

## การเพิ่มอายุของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตรด้วยวัสดุเมโซพอร์สที่ผลิตได้จากซิลิกา ที่สกัดจากแกลบต่อการรีดักชันไนเตรท

### Longevity Enhancement of Nanoscale Zero-valent Iron by Mesoporous Material Prepared from Rice Husk Silica for Nitrate Reduction Application

ฉัตรกมล แก้วบุตดี<sup>1</sup> ปิยวิทย์ สุวรรณ<sup>2</sup> และ กิติโรจน์ หวันตาหลา<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ. สงขลา 90000

<sup>3</sup>ศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

\*E-mail: kitirote@kku.ac.th

#### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตร (nZVI) ด้วยวัสดุรูปทรงนาโนเมโซที่ผลิตได้จากซิลิกาที่สกัดจากแกลบ (RH-MCM-41) โดยศึกษาการย่อยสลายไนเตรทในถังปฏิกรณ์แบบกะซึ่งเตรียม RH-MCM-41 ด้วยวิธีการบ่มด้วยความร้อน และเตรียม nZVI โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเฟอร์ริกไอออนด้วยไฮเดรียมบอโรไฮไดรด์ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการย่อยสลายไนเตรทภายใต้เงื่อนไขของการมีและไม่มีตัวรองรับ pH เริ่มต้นและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design (FFD) และวัดปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 3867 พบว่าสามารถย่อยสลายไนเตรทได้ดีที่สภาวะกรด และ nZVI ที่มีตัวรองรับลดประสิทธิภาพการย่อยสลายไนเตรท แต่สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของ nZVI ได้มากขึ้น 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มี RH-MCM-41

**คำสำคัญ** RH-MCM-41 การบำบัดไนเตรท เหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตร รีดักชันของไนเตรท

#### Abstract

The aim of this work was to investigate the longevity of nanoscale zero-valent iron (nZVI) by the use of RH-MCM-41 prepared from rice husk silica by nitrate removal. RH-MCM-41 was prepared by the direct hydrothermal technique and nZVI was synthesized by the reduction of  $Fe^{3+}$  to  $Fe^0$  by the use of sodium borohydride. The efficiency of nitrate removal was studied by noting the effects with and without RH-MCM-41, initial solution pH, and contact time designed by the full factorial design. The remaining nitrates were analyzed by UV-Visible Spectrophotometer following ASTM 3867. The results showed that nitrates were highly degraded in acidic conditions. However, nitrate removal efficiency was found to decrease when nZVI with support (RH-MCM-41) was used, but the longevity of nZVI with support can be increased to about 4 times compared with nZVI without RH-MCM-41.

**Keywords:** RH-MCM-41, Nitrate treatment, Nanoscale zero-valent iron, Nitrate reduction

## บทนำ

ปัจจุบันปริมาณน้ำเสียและสิ่งปฏิกูลต่างๆ มีเพิ่มมากขึ้นทุกปี สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรทำให้ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งอาศัยที่เพิ่มขึ้น ส่วนสาเหตุอื่นที่สำคัญคือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากการเกษตรกรรม โดยเฉพาะการใช้น้ำและยาฆ่าแมลงในเกษตรกรรม เมื่อแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนจากแหล่งน้ำเสียต่างๆ จะกลายเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไนโตรที่ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ตามลำดับซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงไหลซึมผ่านชั้นดินลงสู่แหล่งน้ำบาดาล ทำให้เกิดการปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ ส่งผลให้เกิดโรค Bluebabysyndrome หรือ Methemoglobinemia เป็นผลให้ US-EPA ได้ออกค่ามาตรฐานสำหรับน้ำอุปโภค บริโภคของการปนเปื้อนไนเตรท และ ไนโตรที่ไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม และ 1 พีพีเอ็ม ตามลำดับ เหล็กประจุนทรีย์ขนาดนาโนเมตร (nZVI) มีความสามารถในการบำบัดไนเตรทด้วยกระบวนการรีดักชันให้กลายเป็นไนโตรเจนแก๊สได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกระบวนการที่มีช่วง pH ต่ำๆ (น้อยกว่า 3) [1] แต่ก็ยังคงมีข้อต่อคือต้องใช้งานหลังจากทำการสังเคราะห์โดยทันทีและมีอายุการใช้งานที่สั้น [2] นักวิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาการยึดอายุการใช้งาน โดยใช้ควมคุ้มกับวัสดุรองรับอื่น ในการศึกษาการกำจัดโลหะหนัก [3] ผลการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของ nZVI ที่ไม่มีวัสดุรองรับ และมีวัสดุรองรับในการกำจัดโครเมียม ( $\text{Cr}^{6+}$ ) พบว่าการมีวัสดุรองรับสามารถกำจัดโครเมียมได้สูงขึ้นเนื่องจากการที่ไม่มีวัสดุรองรับทำให้พื้นที่ผิวของ nZVI ได้ถูกปกคลุมด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  ทำให้เหล็กประจุนทรีย์เกิดการแตกตัวได้น้อยลง แต่เมื่อมีวัสดุรองรับจะลดการปกคลุมบน nZVI แต่จะไปดูดซับบนวัสดุรองรับแทน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงขึ้น และเมื่อวัสดุรองรับมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนั้นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน [3] งานวิจัยนี้สนใจนำวัสดุที่มีรูพรุนขนาดมีโซที่สามารถผลิตได้จากซิลิกาที่สกัดจากแกลบ (RH-MCM-41) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณของรูพรุนสูง อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่แน่นอนและ

มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงอีกด้วย [4] มาใช้เป็นวัสดุรองรับในการย่อยสลายไนเตรท

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของเหล็กประจุนทรีย์ขนาดนาโนเมตร (nZVI) โดยการใช้ควมคุ้มกับวัสดุมีโซพอร์สที่ผลิตได้จากซิลิกาที่สกัดจากแกลบ (RH-MCM-41) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการบ่มด้วยความร้อน [5] เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา nZVI ที่มีและไม่มีตัวรองรับภายใต้เงื่อนไขของ pH เริ่มต้น และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ FFD ในการย่อยสลายไนเตรท

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 1.1 การสกัดซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จากแกลบ

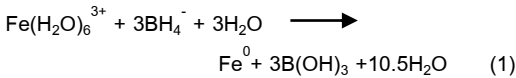
การสกัดซิลิกาจากแกลบได้ดำเนินการตามวิธีของ Wantala *et al.* [5] โดยมีวิธีการดังนี้ นำแกลบมาล้างและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $105^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มาสกัดซิลิกาด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางแล้วนำไปอบจนแห้งและเผาที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

#### 1.2 การสังเคราะห์ RH-MCM-41

สังเคราะห์ RH-MCM-41 ด้วยวิธีการบ่มด้วยความร้อนได้ดำเนินการตามวิธีของ Wantala *et al.* [5] โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (1) เตรียมสารละลาย CTAB โดยนำ CTAB 9 กรัมละลายในน้ำกลั่น 180 มิลลิลิตร คนจนกว่าสารละลายใส (2) เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำมาผสมกับซิลิกาจำนวน 6 กรัม คนจนสารละลายใส (3) ค่อยๆ หยดสารละลายที่ (1) ใส่ในสารละลายที่ (2) คนสารละลายอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการปรับ pH ให้เท่ากับ 11 นำใส่ Autoclave และบ่มที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 วัน (4) นำสารละลายมากรองและล้างจนสารมีสภาพเป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  ชำมคืน (5) นำสารที่สังเคราะห์ได้มาบดและเผาที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

### 1.3 การสังเคราะห์เหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตร

สังเคราะห์ nZVI โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนด้วยโซเดียมบอโรไฮไดรด์ [2] ให้กลายเป็นเหล็กที่มีประจุศูนย์หรือ Fe<sup>0</sup> ตามสมการ (1) เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาสามารถแยก nZVI ด้วยแม่เหล็กและนำไปใช้งานทันที



### 2. การย่อยสลายไนเตรทด้วยกระบวนการดูดซับ

ศึกษาผลของชนิดของการมีและไม่มีตัวรองรับร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา nZVI pH เริ่มต้นของสารละลายตัวอย่างและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ FFD ซึ่งออกแบบปัจจัยการทดลองที่มี 3 ตัวแปร 2 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเตรียมสารละลายไนเตรทความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 กรัม nZVI ต่อลิตร และมี RH-MCM-41 2.0 กรัมต่อลิตร ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ทำการดูดซับและเก็บตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 3867

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ศึกษาการย่อยสลายไนเตรท

ตัวแปร	ระดับ	
	-1	+1
Catalyst; (A)	nZVI	nZVI/RH-MCM-41
pH; (B)	3	7
Time (min); (C)	10	30

โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรทได้ตามสมการ (2) เมื่อ Y คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรท C<sub>0</sub> คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไนเตรท และ C<sub>t</sub> คือ ความเข้มข้นที่เวลาที่ได้ออกแบบการทดลองของสารละลายไนเตรท

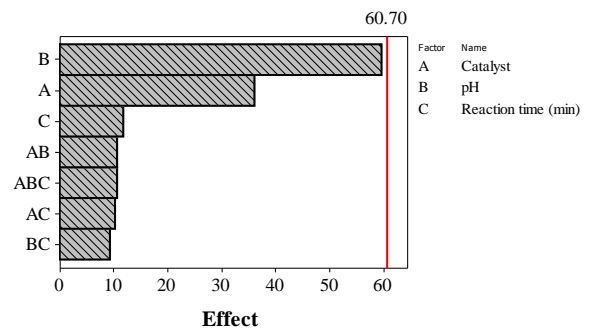
$$Y = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

สุดท้ายศึกษาและเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา nZVI และ nZVI/RH-MCM-41 โดยอาศัยเทคนิคภาพถ่าย เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของ nZVI (สีดำ) ไปเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (สีแดง)

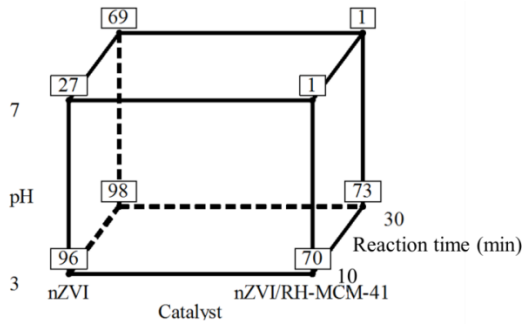
### ผลการวิจัย

การศึกษาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ FFD โดยคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรทตามสมการ (2) แสดงผลดังตารางที่ 2 และสามารถนำมาคำนวณหาค่าผลกระทบ (Effects) และค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ได้แสดงดังตารางที่ 3 โดยที่ Y คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรท A B C คือ ตัวแปรอิสระโดยที่ A B C คือ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา pH เริ่มต้นและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงผลของปัจจัยที่เป็น Coded พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายไนเตรทมากที่สุดคือ pH เริ่มต้น ซึ่งยืนยันได้จากรูปที่ 1 ที่แสดงผลสอดคล้องแสดงให้เห็นว่า pH เริ่มต้นเป็นปัจจัยมีนัยสำคัญต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายไนเตรท ผลของ pH เริ่มต้นมีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายไนเตรทมากกว่าการมีและไม่มีตัวรองรับประมาณ 1.6 เท่า และมีผลมากกว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5.0 เท่า



รูปที่ 1 Pareto ของค่าผลกระทบของแต่ละปัจจัย



แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าผลกระทบบของ pH เริ่มต้นและการมีและไม่มีตัวรองรับมีผลในเชิงลบ แสดงให้เห็นว่า nZVI จะทำปฏิกิริยาได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanbunchuy *et al.* [2] และการมีตัวรองรับจะลดประสิทธิภาพของ nZVI ในการย่อยสลายไนเตรท

รูปที่ 2 ประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรท

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการย่อยสลายไนเตรทโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ FFD

RunOrder	A	B	C	Y (%)
1	nZVI	3	30	98
2	nZVI/RH-MCM-41	3	10	70
3	nZVI/RH-MCM-41	3	30	73
4	nZVI	7	30	69
5	nZVI/RH-MCM-41	7	30	1
6	nZVI	3	10	96
7	nZVI/RH-MCM-41	7	10	1
8	nZVI	7	10	27

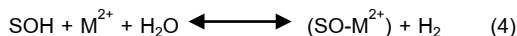
ตารางที่ 3 ค่าผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์

ตัวแปร	ค่าผลกระทบ	ค่าสัมประสิทธิ์
ค่าคงที่		54.38
A	-36.25	-18.12
B	-59.75	-29.87
C	11.75	5.88
A*B	-10.75	-5.38
A*C	-10.25	-5.12
B*C	9.25	4.63
A*B*C	-10.75	-5.37

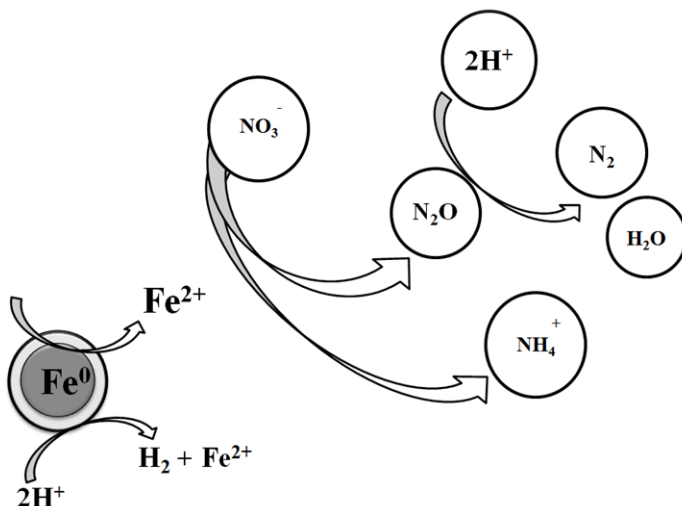
แต่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นมีผลในเชิงบวกแสดงให้เห็นว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นสามารถย่อยสลายในเตรทได้เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายในเตรทด้วยกระบวนการดูดซับของ nZVI และ nZVI/RH-MCM-41 พบว่าที่สภาวะของ pH เริ่มต้นที่ต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการย่อยสลายในเตรทเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของ nZVI และ nZVI/RH-MCM-41 แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากเมื่อ  $Fe^0$  อยู่ในน้ำและที่สภาวะกรดจะเกิดการแตกตัวให้  $Fe^{2+}$  จากนั้น  $NO_3^-$  จะถูกรีดิวซ์โดย  $Fe^{2+}$  กลายเป็น  $NH_4^+$  หรือ  $N_2O$  จากนั้น  $N_2O$  จะถูกรีดิวซ์จนกลายเป็น  $N_2$  ได้อีกด้วย และนอกจากนี้ที่สภาวะกรด  $Fe^0$  ยังแตกตัวให้  $H_2$  ซึ่งมีความสามารถเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี [6] แสดงดังรูปที่ 3 ดังนั้นจึงช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายในเตรทที่สภาวะกรดนั้นเพิ่มขึ้น ในกรณีของการใช้ RH-MCM-41 เป็นตัวรองรับของ nZVI พบว่า RH-MCM-41 นั้นไม่ได้ช่วยทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายในเตรทเพิ่มขึ้นเลย

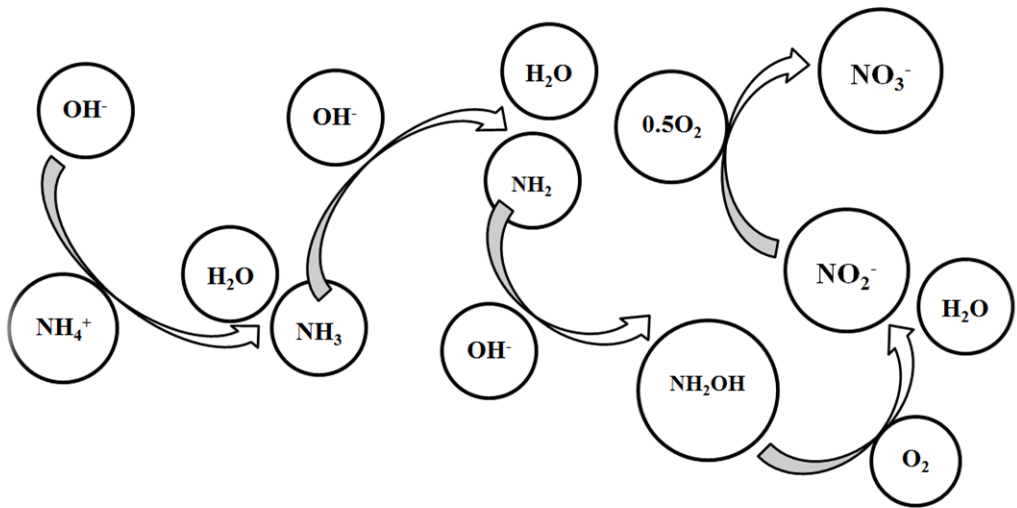
เนื่องจากไอออนประจุสองบวกสามารถเข้าไปจับกับพื้นผิวไฮดรอกไซด์ออกไซด์ [7] ดังสมการ (3) และ (4) ซึ่งเป็นผลให้  $Fe^{2+}$  ไม่ถูกออกซิไดซ์ต่อกลายเป็น  $Fe^{3+}$  เป็นผลให้มีปริมาณของ electron ในการทำปฏิกิริยากับ  $NO_3^-$  ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายในเตรทลดลง และในภาวะที่เป็นกลางผิวของตัวรองรับจะมีปริมาณไฮดรอกซิล ( $OH^-$ ) ปกคลุมเยาะส่งผลให้เกิดการดูดซับของ  $Fe^{2+}$  ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งการที่มีปริมาณไฮดรอกซิลเยาะจะทำให้  $NH_4^+$  ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น  $NH_2OH$   $NO_2^-$  และ  $NO_3^-$  ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4 [8] เป็นผลให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายในเตรทลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกไซด์ออกไซด์  $M^{2+}$  คือ ไอออนโลหะประจุสองบวก และ  $H^+$  คือ ไฮโดรเจนไอออน



รูปที่ 3 การแตกตัวของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตรในสภาวะกรด



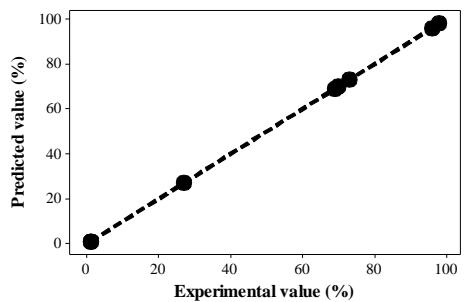
รูปที่ 4 การออกซิเดชันของแอมโมเนียม

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไปแทนในสมการถดถอย (Quadratic equation) ดังแสดงในสมการ (5) และนำมาพล็อตกับผลการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 5

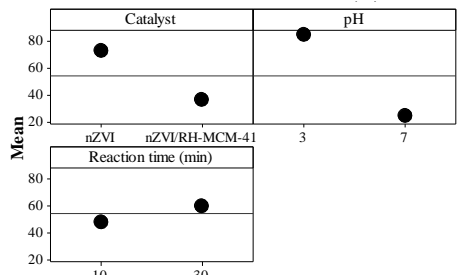
$$Y = 54.38 - 18.12A - 29.87B + 5.88C - 5.38A*B - 5.12A*C + 4.63B*C - 5.37A*B*C \quad (5)$$

เมื่อ Y คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรท A B C คือ Coded ของตัวแปรอิสระ โดยที่ A B C คือ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา pH เริ่มต้นและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ

รูปที่ 5 เป็นการยืนยันเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าสมการที่ใช้ในการทำนายกับผลการทดลองจริงนั้นมีความน่าเชื่อถือ จึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าว และค่าที่ได้จากการทดลอง ผลแสดงอยู่บนแนวเส้นตรง แสดงว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่าสมการที่ใช้ในการทำนายการย่อยสลาย ไนเตรทนั้นสามารถทำนายได้ถูกต้อง



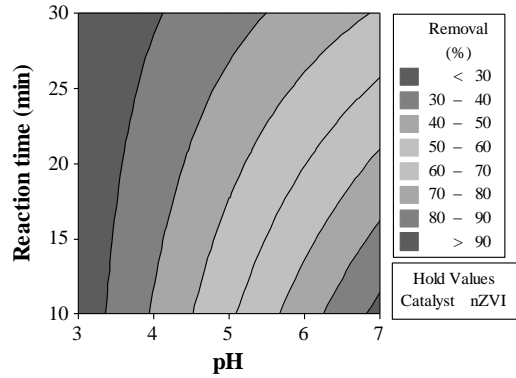
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรทจากการทำนายและการทดลอง



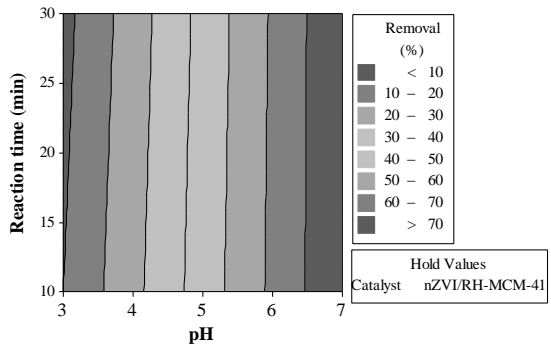
รูปที่ 6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายไนเตรท

เมื่อพิจารณาที่ละปัจจัยพบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน คือ การที่มี RH-MCM-41 เป็น ตัวรองรับของ nZVI ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายไนเตรทเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นพบว่า การย่อยสลายไนเตรทเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณการย่อยสลายไนเตรทจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 0 ถึง 10 นาทีแรก และปัจจัยที่ทำให้การย่อยสลายไนเตรทเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ pH เริ่มต้นเท่ากับ 3 และลดลงเมื่อ pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้อธิบายผลในช่วงต้น ดังแสดงในรูปที่ 6

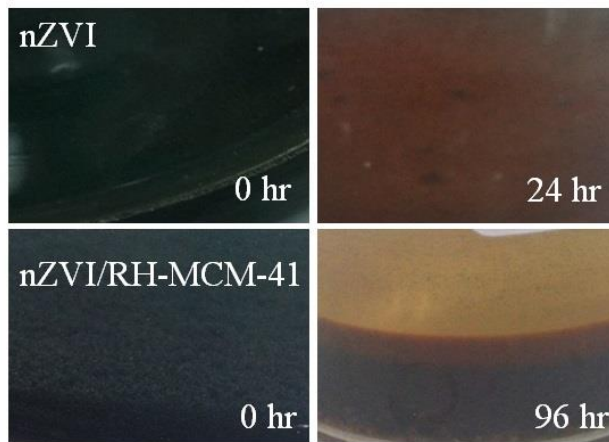
รูปที่ 7 แสดงผลระหว่างปัจจัยในการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI พบว่า เมื่อค่า pH เริ่มต้นที่ต่างๆ จะทำให้ปริมาณการย่อยสลายไนเตรทเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นก็สามารถเพิ่มปริมาณการย่อยสลายไนเตรทได้เช่นกัน แสดงว่าค่า pH เริ่มต้นและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI และผลระหว่างปัจจัยในการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI/RH-MCM-41 แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าค่า pH เริ่มต้นที่ต่างๆ จะทำให้ปริมาณการย่อยสลายไนเตรทเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน แต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่สามารถเพิ่มปริมาณการย่อยสลายไนเตรทได้เลย แสดงว่าค่า pH เริ่มต้นมีผลต่อการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI/RH-MCM-41 เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามการที่มี RH-MCM-41 ก็ทำให้เพิ่มอายุการใช้งานของ nZVI ได้นานยิ่งขึ้นถึง 4 เท่า โดยการเก็บไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 Contour plot ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI



รูปที่ 8 Contour plot ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการย่อยสลายไนเตรทด้วย nZVI/RH-MCM-41



รูปที่ 9 เปรียบเทียบการออกซิเดชันของ nZVI

### สรุปและเสนอแนะ

การยืดอายุการใช้งานของ nZVI สามารถทำได้โดยการเติมตัวรองรับวัสดุรูพรุนขนาดมีโซ ซึ่งสามารถยืดอายุได้มากถึง 4 เท่า แต่พบว่ากลับมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายไนเตรทได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นวิธีการการเพิ่มตัวรองรับในการย่อยสลายไนเตรทจึงไม่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจะศึกษาผลของการมีตัวรองรับในการกำจัดโลหะหนักต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Yong, H. and Tian C, Z. 2004. "Effects of low pH on nitrate reduction by iron powder." **Water Research**. 38 (11): 2631-2642.
- [2] Visanu, T. et al. "Gas-bubbled nano zero-valent iron process for high concentration arsenate removal." **Journal of Hazardous Materials**. 186 (2-3): 2123-2128.
- [3] Young Ju, O. et al. 2007. "Effect of amorphous silica and silica sand on removal of chromium

(VI) by zero-valent iron." **Chemosphere**. 66 (5): 858-865.

- [4] Jeffrey S, B. et al. 1992. "A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates." **Journal of the American Chemical Society**. 114: 10834-10843.
- [5] Kitirote, W. et al. 2010. "Synthesis and characterization of Fe-MCM-41 from rice husk silica by hydrothermal technique for arsenate adsorption." **Environmental Geochemistry and Health**. 32 (4): 261-266.
- [6] Tasuma, S. et al. 2012. "Mechanism of nitrate reduction by zero-valent iron: Equilibrium and kinetics studies." **Chemical Engineering Journal**. 183 (0): 271-277.
- [7] Kitirote, W. et al. 2012. "Arsenic adsorption by Fe loaded on RH-MCM-41 synthesized from rice husk silica." **Journal of Environmental Engineering (United States)**. 138 (1): 119-128.
- [8] Li, H. et al. 2008. "Removal of Ammonia by OH Radical in Aqueous Phase." **Environmental Science & Technology**. 42 (21): 8070-8075.