

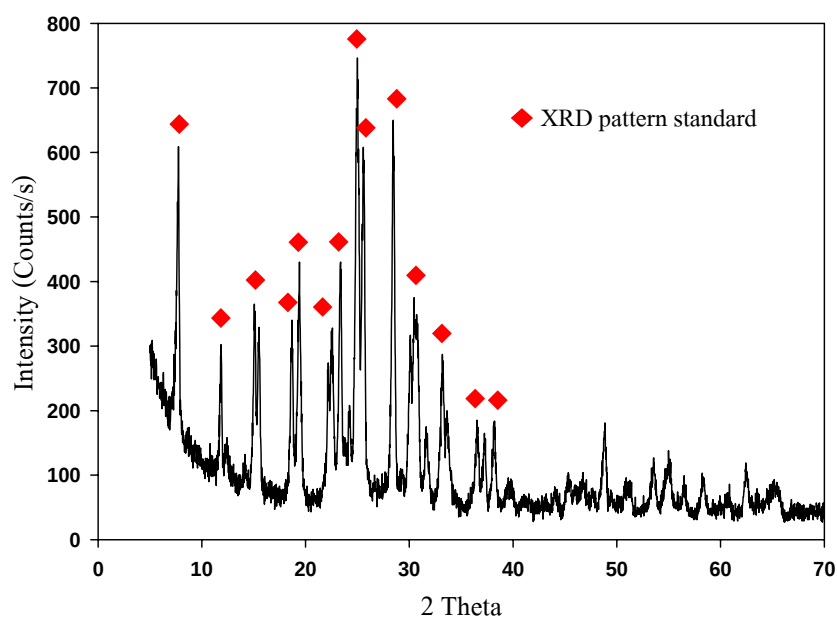
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ K/SUZ-4

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด K/SUZ-4 ที่สัดส่วนเชิงโมลที่  $21.2\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : 7.9\text{KOH} : 2.6\text{TEAOH} : 498.6\text{H}_2\text{O}$  ผ่านกระบวนการโซลเจลไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ความเร็วในการกวนสาร 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 4 วัน นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะผลึกด้วยเครื่อง XRD

จากการนำซีโอไลต์ K/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้มาตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD แสดงในภาพที่ 4-1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ XRD pattern มาตรฐานของซีโอไลต์ K/SUZ-4 ซึ่งมีพีคหลักที่ตำแหน่ง 7.7, 11.8, 15.1, 23.5, 25, 26, และ 28.5 (Subbiah และคณะ, 2003) พบว่าซีโอไลต์ K/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้ มีตำแหน่งพีคหลักตรงกับพีคมาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เป็นซีโอไลต์ชนิด K/SUZ-4



ภาพที่ 4-1 XRD pattern ของซีโอไลต์ K/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้

## 4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 โดยการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ K/SUZ-4 ด้วยวิธี conventional ion-exchange กับสารละลายไอออน(II)คลอไรด์-เตตระไฮไดรด์ โดยปริมาณ Fe(II) ในสารละลายที่ 1, 3, 5, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างซีโอไลต์ K/SUZ-4 กับ Fe(II) ด้วยเครื่อง AAS และศึกษาสมบัติทางกายภาพเชิงเคมีด้วยเครื่อง TGA, XRD, XRF, SEM/EDS, FT-IR และ Autosorb (BET surface area and Pore size)

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

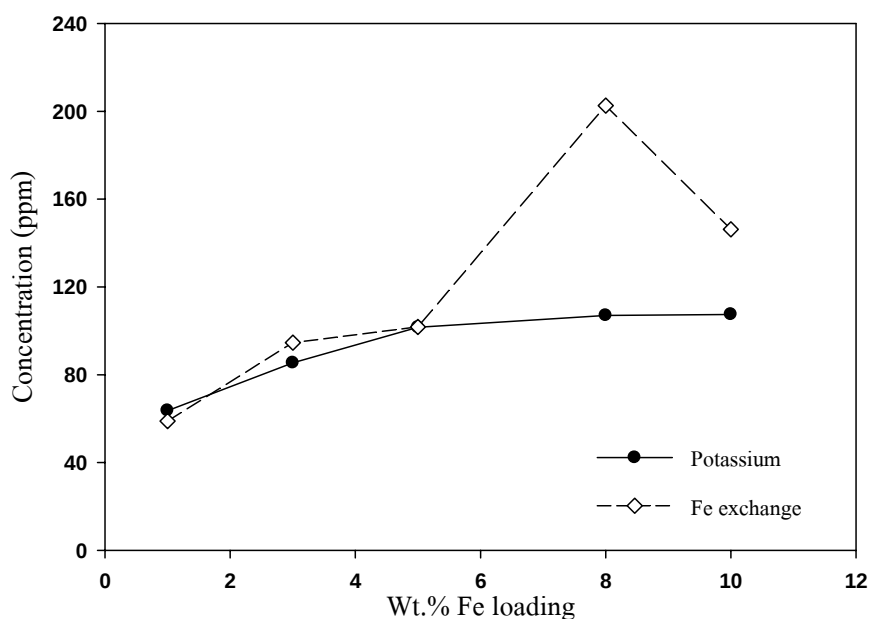
กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยวิธี conventional ion-exchange ระหว่างซีโอไลต์ K/SUZ-4 กับ Fe(II) ศึกษาโดยการหาปริมาณธาตุในสารละลายทั้งก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออน วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง AAS ผลแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณธาตุในสารละลายก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออน

| ตัวอย่าง        | ความเข้มข้นของธาตุในสารละลาย (ppm) |   |    |    |                 |        |      |    |
|-----------------|------------------------------------|---|----|----|-----------------|--------|------|----|
|                 | ก่อนทำปฏิกิริยา                    |   |    |    | หลังทำปฏิกิริยา |        |      |    |
|                 | Fe                                 | K | Si | Al | Fe              | K      | Si   | Al |
| 1%wt. Fe/SUZ-4  | 102.23                             | - | -  | -  | 43.38           | 63.66  | 6.30 | -  |
| 3%wt. Fe/SUZ-4  | 331.20                             | - | -  | -  | 236.60          | 85.38  | 5.70 | -  |
| 5%wt. Fe/SUZ-4  | 477.20                             | - | -  | -  | 375.40          | 101.62 | 6.20 | -  |
| 8%wt. Fe/SUZ-4  | 761.60                             | - | -  | -  | 559.00          | 107.00 | 5.20 | -  |
| 10%wt. Fe/SUZ-4 | 956.80                             | - | -  | -  | 810.60          | 107.51 | 5.60 | -  |

จากผลในตารางที่ 4-1 พบว่ามีปริมาณของซิลิกอนในสารละลายหลังทำการแลกเปลี่ยนไอออนเล็กน้อย แต่ไม่พบการสูญเสียอะลูมิเนียมของซีโอไลต์ในสารละลาย จากการศึกษการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  กับ  $\text{K}^+$  จริง โดยสามารถสังเกตจากปริมาณของโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้น และปริมาณโลหะเหล็กที่ลดลงในสารละลายหลังทำ

ปฏิกิริยา ซึ่งปริมาณของธาตุโพแทสเซียมในสารละลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณ wt.% Fe loading ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ 5 wt.% Fe loading แสดงในภาพที่ 4-2 ซึ่งเป็นจุดอิมิตัวของการแลกเปลี่ยนไอออน จากการศึกษาผลของ Fe exchange ในซีโอไลต์ K/SUZ-4 พบว่าเกิด Fe exchange อยู่ 2 ลักษณะกล่าวคือ การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  กับ  $\text{K}^+$  ในโครงสร้างของซีโอไลต์และเกิดการฝังตัว (Impregnate) ของโลหะเหล็กในซีโอไลต์



ภาพที่ 4-2 ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลาย

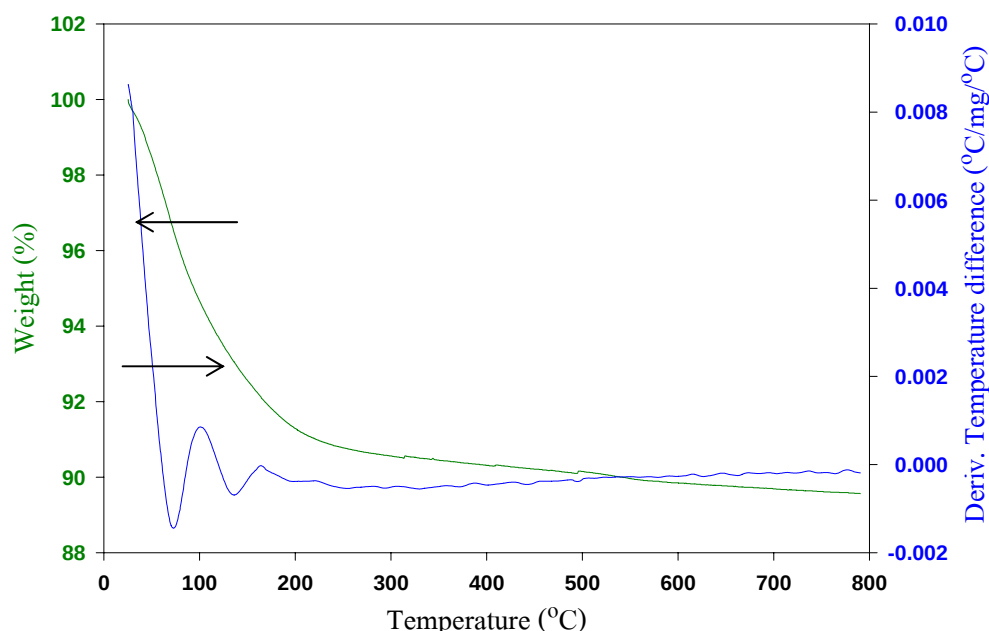
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างของซีโอไลต์ และหาอุณหภูมิในการเผาไหม้ที่เหมาะสม วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยนำ 10 wt.% Fe/SUZ-4 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C มาศึกษาสมบัติทางความร้อนภายใต้สภาวะป้อนอากาศ (Zero air) ศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ ผลแสดงในภาพที่ 4-3

จากการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-200 °C มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการคายซับน้ำทางกายภาพบนกรุปพูนของซีโอไลต์ และที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C

น้ำหนักของซีโอไลต์จะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นการคายซับของน้ำและสารระเหยภายในรูพรุนของซีโอไลต์ และน้ำหนักเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C ขึ้นไป และในการวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิที่ 350 °C เป็นการเผาสาร

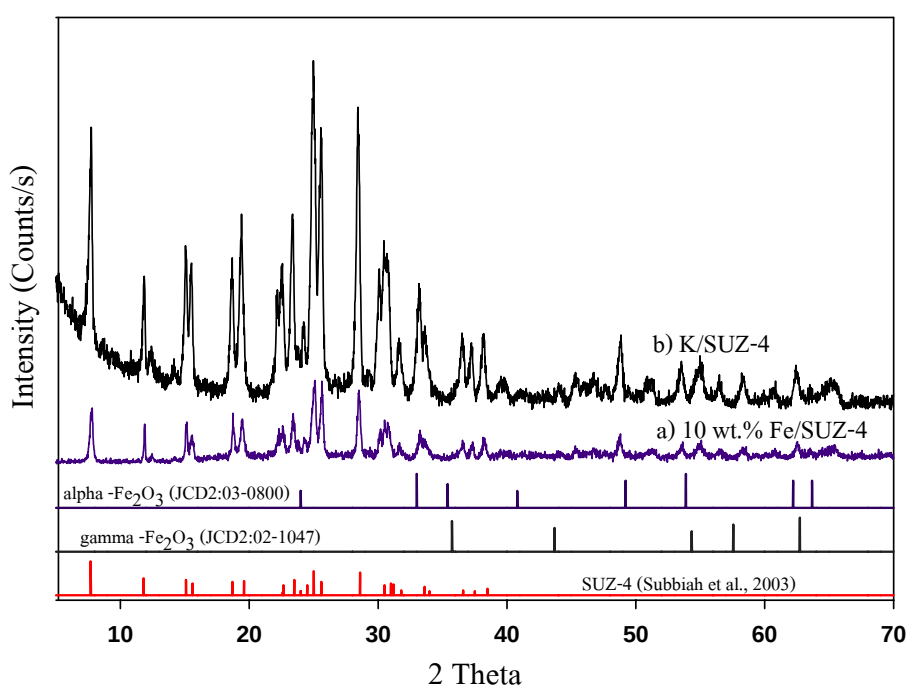
การศึกษาค่า Derivative temperature difference ของซีโอไลต์ 10 wt.% Fe/SUZ-4 พบว่าเกิดฟีกที่อุณหภูมิ 100 °C และ 165 °C โดยฟีกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นการคายซับน้ำของซีโอไลต์ และฟีกที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นการสลายตัวของคลอไรด์ (dehydrochlorination) Lazar และคณะ (1995) รายงานว่าไอรอน(II)คลอไรด์จะเกิดการสลายตัวของคลอไรด์เป็นไอรอน(III)ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 147 °C และเปลี่ยนเป็นไอรอน(III)ออกไซด์โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 347 °C จากภาพที่ 4-3 ไม่ปรากฏฟีกการเปลี่ยนโครงสร้างของไอรอนออกไซด์ เนื่องจากปริมาณ iron content ในซีโอไลต์มีค่าน้อยมาก (แสดงในตารางที่ 4-2) ทำให้เครื่องไม่สามารถตรวจสอบได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Anunziata และคณะ (2004) พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของเหล็กออกไซด์เป็น  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ที่อุณหภูมิ 300–400 °C เกิดเป็นเฟสผสมของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  และที่อุณหภูมิ 500 °C ขึ้นไปเป็นการเปลี่ยนเฟสจาก  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เป็น  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  โดยสมบูรณ์



ภาพที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ของ 10 wt.% Fe/SUZ-4 ด้วยเครื่อง TGA

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ด้วยเครื่อง XRD

การวิเคราะห์ชนิดผลึกของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ K/SUZ-4 ผลแสดงในภาพที่ 4-4 พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะเหล็กไม่ส่งผลทำให้ชนิดของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง โดยมี XRD pattern ตรงกับ XRD pattern ของ K/SUZ-4 แต่ไม่ปรากฏฟีกของไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ปรากฏอยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ SUZ-4 อย่างไรก็ตาม อาจมีไอรอนออกไซด์เกิดขึ้นในโครงสร้าง แต่เนื่องจากปริมาณของ Fe exchange ในซีโอไลต์มีค่าน้อยมาก (< 2wt.%) ซึ่งเกินความสามารถที่เครื่อง XRD สามารถตรวจสอบได้ (Chen และคณะ, 2000)



ภาพที่ 4-4 XRD pattern ของ ซีโอไลต์ K/SUZ-4 และ 10 wt.% Fe/SUZ-4

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง XRF

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 เพื่อศึกษาผลการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ K/SUZ-4 กับโลหะเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การโหลด (% Fe loading) 1 3 5 8 และ 10 wt. % ผลแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าสัดส่วนโดยโมลซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ของ Fe/SUZ-4 อยู่ในช่วงประมาณ 7-8 และปริมาณ iron content ในซีโอไลต์เพิ่มขึ้นตาม wt.% Fe

loading ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (แสดงในภาพที่ 4-2) โดยที่ 8 wt.% Fe/SUZ-4 มีปริมาณ iron content มากที่สุดที่ 0.14 wt.% การคำนวณ Fe exchange level สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-1) (Long และ Yang, 1999)

$$2 \times \frac{[\text{number of iron ions}]}{[\text{number of aluminum ions}]} \times 100 \quad (4-1)$$

พบว่าซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้มี Fe exchange level ค่อนข้างต่ำ โดยอยู่ในช่วง 20-30% เมื่อเปรียบเทียบกับกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าให้ค่า Fe exchange level ใกล้เคียงกัน โดย Subbiah และคณะ (2003) รายงานว่า 1.3 wt.% Fe/SUZ-4 (Si/Al = 5.3-6.0) ให้ค่า Fe exchange level ที่ 28 %

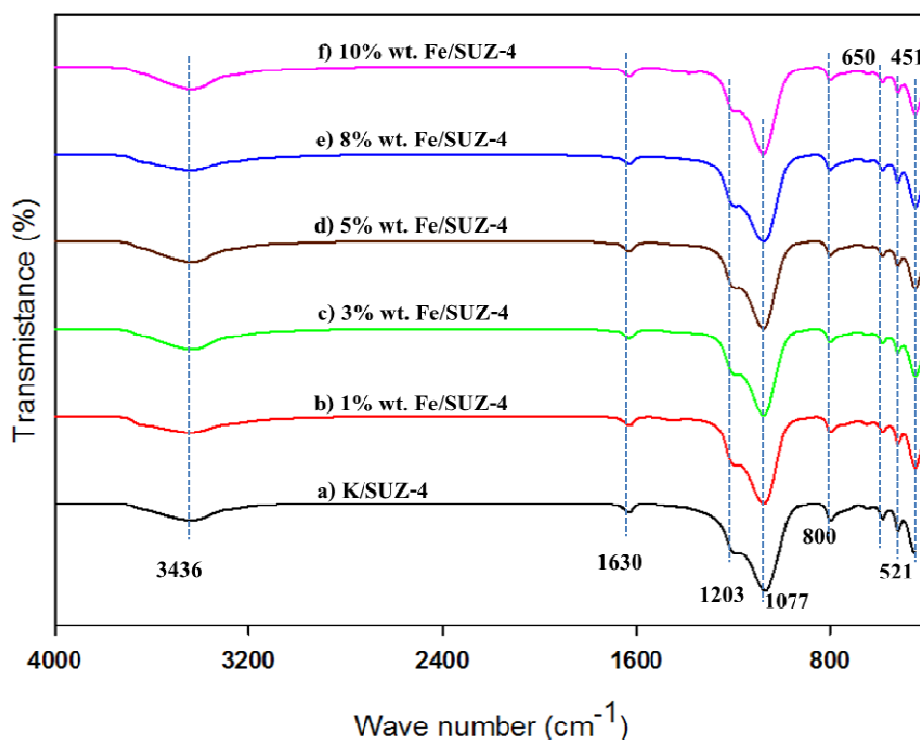
ตารางที่ 4-2 ปริมาณองค์ประกอบของธาตุในซีโอไลต์ SUZ-4 และ Fe/SUZ-4

| Sample           | Iron content<br>(wt.%) | Si/Al | Fe/Al | Fe exchange<br>level (%) |
|------------------|------------------------|-------|-------|--------------------------|
| K/SUZ-4          | -                      | 7.05  | -     | -                        |
| 1 wt.% Fe/SUZ-4  | 0.85                   | 8.27  | 0.10  | 20.33                    |
| 3 wt.% Fe/SUZ-4  | 0.94                   | 7.47  | 0.11  | 21.12                    |
| 5 wt.% Fe/SUZ-4  | 1.18                   | 7.60  | 0.14  | 27.08                    |
| 8 wt.% Fe/SUZ-4  | 1.40                   | 7.39  | 0.15  | 30.26                    |
| 10 wt.% Fe/SUZ-4 | 1.18                   | 7.86  | 0.14  | 27.41                    |

#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR

การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของ Fe/SUZ-4 ที่ wt. % Fe loading ต่างๆ กัน วิเคราะห์โดยอาศัยการดูดกลืนคลื่นแสงที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล โดยกระทำในช่วง Wave number 4,000 – 400  $\text{cm}^{-1}$  ผลแสดงในภาพที่ 4-5 พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ K/SUZ-4 กับโลหะเหล็กไม่ส่งผลทำให้หมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง โดยเกิดพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 3,436 1,630 1,203 1,077 800 650 521 และ 451  $\text{cm}^{-1}$  โดยพีคที่ตำแหน่ง 3,436  $\text{cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันของ stretching Si-OH และดูดซับน้ำ (Jing, 2006) พีคที่ตำแหน่ง 1,630  $\text{cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชัน H-O-H bending vibration ของโมเลกุลน้ำ (Jing, 2006) พีคที่ตำแหน่ง 1,203  $\text{cm}^{-1}$  และ 1,077  $\text{cm}^{-1}$  การสั่น

แบบ asymmetric ของหมู่ฟังก์ชัน Si-O stretching vibration (Iwasaki และ Shinjoh, 2010) พีกที่ตำแหน่ง  $800\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Si-O และ Al-O stretching (Madejova และคณะ, 1999) พีกที่ตำแหน่ง  $521\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Al bending พีกที่ตำแหน่ง  $451\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ Si-O-Si bending (Iwasaki และ Shinjoh, 2010) การพิจารณาเฟสของไอรอนออกไซด์ พบว่าไม่ปรากฏพีกของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  โดยพีกของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  จะพบที่ตำแหน่ง 445, 560 และ  $635\text{ cm}^{-1}$  (Jing, 2006) และ  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  จะพบที่ตำแหน่ง 650, 525, 440 และ  $300\text{ cm}^{-1}$  (Huang และ Xu, 2001) เนื่องจากเพราะปริมาณของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีปริมาณน้อยมาก (แสดงในตารางที่ 4-2) ซึ่งเกินความสามารถที่เครื่อง FT-IR สามารถตรวจสอบได้ พีกที่ตำแหน่ง  $650\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งของ  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับหมู่ฟังก์ชันซีโอไลต์ SUZ-4 จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้



ภาพที่ 4-5 FTIR-spectra ของ a) K/SUZ-4 b) 1 wt.% Fe/SUZ-4 c) 3 wt.% Fe/SUZ-4  
d) 5 wt.% Fe/SUZ-4 e) 8 wt.% Fe/SUZ-4 f) 10 wt.% Fe/SUZ-4

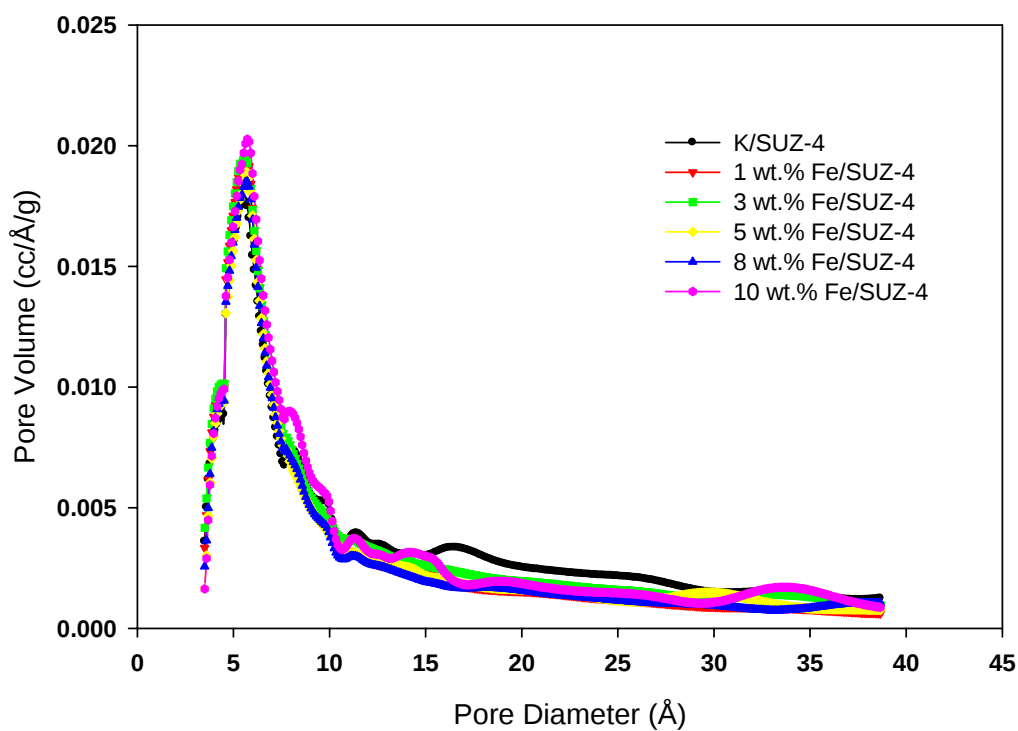
#### 4.2.6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนของ Fe/SUZ-4 ด้วยเครื่อง BET

ผลการศึกษาอิทธิพลของ Fe loading ในซีโอไลต์ SUZ-4 ที่มีผลต่อพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET Nitrogen Adsorption ผลแสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะเหล็กมีผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนในช่วง micropore ของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 เพิ่มขึ้น โดยที่ 1 wt.% Fe/SUZ-4 ให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนในช่วง micropore มากที่สุดที่  $147.1 \text{ m}^2/\text{g}$  และ  $0.0955 \text{ cm}^3/\text{g}$  ตามลำดับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ Fe/SUZ-4 แต่ละ wt.% Fe loading มีการกระจายตัวในช่วงแคบ แสดงในภาพที่ 4-6 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 5.6-5.7 Å

ตารางที่ 4-3 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของ Fe/SUZ-4

| Sample      | BET<br>surface area<br>( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | External<br>surface area <sup>1</sup><br>( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | Micropore<br>surface area <sup>1</sup><br>( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | Micropore<br>volume <sup>1</sup><br>( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) | Total pore<br>volume <sup>2</sup><br>( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) | Pore<br>diameter <sup>3</sup><br>(Å) |
|-------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| SUZ-4       | 402.8                                            | 291.9                                                              | 110.8                                                               | 0.0768                                                         | 0.611                                                           | 5.58±0.02                            |
| 1%Fe/SUZ-4  | 412                                              | 264.9                                                              | 147.1                                                               | 0.0955                                                         | 0.999                                                           | 5.63±0.05                            |
| 3%Fe/SUZ-4  | 416.5                                            | 283.7                                                              | 132.9                                                               | 0.0865                                                         | 0.922                                                           | 5.62±0.02                            |
| 5%Fe/SUZ-4  | 397.8                                            | 259.1                                                              | 138.7                                                               | 0.0898                                                         | 0.649                                                           | 5.68±0.05                            |
| 8%Fe/SUZ-4  | 384.8                                            | 251.2                                                              | 133.5                                                               | 0.0872                                                         | 0.818                                                           | 5.68±0.02                            |
| 10%Fe/SUZ-4 | 430.5                                            | 302.8                                                              | 127.7                                                               | 0.0873                                                         | 0.678                                                           | 5.74±0.02                            |

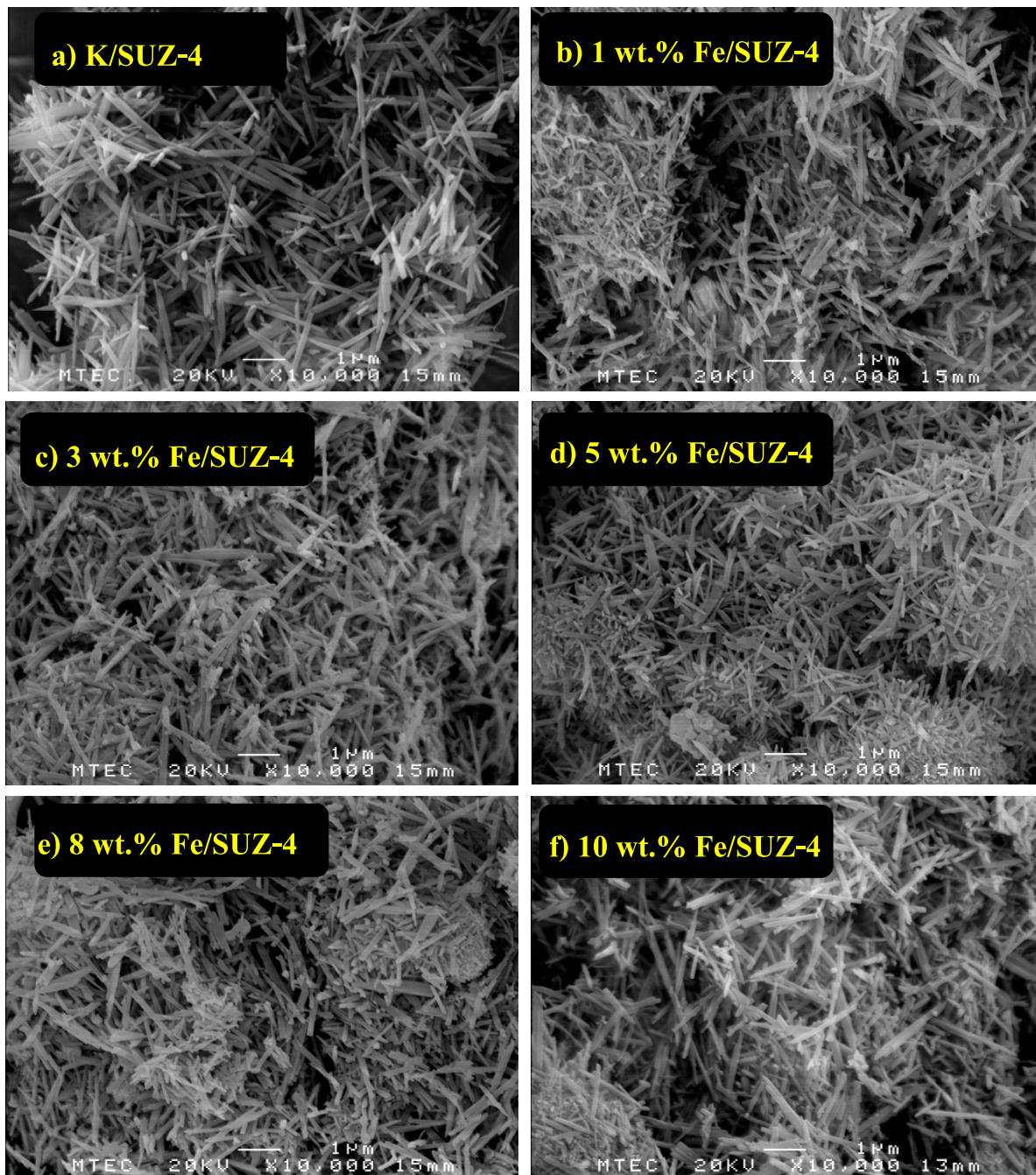
<sup>1</sup> t Method Micropore analysis, <sup>2</sup> MP Method Micropore analysis, <sup>3</sup> SF Method Micropore analysis



ภาพที่ 4-6 การกระจายตัวของรูพรุน ของ a) K/SUZ-4 b) 1 wt.% Fe/SUZ-4  
c) 3 wt.% Fe/SUZ-4 d) 5 wt. %Fe/SUZ-4 e) 8 wt.% Fe/SUZ-4  
f) 10 wt.% Fe/SUZ-4

#### 4.2.7 ผลการวิเคราะห์รูปร่างผลึกซีโอไลต์ด้วยเทคนิค SEM

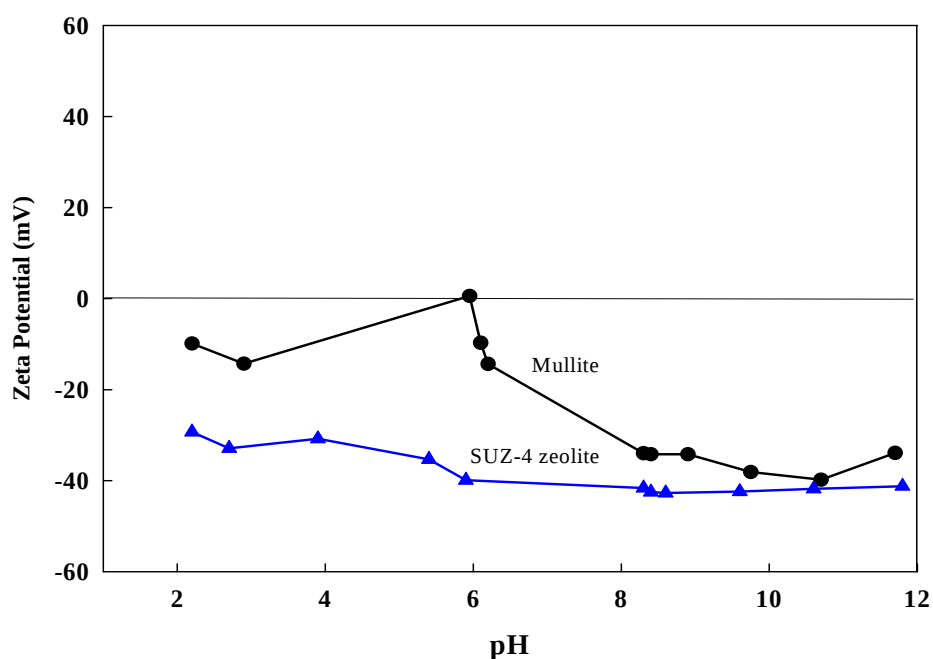
ผลจากการวิเคราะห์รูปร่างผลึกของ Fe/SUZ-4 ด้วยเทคนิค SEM แสดงในภาพที่ 4-7 พบว่า Fe/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีลักษณะผลึกคล้ายรูปแท่งเข็ม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.06  $\mu\text{m}$  และยาว 0.62  $\mu\text{m}$



ภาพที่ 4-7 ภาพ SEM รูปร่างผลึกของ a) K/SUZ-4, b) 1 wt.% Fe/SUZ-4,  
c) 3 wt.% Fe/SUZ-4, d) 5 wt.% Fe/SUZ-4, e) 8 wt.% Fe/SUZ-4 and  
f) 10 wt.% Fe/SUZ-4

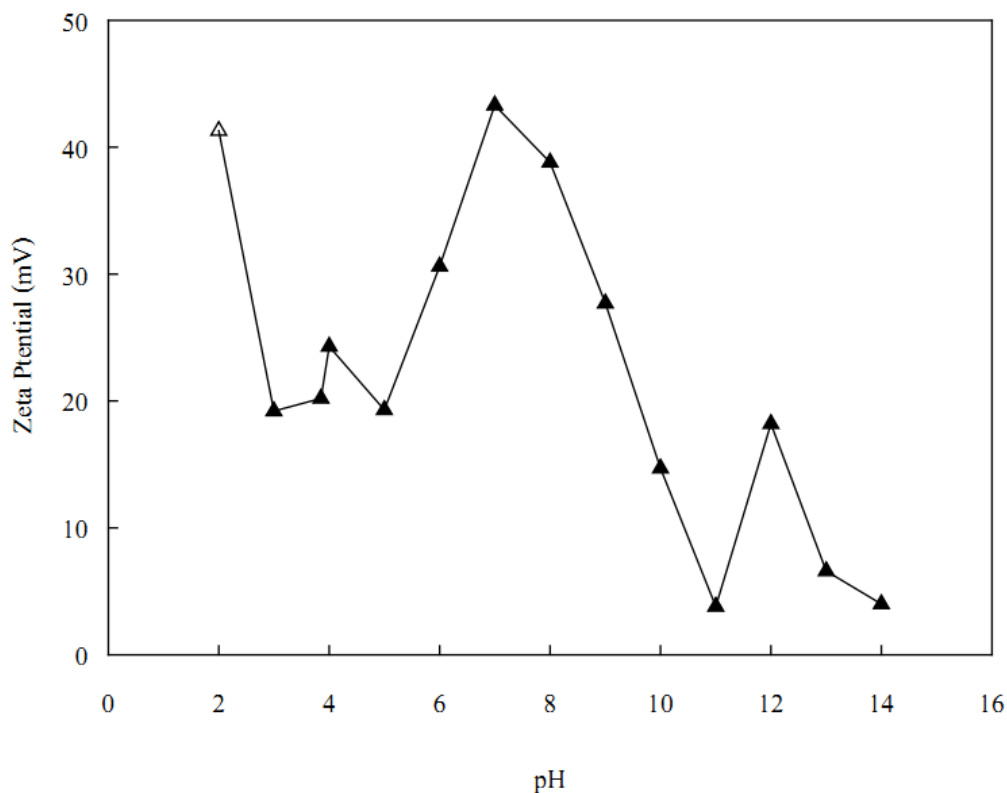
### 4.3 ผลการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ SUZ-4 โดยใช้ท่อมัลไลต์เป็นตัวรองรับ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดก๊าซ NO โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะเหล็ก จากนั้นทำการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ใช้เทคนิคปั่นเคลือบ (spin dip coating) โดยใช้ท่อมัลไลต์ปั่นเคลือบในสารแขวนลอย ซีโอไลต์ ซึ่งสารแขวนลอยซีโอไลต์ประกอบด้วย ซิลิกาโซล ใช้เป็นตัวประสานระหว่างท่อมัลไลต์ กับผงซีโอไลต์ เมทิลเอสเตอร์ซัลโฟเนต เป็นสารลดแรงตึงผิว ช่วยให้ผงซีโอไลต์แขวนลอยในน้ำ ได้ดี ผงซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 และน้ำ DI โดยก่อนการเคลือบได้ปรับเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบนผิวของมัลไลต์จากประจุลบซึ่งเหมือนกับประจุบนผิวของซีโอไลต์ (แสดงในภาพที่ 4-8) ให้กลายเป็นประจุบวกด้วยการเคลือบตัวรองรับมัลไลต์ด้วยสารละลายพอลิเอมีน (แสดงในภาพที่ 4-9)



ภาพที่ 4-8 ค่า Zeta potential ของซีโอไลต์ SUZ-4 และตัวรองรับมัลไลต์

ที่มา : Worathanakul (2008)



ภาพที่ 4-9 ค่า Zeta potential ของสารละลายพอลิเอมีน

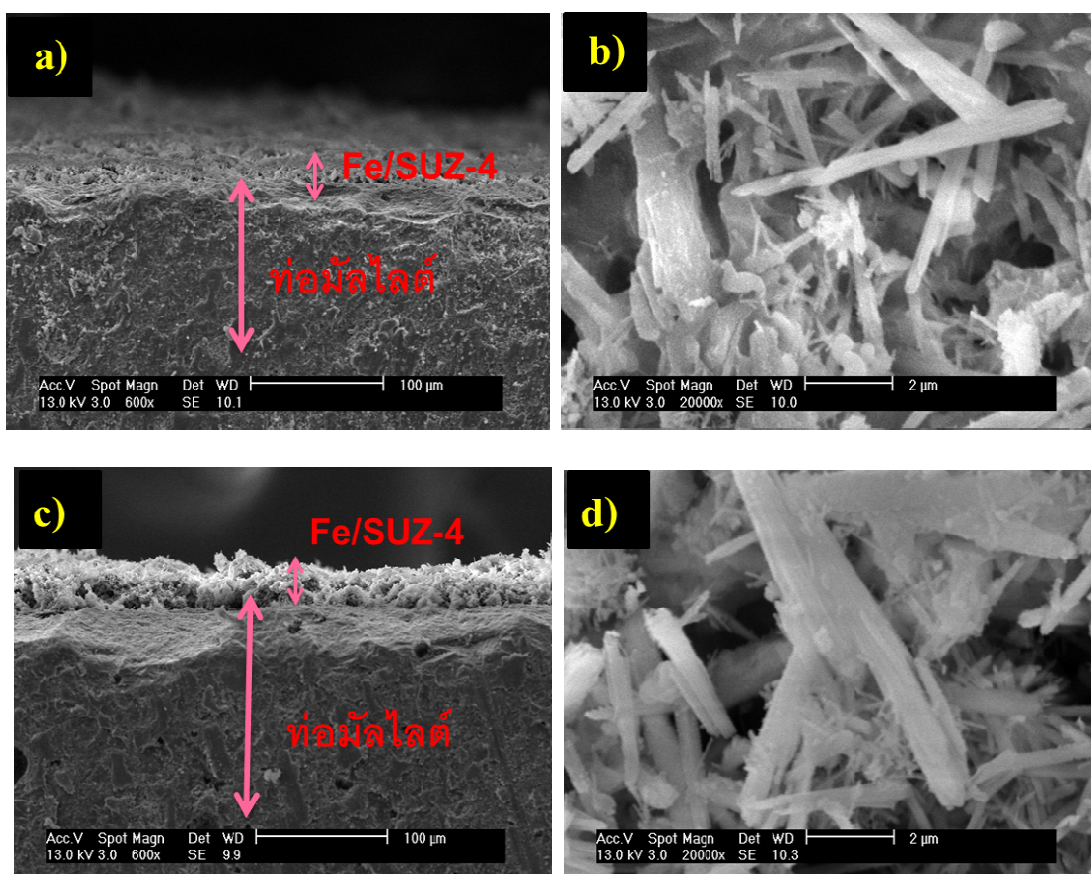
ที่มา : ภัทรดา (2554)

ในการทดลองนี้ทำการปั่นเคลือบใช้ท่อมัลด์ไลต์ในสารแขวนลอยซีโอไลต์ จำนวนทั้งหมด 3 ชั้น เพื่อป้องกันดำหนิและรอยแตกร้าวที่อาจจะเกิดขึ้นบนเมมเบรนซีโอไลต์ ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่เคลือบ โดยการชั่งน้ำหนัก และหาความหนาของชั้นซีโอไลต์บนตัวรองรับด้วยเครื่อง SEM ผลแสดงในตารางที่ 4-4 และ ภาพที่ 4-10 พบว่า ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่ยึดเกาะบนตัวรองรับมัลด์ไลต์มีลักษณะเป็นรูปเข็ม โดยปริมาณของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 บนตัวรองรับมัลด์ไลต์และความหนาของเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นในการปั่นเคลือบ เมื่อทำการปั่นเคลือบครบทั้ง 3 ชั้น ปรากฏว่าเมมเบรนซีโอไลต์มีความหนาประมาณ 40  $\mu\text{m}$  และมีปริมาณของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่ยึดเกาะบนตัวรองรับมัลด์ไลต์ประมาณ 0.057 กรัม

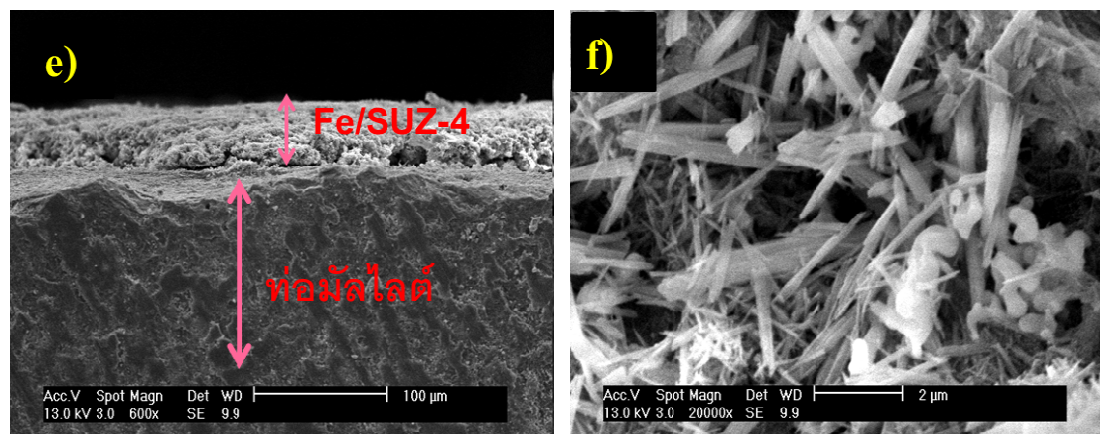
**ตารางที่ 4-4** ปริมาณของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่ยึดเกาะบนตัวรองรับมัลไลต์และชั้นความหนาของเมมเบรน

| จำนวนการปั่นเคลือบ (ชั้น) | ปริมาณ Fe/SUZ-4 (g) <sup>a</sup> | ความหนา (μm) |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1                         | 0.018±0.016                      | 11.43±0.62   |
| 2                         | 0.035±0.017                      | 27.93±3.28   |
| 3                         | 0.057±0.026                      | 40.00±0.92   |

<sup>a</sup> น้ำหนักของ 5 wt.% Fe/SUZ-4 + Silica sol.



**ภาพที่ 4-10** ภาพ SEM ตัดขวาง (cross section) และผิวด้านบน (top view) ของเมมเบรนซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4 a) ภาพตัดขวางของชั้นที่ 1 b) ภาพด้านบนของชั้นที่ 1 c) ภาพตัดขวางของชั้นที่ 2 d) ภาพด้านบนของชั้นที่ 2 e) ภาพตัดขวางของชั้นที่ 3 f) ภาพด้านบนของชั้นที่ 3



ภาพที่ 4-10 (ต่อ)

#### 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)

ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ในการกำจัด NO ของปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์แบบเลือกเกิดด้วยก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ -SCR) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ก๊าซพิษจำลองซึ่งประกอบด้วย 250 ppm NO 10 % Vol.  $O_2$  1 % Vol.  $H_2$  และใช้ก๊าซ He ปรับอัตราการไหลรวมของก๊าซพิษจำลองเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

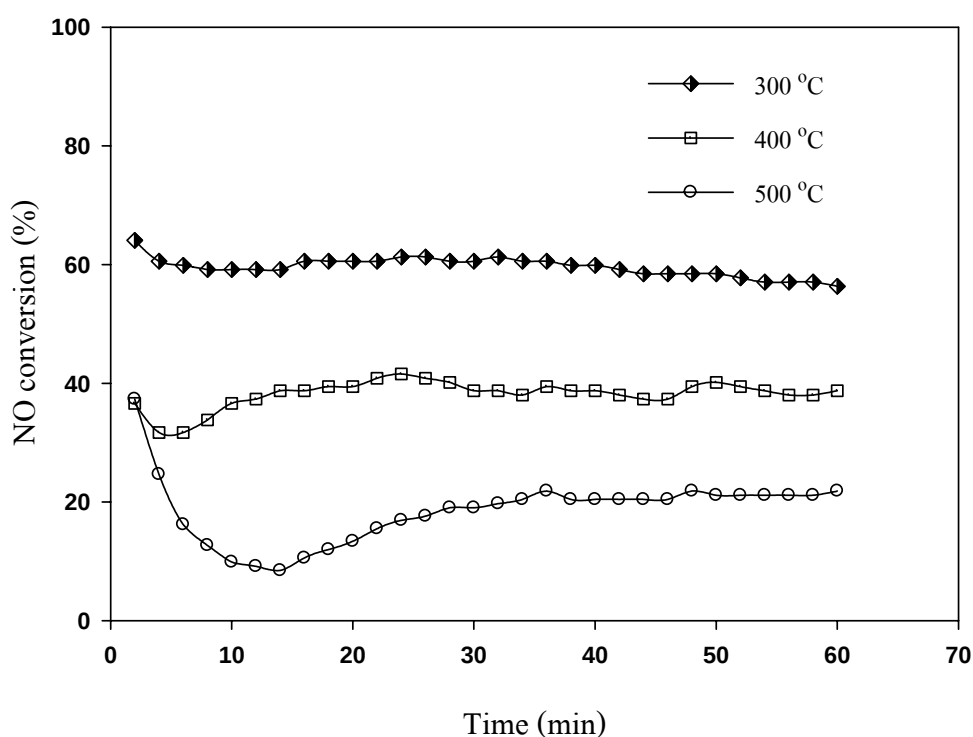
##### 4.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยา

การ pretreat ของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการกระตุ้น (Activate) ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความว่องไวในปฏิกิริยา โดยการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยก๊าซไฮโดรเจน เพื่อเปลี่ยนไอออนของ  $Fe^{3+}$  เป็น  $Fe^{2+}$  ซึ่งโลหะ Fe ในสถานะของ  $Fe^{2+}$  จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ที่สูง (Anunziata และคณะ, 2004) ศึกษาอุณหภูมิในการ pretreat โดยการป้อนก๊าซไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ภายใต้อุณหภูมิในการ pretreat ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% Fe/SUZ-4 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °C ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาหาอุณหภูมิในการ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Catalyst             | 5 wt.% Fe/SUZ-4       |
| Space velocity       | 6,356 h <sup>-1</sup> |
| Pretreat temperature | 300, 400, 500 °C      |
| Reaction temperature | 300°C                 |
| Pressure             | 1 atm                 |

ผลแสดงในภาพที่ 4-11 พบว่าอุณหภูมิในการ pretreat มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ (NO conversion) โดยอุณหภูมิ pretreat ที่ 300 °C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์สูงที่สุด และที่อุณหภูมิในการ pretreat สูงขึ้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์มีแนวโน้มที่ลดลง ในการทดลองนี้จึงเลือกอุณหภูมิในการ pretreat ที่ 300 °C มาทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4-11 ผลของอุณหภูมิในการ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์

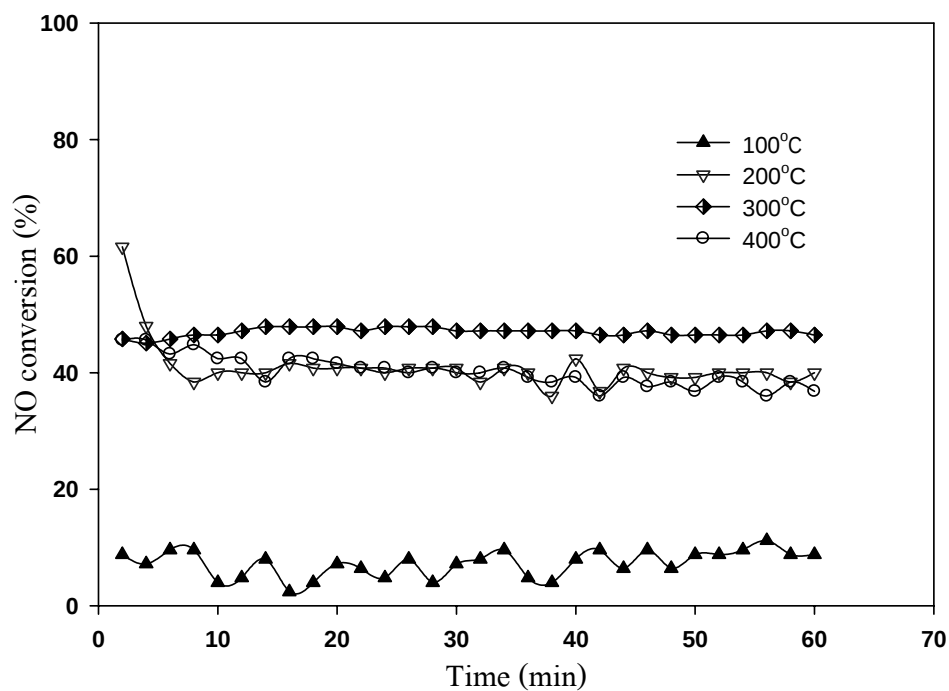
#### 4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาอุณหภูมิในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ทดสอบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 wt.% Fe/SUZ-4 3 wt.% Fe/SUZ-4 5 wt.% Fe/SUZ-4 8 wt.% Fe/SUZ-4 และ 10 wt.% Fe/SUZ-4 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400 °C ทำการวัดค่าความเข้มข้นด้านขาออกของ NO ทุกๆ 2 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4-6

**ตารางที่ 4-6** สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4

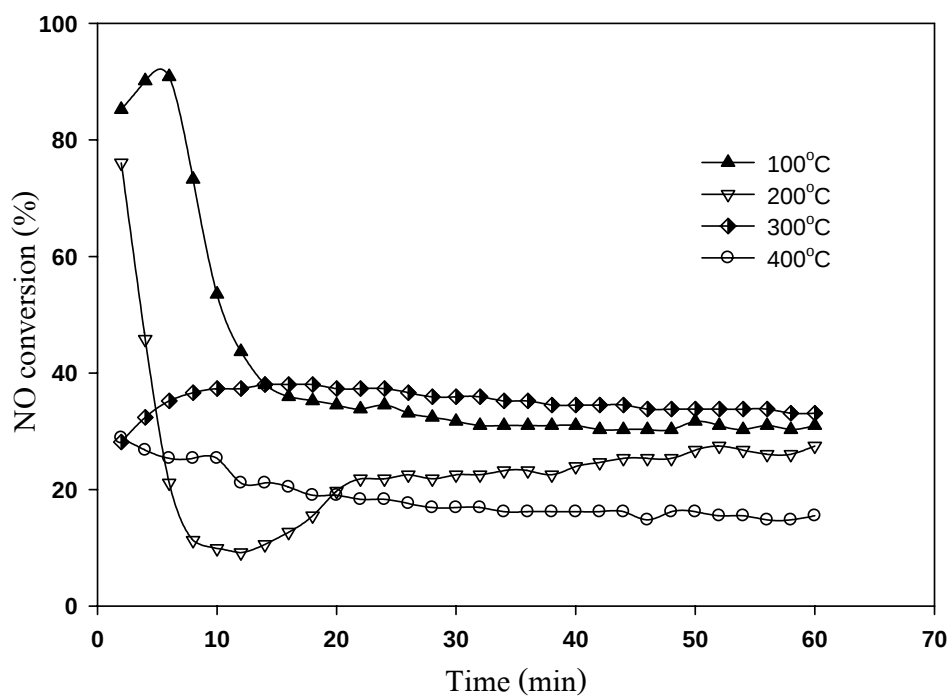
|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Catalyst             | 1, 3, 5, 8, 10 wt.% Fe/SUZ-4 |
| Space velocity       | 6,356 h <sup>-1</sup>        |
| Pretreat temperature | 300 °C                       |
| Reaction temperature | 100, 200, 300, 400 °C        |
| Pressure             | 1 atm                        |

จากการศึกษาผลอุณหภูมิในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 แสดงในภาพที่ 4-12 ถึงภาพที่ 4-16 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนออกไซด์สูงสุด ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 300 °C โดยที่อุณหภูมิ 300 °C ความสามารถในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 5 wt.% Fe/SUZ-4 > 8 wt.% Fe/SUZ-4 > 1 wt.% Fe/SUZ-4 > 10 wt.% Fe/SUZ-4 > 3 wt.% Fe/SUZ-4 ตามลำดับ จากการศึกษพบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นอุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิด autoreduction ของ ไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  เป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ในระหว่างทำปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยาให้ดียิ่งขึ้น (Krishna และ Makkee, 2006)



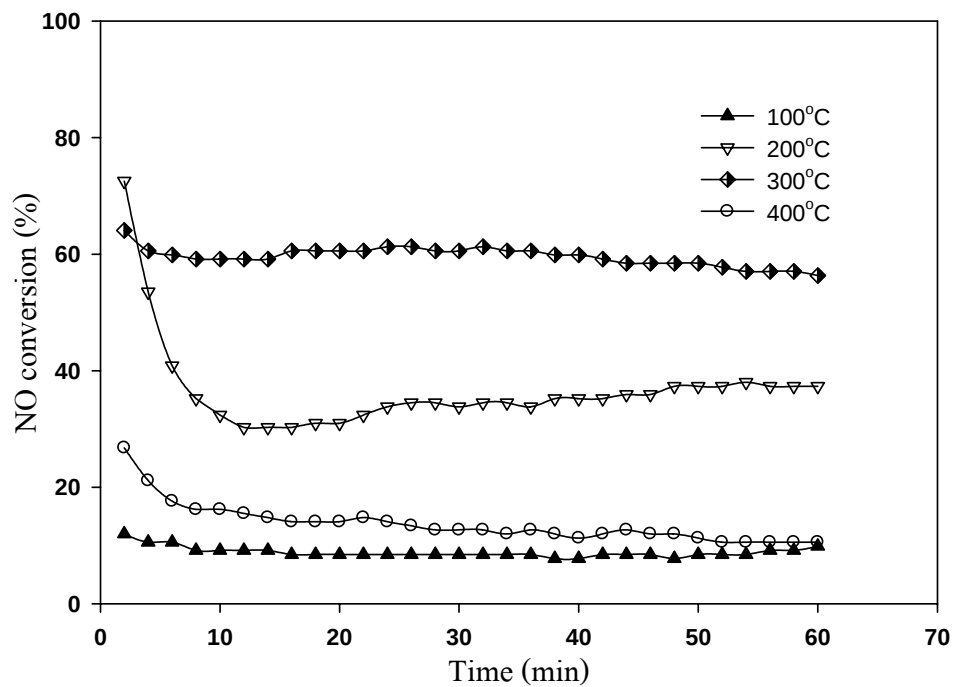
ภาพที่ 4-12 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

1 wt.% Fe/SUZ-4



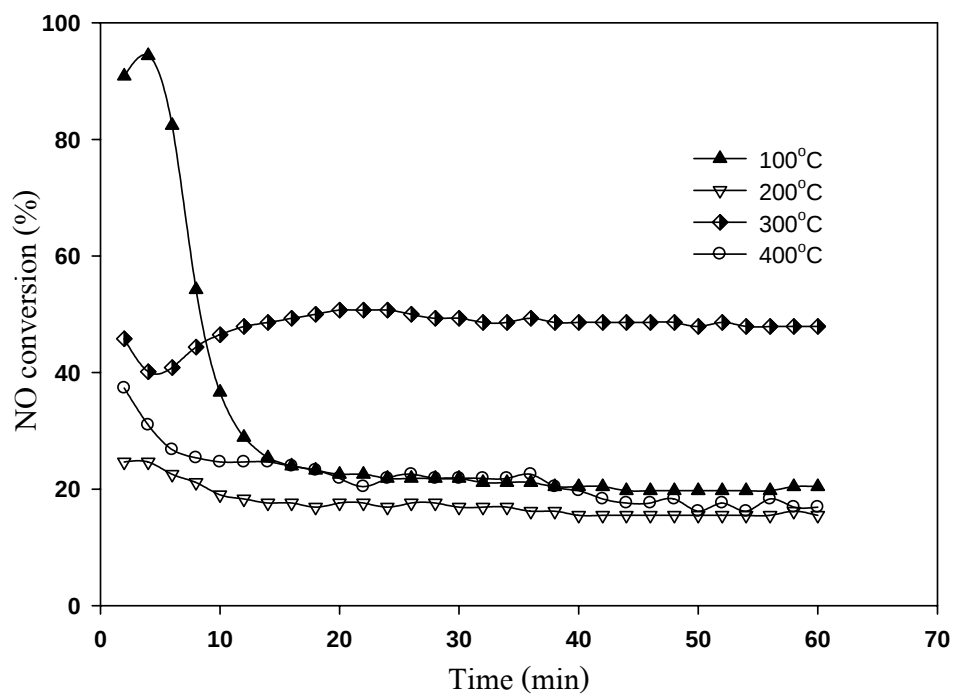
ภาพที่ 4-13 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

3 wt.% Fe/SUZ-4



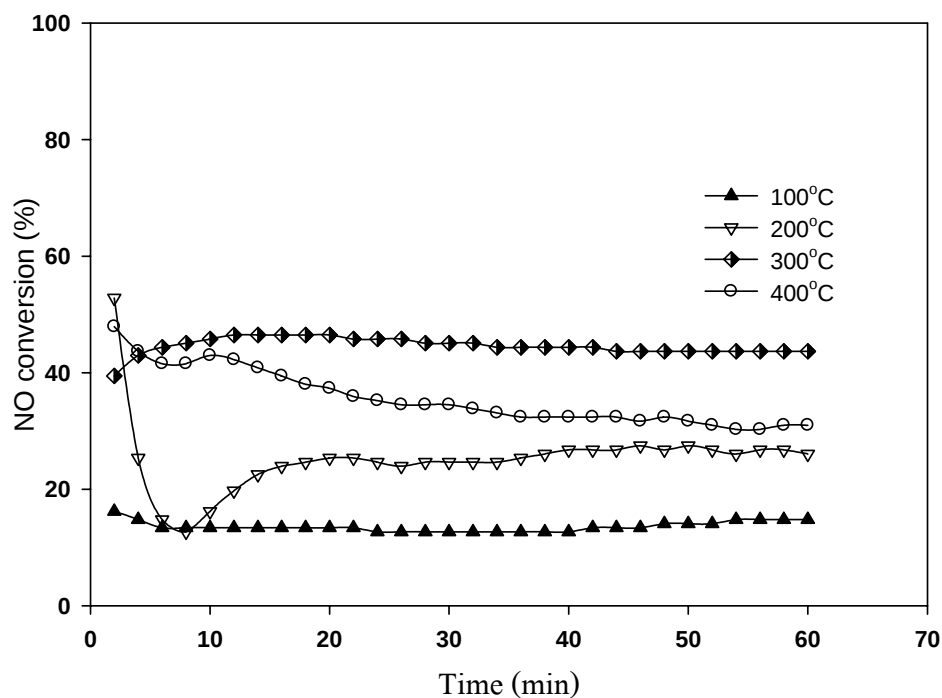
ภาพที่ 4-14 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

5 wt.% Fe/SUZ-4



ภาพที่ 4-15 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา

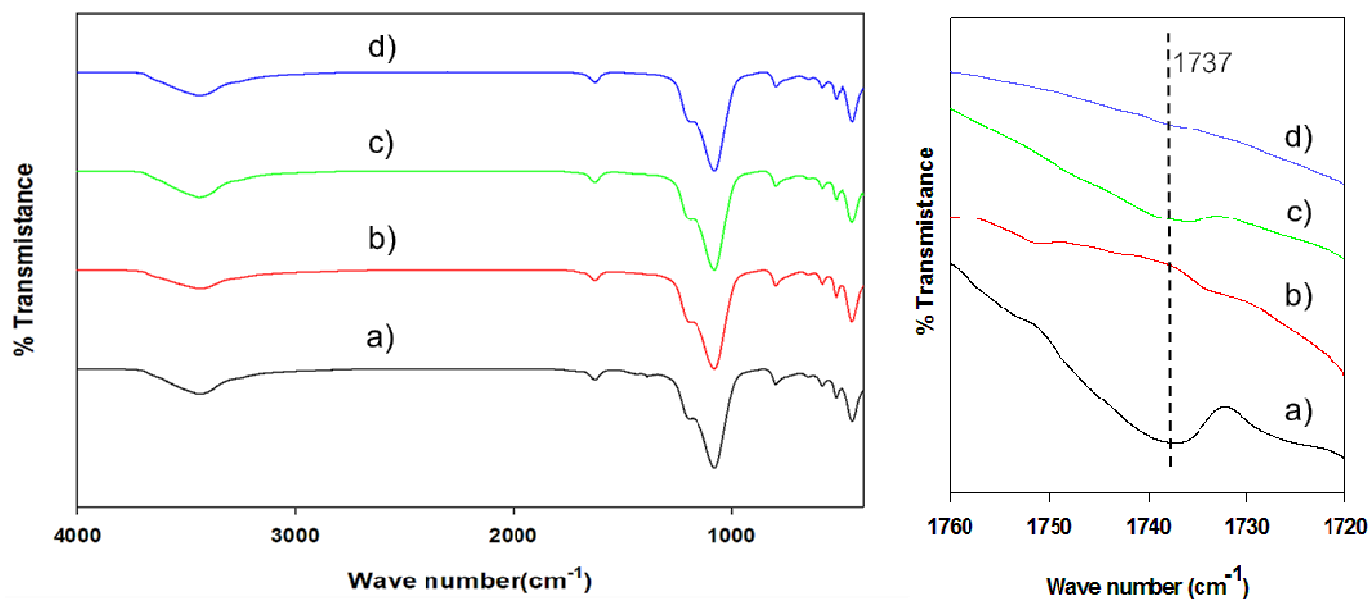
8 wt.% Fe/SUZ-4



ภาพที่ 4-16 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

10 wt. % Fe/SUZ-4

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความเสถียรของโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนการทำปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% Fe/SUZ-4 ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400 °C มาตรวจสอบด้วยเครื่อง FT-IR ผลแสดงในภาพที่ 4-17 พบว่าเกิดพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 3,436 1,630 1,077 800 650 521 และ 451  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับ Fe/SUZ-4 จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 มีความเสถียรต่ออุณหภูมิภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา และพบว่ามีพีคที่ตำแหน่ง 1,737  $\text{cm}^{-1}$  โดยเป็นตำแหน่งดูดซับของหมู่ไนโตรซิล ((NO)<sub>2</sub>) (Bordiga และคณะ, 2001) โดยพบที่อุณหภูมิ 100 °C และ 300 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการทำปฏิกิริยากันที่ตัวเร่งปฏิกิริยา

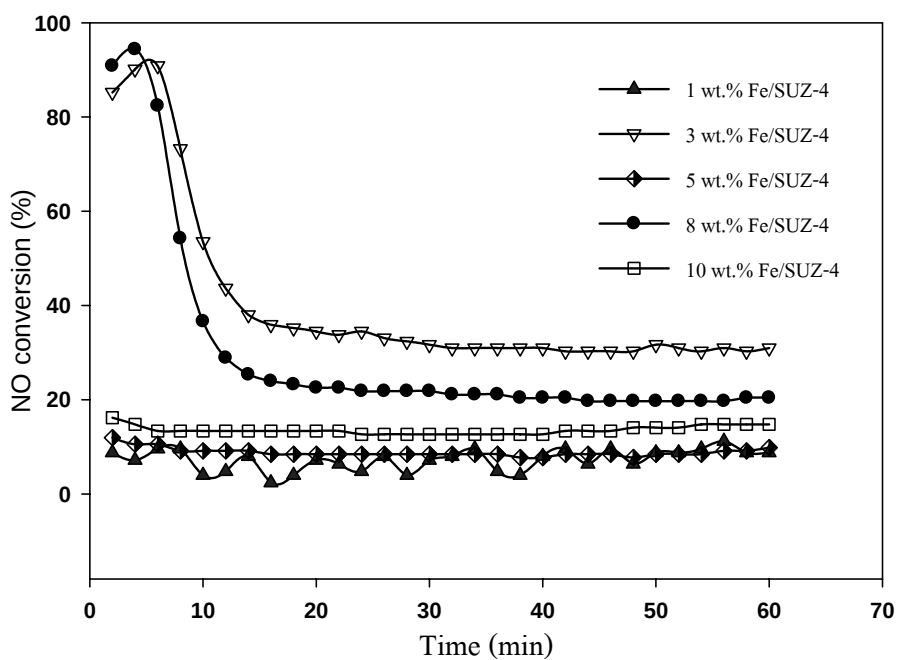


ภาพที่ 4-17 FTIR-spectra ของ 5 wt.% Fe/SUZ-4 ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ

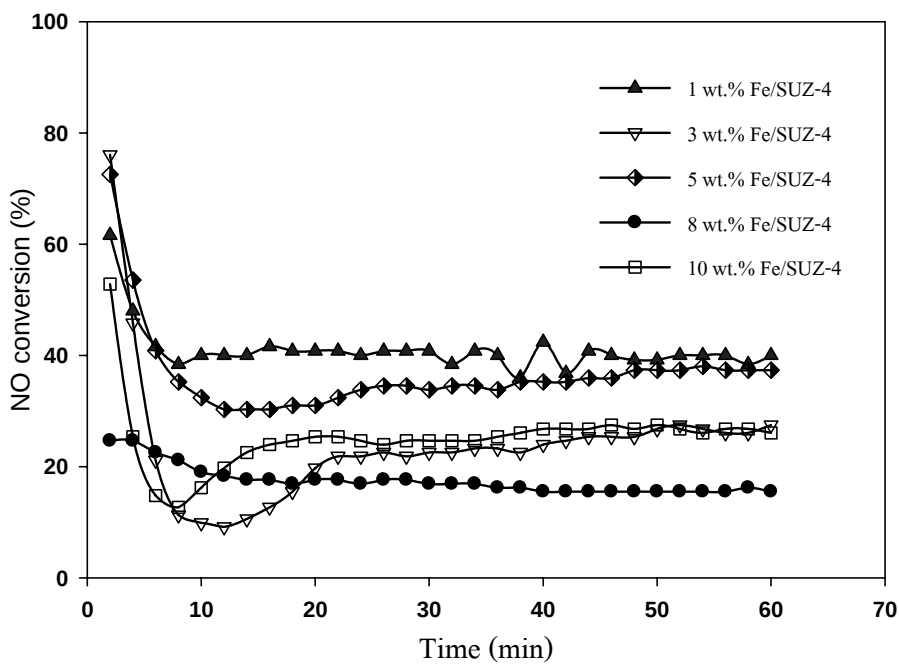
a) 100 °C, b) 200 °C, c) 300 °C และ d) 400 °C

#### 4.4.3 อิทธิพลของปริมาณการโหลดโลหะ Fe (Fe loading)

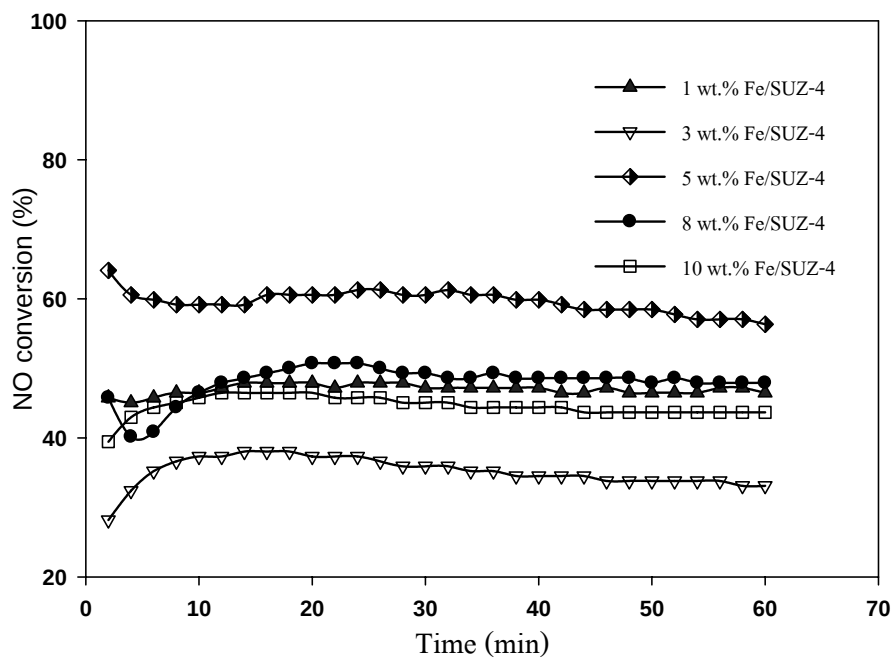
ภาพที่ 4-18 ถึงภาพที่ 4-22 แสดงผลของ % Fe loading ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด NO ที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400 °C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% Fe/SUZ-4 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ที่ดีที่สุด ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 300 °C โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ที่ 59 % แต่ให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิที่แคบ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 wt.% Fe/SUZ-4 ให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิกว้างภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา



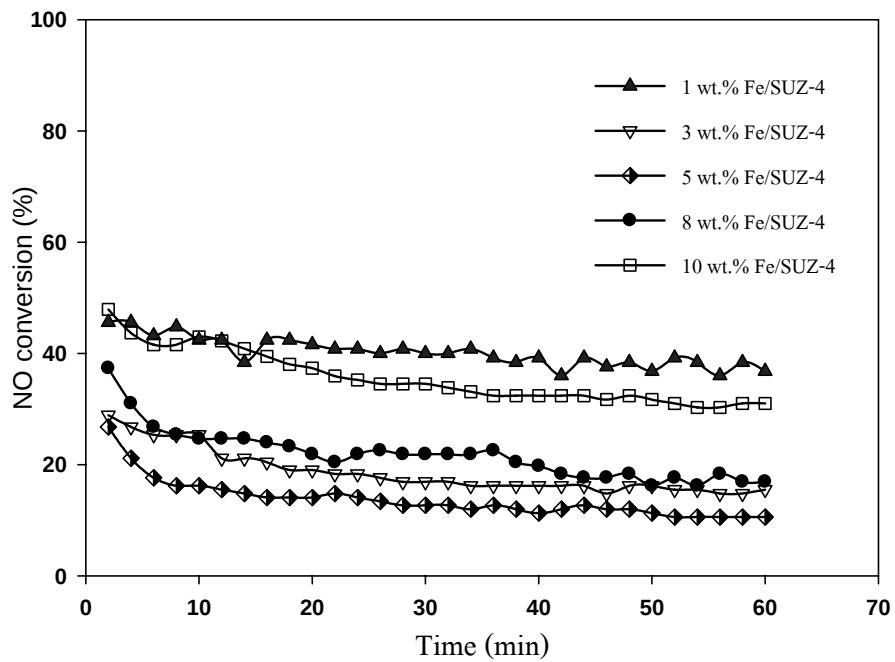
ภาพที่ 4-18 ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 100 °C



ภาพที่ 4-19 ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 200 °C

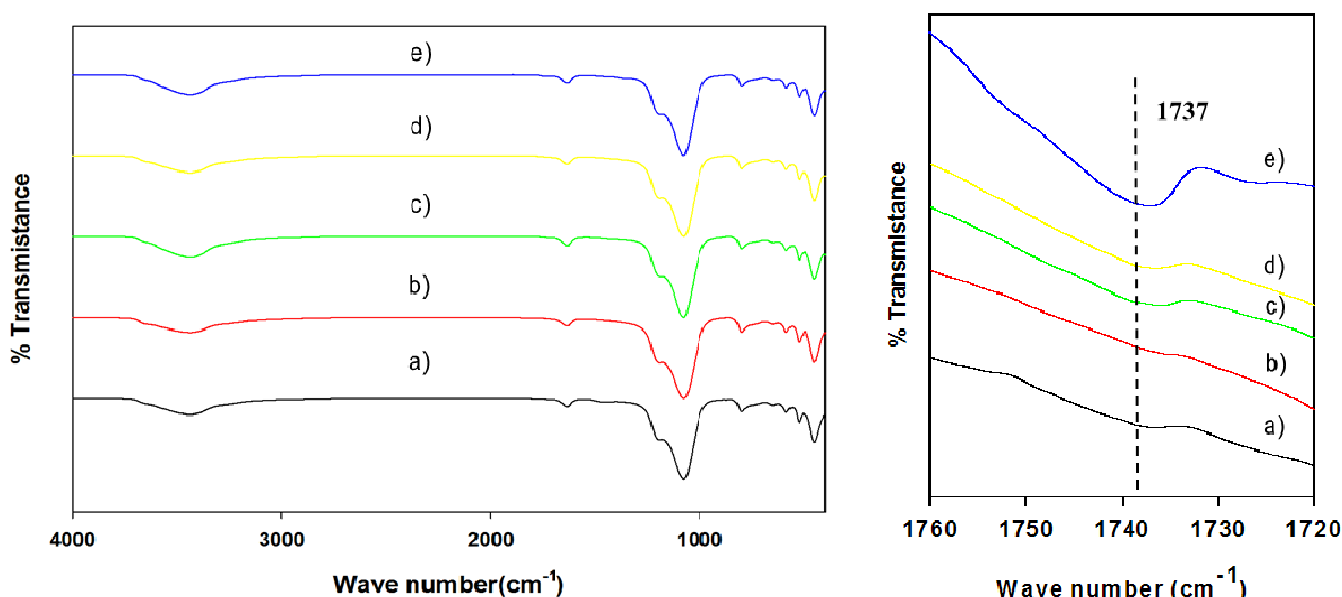


ภาพที่ 4-20 ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 300 °C



ภาพที่ 4-21 ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 400 °C

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทำปฏิกิริยา เพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °C มาตรวจสอบด้วยเครื่อง FT-IR ผลแสดงในภาพที่ 4-22 พบว่าเกิดพิกที่ความยาวคลื่นประมาณ 3,436 1,630 1,077 800 650 521 และ 451  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 และพบพิกที่ตำแหน่ง 1,737  $\text{cm}^{-1}$  โดยเป็นตำแหน่งดูดซับของหมู่ไนโตรซิล ( $\text{NO}$ )<sub>2</sub> (Bordiga และคณะ, 2001) โดยพบที่ 1 5 8 และ 10 wt.% แต่ไม่พบตำแหน่งการดูดซับของหมู่ไนโตรซิล ที่ 3 wt.% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 300 °C ให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดในการทำปฏิกิริยา

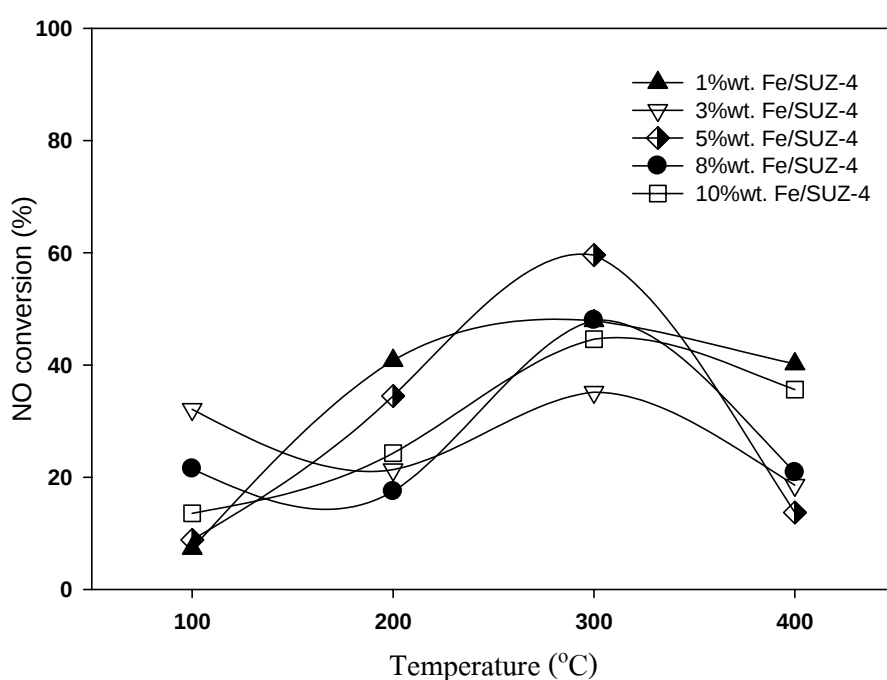


ภาพที่ 4-22 FTIR-spectra ของ a) 1 wt.% Fe/SUZ-4 b) 3 wt.% Fe/SUZ-4

c) 5 wt.% Fe/SUZ-4 d) 8 wt.% Fe/SUZ-4 และ e) 10 wt.% Fe/SUZ-4

ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °C

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ในการกำจัด NO โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทั้งหมดอาจสรุปได้ดังภาพที่ 4-23 ซึ่งจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างมากนัก ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา โดยที่อุณหภูมิ 300 °C ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 มีประสิทธิภาพในการกำจัด NO สูงสุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% Fe/SUZ-4 ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์สูงสุดที่ 59 %



ภาพที่ 4-23 ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 เทียบกับ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

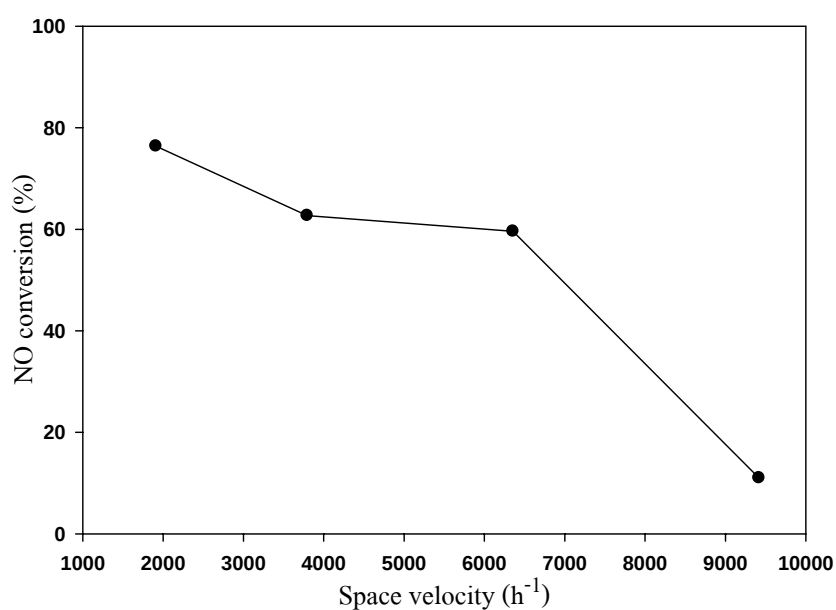
#### 4.4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

อิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด NO ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ 5 wt.% Fe/SUZ-4 ที่ค่า space velocity เท่ากับ 9,417 6,356 3,795 และ 1,912 h<sup>-1</sup> ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 4-7 และผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4-24 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า space velocity มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริก

ออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ space velocity เท่ากับ  $6,356 \text{ h}^{-1}$  โดยที่ค่า space velocity เท่ากับ  $1,912 \text{ h}^{-1}$  ให้การเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ดีที่สุดที่สังเกตได้ 76 % และที่ค่า space velocity เท่ากับ  $9,417 \text{ h}^{-1}$  ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ต่ำที่สุดที่สังเกตได้ 7%

ตารางที่ 4-7 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

|                      |                                            |
|----------------------|--------------------------------------------|
| Catalyst             | 5 wt.% Fe/SUZ-4                            |
| Space velocity (SV)  | 9,417, 6,356, 3,795, 1,912 $\text{h}^{-1}$ |
| Reaction temperature | 300 °C                                     |
| Pressure             | 1 atm                                      |



ภาพที่ 4-24 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์  
ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt. % Fe/SUZ-4

#### 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน (Catalytic Membrane Reactor, CMR)

ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด NO โดยใช้ก๊าซ  $H_2$  เป็นตัวรีดิวซ์ ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ทดสอบโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน (Catalytic Membrane Reactor, CMR) โดยป้อนก๊าซพิษจำลองซึ่งประกอบด้วย 250 ppm NO 10 % Vol.  $O_2$  1 % Vol.  $H_2$  และใช้ก๊าซ He ปรับอัตราการไหลรวมของก๊าซ ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 และเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม ตลอดจนอิทธิพลของค่า space velocity (SV) ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา

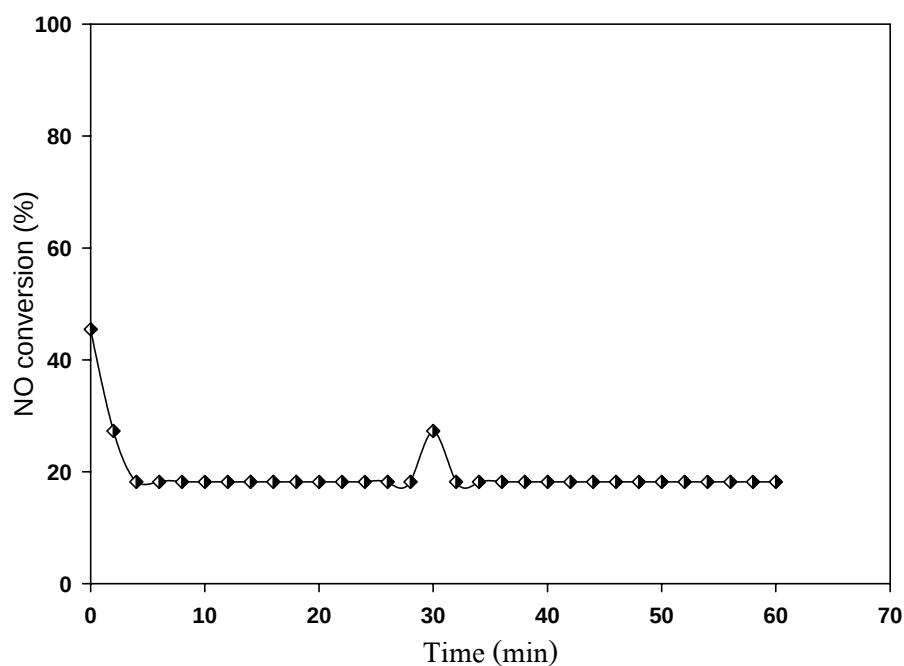
##### 4.5.1 ผลประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4

การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด NO โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน สภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4-8 โดยศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 300 °C และทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ NO ขาออกด้านก๊าซเพอมีเอททุกๆ 2 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-8 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4

|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| Catalyst             | 5 wt.% Fe/SUZ-4 zeolite membrane |
| Space velocity (SV)  | 158,730.16 h <sup>-1</sup>       |
| Pretreat temperature | 300 °C                           |
| Reaction temperature | 300 °C                           |
| Pressure             | 1 atm                            |

ภาพที่ 4-25 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 พบว่าให้เปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ เฉลี่ยที่ 18 % ซึ่งจากผลของการศึกษา K/SUZ-4 membrane ของภครดา (2554) ที่อุณหภูมิ 150 °C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ที่ 28.04 %



ภาพที่ 4-25 ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4

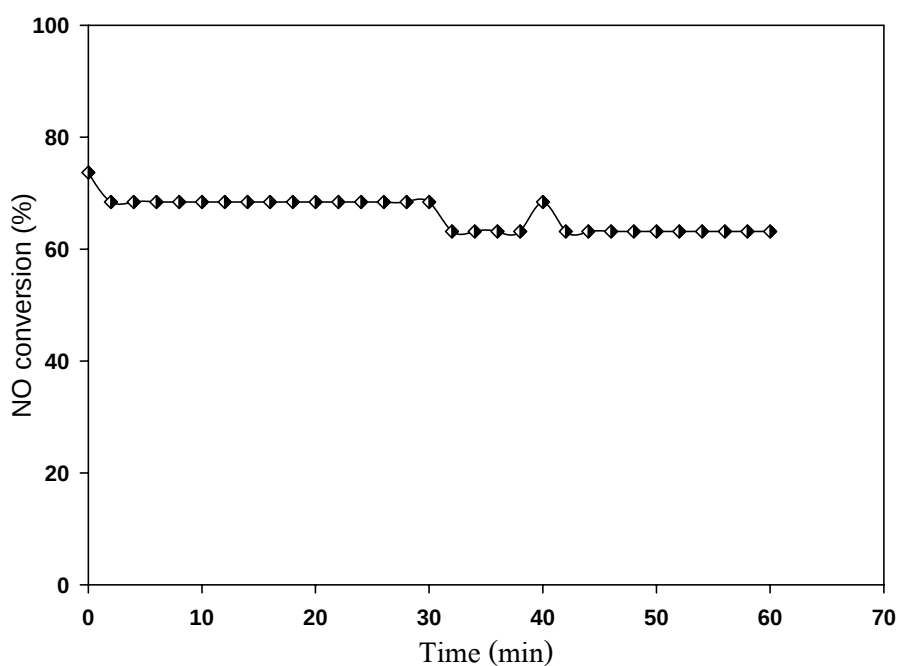
#### 4.5.2 ผลประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด NO ด้วยเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 พบว่าให้เปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ที่ไม่สูงมากนัก (แสดงในภาพที่ 4-25) ดังนั้น จึงสนใจพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน โดยใช้เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม ซึ่งมีการบรรจุผงซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4 ในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนร่วมกับเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 (แสดงในภาพที่ 3-18) โดยสถานะที่ใช้ศึกษาแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม

|                      |                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Catalyst             | 5 wt.% Fe/SUZ-4 zeolite membrane ,<br>5 wt.% Fe/SUZ-4 powder |
| Space velocity (SV)  | 1,256.49 h <sup>-1</sup>                                     |
| Pretreat temperature | 300 °C                                                       |
| Reaction temperature | 300 °C                                                       |
| Pressure             | 1 atm                                                        |

ภาพที่ 4-26 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม พบว่าให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ โดยเฉลี่ยที่ 65.5 % ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบธรรมดา (แสดงในภาพที่ 4-25) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ที่สูงกว่า



ภาพที่ 4-26 ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม

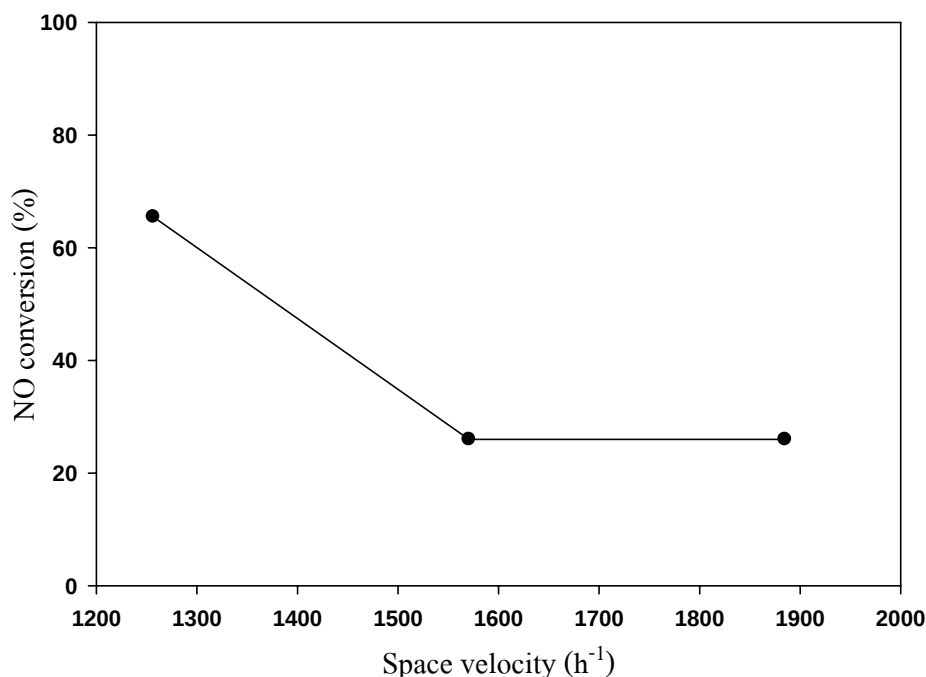
#### 4.5.3 อิทธิพลของค่า Space velocity (SV) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม

ผลของค่า Space velocity ต่อความสามารถในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์แบบผสม ศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลรวมของก๊าซพิษจำลองที่ 200 250 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถคำนวณค่า space velocity ได้เป็น 1,256.49 1,570.68 และ 1,884.81  $\text{h}^{-1}$  ตามลำดับ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 4-10

ผลการศึกษาค่า space velocity ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม แสดงในภาพที่ 4-27 พบว่าการเพิ่มค่า space velocity ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ลดลง โดยค่า space velocity เท่ากับ 1,256.49  $\text{h}^{-1}$  ให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์เฉลี่ยที่ 65.5 % ส่วน space velocity เท่ากับ 1,570.68 และ 1,884.81  $\text{h}^{-1}$  ให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ใกล้เคียงกันที่ 26% จากผลของการศึกษาการกำจัด NO ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ค่า space velocity เท่ากับ 1,912  $\text{h}^{-1}$  (แสดงในภาพที่ 4-24) ซึ่งมีค่า space velocity ใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนแบบผสม พบว่าให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์สูงกว่าที่ 76 %

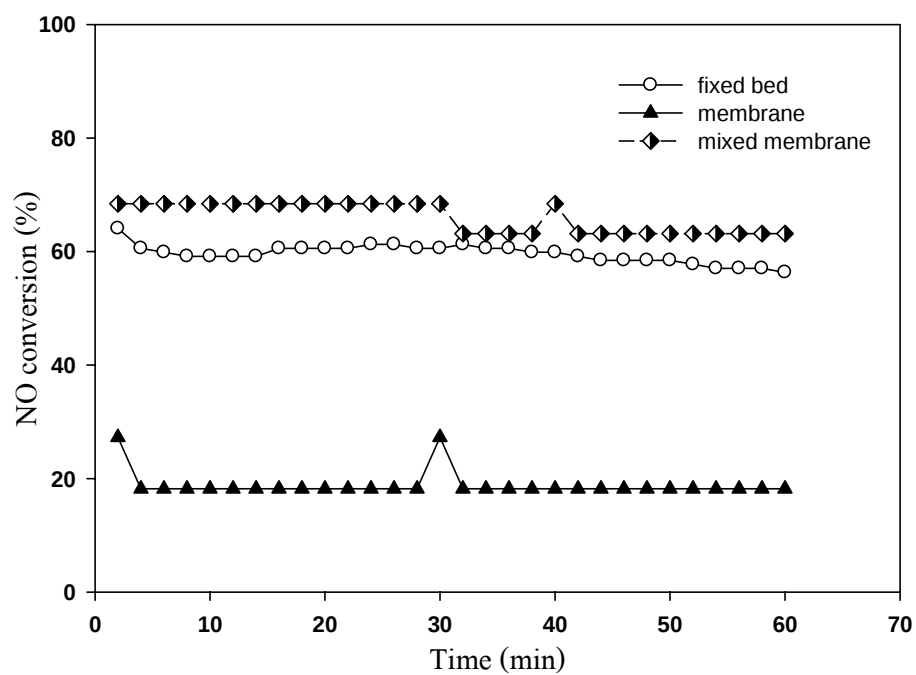
**ตารางที่ 4-10** สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของค่า Space velocity ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม

|                      |                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Catalyst             | 5 wt.% Fe/SUZ-4 zeolite membrane ,<br>5 wt.% Fe/SUZ-4 powder |
| Space velocity (SV)  | 1,256.49, 1,570.68, 1,884.81 $\text{h}^{-1}$                 |
| Pretreat temperature | 300 °C                                                       |
| Reaction temperature | 300 °C                                                       |
| Pressure             | 1 atm                                                        |



ภาพที่ 4-27 อิทธิพลของค่า space velocity ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเมมเบรน  
ซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4 แบบผสม

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4 ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ( $\text{SV} = 6,356 \text{ h}^{-1}$ ) เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน ( $\text{SV} = 158,730.16 \text{ h}^{-1}$ ) และเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนแบบผสม ( $\text{SV} = 1,256.49 \text{ h}^{-1}$ ) แสดงในภาพที่ 4-28 พบว่าเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนแบบผสมให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์สูงที่สุด ที่ 65.5 % เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ที่ 59 % และเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ต่ำที่สุด ที่ 18 %



ภาพที่ 4-28 การเปลี่ยนแปลงไนตรอกออกไซด์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เครื่องปฏิกรณ์  
เมมเบรนและเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนแบบผสม