กลุ่ม 3

กลุ่มวิทยานิพนธ์

(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

การกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

REMOVAL OF NICKEL (II) CYANIDE COMPLEX IN SYNTHETIC WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION

ประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์ [1]

เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ [2]

[1]นิสิตมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : oumyore@gmail.com

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail : khemarath.o@chula.ac.th

บทคัดย่อ

สารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II) ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอันตรายที่พบอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ และอุตสาหกรรมการขุดเหมืองแร่ วิธีการกำจัดไซยาไนด์ที่ใช้กันทั่วไปคือ การกำจัดโดยการออกซิเดชัน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรตโดยในส่วนแรกได้ทำการศึกษาถึงผลของพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทดลองในช่วงความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ประมาณ 60% 50% และ40% ที่พีเอช 9 10 และ 11 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่พีเอช 9 และมีแนวโน้มถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์คือ ไซยาเนต ส่วนที่สองได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยกำหนดให้ความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ที่พีเอช 9 10 และ 11 ผลการทดลองพบว่า พีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนในการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่สุดที่พีเอช 9 และมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาประมาณ 4:1

คำสำคัญ : ไซยาไนด์ สารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เฟอร์เรต การออกซิเดชัน

ABSTRACT

Nickel (II) cyanide complex is a highly toxic substance for electroplating and mining industrial wastewater. Oxidation technique is generally applied for cyanide treatment technologies. This research studied the effects of removal of nickel (II) cyanide complex in synthetic wastewater by ferrate oxidation. The first experiment was done on the synthetic wastewater that the maximum concentration of nickel (II) cyanide is 500 μM. It is to study the effect of pH and the increased mole fractions of ferrate per cyanide to both of by products and nickel (II) cyanide removal efficiency. The result, at the mole fraction of 1:1 ferrate per cyanide, cyanide removal efficiency was 60%, 50% and 40% at pH 9, 10 and 11 respectively with the fast rate at pH 9. The increasing initial concentration of nickel (II) cyanide in each reaction caused the trend of increasing nickel (II) cyanide removal efficiency. Cyanate was identified as the major product of the reaction. The second experiment was done on the synthetic wastewater that the maximum concentration of nickel (II) cyanide is 500 μM at pH 9, 10 and 11. It is to study the mole fractions of ferrate per cyanide during the reaction and the chemical reaction rate. The results indicated that pH has no effect on both nickel (II) cyanide removal efficiency and any mole fractions of ferrate per cyanide, but it retarded the chemical reaction rate. The ferrate molar consumption per oxidized cyanide was 4:1

KEYWORDS : Cyanide, Nickel(II) Cyanide Complex, Ferrate, Oxidation

1. บทนำ

ปัจจุบันมีความเจริญทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการชุบโลหะ ซึ่งการชุบโลหะมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาเนื้อวัสดุ และความสวยงาม การชุบโลหะต้องใช้ไซยาไนด์ ซึ่งเป็นสารช่วยในการทำความสะอาดผิวโลหะที่จะชุบ และใช้เป็นสารคีเลชัน เพื่อให้โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นน้ำเสียจึงปนเปื้อนไซยาไนด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนัก ซึ่งไซยาไนด์ และโลหะหนักเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีการกำหนดค่าความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมดในน้ำทิ้งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 7.6 ไมโครโมลาร์ (อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539 : 45-51) และมาตรฐานน้ำดื่มของ US EPA (The U.S. Environmental Protection Agency) ได้กำหนดปริมาณความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมดต้องมีค่าน้อยกว่า 200 ppb (Sharma, 2008 : 3005-3010) ซึ่งสารประกอบไซยาไนด์ทั้งหมดนั้น รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักด้วย วิธีการกำจัดไซยาไนด์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ การออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Alkali Chlorine Method) แต่การออกซิเดชันด้วยคลอรีนจะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ เช่น ไซยาโนเจน และสารประกอบของคลอไรด์ ซึ่งมีความเป็นพิษ และทำให้น้ำเกิดความเค็ม ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (3) (ภัทรวรรณ ติยานนท์, 2549) ปัจจุบันจึงมีความพยายามอย่างมากที่จะค้นหากระบวนการที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งเฟอร์เรตมีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีกำลังในการออกซิไดซ์สูงมีความสามารถในการโคแอคกูเลชันสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ (4) (Sharma, 2002 : 143-156)

$$CN^- + OCl^- + H_2O \longrightarrow CNCl + 2OH^- \quad (1)$$

$$CNCl + 2OH^- \longrightarrow OCN^- + Cl^- + H_2O \quad (2)$$

$$2OCN^- + 3OCl^- + H_2O \longrightarrow 2HCO_3^- + N_2 + 3Cl^- \quad (3)$$

$$22FeO_4^{2-} + 25CN^- + 55H_2O \longrightarrow 22Fe^{3+} + OCN^- + 4O_2 + 110OH^- \quad (4)$$

สมบัติดังกล่าวทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย และเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระด้วยเฟอร์เรต แต่ในขณะเดียวกันสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะนั้นกำจัดได้ยากกว่า ซึ่งน้ำเสียที่มีสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับนิกเกิลสามารถพบได้ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะทั่วไป ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II)ไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา และหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

3. วิธีการวิเคราะห์

1. เฟอร์เรต ตรวจวัดด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. ไซยาไนด์ และไซยาเนต ตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ
3. พีเอช ตรวจวัดด้วยพีเอชมิเตอร์

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

<u>ส่วนที่ 1</u> : เพื่อศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์เท่ากับ 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) และแปรค่าพีเอชเป็น 9 10 และ 11
2. เติมสารละลายเฟอร์เรตในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 รอจนปฏิกิริยาเสร็จสิ้น
3. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดค่าไซยาไนด์ และไซยาเนต

<u>ส่วนที่ 2</u> : เพื่อศึกษาผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรต กับนิกเกิล (II) ไซยาไนด์

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) และแปรค่าพีเอชเป็น 9 10 และ 11
2. เติมสารละลายเฟอร์เรตในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที
3. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดค่าไซยาไนด์

ส่วนที่ 3 : เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์

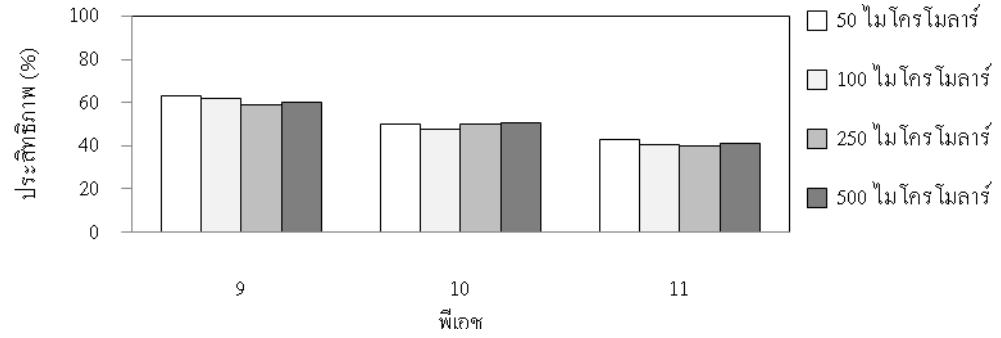
1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์เท่ากับ 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) และแปรค่าพีเอชเป็นพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 1และ 2

2. เติมสารละลายเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 50 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ รอจนปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสีม่วงของเฟอร์เรตหายไปจนหมด

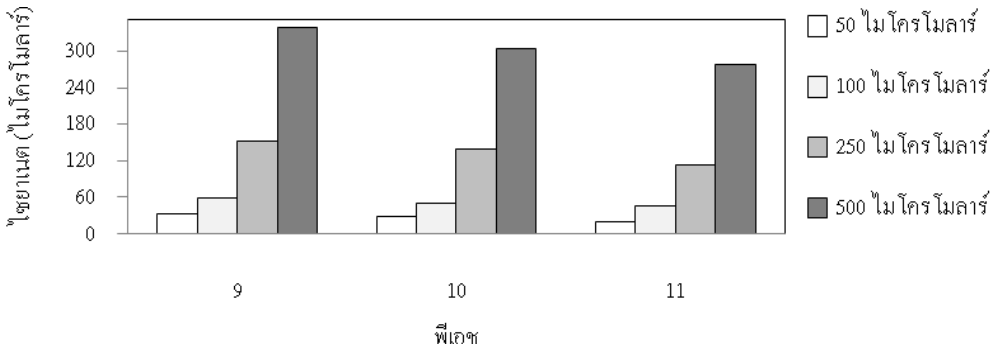
3. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดค่าไซยาไนด์ และไซยาเนต

5. ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาพีเอช และความเข้มข้นไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ พบว่า ที่ความเข้มข้นนิกเกิลเกิล (II) ไซยาไนด์เริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ประมาณ 60% 50% และ 40% ที่พีเอช 9 10 และ 11 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 1 และสารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ไซยาเนต ดังภาพประกอบ 2 โดยปฏิกิริยาสิ้นสุดที่เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ซึ่งสังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตที่หมดไป

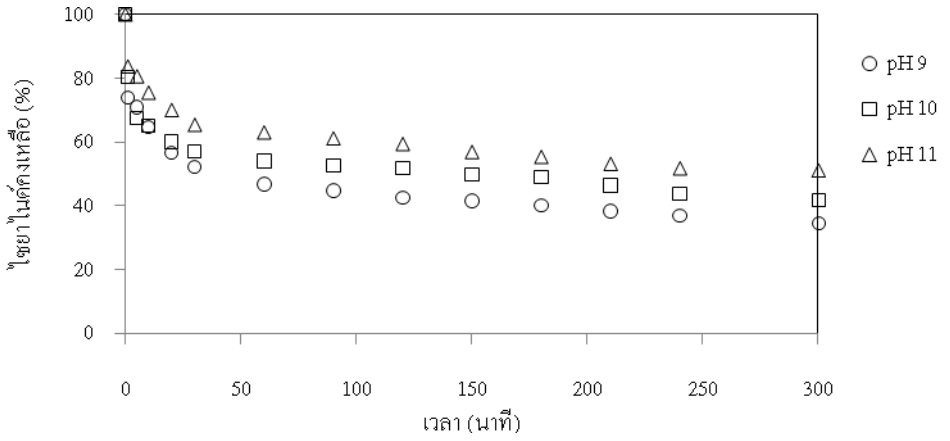


ภาพประกอบ 1 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ที่พีเอช 9 10 และ 11

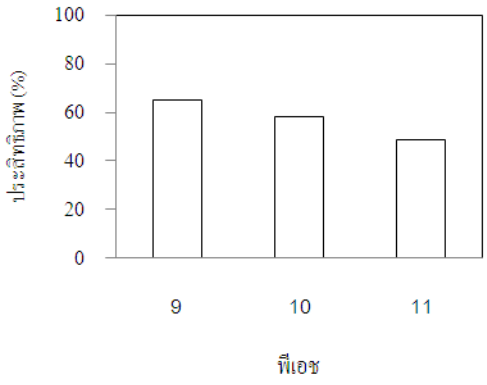


ภาพประกอบ 2 ความเข้มข้นไซยาเนต ที่พีเอช 9 10 และ 11

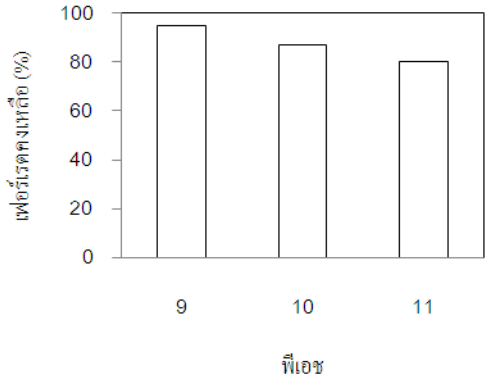
2. ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรต กับนิกเกิล(II) ไซยาไนด์ ผลการทดลอง พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงที่สุดที่พีเอช 9 ดังภาพประกอบ 3 โดยพบว่าการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก แต่หลังจากนั้นการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดการเกิดปฏิกิริยา แสดงว่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนในการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลงซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะจะมีค่าลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ น่าจะมีความสัมพันธ์กับความเสถียรของเฟอร์เรตเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ที่พีเอชต่างๆ มีแนวโน้มคล้ายกับความเสถียรของเฟอร์เรตที่พีเอชต่างๆ ดังภาพประกอบ 4 ถึง 5 โดยที่เฟอร์เรตจะมีความคงตัวมากที่สุดที่ช่วงพีเอช 9.4-9.7 และสลายตัวได้เร็วที่พีเอช 11 (Sharma, 2002 : 143-156) ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับนิกเกิล (II) ไซยาไนด์เกิดขึ้นได้เร็ว แต่เฟอร์เรตมีการสลายตัวได้เร็วเช่นกัน ทำให้เฟอร์เรตส่วนหนึ่งสลายตัวไปก่อนที่ปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์



ภาพประกอบ 3 ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11

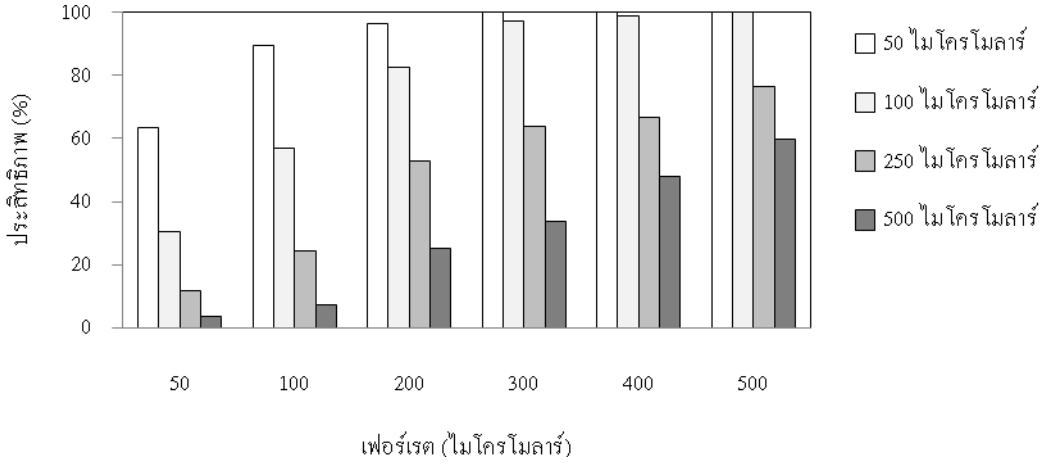


ภาพประกอบ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์

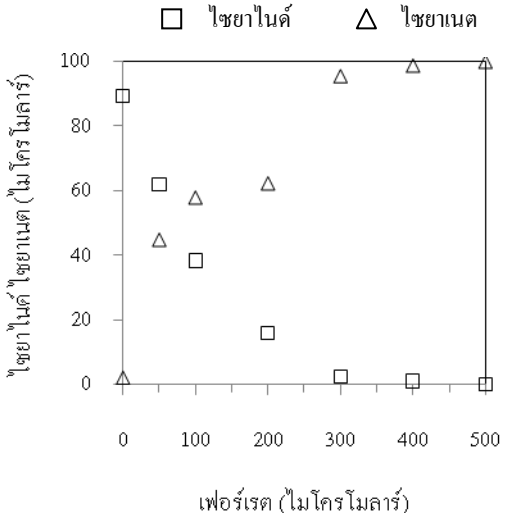


ภาพประกอบ 5 เฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 30 นาที

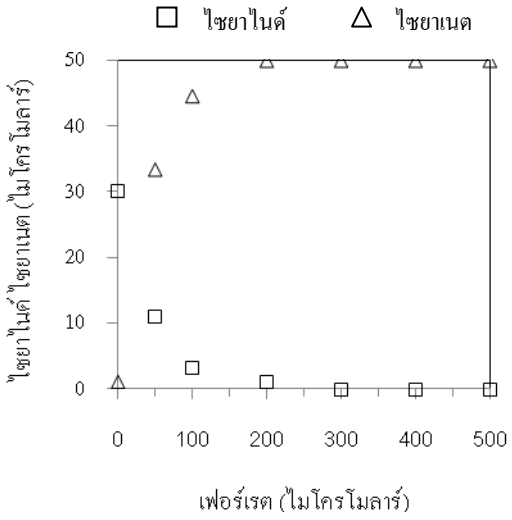
3. ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ ผลการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 4:1 โดยพิจารณาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ได้ 100% ดังภาพประกอบ 6 และสารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ไซยาเนตเช่นเดียวกับการทดลองในส่วนที่ 1 ดังภาพประกอบ 7



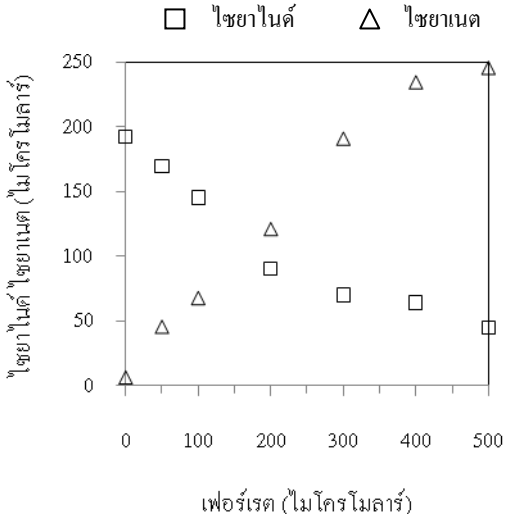
ภาพประกอบ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ กับความเข้มข้นของเฟอร์เรตในการทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์



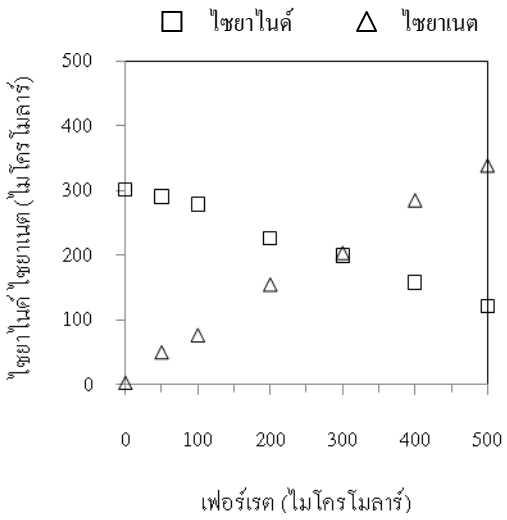
ภาพประกอบ 7-1 ความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์



ภาพประกอบ 7-2 ความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์



ภาพประกอบ 7-1 ความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์



ภาพประกอบ 7-2 ความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต โดยมีความเข้มข้นนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ เริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองพบว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับนิกเกิล (II) ไซยาไนด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ประมาณ 60% 50% และ40% ที่พีเอช 9 10 และ 11 ตามลำดับ และได้สารผลิตภัณฑ์ คือ ไซยาเนต โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับนิกเกิล (II) ไซยาไนด์จะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยที่พีเอช 9 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 30 นาทีแรก แต่หลังจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดการเกิดปฏิกิริยา โดยที่พีเอชนั้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II) ไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนในการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 4:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล (II)ไซยาไนด์ประมาณ 100% และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไซยาเนตเช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$4HFeO_4^- + Ni(CN)_4^{2-} + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + Ni^{2+} + 4OCN^- + O_2 + 4OH^- \qquad (5)$$

จากงานวิจัยต่างๆ ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่สามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์เท่ากับ 1:1 4:1 4:1 และ 5:1 ของสารประกอบไฮโดรเจนไซยาไนด์ แคดเมียม (II) ไซยาไนด์ ซิงค์ (II) ไซยาไนด์ และคอปเปอร์ (II) ไซยาไนด์ ตามลำดับ (Sharma, 2008 : 3005-3010) ซึ่งได้เปรียบเทียบอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะหนักนั้น

เฟอร์เรตต้องไปทำปฏิกิริยาในการสลายพันธะระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักก่อน หลังจากนั้นเฟอร์เรตที่เหลือจึงจะมาทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์อิสระต่อไป ดังนั้นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะหนักจะใช้ปริมาณเฟอร์เรตมากกว่าน้ำเสียที่มีไซยาไนด์อิสระเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ กับสารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ

ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์	อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์
HCN	1:1
$Cd(CN)_4^{2-}$	4:1
$Zn(CN)_4^{2-}$	4:1
$Ni(CN)_4^{2-}$	4:1
$Cu(CN)_4^{3-}$	5:1

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่ง ขอขอบพระคุณ คุณ Virender K. Sharma สำหรับคำแนะนำ สารเคมีโปตัสเซียมเฟอร์เรต และเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำการวิจัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (NCE-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ สารเคมี และเครื่องมือในการทำการวิจัย

8. รายการอ้างอิง

ภัทรวรรณ ติยานนท์, 2549. **ผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548. **ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539. “ไซยาไนด์ (Cyanide).” **วารสารโรงงาน** 14, 3: 45-51.

Sharma, V. K., 2002. “Potassium Ferrate(VI): an Environmentally Friendly Oxidant.” **Advance in Environmental Research** 6: 143-156.

Sharma, V. K., Burnett, C. R., Yngard, R. A. and Cabelli, D. E., 2005. “Iron(VI) and Iron(V) Oxidation of Copper(I) Cyanide.” **Environ. Sci. Technol** 39: 3849-3854.

Yngard, R., Sharma, V. K., Filip, J. and Zboril, R., 2008. “Ferrate(VI) Oxidation of Weak-Acid Dissociable Cyanides.” **Environ. Sci. Technol** 42: 3005-3010.