

## การพัฒนาสูตรแก้วสำหรับเตาหลอมชนิดไม่ต่อเนื่อง Glass batch development for pot furnace

เอกรัฐ มีชูวาศ<sup>1\*</sup>, กนิษฐ์ ตะปะสา<sup>1</sup>, ปรีดา จำปีเรือง<sup>1</sup>, เทพวิพรรณ จิตรวัชรโกมล<sup>1</sup>  
Ekarat Meechoovas<sup>1\*</sup>, Kanit Tapasa<sup>1</sup>, Parida Jampeeruang<sup>1</sup>, Tepewan Jitwatcharakomol<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรแก้วสำหรับเตาหลอมชนิดไม่ต่อเนื่อง (pot furnace) จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของแก้วต้นแบบที่มีจำหน่ายในต่างประเทศเพื่อนำมาเป็นต้นแบบ ซึ่งแก้วต้นแบบดังกล่าวเป็นแก้วโซดาไลม์ที่มีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ำ ทำให้สามารถหลอมได้ง่าย ทำให้ได้สูตรแก้วที่สามารถหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ ( $< 1,400\text{ }^\circ\text{C}$ ) โดยใช้วัตถุดิบหลักภายในประเทศ สามารถนำไปหลอมในเตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์ แก้วที่เตรียมได้มีองค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักของซิลิกา ร้อยละ 68 แอลคาไลน์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 19 แอลคาไลน์เอิร์ท ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) ร้อยละ 9 แบเรียมออกไซด์ ( $\text{BaO}$ ) ร้อยละ 2 และซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ร้อยละ 2 มีสมบัติใกล้เคียงกับแก้วต้นแบบ มีความเหนียวและการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยการเป่าแก้ว (blowing) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตแก้วในระดับอุตสาหกรรม

### Abstract

This research is to develop glass formula for pot furnace. The formula is modified from a prototype soda-lime glass which has low silica content. The low silica glass can be melted easier than the high silica content glass. The developed glass formula by using local raw materials can be melted at temperature below  $1,400\text{ }^\circ\text{C}$ . The glass formula is silica ( $\text{SiO}_2$ ) 68%, alkaline ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 19%, alkaline earth ( $\text{CaO}+\text{MgO}$ ) 9% with barium oxide ( $\text{BaO}$ ) 2% and zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) 2% in weight. The glass properties are closed to the reference glass which has the viscosity and the coefficient of thermal expansion suitable for blowing process and can be applied for the industrial scale glass production.

**คำสำคัญ:** แก้วโซดาไลม์, เตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่อง, วัตถุดิบแก้ว

**Keywords:** Soda-lime glass, Pot furnace, Batch

<sup>1</sup>กรมวิทยาศาสตร์บริการ

\*Corresponding author E-mail address : ekarat@dss.go.th

## 1. บทนำ (Introduction)

เตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่อง (pot furnace) เป็นเตาหลอมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตแก้วของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (small and medium enterprise, SME) ข้อมูลในปัจจุบันพบว่าในประเทศไทยมีผู้ประกอบการกลุ่มดังกล่าวมากกว่า 100 โรงงาน เตาประเภทนี้มักใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงหลัก แม้ว่าบางโรงงานจะมีการปรับเปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติ หรือถ่านหินบ้าง แต่ยังมีสัดส่วนที่น้อย ประกอบกับวิกฤตราคาพลังงานในช่วงปี พ.ศ. 2548-2551 [1] ทำให้โรงงานแก้วได้รับผลกระทบอย่างหนักเนื่องจากพลังงานเป็นต้นทุนถึงร้อยละ 40 ในกระบวนการผลิต [2] หลายโรงงานได้พยายามแก้ปัญหาด้วยการปรับสูตรแก้วให้สามารถหลอมตัวง่ายขึ้น โดยเพิ่มปริมาณโซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ในวัตถุดิบแก้ว (batch) แม้ว่าแก้วจะหลอมตัวได้ดีขึ้นแต่แก้วที่มีปริมาณของโซเดียมสูงคุณภาพของแก้วจะลดลงเนื่องจากมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง มีความทนทานต่อสารเคมีต่ำ และสามารถเกิดฝ้าได้ง่าย [3-4] จากการสำรวจพบว่าแม้อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่องสูงถึง  $1,500^\circ\text{C}$  แต่เนื่องจากวัตถุดิบแก้วถูกใส่ในหม้อหลอม (melting pot) ที่ไม่ได้สัมผัสกับความร้อนโดยตรงทำให้อุณหภูมิการหลอมจริงนั้นต่ำกว่าอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ  $1,400^\circ\text{C}$  ดังนั้นจึงใช้เป็นอุณหภูมิต้นแบบสำหรับการพัฒนาสูตรแก้ว

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา การพัฒนาสูตรแก้วเพื่อลดพลังงานในการหลอมนั้นสามารถทำได้โดย

1. การปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่มีความสามารถในการหลอมตัวได้ดีกว่าเดิม เช่น การแทนที่หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ด้วยวอลลาสโตไนต์ ( $\text{CaSiO}_3$ ) [5] การแทนที่อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ด้วยเฟลด์สปาร์ ( $\text{KNaAlSi}_3\text{O}_8$ ) หรือ ไพโรฟิลไรท์ ( $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) [6-7] ผลการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถลดพลังงานในการหลอมลงได้ร้อยละ 3-10 ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสูตรแก้ว โดยแก้วที่ปรับปรุงสูตรยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติด้านต่างๆ เช่นเดียวกับสูตรแก้วเดิม

2. การลดปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในแก้ว โดยการลดปริมาณทรายในวัตถุดิบแก้ว เนื่องจากทรายเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดและหลอมตัวช้าที่สุดในกระบวนการหลอมแก้ว และเพิ่มปริมาณขององค์ประกอบ แอลคาไลน์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) แอลคาไลน์เอิร์ท ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) และอ็อกไซด์อื่นๆ เพื่อให้แก้วที่ได้ยังคงมีสมบัติด้านต่างๆเหมาะสม [8]

การคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาค่าพลังงานทาง ทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นให้เหมาะกับการใช้คำนวณพลังงานในกระบวนการหลอมแก้วโดย Conradt et.al. [9-10]

ค่าพลังงานทางทฤษฎีที่วัตถุดิบแก้วต้องการใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นเนื้อแก้ว คือ exploited heat,  $H_{\text{ex}}$  สามารถคำนวณได้จากสองส่วนคือ

1. ค่าพลังงานทางเคมี  $\Delta H^\circ_{\text{chem}}$  ในการเปลี่ยนวัตถุดิบแก้ว (batch) ไปเป็น เนื้อแก้วและก๊าซที่อุณหภูมิห้อง

$$\text{Batch } (25^\circ\text{C}) \Rightarrow \text{Glass} + \text{Batch gases } (25^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$\Delta H^\circ_{\text{chem}} \Rightarrow H^\circ_{(\text{glass})} + H^\circ_{(\text{gas})} - H^\circ_{(\text{batch})} \quad (2)$$

2. ค่าพลังงานที่ทำให้เนื้อแก้วอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิการหลอม  $\Delta H_{T(\text{glass})}$ , T อุณหภูมิหลอมตัวของแก้ว

$$H_{\text{ex}} \Rightarrow \Delta H^\circ_{\text{chem}} + \Delta H_{T(\text{glass})} \quad (3)$$

ในการวิจัยนี้วิธีการปรับเปลี่ยนสูตรแก้วเพื่อลดพลังงานนั้น จำเป็นต้องปรับลดปริมาณของทรายเพื่อให้มีความต้องการพลังงานในการทำปฏิกิริยาลดลง ทำให้ค่าพลังงานทางเคมี  $\Delta H^\circ_{\text{chem}}$  ลดลง ส่งผลให้ค่าความต้องการพลังงานที่ใช้ทางทฤษฎีสำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นเนื้อแก้วลดลงไปด้วย เมื่อได้สูตรแก้วที่มีค่าพลังงานลดลงแล้วนำแก้วที่ได้ไปศึกษาสมบัติด้านต่างๆ โดยสูตรแก้วที่พัฒนาได้ต้องหลอมตัวได้ดี และมีสมบัติใกล้เคียงกับแก้วต้นแบบ

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental)

### 2.1 สูตรและสมบัติของแก้วต้นแบบ

สูตรและสมบัติของแก้วต้นแบบที่ใช้ในการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1 แก้วต้นแบบเป็นตัวอย่างที่ได้มาจากยุโรปเป็นแก้วที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในเตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่อง มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้การเป่าแก้ว (blowing) ซึ่งมีรูปแบบในการผลิตคล้ายคลึงกับโรงงานแก้วขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศไทย

ตารางที่ 1 สูตรและสมบัติของแก้วตันแบบ

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	69.22
Na <sub>2</sub> O	11.80
K <sub>2</sub> O	6.20
CaO	4.87
MgO	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08
BaO	4.77
TiO <sub>2</sub>	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01
ZnO	1.93
SrO	0.02
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96
SO <sub>3</sub>	0.07

สมบัติ	
Coefficient of Thermal Expansion	9.6 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Strain point	473 °C
Softening point	709 °C
Working point	1047 °C
Melting point	1450 °C
Density	2.52 g/cm <sup>3</sup>
Refractive index	1.52

## 2.2 สูตรแก้วทดลอง

สูตรแก้วทดลองดังตารางที่ 2 วัตถุดิบหลักคือ ททราย โซดาแอช หินปูน โซเดียมเฟลด์สปาร์ และวอลลาสโตไนต์ นำมาจากโรงงานแก้ว ส่วน ฟลวงอ็อกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นสารเคมีเกรดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (Lab grade) องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 2 จำนวนสูตรแก้วเทียบเคียงกับแก้วตันแบบ โดยปรับปริมาณของทรายในวัตถุดิบแก้วให้อยู่ในช่วงร้อยละ 53-60 ปริมาณ โซดาแอชอยู่ในช่วงร้อยละ 17-20.5 และปรับปริมาณวัตถุดิบอื่นๆ ตามสัดส่วน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	วัตถุดิบ				
	ทราย	โซดาแอช	หินปูน	โซเดียมเฟลด์สปาร์	วอลลาสโตไนต์
SiO <sub>2</sub>	99.48	0.03	0.65	67.46	50.24
TiO <sub>2</sub>	0.02	-	-	0.04	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	-	0.17	19.36	0.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	-	0.07	0.09	0.14
CaO	0.02	0.02	55.76	2.10	43.64
MgO	-	0.11	0.32	0.69	2.06
Na <sub>2</sub> O	-	63.81	0.05	8.54	0.23
K <sub>2</sub> O	0.06	-	-	1.72	0.07
SO <sub>3</sub>	0.03	-	-	-	-
LOI	0.1	36.03	42.98	-	3.4

ตารางที่ 3 แสดงสูตรแก้วทดลอง

วัตถุดิบ	สูตร (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D
พลวงอ็อกไซด์( $Sb_2O_3$ )	0.87	0.90	0.90	0.90
แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ )	4.75	2.17	4.90	2.60
หินปูน ( $CaCO_3$ )	7.83	-	-	11.00
วอลลาสไตต์ ( $CaSiO_3$ )	-	13.20	9.90	-
โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ )	7.80	-	8.05	0.80
โซเดียมฟอสเฟต ( $NaAlSiO_3$ )	-	9.00	-	9.05
ทราย ( $SiO_2$ )	60.10	53.33	56.90	53.45
โซดาแอช( $Na_2CO_3$ )	16.90	20.50	17.55	20.50
ซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ )	1.75	0.90	1.80	1.70

### 2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบสมบัติของแก้ว

2.3.1 ทำการทดสอบความสามารถในการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้วที่อุณหภูมิ 1,350°C ด้วยเตาไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาตรวจพินิจเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการหลอมของวัตถุดิบแต่ละสูตร

2.3.2 เตรียมตัวอย่างแก้วสำหรับทดสอบสมบัติด้านต่างๆ โดยใช้วัตถุดิบแก้ว 300 กรัม หลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,400 °C 2 ชั่วโมง เติแต่ละ batch ในแบบพิมพ์หลังจากนั้นจึงอบที่อุณหภูมิ 520 °C 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในเตาอบ นำมาวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Wavelength-dispersive XRF spectrometer (S8 Tiger Bruker AXSX) สมบัติการขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนด้วย วิธี dilatometric (NETZSCH DIL 402 PC) ความหนืดของแก้วด้วยวิธี fiber elongation (BAHR 402) ดัชนีหักเหแสงด้วยเครื่อง abbe refractometer (T1 Atago) ค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Buoyancy และ ค่าการส่องผ่านของแสงและสีด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer (Analytikjana Specord 250)

### 2.4 ทดลองหลอมแก้วในระดับอุตสาหกรรม

เลือกสูตรแก้วที่มีความเหมาะสมที่สุดพร้อมขยายปริมาณเป็น 200 กิโลกรัม นำไปหลอมในโรงงานแก้วด้วยเตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่องตามกระบวนการผลิตของโรงงาน หลังจากขึ้นรูปเป็นแก้วต้นแบบแล้ว จึงนำแก้วที่ได้ไปหาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของแก้วตามข้อ 2.3

## 3.ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

### 3.1 ค่าพลังงานทางทฤษฎีที่วัตถุดิบต้องการใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นเนื้อแก้ว (exploited heat, $H_{ex}$ )

ค่าพลังงานทางทฤษฎีที่วัตถุดิบต้องการใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นเนื้อแก้ว ที่อุณหภูมิ 1,400 °C แสดงดังตารางที่ 4

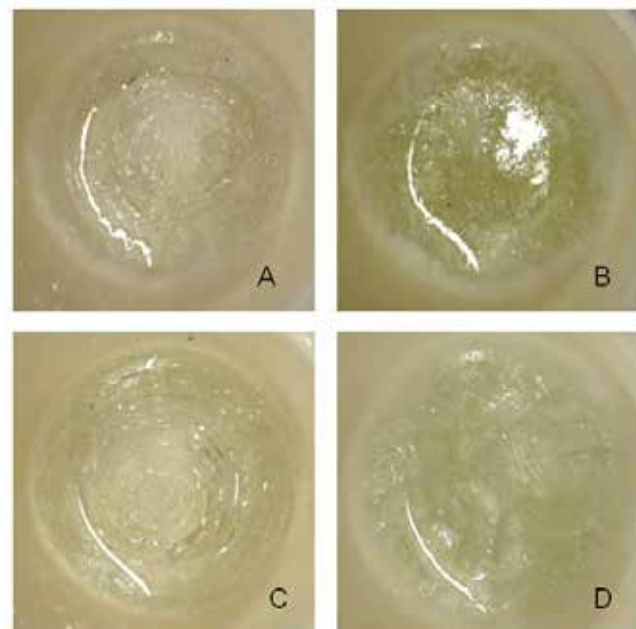
ตารางที่ 4 Thermodynamic calculation of exploited heat,  $H_{ex}$

Thermodynamic data	Batch			
	A	B	C	D
$H_{chem}^o$ (kWh/t)	157	117	140	137
$H_{ex}$ (kWh/t)	489	477	479	488

เนื่องจากแก้วแต่ละสูตรมีส่วนของวัตถุดิบแตกต่างกันทำให้ค่าที่คำนวณได้แตกต่างกัน ซึ่งสูตรที่มีแนวโน้มหลอมตัวได้ดีนั้นจะต้องมีค่าพลังงานทางเคมี และค่าพลังงานทางทฤษฎีต่ำ เนื่องจากมีความต้องการพลังงานในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าสูตรอื่น

### 3.2 ผลการทดสอบความสามารถของการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้ว

ผลการทดสอบความสามารถของการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แก้วที่หลอมที่อุณหภูมิ 1350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการทดลอง เมื่อตรวจพินิจพบว่าทั้ง 4 สูตรสามารถหลอมตัวได้ดี มีเฉพาะสูตร B ที่ยังคงเหลืออนุภาคที่ไม่หลอมบริเวณผิวแก้วเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสูตรที่มีวอลลาสโตไนต์แม้ว่าทางทฤษฎีจะมีค่าความต้องการใช้พลังงานต่ำกว่าสูตรอื่น แต่ในสูตรใช้วอลลาสโตไนต์ร่วมกับโซเดียมเฟลด์สปาร์ถึงเกือบร้อยละ 30 ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอื่นที่มีโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นตัวช่วยหลอม (fluxing agent) ในองค์ประกอบ [11]

### 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	แก้ว			
	A	B	C	D
SiO <sub>2</sub>	68.31	71.86	69.18	67.17
Na <sub>2</sub> O	13.39	15.12	12.68	16.52
K <sub>2</sub> O	5.59	0.20	5.58	0.35
CaO	5.10	6.51	4.83	7.81
MgO	0.04	0.33	0.22	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	2.00	0.23	2.67
BaO	4.12	1.80	4.15	2.27
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.07	0.05	0.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.07	0.04	0.04
ZnO	2.02	1.02	2.00	1.86
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.01	0.95	0.97	1.06
SO <sub>3</sub>	0.07	0.07	0.07	0.08

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Semi-quantitative ด้วยวิธี Wavelength-Dispersive X-ray Fluorescence พบว่าสูตรแก้วทั้งหมดมีปริมาณซิลิการ้อยละ 67-72 แอลคาไลน์ (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) ร้อยละ 15-19 แอลคาไลน์เอิร์ท (CaO, MgO) ร้อยละ 5-9 แบเรียมออกไซด์ (BaO) ร้อยละ 2-4 และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ร้อยละ 1-2

### 3.4 ผลการทดสอบการขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิสำคัญ

ผลการทดสอบการขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิสำคัญของแก้วที่ได้จากการวัดค่าความหนืด แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิสำคัญของแก้ว

แก้ว	Transformation point, Tg (°C)	Dilatometric softening point (°C)	Thermal expansion coefficient, 50-300 °C (°C <sup>-1</sup> )	strain point (°C)	softening point (°C)
A	493.1	570.2	11.13 × 10 <sup>-6</sup>	475.0	689.7
B	531.0	602.3	8.67 × 10 <sup>-6</sup>	511.9	730.7
C	496.0	564.0	10.84 × 10 <sup>-6</sup>	479.0	694.9
D	527.3	604.4	9.62 × 10 <sup>-6</sup>	509.5	719.8

จากผลพบว่าค่าการขยายตัว และอุณหภูมิสำคัญของแก้วมีความสัมพันธ์กับปริมาณซิลิกา โดยแก้ว B มีค่าการขยายตัวต่ำ เนื่องจากมีปริมาณซิลิกาสูงเมื่อเทียบกับแก้ว A ที่มีการขยายตัวสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณซิลิกาดำและแอลคาไลน์ (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) สูง [12] เมื่อเปรียบเทียบผลกับแก้วต้นแบบ พบว่าแก้ว D มีสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกันที่สุด

### 3.5 ผลการทดสอบดัชนีหักเหแสง ความหนาแน่น และสมบัติทางแสง

ผลการทดสอบดัชนีหักเหแสง ความหนาแน่น และสมบัติทางแสงแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 Refractive index, density and optical properties of glasses

Glass	Refractive index (nD)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	L* lightness	a* green-red	b* blue-yellow
A	1.525	2.58	95.87	-0.94	1.03
B	1.523	2.52	95.17	-1.40	1.63
C	1.521	2.57	95.67	-0.86	1.04
D	1.523	2.57	95.43	-0.83	1.03

แก้วตัวอย่างทั้ง 4 สูตร มีค่าดัชนีหักเหแสง และความหนาแน่นใกล้เคียงกับแก้วต้นแบบ ซึ่งสูงกว่าแก้วโซดาไลม์ทั่วไป ที่มีค่าดัชนีหักเหแสง 1.5 nD และความหนาแน่น 2.5 g/cm<sup>3</sup> เนื่องจากการใช้ BaCO<sub>3</sub> และ ZnO ในส่วนผสม [13] ส่วนผลการทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของแก้วด้วยเทคนิค UV-VIS Spectroscopy พบว่าแก้วทั้ง 4 สูตรมีค่าการวัดสีระบบ CIE L\*a\*b\* ที่แสดงว่ามีสีและความขาวสว่างใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตร B ที่มีค่าสีเขียวสูงกว่าสูตรอื่น เนื่องจากในสูตรใช้วอลลาสโตไนต์ซึ่งมีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 0.14 ดังตารางที่ 1 จึงทำให้ปรากฏสีเขียวดังกล่าว



### 3.6 การทดลองหลอมแก้วในระดับอุตสาหกรรม

เลือกสูตรแก้ว D นำไปทดลองการหลอมในโรงงานแก้วดังแสดงในรูปที่ 2 และได้ทำการทดสอบสมบัติของแก้วดังตารางที่ 8



รูปที่ 2 การทดลองหลอมแก้ว

ตารางที่ 8 สมบัติของแก้วสูตร D ที่หลอมในระดับอุตสาหกรรม

สมบัติ	
Transformation point, Tg (°C)	516.7
Dilatometric softening point (°C)	590.7
Thermal expansion coefficient, 50-300 °C (°C <sup>-1</sup> )	10.13 x 10 <sup>-6</sup>
Strain point	496.2
Annealing point	526.4
Softening point	708.6
Refractive index (nD)	1.52
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.51
Transmission (%)	84.11
L* lightness	94.41
a* green-red	-2.05
b* blue-yellow	0.61

การทดลองในโรงงานมีข้อจำกัดคือ โรงงานใช้เข้าหลอมซ้ำจากกระบวนการผลิตเดิม และอุณหภูมิการหลอมแก้วในโรงงานต่ำกว่า 1,350°C ผลการทดลองหลอมแก้วพบว่าแก้วหลอมตัวได้ดีแต่มีสีเขียว (a\* -2.05) มีฟองอากาศตกค้างภายในบางส่วน และมีสมบัติแตกต่างจากแก้วในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เข้าหลอมซ้ำเป็นผลให้มีแก้วสูตรเดิมของโรงงานตกค้างอยู่ และเนื่องจากอุณหภูมิการหลอมแก้วในโรงงานต่ำกว่า 1,350 °C

### 4. สรุป (Conclusion)

สูตรแก้วที่พัฒนาขึ้นสำหรับเตาหลอมแก้วชนิดไม่ต่อเนื่อง ประกอบด้วย ทราयर้อยละ 53.45 โซดาแอชร้อยละ 20.50 หินปูน ร้อยละ 11.00 โซเดียมฟอสเฟตสปาร์ ร้อยละ 9.05 แบเรียมคาร์บอเนต ร้อยละ 2.06 ซิงค์ออกไซด์ ร้อยละ 1.70 และ พลวงออกไซด์ ร้อยละ 0.90 สามารถหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิ 1,400°C และมีสมบัติทางแสงและความร้อนใกล้เคียงกับสูตรแก้วต้นแบบ การนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการปรับแต่งสูตรแก้วให้มีความเหมาะสมกับสภาวะการหลอมแก้วของแต่ละโรงงาน

## 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

รายงานฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการสนับสนุน ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นส่วนหนึ่งในโครงการพัฒนาเนื้อแก้วสำเร็จรูปชนิด อลูมิเนียมต่ำเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับและตกแต่ง

## 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] พรายพล คุ่มทรัพย์. *สถานการณ์พลังงานโลก: วิถุการณ์น้ำมันครั้งที่ 3*. การสัมมนาประจำปี เรื่องสถานการณ์พลังงานโลกและการปรับตัวของไทย คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2551, หน้า 1–32.
- [2] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2551. เอกสารเผยแพร่โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมโลหะ.[ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 1 มีนาคม 2558]. เข้าถึงจาก: [http://www.2dede.go.th/km\\_berc/downloads/menu4/เอกสารเผยแพร่/คู่มือ/08%20sec/09%20อุตสาหกรรมโลหะ/โลหะ.pdf](http://www.2dede.go.th/km_berc/downloads/menu4/เอกสารเผยแพร่/คู่มือ/08%20sec/09%20อุตสาหกรรมโลหะ/โลหะ.pdf)
- [3] TOOLEY, F. V. *The handbook of glass manufacture*. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Ashlee Publishing, 1984.
- [4] SHELBY, J. E. *Introduction to glass science and technology*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2005.
- [5] MEECHOOWAS, E., et al. Improve melting efficiency by Batch-to melt conversion. *Procedia Engineering*, 2012, 32, 956-961.
- [6] MEECHOOWAS, E., et al. Modified glass batch can have increased alumina content by using feldspar to improve glass properties. *Suranaree J. Sci Technol.*, 2013, 20(4), 309-315.
- [7] MEECHOOWAS, E., K. TAPASA, and T. JITWATCHARAKOMOL. Alternative soda-lime glass batch to reduce energy consumption. *Key. Eng. Mater.*, 2013, 545, 24-30.
- [8] MEECHOOWAS, E., et al. Low melting glass billets for pot furnace glass processing. *Key. Eng. Mater.*, 2014, 608, 295-300.
- [9] CONRADT, R. *The industrial glass-melting process. The SGTE casebook: Thermodynamics at work*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2008, pp. 282-303.
- [10] TAPASA, K. and T. JITWATCHARAKOMOL. Thermodynamic calculation of exploited heat used in glass melting furnace. *Procedia Engineering*, 2012, 32, 969-975.
- [11] BRAY, C. *Dictionary of Glass: Materials and Techniques*. 2<sup>nd</sup> ed. Pennsylvania : University of Pennsylvania Press, 2001.
- [12] FLUEGEL, A. Glass viscosity calculation based on a global statistical modeling approach. *Europ. J. Glass Sci. Technol. A*, 2007, 48, 13-30.
- [13] VOGEL, W. *Chemistry of glass*. Westerville, Ohio : The American Ceramic Society, 1985.