

การทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปร่างและอัตราป้อนของอิเล็กโทรดต่อรูปร่างของร่องกัด ในกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

Experimental Investigations into Effects of Electrode Geometries and Feed Rates on Shape of Slots Machined Using Electrochemical Milling Process

จิตติ พัทธวนิช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131
ติดต่อ: jitti@buu.ac.th, โทรศัพท์ 0-3810-2222 ต่อ 3385

บทคัดย่อ

รูปร่างของอิเล็กโทรดและพารามิเตอร์ในการกัดวัสดุมีผลต่อรูปร่างของชิ้นงานสำเร็จที่ถูกสร้างจากกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงรูปร่างของร่องกัดที่ถูกสร้างจากกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกกลวงและตันที่ปลายมีลักษณะเป็นแผ่นกลม และที่อัตราการป้อนอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ในการทดลองได้ใช้ สารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ที่ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตรเป็นอิเล็กโทรไลต์ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 17 โวลต์ ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน 0.2 มิลลิเมตร อัตราป้อนของอิเล็กโทรดที่ทำการทดลองเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร/นาที จากการทดลองพบว่า ในทุกอัตราการป้อน ผิวร่องกัดจากการใช้อิเล็กโทรดทรงกลวงจะมีรูปร่างโค้งนูน โดยโค้งนูนเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของร่องกัด ความกว้างและความลึกของร่องกัดที่บริเวณตรงกลางชิ้นงานมีค่ามากกว่าที่ทางเข้าและทางออก ร่องกัดจากการใช้อิเล็กโทรดทรงตันจะมีลักษณะผิวราบ ความกว้างและความลึกของร่องกัดค่อนข้างค่าคงที่ตลอดความยาวร่องกัด

คำหลัก: ร่องกัด, กระบวนการไฟฟ้า-เคมี, การกัดวัสดุ

Abstract

Electrode geometry and machining parameters play a role in finishing shape of workpiece produced using electrochemical milling process. The aim of this paper is to experimentally investigate shapes of slots electrochemically machined using disk-end hollow and solid cylindrical electrodes at different feed rates. The machining parameters are as, the electrolyte an aqueous of Sodium Nitrate (NaNO_3) at concentration of 100 g/l, applied voltage across the electrode and workpiece 17 Volts (DC), initial inter-electrode gap 0.2 mm and electrode feed rates 2, 4 and 6 mm/min. The results shown that at every electrode feed rate the base face of slots machined by hollow electrode was not flat but there was bulge at the centre. The depth and width of slots at the middle of workpiece were greater than that at entrance and exit. Whilst the base face of slots machined by solid electrode was flat and the depth and width were constant along the length of the slots.

Keywords: Slot, Electro-chemical process, Milling.

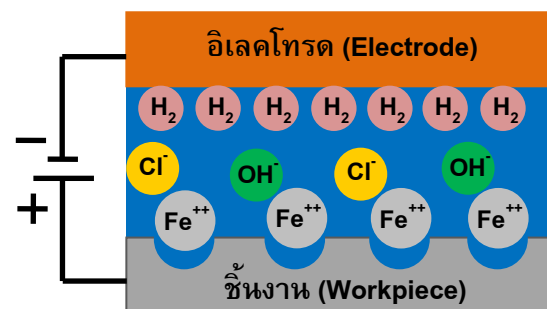
1. บทนำ

กระบวนการในการผลิตชิ้นงานให้ได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้สองกระบวนการได้แก่ กระบวนการผลิตโดยการเพิ่มเนื้อวัสดุเข้าสู่ชิ้นงาน (Additive manufacturing) และกระบวนการผลิตโดยการนำวัสดุออกจากชิ้นงาน (Removal manufacturing) ในกระบวนการผลิตชนิดแรกวัสดุที่ต้องการขึ้นรูปจะถูกเพิ่มเข้าไปบนชิ้นงานทีละชั้น (Layer) โดยในวัสดุที่เพิ่มเข้าไปจะถูกยึดติดกับผิวของวัสดุของชั้นก่อนหน้า [1] ส่วนในกระบวนการที่สองนั้น วัสดุบนผิวชิ้นงานจะถูกนำออกไป จนกระทั่งได้รูปร่างชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการนำวัสดุออกจากชิ้นงานนั้นจะกระทำโดยการใช้หัวตัด (Cutter) ที่มีรูปร่างแหลมคมเพื่อทำการตัดเฉือน วัสดุให้หลุดออกจากชิ้นงาน กระบวนการประเภทนี้ได้แก่กระบวนการ กลึง ตัด กัด วัสดุ เป็นต้น โดยทั่วไปนั้นหัวตัดจะต้องถูกสร้างจากวัสดุที่มีความแข็งกว่าวัสดุของชิ้นงาน และจะต้องทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในระว่างกระบวนการตัดเฉือน

เนื่องจากเทคโนโลยีในการสังเคราะห์และผลิตวัสดุมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก จึงได้มีการผลิตวัสดุโดยเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติที่สามารถทนทานต่อความเค้น และความร้อนสูง แต่มีน้ำหนักเบา เช่น โลหะที่มีส่วนผสมอัลลอยด์ (Alloy) หรือไทเทเนียม (Titanium) ในปัจจุบันวัสดุดังกล่าวนี้ได้ถูกใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เช่น เครื่องยนต์ ใบพัดในโรงจักรต้นกำลัง หรือแม้กระทั่งกระดูกเทียมสำหรับร่างกายมนุษย์ เป็นต้น ดังนั้นหากต้องการผลิตชิ้นงานจากวัสดุดังกล่าวด้วยกระบวนการตัดเฉือน หัวตัดต้องถูกสร้างจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้เกิดความยากในการสังเคราะห์วัสดุเพื่อสร้างหัวตัด เป็นสาเหตุให้การใช้กระบวนการตัดเฉือนกับวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

โดยทั่วไปในการขึ้นรูป หรือการตัดเฉือนวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะใช้กระบวนการที่ไม่มีการสัมผัสกัน

ระหว่างหัวตัดกับวัสดุ เช่นการใช้ลำแสงเลเซอร์ (Laser machining) การใช้การผ่านของกระแสไฟฟ้า (Electro-discharge machining: EDM) และการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining: ECM) ในกระบวนการสองแบบแรกวัสดุจะถูกนำออกจากชิ้นงานโดยการหลอมละลายจากความร้อนสูงที่เกิดขึ้นโดยการใช้ลำแสงเลเซอร์ หรือจากการผ่านปริมาณกระแสไฟฟ้าแรงสูงระหว่างผิวของชิ้นงานกับอิเล็กโทรด ส่งผลให้อนุภาคนำชิ้นงานจึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตก (Crack) ภายในชิ้นงาน [2] สำหรับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี วัสดุจะถูกนำออกจากผิวชิ้นงานโดยการใช้การแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) โดยที่อะตอมของวัสดุ(โลหะ)จะถูกดึงออกจากผิวของชิ้นงานโดยอะตอมของสารละลายจากการใส่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

กำหนดให้สารละลายระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ทำการต่อความต่างศักย์ขั้วบวกที่ชิ้นงาน และขั้วลบที่อิเล็กโทรดเมื่อมีความต่างศักย์เกิดขึ้น โซเดียมคลอไรด์ จะถูกแยกออกเป็นโซเดียม (Na^+) และคลอไรด์ (Cl^-) ในขณะที่น้ำจะถูกแยกออกเป็นไฮโดรเจน (H^+) และไฮดรอกซิล (OH^-) จากนั้นอนุภาคที่เป็นประจุลบ (คลอไรด์ และไฮดรอกซิล) จะวิ่งไปผิวชิ้นงาน (ขั้วบวก) และจะไปตั้งอะตอมของเหล็ก (Fe^{2+}) ให้หลุด

ออกจากผิวของชิ้นงานและทำปฏิกิริยากลายเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และบางส่วนกลายเป็น FeCl_2 ซึ่งสารทั้งสองมีลักษณะเป็นตะกอนของแข็ง ในขณะที่ไฮโดรเจน (H^+) จะวิ่งไปที่ผิวอิเล็กโทรด (ขั้วลบ) และรวมตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ส่วนโซเดียมจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์กลายเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบว่า อะตอมของโลหะสามารถถูกนำออกจากผิวชิ้นงานได้โดยไม่เกิดการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน และยังพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ ดังนั้นเมื่อไม่มีการสัมผัสจึงไม่เกิดความร้อนสูง และไม่เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรดซึ่งเป็นจุดเด่นของการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการผลิตชิ้นงาน ปัจจุบันกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายกระบวนการผลิต เช่นการเจียรนัยผิวชิ้นงาน (Grinding) [3] กระบวนการสร้างผิวที่มีความซับซ้อน (Die-sinking) [4] การเจาะรูขนาดเล็กที่มีความยาวสูง (STED) [5] เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการผลิตชิ้นงาน โดยกระบวนการกัด (Milling) ยังไม่ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากความยากในการควบคุมพารามิเตอร์ในระหว่างการผลิตซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำของขนาดชิ้นงาน อย่างไรก็ตามยังมีความพยายามในการวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้าเคมีให้สามารถใช้ในการผลิตชิ้นงานได้จริง Kozak และคณะ [6] ได้ทำการสร้างผิวชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นผิวโค้งโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่ด้านปลาย Ruszaj และคณะ [7] ได้ใช้อิเล็กโทรดที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อทำการปาดผิวหน้าของชิ้นงาน จากการศึกษาทดลองพบว่าค่าความหยาบของผิว (surface roughness) ขึ้นอยู่กับระยะห่างของแนวทางเดินของอิเล็กโทรด (step-over distance) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pattavanitch และคณะ [8] ในการทดลองสร้างร่องกัดในแนวแกนและในแนวรัศมีของอิเล็กโทรด Kim และคณะ [9] ได้ทำการออกแบบ และ

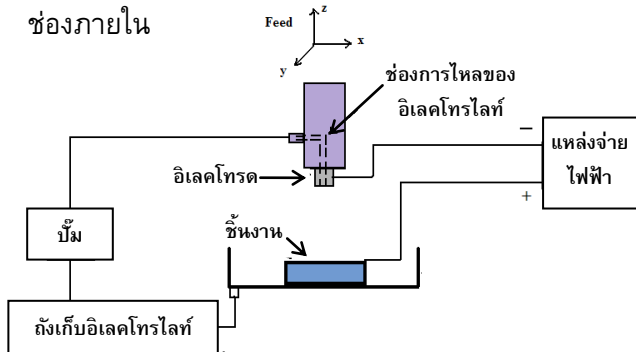
สร้างหัวอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็ก (60 ไมโครเมตร) เพื่อใช้ในการสร้างร่องกัดและหลุมกัด (Pocket) ที่มีขนาดเล็กไม่เกิน 1 มิลลิเมตร Pattavanitch [10] ได้แสดงถึงความความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อกัดชิ้นงานเพื่อสร้างหลุมกัด และหลุมกัดที่มีรอยนูนตรงกลาง (pocket with protrusion) โดยการใช้แท่งอิเล็กโทรดทรงกระบอกตัน

ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้นำเสนอถึงความความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการกัดชิ้นงาน แต่การทดลองทั้งหมดนั้นได้อิเล็กโทรดทรงตันโดยที่อิเล็กโทรไลต์จะถูกบังคับให้ไหลจากหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอกอิเล็กโทรด การไหลของอิเล็กโทรไลต์ออกจากหัวฉีดไปสู่ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กโทรไลต์ไหลปะทะอิเล็กโทรดเป็นสาเหตุให้อิเล็กโทรไลต์ไหลไม่ทั่วตลอดช่องว่าง ส่งผลให้อัตราการกัดชิ้นงานมีค่าไม่สม่ำเสมอในแต่ละตำแหน่งบนผิวชิ้นงาน [10] จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้แก้ปัญหาโดยกำหนดให้อิเล็กโทรไลต์ไหลจากภายในอิเล็กโทรดเพื่อให้อิเล็กโทรไลต์สามารถไหลภายในช่องระหว่างผิวอิเล็กโทรดและชิ้นงานอย่างทั่วถึง โดยทำการสร้างช่องการไหลภายในอิเล็กโทรด ส่งผลให้อิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกลวง แต่เนื่องจากเมื่อรูปทรงของอิเล็กโทรดจะส่งผลต่ออัตราการกัดวัสดุในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองสร้างรูปร่างของการกัด (milling feature) ซึ่งได้แก่ร่องกัด (slot) โดยใช้อิเล็กโทรดทรงกลวง โดยจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบรูปร่างของร่องกัดที่ถูกสร้างโดยใช้อิเล็กโทรดทรงกลวงและทรงตัน ที่อัตราการป้อนอิเล็กโทรดต่างกัน

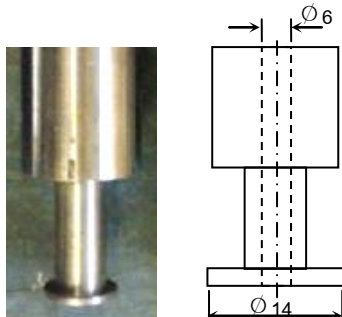
2. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยโต๊ะจับยึดชิ้นงานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แนวแกน (ทิศทาง x, y และ z) ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย

คอมพิวเตอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและชุดควบคุมการไหลอิเล็กโทรไลต์ ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับแท่งอิเล็กโทรดในการทดลองนั้น จะเลือกใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูป โดยทั่วไปจะใช้ทองแดง หรือ สแตนเลส แต่เนื่องจากทองแดงสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำก่อให้เกิดคราบบนผิวอิเล็กโทรดซึ่งจะขัดขวางการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ส่วนวัสดุที่ใช้สำหรับชิ้นงานนั้นจะต้องทนทานต่อการเกิดสนิมเนื่องจากจะต้องสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้สแตนเลสเกรด 316 (SS-316) เป็นวัสดุสำหรับอิเล็กโทรดและชิ้นงาน อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบ แบบแรกเป็นทรงกลวงซึ่งจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่ปลายมีลักษณะเป็นแผ่นจานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องภายใน 6 มิลลิเมตร (รูปที่ 3) ส่วนแบบที่สองนั้นจะเป็นทรงตันคล้ายกับแบบแรกแต่จะไม่มีช่องภายใน



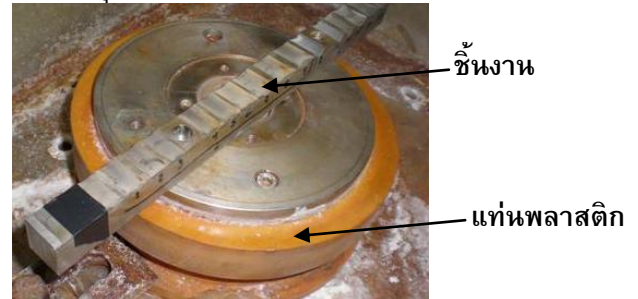
รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3 อิเล็กโทรด

ชิ้นงานซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งโลหะขนาด กว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร รูปที่ 4 โดยชิ้นงานจะถูกวางบนแท่นพลาสติกก่อนที่จะ

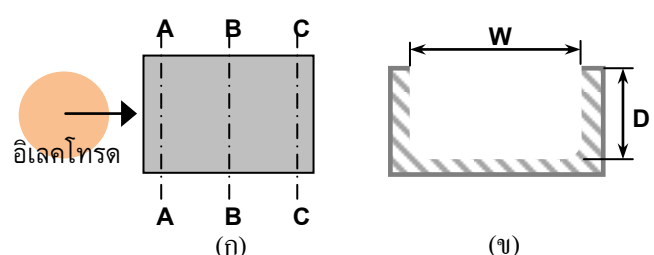
ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้า ป้องกันความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าที่อาจจะรั่วเข้าสู่วงจรควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 4 ชิ้นงานและการจับยึด

อิเล็กโทรไลต์จะใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ที่ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตร โดยที่อิเล็กโทรไลต์จะไหลจากถังเก็บผ่านตัวกรองเพื่อกรองตะกอนของเหล็อกจากปฏิกิริยาเคมี ผ่านวาล์วควบคุมการไหล แล้วจึงไหลเข้าสู่หัวอิเล็กโทรด ในการทดลองอัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 11 ลิตรต่อวินาทีเพื่อที่จะสามารถชำระตะกอนที่เกิดขึ้นให้หลุดออกจากผิวชิ้นงาน

ในการสร้างร่องกัด เริ่มต้นกำหนดให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่จากภายนอกชิ้นงาน (รูปที่ 5(ก)) จนกระทั่งเคลื่อนที่ออกนอกชิ้นงาน โดยอัตราการป้อน (Feed rate) ของอิเล็กโทรดที่ทำการพิจารณามีค่าเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร/นาที ค่าความต่างศักย์ (Applied voltage) 17 โวลต์ ช่องว่างเริ่มต้น (Initial gap) ระหว่างผิวด้านปลายของอิเล็กโทรดกับผิวของชิ้นงาน 0.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 (ก)หน้าตัดที่พิจารณา (ข) พารามิเตอร์ร่องกัด

ในการวัดรูปร่างของร่องกัด จะทำการวัดรูปร่างหน้าตัดของร่องกัดที่ตำแหน่งที่หัวอิเล็กโทรดเคลื่อนที่เข้า-ออก ซึ่งห่างจากขอบชิ้นงาน 5 มิลลิเมตร (หน้าตัด A-A และ C-C) และตรงกลางชิ้นงาน (หน้าตัด B-

B) (รูปที่ 5(ก)) โดยรูปร่างของหน้าตัดจะถูกวัดจากการใช้การสแกนวัตถุโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ซึ่งมีความละเอียดในการวัดเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ตัวแปรของร่องกัดที่ทำการศึกษาได้แก่ ความลึก (D) และความกว้าง (W) (รูปที่ 5(ข))

3. ผลการทดลอง

ตัวอย่างของร่องกัดที่ถูกสร้างขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงแสดงได้ดังรูปที่ 6 รูปร่างร่องกัดที่ถูกสร้างขึ้นจากการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงและทรงตันที่ความเร็วการป้อนอิเล็กโตรดเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร/นาที ที่ตำแหน่งทางเข้า (หน้าตัด A-A) กึ่งกลาง (หน้าตัด B-B) และทางออก (หน้าตัด C-C) ของชิ้นงาน แสดงได้ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 ตามลำดับ ความกว้าง (W) ความลึกสูงสุด (D) และความลึกบริเวณกึ่งกลางของร่องกัด (Dm) แสดงได้ดังตารางที่ 1

จากการพิจารณารูปร่างของร่องกัดที่ถูกสร้างจากการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงพบว่า ในทุกหน้าตัด (รูปที่ 7) ความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากการใช้อิเลคโตรดแบบกลวงจะมีค่าไม่คงที่ตลอดความกว้างของร่องกัด โดยที่ความลึกที่บริเวณด้านข้างของร่องกัดจะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณกึ่งกลาง (ตัวอย่างเช่นที่หน้าตัด A-A (รูปที่ 7(ก)) ที่อัตราป้อนอิเล็กโตรด 4 มิลลิเมตร/นาที ร่องกัดมีความลึกที่บริเวณด้านข้างเท่ากับ 0.64 มิลลิเมตร ขณะที่กึ่งกลางเท่ากับ 0.51 มิลลิเมตร) ผลของความลึกที่เปลี่ยนแปลงตลอดความกว้างร่องกัดทำให้ผิวของร่องกัดมีลักษณะไม่ราบเรียบแต่จะเป็นลักษณะผิวหูนซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางร่องกัด ตรงข้ามกับช่องการไหลของอิเล็กโตรไลต์ ส่วนความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงตันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่งผลให้ผิวร่องกัดมีลักษณะเป็นผิวราบ (รูปที่ 8(ก))

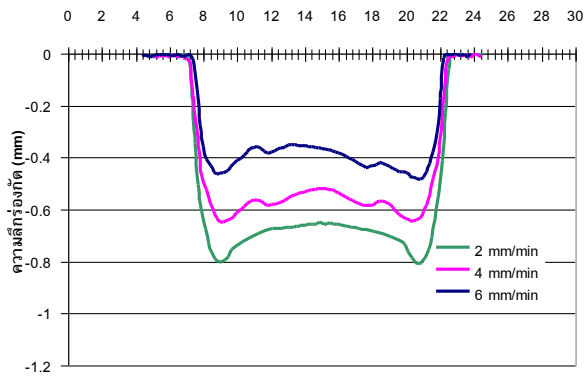
ในการพิจารณาความกว้างและความลึกตลอดความยาวร่องกัดพบว่า ความกว้างและความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงจะมี

ค่าเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของร่องกัด โดยที่ค่าทั้งสองจะมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางชิ้นงาน (หน้าตัด B-B) และมีค่าใกล้เคียงกันที่ทางเข้าและทางออกของชิ้นงาน (หน้าตัด A-A และ C-C) ตัวอย่างเช่นที่อัตราป้อนอิเล็กโตรด 4 มิลลิเมตร/นาที (รูปที่ 7) พบว่าความลึกที่กลางร่องกัดที่ทางเข้า กึ่งกลาง และทางออกของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.51, 0.73 และ 0.50 มิลลิเมตร และความกว้างของร่องกัดมีค่าเท่ากับ 15.20, 18.12 และ 15.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขณะที่ความกว้างและความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงตัน จะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวร่องกัด และมีค่ามากกว่าความกว้างและความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงกลวง เช่นที่อัตราการป้อนอิเล็กโตรด 4 มิลลิเมตร/นาที (รูปที่ 8) ความกว้างของร่องกัดที่ทางเข้า กึ่งกลาง และทางออกของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 18.91, 19.11 และ 18.58 มิลลิเมตร และความลึกของร่องกัดมีค่าเท่ากับ 0.85, 0.86 และ 0.86 มิลลิเมตร ตามลำดับ

อัตราป้อนของอิเล็กโตรดมีผลต่อความกว้างและความลึกของร่องกัด กล่าวคือเมื่ออัตราป้อนของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความกว้างและความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทั้งสองรูปทรงมีค่าลดลง ตัวอย่างเช่น เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มจาก 2 ไปยัง 6 มิลลิเมตร/นาที ความลึกร่องกัดที่กึ่งกลางชิ้นงาน (หน้าตัด B-B) ที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงกระบอกลดลงจาก 0.98 ไปเป็น 0.55 และความกว้างลดลงจาก 22.23 ไปเป็น 15.88 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนความลึกร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงกระบอกตันลดลงจาก 1.03 ไปเป็น 0.61 และความกว้างลดลงจาก 22.33 ไปเป็น 17.01 มิลลิเมตร ตามลำดับ

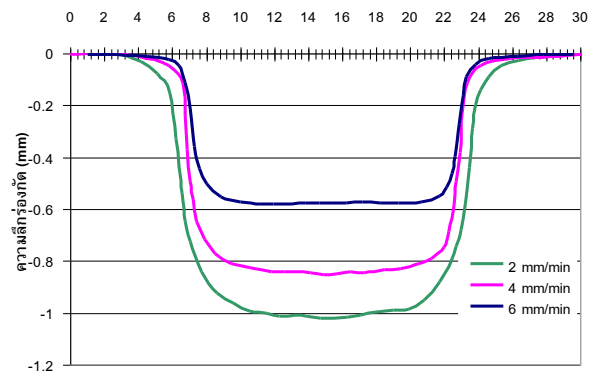


รูปที่ 6 ร่องกัดบนผิวชิ้นงาน



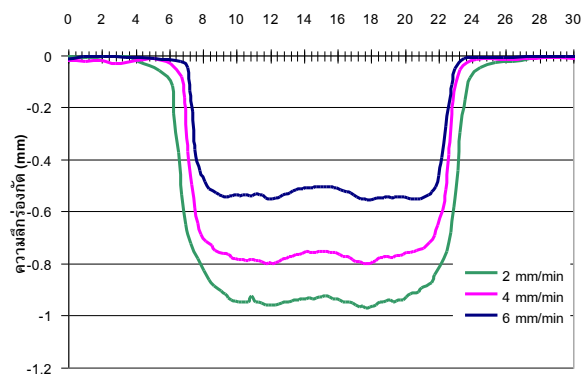
ความกว้างร่องกัด (mm)

(ก) หน้าตัด A-A



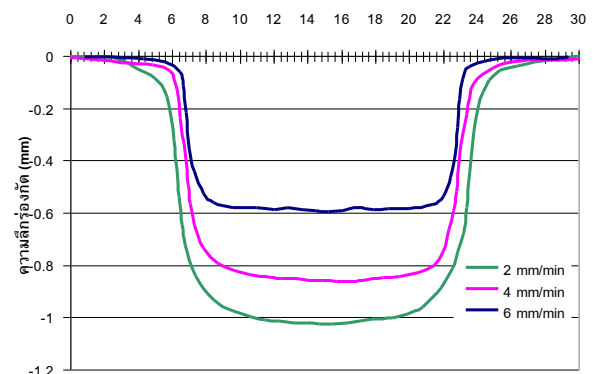
ความกว้างร่องกัด (mm)

(ก) หน้าตัด A-A



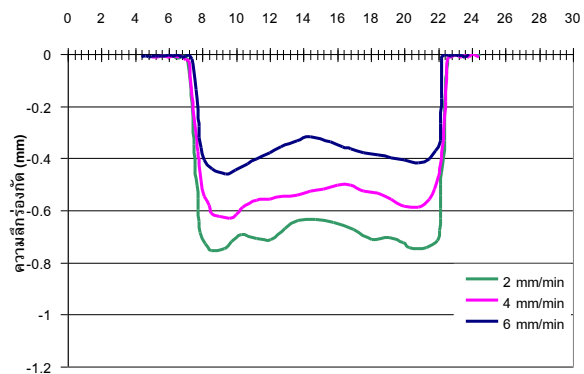
ความกว้างร่องกัด (mm)

(ข) หน้าตัด B-B



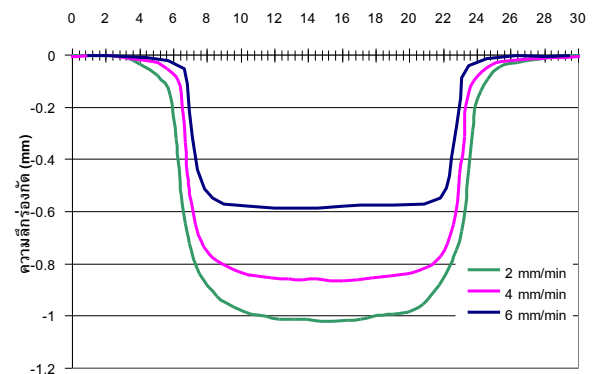
ความกว้างร่องกัด (mm)

(ข) หน้าตัด B-B



ความกว้างร่องกัด (mm)

(ค) หน้าตัด C-C



ความกว้างร่องกัด (mm)

(ค) หน้าตัด C-C

รูปที่ 7 หน้าตัดของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงกลวง

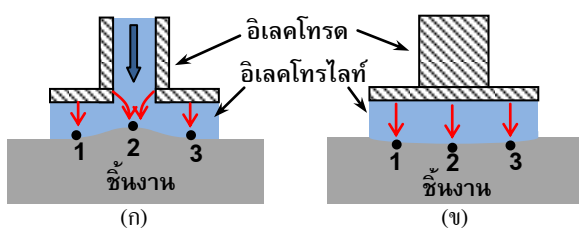
รูปที่ 8 หน้าตัดของร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงตัน

ตารางที่ 1 แสดงค่าความกว้าง (W) ความลึกต่ำสุด (D) และความลึกบริเวณกึ่งกลาง (Dm) ของร่องกัด (หน่วยมิลลิเมตร)

อัตราป้อน mm/min	หน้าตัด A-A						หน้าตัด B-B						หน้าตัด C-C					
	อิเล็กโทรดทรงกลวง			อิเล็กโทรดทรงตัน			อิเล็กโทรดทรงกลวง			อิเล็กโทรดทรงตัน			อิเล็กโทรดทรงกลวง			อิเล็กโทรดทรงตัน		
	W	D	Dm	W	D		W	D	Dm	W	D		W	D	Dm	W	D	
2	15.81	0.79	0.67	21.21	1.02		22.23	0.98	0.94	22.33	1.03		15.74	0.76	0.65	21.29	1.02	
4	15.20	0.64	0.51	18.91	0.85		18.12	0.79	0.73	19.11	0.86		15.40	0.63	0.50	18.58	0.86	
6	14.80	0.48	0.35	16.92	0.58		15.88	0.55	0.49	17.01	0.61		14.80	0.44	0.30	16.86	0.59	

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการที่ความลึกของร่องกัดที่ถูกสร้างจากการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงมีค่าไม่คงที่ตลอดความกว้างของร่องกัด ซึ่งต่างจากผิวของร่องกัดที่ถูกสร้างจากการใช้อิเลคโตรดทรงตัน สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี อัตราการกัดวัสดุจะแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างผิวของอิเลคโตรดกับผิวชิ้นงาน [3] ในกรณีการใช้อิเลคโตรดทรงกลวงเพื่อกัดชิ้นงาน ระยะห่างระหว่างผิวของอิเลคโตรดกับผิวชิ้นงานจะมีค่าไม่คงที่ตลอดความกว้างของอิเลคโตรด ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) พิจารณาระยะห่างระหว่างผิวของอิเลคโตรดกับผิวชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 พบว่าผิวของชิ้นงานที่ตำแหน่ง 1 และ 3 จะอยู่ใกล้ผิวของอิเลคโตรด มากกว่าตำแหน่งที่ 2 ซึ่งอยู่ตรงกับช่องการไหลของอิเลคโตรไลต์ ดังนั้นอัตราการกัดวัสดุที่ตำแหน่ง 1 และ 3 จึงมีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่ 2 ส่งผลให้ ชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 1 และ 3 มีความลึกกว่าตำแหน่งที่ 2 จึงเป็นสาเหตุให้ผิวของร่องกัดมีลักษณะเป็นผิวขรุขระบริเวณกึ่งกลางของร่องกัด ในกรณีที่ใช้อิเลคโตรดทรงตันในการสร้างร่องกัด เนื่องจากไม่มีช่องการไหลภายในอิเลคโตรด ทำให้ระยะห่างระหว่างผิวของอิเลคโตรดกับผิวชิ้นงานมีค่าคงที่ (รูปที่ 9 (ข)) ส่งผลให้อัตราการกัดวัสดุในแต่ละจุดมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ความลึกในการกัดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ผิวของร่องกัดมีลักษณะเป็นผิวราบ

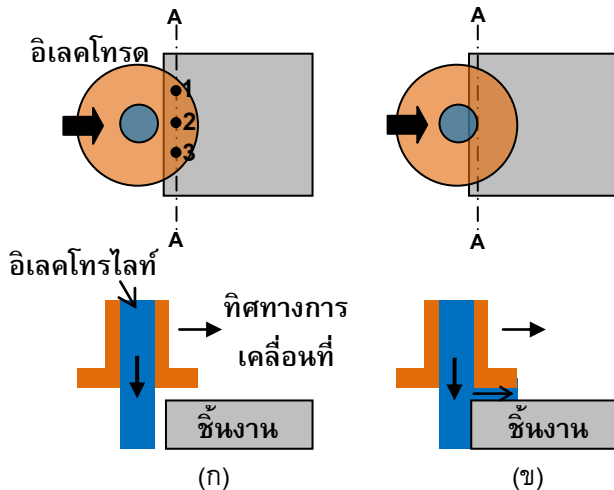


รูปที่ 9 ภาพจำลองแสดงระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานกับอิเลคโตรด (ก) ทรงกลวง (ข) ทรงตัน

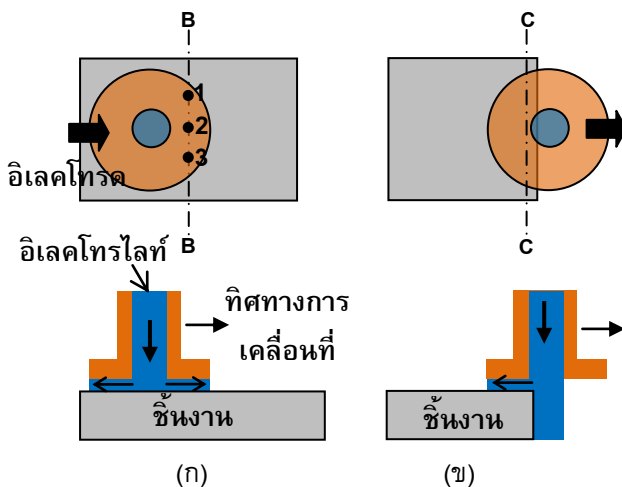
การใช้อิเลคโตรดแบบกลวงในการสร้างร่องกัดไม่เพียงแต่จะส่งผลให้ผิวร่องกัดมีลักษณะเป็นผิวขรุขระ แต่ยังส่งผลให้ความลึก และความกว้างของร่องกัดมีค่าไม่

คงที่ตลอดความยาวของร่องกัด ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอิเลคโตรไลต์ที่มีค่าไม่คงที่ในขณะที่อิเลคโตรดกำลังเคลื่อนที่เพื่อสร้างร่องกัดบนชิ้นงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 10 ในขณะที่อิเลคโตรดกำลังเคลื่อนที่เข้าสู่ชิ้นงานถึงแม้ว่าได้มีบางส่วนของอิเลคโตรด เคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัด A-A (รูปที่ 10 (ก)) อย่างไรก็ตามวัสดุบนหน้าตัดดังกล่าวยังคงไม่ถูกกัดออกเนื่องมาจากอิเลคโตรไลต์ยังไม่ไหลเข้าสู่ช่องระหว่างอิเลคโตรดกับชิ้นงาน (เนื่องจากช่องการไหลอิเลคโตรไลต์ยังไม่เคลื่อนที่ไม่ถึงชิ้นงาน) เมื่ออิเลคโตรดเคลื่อนที่ต่อจนกระทั่งตำแหน่งช่องการไหลอิเลคโตรไลต์ยังเคลื่อนถึงชิ้นงาน (รูปที่ 10 (ข)) อิเลคโตรไลต์บางส่วนจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างผิวของอิเลคโตรดกับผิวชิ้นงานและปฏิกิริยาเคมีจึงเริ่มขึ้นส่งผลให้กระบวนการกัดวัสดุเริ่มขึ้น ในขณะที่อิเลคโตรดเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัด B-B (รูปที่ 11(ก)) ซึ่งพบว่าได้มีอิเลคโตรไลต์ไหลอยู่ภายในช่องว่างอยู่แล้ว ดังนั้นกระบวนการกัดวัสดุจึงเริ่มต้นตั้งแต่อิเลคโตรดเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัดและสิ้นสุดเมื่ออิเลคโตรดเคลื่อนออกจากหน้าตัด และในขณะที่อิเลคโตรดกำลังเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงาน (หน้าตัด C-C) กระบวนการกัดวัสดุเกิดขึ้นตั้งแต่อิเลคโตรดเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัดและสิ้นสุดเมื่อช่องการไหลอิเลคโตรไลต์เคลื่อนที่ออกจากหน้าตัดถึงแม้ว่ายังมีบางส่วนของอิเลคโตรดอยู่เหนือชิ้นงาน (รูปที่ 11(ข)) ดังนั้นจึงพบว่าช่วงเวลาการเกิดกระบวนการกัดวัสดุที่หน้าตัด B-B มากกว่าที่หน้าตัด A-A และ C-C ส่งผลให้ความลึกและความกว้างของร่องกัดที่ หน้าตัด B-B มีค่ามากที่สุด ในกรณีของการใช้อิเลคโตรดแบบทรงตันซึ่งอิเลคโตรไลต์จะไหลจากหัวฉีดเข้าสู่ช่องระหว่างอิเลคโตรดและชิ้นงานตลอดการเคลื่อนของอิเลคโตรด (รูปที่ 12) ดังนั้นกระบวนการกัดวัสดุจึงเกิดขึ้นตั้งแต่อิเลคโตรดเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ชิ้นงานจนกระทั่งสิ้นสุดเมื่อเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงาน ส่งผลให้ช่วงเวลาในการกัดวัสดุในแต่ละหน้าตัดมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ความกว้างและความลึกของร่องกัดมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวร่องกัด

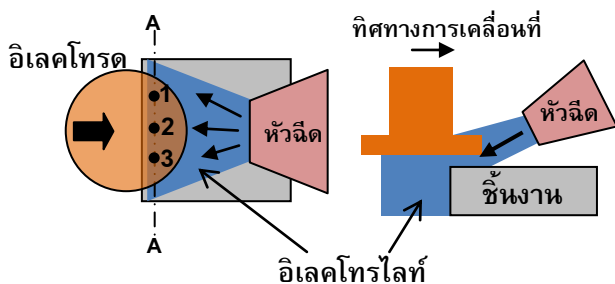
เมื่ออัตราการป้อนของอิเล็กโตรดลดลงส่งผลให้เวลาในการกัดวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลให้วัสดุถูกในปริมาณเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความลึกและความกว้างของร่องกัดมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กโตรด (ก) เมื่อเริ่มเข้าชิ้นงาน (ข) เมื่อเริ่มกระบวนการกัดวัสดุ



รูปที่ 11 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กโตรด (ก) เมื่ออยู่บริเวณกลางชิ้นงาน (ข) เมื่อเริ่มออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 12 แสดงการไหลของอิเล็กโตรไลต์เมื่อใช้หัวฉีด

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การใช้อิเล็กโตรดทรงกลวงในการสร้างร่องกัดส่งผลให้ความลึกของร่องกัดมีค่าไม่คงที่ตลอดความกว้างและความยาวร่องกัด โดยความลึกที่ตรงข้ามกับช่องการไหลอิเล็กโตรไลต์จะมีค่าน้อยสุด ส่งผลให้ผิวของร่องกัดเป็นผิววนที่บริเวณดังกล่าว ความลึกและความกว้างร่องกัดที่กึ่งกลางชิ้นงานมีค่ามากกว่าที่บริเวณทางเข้าและทางออกของอิเล็กโตรด ในขณะที่ร่องกัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโตรดทรงตันจะมีความลึกคงที่ตลอดความกว้างและความยาวร่องกัด

เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ศึกษาเฉพาะผลกระทบของการใช้อัตราการป้อนอิเล็กโตรดที่แตกต่างกันต่อรูปร่างของร่องกัด แต่ในกระบวนการผลิตด้วยวิธีไฟฟ้าเคมียังมีตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อรูปร่างของงานกัดเช่น ความต่างศักย์ ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานและผิวอิเล็กโตรด เป็นต้น ดังนั้นตัวแปรดังกล่าวจึงควรที่จะถูกนำมาพิจารณาในการศึกษาถึงผลกระทบต่อรูปร่างร่องกัดต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hiroshi Toriya. (2008). 3D Manufacturing Innovation, Springer-Verlag.
- [2] McGeough, J.A. (1988). *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, London
- [3] McGeough, J.A. (1975). *Principles of Electrochemical Machining*, Chapman and Hall.
- [4] DeBarr, A.E. & Oliver, D.A. (1968) *Electrochemical machining*, Macdonald & Co, Great Britain.
- [5] Bilgi, D.S., Jain, V.K., Shekhar, R, and Mehrotra, S. (2004). Electrochemical deep hole drilling in super alloy for turbine application, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 445-452
- [6] Jerzy Kozak, Maria Chuchro, Adam Ruszaj, Krzysztof Karbowski. (2000). The computer aided

simulation of electrochemical process with universal spherical electrodes when machining sculptured surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 107, pp. 283 – 287.

[7] Adam Ruszaj, Maria Zybura-Skrabalak. (2001).

The mathematical modelling of electrochemical machining with flat ended universal electrodes, *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 109, pp. 333 – 338.

[8] J. Pattavanitch, S. Hinduja and J. Atkinson.

(2010). Modelling of the electrochemical machining process by the boundary element method, *CIRP Annals*, vol. 59(1), pp 243-246

[9] Kim, B.H., Ryu, S.H., Choi, D.K., and Chu, C.N. (2005). Micro electrochemical milling, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp.124-129.

[10] Pattavanitch J. (2011). *Numerical and Experimental investigations into Electrochemical Machining*, Ph.D thesis, The University of Manchester.