



ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเซรามิก Effects of combined RDF and biomass on performance and emissions of a ceramic kiln

นันทกร ภาณุภูมิ^{1,2*}, พรธชา ลิปลับ^{1,2}, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย², วีรชัย อาจหาญ^{1,2}

Nontakorn Phakphoom^{1,2*}, Pansa Liplap^{1,2}, Thipsuphin Hinsui², Weerachai Arjharn^{1,2}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

²ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

²Center of Excellence in Biomass, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel: +66 93-528-3425, Fax: +66-44-224-610 E-mail: Nonthakorntopp@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel; RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้า รวมถึงการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ทั้งเครื่องปั้นดินเผาและจาน-ชาม เชื้อเพลิง 3 ประเภท ได้แก่ ไม้ลั่น ไม้ : RDF-3 และ ไม้ : RDF-5 ที่อัตราส่วน 80 : 20 wt. % w.b. ถูกใช้ในการวิจัย โดยใช้เตาเผาภาชนะเซรามิกแบบทางเดินลมร้อนลง ในตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา พบว่าการใช้ RDF ทั้ง 2 ประเภท มีสมรรถนะการผลิตความร้อนได้ดีเทียบเท่าไม้ แต่การใช้ RDF-3 อุณหภูมิจะแกว่งกว่าเชื้อเพลิงอื่น ส่วนการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์และเถ้า เมื่อเทียบกับมาตรฐานและงานวิจัยอื่น พบว่ามีค่าใกล้เคียงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว แต่ทั้ง 3 เชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ พบว่าการใช้ ไม้ : RDF-3 มีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าการใช้ไม้ลั่นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นค่า NO_x และ HF ที่มีค่าลดลง แต่ทั้งไม้ลั่นและ ไม้ : RDF-3 มีค่าฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐาน 400 และ 539 mg m^{-3} ตามลำดับ ส่วนค่าอื่นมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว โดยสรุป RDF-3 และ RDF-5 มีสมรรถนะในการผลิตความร้อนได้ดีเทียบเท่าไม้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ ยกเว้นค่าฝุ่นละอองที่มีค่าเกินมาตรฐาน

คำสำคัญ: ชีวมวล, เตาเผาเซรามิก, เชื้อเพลิงขยะ, มลพิษอากาศ, การเผาไหม้โดยตรง, เครื่องปั้นดินเผา

Abstract

The objective of this research was to study effects of combined RDF and biomass on heat production performance, air emissions, and contaminations in ash, including product contamination in both earthenware and plate - bowls. 3 types of fuel were used including Wood, Wood: RDF-3 and Wood: RDF-5 with a ratio of 80: 20 wt. % w.b. Using a ceramic kiln with a path of hot air down, in Dan Kwian Sub-district, Chok Chai District, Nakhon Ratchasima Province. The results showed that burning of the combined RDF and biomass was not different from pure biomass, But the RDF-3 had temperature fluctuates more than in other fuels. Product and ash contamination compared to standards and research showed values close to all passes. But the three fuels had significantly different. For air emissions, it was found that wood: RDF-3 had significantly higher emissions than pure biomass, except for reduced NO_x and HF values. But both fuels have dust values that exceed the standard values of 400

Received: August 03, 2022

Revised: August 26, 2022

Accepted: August 26, 2022

Available online: October 03, 2022

and 539 mg m⁻³, respectively. Summary, RDF-3, and RDF-5 It had the same good heat production performance. Without affecting air pollution emissions and contamination in ash and products, except for the dust value that is higher than the standard

Keywords: Biomass, Ceramic kiln, Refuse-derived fuel, Air pollution, Direct combustion, Earthenware

1 บทนำ

ปัจจุบันขยะมูลฝอยเกิดขึ้นต่อเนื่องทุกวัน ในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยมากถึง 24.98 million tons แต่ลดลงจากปีก่อนหน้าร้อยละ 1.5 ถือเป็นเรื่องดีที่หลายปีที่ผ่านมา ปริมาณขยะมูลฝอยมีแนวโน้มลดลง แต่ยังมีขยะที่มีการกำจัดอย่างไม่ถูกต้องมากถึงร้อยละ 32 (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) ซึ่งขยะเหล่านี้เกิดจากผู้รับซื้อน้อยราย และหน่วยงานในหลายพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งรับซื้อขยะมูลฝอยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือกำจัด เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้าจากขยะ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์เตาเผาขยะ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในแถบภาคกลาง ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง หลายพื้นที่จึงจำเป็นต้องนำไปฝังกลบอย่างไม่ถูกต้องหรือกองทิ้งกลางแจ้ง ทำให้ขยะล้นบ่อฝังกลบ ส่งผลกระทบต่อชุมชนในพื้นที่ใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยที่เหมาะสมกับพื้นที่ เพื่อลดปัญหาเหล่านี้ได้

ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย Carlos et al. (2016). ได้ใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับถ่านหินและกะลาปาล์ม ในกระบวนการเผาอิฐ พบว่าสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ถึงร้อยละ 5 และยังลดการเกิดมลพิษเมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินอย่างเดียว เช่นเดียวกับ Safwat et al. (2019). และ Mustafa K. (2012) ได้นำ RDF ไปใช้ร่วมกับถ่านหินในเตาเผาปูนซีเมนต์ พบว่าสามารถลดต้นทุนและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหิน ซึ่งส่วนมากเป็นการใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือ Small-Medium Enterprise: SMEs) ก็ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จาก RDF ซึ่ง พรชยา ลิบลับ และคณะ. (2562). ได้ทดสอบ RDF-5 กับโรงไฟฟ้าชีวมวล พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้มีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวล มีความเสถียรเทียบเท่าชีวมวล ไม่ส่งผลต่อคุณภาพก๊าซที่ได้ออกมาจนถึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เกินมาตรฐานอีกด้วย แต่การใช้ RDF2-3 รวมยังมีข้อจำกัด เนื่องจากมีขนาดใหญ่และระบบลำเลียงเป็นแบบสกรู ทำให้มีการลำเลียงยาก นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมขนาดเล็กอื่น ๆ ที่กระจายตัวอยู่ในทุกภูมิภาค เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก โรงงานอบไม้

อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก ถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีการใช้พลังงานความร้อนจำนวนมากจากการทดสอบเตาเผาภาชนะดินเผาที่ด่านเกวียน แต่ละรอบจะใช้เวลาราว 9-11 d. อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 970 °C และใช้ไม้ฟืนประมาณ 3-4 tons ต่อเตา และระบบการป้อนเชื้อเพลิงโดยตรง จะสามารถนำ RDF2-3 มาใช้ร่วมได้ จากแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยด้วยเตาอย่างมีประสิทธิภาพ กรมควบคุมมลพิษ. (2561) การเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 850 °C จะสามารถกำจัดมลพิษที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศและเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และหากอุณหภูมิไม่เกิน 1,100 °C จะไม่ก่อให้เกิด NO_x ที่เพิ่มขึ้น และด้วยการเข้าสู่ยุคสังคมเมือง ไม้ฟืนเริ่มหายาก มีต้นทุนสูงขึ้น การนำ RDF มาใช้ร่วมกับไม้ฟืน จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งในตำบลด่านเกวียน จังหวัดนครราชสีมา ก็ถือเป็นแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่จำหน่ายทั้งไทยและต่างประเทศ มีจำนวนมากถึง 13 แห่งด้วยกัน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์, 2560) และอยู่ไม่ห่างจากแหล่งผลิตเชื้อเพลิงขยะ รัศมีไม่เกิน 30 km ได้แก่ เทศบาลนครนครราชสีมา เทศบาลเมืองเมืองปัก

อย่างไรก็ตาม การที่จะนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ประโยชน์ร่วมกับอุตสาหกรรมเซรามิกนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงสมรรถนะการผลิตความร้อนและการเกิดมลพิษ ทั้งมลพิษในอากาศและการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ ถึงแม้ว่า ทวีชัย ลิ้มปสันติเจริญ รัฐพล อันฉ่ง และมัลลิกา ปัญญาตะโป, (2561). ได้ให้ข้อมูลว่าการใช้ไม้ในการเผาเซรามิกไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เกินค่ามาตรฐาน แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะมีคุณสมบัติทางเคมีที่มากกว่าไม้ จึงมีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าไม้อย่างแน่นอน โดยอ้างอิงการตรวจวัดตามมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2553). ประกอบด้วย ค่าฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x as NO₂) ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) สารปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) ในส่วนของผลิตภัณฑ์และเถ้าต้องมีการวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนัก 14 ชนิด ประกอบด้วย (แคดเมียม Cd) (ปรอท Hg) (แบเรียม Ba) ซีลีเนียม (Se) เงิน (Ag) พลวง (Sb) สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอลต์ (Co) ทองแดง

(Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และวาเนเดียม (V) (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับอาหาร ต้องมีการตรวจวัดค่าตะกั่วและแคดเมียม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) มอก. 32 นอกจากนี้ยังต้องมีการตรวจวัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ (O_2) เพื่อประเมินการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเซรามิก ว่าแตกต่างจากการใช้เชื้อเพลิงดั้งเดิมอย่างไร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวล เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ จากการใช้เชื้อเพลิงไม้สับ ไม้: RDF-3 และไม้: RDF-5 ที่สัดส่วนการบ่อน 80: 20 wt. % w.b. โดยใช้เตาเผาเครื่องปั้นดินเผาแบบทางเดินลมร้อนลง ในตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 และ 5 (Refuse-Derived Fuel 3, 5: RDF-3, RDF-5) ลักษณะดัง Figure 1. ที่ผ่านการแปรรูปโดยระบบบำบัดขยะทางกลและชีวภาพของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology, Mechanical and Biological Treatment: SUT MBT) คุณสมบัติดัง Table 1

เชื้อเพลิงไม้เป็นไม้ฟืนทั่วไปในพื้นที่ มีลักษณะเป็นท่อนแห้งคละก้น ได้แก่ ไม้ยางนา ไม้กะถินยักษ์ ไม้ซี้เหล็ก ไม้ยางพารา และไม้จามจุรี คุณสมบัติดัง Table 1

Table 1. Shows the properties of Fuels.

Parameters	Fuels		
	Wood	RDF-3	RDF-5
Physical properties			
Size (mm.)	Ø15-L1	50-300	Ø8-L5
Bulk density (kg m^{-3})	350	25.28	584
Moisture (% w.b.)	8.14	13.79	6.50
Heating value (kJ kg^{-1})	17,633	25,790	
Proximate Analysis (wt. % d.b.)			
Ash	0.73	8.87	
Volatile Matter	84.79	87.34	
Fixed Carbon	14.48	2.32	
Ultimate Analysis (% wt.)			
Carbon (C)	48.74	68.51	
Hydrogen (H)	6.39	10.85	
Nitrogen (N)	0.31	0.44	
Sulphur (S)	0.15	0.11	
Oxygen (O)	44.41	9.75	
Heavy metal (% wt.)			
Antimony (Sb)	N.D.	0.00000	
Arsenic (AS)	0.00010	0.04100	
Barium (Ba)	0.00332	0.00000	
Cadmium (Cd)	0.00000	0.00000	
Chromium (Cr)	0.00088	0.01000	
Cobalt (Co)	N.D.	N.D.	
Copper (Cu)	0.00026	0.00000	
Lead (Pb)	0.00046	0.00000	
Nickel (Ni)	0.00033	0.00000	
Manganese (Mn)	0.03286	0.00000	
Mercury (Hg)	0.00000	0.00000	
Selenium (Se)	N.D.	0.00000	
Silver (Ag)	N.D.	0.00100	
Vanadium (V)	0.00011	0.06100	

N.D. Not detected



Figure 1. (a) RDF-3 and (b) RDF-5

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 การทดลอง 1) เผาโดยใช้ไม้ล้วน 2) เผาโดยใช้ไม้: RDF-3 3) เผาโดยใช้ไม้: RDF-5 ใช้สัดส่วนการป้อนที่ได้จากการทดสอบที่ 80 : 20 wt. % w.b. เป็นการป้อนแยกกันตามสัดส่วนที่กำหนด กระบวนการเผาจะใช้เวลาในการอุ่นเตา 3-4 d. อุณหภูมิไม่เกิน 650 °C โดยใช้ไม้พินล้วน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิหน้าเตา (T1) ให้ได้ 970 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการและสูงที่สุดในการเผาไหม้ ใช้เวลา 10 h. ช่วงนี้จะเริ่มป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ ทั้ง 3 แบบ และเป็นช่วงที่มีการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ จากนั้นจะหยุดป้อนเชื้อเพลิงด้านหน้า แล้วเร่งอุณหภูมิกลางเตาและท้ายเตา (T2 และ T3) โดยใช้ไม้ล้วน ใช้เวลา 6 h. จากนั้นหยุดป้อนเชื้อเพลิงและปิดเตาประมาณ 4 d. หรือจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นตัวลงต่ำกว่า 70 °C เก็บตัวอย่างกระถางดินเผา จาน-ชาม และแก้วเพื่อตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนรวมระยะเวลาในการเผาแต่ละรอบประมาณ 9-11 d.

2.3 การวัดสมรรถนะการผลิตความร้อน

การวัดอุณหภูมิภายในเตาจะใช้ Thermocouple type K วัด 3 ตำแหน่ง หน้าเตา (T1) กลางเตา (T2) และท้ายเตา (T3) แสดงผลทางหน้าจอตัวควบคุมแบบ real time โดยตำแหน่ง A เป็นช่องป้อนเชื้อเพลิงหลัก ใช้ป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบทั้ง 3 แบบ และเก็บตัวอย่างเถ้า ตำแหน่ง B ปล่องไอเสีย เป็นจุดที่ใช้ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ ตำแหน่ง C ใช้ในการนำชิ้นงาน เข้า-ออก และตำแหน่ง D เป็นช่องสำหรับป้อนไม้เพื่อเร่งอุณหภูมิกลางเตา (T2) และท้ายเตา (T3) ดังแสดงใน Figure 1. เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยบันทึกข้อมูลปริมาณการใช้ทุก 30 นาที

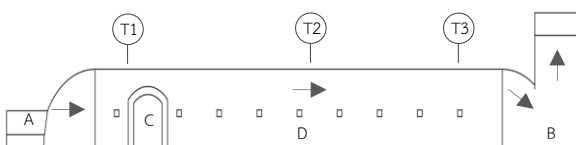


Figure 2. Sampling point

2.4 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

สุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระถางดินเผาและจาน-ชาม นำมาบดให้ละเอียด แล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก (Heavy Metals) 14 ชนิด ได้แก่ Cd, Hg, Ba, Se, Ag, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, และ V โดยใช้วิธีการ Inductively Couple plasma/mass Spectrometry Method (ICP-MS)

2.5 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในเถ้า

เก็บตัวอย่างเถ้าจากเตาเผา มาวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ประกอบด้วยปริมาณ เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว และความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D7582-10 โดยใช้ muffle furnace และ Infrared moisture analyzer หาค่าประกอบแบบแยกธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) ตามมาตรฐาน ASTM D5373-08 โดยใช้เครื่องมือ LECO Method/ CHN628 ,628S และโลหะหนัก 14 ชนิด ได้แก่ Cd, Hg, Ba, Se, Ag, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, และ V โดยใช้วิธีการ X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer Model XGT-5200

2.6 การวิเคราะห์มลพิษในอากาศ

กำหนดจุดซักตัวอย่างตามมาตรฐานองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา 1 (United States Environmental Protection Agency 1 : U.S. EPA 1) ขนาดปล่องควัน ϕ 0.35 m. จุดซักตัวอย่างห่างจากปลายยอด 0.7 m. หากคุณสมบัติการเผาไหม้ ได้แก่ อัตราการไหลก๊าซไอเสียโดยใช้ Type S Pitot Tube ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 2 ส่วนก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ CO₂ CO และ O₂ ตรวจวัดโดย Electro chemical method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 3

วิเคราะห์สารเจือปนในอากาศ 8 ชนิด ได้แก่ 1) ฝุ่นละออง วัดด้วยวิธีการ Isokinetic (Gravimetric) 2) HG 3) Pb และ 4) Cd โดยใช้วิธี ICP AAS Method, AAS Method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 5 29 29 และ 29 ตามลำดับ ส่วนอีก 4 ชนิด 5) HCL และ 6) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ใช้เครื่อง Ion chromatography 7) SO₂ และ 8) NO_x as NO₂ จะตรวจวัดด้วยหลักการ Electro chemical Method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 10 26A 6C และ 7E ตามลำดับ

โดยการวัดมลพิษทางอากาศจะตรวจวัดเพียงการใช้เชื้อเพลิงไม้ล้วนเทียบกับ ไม้ : RDF-3 เนื่องจาก RDF-3 และ RDF-5 มีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกัน

3 ผลและวิจารณ์

3.1 สมรรถนะการผลิตความร้อน

จาก Figure 4. เชื้อเพลิงทั้ง 3 มีความสามารถในการผลิตความร้อนได้อุณหภูมิตามที่กำหนด โดยการใช้ไม้ล้วน อุณหภูมิจะมีความเสถียรมากที่สุด เนื่องจากมีคาร์บอนคงตัวเยอะกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ RDF-3 และ RDF-5 พบว่า RDF-5 มีความเสถียรในการควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า RDF-3 เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่า ส่วน RDF-3 อุณหภูมิจะค่อนข้างแกว่ง เนื่องจากมีความหนาแน่นและคาร์บอนคงตัวน้อย จึงทำให้เกิดการเผาไหม้เร็วกว่าไม้และ RDF-5 ส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมีปริมาณลดลง เมื่อใช้ RDF ร่วมด้วย แต่ในทางพลังงานที่ใช้ RDF-3 มีการใช้พลังงานมากกว่าไม้และ RDF-5 เนื่องจากต้องใช้ไม้ในการควบคุมอุณหภูมิที่ค่อนข้างแกว่งจากการใช้ RDF-3 ร่วม แสดงดัง Table 2.

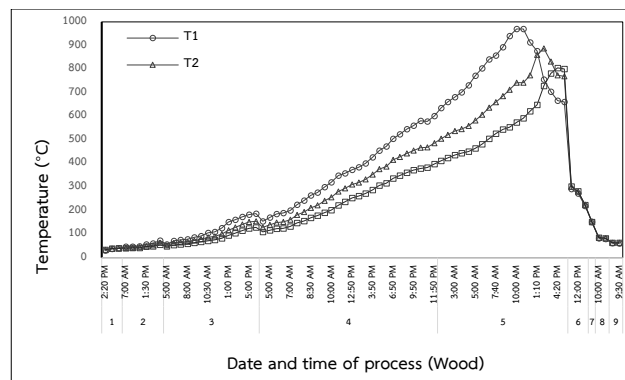
Table 2. Show the fuel and energy consumption.

Parameters	Fuels		
	Wood	W: RDF-3	W: RDF-5
Wood (kg.)	735	569.4	536.0
RDF (kg.)	0	124.9	121.4
Total fuel (kg.)	735	693.0	657.4
Total Energy (MJ)	12,960	13,261	12,582

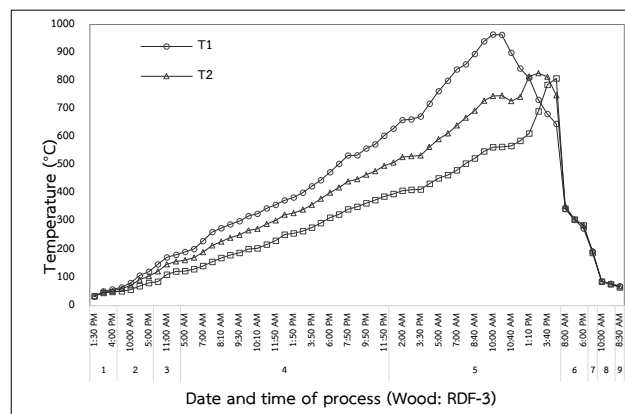
*Fuel and energy at heat-up range (10 h.)



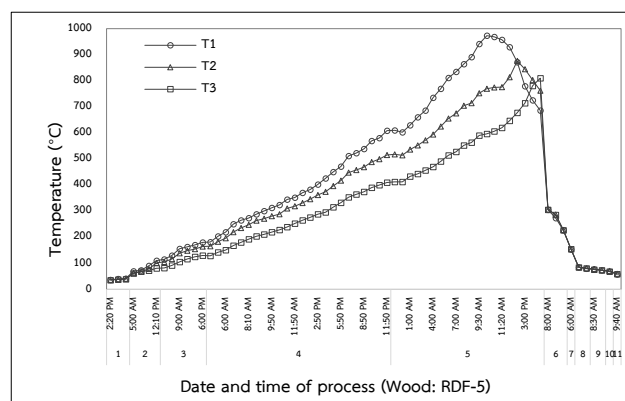
Figure 3. Testing the ceramic kiln



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Temperature profile (a) wood (b) wood: RDF-3 (c) wood: RDF-5

3.2 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

จาก Table 3. พบว่า การใช้ RDF-3 และ RDF-5 เปรียบเทียบกับไม้ มีการปนเปื้อนของโลหะหนักแตกต่างจากการใช้ไม้ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ของชิ้นงานทั้งสองประเภท เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักบนภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร ประกอบด้วย ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ประเภทภาชนะแบบลิ้นขนาดเล็ก (ไม่เกิน 1.1 L) และขนาดใหญ่ (มากกว่า 1.1 L) อ้างอิงมาตรฐานตาม สำนักงานมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มอก. 32 ซึ่งกำหนดให้ค่าตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน 1 และ 2 mg L⁻¹ ตามลำดับ และแคดเมียม (Cd) ไม่เกิน 0.5 และ 0.25 mg L⁻¹ ตามลำดับ ผลพบว่าชิ้นงานทั้งสอง และ 3 ประเภทเชื้อเพลิง ตรวจไม่พบแคดเมียม แต่พบตะกั่วในทุกประเภทเชื้อเพลิง ซึ่งการเผาเชื้อเพลิงขยะร่วม มีค่าตะกั่วต่ำกว่าการเผาโดยไม่ลว่นของทั้งสองผลิตภัณฑ์ โดย Earthenware เมื่อใช้ RDF-3 และ RDF-5 เผาร่วม พบว่ามีค่าตะกั่วลดลงร้อยละ 65 และ 47 ตามลำดับ ส่วน Plate-bowl พบว่ามีค่าตะกั่วลดลงเช่นกัน ร้อยละ 62 และ 78 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) กระทรวง

อุตสาหกรรม. (2548). และ Code of Federal Regulation. (2022). พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัวเช่นเดียวกัน เมื่อเทียบกับ Omolayo J.A., Uzairu A., and Gimba C.E. (2010). ที่ได้ศึกษาโลหะหนักที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่นำเข้าจากจีน พบว่าปริมาณ Pb Cd Ni และ Cu ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ส่วน Cr และ Co จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย โดยมีค่า Mn ค่าเดียวที่มีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ Supawan Vichaphund and Parjaree Thavorniti. (2010). ที่ตรวจวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้เถ้าจากการเผาขยะมูลฝอยเป็นส่วนผสม พบว่าโลหะหนัก Pb Cd Cr และ As จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าในทุกระดัอย่างมีนัยสำคัญ

Table 3. Show heavy metals in products

Parameter	Earthenware (mg L ⁻¹)			Plate-bowl (mg L ⁻¹)			Standard. (STLC) mg L ⁻¹
	Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	
Antimony (Sb)	0.000	0.000	0.000	0.013	0.017	0.004	-
Arsenic (AS)	0.002	0.002	0.003	0.012	0.011	0.005	≤5.00 ^{a, b}
Barium (Ba)	0.348	0.428	0.304	1.400	1.730	0.867	≤100 ^{a, b}
Cadmium (Cd)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤1.00 ^{a, b}
Chromium (Cr)	0.002	0.001	0.003	0.046	0.011	0.013	≤5.00 ^{a, b}
Cobalt (Co)	0.006	0.012	0.001	0.005	0.004	0.007	≤80.0 ^b
Copper (Cu)	0.060	0.044	0.033	0.161	0.086	0.097	≤25.0 ^b
Lead (Pb)	0.017	0.006	0.009	0.037	0.014	0.008	≤5.00 ^a
Nickel (Ni)	0.043	0.019	0.008	0.027	0.025	0.021	≤20.0 ^a
Manganese (Mn)	0.973	1.160	0.304	0.663	0.475	0.311	-
Mercury (Hg)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤0.20 ^a
Selenium (Se)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤1.00 ^a
Silver (Ag)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤5.00 ^a
Vanadium (V)	0.193	0.042	0.852	0.002	0.005	0.005	≤24.0 ^b

^a Code of Federal Regulation. (2022). Maximum Concentration of Contaminants for the Toxicity Characteristic.

^b Ministry of Industry. (2005). Soluble Threshold Limit Concentration (STLC).

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติและการปนเปื้อนในเถ้า

Table 4. แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและการปนเปื้อนในเถ้าที่ได้จากเตาเผาภาชนะเซรามิก จากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท พบว่า การใช้เชื้อเพลิงขยะร่วม มีการเผาไหม้ได้ดี เทียบเท่ากับการใช้ไม้ลว่น ส่วนผลการวิเคราะห์ของโลหะหนักทั้ง 14 ธาตุ ส่วนใหญ่ตรวจไม่พบ มีแค่ Cu และ Mn ที่ตรวจพบในการเผาทุกเชื้อเพลิง โดย Cu ของเชื้อเพลิง ไม้ : RDF-5 มีค่า

เพิ่มขึ้นจากการใช้ไม้ลว่นประมาณ 5 เท่า ส่วน ไม้ : RDF-3 มีค่าใกล้เคียงกับไม้ลว่น ด้าน Cr และ Pb พบเพียงการใช้ ไม้ : RDF-5 ที่ 430 และ 330 mg kg⁻¹ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานองค์ประกอบสิ่งเจือปนในวัสดุที่ไม่ใช่แล้วหรือสิ่งปฏิภูล Total Threshold Limit Concentration (TTLC) กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว เมื่อเทียบกับ Jun Dong et al. (2018) ที่หาโลหะหนักในเถ้าหนักของขยะมูลฝอยในกระบวนการ Pyrolysis, Gasification และ

Incineration พบว่า ค่า Cd, Cu, Ni, และ Cr จากการทดสอบมี

ค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Pb มีค่าใกล้เคียงกัน

Table 4. Properties and heavy metals of ash from ceramic kilns

Analysis	Parameters	Fuels			Standard ^c (TTLC) mg kg ⁻¹
		Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	
Proximate Analysis (% wt. db.)	Ash	85.665	87.866	92.593	-
	Volatile Matter	4.718	6.949	2.674	-
	Fixed Carbon	9.618	5.185	4.733	-
	Moisture content	0.000	0.000	0.000	-
Ultimate Analysis (% wt.)	Carbon (C)	5.119	3.064	3.084	-
	Hydrogen (H)	N.D.	1.810	0.093	-
	Nitrogen (N)	N.D.	N.D.	N.D.	-
	Sulphur (S)	0.477	0.100	0.323	-
Heavy Metals (mg kg ⁻¹)	Antimony (Sb)	0.000	0.000	0.000	≤500
	Arsenic (AS)	0.000	0.000	0.000	≤500
	Barium (Ba)	0.000	0.000	0.000	≤10,000
	Cadmium (Cd)	0.000	0.000	0.000	≤100
	Chromium (Cr)	0.000	0.000	430.0	≤2,500
	Cobalt (Co)	0.000	0.000	0.000	8,000
	Copper (Cu)	300.0	330.0	1,800	≤2,500
	Lead (Pb)	0.000	0.000	330.0	≤1,000
	Nickel (Ni)	0.000	0.000	0.000	≤2,000
	Manganese (Mn)	4,170	6,900	2,470	-
	Mercury (Hg)	0.000	0.000	0.000	≤0.20
	Selenium (Se)	0.000	0.000	0.000	≤100
	Silver (Ag)	0.000	0.000	0.000	≤500
	Vanadium (V)	0.000	0.000	0.000	≤2,400

^c Ministry of Industry. (2005). Total Threshold Limit Concentration (TTLC).

N.D. not detected

3.4 วิเคราะห์การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ

จาก Table 5. พบว่า การใช้ป้อน ไม้ : RDF-3 มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการใช้เชื้อเพลิงไม้ ร้อยละ 26 และมีออกซิเจนคงเหลือจากการเผาไหม้ลดลงร้อยละ 82 ซึ่งด้วยข้อจำกัดที่ปากเตามีขนาดเล็ก การป้อน RDF-3 รวมจะทำให้ช่องว่างลดลง อากาศไหลเข้าได้น้อย ทำให้มีออกซิเจนส่วนเหลือน้อยกว่าการใช้ไม้ล้วน เสี่ยงต่อการเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ยังไม่เกินกว่ามาตรฐาน

กำหนด ที่ 690 ppm (Ministry of Industry, 2005). ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0.1 ppm

การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ จากการตรวจวัดอ้างอิงตามมาตรฐานข้างต้น ผลการตรวจวัดแสดงใน Table 6. เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการควบคุมการปล่อยที่ทางอากาศเสียจากเตาเผา มูลฝอย กระบวนการบำบัดธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2553). พบว่าการเผาโดยใช้ไม้ล้วนและ ไม้ : RDF-3 มีค่าฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐานกำหนด มีค่า 400 และ 539 mg m⁻³ ตามลำดับ และการป้อน ไม้ : RDF-3 มีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าไม้ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่า HCl และ Cd เพิ่มขึ้นร้อยละ 428

และ 500 ตามลำดับ ยกเว้นค่า NO_x และ HF ที่มีค่าลดลงร้อยละ 42 และ 50 ตามลำดับ แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

ค่าโลหะหนักที่พบในการใช้เชื้อเพลิงไม้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย ลิ้มปสันติเจริญ รัฐพล อันเนื่อง และมัลลิกา ปัญญา คะโป, (2561). ที่ศึกษาโลหะหนักปนเปื้อนในอากาศจากการใช้เชื้อเพลิงไม้ พบว่ามีค่าโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานเช่นกัน แต่มีการปลดปล่อยฝุ่นละอองค่อนข้างน้อยกว่า ที่ 131 mg m^{-3} เมื่อเทียบกับ Sánchez de la Campa et al. (2010) ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงถ่านโค้กกับโรงงานเซรามิก พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณแคดเมียมและตะกั่วที่น้อยกว่า

Table 5. Show the combustion gas composition

Parameter	Fuels	
	Wood	Wood: RDF-3
V ($\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$)	565	531
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	182	230
CO_2 (% vol.)	7.04	18
O_2 (% vol.)	13.88	2.51
CO (ppm)	< 0.1	< 0.1

Table 6. Show the Air emissions of ceramic kiln

Parameters	Wood	Wood + RDF-3	Standard ^e
	@ 7% O_2	@ 7% O_2	
Dust (mg m^{-3})	400	539	< 320
Sulphur dioxide: SO_2 (ppm)	< 1	< 1	< 30
NO_x as NO_2 (ppm)	59	34	< 250
Hydrogen chloride: HCl (ppm)	3.03	16.0	< 80
Hydrogen fluoride: HF (mg m^{-3})	0.671	0.329	< 80
Mercury: Hg (mg m^{-3})	0.004	0.009	< 0.05
Cadmium: Cd (mg m^{-3})	<0.001	0.006	< 0.5
Lead: Pb (mg m^{-3})	0.022	0.064	< 1.5

^e Ministry of Natural Resources and Environment. (2010, 16 July). Set the standards to control waste air emissions from solid waste incinerators. No. 127. 87ง A.D. 2010.

4 สรุป

ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ พบว่า RDF-3 และ RDF-5 มีสมรรถนะในการผลิตความร้อนได้เทียบเท่าไม้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ ยกเว้นค่าฝุ่นละอองที่มีค่าเกินมาตรฐาน

5 ข้อเสนอแนะ

การป้อน RDF-3 ทำได้ยาก เนื่องจากเชื้อเพลิงค่อนข้างฟู และจำเป็นต้องบรรจุลักษณะทรงกระบอกเพื่อให้ป้อนง่าย หากการทำงานจริงต้องมีระบบที่สามารถป้อน RDF ได้ง่ายขึ้น และในขั้นตอนการทดสอบที่มีการใช้ RDF ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงค่อนข้างเยอะ เกิดจากช่องป้อนมีขนาดเล็ก ควรมีระบบเติมอากาศเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น รวมถึงมีการ

ประเมินต้นทุนของเชื้อเพลิง RDF ถึงแม้การใช้เชื้อเพลิงลดลงเมื่อมีการใช้ RDF แต่ก็มีต้นทุนการผลิต RDF เช่นกัน

6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัย และขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้สถานที่ และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

7 เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2564). สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ แห่ ล่ง ข้อมูล: <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2564>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2565.
กรมควบคุมมลพิษ. (2561, 26 กันยายน). ประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง แนวทางในการจัดการขยะมูลฝอยด้วยเตาเผาอย่างมีประสิทธิภาพ พ.ศ. 2561

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2556, 23 พฤษภาคม). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. ฉบับที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง วันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2548
- ทวีชัย ลิ้มปสันติเจริญ รัฐบาล อันเนื่อง และมัลลิกา ปัญญาโคโป. (2561). การระบายและการแพร่กระจายของโลหะในฝุ่นจากอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปี ที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2561
- พรรษา ลิบลับ วีรชัย อาจหาญ ครา วาทกิจ อาทิตย์ คุณศรีสุข และทิพย์สุนิษฐ์ หินซุย. (2565). รายงานวิจัย แนวทางการนำเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากมูลฝอยชุมชนมาใช้ประโยชน์ ในกลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก (SME) หรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก. ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์. (2560). รายชื่อโรงงานเซรามิก ในจังหวัดนครราชสีมา (ด้านเกวียน). แหล่งข้อมูล: <https://cim.dip.go.th/th/category/2017-03-03-02-37-41/2017-03-03-02-47-12> เข้าถึงเมื่อ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2565
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556, 23 พฤษภาคม). ประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เครื่องปั้นดินเผาเออร์เทนแวร์ ฉบับที่ 1782 พ.ศ. 2556
- A.M. Sánchez de la Campa, J.D. Rosa, G.Y. Castanedo, F.R. Camacho, A. Alastuey, X. Querol and C. Pio. (2010). “High concentrations of heavy metals in PM from ceramic factories of Southern Spain”, *Atmospheric Research* 96, 2010, pp. 633- 644.
- Code of Federal Regulation. (2022). Maximum Concentration of Contaminants for the Toxicity Characteristic. Available at: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-261/subpart-C/section-261.24>. Accessed on 28 July 2022.
- Carlos et al. (2016). Co-gasification of sub-bituminous coal with palm kernel shell in fluidized bed coupled to a ceramic industry process. *Applied thermal engineering* 107 (2016) 1201–1209
- Jun Dong et al. (2018). Partitioning of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Pyrolysis, Gasification, and Incineration. *Hal open science*. Submitted on 2 May 2018.
- Ministry of Industry. (2005). Announcement of the Ministry of Industry. Regarding the disposal of waste or unused materials (Soluble Threshold Limit Concentration) 123/11ง 25 January 2005
- Ministry of Industry. (2005). Announcement of the Ministry of Industry. Regarding the disposal of waste or unused materials (Total Threshold Limit Concentration) 123/11ง 25 January 2005
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2010, 16 July). Set the standards to control waste air emissions from solid waste incinerators. No. 127. 87 ง A.D. 2010.
- Omolaoye J.A., Uzairu A., and Gimba C.E. (2010). Heavy metal assessment of some ceramic products imported into Nigeria from China. *Archives of Applied Science Research*, 2010, 2 (5):120-125
- Peterson, Beth E. (2012). What Kind of Kiln Is It? Kiln Types by Construction. Retrieved August 8, 2012, from <http://pottery.about.com/od/potterykilns/tp/typkilncons.htm>
- Safwat et al. (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. *Molecular Diversity Preservation International [MDPI]*. (2019)
- Supawan Vichaphund and Parjaree Thavorniti. (2010). Properties of Ceramic Produced from Clay and MSW Incineration Bottom Ash Mixtures. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, Vol. 15, Special Edition, September 2010