

การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิิกส์ แบบอัตโนมัติด้วยวิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง

ธณวิน มั่นสกุล^{1*} กันติชา กิตติพิรัช²

^{1*}หลักสูตรปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

²ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ หุ่นยนต์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : ma.thanavin_st@tni.ac.th

รับต้นฉบับ: 5 พฤษภาคม 2563.; รับบทความฉบับแก้ไข: 13 พฤษภาคม 2563; ตอบรับบทความ: 14 พฤษภาคม 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการปลูกได้ง่าย แต่มีต้นทุนที่สูง และการจัดการระบบที่ซับซ้อนต้องใช้ประสบการณ์และความรู้ ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดความเสียหายต่อรากพืชและส่งผลต่อการดูดธาตุอาหารของพืชได้ บทความนี้นำเสนอการควบคุมความเป็นกรด-ด่างในสารละลายแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง โดยการดัดแปลงวิธีการกำจัดความคลุมเครือเป็นการใช้พื้นที่ได้กราฟของรูปที่กำหนดขึ้น และอ้างอิงข้อมูลจากผู้ที่มีประสบการณ์ในการปลูกมาใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ เพื่อให้ระบบสามารถตัดสินใจและจัดการแทนการทำงานของมนุษย์ได้ จากผลการทดลองกับระบบต้นแบบเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ P พบว่า ระบบที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และกำจัดผลของการรบกวนจากภายนอกได้ดีกว่า ซึ่งช่วยลดภาระงานของมนุษย์และลดความซับซ้อนของการปลูกเพราะระบบสามารถคำนวณและเติมสารได้เองอย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : สารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิิกส์ การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระบบควบคุมความเป็นกรด-ด่าง

Automated pH Control of Nutrient Solution in Hydroponic System using Modified Fuzzy Logic Control

Thanavin Mansakul^{1*} Kanticha Kittipeerachon²

^{1*} *Master of Engineering in Engineering Technology: MET,
Thai-Nichi Institute of Technology: TNI, Bangkok, Thailand*

² *Computer Engineering Robotics and Technology Research Laboratory: CERT
Thai-Nichi Institute of Technology: TNI, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: ma.thanavin_st@tni.ac.th

Received: 5 May 2020; Revised: 13 May 2020; Accepted: 14 May 2020

Published online: 25 June 2020

Abstract

A hydroponic system can control many factors significantly, such as the amount of water and fertilizer. However, the system is a high investment and requires some skills to operate. The unsuitable quantity of pH can cause root damage from acidity and inadequate nutrient uptake. This paper presents the pH control in a nutrient solution using modified fuzzy logic control. The fuzzy logic control is a design based on experienced personal adjustment data. However, the defuzzification technique is modified to suit the controlled system using the area under an appropriately designed graph. From the results obtained from the prototype systems, it was found that the proposed system can control pH value in nutrient solution and reject disturbance better than the conventional P control system. Since the system can decide the proper quantity of acid and base automatically, the system can reduce human workload and reduce complicated procedures for the farmer.

Keywords: Nutrient solution, Hydroponic system, pH, Fuzzy logic control.

1) บทนำ

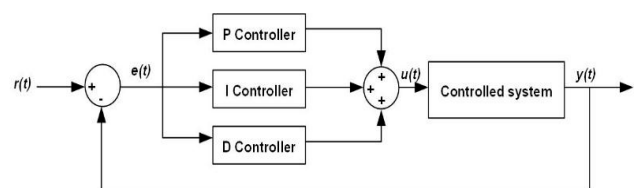
การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ต้องควบคุมปัจจัยหลายอย่างเพื่อป้องกันความเสียหายต่อพืชและให้ผลผลิตตามที่ต้องการ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่ต้องควบคุม เนื่องจากความเป็นกรดที่มากเกินไปเป็นอันตรายต่อเซลล์ในรากของพืชและทำให้สารละลายกลายเป็นพิษได้ ในทำนองเดียวกัน ความเป็นด่างที่มากเกินไปส่งผลเสียต่อรากพืชเช่นกันและยังส่งผลให้การดูดซึมแร่ธาตุบางชนิดของพืชลดลง [1] ความเหมาะสมของค่าความเป็นกรด-ด่างในการปลูกพืชโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5.0-6.0 แต่โดยส่วนใหญ่ค่าความเป็นกรด-ด่างช่วง 6.0-7.0 นั้นก็เพียงพอต่อการปลูกพืช การเพิ่มความเป็นกรดให้กับสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์นิยมใช้กรดไนตริก (HNO_3) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพราะสามารถละลายน้ำได้และสามารถเป็นธาตุอาหารที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับราคาและคุณภาพของน้ำ

วิธีการควบคุมความเป็นกรด-ด่างแบบอัตโนมัติที่นำเสนอใน [2] ใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แล้วนำสมการที่ได้ไปคำนวณปริมาณกรดที่ต้องเติมลงในสารละลายให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างตามต้องการ ระบบสามารถปรับลดค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในย่านที่ยอมรับได้โดยมีความแม่นยำ 95% จากค่าความเป็นกรด-ด่างเป้าหมายคือ 6.0 แต่ไม่ได้แนะนำการปรับเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างหากสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างต่ำเกินไป รวมถึงไม่ได้แนะนำเวลาที่ระบบใช้ในการควบคุมให้ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในย่านที่ยอมรับได้ ใน [3] แนะนำการควบคุมความเป็นกรด-ด่างด้วยวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยนำหลักการตรรกศาสตร์คลุมเครือไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจเพื่อปรับทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายให้อยู่ในย่านที่ต้องการ วิธีนี้ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในการคำนวณปริมาณกรด ด่าง ธาตุอาหารและน้ำในระบบไฮโดรโปนิคส์ที่ต้องเติม ใช้เพียงความรู้จากผู้ที่มีประสบการณ์ในการปรับตั้งค่าของตัวควบคุมและออกแบบกฎหรือเงื่อนไขในการควบคุมให้เหมาะสม ระบบสามารถควบคุมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ โดยสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เข้าสู่ช่วงเป้าหมายคือ 5.5-6.5 ได้ภายใน 60 นาที เร็วกว่าการควบคุมด้วยผู้ที่มีประสบการณ์และผู้ที่ไม่มีความรู้ซึ่งใช้เวลาประมาณ 100 นาที

บทความนี้นำเสนอการควบคุมความเป็นกรด-ด่างในสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์ด้วยวิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลงในรูปแบบการควบคุมแบบวงปิด โดยกำหนดค่าเป้าหมายของความเป็นกรด-ด่างในการควบคุมเป็นค่าเดียวไม่ใช่ช่วง ทั้งยังได้ออกแบบตัวควบคุมและทดลองกับระบบต้นแบบ เปรียบเทียบผลการควบคุมความเป็นกรด-ด่างในสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์ด้วยตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลงกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือที่เรียกกันว่าตัวควบคุมแบบ P ทั้งผลตอบสนองชั่วขณะ (การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างช่วงตอนเริ่มต้นหรือหลังจากระบบถูกรบกวน) และผลตอบที่สภาวะคงตัว (ค่าความเป็นกรด-ด่างตอนเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้ว)

2) วิธีการควบคุม

2.1) การควบคุมแบบ PID



รูปที่ 1 ระบบควบคุมแบบ PID

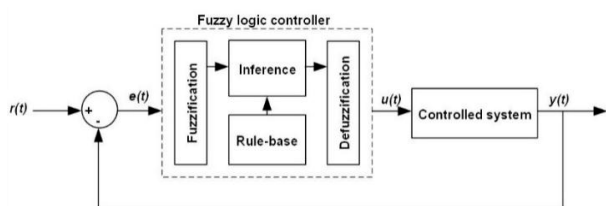
การควบคุมแบบ PID เป็นการควบคุมแบบวงปิดแสดงดังรูปที่ 1 ตัวควบคุมแบบ PID ประกอบด้วย 3 ส่วนรวมกัน คือ ตัวควบคุมแบบ P (P: Proportional) ตัวควบคุมแบบ I (I: Integral) และตัวควบคุมแบบ D (D: Derivative) โดยสัญญาณควบคุม $u(t)$ ที่สร้างจากตัวควบคุมเพื่อป้อนเข้าระบบที่ต้องการควบคุม นั้น ได้มาจากการนำค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ของสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ จากค่าเป้าหมาย $r(t)$ เข้าสู่กระบวนการควบคุม กระบวนการควบคุมจะพยายามทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสัญญาณควบคุมขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนและตัวแปรในการควบคุม 3 ตัว ดังสมการ (1)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ K_p แทนอัตราขยายสัดส่วน K_i แทนอัตราขยายปริพันธ์ และ K_d แทนอัตราขยายอนุพันธ์ อัตราขยายทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าที่จะถูกออกแบบหรือปรับตั้งให้เหมาะสม เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งอัตราขยายแต่ละตัวจะส่งผลต่อคุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตแตกต่างกัน โดยสามารถเลือกปรับตั้งเฉพาะค่าที่ต้องการ หรือเลือกใช้เพียงอัตราขยายบางตัวแล้วกำหนดให้ค่าอื่นที่เหลือเป็นศูนย์ได้ [4]

การปรับตั้งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PID นี้สามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการควบคุม จึงนิยมนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในอุตสาหกรรมหาได้ยาก และการปรับตั้งค่าตัวควบคุมแบบ PID สามารถทำที่หน้างานได้ ซึ่งเทคนิคการปรับตั้งค่ามีหลายรูปแบบ บางเทคนิคสามารถปรับตั้งค่าได้ละเอียดและแม่นยำมาก [5]

2.2) การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ



รูปที่ 2 ระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นการควบคุมแบบอัจฉริยะรูปแบบหนึ่งที่ใช้เหตุผลในการตัดสินใจแสดงดังรูปที่ 2 ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือรับค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ของสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ จากค่าเป้าหมาย $r(t)$ เข้ามาจัดการตามลำดับขั้นตอนการแก้ไข้ปัญหา เพื่อเลือกค่าสัญญาณควบคุม $u(t)$ ที่เหมาะสมสำหรับระบบ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

2.2.1) การทำข้อมูลให้คลุมเครือ (Fuzzification) เป็นขั้นตอนการแปลงค่าความคลาดเคลื่อนที่รับเข้ามาให้เป็นค่าแบบคลุมเครือ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกฎที่กำหนดไว้

2.2.2) การตั้งกฎ (Rule-base) เป็นขั้นตอนการกำหนดกฎจากประสบการณ์ความรู้ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการควบคุมระบบ โดยกฎที่กำหนดขึ้นจะอยู่ในรูปเซตของกฎ

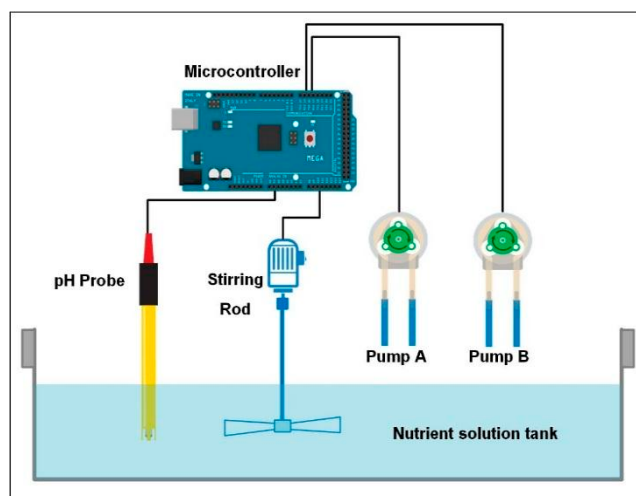
2.2.3) กลไกการตีความ (Inference mechanism) เป็นขั้นตอนการประเมินหาข้อสรุป ซึ่งก็คือค่าสัญญาณควบคุมแบบคลุมเครือจากความสอดคล้องของค่าความคลาดเคลื่อนปัจจุบันแบบคลุมเครือที่ได้รับมากับกฎที่กำหนดไว้

2.3.4) การกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzification) เป็นขั้นตอนการแปลงค่าสัญญาณควบคุมแบบคลุมเครือที่ได้จากกลไกการตีความให้เป็นค่าสัญญาณควบคุมแบบทั่วไป เพื่อส่งออกไปยังระบบที่ต้องการควบคุม [6]

การใช้เหตุผลในการตัดสินใจทำให้การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นวิธีการควบคุมอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถใช้กับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ นอกจากนั้นการที่ตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกได้ระหว่าง 0 ถึง 1 ทำให้เกิดระดับที่สามารถตีความได้มากกว่าขาวหรือดำ เช่น เทา เทาอ่อนหรือเทาเข้ม เป็นต้น จึงใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อน รวมถึงระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้

3) การดำเนินการวิจัย

3.1) การออกแบบอุปกรณ์



รูปที่ 3 ระบบต้นแบบ

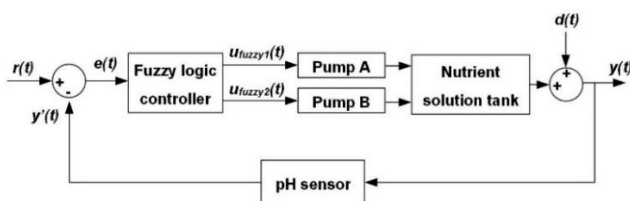
รูปที่ 3 แสดงระบบต้นแบบที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยถังน้ำที่บรรจุสารละลายธาตุอาหารปริมาณ 6 ลิตร เซนเซอร์สำหรับอ่านค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH probe) ซึ่งต้องแช่ไว้ในถังน้ำตลอดเวลา จึงเลือกใช้เซนเซอร์คุณภาพระดับสำหรับการทดลองเพื่อลดปัญหาจากสัญญาณรบกวนที่อาจ

เกิดขึ้น ทำให้อ่านค่าได้อย่างแม่นยำและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ นอกจากการเลือกอุปกรณ์คุณภาพระดับการทดลองแล้ว ยังออกแบบเครื่องกวน (Stirring rod) เพื่อกวนให้สารละลายมีความเข้ากันมากขึ้นในขณะเซนเซอร์อ่านค่าระหว่างตอนเติมสารละลายกรดหรือน้ำ ปัม (Pump) ที่ใช้ในการทดลองเป็นปั๊มสุบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump) ที่มีความแม่นยำสูงและมีคุณภาพระดับสำหรับการทดลองเช่นเดียวกับเซนเซอร์ ขนาดของปั๊มสอดคล้องกับระบบต้นแบบที่ใช้ทำการทดลอง โดยที่ปั๊ม A คือปั๊มที่ปล่อยสารละลายกรดเพื่อเพิ่มความเป็นกรดให้กับสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิิกส์ และปั๊ม B คือปั๊มที่ปล่อยน้ำเพื่อลดความเป็นกรดในสารละลาย เวลาที่ปั๊ม A และปั๊ม B ปล่อยสารละลายกรดและน้ำถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตามวิธีการควบคุมที่ออกแบบ ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีการควบคุม 2 แบบ คือ การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง และการควบคุมแบบ P ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้คืออาร์ดูโอโนเนื่องจากใช้งานง่ายและเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบโอเพนซอร์สทำให้มีการพัฒนาและมีตัวอย่างการเขียนโปรแกรมจำนวนมาก

3.2) การออกแบบตัวควบคุม

3.2.1) ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง

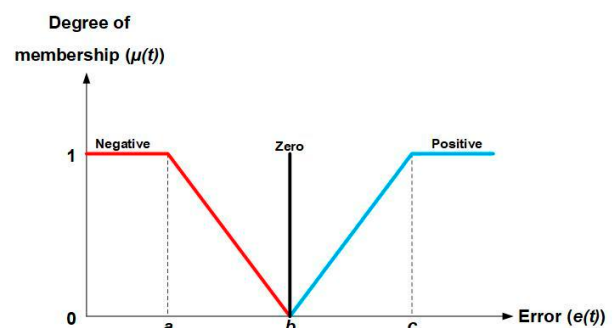
การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือจะดำเนินการตามรูปที่ 4 โดย $x(t)$ คือค่าความเป็นกรด-ด่างเป้าหมายที่กำหนดไว้มีค่าเท่ากับ 6 ในส่วนของ $u_{fuzzy1}(t)$ และ $u_{fuzzy2}(t)$ คือค่าเวลาในการปล่อยสารละลายกรดและน้ำเข้าสู่ระบบ เป็นสัญญาณควบคุมที่ส่งออกจากตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือไปควบคุมการเปิด-ปิดปั๊ม A และปั๊ม B ตามลำดับ $y'(t)$ คือค่าความเป็นกรด-ด่างที่เซนเซอร์อ่านค่าได้ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างจริงของระบบ $y(t)$ และ $d(t)$ คือการรบกวนระบบที่ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบเปลี่ยนไป



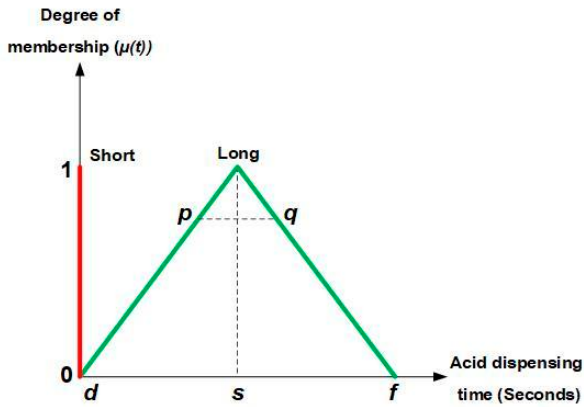
รูปที่ 4 แผนภาพระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลงที่

ออกแบบ

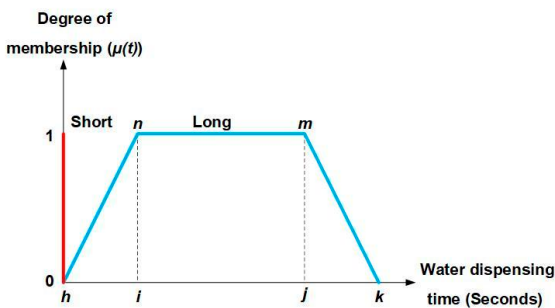
การออกแบบตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลงนี้ กำหนดให้ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเป็นกรด-ด่าง $e(t)$ ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าเป้าหมาย โดยออกแบบให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีรูปร่างดังรูปที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ติดลบแสดงถึงความเป็นด่างมากเกินไปของสารละลาย ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นบวกแสดงถึงความเป็นกรดมากเกินไปของสารละลาย โดยในการออกแบบกำหนดให้ตัวแปร a มีค่าเท่ากับ -3 ตัวแปร b มีค่าเท่ากับ 0 และตัวแปร c มีค่าเท่ากับ 3 ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นค่าเวลาการปล่อยสารละลายกรดและเวลาการปล่อยน้ำ โดยออกแบบให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีรูปร่างแตกต่างกันดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ เพื่อความเหมาะสมในการควบคุม โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าเวลาปล่อยสารละลายกรด กำหนดให้ตัวแปร d มีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปร s เท่ากับ 4.5 และตัวแปร f เท่ากับ 9 ตัวแปร p และ q นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า $\mu(t)$ ที่ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความคลาดเคลื่อนและกฎของการควบคุม ในส่วนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าเวลาการปล่อยน้ำ กำหนดให้ตัวแปร h มีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปร i มีค่าเท่ากับ 120 ตัวแปร j มีค่าเท่ากับ 360 และตัวแปร k มีค่าเท่ากับ 480 ตัวแปร m และ n นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า $\mu(t)$ ที่ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความคลาดเคลื่อนและกฎของการควบคุม



รูปที่ 5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเวลาการปล่อย
สารละลายกรด



รูปที่ 7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเวลาการปล่อยน้ำ

ตารางที่ 1 กฎของการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Rules		
Negative	Zero	Positive
IF Error is Negative THEN Acid dispensing time is Long and Water dispensing time is Short	IF Error is Zero THEN Acid dispensing time is Short and Water dispensing time is Short	IF Error is Positive THEN Acid dispensing time is Short and Water dispensing time is Long

เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนถูกป้อนเข้าตัวควบคุม จะผ่านขั้นตอนการทำข้อมูลให้คลุมเครือตามฟังก์ชันความเป็นสมาชิก รูปที่ 5 ได้เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก (Degree of membership) ด้วยการประมาณเชิงเส้นตามสมการที่ (2) และ (3)

$$\mu_{Negative}(t) = \frac{e(t)}{a} \quad (2)$$

$$\mu_{Positive}(t) = \frac{e(t)}{c} \quad (3)$$

จากนั้นค่าที่ได้จะผ่านเข้าสู่กลไกการตีความตามกฎที่ตั้งขึ้น (ตารางที่ 1) แล้วส่งข้อมูลข้อสรุปซึ่งอยู่ในรูปของค่าระดับความเป็นสมาชิกเช่นกันเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดความคลุมเครือ เพื่อหาสัญญาณควบคุมป้อนด้วยวิธีพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ดังสมการ (4)

$$\mu_{fuzzy1}(t) = \begin{cases} 0.3 * \mu_{Negative}(t) * (f-d) & ; \mu_{Negative}(t) = 1 \\ 0.3 * \mu_{Negative}(t) * [(q-p) + (f-d)] & ; \mu_{Negative}(t) < 1 \end{cases} \quad (4)$$

สำหรับสัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังปั๊ม A เพื่อควบคุมเวลาการปล่อยสารละลายกรดลงในระบบให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ และสมการ (5)

$$\mu_{fuzzy2}(t) = 0.3 * \mu_{Positive}(t) * [(m-n) + (k-h)] \quad (5)$$

สำหรับสัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังปั๊ม B เพื่อควบคุมปริมาณการปล่อยน้ำลงในระบบให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างตามเป้าหมายที่กำหนดไว้

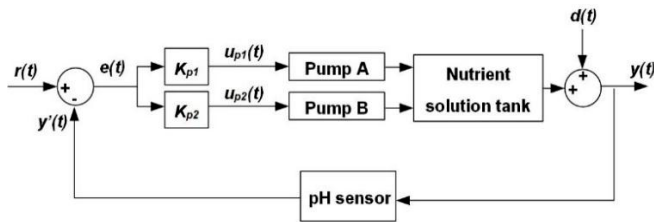
3.2.2) ตัวควบคุมแบบ P

การควบคุมแบบ P จะดำเนินการตามรูปที่ 8 โดยอัตราขยายสัดส่วน K_{p1} มีค่าเท่ากับ -3.81 และ K_{p2} เท่ากับ 95.24 โดยได้มาจากการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับปริมาณการเติมสารละลายกรดและการเติมน้ำจากผลการทดลองปรับสารละลายโดยมนุษย์ แล้วนำมาปรับค่าอย่างละเอียดเพิ่มเติมจากการทดลอง สัญญาณควบคุมป้อน A กรณีที่ต้องการเติมสารละลายกรดในระบบเพื่อให้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นแสดงดังสมการ (6)

$$u_{p1}(t) = K_{p1} * e(t) \quad (6)$$

และสัญญาณควบคุมป้อน B เมื่อต้องการเติมน้ำในระบบเพื่อลดความเป็นกรดของสารละลายแสดงดังสมการ (7)

$$u_{p2}(t) = K_{p2} * e(t) \quad (7)$$



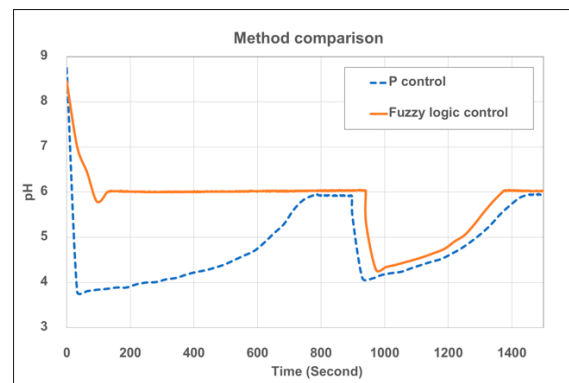
รูปที่ 8 แผนภาพระบบควบคุมแบบ P ที่ออกแบบ

4) ผลการวิจัย

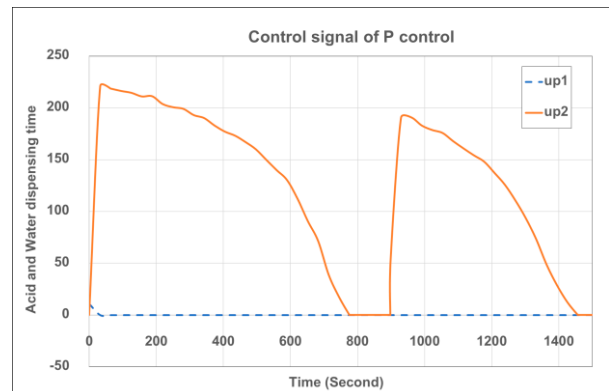
การทดลองช่วงเริ่มต้นใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 8.4 และกำหนดให้คาบเวลาการสูมตัวอย่างอยู่ที่ 30 วินาที เนื่องจากข้อจำกัดจากคุณสมบัติของอุปกรณ์และต้องการให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดีและตอบสนองต่อสิ่งรบกวนได้อย่างรวดเร็ว โดยให้การควบคุมแต่ละวิธีเติมสารละลายกรดเพื่อให้ถึงค่าเป้าหมายคือ 6 จากนั้นรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วรบกวนระบบด้วยการเติมสารละลายกรด 5 มิลลิลิตร เพื่อทดสอบการตอบสนองชั่วขณะและการตอบสนองที่สภาวะคงตัวของระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ P และตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลงที่นำเสนอ ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 9 จะเห็นว่าในช่วงแรกการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง (เส้นทึบสีส้ม) ใช้เวลา 126 วินาทีในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย ซึ่งตอบสนองได้รวดเร็วกว่าการควบคุมแบบ P (เส้นประสีน้ำเงิน) 650 วินาที มีค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่า 10.5 เท่า และมีค่าความความเป็นกรด-ด่างที่สภาวะคงตัวเป็น 6.01 ซึ่งน้อยกว่าการควบคุมแบบ P ที่มีค่าเป็น 5.92 หลังจากรบกวนระบบด้วยการเติมสารละลายกรดลงไป การควบคุมด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถตอบสนองได้เร็วกว่า 94 วินาที และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวน้อยกว่าเช่นเดิม อย่างไรก็ตามการควบคุมทั้งสองแบบสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้กลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้

เมื่อสังเกตในส่วนของสัญญาณควบคุมปั๊มเมื่อใช้การควบคุมแบบ P และเมื่อใช้การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบดัดแปลง รูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับนั้น จะเห็นว่าในช่วงแรกระบบควบคุมแบบ P พยายามลดค่าความเป็นกรด-ด่างโดยการควบคุมให้ปั๊ม A ปลดปล่อยสารละลายกรด (รูปที่ 10 เส้นประ

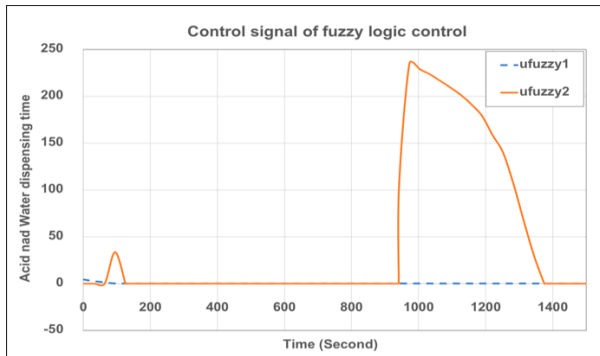
สีน้ำเงิน) มากกว่าระบบที่ควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (รูปที่ 11 เส้นประสีน้ำเงิน) ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงจนต่ำกว่าค่าเป้าหมายมากกว่า ตัวควบคุมจึงต้องชดเชยระบบด้วยการให้ปั๊ม B ปลดปล่อยน้ำ (รูปที่ 10 เส้นทึบสีส้ม) ให้มากกว่าและให้ปั๊มหยุดทำงานเมื่อได้ค่าความเป็นกรด-ด่างตามเป้าหมายแล้ว ในขณะที่หลังจากรบกวนระบบด้วยสารละลายกรด ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นพยายามชดเชยด้วยการควบคุมให้ปั๊ม B ปลดปล่อยน้ำ (รูปที่ 11 เส้นทึบสีส้ม) มากกว่าที่ตัวควบคุมแบบ P ชดเชย (รูปที่ 10 เส้นทึบสีส้ม) ทำให้ปั๊มหยุดปล่อยน้ำได้เร็วกว่านั่นเอง



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของค่าความเป็นกรด-ด่าง



รูปที่ 10 สัญญาณควบคุมปั๊มของการควบคุมแบบ P



รูปที่ 11 สัญญาณควบคุมปั๊มของการควบคุมแบบตรรกศาสตร์
คลุมเครือแบบตัดแปลง

5) สรุป

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ จะส่งผลให้พืชสามารถดูดซึมแร่ธาตุบางชนิดได้ดี และป้องกันการถูกทำลายของรากพืชได้ บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบตัดแปลง เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ P เพื่อควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์ จากการทดสอบกับระบบต้นแบบปรากฏว่าตัวควบคุมทั้งสองที่ออกแบบสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้และกำจัดผลจากการรบกวนได้ แต่วิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือที่นำเสนอตอบสนองได้รวดเร็วกว่า มีค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่า และมีค่าความคลื่อนที่สถานะคงตัวน้อยกว่าการควบคุมแบบ P แม้ไม่ได้นำเสนอในบทความนี้ วิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือแบบตัดแปลง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างร่วมกับปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อพืช เช่น การเติมธาตุอาหารให้แก่พืช เป็นต้น ได้

6) ข้อเสนอแนะ

ในการปรับเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหาร หากใช้สารละลายต่างแทนน้ำจะสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างได้เร็วขึ้น โดยสารละลายต่างที่นิยมใช้สำหรับการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.กันติชา กิตติพิรชล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด และช่วยแก้ไขปัญหาดัง ๆ มาโดยตลอดจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

REFERENCES

- [1] T. Wada, "Theory and technology to control the nutrient solution of hydroponics," in *Plant Factory using Artificial Light*, Japan: Elsevier, 2019, ch.1, sec.1.1, pp. 5-13.
- [2] T. Kaewwiset and T. Yooyativong, "Electrical conductivity and pH adjusting system for hydroponics by using linear regression," in *14th ECTI-CON*, Phuket, Thailand, Jun. 2017, pp. 761-764.
- [3] M. Fuangthong and P. Pramokchon, "Automatic control of electrical conductivity and pH using fuzzy logic for hydroponics system," in *3rd ICDAMT*, Chiangrai, Thailand, Feb. 2018, pp. 65-70.
- [4] R. C. Dorf and R. H. Bishop, "PID controllers," in *Modern Control System*, 13th ed. Malaysia: Pearson Education, 2017, ch.7, sec.7.6, p. 479.
- [5] K. Ogata, "Tuning rules for PID controller," in *System Dynamic*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2004, ch.10, sec.10, p. 566.
- [6] K. M. Passino and S. Yurkovich, "Fuzzy control: The basics," in *Fuzzy Control*. Menlo Park, CA, USA: Addison Wesley Longman, 1998, ch.1, sec.1.3, p. 23.