

การหาเอกลักษณ์ของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยระบบฟัซซี่ลอจิก Fluidized Bed Incinerator Identification by Fuzzy Logic System

นคร เกื้อสกุล และ สินชัย ชินวรรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

Email: nakhon_g@yahoo.com, sch@kmitnb.ac.th

Nakhon Guesakul and Sinchai Chinvorarat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand

Email: nakhon_g@yahoo.com, sch@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาเอกลักษณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้แบบจำลองของระบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic System, FLS) ซึ่งสามารถปรับตัวได้โดยใช้เทคนิคการกระจายย้อนกลับ (Back-Propagation, BP) การฝึกโดย BP ทำให้สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ผลที่ได้จากการหาเอกลักษณ์เปรียบเทียบกับแบบจำลองจริง ได้แสดงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้

Abstract

The paper presents the identification of Fluidized Bed Incinerator using a Fuzzy Logic System Modeling (FLS). With the adaptation ability based on Back-Propagation Technique (BP), the training algorithm has given suitable parameters of the model and reflecting directly to the highly accurate and precise results. The Identified and true model have been compared to verify the correspondent results of this purposed mathematical model.

1 บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของขยะมูลฝอยกำลังเป็นปัญหาไปทั่วโลกสืบเนื่องมาจากการเติบโตของเศรษฐกิจและชุมชน การทำลายจึงเป็นทางออกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ อย่างไรก็ตามการทำลายหลายวิธีทำให้เกิดผลในทางลบต่อสิ่งแวดล้อมขณะที่วิธีที่ดีก็มีค่าใช้จ่ายที่สูง ทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมและถูกนำมาใช้ในปัจจุบันคือ เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ข้อเด่นของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือผลิตความร้อนปริมาณมากโดยใช้ห้องเผาไหม้ขนาดเล็ก อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่สูงและ

สามารถเติมสารดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบดได้ ทำให้การปลดปล่อยแก๊สมลพิษต่ำ และเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพแตกต่างกันมากได้

ระบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Systems, FLSs) ถูกนำมาใช้ในงานบทความนี้ ซึ่งทฤษฎีกลุ่มฟัซซี่ถูกแนะนำโดย Zadeh [1] ในปี ค.ศ.1965 และถูกวิวัฒนาการจนถึงปัจจุบัน แบบจำลองของฟัซซี่ลอจิกสามารถใช้อธิบายคุณสมบัติของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้กฎหรือความสัมพันธ์ของฟัซซี่ ซึ่ง Wang [2] ได้พิสูจน์ว่า FLSs สามารถเป็นตัวประมาณฟังก์ชันที่เป็นสากลได้ ด้วยความสามารถในการเป็นตัวประมาณฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงมีการวิจัยนำ FLSs มาใช้เพื่อแก้ปัญหาการหาเอกลักษณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น Wang [3] ได้นำเสนอการใช้ FLS ซึ่งสามารถฝึกได้โดยเทคนิคการกระจายย้อนกลับ (Back-Propagation, BP) ในการหาเอกลักษณ์ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแนวความคิดนี้แสดง FLS ในรูปของข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward Network) จึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้เทคนิค BP เข้ามาฝึกได้

จากการหาเอกลักษณ์แบบเชิงเส้นของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้แบบจำลองที่เรียกว่า Auto Regressive Moving Average with eXogenous input (ARMAX) ของ Suksankraisorn [4] พบว่าผลจากแบบจำลองยังมีความผิดพลาดอยู่มาก ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ บทความนี้จึงได้นำเสนอการหาเอกลักษณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้แบบจำลองของ FLS ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เทคนิค BP เข้ามาฝึกได้ การที่แบบจำลองของ FLS สามารถฝึกได้ ทำให้สามารถหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองซึ่งก็คือฟังก์ชันของสมาชิกที่เหมาะสมได้ ดังนั้นผลที่ได้จึงมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

2 แบบจำลองของระบบฟัซซี่

ในบทความนี้ระบบที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์กำหนดให้อยู่ในรูป

$$y(k) = f(u) \quad (1)$$

เมื่อ $y(k)$ คือเอาต์พุต และอินพุต $U = [u(k), y(k-1)]^T$ โดยในการหาเอกลักษณ์จะแทน (1) ด้วยแบบจำลองระบบฟัซซี่ซึ่งถูกแนะนำใน [2] แบบจำลองนี้ใช้ center average defuzzifier, product-inference, และ singleton fuzzifier โดยแสดงในรูปสมการ

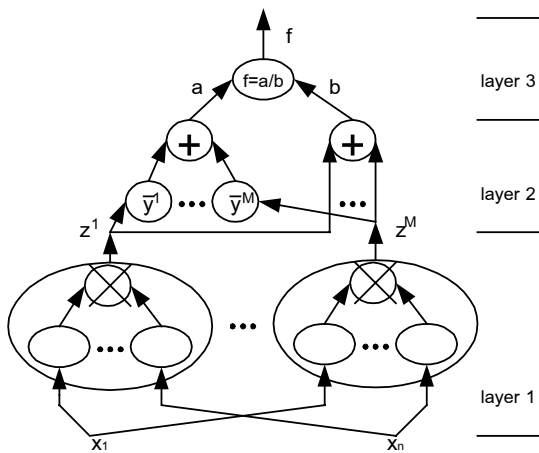
$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} \quad (2)$$

เมื่อ $f(x)$ คือระบบฟัซซี่ลอจิกซึ่งใช้แทน $f(\cdot)$ ใน (1) โดยที่ x คือ U , $\bar{y}^l$ คือค่าศูนย์กลางของฟังก์ชันสมาชิกที่ l ของเอาต์พุต, และ $\mu_{F_i^l}(x_i)$ คือฟังก์ชันสมาชิกที่ l ของอินพุตตัวที่ i โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตเป็นแบบเกาส์เซียนซึ่งอยู่ในรูป

$$\mu_{F_i^l}(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right]$$

โดย $\bar{x}_i^l$ และ σ_i^l คือค่ากลาง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันสมาชิกที่ l ของอินพุตตัวที่ i ตามลำดับ

แบบจำลองในสมการที่ (2) สามารถแสดงในรูปแบบของข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีสามชั้นได้ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบฟัซซี่ลอจิกที่แสดงในรูปข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้า

$$\text{โดย } z^l = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i), a = \sum_{l=1}^M (\bar{y}^l z^l), b = \sum_{l=1}^M z^l$$

ดังนั้นทำให้เทคนิคการกระจายย้อนกลับสามารถประยุกต์ใช้ในการฝึกระบบฟัซซี่ลอจิกได้ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้เทคนิคการกระจายย้อนกลับในการปรับคือ $\bar{y}^l$, $\bar{x}_i^l$ และ σ_i^l ซึ่งแสดงในหัวข้อถัดไป

3 การฝึกระบบฟัซซี่ลอจิกโดยใช้การกระจายย้อนกลับ

3.1 การฝึกโดยการกระจายย้อนกลับ

กำหนดให้ฟังก์ชันของความผิดพลาดคือ

$$e = \frac{1}{2} (f(x) - d)^2 \quad (3)$$

เมื่อ $f(x)$ และ d คือเอาต์พุตของแบบจำลองฟัซซี่และเอาต์พุตจากการวัดตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของการหาเอกลักษณ์ในบทความนี้คือการหาพารามิเตอร์ของฟัซซี่ลอจิกที่อยู่ในรูปของสมการ (2) ซึ่งทำให้สมการ (3) มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นปัญหาการหาเอกลักษณ์ก็คือการปรับพารามิเตอร์ $\bar{y}^l$, $\bar{x}_i^l$ และ σ_i^l ที่ทำให้สมการ (3) มีค่าน้อยที่สุด การฝึกพารามิเตอร์ $\bar{y}^l$, $\bar{x}_i^l$ และ σ_i^l ทำได้โดย

$$\bar{y}^l(k+1) = \bar{y}^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} \bigg|_k \quad (4)$$

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \bar{x}_i^l} \bigg|_k \quad (5)$$

$$\sigma_i^l(k+1) = \sigma_i^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \sigma_i^l} \bigg|_k \quad (6)$$

เมื่อ $l = 1, 2, \dots, M$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $i = 1, 2, \dots, n$ และ α คือพารามิเตอร์การเรียนรู้ และจากการใช้กฎลูกโซ่ทำให้สมการ (4), (5) และ (6) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\bar{y}^l(k+1) = \bar{y}^l(k) - \alpha \frac{f-d}{b} z^l \quad (7)$$

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) - \alpha \frac{f-d}{b} (\bar{y}^l - f) z^l \frac{2(x_i - \bar{x}_i^l(k))}{\sigma_i^{l2}(k)} \quad (8)$$

$$\sigma_i^l(k+1) = \sigma_i^l(k) - \alpha \frac{f-d}{b} (\bar{y}^l - f) z^l \frac{2(x_i - \bar{x}_i^l(k))^2}{\sigma_i^{l3}(k)} \quad (9)$$

3.2 การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสามารถทำกำหนดแบบออนไลน์ได้โดยเริ่มการฝึกโดยการกระจายย้อนกลับหลังจากเวลาผ่านไป M ลำดับ โดยในช่วงเวลาดังกล่าวกำหนดให้

$$\bar{x}_i'(1, 2, \dots, M) = U_i(I) \quad (10)$$

$$\bar{y}'(1, 2, \dots, M) = g(U(I)) \quad (11)$$

$$\sigma_i'(1, 2, \dots, M) = [\max(U_i(I)) - \min(U_i(I))] / 2M \quad (12)$$

เมื่อ $I = 1, 2, \dots, M$, $i = 1, 2, \dots, n$, $g(U(I))$ คือเอาต์พุตจากการวัด และ $U(I) = (U_i(I), \dots, U_n(I))^T = (u(k), y(k-1))^T$ คืออินพุตของระบบ

วิธีการดังกล่าวจะทำให้ฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบเดียวกันครอบคลุมขอบเขตของ $U_i(I)$ จาก $I = 1$ ถึง $I = M$ ส่วนการฝึกสามารถทำได้ตั้งแต่ลำดับเวลา $M + 1$ เป็นต้นไป

3.3 ขั้นตอนการคำนวณ

1. กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นตาม (10), (11), และ (12)
2. คำนวณ f เริ่มต้นที่ลำดับเวลา $M + 1$
3. ทำการปรับ $\bar{y}'$, u_i' และ σ_i' โดย (7), (8) และ (9) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของ α
4. คำนวณ f เริ่มต้นที่ลำดับเวลาถัดไปโดยใช้ $\bar{y}'$, u_i' และ σ_i' ใหม่
5. กลับไปทำขั้นตอนที่ 3

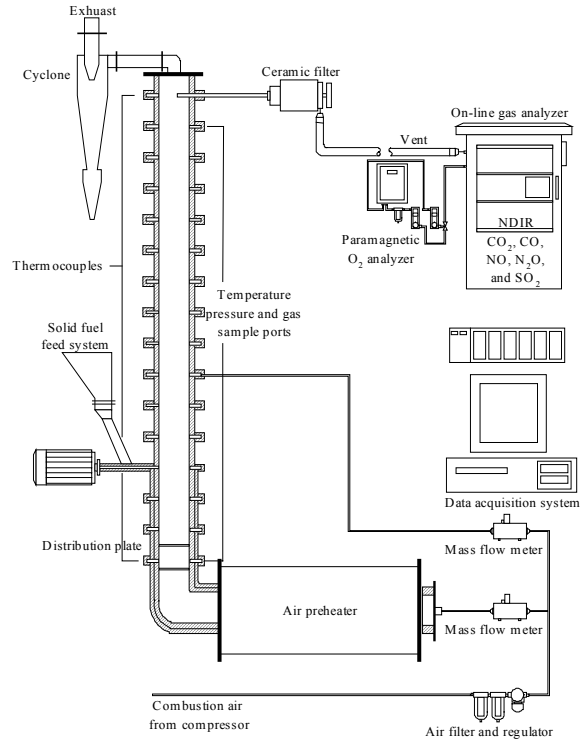
4. การหาเอกลักษณ์ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

4.1 การจัดการทดลอง

การทดลองนี้ทดลองกับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบบับบลิ้ง (Bubbling Fluidized Bed Incinerator) การทดลองถูกจัดตั้งรูปที่ 2 โดยตัวเตาทำจากท่อสแตนเลสที่ทนอุณหภูมิสูงและการกักความร้อนจากแก๊ส ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.1 เมตร และสูง 2.4 เมตร ใช้ทราย 2 กิโลกรัมในเบด ตลอดความสูงของเตาทั้งหมด 33 ช่อง สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิ้ล ดูดแก๊ส และจ่ายอากาศส่วนที่สอง (Secondary air)

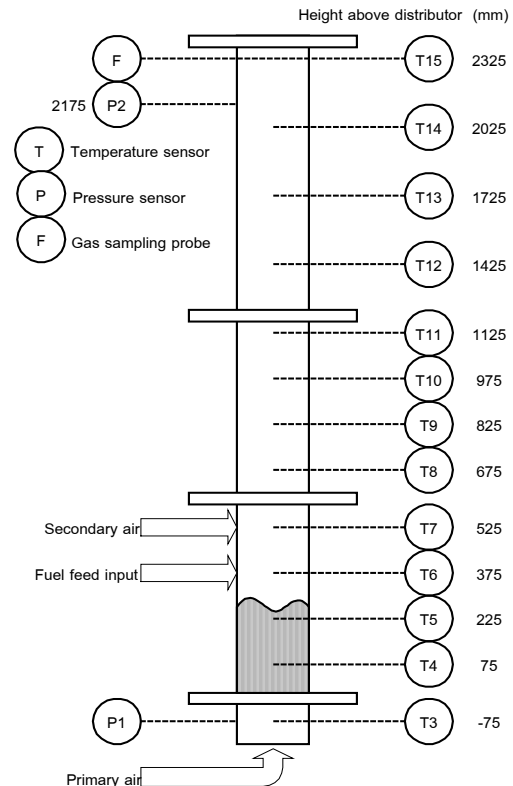
เชื้อเพลิงที่ใช้การทดลองเป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างขยะชุมชนกับถ่านหินซัลเฟอร์สูง โดยมีอัตราส่วนของขยะชุมชน 20% และถ่านหิน 80%

เทอร์โมคัปเปิ้ล type K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรถูกใช้ในการวัดอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมภายในเตาใช้ตัวแปลงความดันของ Auto Tran Incorporated รุ่น 600D1P12D4 โดยมีความแม่นยำ $\pm 1\%$ ส่วนแก๊สจะถูกดูดผ่านตัวกรองและคอนเดนเซอร์ก่อนเข้าไปยังเครื่องวิเคราะห์แก๊สแบบ Non Dispersive Infrared (NDIR) เพื่อวัดแก๊ส SO_2 , NO , N_2O , CO และ CO_2 สำหรับ O_2 ใช้เครื่องวิเคราะห์แบบพารามแมกเนติก



รูปที่ 2 แผนผังของฟลูอิดไดซ์เบดและระบบการวัด

สัญญาณของข้อมูลทั้งหมด ถูกส่งไปยังตัวเก็บข้อมูล Yokogawa รุ่น DA100 และ DS600 ความถี่สูงสุดของการรับข้อมูลคือ 0.5 Hz ตำแหน่งต่างๆของการวัดและอินพุตแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งต่างๆบนเตาฟลูอิดไดซ์เบด

ในการหาเอกลักษณ์ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดในบทความนี้สนใจการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทเมื่อเกิดการเปลี่ยนของอินพุทที่ถูกควบคุมสองอินพุทคือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%EA) และอัตราส่วนของอากาศส่วนที่สองต่ออากาศทั้งหมด (SA ratio) โดย (%EA) จะ normalized ให้อยู่ในช่วง [0,1] และกำหนดให้อินพุทอื่นๆคือ ความชื้น อัตราการป้อนเชื้อเพลิง และ ขนาดของถ่านหิน มีค่าคงที่เท่ากับ 60% 760 กรัมต่อชั่วโมง และ 1-5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4.2 ผลการทดลอง

อินพุทที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์แสดงดังรูปที่ 4 และอินพุทที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5 รูปที่ 6-12 แสดงเอาท์พุทของระบบและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ CO_2 , O_2 และความเข้มข้นของ CO, NO, N_2O , S_2O และ อุณหภูมิที่เบด (T4) ตามลำดับ

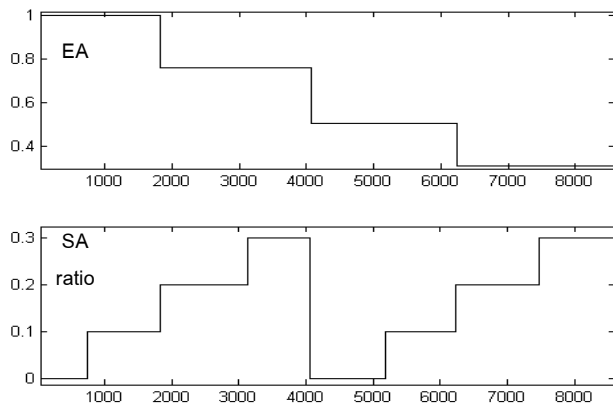
5 สรุป

การหาเอกลักษณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเตาเผาขยะแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ FLS ถูกนำเสนอในบทความนี้ แบบจำลองของ FLS นี้สามารถฝึกได้โดย BP ซึ่งทำให้หาค่าฟังก์ชันสมาชิกที่เหมาะสมได้

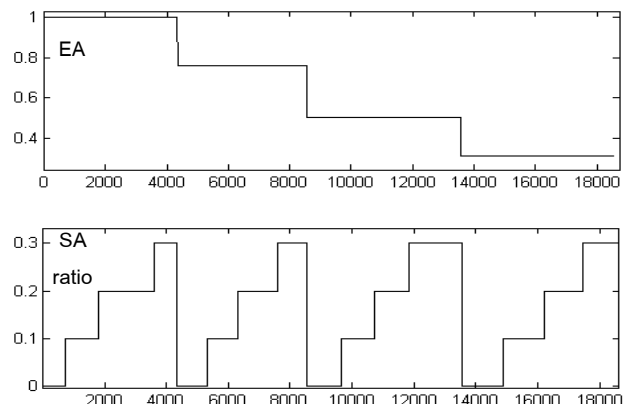
โดยพบว่าผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่มีเอาท์พุทบางตัวคือ CO, NO และ N_2O ยังเกิดความผิดพลาดอยู่มาก ซึ่งอาจเกิดจากการปรับตัวของแบบจำลองเข้าสู่ค่าที่ไม่ถูกต้อง อันเป็นผลมาจากการกำหนดค่า α ที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นการที่สามารถทำให้ค่า α สามารถปรับตัวได้เองระหว่างการหาเอกลักษณ์จึงเป็นแนวทางที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

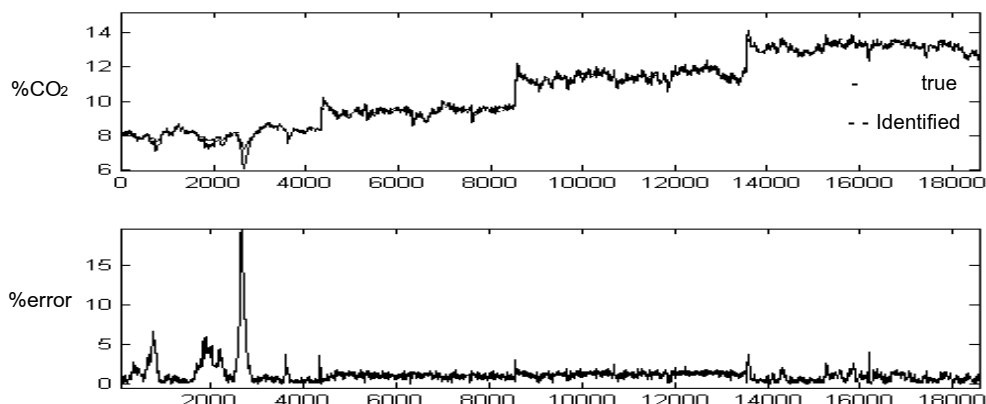
- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- [2] L. X. Wang, "Fuzzy systems are universal approximation," *Proc. IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp. 1163-1170.
- [3] L. X. Wang, and J. M. Mendel, "Back-propagation fuzzy systems as nonlinear dynamic system identifiers," *Proc. IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp.1409-1418.
- [4] K. Suksankraisorn, "Co-combustion of municipal solid waste and Thai lignite in a fluidized bed," Ph.D. Thesis, KMITNB, 2002.



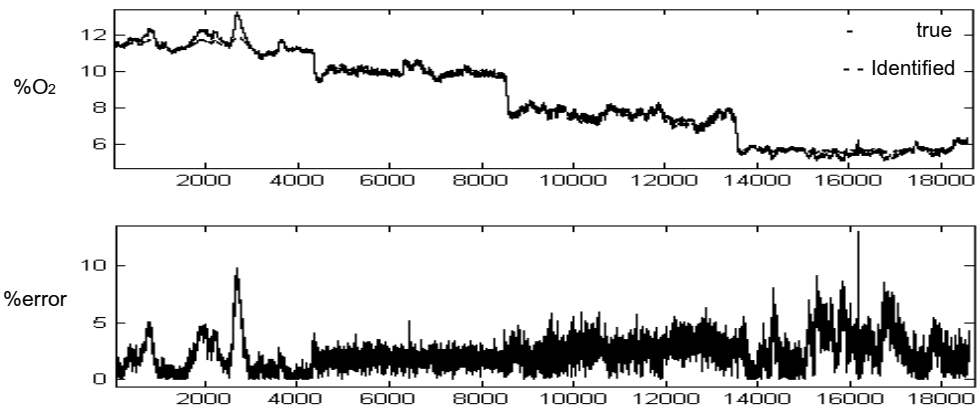
รูปที่ 4 อินพุทสำหรับการหาเอกลักษณ์



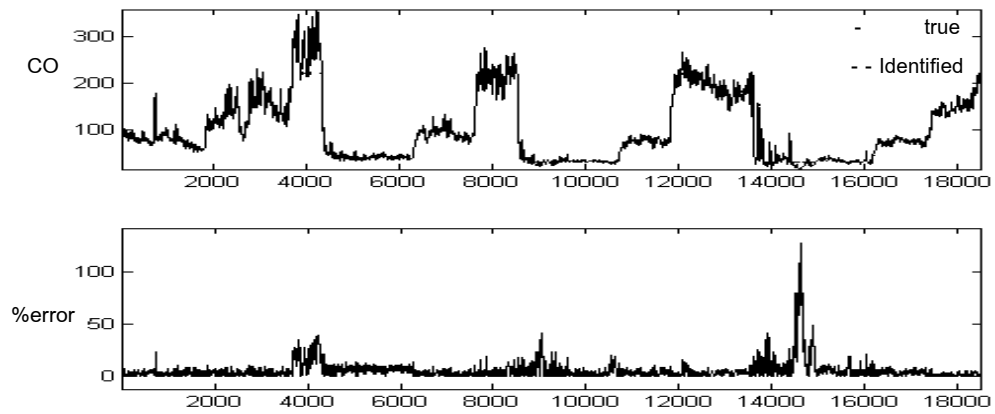
รูปที่ 5 อินพุทสำหรับทดสอบแบบจำลอง



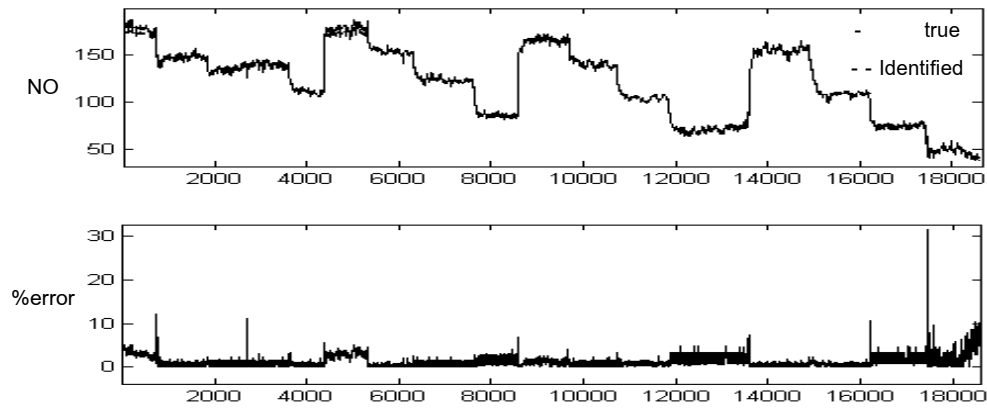
รูปที่ 6 %CO₂ และ %ความผิดพลาด



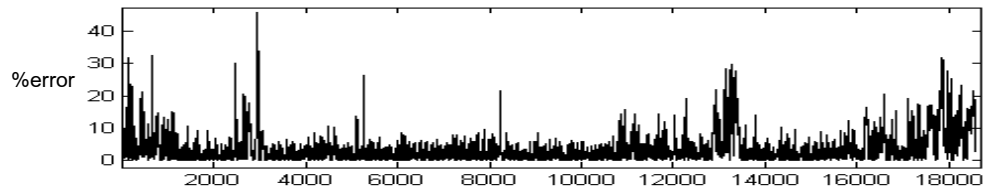
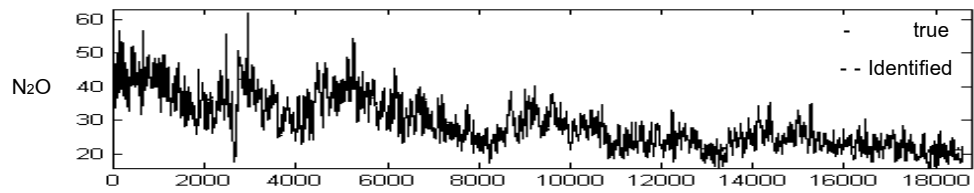
รูปที่ 7 %O₂ และ%ความผิดพลาด



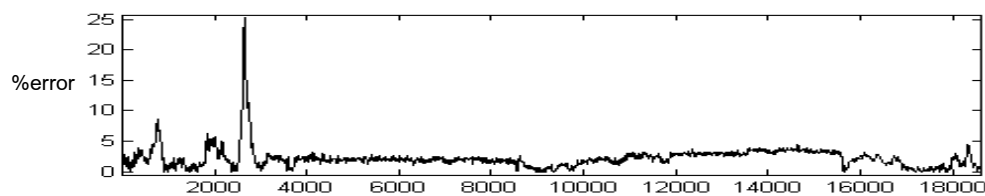
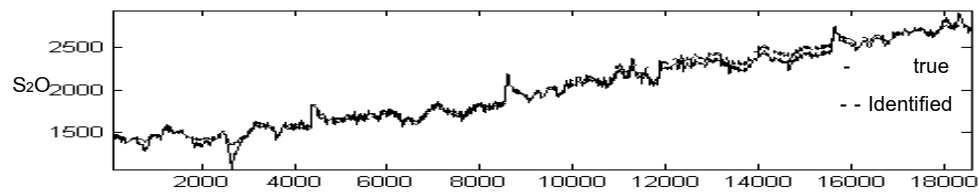
รูปที่ 8 CO และ%ความผิดพลาด



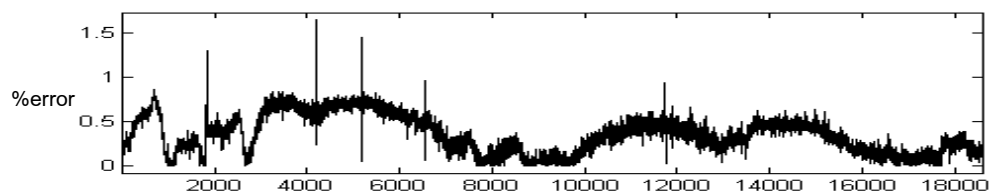
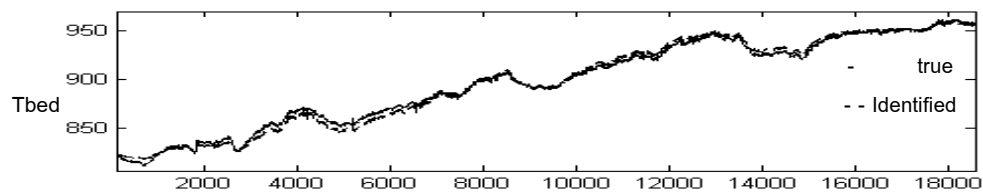
รูปที่ 9 NO และ%ความผิดพลาด



รูปที่ 10 N₂O และ%ความผิดพลาด



รูปที่ 11 S₂O และ%ความผิดพลาด



รูปที่ 12 Tbed และ%ความผิดพลาด