

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

ระบบหัวพิมพ์ที่ใช้เปียโซขับสำหรับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ (Piezo Actuated Print Head System for Drop-On-Demand Printer)

มนัสพงษ์ มั่งไกร้ และ มานะ แซ่ด่าน*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 053-944-146, โทรสาร: 053-944-145

E-mail: mana@chiangmai.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการสร้างระบบหัวพิมพ์หมึกวัสดุโครงสร้างสำหรับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ (Drop-On-Demand) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งสำหรับเครื่องขึ้นรูปต้นแบบเร็ว (Rapid Prototype machine) ด้วยการหยดวัสดุจากหัวพิมพ์ลงบนพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานทีละชั้น ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีในแง่ของการเลือกใช้วัสดุโครงสร้างที่หลากหลาย โดยระบบหัวพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ชุดหัวพิมพ์ที่มีตัวทำงาน (Actuator) เป็นท่อเปียโซ (Piezo Tube) สวมอยู่บนท่อพลาสติกทึบสารเคมีซึ่งปลายทั้งสองด้านติดกับหัวพิมพ์ที่สามารถเปลี่ยนขนาดของรูออกได้และถึงเก็บสาร ชุดจ่ายสัญญาณไฟฟ้าสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับท่อเปียโซและชุดส่งลมที่จ่ายลมแบบสุญญากาศ (Negative Pressure) เพื่อไม่ให้หมึกหยดลงมาเองเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ระบบหัวพิมพ์มีหลักการทำงานคือ เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้กับท่อเปียโซ จะเกิดการบีบและกลายเป็นจังหวะซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหยดของหมึกออกมาจากหัวพิมพ์ โดยสารที่ใช้ในการทดสอบขั้นต้นคือน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งผลการทดสอบการหยดพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ ± 120 โวลต์ หัวพิมพ์จะทำการหยดน้ำลงมา ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบหัวพิมพ์ที่มีจำนวนหัวพิมพ์มากกว่าหนึ่งหัวเพื่อรองรับการใช้งานที่ต้องการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิดต่อไป

คำหลัก: หัวพิมพ์, ระบบหยดหมึกตามประสงค์, การขึ้นรูปต้นแบบเร็ว

Abstract

This paper discusses the development of the print-head system for drop-on-demand printer. Our drop-on-demand printer is being used for rapid prototyping applications that fabricate objects layer-by-layer. The advantage of the drop-on-demand printing over other existing techniques is that it can incorporate multi-materials to create a single object. Our print-head is made based on "squeeze mode" actuation that utilizes a piezo tube as an actuator. The print-head is designed to be nozzle or reservoir interchangeable. The result of experimental, print head can dropped on generate voltage = ± 120 Volt. The print-head functional is verified using pure water is a printing media. The success of our development can be applied directly to multi-material dispensing.

Keywords: Print Head, Drop-On-Demand system, Rapid Prototype

1. บทนำ

การสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid prototyping) คือเทคโนโลยีการผลิตโดยการสร้างแบบจำลองทางกายภาพจากคอมพิวเตอร์ซึ่งจะแบ่งวัตถุเป็นชั้นๆตามภาพตัดขวาง แล้วขึ้นรูปแบบต่อเนื่องจนสมบูรณ์เพื่อทำการก่อสร้างทางกายภาพของวัตถุโดยอัตโนมัติด้วยเครื่องขึ้นรูปต้นแบบเร็ว เป็นวิธีการผลิตที่นิยมมากขึ้นในโรงอุตสาหกรรมการผลิตเนื่องจากเป็นกรรมวิธีในการผลิตที่สามารถสร้างชิ้นงานได้โดยตรงก่อนการผลิตและลดต้นทุนลงจากการผลิตแบบเดิมคือการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Mold) ได้มาก อีกทั้งยังเพิ่มในส่วนของคุณภาพถูกต้องแม่นยำและความได้เปรียบด้านการแข่งขันทางการตลาดในเรื่องของความหลากหลายของชิ้นงานในการผลิต เนื่องจากไม่ต้องทำแม่พิมพ์ใหม่

ปัจจุบันการสร้างต้นแบบเร็วโดยทั่วไปนั้น มีกระบวนการและกรรมวิธีแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 8 วิธีโดยแบ่งความแตกต่างของระบบการทำงานขึ้นรูป และวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตารางที่ 1 กรรมวิธีต่างๆ ในการผลิตด้วยเทคโนโลยีต้นแบบอย่างรวดเร็ว

Selective Laser Sintering (SLS)	Thermoplastics ,ผงโลหะ
Fuse Deposition Molding (FDM)	Thermoplastics,Eutectic,โลหะ
Stereolithography (SLA)	Liquid Photopolymer
Laminate Object Manufac. (LOM)	กระดาษ, พลาสติก
Electron Beam Melting (EBM)	โลหะผสมไทเทเนียม
3D Printing (3DP)	Photopolymer, วัสดุต่างๆ
Multi Jet Modeling (MJM)	Liquid Photopolymer
Direct Shell Production Casting (DSPC)	Ceramics

เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ (Drop-On-Demand inkjet printer) เป็นแขนงหนึ่งของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตต้นแบบรวดเร็วโดยมีหลักการที่ประยุกต์มาจากการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีอิงค์เจทของเครื่องพิมพ์แบบทั่วไป ซึ่งเป็นการหยดหมึกพิมพ์ตามภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบลงบนฐานวางชิ้นงานได้ตามที่ต้องการสามารถรองรับเทคโนโลยีการขึ้นรูปได้สองวิธีคือ

-วิธี 3D Printing (3DP) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปขึ้นการโดยการฉีดน้ำยาประสานลงบนผผโครงสร้าง เพื่อให้ผงวัสดุแต่ละชั้นเกาะตัวกันกลายเป็นการขึ้นรูปชิ้นงาน

- วิธี Multi Jet Modeling (MJM) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการหยดสารที่เป็นของเหลวประเภท Photopolymer หรือ Resin ที่ละชั้นและทำการฉายแสง UV ไปพร้อมๆกับการหยดเพื่อให้วัสดุแข็งตัว

เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ นั้น มีข้อดีคือ 1) ความแม่นยำในการหยดหมึกพิมพ์เพื่อสร้างชิ้นงาน 2) ประหยัดหมึกที่ใช้ในการขึ้นรูปต้นแบบ 3) สามารถรองรับหมึกพิมพ์สารเพื่อขึ้นรูปได้หลากหลาย 4) ใช้เวลาขึ้นรูปสั้นกว่าเครื่องผลิตต้นแบบเร็วแบบอื่นๆ โดยที่เครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์นั้นประกอบด้วยระบบเคลื่อนที่ในแนวระนาบ หรือระบบเคลื่อนที่ในแกน x-y ระบบควบคุมและติดต่อกับคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและระบบชุดหัวพิมพ์

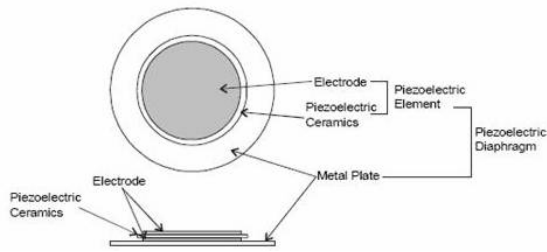
ในรายงานนี้จะกล่าวถึงการพัฒนากระบวนการชุดหัวพิมพ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เป็นหัวใจหลักของเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ โดยจะเป็นตัวกำหนดความแม่นยำในการพิมพ์และการใช้สารตั้งต้นอย่างมีประสิทธิภาพ ใน [1] เป็นการพัฒนาเครื่องต้นแบบรวดเร็วโดยใช้หยดน้ำเป็นวัสดุโครงสร้างและใช้หัวพิมพ์ชนิดที่มีอุปกรณ์ปล่อยความดันที่สามารถปรับค่าได้เมื่อให้ความดันค่าหนึ่งหมึกก็จะหยดลงมา [2] ได้สร้างและนำเสนอเครื่องหยดหมึกโดยวิธี piezoelectric ซึ่งเป็นชนิดที่เป็นการกดเพื่อให้เกิดการหยดหมึก (Push mode actuator) ส่วน [3]

สร้างหัวพิมพ์โดยใช้เปียโซชนิดที่เป็นแบบบีบเพื่อให้เกิดการหยด (Squeeze mode actuator)

ในเชิงพาณิชย์ทั่วไปในปัจจุบันนั้น ระบบชุดหัวพิมพ์กลับเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาสูงและเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างปิด คณะนักวิจัยจึงได้นำปัญหานี้มาทำการออกแบบและพัฒนาเพื่อสร้างระบบชุดหัวพิมพ์ให้กับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ที่สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และมีต้นทุนต่อหน่วยที่ต่ำกว่าระบบชุดหัวพิมพ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. Piezoelectric



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของ Piezoelectric

Piezoelectric [4] เป็นวัตถุที่ผสมกันระหว่างเซรามิกกับสารที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ซึ่งผลึกเปียโซที่นิยมใช้กันคือ ผลึกควอตซ์ (Single Crystal Quartz) ซึ่งมีคุณสมบัติคือเมื่อถูกกระทำด้วยแรงหรือแรงดันเป็นห้วงๆ (Pulse) แล้วจะปล่อยแรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมา (จะไม่ปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาเมื่อเป็นความดันแบบสถิตย) และในทางกลับกันเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมลงบนพื้นผิวของ Piezoelectric ทำให้สถานภาพที่เป็นของแข็งของ Piezoelectric เกิดการสั่นสะเทือนและทำให้เกิดแรงดึงและผลักระหว่างกัน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (1)

$$E = DF/C \quad (1)$$

โดยที่ E = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม

F = แรงที่ดึงและผลัที่เกิดขึ้น

D = ค่าคงที่ความเครียดของ Piezoelectric

C = Capacitance ของ Piezoelectric

การใช้ Piezoelectric ในการหยดหมึก (Droplet) นั้นจะใช้เปียโซติดอยู่ที่ท่อบรรจุหมึกซึ่งเมื่อเกิดการบีบจะทำให้เกิดแรงบังคับให้หมึกพ่นออกมาจากหัวพ่นหมึก ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดของหยดหมึกได้ อีกทั้งไม่ต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจึงมีอิสระในการใช้หมึกได้หลากหลายกว่า

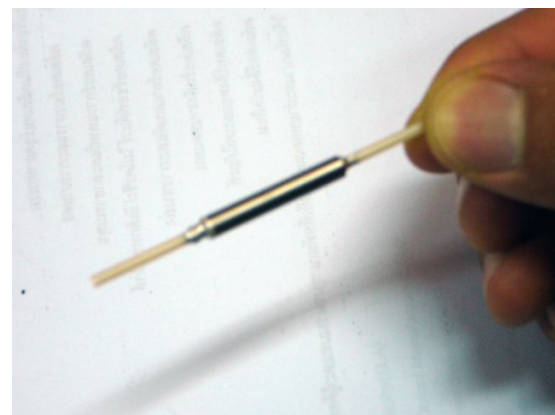
3. ขั้นตอนการพัฒนาระบบชุดหัวพิมพ์

ระบบชุดหัวพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์นั้นประกอบด้วย หัวพิมพ์ ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า และชุดจ่ายลม

3.1 หัวพิมพ์

หัวพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์นี้ประกอบด้วยส่วนย่อย หลายส่วนด้วยกัน

- ชุดขับหมึกให้พ่นออกมาซึ่งได้แก่ เปียโซ โดยใช้เปียโซ ซึ่งมีรูปร่างเป็นท่อกกลางสวมอยู่บนท่อพลาสติกซึ่งเป็นโพลิเมอร์ polyetheretherketone (PEEK) จากนั้นนำสายไฟมาเชื่อมต่อที่ผิวด้านนอกและด้านในของเปียโซ เพื่อใช้สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้า จากนั้นทำการเชื่อมติดเปียโซและท่อพลาสติกด้วยกาวอีพ็อกซีที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า (Conductive epoxy) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงภาพชุดขับหมึก ซึ่งประกอบด้วยเปียโซและท่อพลาสติก

- หัวฉีด (Nozzle) เริ่มจากการตัดหลอดแก้ว (Capillary tube) นำมาเชื่อมกับแผ่นออริฟิส (Orifice) ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จากนั้นนำหัวฉีดที่ได้ไป

สวมเข้ากับตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะคล้ายหัวเข็มฉีดยา
ยึดด้วยอีพอกซี ดังรูปที่ 3 เป็นหัวฉีดที่สามารถทำ
การถอดเปลี่ยนเพื่อเลือกขนาดของรูทางออกได้



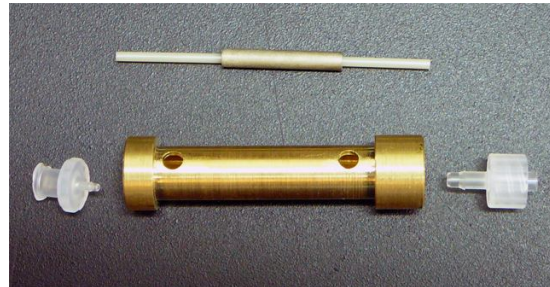
รูปที่ 3 แสดงภาพของหัวฉีดหลังจากทำการประกอบ
เสร็จแล้ว

- ถังเก็บสาร (Reservoir) เป็นที่สำรองหมึกและนำ
สารออกมาใช้ประกอบด้วย กระบอกฉีดยาขนาดเล็ก
และตัวเชื่อมต่อที่ปลายด้านหนึ่งต่อกับกระบอกฉีดยา
และต่อกับสายส่งลมอีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 4

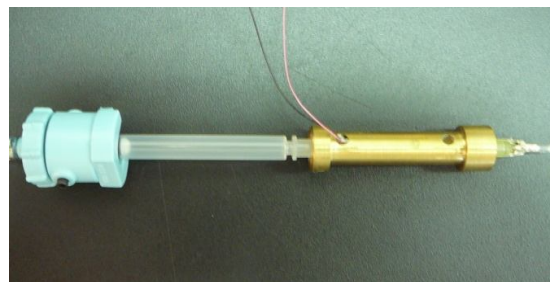


รูปที่ 4 แสดงส่วนของถังเก็บสาร

เมื่อนำทั้ง 3 ส่วนมาประกอบกันโดยนำชุดขับหมึก
มาใส่ลงในตัวครอบซึ่งทำจากทองเหลืองตามรูปที่ 5
โดยให้ปลายทั้งสองด้านต่อกันกับหัวพิมพ์และถังเก็บ
สารด้วยตัวเชื่อมต่อซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถ
ถอดเปลี่ยนทั้งหัวพิมพ์ และถังเก็บสารได้ในกรณีที่
ต้องการหัวพิมพ์ที่มีขนาดรูเล็กลง หรือเปลี่ยนสาร
ใหม่ หลังจากการประกอบแล้วทำการอุดรูด้วยกาวอี
พอกซี ตามรูปที่ 6



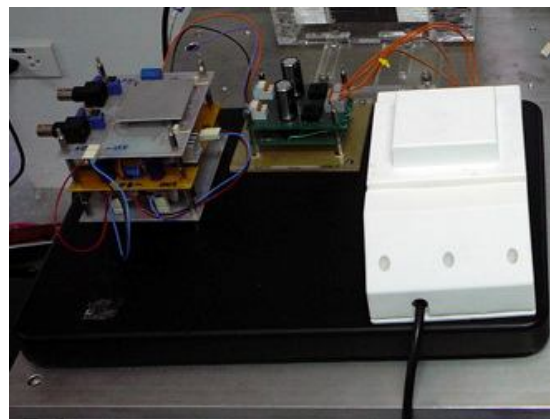
รูปที่ 5 แสดงตัวครอบทองเหลืองและตัวเชื่อมต่อ



รูปที่ 6 แสดงหัวพิมพ์หลังจากการประกอบ

3.2 ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ
สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงสุด ± 170 โวลต์ให้กับ
ท่อเป็ยโซ และยังมีส่วนที่เชื่อมต่อกับ เครื่องสร้างรูป
คลื่นสัญญาณ (Waveform generator) ซึ่งสร้างรูป
คลื่นสัญญาณแบบเป็นสัญญาณ ไบโพลาร์เพาส์
(Bipolar pulse) เพื่อให้แหล่งจ่ายไฟจ่ายแรงดันไฟฟ้า
แบบเป็นห้วงๆ ให้กับเป็ยโซอีกทั้งยังสามารถทำการ
เปลี่ยนแปลงรูปแบบของคลื่นได้อีกด้วย



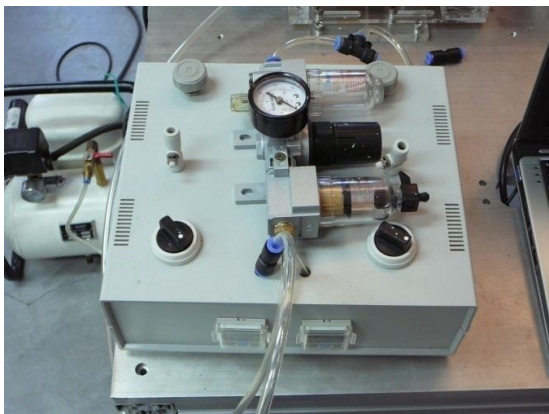
รูปที่ 7 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 8 แสดงภาพของเครื่องสร้างรูปคลื่น

3.3 ชุดจ่ายลม

จากรูปที่ 9 กล่าวถึงชุดจ่ายลมประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์และชุดจ่ายลมซึ่งถูกออกแบบให้ สามารถจ่ายลมได้ทั้งแบบลมดันออก (Positive pressure) และลมดูดกลับหรือสุญญากาศ (Negative pressure) ซึ่งใช้สวิตช์นิวแมติกซ์เป็นตัวควบคุม นอกจากนี้ยังมีตัวปรับความดันเพื่อปรับความดันให้ ฟ่นออกหรือดูดกลับให้เหมาะสม



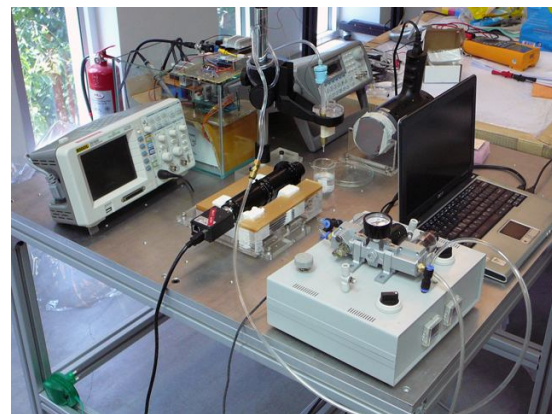
รูปที่ 9 แสดงภาพของชุดส่งลมกลับ

4. การทดสอบการทำงานของระบบหัวพิมพ์

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบว่าหัวพิมพ์ที่ผลิตขึ้น สามารถทำการหยดได้ตามหลักการทำงานหรือไม่ โดยระบบหัวพิมพ์นี้มีหลักการคือ เมื่อนำหมึกพิมพ์มา เก็บไว้ในถังเก็บหมึกแล้ว ชุดส่งลมดูดกลับจะทำการ จ่ายลมดูดกลับเพื่อไม่ให้สารหมึกพิมพ์นั้นหยดลงมา

เองเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นจึงใช้เครื่อง สร้างรูปคลื่นจ่ายสัญญาณเพื่อส่งไปยังแหล่งจ่ายไฟ และแหล่งจ่ายไฟจะส่งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไปยังเปีย โซ เพื่อให้เปียโซเกิดการสั่นและเกิดแรงผลักเพื่อบีบ ให้สารหมึกพิมพ์หยดลงมาจากหัวพิมพ์

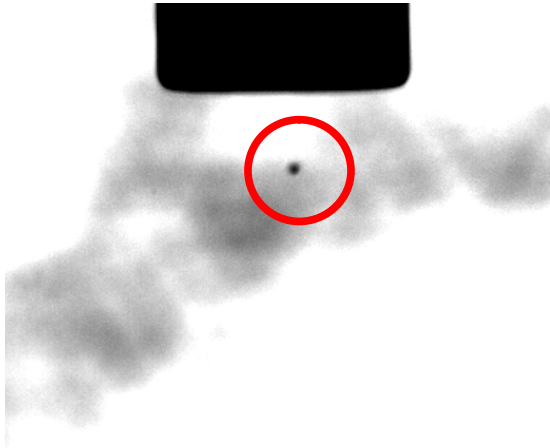
การทดสอบการทำงานนี้จะใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสาร หมึกพิมพ์ [1] ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของต้นทุนที่ต่ำเมื่อ เทียบกับสารอื่นอีกทั้งยังมีความสะอาดและไม่เกิดการ อุดตันกับหัวพิมพ์โดยน้ำมีความหนืดอยู่ที่ 0.89 centipoises ทำการหยดโดยควบคุมอุณหภูมิในห้อง ทดสอบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส หัวพิมพ์ที่มีขนาดรู ออก 50 ไมโครเมตร และอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ประกอบด้วย ชุดระบบหัวพิมพ์ กล้องจุลทรรศน์ เครื่องวัดสัญญาณ (Oscilloscope) สโตรโบสโคป (Stroboscope) สำหรับฉายแสงพร้อมทั้งสามารถปรับ ความถี่เพื่อจับภาพกล้องจุลทรรศน์ให้เหมือนหยุดนิ่ง



รูปที่ 10 แสดงโต๊ะอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการ ทำงานของระบบหัวพิมพ์

ทำการทดสอบการทำงานของระบบหัวพิมพ์โดย เริ่มจากสร้างรูปแบบของคลื่นในเครื่องสร้างฟังก์ชันซึ่ง ในการทดสอบนี้ ใช้ สัญญาณแบบสแควเวฟ (square wave) มีความถี่ 100 เฮิร์ต(Hz) และกำหนดแรงดัน เริ่มต้นที่ ± 80 โวลต์ สังเกตจากกล้องจุลทรรศน์ว่า หัวพิมพ์หยดหรือไม่ จากนั้นปรับขนาดของแรงดันให้ สูงขึ้นจนกว่าหัวพิมพ์จะทำการหยดสารซึ่งจากการ ทดสอบซ้ำไปซ้ำมาพบว่าถ้าจะทำให้เริ่มเกิดการหยด

สารนั้นจะต้องปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ ± 120 โวลต์ จะเกิดหยดน้ำหยดลงมา ซึ่งเกิดผลดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เพื่อแสดงการหยดสารของหัวพิมพ์โดยจุดสีดำใหญ่ในวงกลมคือหยดหมึก

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้แสดงถึงการสร้างระบบชุดหัวพิมพ์ที่ใช้เพียโซขับสำหรับเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์โดยที่ทดสอบการพิมพ์ด้วยการใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารหมึกพิมพ์ เนื่องจากบทความนี้เป็นการสร้างและทดสอบระบบหัวพิมพ์เพียโซว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ ซึ่งเป็นแนวทางขั้นต้นในการพัฒนาต่อไป กล่าวคือ สามารถนำหัวพิมพ์เพียโซนี้ไปใช้หยดสารหมึกพิมพ์อื่นๆ ที่มีค่าความหนืดแตกต่างกันไป โดยเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ ขนาดของรูทางออกหัวพิมพ์และแรงดันที่จ่ายให้กับเพียโซ กลายเป็นการออกแบบควบคุมขนาดของหยดหมึกพิมพ์ของสารแต่ละชนิดซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้คือสามารถทำการสร้างเครื่องพิมพ์แบบหยดหมึกตามประสงค์ที่สามารถใช้ชุดหัวพิมพ์ได้มากกว่า 1 หัวและรองรับสารได้มากกว่า 1 สารในการผลิต 1 ครั้งเพื่อเพิ่มความหลากหลายทางการผลิต ซึ่งจะเป็นส่วนที่ต้องวิจัยและพัฒนากันต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาเครื่องผลิตต้นแบบเร็วครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทิวกกร อภิรักษ์ธนากร, คุณยุต เอี่ยมสะอาด, การสร้างเครื่องต้นแบบเร็วโดยใช้หยดน้ำ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, AMM-029170, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2552
- [2] J.C.Yang, W.Chien, M.King, W.L.Grosshandler (1997), A simple piezoelectric droplet generator, *Experiment in Fluids*, vol.23, 445-447, 1997.
- [3] Hartmut Ulmke, Thomas Wriedt, and Klaus Bauckhage (2001), Piezoelectric Droplet Generator for the Calibration of Particle-Sizing Instruments, *Chemical Engineering & Technology*, Vol.24 (3), page 265-268, 2001.
- [4] เว็บไซต์สำหรับสนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาผลงานทางวิชาการ สมาอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, Research 2549 – เปียโซอิเล็คทริก (Piezoelectric), URL: <http://research.crma.ac.th/2549/index.php>