

การศึกษาเชิงทดลองของความสัมพันธ์ของระดับความสูงเบตต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไซโคลน  
An Experimental Study on the Influence of Bed Height on the Combustion of Biomass Fuel in  
Cyclone Combustor

วิศิษฐ์ ลีลาผาทิกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

38 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160

โทร. 0-2457-0068, โทรสาร 0-2457-3982, E-mail: wisitle17@yahoo.com, wisit.l@l@siam.edu

Wisit Lelaphatikul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University

38 Petkasam Road, Phasicharoen, Bangkok 10160

Tel. 0-2457-0068, Fax 0-2457-3982, E-mail: wisitle17@yahoo.com, wisit.l@l@siam.edu

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองการเผาไหม้ในเตาเผาไซโคลน โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.4 m มีความสูงรวมเท่ากับ 2.8 m ในการทดลองกำหนดความสูงของเบตในเตาเผาทั้งหมด 4 ระดับ คือ 30, 45, 50 และ 60 cm ซึ่งจะมีการติดตั้งท่อฉีดอากาศไว้ในแนวสัมผัสผนังห้องเผาไหม้ เพื่อให้ทำให้อากาศภายในเกิดการไหลแบบหมุนวน โดยแต่ละการทดลองกำหนดอัตราการป้อนปริมาณแกลบ และอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ คงที่ เท่ากับ 0.04 kg/s และ 1.8 m<sup>3</sup>/s ตามลำดับ จากผลการทดลอง ที่ระดับความสูงเบต เท่ากับ 50 cm ก๊าซไอเสียที่วัดจากทางออกท่อไอเสียประกอบด้วย O<sub>2</sub>=18.4%, CO=1,562 ppm, SO<sub>x</sub>=7 ppm และ NO<sub>x</sub>= 46 ppm ซึ่งสามารถวัดประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดได้ 68%

**คำสำคัญ:** เตาเผาไซโคลน, เบต, การไหลอากาศแบบหมุนวน

## Abstract

This paper presents an experimental study of the combustion in a cyclone combustor. The combustion chamber is in cylindrical shape, 1.4 m in diameter and 2.8 m in height. The bed height in the chamber is designed to be adjustable as desired at four levels: 30, 45, 50 and 60 cm. A set of air nozzles was placed circumferentially on the chamber to produce air-swirl flow inside. For each experiment, the rice husk feeding rate and air flow rate were constantly controlled at 0.04 kg/s and 1.8 m<sup>3</sup>/s respectively. The experimental results show that the exhaust gas emitted from stack was composed of O<sub>2</sub>=18.4%, CO=1,562 ppm, SO<sub>x</sub>=7

ppm and  $\text{NO}_x = 46$  ppm at 50 cm bed-height, which achieved the maximum thermal efficiency at 68%.

**Keywords:** cyclone combustor, bed, air-swirl flow

## 1. บทนำ

ในภาวะปัจจุบันราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น เนื่องจากวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจและคาดว่าราคาน้ำมันก็จะสูงขึ้นอีก เพราะจำนวนของน้ำมันที่กำลังมีแนวโน้มลดน้อยลง ทำให้ต้นทุนในการเดินเครื่องจักรเพื่อการผลิตเพิ่มสูงขึ้น จึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนทางอุตสาหกรรม, เกษตรกรรม และ การดำรงชีวิต เพราะในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจจะเจริญเติบโตก้าวหน้าได้นั้น ประการสำคัญคือ การใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาด้านการเกษตรกรรม ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ทั่วทุกภาคของประเทศไทยเป็นพื้นที่เกษตรกรรม จึงมีสิ่งที่เหลือใช้ทางเกษตรกรรมมากมาย ที่พบมาก ได้แก่ แกลบ ฟาง ชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปสิ่งที่เหลือใช้นั้นมาเป็นพลังงานทดแทน เพื่อลดการนำเข้าพลังงานจากต่างชาติ ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม และ ถ่านหิน เป็นต้น ในที่นี้ได้ให้ความสนใจกับแกลบข้าวซึ่งเมื่อนำข้าวเปลือก 100 kg ไปสีแล้วจะได้แกลบประมาณ 26.12 kg (คิดเป็นประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะได้ค่าความร้อน (Overall gross calorific value of rice husk) ประมาณ 2,900–4,560

kcal/kg. เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตา จะได้ค่าความร้อนเพียงครึ่งหนึ่ง แต่ราคาต่ำกว่ามาก เมื่อนำแกลบมาเป็นพลังงานทดแทน จะทำให้ประหยัด ลดการนำเข้า และเป็นวัตถุดิบที่ใช้ได้อย่างเหลือเฟือ แต่ถ้าใช้วิธีการเผาไหม้แกลบในเตาเปิดปกติจะทำให้ได้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้ และทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากขี้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ ฉะนั้นวิธีเผาไหม้เพื่อให้มีประสิทธิภาพของการเผาไหม้ดีที่สุดและสภาพแก๊สที่ออกจากปล่องไฟเป็นมลพิษน้อยที่สุด โดยใช้เทคนิคการหมุนวนของอากาศความเร็วสูงแบบปั่นป่วน

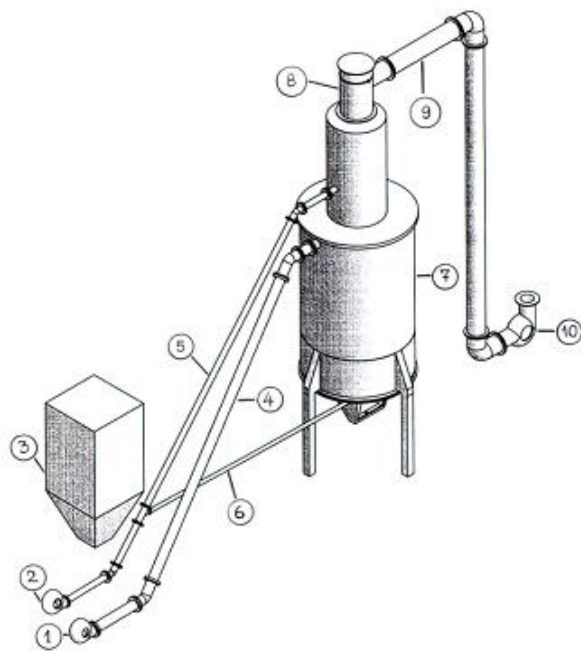
ปัจจุบันได้มีการวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งทำการวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาประเภทต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น งานวิจัยของ พงษ์เจต พรหมวงศ์[1] ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในช่องว่างภายในห้องเผาไหม้แบบวอร์เทค (Vortex Combustor:VC), งานวิจัยของ ประจักษ์ จิตริทิพย์ ทำการศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้เชื้อเพลิง [4], งานวิจัยของ สุพจน์ นานาโชค ทำการศึกษารูปแบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง[5] งานวิจัยของ Sen Nieh และ Tim T. Fu [2] ได้ทำการทดลองโดยการทดสอบการไหลในเตาแบบจำลอง Hot test model ของเตาแบบวอร์เทคโดยใช้ถ่านหินผงและงานวิจัยต่อเนื่องถึงการทดสอบเตาแบบวอร์เทคโดยใช้เชื้อเพลิง Dry Ultra Fine Coal และ Coal Water Fuel

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสูงของเบดในเตาเผาไซโคลน ซึ่งระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [3] ของเตาเผาแบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในการเผา

ไหม้สูง และสามารถควบคุมมลพิษที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ จึงมีการวิจัยและพัฒนา เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคต

## 2. อุปกรณ์การทดลอง

การติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง เริ่มต้นจากการประกอบตัวถังไซโคลนแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน(7) โดยอากาศที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอากาศ 3 ส่วน คือ อากาศส่วนปฐมภูมิ (Primary Air) เป็นอากาศที่เข้าทาง inlet air (4), อากาศส่วนทุติยภูมิ (Secondary Air) เป็นอากาศที่ฉีดเข้าทางท่อลม (Secondary Air Nozzle) [5] และ อากาศส่วนตติยภูมิ (Thirdary Air Nozzle) [6] โดยอากาศทั้ง 3 ส่วน จะได้จากแหล่งต้นกำเนิด คือ Blower จำนวน 2 ชุด (1,2) และมี Butterfly Valve ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่ท่อทิ้งไอเสีย(9) โดยมี Blower(10) ทำหน้าที่ดูดก๊าซไอเสียออกจากท่อทิ้งไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 1



1. Primary Blower
2. Secondary Blower
3. Hopper
4. Primary Inlet air
5. Secondary Inlet air
6. Thirdary Inlet air
7. Cyclone Combustor
8. Butterfly Valve
9. Stack
10. Thirdary Blower

รูปที่ 1 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองไซโคลน

## 3. วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งเตาเผาไหม้แบบไซโคลน (ดังรูปที่ 1)
2. ทำการอุ่นเตาเผา ด้วย LPG จนอุณหภูมิประมาณ  $450-600^{\circ}\text{C}$
3. ป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่ผสมกับอากาศ โดยปรับอากาศที่ Blower 1 เพื่อให้เกิดการเผาไหม้เริ่มต้นก่อน จนอุณหภูมิเริ่มคงที่ประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  และหยุดการให้ LPG
4. ปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ  $0.04\text{ kg/s}$  และปรับอากาศที่ Blower 2 ให้จ่ายอากาศมายังอากาศส่วนที่ 2 และอากาศส่วนที่ 3 เท่ากับ 80% และ 20% ของอากาศทั้งหมด ตามลำดับ
5. เมื่อความสูงของเบดภายในมีระดับความสูงที่ 30 cm ทำการวัดก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผา

ไหม้ ทุก 10 นาที จนถึง 120 นาที บันทึกผลการทดลอง

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 5 เพิ่มระดับความสูงเบตจากเดิม 30 cm เป็น 45, 50 และ 60 cm ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 1. ข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ [6]

Composition of rice husk	Percent (%)
Carbon	38.0
Hydrogen	5.70
Oxygen	41.6
Nitrogen	0.69
Sulfur	0.06
Volatile matter	55.6
Fixed carbon	20.1
Moisture	10.3
Ash	14.0

ในการศึกษาสมรรถนะของไซโคลน ได้ทำการทดลองหาจากประสิทธิภาพทางความร้อนของไซโคลนซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้ [6]

$$\text{Thermal Efficiency } (\eta_c) = \frac{H_s}{H_A} \quad (1)$$

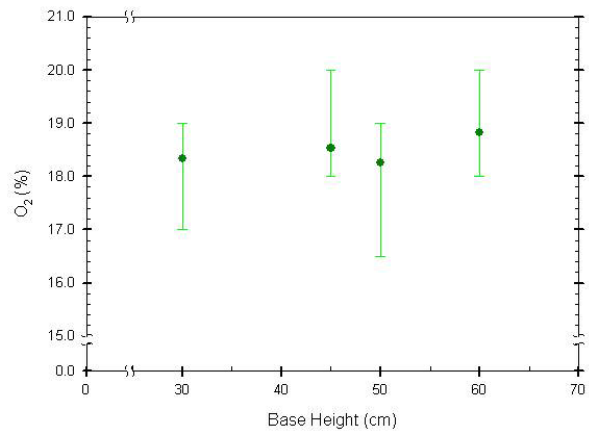
โดย  $H_s$  = ความร้อนของอากาศที่นำไปใช้ประโยชน์ (Heat Supplied)

$H_A$  = ความร้อนของอากาศที่ได้จากเชื้อเพลิง (Heat Available)

#### 4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ได้ทำการศึกษาความสูงของเบตที่มีผลต่อการเกิดก๊าซจากการเผาไหม้ ได้แก่

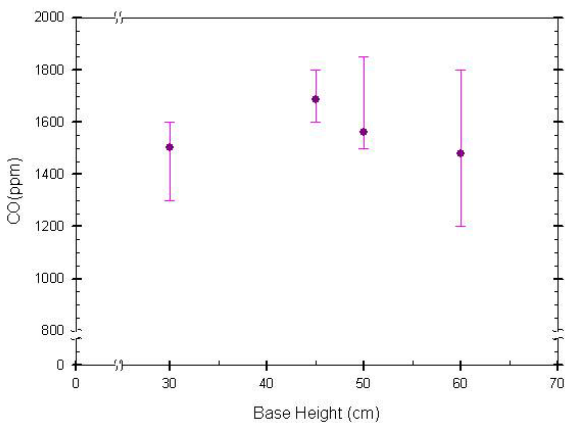
$O_2$ , CO,  $SO_x$  และ  $NO_x$  ดังนี้



รูปที่ 2 ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่วัดได้ ณ. ความสูงเบตต่าง ๆ

จากรูปที่ 2 พบว่าจากผลทดลอง ที่ระดับความสูงเบต 30-50 cm จะมีจำนวนของ  $O_2$  ที่วัดได้เฉลี่ยอยู่ในช่วง 18.2-18.8% ซึ่งปริมาณของ  $O_2$  ที่วัดได้นั้น เกิดจากการให้อากาศส่วนเกินในขณะที่เกิดการเผาไหม้แก่เตาเผาไซโคลน จึงทำให้มี  $O_2$  เหลือหลังจากการเผาไหม้ และที่ระดับความสูงเบต 30-50 cm นี้ เบตจะมีปริมาณการทับถมของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์บางส่วนเหลืออยู่ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอากาศส่วนเกินที่ฉีดเข้าไปใหม่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่าง เชื้อเพลิงกับอากาศได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนผลการทดลองที่ระดับความสูงเบต 60 cm นั้นเกิดการทับถมของเชื้อเพลิงที่เบตมากเกินไป ทำให้อากาศส่วนเกินที่ฉีดเข้าไปใหม่ ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงไม่ต่อเนื่องมากนัก เพราะตามหลักทฤษฎีของการเผาไหม้ จะเริ่มที่ผิวชั้นนอกของอนุภาคก่อนแล้วจึงลามเข้าไปที่แกนกลาง โดยเชื้อเพลิงที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่(เปรียบได้กับเบตที่มีระดับสูงเกินไป) จะทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้อย่างช้า ๆ

เฉพาะที่บริเวณผิวหน้าของเบตเท่านั้น ซึ่งปริมาณ  $O_2$  ในอากาศส่วนเกินที่ฉีดเข้าไปในเตาเผา จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ทันทีกับเชื้อเพลิง จึงเหลือปริมาณ  $O_2$  มากกว่าที่ระดับความสูงอื่น ดังนั้นการวัด  $O_2$  ที่ระดับความสูงเบตที่ 60 cm นี้จึงสามารถวัดปริมาณ  $O_2$  ได้มากกว่าระดับความสูงเบตที่ตำแหน่ง 30-50 cm



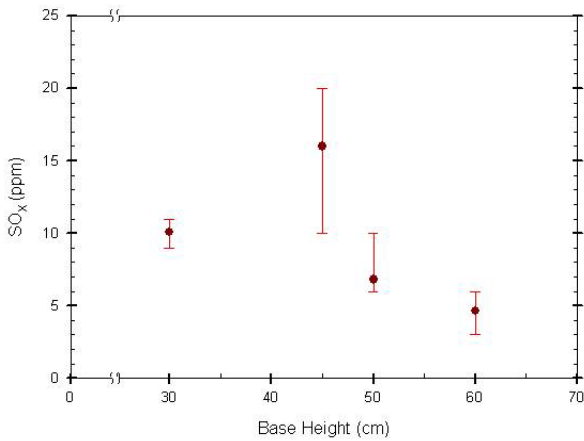
รูปที่ 3 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่วัดได้ ณ. ความสูงเบตต่าง ๆ

จากรูปที่ 3 พบว่าที่ระดับความสูงของเบตในช่วง 30-60 cm ค่า CO ที่วัดได้เฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์สูงอยู่ในช่วง 1,500-1,700 ppm เนื่องจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ เกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึง โดยขั้นตอนการเผาไหม้เริ่มเมื่อเชื้อเพลิงกลบถูกป้อนเข้าเตาเผาด้านบน ในลักษณะสัมผัสเส้นรอบวง ซึ่งในขณะที่เกิดการเผาไหม้นั้น เชื้อเพลิงกลบจะตกลงมาบนฐานของห้องเผาไหม้ตามแรงโน้มถ่วงของโลกและเกิดการทับถมของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จนเกิดเป็นชั้นความหนาของเบต ซึ่งบริเวณผิวหน้าของเบตที่มีอากาศสัมผัสเท่านั้นที่มีการเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ยังคงไม่ถูกเผาไหม้

โดยจากการทดลองค่า CO ที่วัดได้อยู่ในปริมาณที่สูง เนื่องมาจากอีกเหตุผลที่ว่า การเผาไหม้ที่สมบูรณ์นั้นต้องเกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างเหมาะสม แต่ในกรณีของการทดลองนี้เชื้อเพลิงกลบไม่ได้เกิดการคลุกเคล้ากับอากาศอย่างทั่วถึง เหมือนกับกรณีการไหลปั่นป่วนของเตาเผาแบบวอร์เทคและเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ที่เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศทั่วทั้งห้องเผาไหม้ ซึ่งค่า CO ที่วัดได้ของเตาเผาทั้งสองอยู่ในช่วงระหว่าง 250-400 ppm เท่านั้น

จากรูปที่ 4 ปริมาณ  $SO_x$  ที่วัดได้เฉลี่ยมีปริมาณค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 5-16 ppm เนื่องมาจากว่าก๊าซ  $SO_x$  มี Sulfur เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมักจะพบได้ในเชื้อเพลิง ประเภท น้ำมันดิบ ถ่านหิน และอยู่ในสารประกอบของโลหะต่าง ๆ ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และ เหล็ก เป็นต้น แต่ในการทดลองนี้ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งมีองค์ประกอบของ Sulfur ในปริมาณต่ำ จึงทำให้ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศนั้น เกิดปริมาณของ  $SO_x$  ไม่สูงมากนัก โดยที่ระดับความสูงเบตที่ 45 cm สามารถวัดปริมาณ  $SO_x$  ได้ประมาณ 16 ppm ซึ่งแสดงได้ว่าที่ระดับดังกล่าว การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกลบและอากาศเกิดมากที่สุด จึงทำให้เกิดการรวมตัวของ Sulfur ในเชื้อเพลิงกลบกับอากาศเกิดเป็น  $SO_x$  สูงที่สุด แต่แตกต่างกับที่ระดับความสูงเบต 60 cm เพราะที่ระดับความสูงนี้ต้องมีปริมาณของเชื้อเพลิงมากที่สุด ซึ่งตามหลักความเป็นจริงแล้ว ถ้ามี Sulfur ในปริมาณมากเมื่อเกิดปฏิกิริยารวมกับอากาศส่วนเกินภายในห้องเผาไหม้ ก็ควรต้องมี  $SO_x$  มากเช่นกัน แต่ในจากการ

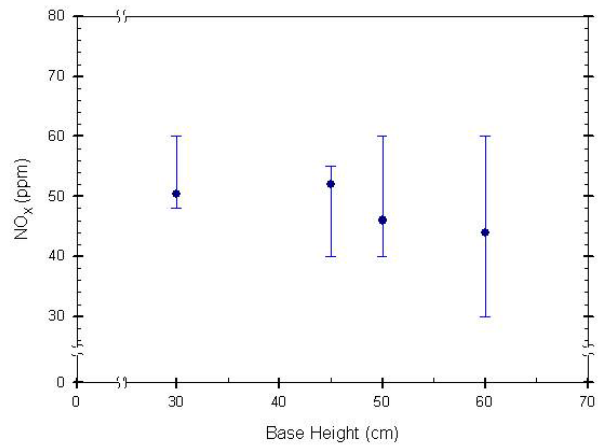
ทดลองนี้ ที่ระดับความสูง 60 cm เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่ำ ฉะนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการรวมตัวของ Sulfur กับอากาศในปริมาณที่น้อย ซึ่งวัดปริมาณ  $SO_x$  ได้ประมาณ 5 ppm



รูปที่ 4 ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์( $SO_x$ ) ที่วัดได้ ณ. ความสูงเบตต่าง ๆ

จากรูปที่ 5 การทดลองการเผาไหม้ที่ความสูงเบต 30, 45, 50 และ 60 cm สามารถวัดค่า  $NO_x$  เฉลี่ยอยู่ในช่วง 44-52 ppm ซึ่งจัดว่าอยู่ในปริมาณไม่มากนัก เนื่องจาก  $NO_x$  จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยปัจจัยของอุณหภูมิที่สูง ในขณะที่เกิดการเผาไหม้ โดยจากผลการทดลอง รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 จะมีแนวโน้มของก๊าซไอเสียที่วัดได้คล้ายคลึงกัน โดยที่ระดับความสูงเบต 45 cm สามารถวัดปริมาณ  $NO_x$  เฉลี่ยได้สูงที่สุด เท่ากับ 52 ppm ซึ่งค่า  $NO_x$  นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยขององค์ประกอบต่าง ๆ ของก๊าซไอเสีย เช่น ไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจน และ สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfur) โดยจากรูปที่ 4 สามารถวัดค่า  $SO_x$  ได้สูงที่สุดที่ตำแหน่งความสูงเบต เท่ากับ 45 cm ฉะนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระดับความสูงเบตที่ 45 cm จึงสามารถ

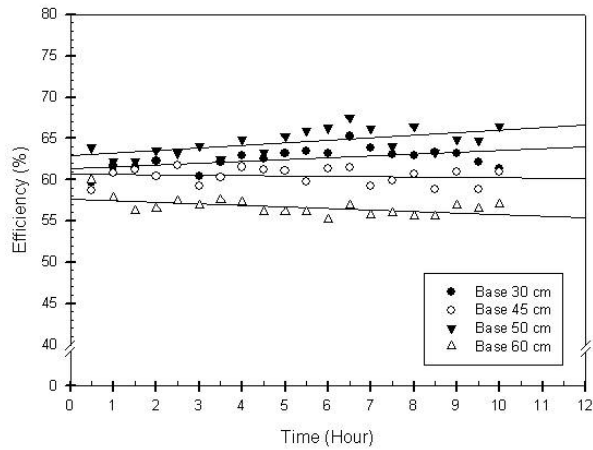
วัดค่า  $NO_x$  ได้สูงที่สุดเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5 ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน( $NO_x$ ) ที่วัดได้ ณ. ระดับความสูงเบตต่าง ๆ

## 5. สรุปผลการทดลอง

1. การทดลองการเพิ่มระดับความสูงเบตของเตาเผาไฮโดรคาร์บอน พบว่า มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่วัดได้ โดยระดับความสูงเบตที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้และให้ปริมาณก๊าซไอเสียที่ยอมรับได้ คือ ที่ระดับ 50 cm หรือ ประมาณ 0.2 เท่าของความสูงเตาเผา
2. การเผาไหม้ ที่ทำให้เกิดก๊าซไอเสียในปริมาณต่ำนั้น (โดยเฉพาะองค์ประกอบของ CO และ  $O_2$ ) เชื้อเพลิงควรจะมีการคลุกเคล้ากับอากาศอย่างเหมาะสม ตลอดช่วงเวลากการเผาไหม้ ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงไม่เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวแล้ว ค่า CO ที่วัดได้จะมีปริมาณที่สูงมาก
3. ประสิทธิภาพทางความร้อนที่วัดได้สูงสุดประมาณ 68% ที่ระดับความสูงเบตที่ 50 cm ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพทางความร้อน ณ. ระดับความสูงเบดต่าง ๆ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสยาม ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] David G. Sloan, Philip J. Smith and L. Douglas Smooth “ Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems” Energy Combustion Sci, 1986, Vol. 12, pp. 163-250.
- [2] Pongjet promvong, “A Low Emission Annular vortex Combustor Firing Rice Husk Fuel: Part II – Experiment Investigation” The First Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment, 1<sup>st</sup>-2<sup>nd</sup> December 2000 The Empress Hotel, Chang Mai, Thailand.
- [3] Marcio L. de Souza-Santos, “Solid Fuels Combustion and Gasification, 2004.

[4] ประจักษ์ จิตวีรทิพย์” การศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะของการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2535

[5] สุพจน์ น่านาโชค” การเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2536

[6] วิศิษฐ์ สีสลาผาดิกุล “ปัจจัยตำแหน่งของอากาศหุติยภูมิต่อสมรรถนะการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด” การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 8 จังหวัดเชียงราย 12-13 มีนาคม 2552.