



## การใช้ตะกรันอะลูมิเนียมจากกระบวนการรีไซเคิลอะลูมิเนียมผสมเพื่อเป็นวัสดุทนไฟ

กฤษณา พูลสวัสดิ์\* ธณิกานต์ ธงชัย และ นฤมล สีพลไกร  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6590 1930 อีเมล: kitsanap@nu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.016

รับเมื่อ 29 ตุลาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 4 มกราคม 2564 ตอรับเมื่อ 18 มกราคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤศจิกายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ตะกรันอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลอะลูมิเนียมผสม โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จากการวิเคราะห์ตะกรันอะลูมิเนียมในเบื้องต้น ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์พบว่า ตะกรันอะลูมิเนียมมีสารประกอบอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการขึ้นรูปวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง โดยมีอะลูมินาร้อยละ 81.6 และซิลิการ้อยละ 5.6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำตะกรันอะลูมิเนียมดังกล่าวมาผสมกับอะลูมินา และซิลิกา เกรดอุตสาหกรรม ที่สัดส่วน 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 ตามลำดับ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปที่ก้ำลึงอัด 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าสัดส่วนที่เหมาะสม ได้แก่ 80 : 10 : 10 เเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส โดยที่สัดส่วนดังกล่าวให้ค่าความแข็งแรงอัดเท่ากับ 54.3 เมกกะปาสกาล ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 1.8 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับช่วงที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง ตามมาตรฐาน KB-50

**คำสำคัญ:** ตะกรันอะลูมิเนียม ของเหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลอะลูมิเนียมผสม วัสดุทนไฟ วัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง



## The Use of Aluminum Dross in Refractory Materials from the Recycling Process of Aluminum Alloys

Krisana Poolsawat\*, Tanikan Thongchai and Narumon Seeponkai

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 6590 1930, E-mail: kitsanap@nu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.016

Received 29 October 2020; Revised 4 January 2021; Accepted 18 January 2021; Published online: 25 November 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research studies an application of aluminum dross, that is solid waste from aluminum alloys recycling process. The main objective of this study is to obtain the benefit from waste material utilization. Basically, alumina is the main composition for producing high alumina refractory. In this research the aluminum dross was studied the primary chemical composition by using XRD and XRF techniques in order to monitor the alumina composition from aluminum dross. It was found that alumina is the major chemical composition with 81.6 wt% followed by silica with 5.6 wt%. The aluminum dross was mixed with alumina and silica (industrial grade) by using the ratio of 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 and 60 : 20 : 20, respectively. The mixing powder were compressed at 4,000 lb/in<sup>2</sup> and then all samples were sintered at 1300, 1350 and 1,400 degrees Celsius for 2 hours. The compressive strength, bulk density and thermal conductivity coefficient were analyzed. It was found that the sample with the aluminum dross : alumina : silica at the ratio of 80 : 10 : 10 sintered at 1300 degrees Celsius provided the value of the compressive strength, bulk density and thermal conductivity coefficient of approximately 54.3 MPa, 2.2 g/cm<sup>3</sup> and 1.8 W/m.K, respectively. These values show the sample with the ratio of 80 : 10 : 10 is suitable for using as high alumina refractories, referring to standard of KB-50 refractory materials.

**Keywords:** Aluminum Dross, Waste from Recycling Aluminum Alloys, Refractory Materials, High Alumina Refractory

Please cite this article as: K. Poolsawat, T. Thongchai, and N. Seeponkai, "The use of aluminum dross in refractory materials from the recycling process of aluminum alloys," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 819–829, Oct.–Dec. 2022 (in Thai).

## 1. บทนำ

วัสดุทนไฟ (Refractory Materials) ถูกนำมาใช้งานที่หลากหลายทั้งในกลุ่มอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิก ซีเมนต์ โลหะทั้งในและนอกกลุ่มเหล็ก โดยวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง (High Alumina Refractory Materials) นั้นมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก ซึ่งทำให้วัสดุดังกล่าว มีสมบัติของความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) และความต้านทานการเปลี่ยนรูป เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ที่สูงขึ้น อีกทั้งยังมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal Stability) [1], [2]

ในปัจจุบันมีการศึกษาการนำตะกรันเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมด้านโลหะมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น ได้แก่ ตะกรันจากโรงงานผลิตเหล็กที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [3] และตะกรันจากโรงงานรีไซเคิลอะลูมิเนียมมาใช้ผสมอิฐทนไฟในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ [1], [2], [4] ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys Recycling Process) นั้น เป็นการนำอะลูมิเนียมที่ผ่านการใช้แล้วมาทำการหลอมอีกครั้ง เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยขั้นตอนการหลอมกลับมาใช้ใหม่นี้ จะช่วยลดปริมาณสารปนเปื้อนที่อันตรายได้ดีกว่าการกำจัดโดยการฝังกลบ ซึ่งมีโอกาสจะกระจายสู่ธรรมชาติได้มากกว่า [4], [5] แต่ในกระบวนการรีไซเคิลนี้ จะเกิดสิ่งๆ ที่เรียกว่า ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminum Dross) โดยในการรีไซเคิลครั้งที่ 1 (Primary Aluminum Recycle) ประมาณ 1 ตัน จะให้ตะกรันอะลูมิเนียมประมาณ 40 กิโลกรัม และในทุกๆ การรีไซเคิลครั้งที่ 2 (Secondary Aluminum Recycle) ประมาณ 1 ตัน จะให้ตะกรันอะลูมิเนียมประมาณ 200 กิโลกรัม [2], [6]–[8]

โดยทั่วไปตะกรันอะลูมิเนียมจะมีองค์ประกอบหลักคือ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) แมกนีเซียมอะลูมิเนต ( $MgAl_2O_4$ ) และออกไซด์ของธาตุเติมแต่ง (Alloying Element) ชนิดต่างๆ เช่น ออกไซด์ของซิลิกอน ทองแดง เหล็ก และสังกะสี [1], [5], [9]–[13] อีกทั้งยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ในกลุ่มของเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

อีกด้วย [9]–[13]

ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในประเทศพบว่า มีปริมาณเฉลี่ยอยู่ที่ 351 ตัน/ปี ที่ต้องผ่านกระบวนการกำจัดอย่างถูกวิธี อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือฝังกลบอีกด้วย [4], [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำตะกรันอะลูมิเนียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยจากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ตะกรันอะลูมิเนียมดังกล่าวมีสารประกอบอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการขึ้นรูปวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง ซึ่งเป็นการต่อยอดการใช้ประโยชน์ อีกทั้งยังช่วยพัฒนาสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุทนไฟได้ในอนาคต

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

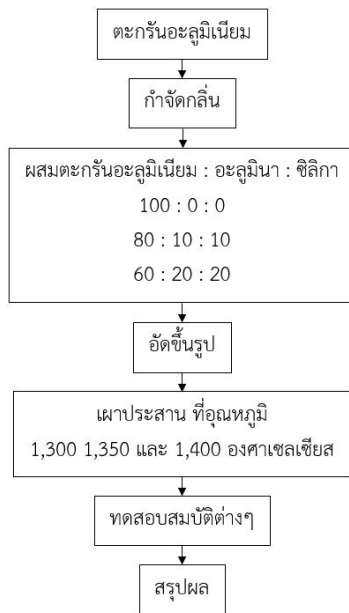
### 2.1 การเตรียมชิ้นงาน

ตะกรันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้นั้น เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมผสม โดยทางผู้วิจัยได้ทำการเก็บจากแหล่งเดียวกัน และเก็บในปริมาณที่มากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อป้องกันความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี และสมบัติต่างๆ ของตะกรันอะลูมิเนียม

โดยนำตะกรันอะลูมิเนียมดังกล่าว มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากนำตะกรันดังกล่าวมากำจัดกลิ่น โดยกวนในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)

จากนั้นนำตะกรันดังกล่าว มาผสมกับอะลูมินา เกรดอุตสาหกรรม และซิลิกา เกรดอุตสาหกรรม ประเภทควอตซ์ (Quartz) โดยค่าอัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุทนไฟ แสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้อ้างอิงประเภทของส่วนผสมจากมาตรฐานวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง ซึ่งมีองค์ประกอบ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

หลักเป็นอะลูมินา และซิลิกา ส่วนขนาดของอนุภาคของวัสดุตั้งแต่ละชนิด มีขนาดอยู่ระหว่าง 53–212 ไมครอน และผสมให้เข้ากันด้วยวิธีการผสมแบบเปียก (Wet Mixing) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมให้ได้มากที่สุด โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวช่วยในการผสม โดยผสมวัสดุในสัดส่วนของอนุภาคต่อน้ำ เท่ากับ 1 : 2 ส่วน ด้วยเครื่องบดผสมความเร็วสูง แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานทดสอบวัสดุทนไฟ

	ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminum Dross)	อะลูมินา (Alumina)	ซิลิกา (Silica)
1	100	0	0
2	80	10	10
3	60	20	20

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุทนไฟ เริ่มจากวิธีการผสมแบบเปียกจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้งสนิท นำส่วนผสมที่ได้ไปอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดแบบ



รูปที่ 2 เครื่องบดผสมความเร็วสูง



รูปที่ 3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก

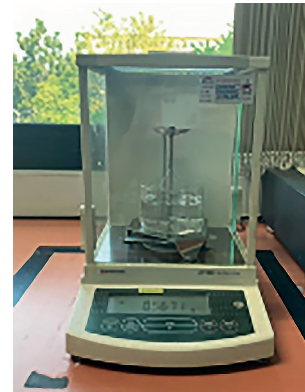
ไฮดรอลิกแสดงดังรูปที่ 3 ที่ความดัน 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยอัดขึ้นรูปชิ้นงานให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 51 มิลลิเมตร ความสูงประมาณ 51 มิลลิเมตร แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปเผาประสานที่เตาเผาอุณหภูมิ 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อ้างอิงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสานจากการเตรียมวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 [14] ทำการเผาประสานเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) และอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทั้งนี้เพื่อป้องกันอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานหลังเผาได้

## 2.2 การทดสอบสมบัติ

สำหรับวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูงนั้น โดยทั่วไปการออกแบบส่วนผสมวัสดุดิบต่างๆ จะพิจารณาจากปริมาณ



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงอัด



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

ส่วนผสมของอะลูมินาเป็นหลัก เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์สมบัติด้านการทนไฟของชิ้นงานตามมาตรฐานการออกแบบวัสดุทนไฟ อะลูมินาสูง มอก.548-2541 และสมบัติต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ค่าความแข็งแรงอัด ค่าความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [15], [16]

ในการศึกษาการนำตะกั่วอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟในครั้งนี้ จะศึกษาสมบัติของวัสดุทนไฟในเบื้องต้น ได้แก่ การทดสอบร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร โดยทำการวัดปริมาตรของชิ้นงานทดสอบก่อน และหลังการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง การทดสอบความแข็งแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 133-97 โดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงอัดแสดงดังรูปที่ 4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 20 โดยเครื่องทดสอบความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงดังรูปที่ 5 และการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยเทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) และนำไปทดสอบมาตรฐานวัสดุทนไฟ มอก.548-2541 โดยใช้ 5 ชิ้นงานตัวอย่างต่อการทดสอบ

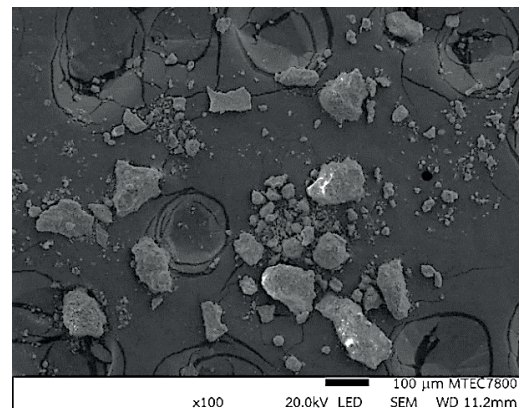
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วอะลูมิเนียม

ลักษณะของตะกั่วอะลูมิเนียมที่ได้มาจากโรงงานรีไซเคิลอะลูมิเนียมผสม แสดงดังรูปที่ 6 โดยจากการศึกษา

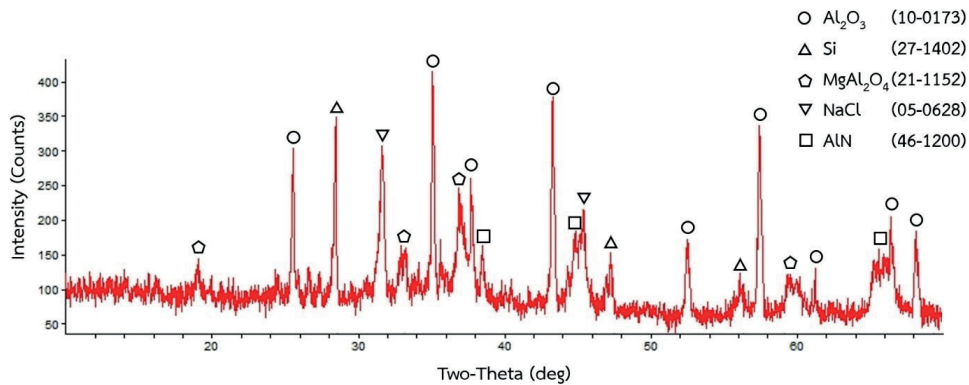


รูปที่ 6 ตะกั่วอะลูมิเนียม



รูปที่ 7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตะกั่วอะลูมิเนียมที่ กำลังขยาย 100 เท่า

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่า อนุภาคดังกล่าวมีรูปร่างที่เป็นแบบไม่แน่นอน (Irregular Shape) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตะกรันอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า เฟสสารประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมประกอบด้วย อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซิลิคอน (Si) แมกนีเซียมอะลูมิเนต ( $MgAl_2O_4$ ) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นองค์ประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 8 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) พบว่า ตะกรันอะลูมิเนียมที่ผ่านการกำจัดกลิ่นประกอบด้วยอะลูมินา ร้อยละ 81.6 ซิลิกา ร้อยละ 5.6 โดยน้ำหนัก และปริมาณองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2

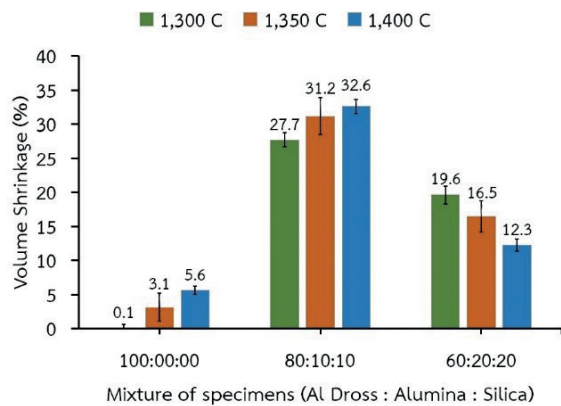
ตารางที่ 2 ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอะลูมิเนียมที่ผ่านการกำจัดกลิ่น

	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Na_2O$	MgO	$SO_3$	Cl	$K_2O$
Wt%	81.6	5.6	4.8	4.4	1.6	1.0	1.0

### 3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางกลของชิ้นงานวัสดุทนไฟที่ได้

#### 3.2.1 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

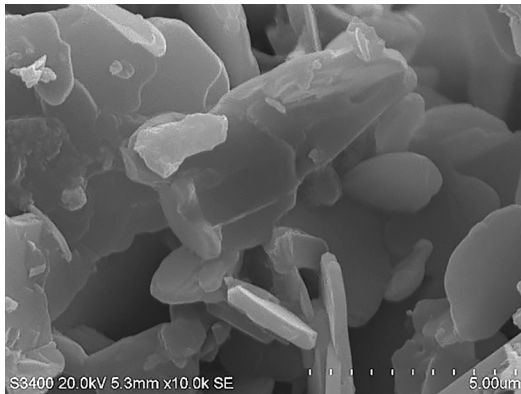
เมื่อทำการผสมส่วนผสมของวัสดุทนไฟประกอบด้วย ตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 และ 80 : 10 : 10 จากนั้น นำไปเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ชิ้นงาน



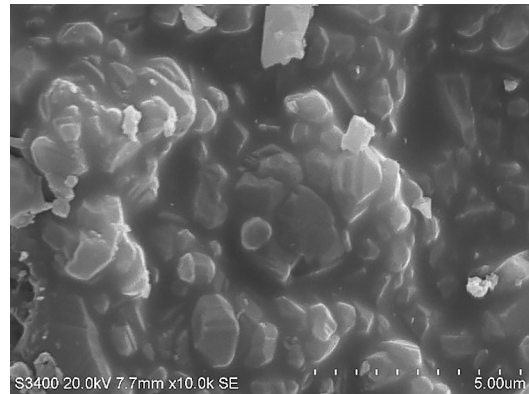
รูปที่ 9 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของตะกรัน อะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 อุณหภูมิเผาประสาน 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส

วัสดุทนไฟเกิดการหดตัวเพิ่มสูงขึ้น แสดงค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร ดังรูปที่ 9

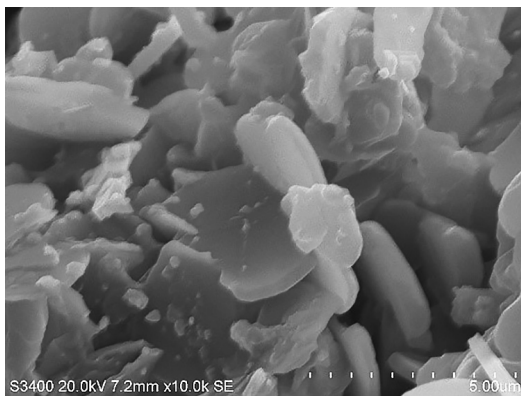
โดยชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 มีอนุภาคของตะกรันอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว และเมื่อเผาประสานที่อุณหภูมิต่างๆ อนุภาคของตะกรันดังกล่าวมีการเชื่อมต่อกันเพียงบางส่วน โดยส่วนใหญ่ยังแสดงลักษณะของอนุภาคที่ชัดเจน แสดงดังรูปที่ 10 โดยจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส [รูปที่ 10 (ก)] อนุภาคของตะกรันอะลูมิเนียมเชื่อมต่อกันได้น้อยกว่าการเผา



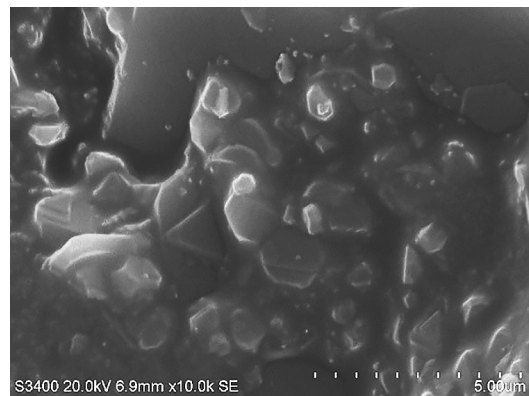
(ก)



(ง)



(ข)



(จ)

**รูปที่ 10** ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 10,000 เท่าของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0 โดยใช้อุณหภูมิเผาประสานที่ (ก) 1,300 องศาเซลเซียส (ข) 1,400 องศาเซลเซียส

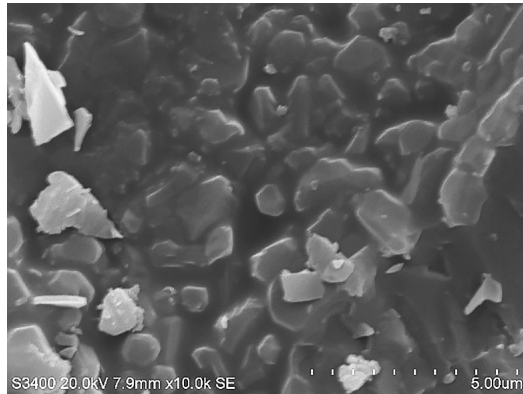
ประสานที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส [รูปที่ 10 (ข)] ซึ่งทำให้เมื่ออุณหภูมิในการเผาประสานยิ่งสูงขึ้นก็จะเกิดการหดตัวเชิงปริมาตรที่สูงขึ้นนั่นเอง

ชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 เมื่อทำการเผาประสานที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่สัดส่วนนี้ให้ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรที่สูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากเกิดเฟสที่มีลักษณะคล้ายแก้ว (Glassy Phase) ทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างแต่ละอนุภาค แสดงดังรูปที่ 11 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 และ 1,400 องศา

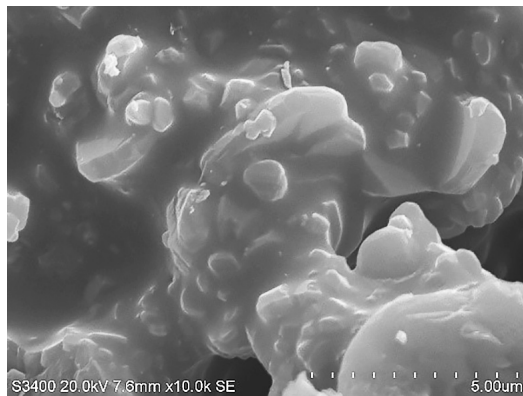
**รูปที่ 11** ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 10,000 เท่าของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 80 : 10 : 10 โดยใช้อุณหภูมิเผาประสานที่ (ก) 1,300 องศาเซลเซียส (ข) 1,400 องศาเซลเซียส

เซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาประสานที่สูงขึ้นทำให้เกิดเฟสที่เชื่อมประสานกันในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งเฟสดังกล่าวนี้นำผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวเชิงปริมาตรนั่นเอง

ส่วนชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 60 : 20 : 20 ซึ่งสัดส่วนนี้มีปริมาณซิลิกาประเภทควอตซ์ที่สูงมากขึ้น ถูกนำไปเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานยังคงเกิดการหดตัวเชิงปริมาตรอยู่ แต่มีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกา เกร็ดอุตสาหกรรม ที่ผสมลงไปนั้นเป็นซิลิกาประเภทควอตซ์ โดยเมื่อเผาจนถึงอุณหภูมิในช่วง



(ก)

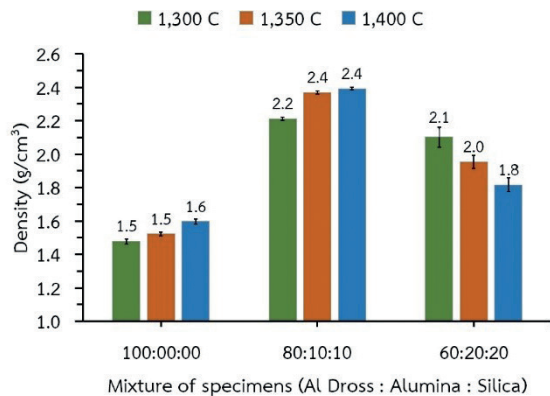


(ข)

**รูปที่ 12** ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 10,000 เท่าของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 60 : 20 : 20 โดยใช้อุณหภูมิเผาประสานที่ (ก) 1,300 องศาเซลเซียส (ข) 1,400 องศาเซลเซียส

ประมาณ 1,300 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส

ซิลิกาประเภทควอตซ์ จะเปลี่ยนโครงสร้างเฟสไปเป็นเฟสของทริไดไมต์ (Tridymite) ที่มากขึ้น (ที่อุณหภูมิในช่วง 870 ถึง 1,470 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นทริไดไมต์ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเฟสมากขึ้นด้วย) โดยการเปลี่ยนเฟสของควอตซ์ไปเป็นเฟสทริไดไมต์ จะสังเกตในเบื้องต้นได้จากค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะลดลง เนื่องจากค่าความหนาแน่นของเฟสควอตซ์ไปเป็นทริไดไมต์จะลดลงจาก 2.7 ไปเป็น 2.3 กรัมต่อลูกบาศก์



**รูปที่ 13** ความหนาแน่นของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 อุณหภูมิเผาประสาน 1,300 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส

เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานวัสดุทนไฟเกิดการหดตัวที่ลดต่ำลง [16], [17]

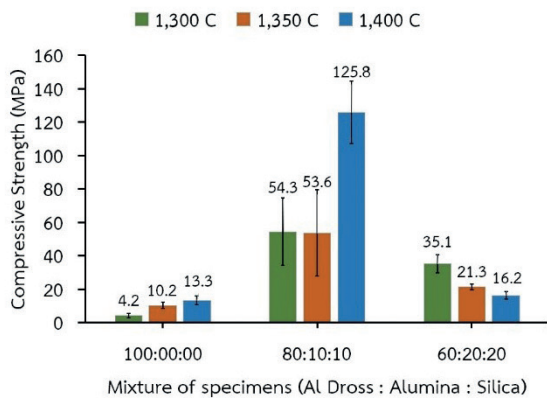
โดยรูปที่ 12 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 60 : 20 : 20 จากรูปจะสังเกตเห็นได้แต่เพียงว่าเกิดเฟสที่มีลักษณะคล้ายแก้วทั้ง 2 อุณหภูมิทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างแต่ละอนุภาคแต่เพียงเท่านั้น

**3.2.2 ความหนาแน่น ความแข็งแรงอัด และร้อยละการดูดซึมน้ำ**

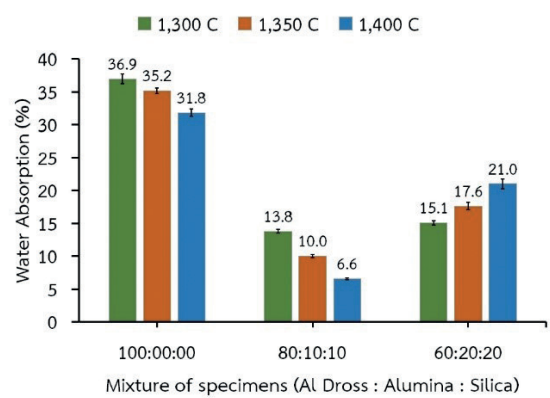
ผลการทดสอบความหนาแน่น (Bulk Density) แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาประสานพบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของตะกรันอะลูมิเนียมมีการเชื่อมประสานกัน ปริมาณที่สูงขึ้น โดยได้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 1.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานวัสดุทนไฟในสัดส่วนนี้มีค่าความแข็งแรงอัด (Compressive Strength) แสดงดังรูปที่ 14 อยู่ระหว่าง 4.2–13.3 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงอัดที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 45 เมกะปาสคาล [15]

ชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาประสานพบว่า ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น





**รูปที่ 14** ความแข็งแรงอัดของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 อุณหภูมิเผาประสาน 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส



**รูปที่ 15** ร้อยละการดูดซึมน้ำของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 อุณหภูมิเผาประสาน 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส

จาก 2.2 เป็น 2.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เกิดเนื่องจากเฟสที่มีลักษณะคล้ายแก้วทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น โดยเฟสดังกล่าวนี้ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงอัดที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิเผาประสาน 1,300, 1,350 และ 1,400 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงอัดเท่ากับ 54.3, 53.6 และ 125.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยในทุกๆ ค่าความแข็งแรงอัดนั้น มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 45 เมกะปาสคาล และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 ซึ่งไม่พบเฟสที่มีลักษณะคล้ายแก้ว จึงทำให้สัดส่วนดังกล่าวมีทั้งค่าความหนาแน่น และค่าความแข็งแรงอัดที่ต่ำกว่าในทางกลับกันชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 60 : 20 : 20 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาประสานจาก 1,300 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีค่าต่ำลง จาก 2.1 เป็น 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงานวัสดุทนไฟมีค่าลดต่ำลงตามค่าความหนาแน่นที่ลดลงเช่นเดียวกัน

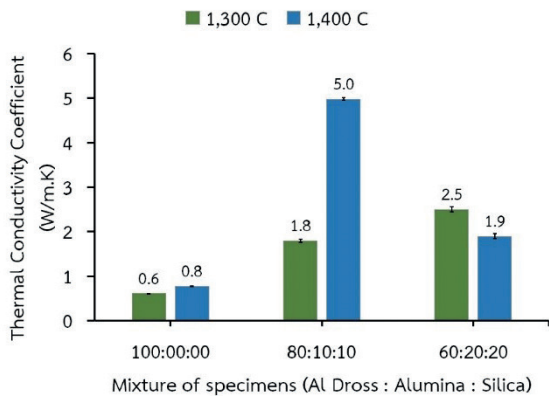
ส่วนผลร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 พบว่ามีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 และที่สัดส่วน 60 :

20:20 โดยที่ร้อยละการดูดซึมน้ำที่ลดลงเป็นผลมาขึ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องว่างในเนื้อวัสดุหรือรูพรุนมีปริมาณน้อยลง แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 15

### 3.2.3 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แสดงดังรูปที่ 16 จากการทดสอบพบว่า ชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 0.8 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 และที่สัดส่วน 60 : 20 : 20 ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวมีช่องว่างที่เกิดจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของตะกรันอะลูมิเนียมจำนวนมาก โดยตะกรันอะลูมิเนียมมีการเชื่อมติดกันแค่เพียงบางส่วน (รูปที่ 10) ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีค่าต่ำลง

ส่วนชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดจากเฟสที่มีลักษณะคล้ายแก้วทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคตะกรันอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง โดยยิ่งให้อุณหภูมิในการเผาประสานที่สูงขึ้นจะเกิดเฟส



**รูปที่ 16** สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตะกรันอะลูมิเนียม : อะลูมินา : ซิลิกา ที่ 100 : 0 : 0, 80 : 10 : 10 และ 60 : 20 : 20 อุณหภูมิเผาประสาน 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส

ที่มีลักษณะคล้ายแก้วที่มากขึ้น (รูปที่ 11) ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น โดยการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.8 และ 5.0 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ

โดยรวมค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 100 : 0 : 0 มีค่าต่ำมากที่สุด ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุกันความร้อน แต่ผลทดสอบค่าความแข็งแรงอัดที่ได้ก็ลดลงมากจนไม่ผ่านค่ามาตรฐานวัสดุทนไฟ ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 45 เมกกะปาสคาล และเมื่อพิจารณาค่าสมบัติทั้งหมดตามค่ามาตรฐานวัสดุทนไฟ อะลูมินาสูงจะพบว่า ชิ้นงานวัสดุทนไฟที่สัดส่วน 80 : 10 : 10 ที่อุณหภูมิเผาประสาน 1,300 องศาเซลเซียส จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ และใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานวัสดุทนไฟมากที่สุด คือ เท่ากับ 1.8 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (มาตรฐานของวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เท่ากับ 1.5 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)

#### 4. สรุป

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สรุปได้ว่าชิ้นงานวัสดุทนไฟที่มีสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง คือ 80 :

10 : 10 เผาประสานที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส โดยที่สัดส่วนดังกล่าวให้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งแรงอัดเท่ากับ 54.3 เมกกะปาสคาล และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 1.8 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานของวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 [15] ตามมาตรฐาน ASTM C-27 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งแรงอัดไม่น้อยกว่า 45 เมกกะปาสคาล และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 1.5 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน นั้น พบว่า ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปนั้นมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง KB-50 เท่ากับ 0.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่าความแข็งแรงอัด และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนั้นมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน 9.3 เมกกะปาสคาล และ 0.3 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวผู้น้อยอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในงานวัสดุทนไฟประเภทอะลูมินาสูง ตามมาตรฐาน KB-50 ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดการใช้ประโยชน์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีงบประมาณ 2562 อีกทั้งได้รับการสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Li, H. Zhang, and H. Yang, "Evaluation of aluminum dross as raw material for high-alumina refractory," *Ceramics International*, vol. 48, no. 8, pp. 12585–12590, September 2014.
- [2] P. Poonayam, P. Yaemporn, and K. Kimapong. (2012). *Feasibility study of aluminum dross as*

- alloying component of refractory brick. [Online] (in Thai). Available: <http://www.research.rmutt.ac.th>
- [3] P. Koonmee, W. Songserm, and T. Wuttipornpun, "The use of granular blast furnace slag in concrete manufacturing: Statistical analysis," *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 1, pp. 103–110, 2014 (in Thai).
- [4] M. C. Shinzato and R. Hypolito, "Solid waste from aluminum recycling process: Characterization and reuse of its economically valuable constituents," *Waste Management*, vol. 25, no. 1, pp. 37–46, 2005.
- [5] A. Meshram and K. K. Singh, "Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review," *Resource, Conservation & Recycling*, vol. 130, pp. 95–108, March 2018.
- [6] S. Freti, J. D. Bornand, and K. Buxman, "Metallurgy of dross formation on Al melts," in *Proceedings of Technical Sessions Sponsored by the TMS Light Metal Committee at the 111th AIME Annual Meeting*, 1982, pp. 143–144.
- [7] J. Hong, J. Wang, H. Chen, B. Sun, J. Li, and C. Chen, "Process of aluminum dross recycling and life cycle assessment for Al-Si alloys and brown fused alumina," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, no. 11, pp. 2155–2161, 2010.
- [8] L. O. Osoba, O. B. Owolabi, S. I. Talabi, and S. O. Adeosun, "Review on oxide formation and aluminum recovery mechanism during secondary smelting," *Journal of Casting & Materials Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 45–51, 2018.
- [9] B. R. Das, B. Dash, B. C. Tripathy, I. N. Bhattacharya, and S. C. Das, "Production of  $\eta$ -alumina from waste aluminium dross," *Mineral Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 252–258, 2007.
- [10] S. Capuzzi and G. Timelli, "Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review," *Metals*, vol. 8, no. 249, pp. 1–24, 2018.
- [11] O. Manfredi, W. Wuth, and I. Bohlinger, "Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 49, pp. 48–51, 1997.
- [12] D. Bajare, A. Korjakins, J. Kazjonovs, and I. Rozenstrauha, "Pore structure of lightweight clay aggregate incorporate with non-metallic products coming from aluminium scrap recycling industry," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, no. 1, pp. 141–148, January 2012.
- [13] A. M. Amer, "Extraction aluminum from dross tailings," *The Journal of The Minerals, Metal & Materials Society*, vol. 54, pp. 72–75, November 2002.
- [14] Siam Refractory. (2021). *Refractory User Guide*. [Online] (in Thai). Available: <http://www.stp-refractory.com/Files/Name2/CONTENT804859332372.pdf>
- [15] Thai.s. Refractory. (2020). *KB-50*. [Online] (in Thai). Available: <https://www.tssrefractory.com/product/kb-50/>
- [16] L. Labjaturaput. (1999). *Refractory Materials*. [Online] (in Thai). Available: <https://library.dmr.go.th>
- [17] W. Ryan and C. Radford, *Whitewares: Production, Testing and Quality Control: Including Materials, Body Formulations and Manufacturing Processes*. Oxford: Institute of Ceramics by Pergamon Press, 1987.