การพัฒนาระบบควบคุมการฉีดพ่นโดยใช้บรัชเลสมอเตอร์สำหรับอากาศยานไร้คนขับ

Development of a Brushless Motor Sprayer Control System for Unmanned Aerial Vehicle

พาโชค พิมพ์เลขา[1], ณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

*ติดต่อ: fengndn@ku.ac.th, 0-3435-5310 ext. 7503, fax 0-3435-5310

บทคัดย่อ

ความนิยมอากาศยานไร้คนขับในปัจจุบันแพร่หลายเป็นอย่างมากและได้มีการนำมาใช้ในหลากหลายรูปแบบ บทบาทหนึ่งคือการประยุกต์ด้านการเกษตรซึ่งครอบคลุมถึงการฉีดพ่นปุ๋ยและสารเคมีต่าง ๆ อย่างไรก็ตามยังขาดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบฉีดพ่นที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการเกษตรสำหรับประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการฉีดพ่นสำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยใช้จุดแข็งจากกลุ่มผู้เล่นวิทยุบังคับซึ่งมีเป็นจำนวนมากรวมถึงอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายมีน้ำหนักเบาและง่ายต่อการควบคุม อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยระบบฉีดพ่นทางการเกษตรได้แก่ปั๊มแบบไดอะแฟรมแรงดัน 4.8 bar อัตราการไหลสูงสุด 3.5 Lpm ดัดแปลงให้ใช้กับบรัชเลสมอเตอร์สำหรับอากาศยานวิทยุบังคับที่มีค่าคงที่ความเร็ว 390 rpm/V ตัวควบคุมความเร็วแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ระบบท่อและหัวพ่นเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลแปรผันตรงกับแรงดันอินพุตที่เป็นคำสั่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ในช่วงอัตราการไหล 0.2 ถึง 0.5 Lpm และช่วงความดัน 100 ถึง 320 kPa สำหรับระบบปั๊มที่แปลงให้ใช้กับมอเตอร์แบบบรัชเลส สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้แปรผันตรงกับแรงดันอินพุตภายใต้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 ถึง 280 kPa ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแปรผันอัตราการไหลสำหรับการฉีดพ่นโดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่ายในตลาดวิทยุบังคับด้วยราคาที่ไม่สูงนัก แต่ระบบที่นำเสนอยังมีช่วงการทำงานแคบและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง จึงต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในด้านปั๊มรวมทั้งการใช้ระบบควบคุมแบบปิดเพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลได้อย่างแม่นยำต่อการนำไปใช้งานการเกษตรแบบแม่นยำ

คำหลัก: ฉีดพ่น; ควบคุม; อากาศยานไร้คนขับ; การเกษตร

Abstract

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) gains enormous popularity and is used in various fields. One field of interest is the application of UAV in agricultural fertilizer and chemical spraying task. However more research in appropriate spraying technology is still need especially for Thailand's agriculture. The objective of this study was to develop a sprayer control system for UAV. Taking advantage of an already widespread and mature market of radio control (RC) based hobby, the sprayer pump was adapted from an off-the-shelve RC brushless motor for light-weight and ease of control advantage. The equipment included diaphragm pump with pressure rating of 480 kPa and maximum flowrate of 3.5 Lpm adapted from brushless motor with velocity constant of 390 rpm/V, Pulse Width Modulation (PWM) speed controller, piping, and 0.6-millimeter

diameter nozzle. The experimental results have shown that flowrate is proportional to the voltage input of DC motor pwm controller in the range of 0.2 to 0.5 Lpm and pressure ranged from 100 to 320 kPa. In case of the modified pump system, the speed of brushless motor is proportional to input voltage under varied system pressure from 100 to 280 kPa. The developed system demonstrated that the dosage of liquid can be varied using appropriate low-cost equipment in RC market but the early result has shown reduced linear operation range and highly non-linear characteristic. Further research in pump and close-loop control is needed to improve the precision of flowrate to the level required for precision agriculture.

Keywords: Spray; Control; UAV; Agriculture

1. บทนำ

การขาดแคลนแรงงานด้านการเกษตรและการแข่งขันเพื่อเป็นเจ้าของส่วนแบ่งตลาดผลิตผลและผลิตภัณฑ์จากการเกษตรในระดับโลก ความใส่ใจถึงคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร และความตระหนักต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม เป็นตัวผลักดันให้เกิดความต้องการการจัดการฟาร์มที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น การเกษตรแบบแม่นยำ (Precision Agriculture, PA) ก็เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งได้รับความสนใจและศึกษาต่อเนื่องมาเป็นเวลายาวนานกว่ายี่สิบปีตั้งแต่ช่วงปลายศตวรรษที่ 20 [1] สำหรับประเทศไทยนั้นนับเป็นผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลกรวมทั้งประชากรส่วนใหญ่ของประเทศยังทำอาชีพเกษตรกรรมทั้งที่เป็นรายได้หลักและรายได้เสริม การวิจัยเพื่อให้เกิดเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเกษตรกรรมสำหรับประเทศไทยจึงเป็นเรื่องที่ควรให้ความสนใจ กระบวนการที่สำคัญอันหนึ่งระหว่างช่วงเตรียมการปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยวข้าวหรือพืชใดก็ตามคือการจัดการโรคและศัตรูพืช การปฏิบัติที่เป็นอยู่คือการใช้แรงงานคนฉีดพ่นสารเคมีต่าง ๆ ในแปลงนาซึ่งมีความเสี่ยงต่อการสัมผัสสารเคมีดังกล่าวอีกทั้งอาจก่อให้เกิดความเสียหายจากการเหยียบย่ำต้นข้าวอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของการนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Arial Vehicle, UAV) มาช่วยในงานฉีดพ่นด้านการเกษตรซึ่งสามารถลดความเสี่ยงต่อการสัมผัสสารเคมีและลดความเสียหายต่อต้นข้าวได้ ในประเทศไทยมีการใช้งาน UAV อย่างแพร่หลายทั้งในระดับงานอดิเรกและเชิงการค้า ขณะนี้มีผู้ผลิตจำหน่าย UAV ด้านการเกษตรเชิงการค้าหลายรายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามยังขาดการเผยแพร่ข้อมูลเชิงวิชาการที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะและประสิทธิภาพที่แสดงให้เห็นว่า UAV มีความเหมาะสมและสามารถนำมาใช้ในงานฉีดพ่นสำหรับการเกษตรแบบแม่นยำได้จริงในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมุ่งตอบคำถามเบื้องต้นว่า จากองค์ความรู้ด้าน UAV และอุปกรณ์เท่าที่หาได้ในตลาดในประเทศไทยเราจะพัฒนา UAV ที่เหมาะสมและสามารถใช้งานด้านฉีดพ่นเพื่อการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างไร? บทความจะแบ่งเป็นส่วนได้แก่ บทนำ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาวิจัย ถัดไปจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนท้ายของบทนำจะสรุปขอบเขตของปัญหาวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่สองกล่าวถึงอุปกรณ์และวิธีการในการวิจัย ผลการทดลองแสดงในบทที่ 3 และบทที่ 4 เป็นสรุปผลการวิจัย ข้อจำกัดในงานวิจัยนี้รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการวิจัยต่อไป

การการเกษตรแบบแม่นยำนี้มีที่มาจากความเป็นจริงที่ความต้องการของพืชนั้นไม่เป็นอัตราคงที่แต่แปรผันไปตามตำแหน่งของพืชในแปลงปลูกในช่วงเวลาหนึ่ง กล่าวคือพืชแต่ละต้นมีความต้องการไม่เท่ากันจึงต้องมีเทคโนโลยีที่จะวัดความต้องการของพืชตามตำแหน่งในแปลงในช่วงเวลาที่แตกต่างกันได้เช่นระบบ remote

sensing [2-8] เห็นได้ว่าการเก็บข้อมูลของพืชและดินในแปลงดังกล่าวสามารถใช้ระบบอัตโนมัติหรือหุ่นยนต์เข้ามามีส่วนช่วยได้ไม่น้อย ไม่เพียงแต่การเก็บข้อมูลเท่านั้น ระบบอัตโนมัติยังเข้าไปมีบทบาททั้งในช่วงการดูแลพืชและการเก็บเกี่ยวอีกด้วย [9-12] UAV ก็ได้ถูกนำมาใช้ในการเกษตรแม่นยำเช่นกัน Zhang and Kovacs [13] ได้ศึกษางานวิจัยตีพิมพ์มากกว่า 100 ฉบับที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ UAV มาใช้ในการเกษตรแม่นยำ สรุปได้ว่าแนวทางหลักของงานวิจัยด้าน UAV จนถึงปัจจุบันคือเทคโนโลยีด้านการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารและสารเคมีที่พืชที่ได้รับการประมาณการผลผลิต และวิเคราะห์ความแข็งแรงของพืชเป็นต้น แต่กลับไม่ปรากฏการนำมาใช้ด้านอื่นมากนัก อย่างไรก็ตาม Huang, et al. [14], [15] ได้นำเสนอแนวทางใหม่ของการใช้งาน UAV คืองานฉีดพ่นสารเพื่อควบคุมศัตรูพืชจำพวก arthropod vector UAV ถูกมองว่าไม่เหมาะสมต่องานฉีดพ่นสำหรับแปลงขนาดใหญ่แต่พื้นที่การเกษตรในประเทศไทยเฉลี่ยมีขนาดเล็กกว่าในสหรัฐอเมริกาและยุโรป การใช้ UAV ขนาดเล็กในการฉีดพ่นจึงเหมาะสมกว่าการใช้เครื่องบินที่มีนักบินขับ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการสัมผัสกับสารเคมีโดยตรงการใช้งาน UAV เพื่อการฉีดพ่นไม่จำกัดเพียงการควบคุมศัตรูพืชเท่านั้นแต่ยังรวมไปถึงการให้ปุ๋ยและยาทั้งรูปแบบสารเคมีและสารอินทรีย์ การควบคุมอัตราแบบแปรผัน (Variable Rate Treatment, VRT) เพื่อให้พอดีกับความต้องการของพืชเป็นหัวใจสำคัญของการทำเกษตรแบบแม่นยำดังนั้นระบบฉีดพ่นจึงต้องมีความสามารถในการควบคุมอัตราฉีดพ่นได้ดังเช่นงานวิจัยของ Zhu, et al. [16] ซึ่งได้ออกแบบตัวควบคุมการฉีดพ่นโดยใช้สัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ในการควบคุมปริมาณการฉีดพ่นได้อย่างแม่นยำ

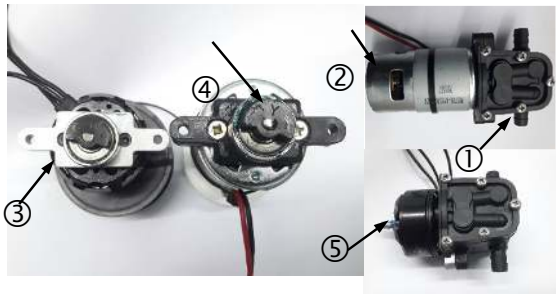
ในปัจจุบัน UAV ได้รับความนิยมแพร่หลายไปสู่ภาคส่วนพลเรือนเนื่องด้วยแนวโน้มราคาอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กโทรนิคที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีผ่านสื่อแบบเปิด ทำให้ผู้ที่สนใจเข้าถึงเทคโนโลยี UAV ได้ง่าย อาจกล่าวได้ว่าเพียงศึกษาข้อมูลจากอินเตอร์เน็ตก็สามารถสร้าง UAV ได้ ระดับเทคโนโลยีมีตั้งแต่เป็นงานอดิเรกเพื่อความบันเทิงในกลุ่มผู้เล่นวิทยุบังคับ (Radio Control, RC) จนถึงที่ได้รับการพัฒนาให้มีสมรรถนะและความเชื่อถือได้สูง จากความนิยมดังกล่าวทำให้การพัฒนา UAV ในประเทศไทยสามารถทำได้โดยใช้ฐานของอุปกรณ์และองค์ความรู้จากกลุ่มผู้เล่น RC การพัฒนา UAV โดยใช้อุปกรณ์จากกลุ่ม RC เช่นงานของ Meivel, et al. [17] ที่ได้เสนอการออกแบบ UAV แบบสี่ใบพัด (Quad-Rotor) สำหรับการฉีดพ่นจากประเทศอินเดีย งานวิจัยได้กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้าง ระบบควบคุม กล้องและตัวตรวจรู้ ระบบปั๊ม ระบบนำทาง และการออกแบบมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor, BLDC) เพื่อใช้เป็นตัวขับใบพัดของ UAV ด้วย

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่า UAV ได้ถูกพัฒนาไปมากสามารถใช้งานได้หลากหลายแต่งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์การนำมาใช้ในการฉีดพ่นด้านเกษตรกรรมยังมีน้อยรวมทั้งเท่าที่ผู้วิจัยได้สืบค้นมายังไม่มีอุปกรณ์ระบบฉีดพ่นการเกษตรที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ UAV ทำให้มีข้อเสียด้านขนาดและน้ำหนักและยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการฉีดพ่นเพื่อใช้กับการเกษตรแบบแม่นยำได้ ขอบเขตของงานวิจัยนี้จึงอยู่ที่การออกแบบและพัฒนาระบบฉีดพ่นสำหรับ UAV ที่เบื้องต้นได้ดัดแปลงจากอุปกรณ์ต้นกำลังในการฉีดพ่นและใช้หัวฉีดด้านการเกษตรทั่วไปเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการนำอุปกรณ์ RC มาใช้ด้านการเกษตรโดยจะยังไม่พิจารณาถึงการออกแบบเชิงวิศวกรรมของระบบปั๊มและหัวฉีด ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้คือ การออกแบบและสร้างระบบฉีดพ่นที่สามารถแปรผันอัตราการฉีดพ่นได้โดยใช้อุปกรณ์ RC ในงบประมาณที่ไม่สูงนักซึ่งจะได้ข้อมูลด้านสมรรถนะและ

ประสิทธิภาพการทำงานที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบฉีดพ่นด้านการเกษตรสำหรับ UAV โดยเฉพาะ

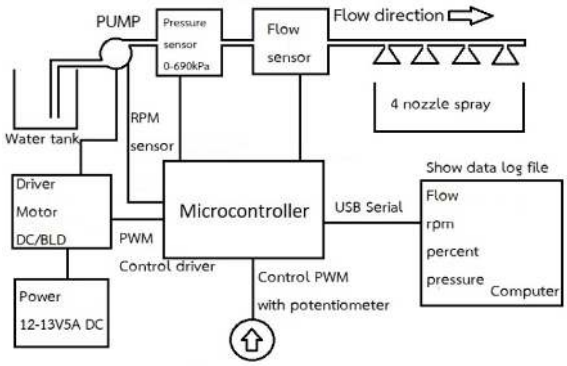
2. อุปกรณ์และวิธีการ

ผู้วิจัยได้ปรับปรุงปั๊มแบบไดอะแฟรมที่ใช้ในการพ่นสารละลายสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ทางการเกษตร โดยปรับปรุงมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (brushed motor) ที่ติดมากับปั๊มเปลี่ยนเป็นแบบ BLDC ผู้วิจัยพิจารณาการปรับปรุงดังนี้ ปั๊มแบบไดอะแฟรมสร้างแรงดันได้สูง เหมาะสมกับการนำมาใช้พ่นสารละลายที่ผ่านหัวฉีดแบบละเอียดขนาดเล็ก เนื่องจากมอเตอร์แบบมีแปรงถ่านมีน้ำหนักมาก และกำลังน้อย อายุการใช้งานสั้น ทำให้การบินต้องใช้แรงยกมากขึ้นในการบิน ทางผู้วิจัยจึงนำมอเตอร์แบบ BLDC ดัดแปลงใช้งานแทนมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน มอเตอร์ BLDC มีความสามารถทำงานที่รอบต่ำได้ดี แรงบิดสูง อายุการใช้งานนานกว่ามอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่านที่มีขนาดเดียวกัน รวมถึง หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด (รูปที่ 1) โดยพิจารณาจาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอเตอร์ และความเร็วรอบที่ความต่างศักย์เท่ากัน



รูปที่ 1 หัวปั๊ม (1) และมอเตอร์ DC (2) ยึดเข้าด้วยกันด้วยหน้าแปลน (3) ตัวเยื้องศูนย์ (4) สำหรับดันไดอะแฟรม มอเตอร์ BLDC (5)

การทดลองการทำงานของปั๊มที่ใช้มอเตอร์ทั้งสองแบบโดยใช้ตัวกลไกของปั๊มไดอะแฟรมเดียวกัน ซึ่งทำการติดตั้ง อุปกรณ์ตรวจวัดรอบการทำงานของมอเตอร์ ตัววัดความดันในท่อ ระดับของการควบคุมมอเตอร์ 0-100 เปอร์เซ็น ตัววัดกระแสไฟ และความต่างศักย์ของมอเตอร์ของปั๊มที่ใช้มอเตอร์ทั้งสองแบบ และเก็บข้อมูลแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 2 และ 3)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 1) ปั๊มและมอเตอร์ 2) ตัวขับมอเตอร์ 3) Arduino สำหรับส่งสัญญาณ PWM และสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ 4) มิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า 5) ตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6) ตัววัดความดัน 7) ข้อต่อและท่อ และ 8) หัวฉีด

การทดลองเก็บข้อมูลการทำงานของปั๊ม ผู้วิจัยควบคุมจำนวนของหัวฉีดอยู่ที่ 4 หัว มีขนาดรู 0.6 mm ผู้วิจัยได้นำลักษณะการติดตั้งหัวฉีด จากอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด (Multi-rotor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1200 mm ซึ่งติดตั้ง หัวฉีดจำนวน 4 หัวใน

การทำงาน เนื่องจากการทับซ่อนของหัวฉีดสารละลาย (รูปที่ 4)

รูปที่ 4 รูปแบบของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด (Multi-rotor) กับการติดตั้งหัวฉีดสารละลาย

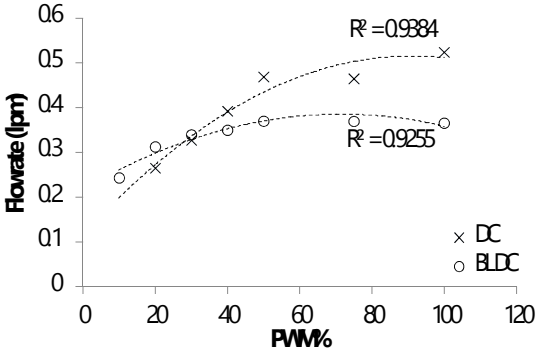
ขั้นตอนการทดลอง เก็บข้อมูลที่ ระดับของการควบคุมมอเตอร์ 20, 30, 40, 50, 75 และ 100% ของมอเตอร์โดยที่ 10% ของระดับของการควบคุมมอเตอร์แบบมีแปรงถ่านมอเตอร์ไม่ทำงาน และ 10, 20, 30, 40, 50, 75 และ 100 ของมอเตอร์ BLDC โดยเก็บข้อมูลอัตราการไหล ความดันในท่อ ความเร็วรอบ กระแสที่ใช้และความต่างศักย์ที่จ่ายให้ระบบที่ระดับของการควบคุมมอเตอร์ดังกล่าวเมื่อการตอบสนองของระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ทำการทดลองซ้ำห้าชุดและหาค่าเฉลี่ย พิจารณาเปรียบเทียบการทำงานของปั๊มที่ใช้มอเตอร์แบบมีแปรงถ่านและไม่มีแปลงถ่าน วัดอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริงจากการจับเวลาการฉีดลงในกระบอกตวงขนาด 500 mL

3. ผลการทดลอง

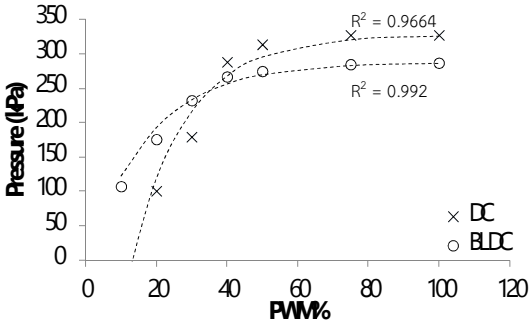
รูปที่ 5 ถึงรูปที่ 9 แสดงผลการทดลอง รูปที่ 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันช่วงความกว้างของสัญญาณควบคุมแบบ PWM กับอัตราการไหล และความดัน พบว่าอัตราการไหลมิได้แปรผันเป็นเส้นตรงตลอดช่วงการทำงานแต่มีลักษณะลู่เข้าสู่อัตราการไหลค่าหนึ่งเมื่อเพิ่มค่า PWM เกินกว่า 50% อัตราการไหลสูงสุดของปั๊มมอเตอร์ DC อยู่ที่ 0.53 Lpm ที่ความดัน 327 kPa และ สำหรับปั๊มมอเตอร์ BLDC อยู่ที่ 0.37 Lpm ที่ความดัน 287 kPa

เช่นเดียวกันรูปที่ 7 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ของความดันและอัตราการไหล พบว่าทั้งสองกรณีชุดข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันแต่กรณี BLDC มีอัตราการไหลสูงสุดที่ต่ำกว่ากรณีของ DC เส้นกราฟแสดงถึงความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลผ่านหัวฉีดเพิ่มขึ้น

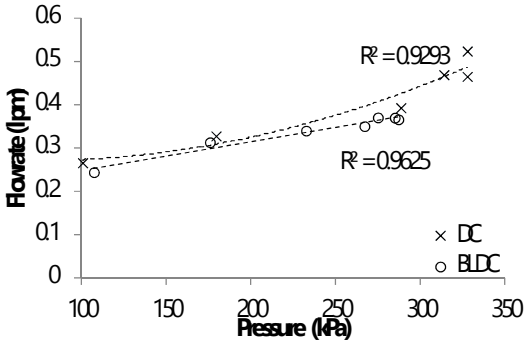
รูปที่ 8 และ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันช่วงความกว้างของสัญญาณควบคุมแบบ PWM กับกระแสที่ใช้และความเร็วรอบของมอเตอร์



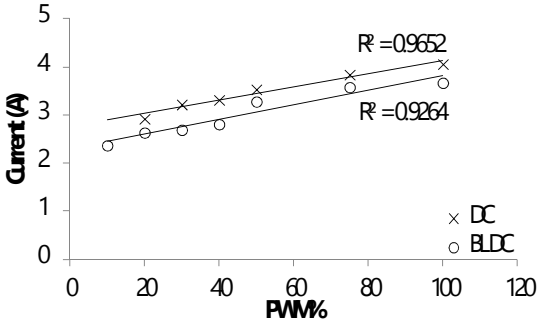
รูปที่ 5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง %PWM และอัตราการไหล (Lpm) เปรียบเทียบปั๊มเดิม (DC) กับปั๊มที่ปรับปรุงใหม่ (BLDC)



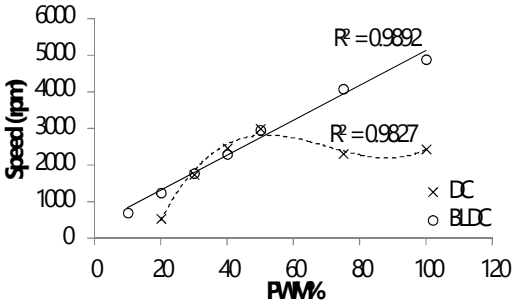
รูปที่ 6 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง %PWM และความดัน (kPa) เปรียบเทียบปั๊มเดิม (DC) กับปั๊มที่ปรับปรุงใหม่ (BLDC)



รูปที่ 7 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหล (Lpm) และความดัน (kPa) เปรียบเทียบปั๊มเดิม (DC) กับปั๊มที่ปรับปรุงใหม่ (BLDC)



รูปที่ 8 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง %PWM และ กระแสที่ใช้ (A) เปรียบเทียบปั๊มเดิม (DC) กับปั๊มที่ปรับปรุงใหม่ (BLDC)



รูปที่ 9 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง %PWM และ ความเร็วรอบ (rpm) เปรียบเทียบปั๊มเดิม (DC) กับปั๊มที่ปรับปรุงใหม่ (BLDC)

จากรูปที่ 8 พบว่ากระแสที่ใช้มีลักษณะแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ PWM พบว่ามอเตอร์ BLDC ใช้กระแสต่ำกว่ามอเตอร์ DC ในช่วง PWM ต่ำกว่า 40% ที่อัตราการไหลใกล้เคียงกันแต่ช่วง PWM ตั้งแต่ 40% และมากกว่ามอเตอร์ BLDC ดึงกระแสสูงกว่า รูปที่ 9 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ พบว่าตัวขับมอเตอร์ BLDC สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้แปรผันกับค่า PWM ที่สั่งได้ดีตลอดช่วงการทำงาน แต่กรณีมอเตอร์ DC ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นในช่วงสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 10 ถึง 50% แล้วลดลง

จากผลการทดลองพบว่าถึงแม้ปั๊มแบบไดอะแฟรมจะเป็นปั๊มแบบการกระจัด (Displacement) แต่อัตราการไหลมิได้แปรผันตรงกับความเร็วรอบปั๊มซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นยิ่งปรากฏมากขึ้นเมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้นทำให้ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้หากไม่มีสัญญาณวัดค่าอัตราการไหลป้อนกลับในส่วนนี้จึงต้องค้นคว้าต่อไปว่าเป็นที่ตัวปั๊มเองหรือความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์ BLDC โดยรวมมีประสิทธิภาพสูงกว่าและควบคุมรอบต่ำได้ดีกว่าแต่กลับได้อัตราการไหลและแรงดันต่ำกว่าอาจเป็นผลจากการผันแปรของชิ้นส่วนที่ประกอบขึ้นนอกจากนี้เราไม่ทราบแน่ชัดถึงการปั๊มที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมภายในอีกด้วย

4. สรุป

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการฉีดพ่นสำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยใช้จุดแข็งจากกลุ่มผู้เล่นวิทยุบังคับซึ่งมีเป็นจำนวนมากรวมถึงอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายมีน้ำหนักเบาและง่ายต่อการควบคุม อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยระบบฉีดพ่นทางการเกษตรได้แก่ปั๊มแบบไดอะแฟรมดัดแปลงให้ใช้กับมอเตอร์ BLDC สำหรับอากาศยานวิทยุบังคับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลแปรผันตรงกับแรงดันอินพุตที่เป็นคำสั่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพียงในช่วงสั้นๆตั้งแต่อัตราการไหล 0.2 ถึง 0.5 Lpm ซึ่งต่ำกว่า 3.5 Lpm ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ไม่มีภาระความดันมาก สำหรับระบบปั๊มที่แปลงให้ใช้กับมอเตอร์ BLDC สามารถควบคุมความเร็ว

รอบของมอเตอร์ให้แปรผันตรงกับแรงดันอินพุตภายใต้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้ดีแต่อัตราการไหลยังต่ำกว่าระบบเดิม อย่างไรก็ตามระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแปรผันอัตราการไหลสำหรับการฉีดพ่นโดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่ายในตลาดวิทยุบังคับด้วยราคาที่ไม่สูงนัก มีน้ำหนักและขนาดของระบบรวมลดลงกว่าเดิม แต่ผลการทดลองเบื้องต้นนี้ยังแสดงให้เห็นถึงช่วงการทำงานแคบและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ข้อจำกัดของการวิจัยนี้คือผลการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการปรับค่าPWM โดยไม่ทราบค่า ความเร็วรอบททำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ รวมถึงชุดควบคุมมอเตอร์แบบ DC ประสิทธิภาพไม่เทียบเท่ากับของ BLDC ยังขาดตัวตรวจวัดรอบและอัตราการไหลที่สามารถป้อนสัญญาณเข้าสู่ตัวควบคุมซึ่งมีความจำเป็นต่อการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อที่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ นอกจากนี้เรายังมิได้คำนึงถึงลักษณะสมบัติของหัวฉีดพ่นและลักษณะรูปทรงของโคนของเหลวที่ถูกฉีดพ่นว่าเหมาะสมหรือไม่ จึงต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในด้านตัวปั๊ม การใช้ระบบควบคุมแบบปิด และการทดสอบกับแปลงจริงเพื่อหาพารามิเตอร์เช่นระดับความสูงและความเร็วในการบินเพื่อการนำไปใช้งานการเกษตรแบบแม่นยำสำหรับประเทศของเราได้อย่างแท้จริง

5. เอกสารอ้างอิง

[1] J. V. Stafford, "Implementing Precision Agriculture in the 21st Century," *Journal of Agricultural Engineering Research,* vol. 76, no. 3, pp. 267-275, 2000/07/01 2000.

[2] A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, "A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture," (in English), *Computer Standards & Interfaces,* vol. 36, no. 2, pp. 263-270, Feb 2014.

[3] A.-J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, "Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops," *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 75, no. 2, pp. 288-303, 2011.

[4] Y. Ge, J. A. Thomasson, and R. Sui, "Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review," *Frontiers of Earth Science,* vol. 5, no. 3, pp. 229-238, 2011.

[5] S. Liaghat and S. K. Balasundram, "A review: The role of remote sensing in precision agriculture," *American journal of agricultural and biological sciences,* vol. 5, no. 1, pp. 50-55, 2010.

[6] D. J. Mulla, "Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps," *Biosystems engineering,* vol. 114, no. 4, pp. 358-371, 2013.

[7] C. A. Rokhmana, "The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia," *Procedia Environmental Sciences,* vol. 24, pp. 245-253, 2015.

[8] N. Wang, N. Zhang, and M. Wang, "Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective," *Computers and electronics in agriculture,* vol. 50, no. 1, pp. 1-14, 2006.

[9] D. Slaughter, D. Giles, and D. Downey, "Autonomous robotic weed control systems: A review," *Computers and electronics in agriculture,* vol. 61, no. 1, pp. 63-78, 2008.

[10] M. M. Foglia and G. Reina, "Agricultural robot for radicchio harvesting," *Journal of Field Robotics,* vol. 23, no. 6-7, pp. 363-377, 2006.

[11] T. Bak and H. Jakobsen, "Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection," *Biosystems Engineering,* vol. 87, no. 2, pp. 125-136, 2004.

[12] C. W. Bac, E. J. Henten, J. Hemming, and Y. Edan, "Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead," *Journal of Field Robotics,* vol. 31, no. 6, pp. 888-911, 2014.

[13] C. Zhang and J. M. Kovacs, "The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review," *Precision Agriculture,* journal article vol. 13, no. 6, pp. 693-712, 2012.

[14] Y. Huang, W. Hoffmann, Y. Lan, W. Wu, and B. Fritz, "Development of a Spray System for an Unmanned Aerial Vehicle Platform," *Applied engineering in agriculture,* vol. 25, no. 6, pp. 803-809, 2009.

[15] Y. Huang, W. C. Hoffman, Y. Lan, B. K. Fritz, and S. J. Thomson, "Development of a low-volume sprayer for an unmanned helicopter," *Journal of Agricultural Science,* vol. 7, no. 1, p. 148, 2015.

[16] H. Zhu *et al.*, "Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles," *Journal of Bionic Engineering,* vol. 7, no. 3, pp. 276-283, 2010.

[17] S. Meivel, K. Dinakaran, N. Gandhiraj, and M. Srinivasan, "Remote sensing for UREA Spraying Agricultural (UAV) system," in *Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS),* 2016 3*rd International Conference on*, 2016, vol. 1, pp. 1-6: IEEE.