าไปในช่องว่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงานได้ ซึ่งทำให้ผงอะลูมิเนียมเข้าไปขัดขวางระบบไหลวนของสารไดอิเล็กตริกจนไม่สามารถปฏิบัติงานได้



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ระดับ
ค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียม 5 ระดับ

4.4 ผลการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังกระบวนการ EDM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS)

กระบวนการตรวจสอบพื้นผิวหลังกระบวนการอีดีเอ็มโดยทั่วไปจะนิยมใช้การถ่ายภาพเพื่อเป็นการยืนยันผลหรือหาข้อสรุปเกี่ยวกับผลการทดลอง เนื่องจากสามารถแสดงให้เห็นถึงร่องรอยของการกัดเซาะบนผิวงาน ลักษณะของการกัดเซาะ ความรุนแรงของการกัดเซาะตลอดจนยังสามารถแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเกี่ยวกับรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์อย่างแพร่หลายในงานวิจัย นอกจากนี้แล้วกระบวนการตรวจสอบปริมาณธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดด้วยการเอ็กซ์เรย์ (EDS) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ควบคู่กัน งานวิจัยฉบับนี้จึงนำเอการตรวจสอบทั้ง 2 วิธีมาใช้ในการวิเคราะห์ผลรวมกัน เพื่อตรวจสอบถึงสาเหตุของการลดลงของค่าความหยาบผิวชิ้นงานอีกริธีหนึ่ง และหาข้อสรุปเกี่ยวกับธาตุอะลูมิเนียมที่เคลือบบนผิวชิ้นงานว่าเกิดขึ้นในปริมาณมากน้อยเพียงใด ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

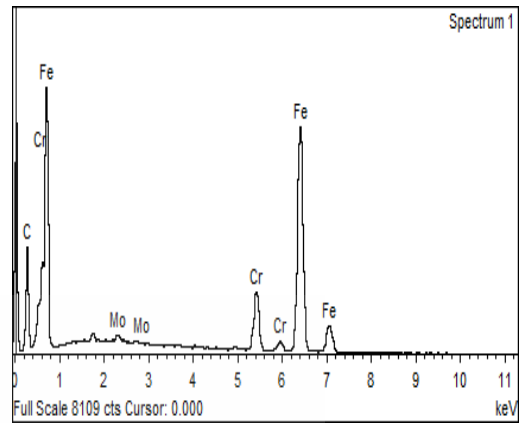
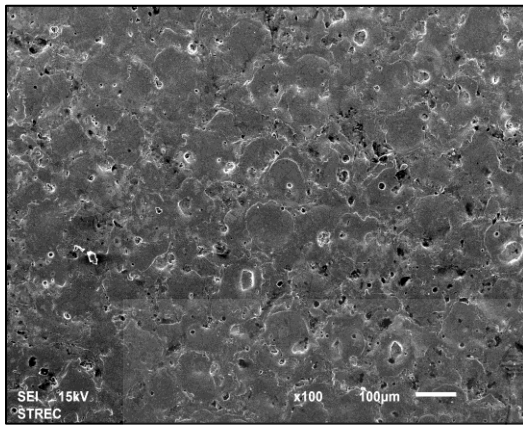
4.4.1 ผลการตรวจสอบการเปรียบเทียบพื้นผิวชิ้นงานระหว่างก่อนการเติมผงกับหลังเติมผงอะลูมิเนียม

ผลจากการตรวจหาปริมาณธาตุบนผิวชิ้นงานด้วย EDS พบว่า พื้นผิวชิ้นงานอีดีเอ็มก่อนการเติมผงอะลูมิเนียมไม่มีธาตุอะลูมิเนียมผสมอยู่บนผิวงาน มีเพียงแต่ธาตุพื้นฐานที่เป็น

ส่วนประกอบของวัสดุ SKD 11จากการทดลองนี้ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.658 ไมโครเมตร เมื่อทำการเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ลงไปในของเหลว ไดอเล็กทริก ผลปรากฏว่า ผงอะลูมิเนียมสามารถลงไปสร้างชั้นเคลือบบนผิวงานได้ และยังช่วยให้ผิวงานมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ปริมาณธาตุอะลูมิเนียมที่ตรวจพบบนผิวชิ้นงานคิดเป็น 1.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการทดลองดังกล่าวสามารถวัดค่าความหยาบผิวได้ 1.391 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองโดยไม่เติมผง ค่าความหยาบผิวลดลงคิดเป็น 16.10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งธาตุต่างๆ บนผิวชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.8 และแสดงลักษณะคุณภาพผิวงานที่ได้จากการตรวจสอบด้วย SEM บนผิวชิ้นงานก่อนและหลังการเติมผงอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบพื้นผิวชิ้นงานระหว่างก่อนการเติมผงกับหลังเติมผงอะลูมิเนียม

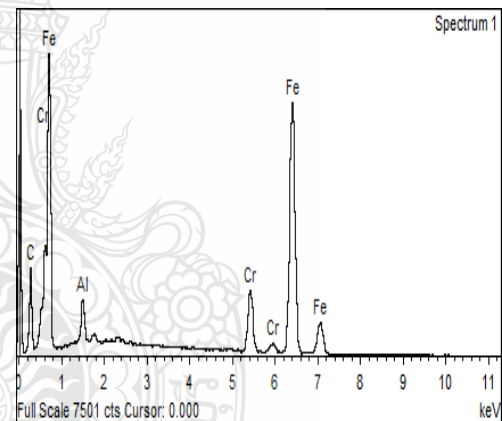
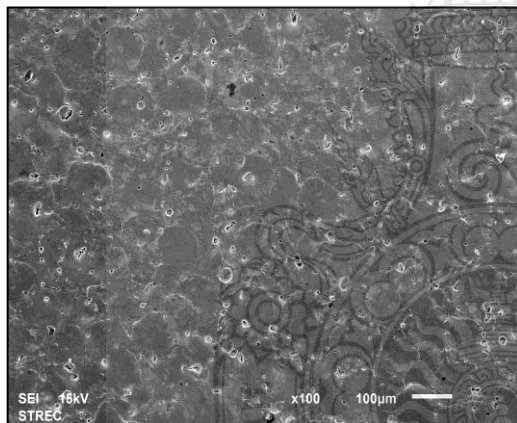
ธาตุผสม	ปริมาณธาตุบนพื้นผิวชิ้นงาน (% wt)	
	ก่อนเติมผง	หลังเติมผงขนาด 45 ไมโครเมตร 40 กรัมต่อลิตร
C	18.15	23.69
Fe	70.35	65.28
Cr	9.55	8.57
Mo	0.86	-
Al	-	1.95
other	1.09	0.51
รวม (%)	100	100



(ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กราฟปริมาณธาตุบนผิวงานด้วยวิธี EDS

รูปที่ 4.14 ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานก่อนการเติมผงอะลูมิเนียม
ที่ค่าความหยาบผิว 1.658 ไมโครเมตร



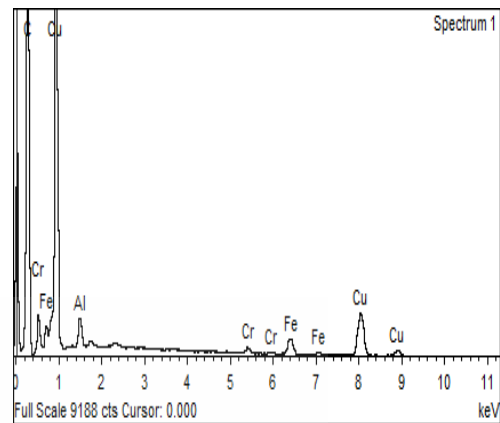
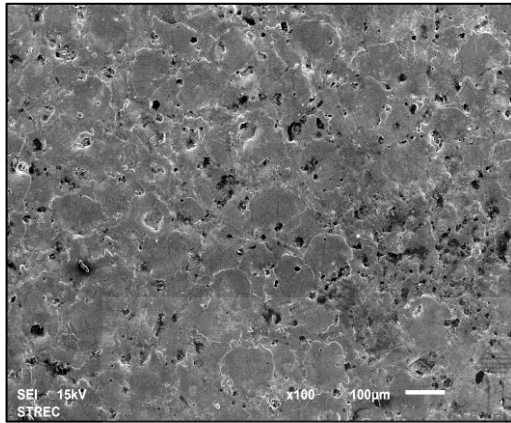
(ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กราฟปริมาณธาตุบนผิวงานด้วยวิธี EDS

รูปที่ 4.15 ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิว 1.391 ไมโครเมตร

ภายหลังการเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร

จากการตรวจสอบผิวชิ้นงานด้วยวิธีการ SEM และ EDS สามารถสรุปได้ว่า
ผงอะลูมิเนียมสามารถสร้างชั้นเคลือบบนผิวงานวัสดุ SKD11 ได้ ซึ่งทำให้ค่าความหยาบผิวลดลง



(ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กราฟปริมาณธาตุบนผิวงานด้วยวิธี EDS

รูปที่ 4.16 ภาพการตรวจสอบผิวชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิว 1.625 ไมโครเมตร

ภายหลังการเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 150 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร

4.4.2 ผลการตรวจสอบการเปรียบเทียบพื้นผิวอิเล็กโตรดระหว่างก่อนการเติมผงกับหลังเติมผงอะลูมิเนียม

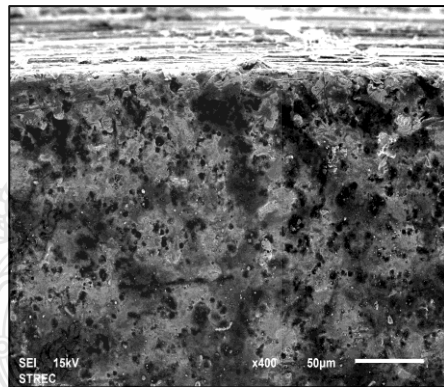
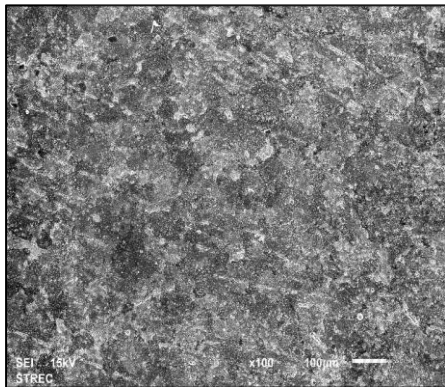
เนื่องจากกำหนดให้อิเล็กโตรดเป็นขั้วกระแสไฟฟ้าบวก ปริมาณคาร์บอนและธาตุอะลูมิเนียมบางส่วนที่เป็นขั้วลบจะวิ่งมาจับผิวอิเล็กโตรด เมื่อทำการวัดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดพบว่าอิเล็กโตรดมีความหยาบเพิ่มขึ้นหรือไม่เกิดการสึกหรอเลย การตรวจสอบผิวอิเล็กโตรดด้วย (EDS) ตรวจสอบว่า ปริมาณคาร์บอนที่ผิวอิเล็กโตรดมีปริมาณเพิ่มสูงมาก นอกจากนี้ยังตรวจพบธาตุอะลูมิเนียมในปริมาณ 0.95 เปอร์เซ็นต์ wt ซึ่งสามารถสรุปได้ถึงสาเหตุที่ทำให้อิเล็กโตรดมีความหยาบเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบพื้นผิวอิเล็กโตรดระหว่างก่อนการเติมผงอะลูมิเนียมกับหลังเติมผงอะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 4.9 และ ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบผิวอิเล็กโตรดระหว่างก่อนเติมผงกับหลังเติมผงอะลูมิเนียม

ธาตุผสม	ปริมาณธาตุบนพื้นผิวอิเล็กโตรด (% wt)	
	ก่อนเติมผง	หลังเติมผงขนาด 45 ไมโครเมตร 40 กรัมต่อลิตร
C	51.64	66.42
Cu	9.84	27.97
Fe	32.41	3.85

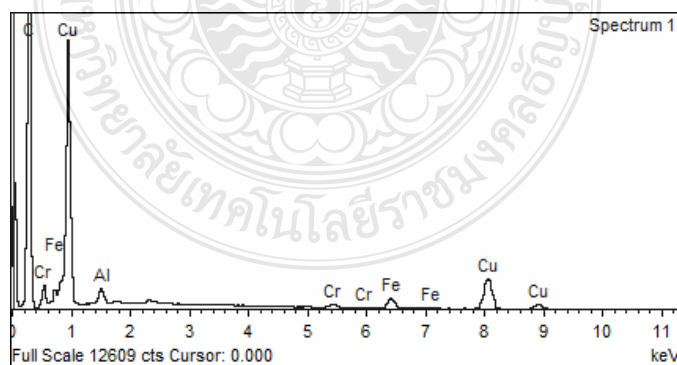
ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบผิวอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างก่อนเติมผงกับหลังเติมผงอะลูมิเนียม (ต่อ)

ธาตุผสม	ปริมาณธาตุบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ (% wt)	
	ก่อนเติมผง	หลังเติมผงขนาด 45 ไมโครเมตร 40 กรัมต่อลิตร
Cr	5.06	0.81
Mo	1.05	-
Al	-	0.95
รวม (%)	100	100



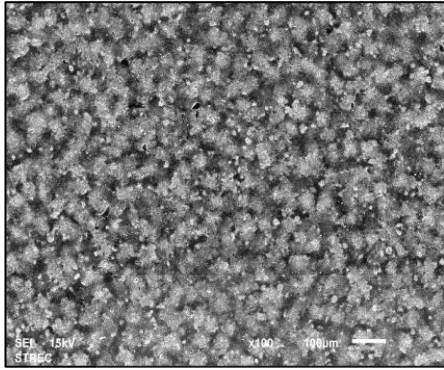
(ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 400 เท่า บริเวณขอบอิเล็กทรอนิกส์

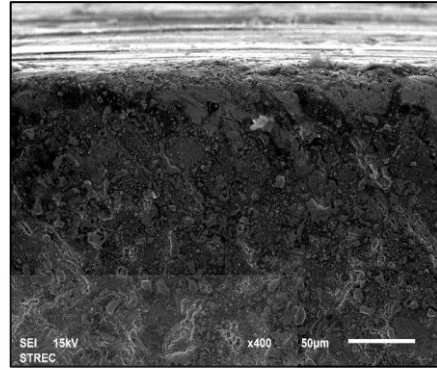


(ค) กราฟปริมาณธาตุบนผิวงานด้วยวิธี EDS

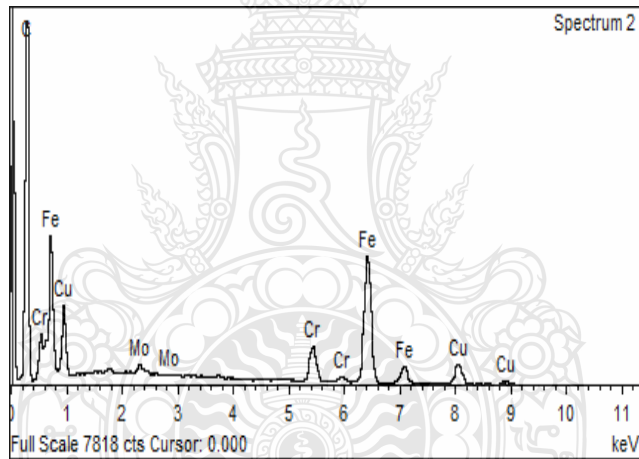
รูปที่ 4.17 ภาพการตรวจผิวอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการเติมผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร



(ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า



(ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 400 เท่า
บริเวณขอบอิเล็กโตรด



(ค) กราฟปริมาณธาตุบนผิวงานด้วยวิธี EDS

รูปที่ 4.18 ภาพการตรวจผิวอิเล็กโตรดก่อนการเติมผงอะลูมิเนียม

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยวิธีการ PMEDM โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความผิว แล้วนำมาหาข้อสรุปโดยการแบ่งขั้นตอนของการทดลองเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานและขั้นตอนของการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโตรดภายหลังกระบวนการ EDM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์งานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ได้แก่ เวลาเปิดกระแสไฟฟ้าและช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน โดยการไขว้ตัวแปรแบบ L9 พบว่าค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ได้จากการทดลองคือ 1.658 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในการทดลองที่ 7 ที่พารามิเตอร์ เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V

5.1.2 ผลจากการทดลองสุมเติมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร โดยการไขว้ตัวแปรแบบ L9 พบว่า ผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปของเหลวไดอิเล็กตริกสามารถทำให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานลดลงได้ โดยค่าความหยาบผิวต่ำสุดอยู่ในการทดลองที่ 7 เช่นเดียวกับการทดลองแบบไม่เติมผง ซึ่งมีค่าความหยาบผิวเท่ากับ 1.622 ไมโครเมตร ลดลงจากวิธีไม่เติมผงคิดเป็น 2.17 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ

5.1.3 ผลจากการทดลองเพื่อศึกษาขนาดของผงอนุภาคและความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว โดยการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดจากการศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้น ที่เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V พบว่า ผงอะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาค 45 ไมโครเมตร ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.391 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.625 ไมโครเมตร ส่วนขนาดอนุภาคที่ 500 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร

ขึ้นไป ไม่สามารถอยู่ในสภาวะที่ทำการทดลองได้ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคและขนาดของผงมีความโตเกินกว่าที่จะสามารถเข้าไปในช่องว่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงานได้ ซึ่งทำให้ผงอะลูมิเนียมเข้าไปขัดขวางระบบไหลวนของสารไดอิเล็กตริกจนไม่สามารถปฏิบัติงานได้ ทำให้เมื่อพิจารณาจากขนาดผงอะลูมิเนียม 45 และ 150 ไมโครเมตร สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ให้ค่าความหนาแน่นผิวต่ำสุดดีกว่าขนาดอนุภาค 150 และ 500 ไมโครเมตร คิดเป็น 14.4 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ

5.1.4 ปริมาณความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปโดยสารไดอิเล็กตริก พบว่าที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ให้ค่าความหนาแน่นผิวต่ำสุด ทุกขนาดของอนุภาคผงอะลูมิเนียม นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นในปริมาณที่เหมาะสมยังสามารถช่วยให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดลดลงได้

5.1.5 ผลจากการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าและขั้วอิเล็กโตรดส่งผลต่อค่าความหนาแน่นผิวชิ้นงาน พบว่ากระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นผิวชิ้นงาน ที่กระแสไฟฟ้าต่ำค่าความหนาแน่นผิวของขั้วอิเล็กโตรดจะให้ความหนาแน่นผิวที่ต่ำกว่าขั้วอิเล็กโตรดลบ แต่เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขั้วอิเล็กโตรดจะมีความหนาแน่นผิวสูงขึ้นตามอย่างชัดเจน ต่างจากขั้วอิเล็กโตรดลบที่เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นผิวจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้นและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะเพิ่มสูงขึ้นตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

วัสดุที่นำมาเป็นอิเล็กโตรดควรมีคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าที่ดีและมีจุดหลอมเหลวสูง จึงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในกระบวนการกัดเซาะ โลหะด้วยไฟฟ้าและยังสามารถลดเวลาในการผลิตได้ นอกจากนี้ควรศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกันระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอีดีเอ็มด้วยการเติมผงโลหะลงในของเหลวไดอิเล็กตริกควรที่จะตรวจสอบคุณสมบัติของผงโลหะนั้นๆ ให้ถี่ถ้วนเนื่องจากผงโลหะแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น การเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องาน การลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดหรือช่วยให้ค่าความหนาแน่นผิวชิ้นงานดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ผู้ปฏิบัติได้ผลลัพธ์ที่สูงสุด นอกจากลักษณะรูปร่างของผงโลหะยังเป็นปัจจัยที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง หากผงโลหะมีรูปร่างที่แตกต่างกันมากๆ ก็จะทำให้ผลที่ได้ไม่เที่ยงตรงหรืออาจจะไม่สามารถทำงานได้

บรรณานุกรม

- [1] Thomas, B., Technology of Electrical Discharge Machining. Druckerei Helene, 6102 Pfunstste pp. 11-53.
- [2] E. Bud Guitrau., The EDM Handbook. Handser Gardener publication Cincinnati, pp. 19-54, 1997.
- [3] พิชัย จันทน์มณี, การศึกษาเพื่อลดรอยแตกร้าวขนาดเล็กในกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้าสำหรับทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2554.
- [4] Header Die & Tool, Inc. was named 2013 Manufacturer of the Year by Rockford Chamber of Commerce
- [5] Sravankumar Gubur, V V Potdar, Srinath Gudur., A review on effect of aluminum & silicon powder mixed EDM on reponse variables of various materials. International Journal of Innovative Resesearch in Science Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 12, 2014.
- [6] Kansal, H.K., Singh, P, Kumar, P., Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). Journal of Materials Processing Technology, pp. 32–41, 2007.
- [7] Khalid Hussain SYED, Kuppan PALANIYANDI., Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water. Turkish J. Eng. Env. Sci. 36, pp. 195-207, 2012.
- [8] Ho, K.H., Newman, S.T., State of the art electrical discharge machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 1287–1300, 2003.
- [9] JIS B 0031 and JIS B 0061
- [10] ณัฐดนัย ชื้อตระกูล, ผลกระทบของอิเล็กโตรดต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กในทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [11] Kuldeep Ojha , R. K. Garg , K. K. Singh., Experimental Investigation and Modeling of PMEDM Process with Chromium Powder Suspended Dielectric. International Journal of Applied Science and Engineering , pp. 65-81, 2011.

- [12] Sukhjeet Singh , Harpreet Singh , Jasbir Singh , Rakesh Bhatia., Effect of Composition of Powder Mixed Dielectric Fluid on Performance of Electric Discharge Machining. National Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering , pp.7-8, October 2011.
- [13] Soumyakant Padhee, Niharranjan Nayak,S K Panda,P R Dhal and S S Mahapatra., Multi objective parametric optimization of powder mixed electro discharge machining using response surface methodology and non-dominated sorting genetic algorithm.Indian Academy of Sciences, Sa^{dhana} Vol. 37, Part 2, pp. 223–240, April 2012.
- [14] Gurtej Singh, Paramjit Singh, Gaurav Tejpal, Baljinder Singh., Effect of Machining Parameters on Surface Roughness of H13 Steel In EDM Process Using Powder Mixed Fluid. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, IJAERS/Vol. II/ Issue I/, pp.148-150, Oct.-Dec 2012.
- [15] M.Y. Ali, N. Atiqah and Erniyati., Silicon Carbide Powder Mixed Micro Electro Discharge Milling of Titanium Alloy.” International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), pp.338-342, Vol.6, 2011.
- [16] S. Singh and M.F Yeh., Optimization of Abrasive Powder Mixed EDM of Aluminum Matrix Composites with Multiple Responses Using Gray Relational Analysis.Journal of Materials Engineering and Performance, pp.481–491, April 2012.
- [17] Paramjit Singh, Anil Kumar, Naveen Beri, Vijay Kumar., Some Experimental Investigation on Aluminum Powder Mixed EDM on Machining Performance of Hastelloy Steel International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.I/Issue II/, pp.28-45, July –Sept 2010.
- [18] Saurabh Sharma, Anil Kumar, Naveen Beri., Study of Tool Wear Rate During Powder Mixed EDM of Hastelloy Steel. International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.II/ Issue II/, pp.133-139, April-June 2011.

- [19] Baljinder Singh, Paramjit Singh, Gaurav Tejpal, Gurtej Singh., An Experimental Study of Surface Roughness of H11 Steel in EDM Process Using Copper Tool Electrode. International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.III/ Issue IV/, pp.130-133, October - December 2012.
- [20] Gurule N. B., Nandurkar K. N., Effect of Tool Rotation on Material Removal Rate during Powder Mixed Electric Discharge Machining of Die Steel. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, pp.328-332, August 2012.
- [21] Saurabh Sharma, Anil Kumar, Naveen Beri, Dinesh Kumar., Effect of Aluminium Powder Addition in Dielectric During Electric Discharge Machining of Hastelloy on Machining Performance Using Reverse Polarity. International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.I/ Issue III/, pp.13-24, October - December 2010.
- [22] Yusaf, K. et al., An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surfaces roughness in electrical discharge machining (EDM). Springer Verlag London Limited (Electronic), pp.1118 – 112, Vol.28, 2005.
- [23] Yanzhen Z, Yonghong L, Renjie J, Baoping C., Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric, Applied Surface Science. 257, pp.5989–5997, 2011.
- [24] Sharanjit Singh, Arvind Bhardwaj., Review to EDM by using water and powder-mixed dielectric fluid. Journal of minerals & materials characterization & engineering. Vol. 10, No.2, pp.199-230, 2011.
- [25] Ferraris, E. Reynaerts, D. and Lauwers, D., Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al₂O₃ and ZrO₂ based ceramic composites. CIRP Annals Manufacturing Technology, pp.235-238, 2011.
- [26] Tenghongcharean S, Welding Engineering, Bangkok, Sounsongsermwechaken, 2549.

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง



ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก

การทดลองที่	เวลา (นาท)	ระยะสึก	ความลึก	EWR	MRR	Ra
1	35	0.934	0.200	467.000	0.449	1.937
2	35	1.033	0.408	253.186	0.916	2.537
3	35	0.967	0.886	109.142	1.989	3.138
4	35	0.93	0.036	2583.333	0.081	1.691
5	35	-0.091	0.362	-25.138	0.813	3.102
6	35	-0.272	2.485	-10.946	5.579	3.594
7	35	-0.032	0.073	-43.836	0.164	1.658
8	35	-0.306	0.625	-48.960	1.403	3.151
9	35	-0.091	0.648	-14.043	1.455	4.554

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานจากการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริก

การทดลองที่	EWR	MRR	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μm)				
1	467.000	0.449	2.194	1.917	1.736	1.902	1.937
2	253.186	0.916	2.592	2.713	2.348	2.496	2.537
3	109.142	1.989	2.804	3.299	3.126	3.326	3.138
4	2583.333	0.081	1.628	1.683	1.634	10801	1.691
5	-25.138	0.813	3.479	2.847	3.092	2.993	3.102
6	-10.946	5.579	3.677	3.352	3.746	3.594	3.594
7	-43.836	0.164	1.690	1.642	1.601	1.700	1.658
8	-48.960	1.403	3.304	3.026	3.263	3.484	3.151
9	-14.043	1.455	4.554	4.580	4.528	-	4.554

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยวิธีสุ่มเต็มพองอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

การทดลองที่	เวลา (นาท)	ระยะสึก	ความลึก	EWR	MRR	Ra
1	35	-0.098	0.204	-48.039	0.458	1.804
2	35	-0.031	0.432	-7.176	0.970	2.393
3	35	-0.008	0.887	-0.902	1.991	2.942
4	35	-0.008	0.080	-10.000	0.180	1.65
5	35	-0.048	0.426	-11.268	0.956	3.005
6	35	-0.047	1.876	-2.505	4.211	3.313
7	35	-0.011	0.092	-11.957	0.207	1.622
8	35	-0.088	0.512	-17.188	1.149	2.894
9	35	-0.014	0.710	-1.972	1.594	4.379

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานจากการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ โดยการไขว้ตัวแปร 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยวิธีสุ่มเต็มพองอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

การทดลองที่	EWR	MRR	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μm)				
			1	2	3	4	5
1	-48.039	0.458	1.818	1.641	1.889	1.705	1.970
2	-7.176	0.970	2.411	2.183	2.439	2.240	2.692
3	-0.902	1.991	2.847	3.005	3.097	2.692	3.069
4	-10.000	0.180	1.755	1.544	1.692	1.685	1.562
5	-11.268	0.956	3.064	2.952	2.998	3.050	2.961
6	-2.505	4.211	3.045	3.380	3.471	3.287	3.311
7	-11.957	0.207	1.630	1.563	1.692	1.602	1.624
8	-17.188	1.149	2.889	2.833	2.865	2.950	2.937
9	-1.972	1.594	4.206	4.177	4.602	4.452	4.459

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลผลการทดลองขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน โดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V

เติมผง 45 ไมโครเมตร					
ปริมาณผง (g/l)	เวลา (นาทื)	ความลึก (มม.)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μ m)
10	35	0.072	-0.010	0.162	1.679
20	35	0.081	-0.178	0.182	1.650
30	35	0.089	-0.011	0.200	1.607
40	35	0.049	-0.005	0.110	1.391
50	35	0.038	-0.004	0.085	1.510

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวจากการทดลอง ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V

ปริมาณผง (g/l)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1.762	1.708	1.602	1.725	1.681
10	-0.010	0.162	1.762	1.708	1.602	1.725	1.681
20	-0.178	0.182	1.630	1.563	1.692	1.602	1.624
30	-0.011	0.200	1.577	1.680	1.607	1.576	1.597
40	-0.005	0.110	1.494	1.215	1.415	1.441	1.391
50	-0.004	0.085	1.504	1.498	1.493	1.528	1.530

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลผลการทดลองขนาดอนุภาคของอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการเติมผงอะลูมิเนียม 150 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V

เติมผง 150 ไมโครเมตร					
ปริมาณผง (g/l)	เวลา (นาท.)	ความลึก (มม.)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μ m)
10	35	0.040	-0.052	0.090	1.703
20	35	0.054	-0.021	0.121	1.672
30	35	0.064	-0.014	0.144	1.662
40	35	0.069	-0.012	0.155	1.625
50	35	0.128	-0.017	0.287	1.780

ตารางที่ ก.8 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวจากการทดลอง ขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการเติมผงอะลูมิเนียม 150 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V

ปริมาณผง (g/l)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)					
10	-0.052	0.090	1.676	1.775	1.621	1.782	1.742	1.704
20	-0.021	0.121	1.586	1.680	1.647	1.679	1.780	1.772
30	-0.014	0.144	1.577	1.608	1.724	1.738	1.729	1.674
40	-0.012	0.155	1.722	1.667	1.538	1.581	1.634	1.609
50	-0.017	0.287	1.760	1.717	1.787	1.788	1.878	1.953

ตารางที่ ก.9 แสดงข้อมูลผลการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อความหยาบผิวชิ้นงาน โดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดบวก

เติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร 40 กรัมต่อลิตร ขั้วอิเล็กโตรดบวก						
กระแสไฟฟ้า (A)	เวลา (นาท)	ระยะลึก (มม.)	ความลึก (มม.)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μ m)
1	35	-0.009	0.050	-18.000	0.112	1.308
2	35	-0.017	0.059	-28.814	0.132	1.391
4	35	-0.016	0.192	-8.333	0.431	2.013
6	35	-0.01	0.632	-1.582	1.419	4.405
8	35	0.003	0.747	0.402	1.677	6.044

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน โดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดบวก

กระแสไฟฟ้า (A)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
1	-18.000	0.112	1.376	1.362	1.287	1.219	1.299
2	-28.814	0.132	1.494	1.215	1.415	1.441	1.391
4	-8.333	0.431	2.314	2.061	1.92	1.883	1.887
6	-1.582	1.419	4.02	4.29	4.639	4.58	4.497
8	0.402	1.677	5.946	6.301	6.004	6.253	5.717

ตารางที่ ก.11 แสดงข้อมูลผลการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการไม่เติมผงอะลูมิเนียม ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดบวก

ไม่เติมผง ขั้วอิเล็กโตรดบวก						
กระแสไฟฟ้า (A)	เวลา (นาท)	ระยะลึก (มม.)	ความลึก (มม.)	EWR (%)	MRR (mm^3/min)	Ra (μm)
1	35	-0.002	0.027	-7.407	0.061	1.297
2	35	-0.005	0.030	-16.667	0.067	1.658
4	35	0.001	0.238	0.420	0.534	2.952
6	35	0.003	0.591	0.508	1.327	4.542
8	35	0.006	0.720	0.833	1.616	6.421

ตารางที่ ก.12 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการไม่เติมผงอะลูมิเนียม ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดบวก

กระแสไฟฟ้า (A)	EWR (%)	MRR (mm^3/min)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μm)				
1	-7.407	0.061	1.272	1.293	1.417	1.134	1.373
2	-16.667	0.067	1.735	1.659	1.644	1.628	1.627
4	0.420	0.534	2.813	3.029	2.958	3.211	2.752
6	0.508	1.327	4.519	4.423	4.647	4.631	4.494
8	0.833	1.616	6.046	6.87	6.662	6.398	6.129

ตารางที่ ก.13 แสดงข้อมูลผลการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดลบ

เติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร 40 กรัมต่อลิตร ขั้วอิเล็กโตรดลบ						
กระแสไฟฟ้า (A)	เวลา (นาท)	ระยะลึก (มม.)	ความลึก (มม.)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	Ra (μ m)
1	35	-0.013	0.029	-44.828	0.065	1.937
2	35	-0.012	0.053	-22.642	0.119	2.855
4	35	-0.016	0.056	-28.571	0.126	2.918
6	35	-0.01	0.103	-9.709	0.231	2.968
8	35	0.003	0.219	1.370	0.492	3.265

ตารางที่ ก.14 แสดงข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวการทดลองขั้วกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการเติมผงอะลูมิเนียม 45 ไมโครเมตร ใช้พารามิเตอร์เวลาเปิด 100 μ s และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ขั้วอิเล็กโตรดลบ

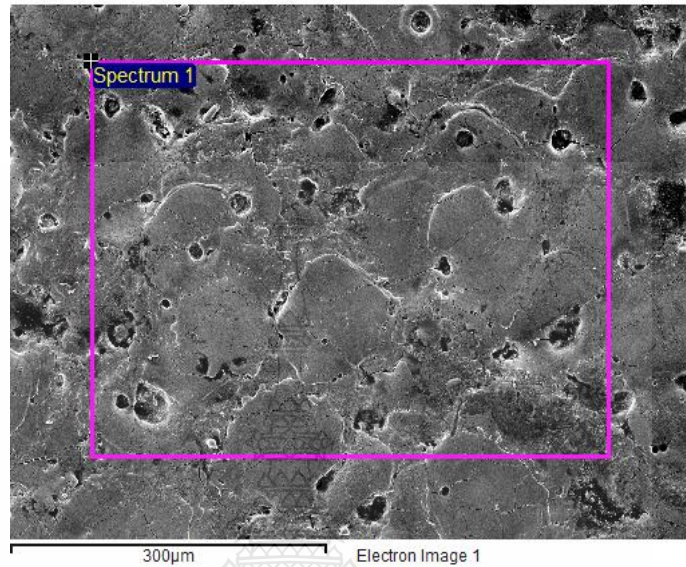
กระแสไฟฟ้า (A)	EWR (%)	MRR (mm ³ /min)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : μ m)				
			1	2	3	4	5
1	-44.828	0.065	1.914	2.026	1.903	1.878	1.966
2	-22.642	0.119	2.97	3.094	2.9	2.846	2.465
4	-28.571	0.126	3.06	2.942	2.795	2.69	3.106
6	-9.709	0.231	2.991	2.858	2.918	3.252	2.824
8	1.370	0.492	3.023	3.115	3.662	3.398	3.129

ภาคผนวก ข

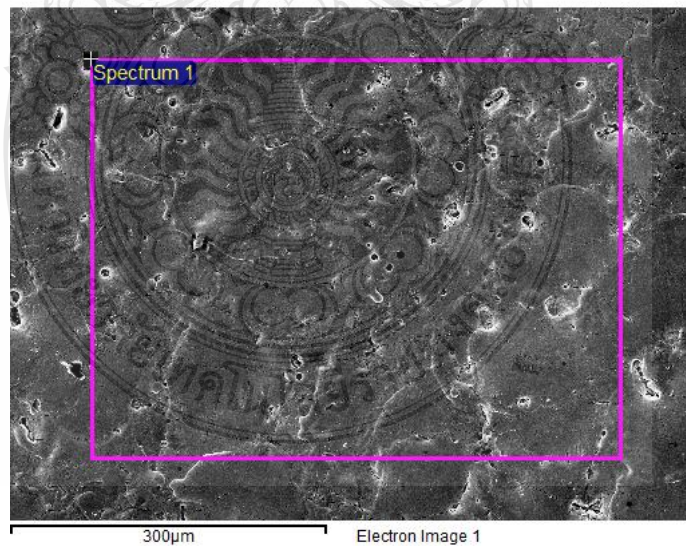
รูปภาพจากการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานด้วยวิธี SEM - EDS



รูปภาพจากการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานด้วยวิธี SEM - EDS



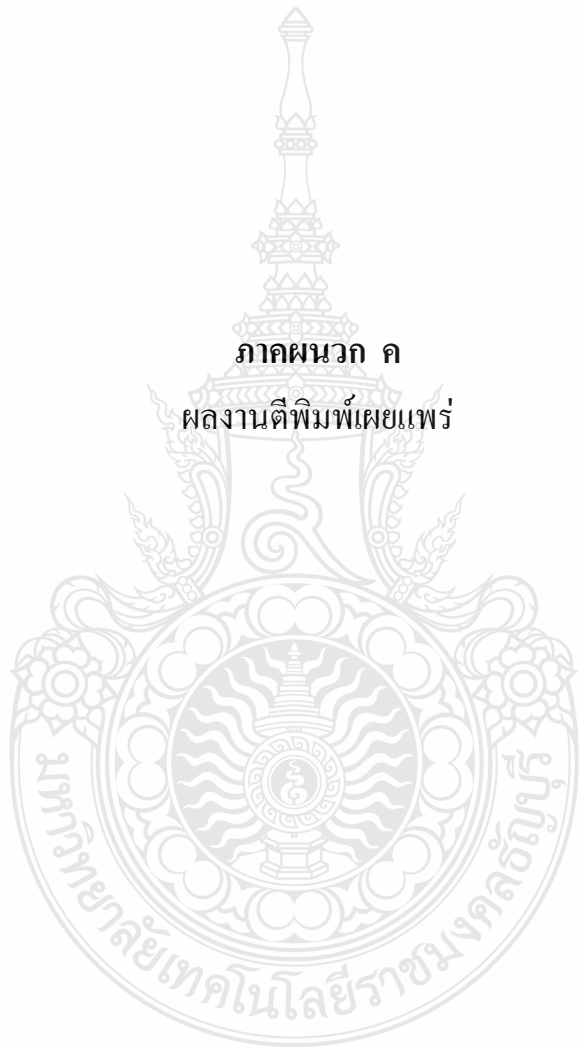
รูปที่ ข.1 รูปพื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยไม่เติมผงอะลูมิเนียม ที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ ข.2 รูปพื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยการเติมผงอะลูมิเนียม ขนาด 45 ไมโครเมตร ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ที่กำลังขยาย 400 เท่า

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





บทความฉบับสมบูรณ์

การประชุมวิชาการ

ด้านการพัฒนาการดำเนินงาน

ทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 6

วันที่ 12 พฤษภาคม 2558

ณ โรงแรม รามา การ์เด้นส์ กรุงเทพฯ



จัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

PROCEEDINGS

*The 6th Conference of Industrial Operations Development 2015
(CIOD 2015), 12 May 2015*

Rama Gardens Hotel, Bangkok



การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 6 ประจำปี 2558
The 6th Conference on Industrial Operations Development 2015 (CIOD 2015)
วันที่ 12 พฤษภาคม 2558 ณ โรงแรม รามา การ์เด้นส์ กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 6 ประจำปี 2558

The 6th Conference on Industrial Operations Development 2015
(CIOD 2015)

วันที่ 12 พฤษภาคม 2558

ณ โรงแรม รามา การ์เด้นส์ กรุงเทพฯ



จัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

โทร 02-564-3001-2 ต่อ 3086



คณะกรรมการประเมินบทความ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

- | | |
|--|---------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์ | กรรมการ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร. จิรรัตน์ ธีระวารพฤกษ์ | กรรมการ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร. มณฑล ศาสนนันท์ | กรรมการ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย สุรพันธ์ | กรรมการ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ | กรรมการ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร. ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง | กรรมการ |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร. ดนุพันธ์ วิสุวรรณ | กรรมการ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร. บุษบา พงษ์พานิชรัตน์ | กรรมการ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทักษิณีย์กร | กรรมการ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ภาระราช | กรรมการ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวรรณ คล้อยภยันต์ | กรรมการ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรัตน์ กังสัมฤทธิ์ | กรรมการ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ | กรรมการ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นริศ เจริญพร | กรรมการ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปาริชาติ ชื่นวัฒนกุล | กรรมการ |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ ตันตีไพบูลย์วุฒิ | กรรมการ |
| 17. อาจารย์ ดร. สุภมาศ สุชาติานนท์ | กรรมการ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- | | |
|--|---------|
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยธัช เผือกสามัญญ | กรรมการ |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย รุ่งเรืองอนันต์ | กรรมการ |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนสาร อินทรกำธรชัย | กรรมการ |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล | กรรมการ |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาติชาย อัครศักดิ์ | กรรมการ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- | | |
|--|---------|
| 23. รองศาสตราจารย์ ดร. บวรโชค ผู้พัฒน์ | กรรมการ |
| 24. รองศาสตราจารย์ ดร. เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ | กรรมการ |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญชัย โขมพัตรารภรณ์ | กรรมการ |
| 26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันทนา อุดมศักดิ์กุล | กรรมการ |



27	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจริญ สุนทราวาณิชย์	กรรมการ
28	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พงมาน เตียววัฒนรัฐติกาล	กรรมการ
29	อาจารย์ ดร. ช่อแก้ว จตุรานนท์	กรรมการ
30	อาจารย์ ดร. พิเนษฐ์ ศรีโยธา	กรรมการ
31	อาจารย์ ดร. วิบุญ ตั้งวโรตมกุล	กรรมการ
32	อาจารย์ ดร. อุษณีย์ คำพูล	กรรมการ
คณะกรรมการธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร		
33	อาจารย์ ดร. ธราธร พชรฐิติกุล	กรรมการ
34	อาจารย์ ดร. สิริรักษ์ ภูริยะพันธ์	กรรมการ
35	อาจารย์ สุวัฒน์ ตานสมบุญ	กรรมการ
36	อาจารย์ พิชญดา ดอนสมจิตร	กรรมการ
37	อาจารย์ ชิตษณ ภัคดีวานิช	กรรมการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม		
38	รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วจิรวนิช	กรรมการ
39	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมเกียรติ วงศ์วินชวี	กรรมการ
40	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ โสทรโยม	กรรมการ
41	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐวุฒิ ฐัณฑ์คุณ	กรรมการ
42	อาจารย์ พงศ์พัฒน์ เพ็ชรรุ่งเรือง	กรรมการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี		
43	รองศาสตราจารย์ ดร. ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	กรรมการ
44	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบัติ สิ้นธุ์เขาวน	กรรมการ
45	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นุชสรา เกรียงกรกฎ	กรรมการ
46	อาจารย์ ดร. จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์	กรรมการ
47	อาจารย์ ดร. ธารชุตตา พันธุ์นิกุล	กรรมการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น		
48	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย ปทุมนากุล	กรรมการ
49	รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา เศรษฐนันท์	กรรมการ
50	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน พิรพัฒนา	กรรมการ
51	อาจารย์ ดร. คมกฤษ ปิติฤกษ์	กรรมการ
52	อาจารย์ ทวี นาครชตะอมร	กรรมการ

คณะกรรมการประสานงานเครือข่าย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

- | | |
|---|---------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ภาระราช | กรรมการ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ | กรรมการ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- | | |
|---|---------|
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธชัย บรรเทงจิตร | กรรมการ |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย รุ่งเรืองอนันต์ | กรรมการ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- | | |
|---|---------|
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร. เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ | กรรมการ |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์ | กรรมการ |
| 7. อาจารย์ ดร. ช่อแก้ว จตุรานนท์ | กรรมการ |

คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

- | | |
|-----------------------------------|---------|
| 8. อาจารย์ ดร. ธราธร พชรจิตกุล | กรรมการ |
| 9. อาจารย์ ดร. สุชาติดา เจียมสกุล | กรรมการ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

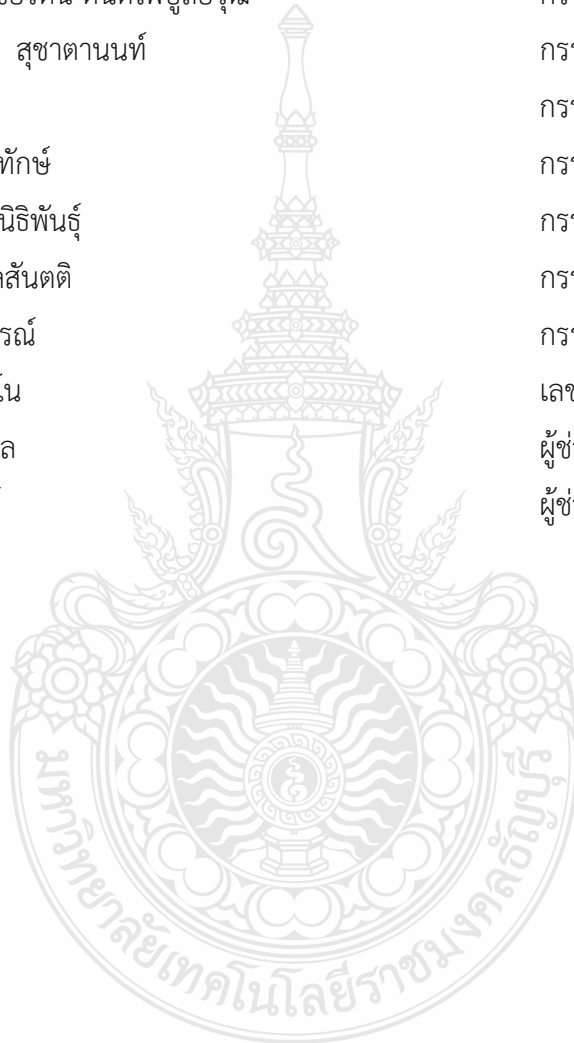
- | | |
|--|---------|
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ริจิวณิช | กรรมการ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมเกียรติ ว่องวานิชทวี | กรรมการ |

คณะกรรมการฝ่ายจัดงานการประชุมวิชาการ

- | | |
|--|---------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ภาระราช | ประธาน |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์ | กรรมการ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร. จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์ | กรรมการ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร. มณฑลีส ศาสนนันท์ | กรรมการ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย สุรพันธ์ | กรรมการ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ | กรรมการ |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร. ตรีเทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง | กรรมการ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร. ดนุพันธ์ วิสุวรรณ | กรรมการ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร. บุชบา พฤษชาพันธ์รัตน์ | กรรมการ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร | กรรมการ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวรรณ คล้อยภยันต์ | กรรมการ |



- | | |
|--|------------------|
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรัตน์ กังสัมฤทธิ์ | กรรมการ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ | กรรมการ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นริศ เจริญพร | กรรมการ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปาริชาติ ชื่นวัฒนกุล | กรรมการ |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ ต้นตีไพบูลย์วุฒิ | กรรมการ |
| 17. อาจารย์ ดร. สุภมาศ สุชาติตานนท์ | กรรมการ |
| 18. นายอนันท์ เพ็ชรผึ้ง | กรรมการ |
| 19. นายศักดิ์เฉลิม ผลพิทักษ์ | กรรมการ |
| 20. นางธัญธรณ์ สวากนธิพันธุ์ | กรรมการ |
| 21. นางวรรณวิภา ชวาลสันตติ | กรรมการ |
| 22. นายวัชรชัย พิมพภรณ์ | กรรมการ |
| 23. นางภูมิใจ พหรมมาโน | เลขานุการ |
| 24. นางสาวชมพูนุช พิกุล | ผู้ช่วยเลขานุการ |
| 25. นางอุษมา พิณสุรงค์ | ผู้ช่วยเลขานุการ |



Manu12	การสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยเคลือบบนวัสดุทางการแพทย์ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา เมษลัตตา ประเสริฐศรี คมกฤต เล็กสกุล และ อีรวรรณ บุญญวรรณ	736
Manu13	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล้าทางจิตใจในงานใช้สายตาและสมาธิสูง นันทนัช แสงชูไทย และ นิวิธ เจริญใจ	741
Manu14	ศึกษาอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM วิษณุวัฒน์ เกตุอู๊ด และ ชัยยะ ปราณีตพลกรัง	746
Manu15	การศึกษาเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตงานหล่อประทับดุมล้อของรถไฟเดินตามเพื่อลดของเสีย ฐิติกร เปล่งขำ และ ศุภชัย สุรพันธ์	751
Manu16	การออกแบบเครื่องทดสอบการเคลื่อนที่ของ PZT บนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สัญญา ธรรมประสิทธิ์ และ มณฑล ศาสนนนท์	758
Manu17	การปรับปรุงค่าความเยื้องศูนย์ของชิ้นงานด้านหลังตัวหมุน กมล มุสิกกุล และ อภิวัฒน์ มุตตามระ	763
Manu18	สมบัติเชิงกลของแผ่นยางมาสเตอร์แบทช์ผสมผงถ่าน จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ และ ปิยณัฐ โตอ่อน	771
Manu19	การออกแบบบันไดข้างเรือต้นทุ่นสำหรับเรือเดินสมุทร 65.2 เมตร หะริน กุลพิทักษ์ และ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	776
Manu20	การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดโม่โดยใช้การทดลองแบบสปลิทพล็อต จักรกฤษ เพชรโคตร และ อีรเดช วุฒิพรพันธ์	786
Manu21	การหารัศมีตายที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปชิ้นงานฝาถังเก็บสาร นรา นาคีนพคุณ สิมาพร แสนประเสริฐ และ ธนสาร อินทรกาธรชัย	793

กลุ่ม Bm (Business Management)		
รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
Bm1	กระบวนการสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกแนวทางการบริหารจัดการของเสียอุตสาหกรรม กรณีศึกษา นิคมอุตสาหกรรมบางปู เสกสรร กันธรส และ ปริญญา บุญกนิษฐ	799

ศึกษาอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิว เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการ PMEDM

วิชญวัฒน์ เกตุอู๊ด^{1*} และ ชัยยะ ปราณีตพลกรัง²

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: cheat11_utt@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ทำการปรับปรุง ความหยาบผิววัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 โดย กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการเติม ผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลว ไฮโดรคาร์บอน และใช้ระบบการไหลวนของสารเพื่อจัดเศษ แบบชนิด ทำการทดลองโดยการใส่ตัวแปรตามตารางการ ทดลอง L9 array เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจาก 9 การทดลอง โดยพิจารณาตัวแปรกระแสไฟฟ้า ระยะห่างของการสปาร์ค โดยการปรับแรงดันไฟฟ้า ตลอดจนเวลาเปิด นอกจากนี้ยัง ควบคุมตัวแปรคงที่ได้แก่ ระดับปัจจัยประสิทธิภาพไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอิเล็กโทรด 10 มิลลิเมตร ขั้วอิเล็กโทรดบวก และแรงดันไหลผ่านของสารไดอิเล็กทริกตามลำดับ ผลการ จากทดลองขั้นต้นพบว่า อนุภาคผงอะลูมิเนียมทำให้ความ ความผิวเฉลี่ยของวัสดุชิ้นงานลดลง 16.10 เปอร์เซ็นต์ ($Ra = 1.658$ ไมโครเมตร) เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของ ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียมกับ ปริมาณความเข้มข้นของผง อะลูมิเนียม พบว่า ผงอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร สามารถสร้างผิวงานที่มีความหยาบผิวต่ำกว่าผงอะลูมิเนียม ขนาด 150 ไมโครเมตร ทั้งนี้ความเหมาะสมของปริมาณผง อะลูมิเนียมที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 กรัม/ลิตร ให้ความหยาบผิว เฉลี่ยดีที่สุดที่ 1.391 ไมโครเมตร

คำสำคัญ กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า, เหล็กกล้า เครื่องมือ, อะลูมิเนียมผง, การปรับปรุงผิวงาน

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะส่วนใหญ่จะ นิยมผลิตขึ้นโดยการใช้อุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นหลัก ไม่ว่าจะ เป็นแม่พิมพ์โลหะหรือแม่พิมพ์พลาสติก โดยวัสดุที่ นำมาผลิตเป็นแม่พิมพ์จะต้องมีคุณสมบัติเด่นด้านความ แข็งแรงสูง ด้านทานการสึกหรอได้ดีหรือทนทานต่อการกัด กร่อนด้วยสารเคมี เป็นต้น การแปรรูปแม่พิมพ์จึงมักจะส่งผล ต่อวัสดุเครื่องมือตัดที่สึกหรอได้ง่าย มากไปกว่านั้นอาจจะ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ค่าความแข็งที่เปลี่ยนไป เกิดความเค้นเฉือนขึ้นภายในชิ้นงาน และส่งผลโดยตรงต่อ ความหยาบผิวชิ้นงาน สำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและ มีความซับซ้อนด้านรูปร่าง ตลอดจนต้องการความหยาบ ผิวชิ้นงานต่ำเพื่อลดกระบวนการขัดผิวภายหลัง กระบวนการ กัดอาร์คด้วยไฟฟ้า (EDM) เป็นกรรมวิธีที่ถูกนำมาใช้แปรรูป แม่พิมพ์ โดยการอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่มีความถี่สูงผ่านของเหลว ตัวกลาง ทำให้เกิดการขจัดเนื้องานขึ้น[1,2] ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ ใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามกระบวนการ EDM ยังมี จุดด้อย คือ อัตราการขจัดเนื้องานต่ำเมื่อเทียบกับเวลา การ เพิ่มกระแสไฟฟ้าสามารถทำให้อัตราการขจัดเนื้องานเพิ่ม สูงขึ้นได้ แต่จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน ค่าความ เค้นตกค้าง รอยแตกร้าวขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเหตุให้ชิ้นงานเกิด การสึกหรอได้ง่าย การปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานด้วย กระบวนการ EDM โดยการใช้เทคนิคการผสมผงอนุภาคลงใน สารของเหลวตัวกลางเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้ค่า

ความหยาบผิวชิ้นงานลดลงได้[4] ผงอนุภาคในสารของเหลวตัวกลางจะเข้าไปขัดขวางการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้เกิดการหักเหและลดความรุนแรงในการกัดอาร์ค ทำให้กระแสไฟฟ้ากระจายไปทั่วพื้นผิวชิ้นงาน นอกจากนี้อนุภาคของผงโลหะบางส่วนยังถูกหลอมละลายไปพร้อมกับเนื้องานกลายเป็นชั้นเคลือบผิว ซึ่งทำให้ค่าความหยาบผิวลดต่ำลงได้[5]

งานวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมในสารไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการ EDM โดยการกำหนดตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อค่าความหยาบผิว เช่น กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด ช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโตรดและควบคุมอัตราการไหลวนของสารไดอิเล็กตริกทำการประเมินผลโดยการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความเข้มข้นของผงอนุภาคและขนาดของผงอะลูมิเนียม

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 และใช้วัสดุอิเล็กโตรดเป็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 ทำการผสมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบและอิเล็กโตรด

คุณสมบัติ	หน่วย	ชิ้นงาน SKD 11	อิเล็กโตรดทองแดง
ความหนาแน่น	g/cm ³	7.85	8.86
จุดหลอมเหลว	°C	1,421	1,085
การนำความร้อน	W/m.k	25	401

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของผงอะลูมิเนียม (Al powder)

คุณสมบัติ	หน่วย	ผงอะลูมิเนียม
ความหนาแน่น	g/cm ³	2.70
จุดหลอมเหลว	(°C)	660
การนำความร้อน	W/m.k	237

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองใช้เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า Aristech รุ่น 3D CNC EDM กัดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร โดยให้อิเล็กโตรดเป็นขั้วบวก เวลางาน 35 นาที พารามิเตอร์ที่ใช้ในตารางที่ 3 ทำการทดลองแบบไขว้ตัวแปร L9 array หาค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุด เพื่อทำการผสมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาค 45,150,500 μm ลงในสารไดอิเล็กตริก ในอัตราส่วน 5 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50 กรัม / ลิตร ในสารไดอิเล็กตริก Shell EDM Fluid 2A โดยมีระบบไหลวนเพื่อฉีดสารไดอิเล็กตริกผสมผงอะลูมิเนียมจากด้านข้างด้วยแรงดัน 1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ผ่านท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ด้วยอัตราการไหล 12 ลิตร/นาที ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ตัวแปรที่ส่งผลในกระบวนการทำงาน EDM และขั้นตอนการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบไขว้ตัวแปร L9

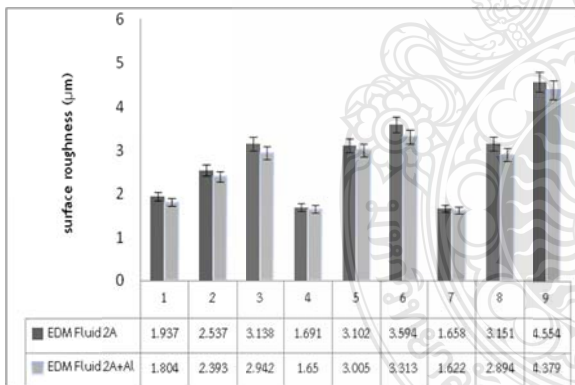
ตัวแปร	ระดับ		
	LV 1	LV 2	LV 3
เวลาเปิด (μs)	10	50	100
กระแสไฟฟ้า (A)	2	4	6
ช่องว่าง (H.V)	5	10	15

ทำการทดลองโดยการไขว้ตัวแปรตามตารางที่ 3 แบบ L9 array ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากผลการทดลองปรับค่าแบบไขว้ตัวแปรเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน โดยทำการเปรียบเทียบผลจากการสปาร์คแบบไม่เติมผงอะลูมิเนียมกับการสุมเติมผงอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร ดังรูปที่ 1 พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดต่ำสุดคือการปรับค่าเวลาเปิด 100 μ s กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน 15 H.V ซึ่งการเติมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กทริกทำให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยลดลง 2.20% โดยประมาณ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สามารถเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากทั้งหมด 9 การทดลองเพื่อนำมาใช้อ้างอิงในการทดลองขั้นต่อไป

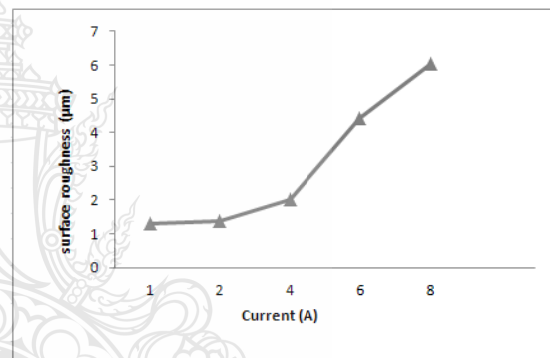


รูปที่ 1 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวภายหลังการสปาร์คแบบไม่เติมผงอะลูมิเนียมกับการสุมเติมผงอะลูมิเนียมในสารไดอิเล็กทริกที่ 20 กรัม/ลิตร

3.2 ผลการทดลองปรับพารามิเตอร์ค่ากระแสไฟฟ้าอิเล็กโตรดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากผลการทดลองในเบื้องต้น นำมาทำการทดสอบปรับค่ากระแสไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเพื่อเป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าความหยาบ

ผิวชิ้นงาน เมื่อพื้นผิวชิ้นงานได้รับความร้อนสูง จะทำให้เกิดการหลอมละลายบนผิวงาน และเมื่อได้รับการขัดเศษด้วยสารไดอิเล็กทริกจะทำให้ผิวงานเกิดการเย็นตัว (Recast) กลายเป็นชั้นหลอมใหม่ซึ่งจะกระทำเป็นวัฏจักรซ้ำๆกัน ดังนั้น เมื่อทำการผสมผงอะลูมิเนียมลงในสารไดอิเล็กทริก ในปริมาณที่เหมาะสม ผงอะลูมิเนียมบางส่วนจะเข้าไปหลอมรวมกับผิวชิ้นงาน[6] ดังรูปที่ 5,7 เมื่อทำการ SEM-EDS บนพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่เติมผงและเติมผงอะลูมิเนียม นอกจากนี้ กระแสไฟฟ้ายังส่งผลโดยตรงต่อความหยาบผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 2

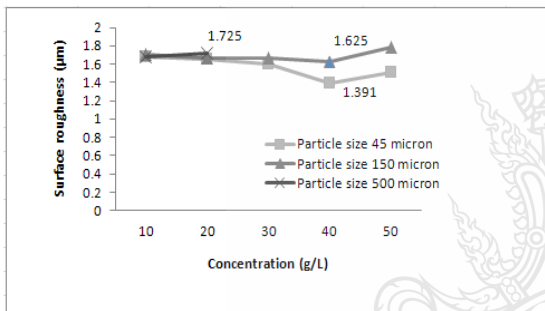


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

3.3 ผลการทดลองประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

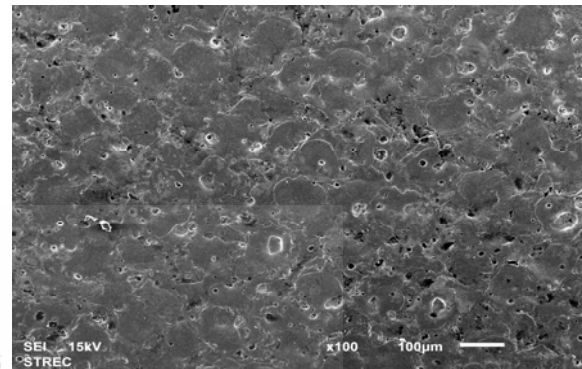
ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว โดยการปรับค่าความเข้มข้นของผงอะลูมิเนียมที่เติมลงในสารไดอิเล็กทริกโดยแบ่งออกเป็น 5 ระดับ พบว่าค่าความเข้มข้นที่ 40 กรัมต่อลิตรให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่ 1.391 μ m ดังรูปที่ 3 และเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมพบว่าขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม 45 μ m ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำกว่าขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม 150 μ m 14.4 % โดยประมาณ เนื่องจากผงอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถรวมตัวเข้ากับสารไดอิเล็กทริก

และเข้าไปในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงานได้ดีกว่า ผงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่[3] ทั้งนี้ผงอะลูมิเนียมที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำเมื่อรวมตัวกับสารไดอิเล็กทริกที่ได้รับความร้อนก็จะแตกตัวกลายเป็นคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนดังกล่าวจะเข้าไปรวมตัวกับผิวงานเมื่อมีการเย็นตัว [7,8] ขนาดอนุภาคผงอะลูมิเนียม 500 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 30 กรัม/ลิตร ขึ้นไปไม่สามารถอยู่ในสภาวะที่ทำให้การทดลองได้ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคและขนาดของผงอะลูมิเนียมมีความโตมากเกินไปทำให้เกิดการลัดวงจรได้

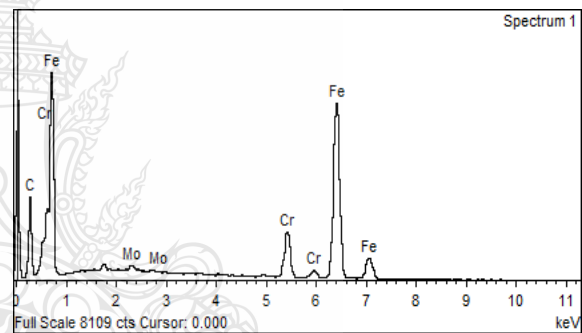


รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิว

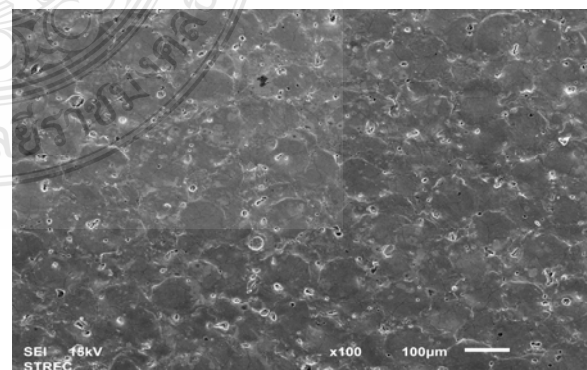
จากการศึกษาคุณภาพผิวงานภายหลังการ EDM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) สามารถแสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของพื้นผิวงานได้อย่างชัดเจน รูปที่ 4 แสดงพื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมด้วยกำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งมีความหยาบผิว 1.658 µm รูปที่ 6 แสดงพื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม 45 µm ลงในสารไดอิเล็กทริก 40 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีความหยาบผิว 1.391 µm ความหยาบผิวที่ต่างกันนี้อาจเกิดจากอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปในสารไดอิเล็กทริก ซึ่งนั่นหมายความว่าผงอะลูมิเนียมสามารถสร้างชั้นเคลือบผิวได้บนชิ้นงาน SKD 11 ด้วยกระบวนการ EDM



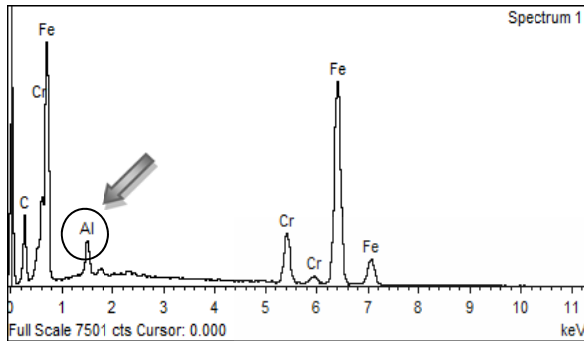
รูปที่ 4 พื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 5 ปริมาณธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการ EDM โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียมด้วยพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 6 พื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์คโดยเติมผงอะลูมิเนียมด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 7 ปริมาณธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการ EDM
โดยเติมผงอะลูมิเนียม 40 กรัม/ลิตร
ขนาดอนุภาคผง 45 μm

4. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการ PMEDM สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปในการใส่อิเล็กตริกที่มีปริมาณที่เหมาะสม สามารถสร้างชั้นเคลือบได้บนพื้นผิวชิ้นงาน SKD 11 ด้วยกระบวนการ EDM
2. ค่ากระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน
3. ผงอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปในการใส่อิเล็กตริกที่มีขนาดอนุภาค 45 μm และมีความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ให้ค่าความหยาบผิวลดลงจากกระบวนการ EDM แบบไม่เติมผงคิดเป็น 16.10 % โดยประมาณ
4. ผงอนุภาคของอะลูมิเนียมที่มีขนาด 45 μm ให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่า ผงอนุภาคของอะลูมิเนียมที่มีขนาด 150 μm คิดเป็น 14.4 % โดยประมาณ

เอกสารอ้างอิง

[1] กมลพงศ์ แจ่มกมล และ พิชัย จันทรมณี, การศึกษาพารามิเตอร์ในการกัดเซาะวัสดุด้วยไฟฟ้าสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI P20, KKU ENGINEERING JOURNAL

2013 40(1) ; น. 95-103.

[2] พิชัย จันทรมณี, การศึกษาเพื่อลดรอยแตกร้าวขนาดเล็กในกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้าสำหรับทั้งสแตนคาร์ไบด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2554.

[3] Khalid Hussain SYED, Kuppan PALANIYANDI, 2012. Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water. Turkish J. Eng. Env. Sci. 36, 195-207.

[4] Ferraris, E. Reynaerts, D. and Lauwers, D. 2011. Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al_2O_3 and ZrO_2 based ceramic composites. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60: 235-238.

[5] Sharanjit Singh, Arvind Bhardwaj, 2011. Review to EDM by using water and powder-mixed dielectric fluid. Journal of minerals & materials characterization & engineering. Vol. 10, No.2, pp. 199-230

[6] Yanzen Z, Yonghong L, Renjie J, Baoping C. Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric, 2011. Applied Surface Science. 257 ; 5989–5997.

[7] E. Bud Guitrau, The EDM handbook. Handser Gardener publication Cincinnati ; 1997.

[8] B. Thomas, Technology of electrical discharge machining. Druckerei Helene, 6102;1997.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิษณุวัฒน์ เกตุอุ๊ต
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2521
ที่อยู่	407/1 หมู่1 ตำบลท่าสัก อำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์ 53220
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	ครูพิเศษแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงจันทบุรี อนุสรณ์
	ครูประจำแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคชลบุรี
เบอร์โทรศัพท์	089-7732372
อีเมล	cheat11_utt@hotmail.com

