

# การสร้างแบบจำลองของเตาปฏิกรณ์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านข้อมูล

## MODELING OF CRACKING FURNACE BY USING DATA-DRIVEN TECHNIQUE

ชาติรีพิทยานิพนธ์, วรานนท์ตรศวุฒัน

ผศ. ดร. ชรินทร์ปัญญาพรผล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร 02-942-8555 ต่อ 1230 และ 1204 โทรสาร 02-561-4621 E-mail: fengcnp@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

การสร้างแบบจำลองพลวัต (Dynamic model) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในเตาปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อปฏิกรณ์กับผนังเตาเป็นแบบผลรวมของอนุพันธ์สามัญ (ODE) กับอนุพันธ์ย่อย (PDE) โดยการสร้างแบบจำลองของเตาปฏิกรณ์มีการนำเสนอการสร้างด้วยกันหลากหลายวิธีแต่อย่างไรก็ตามยังมีความยุ่งยากในสร้างแบบจำลองและการประยุกต์ใช้ซึ่งงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบการไล่ระดับแพร่ย้อนกลับ (Feed forward back propagation neural networks) ที่คิดผลรวมของอนุพันธ์สามัญกับอนุพันธ์ย่อยได้ด้วยเทคนิคการผสมโครงข่ายประสาทเทียมหลายโครงข่ายรวมเข้าด้วยกัน (Hybrid neural network) เพื่อลดรูปสมการคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในเตาปฏิกรณ์ได้ดี

**คำสำคัญ:** กระบวนการใช้ความร้อนในการแตกตัว, เตาปฏิกรณ์, แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

### Abstract

The modeling of the cracking furnace that expresses the dynamics of a tubular reactor and a furnace wall can be expressed by coupling equations between partial differential equation and ordinary differential equation. Although various techniques have been proposed to formulate the model, they still have difficulties to develop and apply the models. Thus, this research proposes the feed forward back propagation neural network model that represents coupling ODE/PDE dynamics of cracking furnace. Hybrid neural network technique is used

to capture the complex furnace behavior into simplified mathematical equation. From the result, the model provides a good prediction of the furnace behavior.

**Keyword:** Thermal cracking, Cracking furnace, Neural network model

### 1. คำนำ

กระบวนการทางอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและการกลั่นน้ำมันเป็นกระบวนการที่มีความสลับซับซ้อนที่ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยๆ ประกอบเข้าด้วยกัน โดยหน่วยปฏิบัติการหน่วยหนึ่งที่มีความสำคัญและเป็นหัวใจของกระบวนการคือ เตาปฏิกรณ์ ที่ประกอบด้วยตัวเตาปฏิกรณ์และท่อปฏิกรณ์ที่เป็นแบบผลรวมของอนุพันธ์สามัญกับอนุพันธ์ย่อย ซึ่งภายในเตาปฏิกรณ์นั้นมีการถ่ายเทพลังงาน และการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของพันธะโมเลกุล จึงมีความพยายามที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในเตาปฏิกรณ์ด้วยการทำแบบจำลองพลวัตด้วยกันหลากหลายวิธีแต่ยังมีความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองและการนำมาประยุกต์ใช้งาน

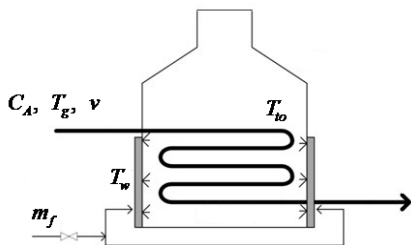
จากปัญหาที่กล่าวถึงมีความพยายามศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทขึ้นหลายรูปแบบ โดยตัวอย่างงานวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียม เช่น Niaei และคณะ (2004) ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงแบบอนุพันธ์สามัญของค่าความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารที่ขึ้นกับเวลา Masoumi และคณะ (2006) ใช้สมการคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงแบบอนุพันธ์ย่อยของอุณหภูมิของสารในกระบวนการการแตกตัวด้วยการใช้ความร้อน และงานวิจัยของ Cao และคณะ (2007) ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยเทคนิคการแบ่งชุดข้อมูลของตัวแปรสถานะและตัวแปรตำแหน่งเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารในท่อ

ปฏิกิริยาของพอลิเมอร์โรเซชันแต่อย่างไรก็ตามจากแบบจำลองที่ศึกษาข้างเป็นการทำแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบแบบอนุพันธ์เดียวเท่านั้น

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองแบบพลวัตของเตาปฏิกรณ์ โดยใช้ชุดข้อมูลจากแบบจำลองการคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่ประกอบด้วยท่อปฏิกรณ์และผนังเตาปฏิกรณ์เข้าด้วยกัน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบไล่ระดับแพร่ย้อนกลับในการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคการผสมโครงข่ายประสาทเทียมหลายโครงข่ายรวมเข้าด้วยกันที่มีการแบ่งชุดข้อมูลป้อนเข้าเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงระยะทางและเวลาที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาในการหาค่าตัวแปร ณ ตำแหน่งใดๆ ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเตาปฏิกรณ์ ให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายจากการถอดสมการของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อลดความยุ่งยากในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการอธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในเตาปฏิกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เตาปฏิกรณ์อย่างง่ายในการสร้างแบบจำลองเป็นกรณีศึกษาเบื้องต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของเตาปฏิกรณ์อย่างง่าย

โครงสร้างของเตาปฏิกรณ์ประกอบด้วยผนังเตาปฏิกรณ์และท่อปฏิกรณ์ที่มีก๊าซอยู่ระหว่างผนังเตากับท่อปฏิกรณ์ โดยการให้ความร้อนแก่ผนังเตาด้วยการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อปฏิกรณ์เป็นแบบการแผ่รังสี เมื่อท่อปฏิกรณ์ได้รับความร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับก๊าซผสมเป็นแบบการนำความร้อนและการพาความร้อนในการเปลี่ยนสารเอทิลีนไดคลอไรด์ไปเป็นไวนิลคลอไรด์ มอโนเมอร์กับไฮโดรคลอไรด์จากกระบวนการแตกตัวโดยใช้ความร้อนของ Lakshmanan และ Biegler (2007)

ตัวแปรขาในระบบเข้า คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซผสม ( $C_A$ ) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของก๊าซผสม ( $T_g$ ) ค่าความเร็วของก๊าซผสม ( $v$ ) และระยะทาง ( $z$ ) ค่าอุณหภูมิของผนังเตาปฏิกรณ์ ( $T_w$ ) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของท่อปฏิกรณ์ ( $T_{to}$ ) และค่าปริมาณเชื้อเพลิง ( $m_f$ ) ส่วนตัวแปรขาออกนั้น คือ ค่าความเข้มข้น ( $C_A$ ) และอุณหภูมิของก๊าซผสม ( $T_g$ ) ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการ

ความเข้มข้นของก๊าซผสม

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = -v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} - k_0 C_e \frac{-E}{RT_g} \quad (1)$$

อุณหภูมิของก๊าซผสม

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -v_z \frac{\partial T_g}{\partial z} + \frac{r(-\Delta H)}{(\rho c_p)_g} + \frac{1}{V_r(\rho c_p)_g} \left( \frac{2\pi L}{\ln(R_{to}/R_{ti}) + \frac{1}{R_{ti}h_g}} (T_{to} - T_g) \right) \quad (2)$$

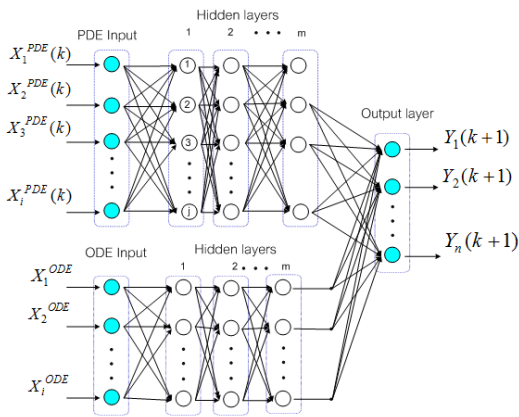
อุณหภูมิของผนังเตาปฏิกรณ์

$$\frac{dT_{wi}}{dt} = \frac{\dot{m}_{fuel} H_{comb} - \sigma F A_w (T_w^4 - T_{to}^4)}{(mc_p)_w} \quad (3)$$

อุณหภูมิเริ่มต้นของท่อปฏิกรณ์

$$\frac{dT_{to}}{dt} = \frac{\sigma F A_w (T_w^4 - T_{to}^4) - \left( \frac{2\pi L}{\ln(R_{to}/R_{ti}) + \frac{1}{R_{ti}h_g}} (T_{to} - T_g) \right)}{(mc_p)_t} \quad (4)$$

ในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้ ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบไล่ระดับแพร่ย้อนกลับ เนื่องจากเหมาะสมกับการสร้างแบบจำลองชนิดพลศาสตร์โดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลที่อาศัยค่าข้อมูลของความเร็ว ระยะทาง และปริมาณเชื้อเพลิงในช่วง 3-12 เมตรต่อวินาทีที่เพิ่มครั้งละ 3 เมตรต่อวินาที 0-300 เมตรและ 0.01-0.2 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการแบ่งการป้อนเข้าชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวแปรป้อนเข้าอนุพันธ์สามัญ ( $X^{ODE}$ ) และตัวแปรป้อนเข้าอนุพันธ์ย่อย ( $X^{PDE}$ )

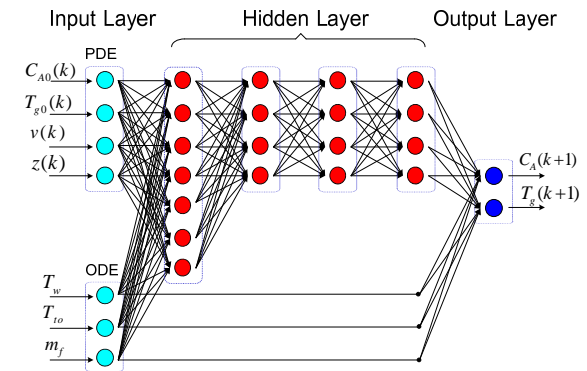


รูป 2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

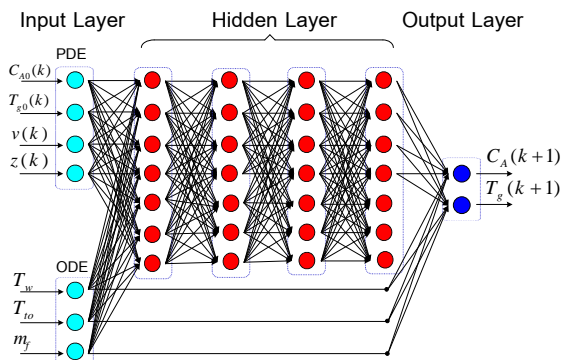
จากนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วย ชั้นขาเข้า ชั้นซ่อนและชั้นขาออกโดยกำหนดชั้นซ่อน (Hidden layers)เท่ากับ 4 ชั้นซ่อนโดยจำนวนนิวรอน (Neurons) ของชั้นซ่อนที่ 1 ถึง 4จะเขียนอธิบายได้ในรูปแบบของ a1-a2-a3-a4 เพื่อรับค่าตัวแปรทั้งหมดในระบบและหาความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้น ( $C_A$ ) อุณหภูมิ ( $T_g$ ) ความเร็ว ( $v$ ) และระยะทาง ( $z$ ) และเลือกใช้การส่งผ่านข้อมูลด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิก (Tansig) ที่ชั้นซ่อนและแบบเพียวรีน (Purelin) ที่ชั้นขาออกด้วยการวางจำนวนนิวรอนชั้นซ่อนที่แบ่งเป็น 2 แบบคือ

- 1.แบบ 7-4-4-4 ความสัมพันธ์ของอนุพันธ์ย่อยเท่านั้นที่เกิดจากตัวแปร คือ ความเข้มข้นของก๊าซผสม อุณหภูมิของก๊าซผสม ความเร็ว และระยะเวลา
- 2.แบบ 7-7-7-7 คิออนุพันธ์ย่อยที่มีความสัมพันธ์กับอนุพันธ์สามัญ จะคิดค่าของตัวแปร คือ อุณหภูมิของผนังเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิของผนังท่อปฏิกรณ์ และปริมาณเชื้อเพลิง

โดยการวางจำนวนนิวรอนของชั้นขาเข้าและขาออกเท่ากับจำนวนของตัวแปร ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 โครงสร้างแบบ 7-4-4-4



รูปที่ 4 โครงสร้างแบบ 7-7-7-7

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองจะต้องผ่านการเทรนแบบจำลองเพื่อให้เกิดการเรียนรู้ของแบบจำลองในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบ เพื่อให้แบบจำลองสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและอุณหภูมิของก๊าซผสม ด้วยค่าตัวแปรในการเทรนแบบจำลองดังนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม

ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าของตัวแปรที่ควบคุม
(Epochs)	5000
(Validation check)	5000
Time	ไม่จำกัด
การปรับค่าชดเชย	การปรับค่าแบบไล่ระดับ
Performance goal	1e-09

### 3. การทดสอบแบบจำลอง

#### 3.1 การสร้างชุดข้อมูลทดสอบ

จะทำการเปลี่ยนค่าข้อมูลป้อนเข้า คือ ค่าความเร็วและค่าปริมาณเชื้อเพลิงของสาร ด้วยค่าความเร็วที่อยู่ในช่วง 2-17 เมตรต่อวินาที ที่เพิ่มครั้งละ 3 เมตรต่อวินาที และค่าปริมาณเชื้อเพลิงในช่วง 0.005-1 กิโลกรัมต่อวินาที มาเป็นค่าของช่วงข้อมูลในการป้อนเข้าแบบจำลอง พลศาสตร์ของไหลเพื่อสร้างชุดข้อมูลในการป้อนเข้าแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียม โดยชุดข้อมูลชุดใหม่ไม่ได้นำมาใช้ในการเรียนรู้มาก่อน นำมาเป็นชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น

#### 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

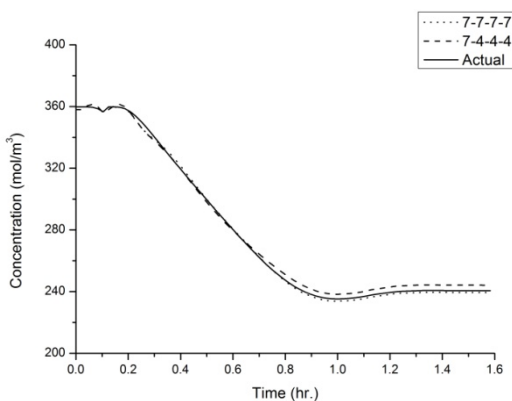
ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรความเร็ว ระยะทางและปริมาณเชื้อเพลิงด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

**เงื่อนไขที่ 1** ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองแบบ 7-4-4-4 และ 7-7-7-7 ด้วยค่าปริมาณมวลเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.01 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ความเร็วเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาทีและที่ระยะทาง 300 เมตร

**เงื่อนไขที่ 2** ผลการเทรนแบบจำลองเมื่อค่าปริมาณมวลเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.005 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ความเร็วเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาทีและที่ระยะทาง 156.25 เมตร ของโครงสร้าง 7-7-7-7

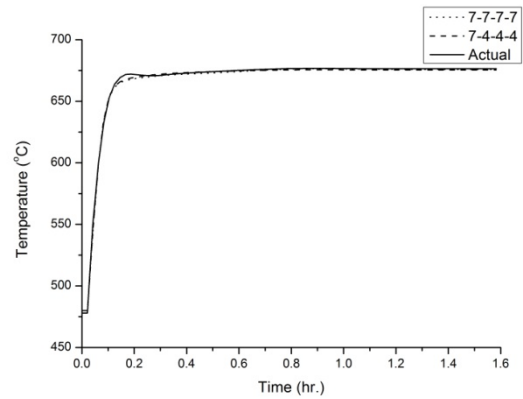
#### 3.2 ผลการทดสอบแบบจำลอง

##### เงื่อนไขที่ 1



รูปที่ 5(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

ความเข้มข้นของสารที่ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 360 โมลต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบไม่เป็นเส้นตรง ที่ช่วงกลางความเข้มข้นของก๊าซผสมมีการเปลี่ยนแปลงมาก



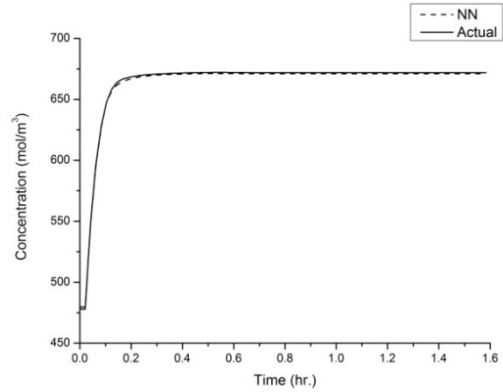
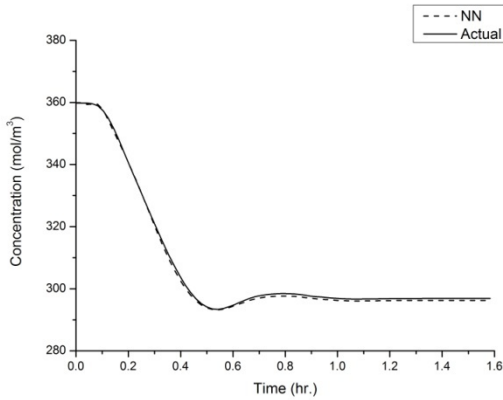
รูปที่ 5(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

ในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงสูง เนื่องจากได้รับการถ่ายเทความร้อนจากผนังท่อแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน

ตารางที่ 2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนแบบค่ารากกำลังสอง

รูปแบบ	ค่าความคลาดเคลื่อนค่ารากกำลังสอง (%)			
	ความเข้มข้น		อุณหภูมิ	
	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย
7-4-4-4	2.74	0.34	2.93	0.41
7-7-7-7	2.60	0.21	1.54	0.36

เงื่อนไขที่ 2



รูปที่ 6(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

รูปที่ 6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

ผลที่ได้จากชุดข้อมูลทดสอบในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและอุณหภูมิของก๊าซผสมดังรูป 6(ก) และ 6(ข) สามารถอธิบายได้การเปลี่ยนแปลงในระบบได้ดี

ตารางที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบค่าความเคลื่อนแบบค่ารากกำลังสองของแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยการเทียบกับค่าจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหล

ปริมาณเชื้อเพลิง (kg / s)	ความเร็ว (m / s)	6.25 เมตร		156.25 เมตร		300 เมตร	
		$C_A$	$T_g$	$C_A$	$T_g$	$C_A$	$T_g$
0.005	2	0.21	0.13	0.26	0.20	0.02	0.11
	8	0.42	0.22	0.34	0.16	0.13	0.15
	17	0.20	0.16	0.32	0.21	0.16	0.15
0.5	2	0.36	0.12	0.26	0.21	0.36	0.24
	8	0.33	0.09	0.29	0.12	0.10	0.20
	17	0.26	0.12	0.16	0.21	0.21	0.25
1.0	2	0.33	0.22	0.25	0.22	0.27	0.20
	8	0.32	0.25	0.36	0.24	0.34	0.20
	17	0.25	0.20	0.25	0.30	0.12	0.23

4. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยโครงข่ายประสาทเทียมมีความง่ายต่อการใช้งานและการสร้างไม่ซับซ้อนมากนักเพื่อใช้ในการอธิบายเตาปฏิกรณ์ดังกล่าว

$a\{n\}$  = ค่าขาออกของชั้นซ่อนใดๆ

$w$  = ค่าถ่วงน้ำหนัก

$a\{0\}$  = ค่าขาออกของชั้นขาเข้า

$b$  = ค่าปรับขดเซช

$Y$  = ค่าตัวแปรขาออก

$x$  = ตัวแปรขาเข้า

ชั้น	สมการ
ชั้นขาเข้า	$a\{0\}_i = 2 \left( \frac{x_i - x_{\min_i}}{x_{\max_i} - x_{\min_i}} \right) - 1 \quad i = 1, 2, 3 \dots q$
ชั้นซ่อน	$a\{n\} = f \left( \left( \sum w_{i,j} a\{n-1\} \right) + b_{j_n} \right)$ $i_n = 1, 2, 3 \dots k, \quad j_n = 1, 2, 3 \dots m$
ชั้นขาออก	$Y_i = \frac{a\{n\} + 1}{2} (x_{\max_i} - x_{\min_i}) + x_{\min_i} \quad i = 1, 2, 3 \dots q$

## 5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเคมีเรื่อง การสร้างแบบจำลองของเตาปฏิกรณ์ด้วยเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมเคมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การดำเนินงานของโครงการนี้สามารถดำเนินไปได้ด้วยดีทางคณะผู้จัดทำ จึงใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่างๆดังนี้

ผศ.ดร.ชรินทร์ ปัญญาพรผล อาจารย์ที่ปรึกษาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินงานโครงการทั้งทางข้อมูลและทางปฏิบัติด้วยดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ทุนในการทำโครงการในครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- Niaei, A., J. Towfighi, S. M. Sadrameli and R. Karimzadeh. 2004. The combined simulation of heat transfer and pyrolysis reactions in industrial cracking furnaces. **Appl. Therm. Eng.**24:2251–2265.
- Masoumi, M. E., S. M. Sadrameli, J. Towfighi and A. Niaei. 2006. Simulation optimization and control of a thermal cracking furnace. **Energy**.31:516–527.
- Cao, L., D. Li, C. Zhang and H. Wu. 2007. Control and modeling temperature distribution in a tubular polymerization process. **Comput. Chem. Eng.**31:1516-1524.
- Lakshmanan, A. and L. T. Biegler. 2007. A case study for reactor network synthesis: the vinyl chloride process. **Comput. Chem. Eng.**21:785-790.