

## ผลของอันดับการเสื่อมสภาพต่อการทำนายอายุของตัวเร่งปฏิกิริยา

### Effect of order of deactivation on catalyst lifetime prediction

พัชรพล ใจเพชร<sup>1</sup>, รศ.ดร.ผิงผาย พรรณวดี<sup>1</sup>, กมลชนก ปานสง่า<sup>1</sup>, รศ.ดร.เมตตา เจริญพานิช<sup>1</sup>,  
ผศ.ดร.ชงไทย วิฑูรย์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้จำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสมรรถนะของปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล อัตราการเสื่อมสภาพหรือการเปลี่ยนแปลงของความว่องไวตามเวลาแสดงในรูปของ Power-law โดยที่มีอันดับการเสื่อมสภาพอยู่ในช่วงระหว่างศูนย์ถึงสาม โพรไฟล์ของความว่องไวภายในปฏิกรณ์คำนวณสำหรับแต่ละค่าของอันดับการเสื่อมสภาพในระหว่างการปฏิบัติการ การคำนวณอายุของตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำหนดโดยค่าการแปลงผันของมีเทนแสดงให้เห็นว่าเมื่ออันดับการเสื่อมสภาพมีค่าสูงจะทำให้อายุของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำนายได้มีค่าสูง ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าอันดับของการเสื่อมสภาพมีผลกระทบอย่างมากต่อการทำนายอายุตัวเร่งปฏิกิริยา

**คำสำคัญ :** สตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง, อันดับของการเสื่อมสภาพ, อายุตัวเร่งปฏิกิริยา

#### Abstract

Numerical simulation was performed to investigate some characteristics of steam methane reforming reactor performance. A plug flow reactor model was applied. The rate of catalyst deactivation or the change in the catalytic activity with time was described by a power-law expression in which the order of the deactivation ranges from zero to three. The activity profiles in the reactor were calculated for each value of the order of deactivation during the operation period. It was found that, when a given methane conversion is used to determine the date to replace the catalyst, the higher order gives a higher calculated catalyst lifetime. This result shows that the order of the deactivation greatly affects the calculation for the catalyst lifetime.

**Keywords:** Steam Methane Reforming, Order of Deactivation, Catalyst Lifetime

## บทนำ

ในปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกได้ให้ความสำคัญกับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ และได้ตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปริมาณของน้ำมันดิบที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ ข้อดีของไฮโดรเจนคือเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษใด ๆ อีกทั้งยังให้ค่าความร้อนที่สูงถึง 120.1 กิโลจูลต่อกรัมซึ่งมากกว่าแก๊สโซลีนหรือดีเซล (Bossel, 2003) และไฮโดรเจนยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่น ๆ อีกด้วยเช่น ใช้ปรับปรุงไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของเชื้อเพลิงในกระบวนการกลั่นน้ำมันหรือ ไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) เป็นต้น (Lipman, 2011) ในการผลิตไฮโดรเจนกระบวนการที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์มากที่สุดคือกระบวนการการเกิดปฏิกิริยา สตีมีเทนรีฟอร์มมิง (Steam methane reforming) เพราะให้ผลผลิตที่สูงและต้นทุนต่ำ (Hazzim and Wan Daud, 2010) วิธีการคือป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซเช่น ก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งและได้ผลิตภัณฑ์คือไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่โลหะนิกเกิล (Nickel) ซึ่งมีราคาถูกกว่าโลหะชนิดอื่นที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีปัญหาด้านการเสื่อมสภาพง่ายตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ (Beurden, 2004)

ปฏิกิริยา สตีมีเทนรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการที่มีปฏิกิริยาหลักเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิสูง (>600°C) นอกจากนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของไอน้ำต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยังมีส่วนช่วยเพิ่มการทำปฏิกิริยาอีกด้วย (Beurden, 2004) ซึ่งสภาวะที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมประสิทธิภาพลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีกลไกการเสื่อมประสิทธิภาพหลัก ๆ ได้แก่ การเกิดโค้ก (Coking) พิษจากซัลเฟอร์ (Sulfur poisoning) และการเผาผนึก (Sintering) (Hashemnejad and Parvari, 2011)

ในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ด้านหน้าของปฏิกรณ์ก่อนด้านหลังของปฏิกรณ์ (Fogler, 2006) การทำนายสมรรถนะของปฏิกรณ์ที่ใช้ดำเนินปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสมการการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่อัตราเร็วของการเสื่อมสภาพ (-da/dt) ที่แสดงอยู่ในรูปของ Power-law มักจะเขียนอยู่ในรูปที่แปรผันตาม  $an$  เมื่อ  $a$  คือความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและ  $n$  คืออันดับของการเสื่อมสภาพ (Order of deactivation) ในที่นี้  $n$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3 (Levenspiel, 1999) บทความนี้จะรายงานผลของค่า  $n$  ต่อลักษณะเฉพาะของสมรรถนะของปฏิกรณ์และอายุตัวเร่งปฏิกิริยา

## วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของอันดับการเสื่อมสภาพต่อการทำนายอายุของตัวเร่งปฏิกิริยา

### ขอบเขตการวิจัย

การจำลองแบบสำหรับทำนายการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งในกระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอลูมินาภายใต้อุณหภูมิและความดันคงที่ โดยใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ครอบคลุมทั้ง 3 ปฏิกิริยา คือ (Hou and Hughes, 2001)

- ปฏิกิริยาสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง (Steam Methane Reforming) :



- ปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas-shift) :



- ปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทน (Reverse Methanation) :



โดยมีอัตราการเสื่อมสภาพแสดงอยู่ในรูป Power-law และอันดับความว่องไวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3

### การทบทวนวรรณกรรม

ปฏิกิริยาหลักในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่งมี 3 ปฏิกิริยาหลักได้แก่ สมการที่ (1) (2) และ (3)

การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง (steam methane reforming reaction)

Hou and Hughes (2001) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ (1) (2) และ (3) บนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในปฏิกรณ์มีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ภายใต้สภาวะคงที่ไม่มี ความต้านทานจากการแพร่ แสดงไว้ดังนี้

อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง ( $r_1$ )

$$r_1 = \frac{k_1 \left( \frac{P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5}}{P_{\text{H}_2}^{1.25}} \right) \left( 1 - \left( \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^3}{K_{P_1} P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right)}{(\text{den})^2} \quad (4)$$

อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ( $r_2$ )

$$r_2 = \frac{k_2 \left( \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5}}{P_{\text{H}_2}^{0.5}} \right) \left( 1 - \left( \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{P_2} P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right)}{(\text{den})^2} \quad (5)$$

อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทน (r<sub>3</sub>)

$$r_3 = \frac{k_3 \left( \frac{P_{CH_4} P_{H_2O}}{P_{H_2}^{1.75}} \right) \left( 1 - \left( \frac{P_{CO_2} P_{H_2}^4}{K_{P_3} P_{CH_4} P_{H_2O}^2} \right) \right)}{(\text{den})^2} \quad (6)$$

โดยที่

$$\text{den} = 1 + K_{CO} P_{CO} + K_H P_H^{0.5} + K_{H_2O} \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} \right) \quad (7)$$

และ

k<sub>1</sub>, k<sub>3</sub> คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา 1 และ 3 ตามลำดับ (kmol/k<sub>gcat</sub>.s)(kPa)<sup>0.25</sup>

k<sub>2</sub> คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา 2 (kmol/k<sub>gcat</sub>.s)(kPa)

K<sub>CO</sub> คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับของ CO (kPa)<sup>-1</sup>

K<sub>H</sub> คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับของ H (kPa)<sup>-1</sup>

K<sub>H<sub>2</sub>O</sub> คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับของ H<sub>2</sub>O (kPa)<sup>-1</sup>

K<sub>p1</sub>, K<sub>p3</sub> คือ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่ 1 และ 3 ตามลำดับ (kPa)<sup>2</sup>

K<sub>p2</sub> คือ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่ 2 (kPa)<sup>2</sup>

P<sub>i</sub> คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ i (kPa)

พารามิเตอร์ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k<sub>j</sub>) ค่าคงที่สมดุล (K<sub>pj</sub>) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K<sub>i</sub>) แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานกระตุ้น, ค่าความร้อนของการดูดซับและฟรีเอ็กโพแนนเชียลแฟกเตอร์

ค่าคงที่	ฟรีเอ็กโพแนนเชียลแฟกเตอร์ A(kk); A(Ki)	พลังงานกระตุ้น, E <sub>k</sub> (kJ/mol) ความร้อนของการดูดซับ (-ΔH) <sub>k</sub> (kJ/mol)
k <sub>1</sub> (kmol / (kg <sub>cats</sub> kPa <sup>0.25</sup> ))	5.922 × 10 <sup>8</sup>	209.2
k <sub>2</sub> (kmol / (kg <sub>cats</sub> kPa))	6.028 × 10 <sup>-4</sup>	15.4
k <sub>3</sub> (kmol / (kg <sub>cats</sub> bar <sup>0.25</sup> ))	1.093 × 10 <sup>3</sup>	109.4
K <sub>CO</sub> (bar <sup>-1</sup> )	5.127 × 10 <sup>-13</sup>	-140
K <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (-)	9.251	15.9
K <sub>H<sub>2</sub></sub> (bar <sup>-1</sup> )	5.68 × 10 <sup>-10</sup>	-93.4

ค่าคงที่ปฏิกิริยาสมดุลเคมี

$$K_{p,1} = 1.198 \times 10^{17} \exp(-26830/T), (\text{kPa})^2$$

$$K_{p,2} = 1.767 \times 10^{-2} \exp(4400/T), -$$

$$K_{p,3} = 2.117 \times 10^{15} \exp(-22430/T), (\text{kPa})^2$$

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Deactivation)

ภายใต้สภาวะของกระบวนการในอุตสาหกรรมพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงไปตามเวลา หรือตามการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นสมการอัตราของปฏิกิริยาจึงต้องเพิ่มเทอมแสดงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) ที่อธิบายสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ลดลง อันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพนี้ด้วย (Levenspiel, 1999) โดยที่

$$a = \frac{\text{อัตราการหายไปของสปีชีส์ } j \text{ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานแล้ว}}{\text{อัตราการหายไปของสปีชีส์ } j \text{ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่}} = \frac{-r_j}{-r_{j0}} \quad (11)$$

อัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$-\frac{da}{dt} = k_d P_j^m a^n \quad (12)$$

a คือ ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$P_j$  คือ ความดันย่อยของสปีชีส์  $j$  ในที่นี้คือมีเทน ( $\text{CH}_4$ )

$k_d$  คือ ค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

m คือ อันดับของปฏิกิริยาโดยในที่นี้สมมุติให้  $m=1$

t คือ เวลา (วินาที)

n คือ อันดับของปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับ n ที่มีค่าสูงจะสะท้อนถึงความต้านทานการแพร่ในรูพรุนของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูง (Levenspiel, 1999)

### วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของความแตกต่างของอันดับการเสื่อมสภาพ (n) ที่แตกต่างกัน (0 ถึง 3) ว่ามีผลอย่างไรต่อการทำนายอายุตัวเร่งปฏิกิริยา ในการสร้างแบบจำลองในปฏิกรณ์ที่ตั้งข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กระบวนการดำเนินไปที่สภาวะไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state)
2. อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง คงที่ทั้งปฏิกรณ์ (Isothermal)
3. ถือว่าความดันในปฏิกรณ์สม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละการปฏิบัติการ

4. ความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงตามแนวความยาวปฏิกรณ์เท่านั้น
5. รูปแบบการไหลของของไหลในปฏิกรณ์เป็นแบบท่อไหล (Plug flow)

กระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่งจะมีองค์ประกอบอยู่ 6 ชนิดด้วยกัน คือ มีเทน (CH<sub>4</sub>), น้ำ (H<sub>2</sub>O), ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), และไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) สมการดุลมวลในปฏิกรณ์สำหรับก๊าซแต่ละชนิดเขียนไว้ดังนี้

$$\frac{dF_{CH_4}}{dz} = aA\rho(-r_1 - r_3) \quad (13)$$

$$\frac{dF_{H_2O}}{dz} = aA\rho(-r_1 - r_2 - 2r_3) \quad (14)$$

$$\frac{dF_{CO}}{dz} = aA\rho(r_1 - r_3) \quad (15)$$

$$\frac{dF_{CO_2}}{dz} = aA\rho(r_2 + r_3) \quad (16)$$

$$\frac{dF_{H_2}}{dz} = aA\rho(3r_1 + r_2 + 4r_3) \quad (17)$$

$$\frac{dF_{N_2}}{dz} = 0 \quad (18)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ (m<sup>2</sup>)

$\rho$  คือ มวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรของเบด (kg cat/m<sup>3</sup>)

โดยมีแบบจำลองของสมการการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการจำลองแบบนี้

$$\frac{da}{dt} = -k_d P_{CH_4} a^n, \quad (0 \leq n \leq 3) \quad (19)$$

สมการ (13) - (17) คือ สมการแบบจำลองของปฏิกรณ์ในกระบวนการสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่งที่จะใช้คำนวณหาค่าการแปลงผันของมีเทน (Methane conversion) และสมการที่ (19) คือสมการแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายอายุที่เหลือตัวเร่งปฏิกิริยา การหาพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองจะใช้ข้อมูลการปฏิบัติการเริ่มต้นแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการจำลองแบบ

สภาวะปฏิบัติการ		
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
อุณหภูมิปฏิบัติการ	856.98	องศาเซลเซียส
ความดันปฏิบัติการ	29.32	บาร์
ความยาวปฏิกรณ์	12.5	เมตร
อัตราส่วนไอน้ำต่อจำนวนคาร์บอน (S/C ratio)	3.7	-
$F_{CH_4}$	261.43	โมล/วินาที
$F_{H_2O}$	967.29	โมล/วินาที
$F_{CO}$	3.094	โมล/วินาที
$F_{CO_2}$	37.472	โมล/วินาที
$F_{H_2}$	5.368	โมล/วินาที
$F_{N_2}$	2.724	โมล/วินาที

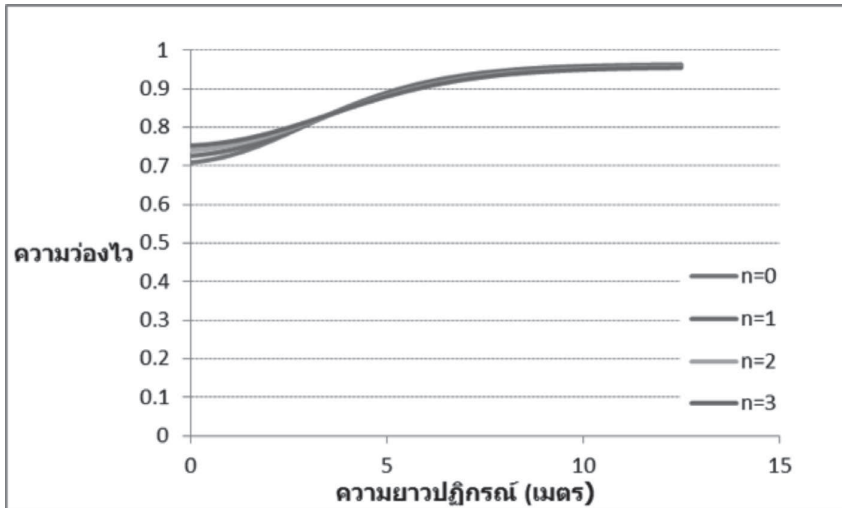
เมื่อ  $F_i$  คืออัตราการไหลของโมลของแต่ละองค์ประกอบ และข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับการผลิตไฮโดรเจนในปริมาณ 120 ตันต่อวัน

เมื่อแทนสมการ (4)-(6) ลงในสมการที่ (13)-(17) จะปรากฏเทอมของพารามิเตอร์ได้แก่  $AP_{k_1}$ ,  $AP_{k_2}$  และ  $AP_{k_3}$  งานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $264.337 \text{ mol/m.s.kPa}^{0.25}$ ,  $0.244 \text{ mol/m.s}$  และ  $20.01 \text{ mol/m.s.kPa}^{0.25}$  ตามลำดับ ค่าเหล่านี้จะตรงกับกรณีที่เรากำหนดอัตราส่วน  $AP_{k_1}:AP_{k_2}:AP_{k_3}$  เท่ากับ  $k_1:k_2:k_3$  ที่รายงานโดย Hou และ Hughes (2001) และตรงกับกรณีที่มีเทนมีค่าการแปลงผันเท่ากับร้อยละ 83.17 สำหรับวันแรกของการปฏิบัติการที่ตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่เสื่อม ส่วนค่าคงที่อื่น ๆ ในสมการที่ (13)-(17) ใช้ค่าที่รายงานโดย Hou และ Hughes

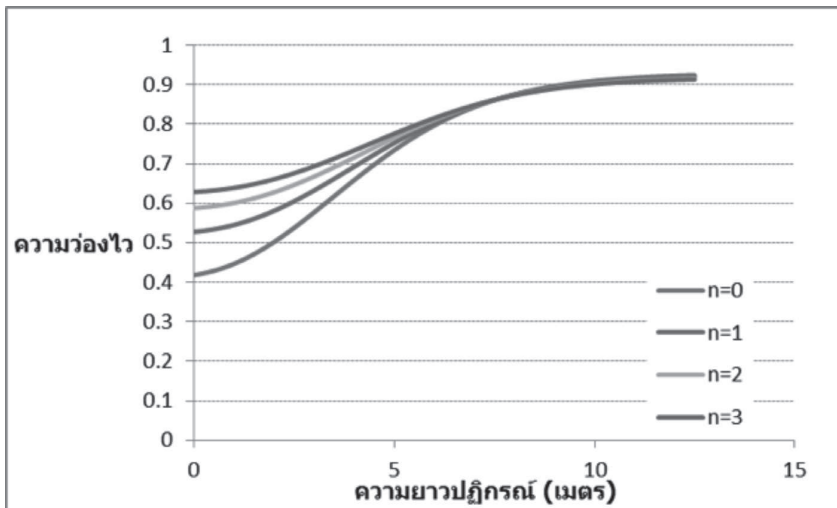
สำหรับค่า  $k_d$  ที่ปรากฏในสมการที่ (19) มีค่าเท่ากับ เท่ากับ  $9.69 \times 10^{-4}$ ,  $1.065 \times 10^{-4}$ ,  $1.168 \times 10^{-4}$  และ  $1.276 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}\text{year}^{-1}$  เมื่อ  $n$  เท่ากับ 0, 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ค่านี้ทำให้ปฏิกิริยาเมื่อสิ้นสุดปีที่ 5 (เดือนที่ 60) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมลงจนกระทั่งค่าการแปลงผันของมีเทนเท่ากับร้อยละ 82.66 การจำลองแบบจะถือว่าแต่ละกรณีที่กำหนดค่าของ  $n$  คือ 0, 1, 2 และ 3 มีกรอบการปฏิบัติการที่เหมือนกัน ซึ่งกำหนดโดยค่าการแปลงผันของมีเทนที่เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดปีที่ 5 เมื่อสิ้นสุดปีที่ 5 ถือว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังใช้งานได้อีกและถือว่าตัวเร่งปฏิกิริยาใช้งานไม่ได้เมื่อการแปลงผันของมีเทนเท่ากับร้อยละ 77.86 แบบจำลองจะถูกใช้เพื่อทำนายว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานไม่ได้เมื่อใดสำหรับแต่ละค่าของ  $n$

### ผลการวิจัย

ภาพที่ 1 และ 2 แสดงถึงโพรไฟล์ของความว่องไว (Activity Profile) ที่เป็นฟังก์ชันต่อความยาวของปฏิกรณ์ในปีที่ 5 และ 10 ตามลำดับ ภาพที่ 1 แสดงว่าโพรไฟล์ของความว่องไวมีลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อย ทั้ง 4 กรณีให้ค่าการแปลงผันขาออกเท่ากัน และภาพที่ 2 แสดงว่าโพรไฟล์ของความว่องไวมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งเกิดจากค่า  $n$  หรืออันดับการเสื่อมสภาพที่ต่างกัน และภาพ 2 แสดงด้วยว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทางเข้าของปฏิกรณ์จะเสื่อมเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ทางออกของปฏิกรณ์



ภาพที่ 1 โพรไฟล์ความว่องไวตามแนวปฏิกรณ์ที่เวลาสิ้นสุดปีที่ 5



ภาพที่ 2 โพรไฟล์ความว่องไวตามแนวปฏิกรณ์ที่เวลาสิ้นสุดปีที่ 10



ตารางที่ 3 แสดงอายุของตัวเร่งปฏิกิริยานับตั้งแต่เริ่มใช้เดือนแรกจนถึงเดือนสุดท้ายสำหรับค่า  $n$  เท่ากับ 0, 1, 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $n$  มีค่าสูงขึ้นอายุของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงขึ้น สอดคล้องกับข้อมูล que แสดงในภาพที่ 2 กล่าวคือเมื่อ  $n$  มีค่าสูงขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $a$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ดังนั้นเมื่อ  $n$  มีค่าสูงขึ้นอัตราการเสื่อมสภาพจึงช้าลง

ตารางที่ 3 อายุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขึ้นกับอันดับการเสื่อมสภาพ

อันดับ (n)	(-da/dt)	อายุตัวเร่งปฏิกิริยา
0	kdPCH4	13 ปี 7 เดือน
1	kdPCH4a	16 ปี 10 เดือน
2	kdPCH4a2	20 ปี 7 เดือน
3	kdPCH4a3	25 ปี 2 เดือน

#### อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้จำลองแบบสำหรับปฏิกิริยาสตีมีเทนรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของ Power-law ผลการจำลองแบบแสดงโพลีพลัสของความว่องไวที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลการคำนวณแสดงอายุของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันมากเมื่ออันดับการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่างกันระหว่าง 0 ถึง 3

#### ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่รายงานในบทความนี้ ยังไม่ครอบคลุมกรณีที่อัตราการเสื่อมสภาพแสดงด้วยนิพจน์ที่ซับซ้อนมาก และยังไม่ได้ศึกษาเงื่อนไขของสภาวะการปฏิบัติการที่กว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความไม่แน่นอนของสภาวะปฏิบัติการในแต่ละช่วงเวลาการศึกษาหาวิธีการคำนวณเพื่อการทำนายอายุของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการปฏิบัติการที่แตกต่างกันจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการผลิต

#### เอกสารอ้างอิง

- Hashemnejad, S. M., M. Parvari, 2011. **Deactivation and Regeneration of Nickel-Based Catalysts for Steam-Methane Reforming**. Chinese Journal of Catalysis, Vol.32, No.2, 273-279.
- Hazzim F. Abbas, W.M.A. Wan Daud, 2010. **Hydrogen production by methane decomposition: A review**, International Journal of Hydrogen Energy, 35(2010) 1160-1190.
- H. Scott Fogler, 2006. **Elements of Chemical Reacting Engineering fourth edition**, Prentice Hall International Series.

- Hou, K., R. Hughes, 2001. **The kinetics of methane steam reforming over a Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst.** Chemical Engineering Journal, 82, 311–328.
- Levenspiel, O., 1999. **Chemical Reaction Engineering 3rd Ed.** John Wiley & Sons.
- Timothy Lipman, 2011. **An Overview of Hydrogen Production and Storage Systems with Renewable Hydrogen case studies.** Clean Energy States Alliance.
- U. Bossel, 2003. **Well-to-Wheel studies, heating values, and the energy conversion principle.** In Proc. Eur. Fuel Cell forum.
- Van Beurden, P., 2004. **On the catalytic aspects of steam-methane reforming, A Literature Survey.** Report of ECN, the Netherlands, 1-27.