

แบบจำลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ที่ปนเปื้อนฟอสเฟต ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า Optimization Modeling for Treatment of Wastewater Containing Phosphate by Electrochemical Process

ศตวรรษ ทวงชน^{1*} วัชรวิษณุ ดาวสว่าง²

Sattawat Thuangchon^{1*} and Wacharawish Daosawang²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม อ.ศรีสงคราม จ.นครพนม 48150

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
A. Kantarawichai, Mahasarakham, Thailand 44150

²Department of Electrical Engineering, Technology Srisongkram college, Nakhonphanom University
A. Srisongkram, Nakhonphanom, Thailand 48150

* E-mail: sattawat.t@msu.ac.th, sattawat.th@gmail.com, Tel. 0918628896

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองสำหรับสถานะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง หาสถานะที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ทดลองด้วยถึงปฏิบัติการแบบเบทซ์ที่เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใช้แผ่นอะลูมิเนียมสองแผ่น ที่มีพื้นที่ประสิทธิผลแผ่นละ 10 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ทุกปัจจัยที่ใช้ศึกษามีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฟอสเฟตคำนวณได้จากแบบจำลองถดถอยกำลังสอง ทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยการเลือกสถานะที่เหมาะสมมาทดลองซ้ำ 1 สถานะ พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสียเท่ากับ 13.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตที่ต้องการร้อยละ 80 สถานะที่เหมาะสมคือ เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า เท่ากับ 10.82 นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 9.19 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เท่ากับ 7.73 ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตจากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81.78 แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเท่ากับร้อยละ 1.77 แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดเมื่ออยู่ในสถานะที่จำเพาะ คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 10 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า 5 – 35 นาที กระแสไฟฟ้า 5 – 12.5 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 6 – 9 โดยประสิทธิภาพจากการทำนายจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70 - 90

คำสำคัญ: ฟอสฟอรัส บำบัด อิเล็กโทรไลต์ แอโนด

ABSTRACT

This research studied the mathematical modeling for optimization of the operating conditions and investigation of factors affecting on treatment of wastewater containing phosphate by electrochemical process. A central composite experimental design (CCD) combining with response surface method (RSM) and multiple regression analysis was employed to establish the model and to study effects of four independent variables on phosphate removal. These variables included initial concentration of phosphate in wastewater, electrical discharging time, applied current and initial pH of wastewater. Levels of significance for the operating conditions were tested by means of the analysis of variance (ANOVA) with 95 % confidence limits ($\alpha = 0.05$). All tests were conducted with batch experiments using reactors of working volume of 200 ml filled with synthetic wastewater. Two Aluminium plates with effective areas of 10 cm² were used as electrodes with a separation distance of 2 cm. Results indicated that all operating conditions were at the significance level of 0.05 ($P < 0.05$). The optimum conditions were obtained by solving the quadratic regression model. The model validation was conducted using one of the experimental trials, which had the initial phosphate concentration of 13.34 mg/l and required a 80% removal efficiency. The model optimization provided an electrical discharging time of 10.82 minutes, applied current of 9.19 mA and initial pH of wastewater of 7.73. An average experimental value for phosphate removal was 81.78%, which was slightly 1.77% different from the modeled value. However, the application of this optimization model was limited to the certain conditions including, a 10 - 35 mg/l initial phosphate concentration range, a 5 - 35 minute electrical discharging range, a 5 - 12.5 mA applied current range, and an initial pH range of 6 - 9. The predicted phosphate removals were expected to be 70 - 90%.

Keywords : phosphorus, removal, electrocoagulation

1. บทนำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) เป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่มีความจำเป็นและเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตขั้นต้น (primary producer) ในห่วงโซ่อาหาร (food chain) ด้วยแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นของจำนวนประชากร ส่งผลให้ความต้องการด้านอาหารมีมากขึ้น และความต้องการใช้ฟอสฟอรัสในกิจกรรมต่างๆจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ในปัจจุบัน ฟอสฟอรัสได้ถูกนำมาใช้ในกิจกรรมของมนุษย์อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการผลิตปุ๋ย ใช้เป็นส่วนประกอบในสารกำจัดศัตรูพืช (pesticide) เช่น สารกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate) หรือใช้เป็นส่วนประกอบของสารซักล้างหรือทำความสะอาดต่างๆ เป็นต้น สารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆเหล่านี้ของมนุษย์หากเกิดการปนเปื้อนออกสู่ธรรมชาติในปริมาณมาก ก็มักจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ

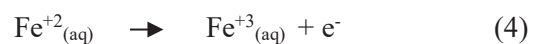
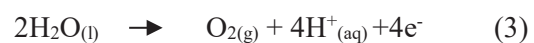
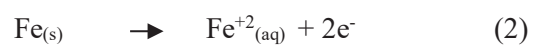
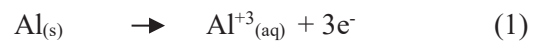
ปนเปื้อนของน้ำเสียชุมชนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากในน้ำเสียชุมชนมักจะปนเปื้อนไปด้วยสารประกอบฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($PO_4^{3-}-P$) ทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการบำบัดก่อน ก็อาจจะทำให้พืชน้ำต่างๆ แพลงค์ตอนพืช และสาหร่ายเซลล์เดียว เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนมีจำนวนมากผิดปกติ เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า สาหร่ายเบ่งบาน (algal bloom) [1] และหากปล่อยทิ้งไว้ ไม่รีบทำการแก้ไข ก็จะทำให้ระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำนั้นเสียสมดุล ขาดความหลากหลายทางชีวภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมในการดำรงชีวิต เกิดการตายและทับถมกันของสัตว์น้ำ แพลงค์ตอนและพืชน้ำต่างๆ จนก่อให้เกิดการเน่าเสียของน้ำในแหล่งน้ำนั้นตามมา ทำให้มนุษย์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ตามปกติอีกต่อไป โดยเรียกปรากฏการณ์ที่น้ำเน่าเสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชสาหร่ายเซลล์เดียวและพืชน้ำที่มี

มากกว่าปกตินี้ว่า ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) [2] ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการบำบัดหรือกำจัด ฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ

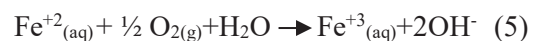
การกำจัดหรือบำบัดฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส ที่ปนเปื้อนในน้ำนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้ อย่างแพร่หลาย เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้อย แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างต่ำและในการควบคุมหรือเดินระบบมีความยุ่งยากซับซ้อน ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญโดยเฉพาะ หรืออาจจะทำการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมี (chemical precipitation) เช่น ปูนขาว (lime) สารส้ม (Alum) หรือสารประกอบเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้สารเคมีและเกิดตะกอนจากปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นตามมา การบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (electrochemical process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ควบคุมระบบได้ง่ายและใช้ได้กับน้ำเสียหลากหลายชนิด ทั้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม [3-5] และน้ำเสียชุมชน [6-7] กระบวนการนี้จะอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) ที่มีกลไกที่ซับซ้อนในการบำบัดมลสารในน้ำ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าผ่านตัวนำลงไปในสารละลาย จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (electrode) และสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติกส์ (electrolytic cell) เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยที่ขั้วบวก (anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้โลหะที่ใช้ทำขั้วบวกเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและปล่อยไอออนบวกของโลหะ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้ อะลูมิเนียม หรือเหล็ก ปล่อยออกอะลูมิเนียมไอออน (Al³⁺) หรือเหล็กไอออน (Fe²⁺)

ออกมาในสารละลาย ไอออนบวกเหล่านี้จะไปรวมกับมลสารที่มีประจุลบในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากและตกตะกอนผลึก (precipitation) แยกตัวออกมาจากสารละลายได้ ขณะเดียวกันที่บริเวณขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ของโมเลกุลน้ำ (H₂O) เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ซึ่งสามารถไปรวมกับไอออนบวกของโลหะที่ใช้ทำขั้วบวก (Al³⁺, Fe²⁺) เกิดเป็นตะกอน (floc) ไฮดรอกไซด์ของโลหะนั้นๆ [7] โดยตะกอนผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทั้งหมดนี้ ยังสามารถดูดซับ (adsorption) มลสารบางชนิดเอาไว้ที่ผิวได้ด้วย [8-10] เมื่อตะกอนเหล่านี้ถูกแยกตัวออกมาจากสารละลายจึงสามารถกำจัดมลสารเหล่านี้ออกไปได้พร้อมๆกัน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ อะลูมิเนียมหรือเหล็ก เป็นขั้วอิเล็กโทรดแสดงดังสมการที่ (1) – (8) ดังต่อไปนี้ [8, 11-12]

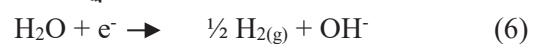
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (Anode) :



เมื่อมีออกซิเจนอยู่ในสารละลาย Fe²⁺ จะถูกเปลี่ยนไปเป็น Fe³⁺ จากปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการ (5)



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (Cathode) :



ปฏิกิริยารวมในสารละลาย (bulk solution) เมื่อมีการปนเปื้อนด้วยฟอสเฟต [12]



ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาทดลองบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า พบว่า

สามารถบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถบำบัดได้ถึงร้อยละ 80 – 99 [6, 10, 13-14] แต่เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้านี้ จะอาศัยการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการบำบัด ประกอบกับการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดในขณะที่บำบัด ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและการซ่อมบำรุงระบบสูง ระบบนี้จึงไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายเท่าที่ควร แต่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้เกิดการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเป็นอย่างมาก ทั้งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย หรือการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงมีความคุ้มค่าและน่าสนใจในการนำมาใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง การออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการใช้งานก็ยังเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมาก ซึ่งในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบค่ากำหนดหรือค่าแนะนำในการออกแบบ (design criteria) ที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียแต่ละชนิด แต่ในปัจจุบันยังมีรายงานเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมาก ทำให้การนำไปขยายการทดลองเป็นระดับต้นแบบ (pilot scale) หรือการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเกิดข้อจำกัด ดังนั้นเพื่อเติมเต็มความรู้ความเข้าใจและลดข้อจำกัดการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว งานวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลและความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งจะสามารถพัฒนาไปเป็นค่ากำหนดหรือค่าแนะนำในการออกแบบระบบได้ต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตการทดลอง

การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) ทำการทดลองแบบแบตช์ (batch) ที่อุณหภูมิห้อง (กำหนดอุณหภูมิด้วยเครื่องปรับอากาศที่ 25 องศาเซลเซียส) ออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (central composite design) กำหนดให้มีการทำซ้ำ (replication) ที่จุดกลาง (center point) 6 ครั้ง วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (multiple regression analysis) หาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) ทำการทดลองตัวอย่างละ 1 ซ้ำ และเปลี่ยนแผ่นขั้วอิเล็กโทรดใหม่ทุกการทดลอง

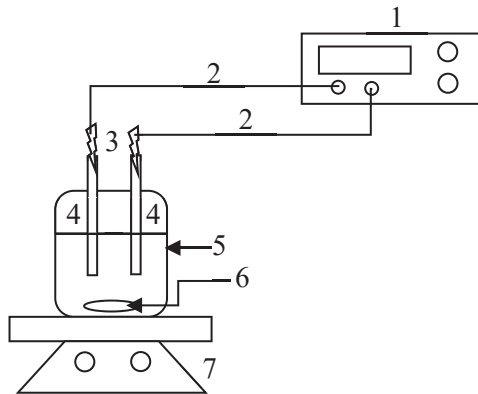
2.2 วัสดุและสารเคมี

สารละลายทั้งหมดในการทดลองครั้งนี้จะเตรียมโดยใช้ น้ำกลั่น (distilled water) สารเคมีทั้งหมดใช้ ยี่ห้อ UNILAB เกรดปฏิบัติการ (laboratory grade) น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจาก ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณฟิเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก (HCl) น้ำตัวอย่างที่สิ้นสุดการทดลองแล้วจะถูกกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ยี่ห้อ Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 300 มิลลิลิตรเป็นถังปฏิกรณ์ วัดค่าฟิเอชของสารละลายด้วยเครื่องวัดฟิเอช (Mettler Toledo pH meter model seven easy™) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นอะลูมิเนียม

เกรดการค้า (commercial grade) ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป ความหนา 1 มิลลิเมตร ตัดให้มีความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการจุ่มในสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก (5% โดยน้ำหนัก) ล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ อบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นและเก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดลอง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (direct current power supply) สามารถปรับค่ากระแสได้ในช่วง 0 – 3 แอมแปร์ ปรับความต่างศักย์ได้ในช่วง 0 – 30 โวลต์ ต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดด้วยที่คีบปากจระเข้ แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) สายไฟ (3) ที่คีบปากจระเข้ (4) แผ่นอิเล็กโทรด (5) บีกเกอร์ (6) แท่งแม่เหล็ก (7) เครื่องกวนแม่เหล็ก

2.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์และผลการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่คงเหลืออยู่ จะวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน [15] ด้วยวิธีแวนาโดโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ PG Instrument รุ่น T60 UV Vis นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่

และคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตจากสมการที่ (9) ดังนี้

$$R = 100 \times (C_i - C_f) / C_i \quad (9)$$

เมื่อ R คือประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

C_i คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น (มก./ล.)

C_f คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลือ (มก./ล.)

3. วิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัด จะออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง กำหนดให้ประสิทธิภาพการบำบัดเป็นผลตอบสนอง (response) และกำหนดปัจจัยที่ใช้ศึกษา 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาทิจ) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลอง 5 ระดับ ค่าแอลฟา (axial point; α) เท่ากับ 2 จำนวนการทำซ้ำ (replication) ที่จุดกลาง (center point) เท่ากับ 6 ปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

parameters	level				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
X_1	2.7	10.7	18.7	26.7	34.7
X_2	5	20	35	50	65
X_3	2.5	5	7.5	10	12.5
X_4	5	6	7	8	9

หมายเหตุ :

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

X_2 คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาทิจ)

X_3 คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์)

X_4 คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดยการชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่อบแห้ง 219.5 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l as PO_4^{3-}) จากนั้นนำไปเจือจางให้มีความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ได้ปริมาตรอย่างน้อย 35 มิลลิลิตร แล้วนำไปเติมสารเคมีตามวิธีแวนาโดมอลิบโดฟอสฟอริกแอซิด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตพล็อตกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ จะได้กราฟที่มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง สามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างได้

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และขั้นตอนการทดลอง

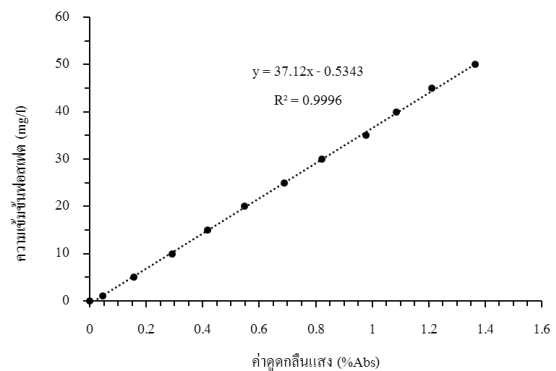
เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยชั่งไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 100 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ให้เป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายตั้งต้นที่มีไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตไดไฮเดรต เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ($\text{mg/l as Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากนั้นปิเปต (pipet) สารละลายตั้งต้นไปเจือจางในขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตรให้มีความเข้มข้น 5, 20, 35, 50 และ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร ($\text{mg/l as Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) คิดเป็นความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 2.7, 10.7, 18.7, 26.7 และ 34.7 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l as PO_4^{3-}) ตามลำดับ ตวงน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับความเข้มข้นแล้วด้วยกระบอกตวงให้ได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ซึ่งใช้เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก จุ่มขั้วอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ ให้แต่ละขั้วจุ่มลงไปนสารละลายเป็นระยะ 5 เซนติเมตร

(พื้นที่ประสิทธิผลของขั้วแอโนด เท่ากับ 10 ตารางเซนติเมตร) ติดตั้งให้ขั้วห่างกันเป็นระยะ 2 เซนติเมตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นต่อขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยที่คียบปากจิ้งจก เปิดสวิตช์เครื่องจ่ายไฟฟ้าแล้วจับเวลา เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ นำน้ำส่วนที่ผ่านกระดาษกรองไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองไปคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด แล้ววิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลและสร้างสมการความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

4. ผลการทดลอง

4.1 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

เมื่อนำความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตพล็อตกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ จะได้แผนผังความสัมพันธ์ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับร้อยละ 99.96 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังความสัมพันธ์ของความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

โดยความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร จะมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ (10)

$$Y = 37.12X - 0.5343 \quad (10)$$

เมื่อ

Y คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสีย (มก./ล.)

X คือ ค่าการดูดกลืนแสง (ร้อยละ)

4.2 การทดสอบความเหมาะสมทางสถิติของชุดข้อมูล

เมื่อทำการกำหนดปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง จะได้จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 30 ชุดการทดลอง สภาวะที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตที่ได้จากการทดลอง

Run no.	parameters				response
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y _{obs}
1	2.7	35	7.5	7	68.22
2	10.7	20	5	6	82.59
3	10.7	50	10	6	93.89
4	10.7	50	5	6	99.15
5	10.7	20	10	6	98.48
6	10.7	50	10	8	89.37
7	10.7	20	10	8	81.40
8	10.7	50	5	8	87.47
9	10.7	20	5	8	81.33
10	18.7	35	7.5	9	82.56
11	18.7	65	7.5	7	86.57
12	18.7	35	7.5	7	83.10
13	18.7	35	7.5	7	80.95
14	18.7	35	7.5	7	80.68
15	18.7	35	7.5	7	81.50
16	18.7	35	7.5	7	81.46
17	18.7	35	7.5	7	81.33
18	18.7	35	12.5	7	83.62
19	18.7	35	7.5	5	77.26
20	18.7	5	7.5	7	81.52
21	18.7	35	2.5	7	78.14
22	26.7	20	10	8	82.19
23	26.7	50	5	8	81.71
24	26.7	50	10	6	79.33
25	26.7	50	10	8	86.67
26	26.7	20	10	6	83.70
27	26.7	50	5	6	72.29
28	26.7	20	5	8	80.92
29	26.7	20	5	6	77.42
30	34.7	35	7.5	7	78.52

หมายเหตุ :

X₁ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

X₂ คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาทิจ)

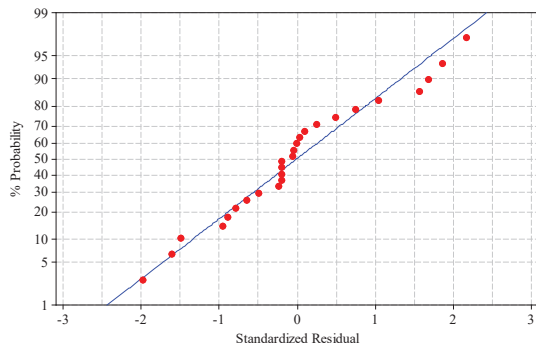
X₃ คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์)

X₄ คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

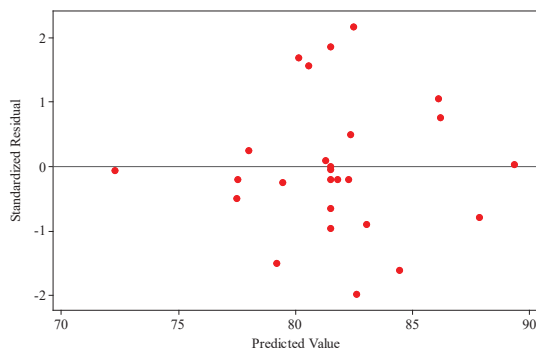
Y_{obs} คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

เมื่อนำข้อมูลทั้ง 30 ชุดการทดลอง มาทดสอบข้อกำหนดทางสถิติ พบว่า มีชุดข้อมูลบางชุดที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) มีความผิดปกติสูง เป็นไปได้ว่าชุดข้อมูลเหล่านั้นอาจเกิดความผิดปกติจากปัจจัยภายนอกหรือการทดลอง ซึ่งจะส่งผลให้สมการหรือแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัยกับผลตอบสนอง (Y_{obs}) ดังนั้นเพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยกับผลตอบสนองได้อย่างเหมาะสมและมีความแม่นยำ จึงพิจารณาตัดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติ ได้แก่ ข้อมูลจากชุดการทดลองที่ 1, 3, 4 และ 5 ออกจากการวิเคราะห์ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติอีกครั้ง ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อทำการพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal % probability) กับ ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน ความสัมพันธ์จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงทำมุมใกล้เคียง 45 องศา (รูปที่ 3) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์เป็นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าทำนายผลตอบสนอง (Predicted Value) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบแน่นอน (รูปที่ 4) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่าไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติและข้อมูลมีการกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (รูปที่ 5) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่ม มีความ

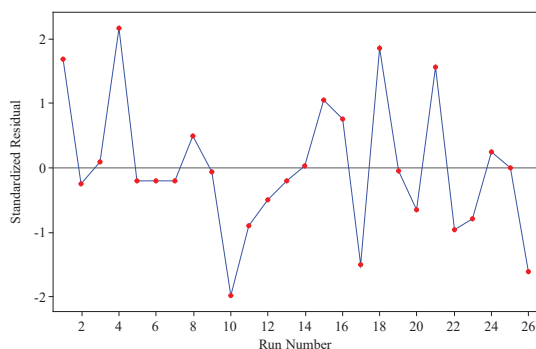
เป็นอิสระต่อกันและเหมาะสมที่จะใช้สร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 แผนภาพการกระจายตัวร้อยละความน่าจะเป็นปกติกับส่วนเหลือมาตรฐาน



รูปที่ 4 แผนภาพการกระจายตัวส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าทำนายผลตอบสนอง



รูปที่ 5 แผนภาพการกระจายตัวส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง

4.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

หลังจากทดสอบความเหมาะสมทางสถิติของชุดข้อมูลแล้ว จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการตัวแบบที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์ ANOVA ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่ใช้ทดลองทั้ง 4 ปัจจัย คือความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ($P=0.0001$) ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า ($P=0.0024$) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ($P<0.0001$) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ($P=0.0002$) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยมีสมการความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$Y_{obs} = 90.3507 - 1.2224X_1 - 0.8831X_2 + 1.6258X_3 + 1.7048X_4 - 0.0103X_1X_2 + 0.0354X_1X_3 + 0.1154X_1X_4 + 0.0144X_2X_3 + 0.1144X_2X_4 - 0.2836X_3X_4 + 0.0069X_1^2 + 0.0032X_2^2 - 0.0109X_3^2 - 0.3107X_4^2 \quad (11)$$

โดย

Y_{obs} คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

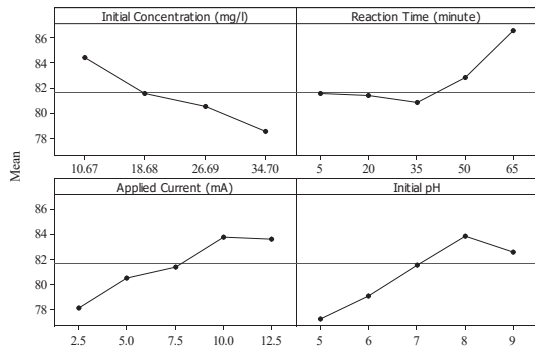
X_2 คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาที)

X_3 คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์)

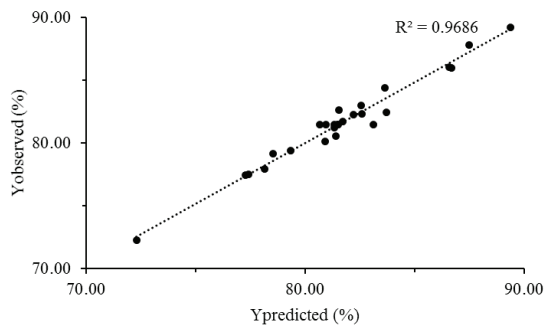
X_4 คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัย เมื่อกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ระหว่างร้อยละ 70 – 90 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดจะแปรผันตามระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (ช่วงพีเอช 5 – 8) แต่จะแปรผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต แผนภาพความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อนำประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลอง ($Y_{observed}$) กับประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนาย ($Y_{predicted}$) มาสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ พบว่า มีแนวโน้มสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับร้อยละ 96.86 แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนภาพความสัมพันธ์ของของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต



รูปที่ 7 แผนภาพความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลองกับประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนาย

เมื่อทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการตัวแบบที่สร้างขึ้น พบว่า สมการตัวแบบมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.0001$) และเมื่อทดสอบการขาดความสมบูรณ์ของสมการ (lack of fit) ที่สร้างขึ้นพบว่าการขาดความสมบูรณ์ของสมการไม่มีนัยสำคัญ ($P = 0.3546$) (ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงดังตารางที่ 3) ดังนั้นสมการตัวแบบที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมในการนำมาอธิบายอิทธิพลของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลองและสามารถนำมาใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียได้เมื่อทราบค่าของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย

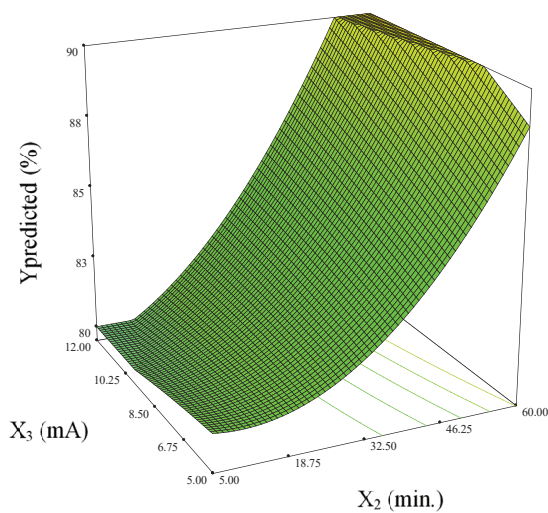
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยที่ศึกษาและตัวแบบสมการที่สร้างขึ้น

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	299.93	14	21.42	24.29	< 0.0001
X ₁	30.60	1	30.60	34.70	0.0001
X ₂	13.49	1	13.49	15.30	0.0024
X ₃	44.16	1	44.16	50.07	< 0.0001
X ₄	27.12	1	27.12	30.75	0.0002
X ₁ X ₂	15.05	1	15.05	17.07	0.0017
X ₁ X ₃	4.98	1	4.98	5.64	0.0368
X ₁ X ₄	6.64	1	6.64	7.53	0.0191
X ₂ X ₃	3.59	1	3.59	4.08	0.0686
X ₂ X ₄	29.10	1	29.10	33.00	0.0001
X ₃ X ₄	4.96	1	4.96	5.63	0.0370
X ₁ ²	2.11	1	2.11	2.39	0.1503
X ₂ ²	13.83	1	13.83	15.68	0.0022
X ₃ ²	0.12	1	0.12	0.14	0.7157
X ₄ ²	2.55	1	2.55	2.90	0.1168
Residual	9.70	11	0.88		
Lack of Fit	6.14	6	1.02	1.43	0.3546
Pure Error	3.56	5	0.71		
Cor. Total	309.63	25			

4.3 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและการทดสอบความแม่นยำของสมการ

ทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟต ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการ (Y_{obs}) ให้มีค่าระหว่างร้อยละ 70 - 90 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (X_1) เท่ากับ 13.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (X_2) มีค่าระหว่าง 5 - 60 นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (X_3) มีค่าระหว่าง 2.5 - 15 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (X_4) มีค่าระหว่าง 5 - 9 ผลการวิเคราะห์พบว่า หากต้องการประสิทธิภาพการบำบัดประมาณร้อยละ 80 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับข้อกำหนดที่ต้องการคือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า เท่ากับ 10.82 นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 9.19 มิลลิแอมแปร์ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.73 จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจากการทำนายเท่ากับร้อยละ 80.33 ทำการ

ทดลองซ้ำด้วยสภาวะดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำ แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายผลการทดลองซ้ำพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81.78 แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนาย (ร้อยละ 80.33) เท่ากับร้อยละ 1.77 ดังนั้น สมการที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้แผนผังความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 8 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการตัวแบบแสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 แผนผังความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสม (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย 13.34 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 7.73)

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการตัวแบบ

parameters				% removal		ΔY (%)
X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{obs}	Y_{Pred}	
13.34	10.82	9.19	7.73	82.33	80.33	
13.34	10.82	9.19	7.73	82.41	80.33	
13.34	10.82	9.19	7.73	80.59	80.33	
average				81.78	80.33	1.77

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย ระยะเวลาในการปล่อยประจุ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) โดยประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายด้วยสมการมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 1.77 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีลักษณะสมบัติที่ต่างจากกัน ดังนั้นการนำสมการไปใช้กับน้ำเสียจริงหรือปัจจัยที่มีค่านอกเหนือจากค่าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ สมการที่ได้จากการทดลองครั้งนี้มีความเหมาะสมเฉพาะค่าปัจจัยที่อยู่ในช่วงที่นำมาทำการทดลองเท่านั้น คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 10 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า 5 – 35 นาที กระแสไฟฟ้า 5 – 12.5 มิลลิแอมแปร์ และพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสีย อยู่ระหว่าง 6 – 9 โดยประสิทธิภาพการบำบัดจากการทำนายด้วยสมการจะมีค่าระหว่างร้อยละ 70 – 90 ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาทดลองกับน้ำเสียจริงและปรับแก้สมการให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ครอบคลุมทุกสภาวะต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้รับความอนุเคราะห์สถานที่ทดลอง เครื่องมือวิเคราะห์และวัสดุสิ้นเปลืองจากห้องวิจัยแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. ศัพท์บัญญัติและนิยามสิ่งแวดล้อม. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2548, ISBN : 974-93212-9-4.
- [2] พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. *วิศวกรรมสาร มก.*, 2557; 88: 57 – 67.
- [3] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç., Yalçın, M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 2008; 87: 420–428.
- [4] Ghanbari, F. and Moradi, M. A comparative of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015; 3: 499–506.
- [5] Thirugnanasambandham, K., Sivakumar, V., Maran, J. P. Optimization of process parameters in electrocoagulation treating chicken industry wastewater to recover hydrogen gas with pollutant reduction. *Renewable Energy*, 2015; 80: 101–108.
- [6] Nguyen, D.D., Ngo, H.H., Guo, W., Nguyen, T.T., Chang, S.W., Jang, A., Yoon, Y.S. Can electrocoagulation process be an appropriate technology for phosphorus removal from municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 2016; 563–564: 549–556.
- [7] Barişçi, S. and Turkay, O. Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. *Journal of Water Process Engineering*, 2016; 10: 56–65.
- [8] Chen, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 2004; 38: 11–41.
- [9] Karhu, M., Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J. Bench scale electrocoagulation studies of bio oil-in-water and synthetic oil-in-water emulsions. *Separation and Purification Technology*, 2012; 96: 296–305.
- [10] Attour, A., Touati, M., Tlili, M., Amor, M.B., Lapticque, F. and Leclerc, J.-P. Influent of operating parameters on phosphate removal from water by electrocoagulation using aluminum electrode. *Separation and Purification Technology*, 2014; 123: 124–129.
- [11] Zodi, S., Potier, O., Lapticque, F. and Leclerc, J. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. *Separation and Purification Technology*, 2009; 69: 29–36.
- [12] Bektaş, N., Akbulut, H., Inan, H. and Dimoglo, A. Removal of phosphate from aqueous solutions by electro-coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2004; 106B: 101–105.
- [13] İrdemez, Ş., Yildiz, Y.Ş. and Tosunoğlu, V. Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminium plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 2006; 52: 394–401.
- [14] Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J., Lassi, U. and Roininen, J. Removal of phosphate from wastewater for further utilization using electrocoagulation with hybrid electrode-Techno-economic studies. *Journal of Water Process Engineering*, 2015; 8: e50–e57.
- [15] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ, 2545; ISBN: 974-90400-9-0.