

การออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์พลังงานต่ำ

Design of Small Chamber Electrode for Low-Energy Pasteurization

นิตติพงษ์ ปานกลาง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: p.nitipong@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบสนามไฟฟ้ารวมและเหมาะสมกับการพาสเจอร์ไรซ์แบบกระบวนการต่อเนื่อง อิเล็กโทรดแชมเบอร์มีแชมเบอร์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ในลักษณะทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ การสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV และความกว้างของพัลส์เท่ากับ 1.5 μ s ต้องใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.15W/mL หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.225 $\times 10^{-6}$ J/mL เมื่อตัวกลางของเหลวมีความนำไฟฟ้า 0.3S/m การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในบริเวณ PEF Zone จากการวิเคราะห์ พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ ระดับแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ, แบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส, แบคทีเรียซูโดโมแนส ฟลูออเรสเซนส์ และยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีรีวิเชียมีค่าเท่ากับ 30kV และความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่า 1.2kV/mm ซึ่งมากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียและยีสต์ดังกล่าว

คำสำคัญ: อิเล็กโทรโพรเซชัน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, การพาสเจอร์ไรซ์

Abstract

This paper presents design and development of small electrode chamber for liquid food pasteurization by using pulse electric field. The developed electrode chamber is co-field type and suitable for continue pasteurization process. Electric field chamber for buildup electric field inside an electrode chamber at PEF Zone has radius and volume equal to 5mm and 785mm³ respectively. Power and energy was used to generate the electric field at PEF Zone about 0.15W/mL and 0.225 $\times 10^{-6}$ J/mL respectively, when the value of V_0 is 30kV and 1.5 μ s pulse width. The finite element method is used for electric-field strength analysis at PEF Zone - inner electrode chamber. From the analysis results show that, the electric-field strength was directly proportional to voltage V_0 of electrode. In order that, at 30kV of voltage V_0 can be used to

inactivate the E.coli, S.Aureus, P.Fluorescens and S.Cerevisiae. Electric field strength at PEF Zone was more than 1.2kV/mm that also was more than critical electric field of those bacteria and yeast membrane.

Keywords: Electropolation, Finite Element, Pasteurization

1. บทนำ

การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว โดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ [1,2] เป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ความร้อน เชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวจะถูกทำลายด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ด้วยเหตุนี้ เราจึงสามารถทำการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวได้ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ซึ่งมีข้อดีคือ อาหารเหลวยังคงมีคุณค่าทางอาหาร รสชาติ สีของอาหารและกลิ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง รวมถึงเอนไซม์และวิตามินต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในอาหารไม่ได้ถูกทำลายเนื่องจากความร้อน การพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าและยังเป็นจุดที่อาหารเหลวสัมผัสกับแรงดันไฟฟ้า จึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอาหารเหลว ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ได้

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ซึ่งถือว่าการพาสเจอร์ไรซ์ที่ใช้พลังงานต่ำกว่าแบบใช้ความร้อน รวมถึงผู้เขียนยังได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ เพื่อดูถึงลักษณะของสนามไฟฟ้าว่ามีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์หรือไม่

2. การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้า

การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่เป็นอันตรายที่อยู่ในอาหารเหลว อาทิเช่น ซาลโมเนลลา (Salmonella), เอสเชอริเชีย โคลิ (Escherichia Coli, E.Coli) ฯลฯ ด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์หรือการสเตอริไรซ์จำเป็นต้องอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิสูง ความร้อนดังกล่าว นอกจากจะทำลายเชื้อจุลินทรีย์แล้ว ยังอาจมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ทำให้รสชาติ สี กลิ่นเปลี่ยนแปลง และวิตามินถูกทำลาย การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าเป็นวิธีการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวโดยที่ไม่ใช้ความร้อน โดยอาศัยกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชัน (Electropolation) [3] ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าสภาพยอม (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ การ

เพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทำโดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงและมีลักษณะเป็นพัลส์ พัลส์สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้า(Electric Potential) ที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุน(Pores) เล็ก ๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์(Programmed Cell Death)

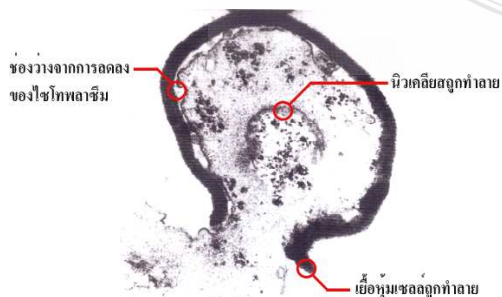
เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุน จะทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาสซึม(Cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การแตกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ในที่สุด รูปที่ 1 แสดงลักษณะการแตกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์แซคคาโรไมซิส ซีรีวิลีอี(Saccharomyces Cerevisiae, S.Cerevisiae) เนื่องจากพัลส์สนามไฟฟ้า 40kV/cm จำนวนพัลส์เท่ากับ 64 พัลส์

รูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ต้องเป็นแบบไฮโดรโฟบิก และมีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปสู่การตายของเซลล์ โดยปกติรูพรุนจะมีขนาดประมาณ 1 - 3 nm และเกิดครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 0.01 - 0.1% ของพื้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ทั้งหมด เยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์จะมีลักษณะเป็นฉนวน(Insulator) ที่ห่อหุ้ม ไซโทพลาสซึมไว้ภายใน ซึ่งไซโทพลาสซึมเป็นตัวนำไฟฟ้าและมีความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) มากกว่าเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 6 - 8 เท่า[4] ด้วยเหตุนี้บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์จึงสามารถพิจารณาในรูปของตัวเก็บประจุที่คั่นด้วยฉนวนที่มีค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก(Dielectric Constant, ϵ_r) เมื่อเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในอาหารเหลวได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะทำให้เกิดการเรียงตัวของประจุตามทิศทางของสนามไฟฟ้าบริเวณผนังของเยื่อหุ้มเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ประจุดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์และแรงทางกลในรูปของความเค้นทางไฟฟ้า (Electromechanical Stress) ขึ้น

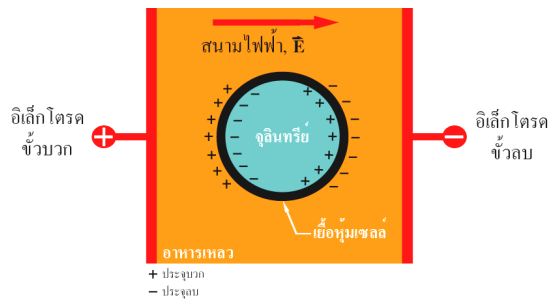
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการ[5]

$$U_c = f a_0 E_c \quad (1)$$

เมื่อ U_c คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์, f คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์, a_0 คือรัศมีวงนอกสุดของเซลล์และ E_c คือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ



รูปที่ 1 เยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์แซคคาโรไมซิส ซีรีวิลีอีที่เกิดการแตกตัว (กระบวนการเนโครลิซิส) เนื่องจากพัลส์สนามไฟฟ้า[6]

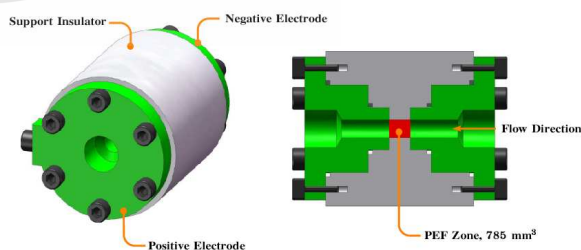


รูปที่ 2 ประจุไฟฟ้าที่สะสมบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์

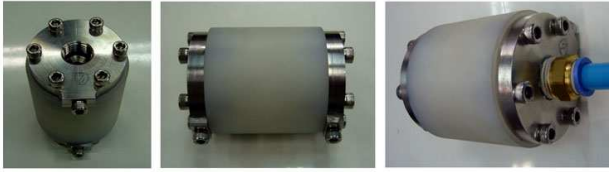
3. การออกแบบอิเล็กโตรดแชมเบอร์

อิเล็กโตรดแชมเบอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว อิเล็กโตรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโตรดขั้วบวกและขั้วลบที่ถูกยึดติดอยู่บนฉนวน โดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง อาหารเหลวที่เราต้องการพาสเจอร์ไรซ์จะถูกส่งผ่านช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด ในขณะที่เราจ่ายแรงดันให้กับอิเล็กโตรด อิเล็กโตรดแชมเบอร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ อิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบกลุ่ม (Batch Chamber), อิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Cross-Field Chamber) และอิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม (Co-Field Chamber)

อิเล็กโตรดแชมเบอร์แต่ละแบบมีคุณสมบัติและลักษณะของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ วัสดุที่เลือกมาทำฉนวนและอิเล็กโตรดได้แก่ โพลีเอไมด์ (Polyamide) และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 (Stainless Steel, SUS316L) ตามลำดับแบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโตรดแชมเบอร์มีลักษณะดังรูปที่ 3 อิเล็กโตรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโตรดขั้วบวก(Positive Electrode) และอิเล็กโตรดขั้วลบ(Negative Electrode) ที่ถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ภายในฉนวนมีช่องว่างหรือแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์หรือเรียกว่า PEF Zone รูปที่ 4 แสดงลักษณะของอิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วมที่พัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของอิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม คือ สนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone จะค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ แต่มีความเหมาะสมกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แบบกระบวนการต่อเนื่อง



รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 4 อิเล็กโทรดระบบเบรแบบสนามไฟฟ้าร่วม

อาหารเหลวที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดระบบเบรจะได้รับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบบริเวณ PEF Zone รวมถึงมีกระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลผ่านอาหารเหลว อิมพีแดนซ์ของอาหารเหลวบริเวณ PEF Zone สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z = \frac{(L + 0.254D)}{\frac{1}{4}\sigma\pi D^2} \quad (2)$$

เมื่อ Z คืออิมพีแดนซ์ของตัวกลางของเหลวบริเวณ PEF Zone (Ω/m^2), L คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดบริเวณ PEF Zone (m), D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณ PEF Zone (m) และ σ คือค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว (S/m)

การสร้างสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดระบบเบรบริเวณ PEF Zone ทำโดยการจ่ายแรงดันที่มีลักษณะเป็นพัลส์ให้กับอิเล็กโทรดระบบเบร เมื่อเราไม่คำนึงถึงอัตราการไหลของตัวกลางของเหลวที่ไหลผ่าน PEF Zone กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าต่อพัลส์แรงดันหนึ่งรูปคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

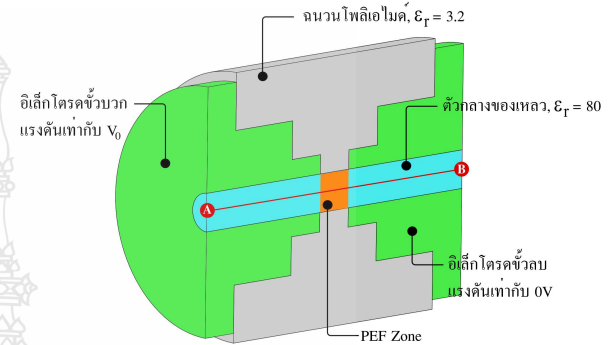
$$P_{pulse} = \sigma E^2 V_{CH} \quad (3)$$

เมื่อ P_{pulse} คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าต่อพัลส์หนึ่งรูปคลื่น (W), σ คือความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว (S/m), E คือความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m) และ V_{CH} คือปริมาตรของอิเล็กโทรดระบบเบรบริเวณ PEF Zone (m^3)

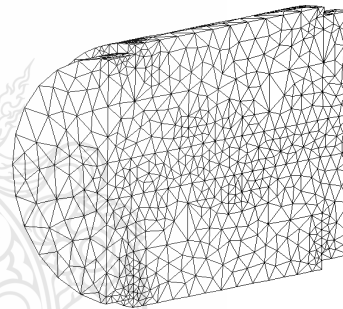
4. การวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์

จากอิเล็กโทรดระบบเบรที่ได้ออกแบบและพัฒนา ผู้เขียนได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีลักษณะผาครึ่งเพื่อให้เห็นถึงภายในบริเวณ PEF Zone เนื่องจากอิเล็กโทรดระบบเบรมีลักษณะสมมาตรรอบแกนหมุน แบบจำลองประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวกมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_0 อิเล็กโทรดขั้วลบมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์ ฉนวนโพลีเอไมด์ที่รองรับอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เท่ากับ 3.2[7] ตัวกลางของเหลวภายในอิเล็กโทรดระบบเบรกำหนดให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 แบบจำลองจะละเลยส่วนที่เป็นโอรังและบริเวณเหนืออิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ การคำนวณไม่คิดประจุค้าง (ρ_0) ที่เกิดขึ้นบริเวณตัวนำและฉนวน องค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5

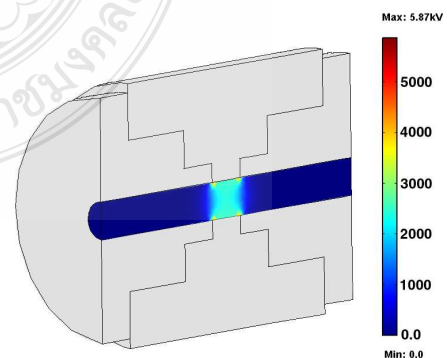
การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[8] และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) ของผลเฉลยเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \%$ การคำนวณแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวน 32,975 เอลิเมนต์และมีโหนดจำนวน 7,042 โหนด ดังแสดงในรูปที่ 6 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้เป็นเอลิเมนต์กำลังสองลากรองจ์ (Lagrange-Quadratic Element) และการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยใช้วิธีคางต่ำสุดแบบวางนัยทั่วไป (Generalized Minimal Residual Method, GMRES)



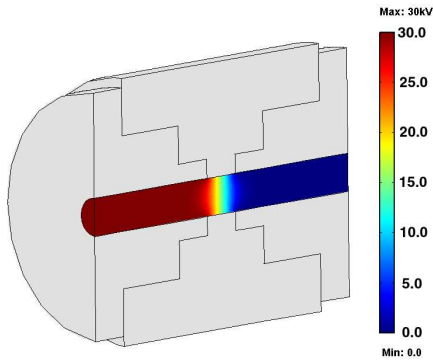
รูปที่ 5 แบบจำลองอิเล็กโทรดระบบเบร 3 มิติ



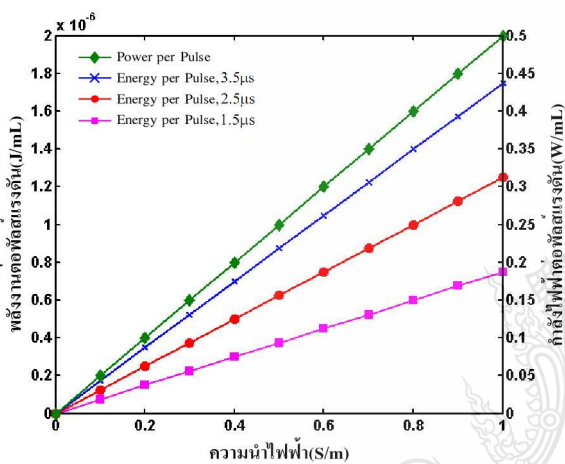
รูปที่ 6 การแบ่งพื้นที่ของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม



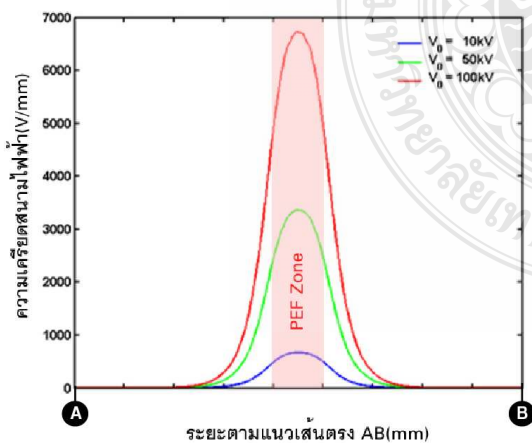
รูปที่ 7 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโทรดระบบเบรที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV



รูปที่ 8 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโตรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว $0.1 \leq \sigma \leq 1.0$



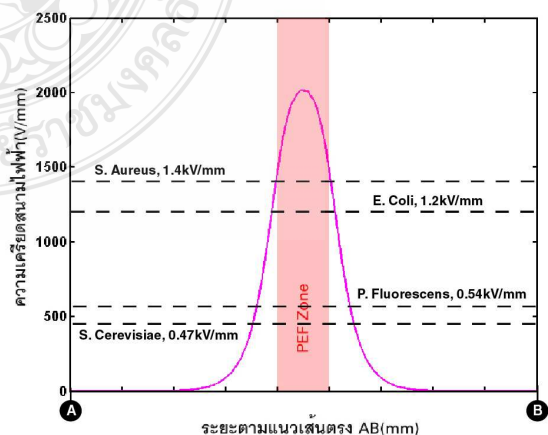
รูปที่ 10 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรง AB ที่ระดับแรงดัน 10kV, 50kV และ 100kV

รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโตรดแชมเบอร์ เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะเกิดขึ้นตรง

บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนโพลีเอไมด์กับอิเล็กโตรดขั้วบวกและขั้วลบ โดยมีค่าเท่ากับ 7.065kV/mm และตามแนวเส้นตรง AB ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าประมาณ 2kV/mm จากสมการที่ (3) เมื่อเราจ่ายแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV ให้กับอิเล็กโตรดแชมเบอร์ โดยกำหนดให้แรงดัน V_0 มีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ 1.5µs และตัวนำของเหลวมีความนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.3S/m กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 0.15W/mL หรือคิดเป็นพลังงาน $0.225 \times 10^{-6} \text{ J/mL}$ รูปที่ 9 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว $0.1 \leq \sigma \leq 1.0$ เมื่อกำหนด $E = 7.065 \text{ kV/mm}$ และพัลส์แรงดัน V_0 มีความกว้างเท่ากับ 1.5µs, 2.5µs และ 3.5µs ตามลำดับ

รูปที่ 10 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรง AB ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 10kV, 50kV และ 100kV ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนั้น ณ ระดับแรงดัน V_0 ที่ค่าสูงกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้ายังมีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อแรงดัน V_0 มีค่าต่ำๆ

การเลือกแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์สามารถพิจารณาจากสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ (Critical Electric Field of Membrane) โดยเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล (E.Coli) มีสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 1.2kV/mm[9] ดังนั้นแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไลด้วยอิเล็กโตรดแชมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 30kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ตามแนวเส้นตรง AB มีค่ามากกว่า 1.2kV/mm นอกจากนั้น ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ตามแนวเส้นตรง AB ยังมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียสแตปไฟโลคอคคัส ออเรียส (S.Aureus), แบคทีเรียซูโดโมแนสฟลูออเรสเซนส์ (P.Flourescens) และยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีรีวิเซีย (S.Cerevisiae) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรง AB ที่ระดับแรงดัน 30kV

5. สรุป

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์โทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้ารวมขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้สำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก (Positive Electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Negative Electrode) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ ที่ภายในฉนวนมีช่องว่างหรือแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟโนเอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในบริเวณ PEF Zone จากการวิเคราะห์ พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย ระดับแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล, แบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส, แบคทีเรียซูโดโมแนส ฟลูออเรสเซนส์ และยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีรีวิลีอี่ มีค่าเท่ากับ 30kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียและยีสต์ดังกล่าว

ในส่วนของกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แปรผันตรงกับความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลวและความกว้างของพัลส์แรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแชมเบอร์ โดยที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV และลักษณะแรงดัน V_0 เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ 1.5 μ s กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในตัวกลางของเหลวที่มีความนำไฟฟ้า 0.3S/m จะมีค่าเท่ากับ 0.15W/mL หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า $0.225 \times 10^{-6} \text{ J/mL}$

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lelieveld H.L.M. and et al. (2007). Food Preservation by Pulse Electric Field: From Research to Application, Woodhead Publishing Limited, England.
- [2] นิตยพงศ์ ปานกลาง และคณะ. "การศึกษาเบื้องต้นถึงการประยุกต์ใช้พัลส์สนามไฟฟ้าเพื่อการถนอมอาหารแบบประหยัดพลังงาน", การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4, 14-16 พฤษภาคม 2551.
- [3] Electroporation. From : <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroporation>.
- [4] Chen, W. and Lee, R. (1994). Altered ion channel conductance and ionic selectivity induced by large imposed membrane potential pulse. Biophysical Journal, 67: 603 - 612.
- [5] Schoenbach, K.H. and et al. (1997). The effect of pulsed electric field on biological cell: Experiment and application. IEEE Trans. Plasma Sci., 25: 284 - 292.

- [6] Barbosa-Canovas G.V. and et al. (1999). Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields, Academic Press, California.
- [7] Robert, P. (1988). Electrical and Magnetic Properties of Materials, Artech House Inc., Massachusetts.
- [8] Reece, A.B.J. and Preston, T.W. (2000). Finite Element Methods in Electrical Power Engineering, Oxford, New York.
- [9] Grahl, T. and Markl, H. (1996). Killing of Microorganisms by Pulse Electric Fields. Appl. Microbiol. Biotechnol., 45: 148 - 157.

ผลการประหยัดพลังงานจากการพัฒนาเรือร่อนน้ำไฟฟ้าเปรียบเทียบกับใช้เครื่องยนต์ดีเซล

Energy Saving Result of Electric Water Boat Development to Compare with using Diesel Engine

ธีระพล เหมือนขาว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม.1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร. 0-2549-3567 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail mk_theerapol@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานระหว่างเรือร่อนน้ำไฟฟ้าและเรือร่อนน้ำที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล เรือร่อนน้ำไฟฟ้าประกอบด้วย ตัวเรือที่ทำจากสแตนเลส แบตเตอรี่ ปั๊มน้ำ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งถูกใช้เป็นตัวขับเคลื่อนปั๊มน้ำและควบคุมทิศทางของเรือ กัดองควบคุมรีโมตและเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก สำหรับการทำงานของเรือร่อนน้ำ มีการทำงาน 2 โหมด คือ การควบคุมระยะไกลและการควบคุมแบบอัตโนมัติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเรือร่อนน้ำไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ขนาด 2.5 H.P ประหยัดพลังงานมากกว่า เรือที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลที่มีขนาด 18 HP และ 7 HP (ประมาณ 50%) ที่ระยะเดียวกันและปริมาณน้ำที่เท่ากัน

คำสำคัญ: ประหยัดพลังงาน เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

Abstract

This paper presents the comparison of energy saving result between electric water boat and diesel engine water boat. An electric water boat are consists of boat which made from stainless steel, battery, water pump, dc motor which used as power source to drive water pump and control the direction of boat, control box, remote control and ultrasonic sensor. For the operation of boat, there are two modes of operation: remote control and automatic control. The experimental result show that electric water boat with dc motor size 2.5 H.P save more energy than diesel engine water boat with size 18 H.P and 7 H.P (by about 50%) at the same distance and same water volume.

Keywords: Energy Saving, Ultrasonic Sensor

1. บทนำ

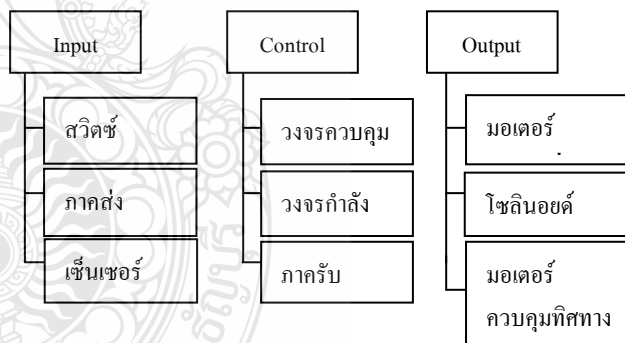
ในปัจจุบันความต้องการการใช้พลังงานน้ำมันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ทำให้น้ำมันมีราคาสูงขึ้นตามความต้องการ กลายเป็นภาระให้กับเกษตรกรที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการสูบน้ำหรือปั๊มน้ำด้วยเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการรดน้ำต้นไม้ จึงทำให้ต้องทนแบกรับภาระค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามาทดแทน

การใช้พลังงานน้ำมัน ก่อนหน้านี้ได้มีการพัฒนาเรือร่อนน้ำสักแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้แหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ผ่านอินเวอร์เตอร์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ [2]

การพัฒนาเรือร่อนน้ำไฟฟ้าควบคุมระยะไกลและอัตโนมัติ เป็นการพัฒนาการควบคุมแบบ 2 ระบบ คือ สามารถควบคุมการทำงานโดยใช้รีโมทและแบบอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011 เป็นตัวควบคุมการทำงาน รับคำสั่งมาจากรีโมทและอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ เช่น การบังคับเลี้ยว ชั่ว ขวา การขับมอเตอร์ของปั๊มน้ำ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่าย มีความสะดวก มากยิ่งขึ้น

2. การออกแบบและพัฒนา

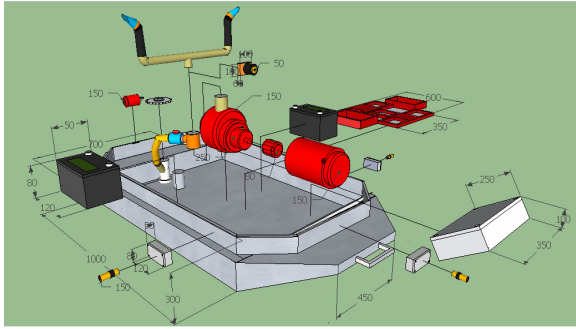
2.1 องค์ประกอบของเรือร่อนน้ำไฟฟ้า



รูปที่ 1 องค์ประกอบของเรือร่อนน้ำไฟฟ้า ประกอบด้วย

1. Input คืออุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณไปยังส่วนควบคุม ประกอบด้วย สวิทช์ รีโมตคอนโทรล และเซ็นเซอร์
2. Control คือส่วนที่รับข้อมูลจากจากอินพุตแล้วส่งสัญญาณออกทางด้านเอาต์พุต
3. Output คือ ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนและทำงานทางกล ประกอบด้วย มอเตอร์ขับปั๊มน้ำ มอเตอร์ควบคุมทิศทาง และโซลินอยด์วาล์วสำหรับเปิดปิดน้ำ

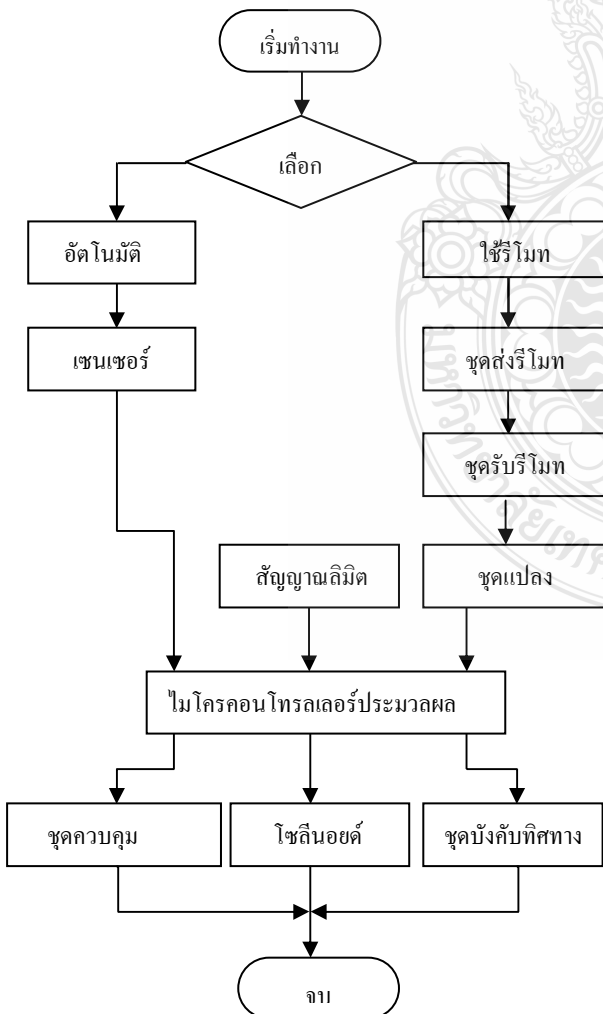
ชิ้นส่วนประกอบของเรือร่อนน้ำไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบของเครื่องสูบน้ำไฟฟ้า

2.2 การออกแบบระบบ

เริ่มต้นจากการหาขนาดของปั้มน้ำเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับปริมาณน้ำที่จะใช้ในการรดประมาณ 90-120 ลิตร/นาที จึงออกแบบเลือกปั้มน้ำใช้มอเตอร์ขนาด 2.5 Hp แบตเตอรี่ขนาด 70 Ah 2 ลูก ตัวเรือทำด้วยสแตนเลส กว้าง 0.7 เมตร ยาว 1.2 เมตร ลึก 0.3 เมตร การควบคุมการทำงานของเรือคาน้ำไฟฟ้าสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด คือ แบบควบคุมด้วยมือหรือใช้รีโมท และแบบให้ทำงานเองโดยอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการควบคุมของเรือคาน้ำไฟฟ้า

หลักการการทำงานจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011 [1]เป็นตัวประมวลผล รับสัญญาณจาก รีเซฟเวอร์ของตัวรีโมท ผ่านวงจรขับของเซอร์โวมอเตอร์เป็นสัญญาณพัลส์ ช่วงบวกและช่วงลบ ต่อ 1 CH หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาต่อผ่านไฟโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะใช้ 2 ตัวในการคิดสัญญาณซีกบวกและซีกลบต่อ 1 CH ซึ่งต้องใช้ทั้งหมด 4 CH ได้แก่ CH 1 เลี้ยวซ้ายขวา CH 2 เดินหน้า-ถอยหลัง CH 3 เปิด-ปิดโซลินอยด์ และ CH 4 ปรับความเร็วมอเตอร์ปั้มน้ำ

แล้วนำสัญญาณที่ได้เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณอินพุตอีกส่วนหนึ่ง จะได้อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้ทางด้านหน้าและด้านข้างทั้งสองข้าง เพื่อตรวจจับขอบคลอง และส่งสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผล ใช้ Power MOSFET เบอร์ IRFP2907 เป็นตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณ PWM ที่ duty cycle 3 ระดับเป็นสัญญาณทริกเกอร์ Power MOSFET [3]

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลเรือคาน้ำโดยใช้น้ำมันดีเซล

เรือคาน้ำทางการเกษตรที่ได้ไปเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบส่วนใหญ่ใช้น้ำมันดีเซล อาจจะมีด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซิน ข้อมูลของเครื่องยนต์ที่ได้เก็บมานั้นขนาดพิกัดแรงม้าอาจจะไม่เท่ากับกับขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้า มีขนาดเท่ากับ 7 และ 18 แรงม้าแน่นอนแรงแม้มากย่อมให้อาชีพดีมาก แต่ในการเปรียบเทียบจะพิจารณาบนฐานอ้างอิงเดียวกันเพื่อหาผลประหยัด จากรูปที่ 4 แสดงเรือคาน้ำไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมา รูปที่ 5 เรือคาน้ำใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 7 แรงม้า และรูปที่ 8 เรือคาน้ำใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 18 แรงม้า



รูปที่ 4 แสดงเรือคาน้ำไฟฟ้า



รูปที่ 5 เรือคาน้ำใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 7 แรงม้า



รูปที่ 6 เรือร่อนน้ำใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 18 แรงม้า

ทดลองเก็บข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในสถานที่จริง ของเรือที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลและเรือร่อนน้ำไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์ที่มีขนาดแรงม้าสูง ๆ จะให้อัตราไหลหรือปริมาณน้ำที่ต้องการมากกว่าขนาดเล็ก แสดงตารางที่ 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีชผลทางการเกษตรด้วยว่าต้องการปริมาณน้ำมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 1 ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ ของเครื่องยนต์ดีเซล

อัตราการไหลของน้ำเครื่องยนต์ดีเซล (ลิตร/นาที)			
ครั้งที่	เครื่องยนต์ 7 Hp	เครื่องยนต์ 18 Hp	มอเตอร์ไฟฟ้า 2.5 Hp
1	386	626	102
2	400	542	104
3	382	568	98
4	371	580	99.5
เฉลี่ย	385	580	101

ตารางที่ 2 ทดลองวัดระยะทางปริมาณน้ำและจับเวลากรณีใช้น้ำมัน 1 ลิตร

ระยะทาง ปริมาณน้ำและจับเวลากรณีใช้น้ำมัน 1 ลิตร			
	ระยะทาง (กิโลเมตร)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำ (ลิตร)
7 Hp	3.2	50	19,230
18 Hp	2.6	35	20,118

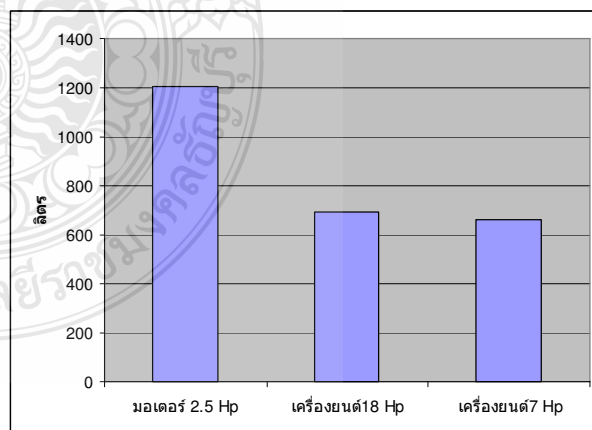
ตารางที่ 2 แสดงผลของการร่อนน้ำไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของเรือ ซึ่งได้วัดระยะทางและทำการจับเวลา ในกรณีที่ใช้ น้ำมันดีเซล 1 ลิตร

3. การวิเคราะห์ผลประหยัดที่ได้จากการใช้เรือร่อนน้ำไฟฟ้า

การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลประหยัด มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งการชาร์จ 1 ครั้งใช้เวลา 6 ชั่วโมง ใช้พลังงาน 1.5 หน่วย คิดหน่วยละ 3.5 บาท ดังนั้น ชาร์จ 1 ครั้งเสียค่าใช้จ่ายเท่ากับ 5.25 บาท โดยใช้งานในการร่อนน้ำได้ประมาณ 1 ชั่วโมง สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 18 แรงม้า เสียค่าใช้จ่าย 49.71 บาท/ชั่วโมง และ เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 7 แรงม้า เสียค่าใช้จ่าย 34.8 บาท/ชั่วโมง นอกจากนี้สามารถเปรียบเทียบ ปริมาณน้ำที่ได้ต่อค่าใช้จ่าย ลิตร/บาท แสดงดังตารางที่ 3 และแสดงเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบทั้ง 3 ประเภท ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับปริมาณน้ำที่ได้

การเปรียบเทียบ	ค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน		
	มอเตอร์ 2.5 Hp	เครื่องยนต์ 18 Hp	เครื่องยนต์ 7 Hp
ปริมาณน้ำ ลิตร/ชม.	6,206.4	34,488	23,076
ค่าใช้จ่าย บาท/ชม.	5.25	49.71	34.8
ปริมาณน้ำ ลิตร/บาท	1,205.83	693.72	663.10



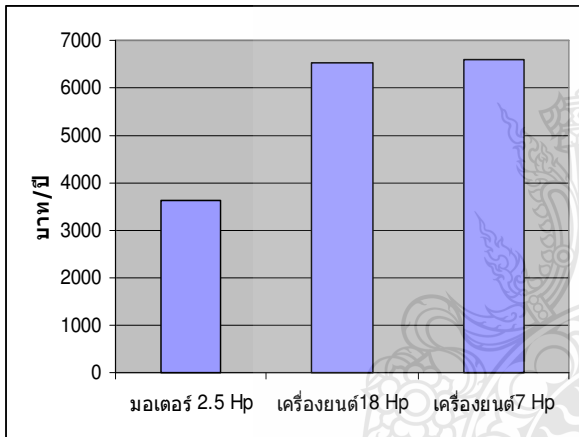
รูปที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณน้ำต่อค่าใช้จ่าย (ลิตร/บาท)

ทดลองร่อนน้ำจริง ซึ่งขนาดของแปลงพีชผักผลไม้ จำนวน 7 ไร่ รวมระยะทางประมาณ 1.4 กิโลเมตร ทำการร่อนน้ำวันละ 2 ครั้ง คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีในการร่อนน้ำ โดยใช้ฐานในการคำนวณเดียวกัน คือปริมาณน้ำ

6,000 ลิตร/ครั้ง จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการรดน้ำโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า
ค่าใช้จ่ายต่อปีเท่ากับ 3,635.4 บาท สำหรับเครื่องยนต์ 18 Hp เท่ากับ
6,540.4 บาท และ เครื่องยนต์ 7 Hp เท่ากับ 6,602.8 บาท

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับปริมาณน้ำที่ได้

ค่าใช้จ่ายต่อระยะทาง 1.4 กิโลเมตร (บาท)			
	มอเตอร์ 2.5Hp	เครื่องยนต์ 18 Hp	เครื่องยนต์ 7 Hp
ปริมาณน้ำ 6,000 ลิตร/ครั้ง	4.98	8.65	9.04
ค่าใช้จ่ายต่อวัน	9.96	17.29	18.08
ค่าใช้จ่ายต่อปี	3,635.4	6,540.4	6,602.8



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณน้ำต่อค่าใช้จ่าย(ลิตร/บาท)

จากรูปที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ปริมาณ
เอาต์พุต (น้ำ 6000 ลิตร) เท่า ๆ กัน เมื่อคิดต่อปี เรือรดน้ำไฟฟ้าเสีย
ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานถูกกว่าประมาณเกือบ 50 % ของเครื่องยนต์
ดีเซล และจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์ดีเซลทั้ง 2 ขนาด เมื่อคำนวณค่าใช้จ่าย
ต่อปีแล้วมีค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกันมาก

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเรือรดน้ำไฟฟ้าสามารถ
ทำงานได้ 2 โหมด คือแบบควบคุมด้วยรีโมตไร้สายและแบบทำงานเอง
โดยอัตโนมัติ ซึ่งสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ การทำงานแบบ
อัตโนมัติจะใช้อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับเพื่อควบคุม
การเคลื่อนที่ของเรือ ส่วนการควบคุมโดยรีโมต ใช้คลื่นความถี่วิทยุ

เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือ เปิด-ปิดวาล์วน้ำ และระดับน้ำ ซึ่งปรับ
ได้ 3 ระดับ นอกจากนี้ได้เก็บข้อมูลการใช้พลังงานของเรือรดน้ำที่ใช้
เครื่องยนต์ดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ผลที่ได้คือ
ปริมาณน้ำ (ลิตร/บาท) เรือรดน้ำไฟฟ้าให้ปริมาณน้ำมากกว่าเครื่องยนต์
ทั้ง 2 ขนาด และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อปี จากเงื่อนไขที่เอาต์พุต
หรือปริมาณน้ำที่เท่ากัน เรือรดน้ำไฟฟ้าเสียค่าพลังงานน้อยกว่าเกือบ
50% เมื่อเปรียบเทียบกับเรือรดน้ำที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายธีระพงษ์ แดงด้วง นายทวิศักดิ์ บุญประเสริฐ
นักศึกษาคณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี ที่ช่วยพัฒนาเรือรดน้ำไฟฟ้าและทดสอบการทำงาน และกลุ่ม
เกษตรกรรมชนคลอง 6 ที่ให้ข้อมูลและให้ทดลองเรือรดน้ำเครื่องยนต์
ดีเซล

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประจัน พลังสันติกุล “การเขียนโปรแกรมควบคุม
ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C”,
2552
- [2] เมธี ทรัพย์สูงเนิน, กมลชัย จันทร์อุ่น, บุญเติม แซ่ฮ่า “เรือรดน้ำผัก
อัตโนมัติ” ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2548
- [3] วีระชัย ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”
พิมพ์ครั้งที่ 2 ม.วิ.จ. พรินติ้ง, 2547

ประวัติผู้เขียนบทความ



ธีระพล เหมือนขาว สำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาตรี วศ.บ.(ไฟฟ้ากำลัง) จาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ระดับ
ปริญญาโท วศ.ม.(ไฟฟ้ากำลัง) จาก
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันดำรง
ตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี งานวิจัยด้านหุ่นยนต์ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ระบบป้องกัน
ไฟฟ้ากำลัง