

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การผ่อนคลายในแก้ว	1
1.2 การเกิดแก้วและการแปรเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว	2
1.2.1 การเกิดแก้ว	2
1.2.2 การแปรเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว	4
1.3 ข้อมูลการทดลองเกี่ยวกับการผ่อนคลายในแก้ว	7
1.3.1 อุณหภูมิและการอบแก้ว	7
1.3.2 อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวของแก้ว	13
1.4 แก้วซิลิเกตตะกั่ว	17
1.4.1 ความหมายของแก้วซิลิเกตตะกั่ว	17
1.4.2 องค์ประกอบของแก้วซิลิเกตตะกั่ว	18
1.4.3 สมบัติของแก้วซิลิเกตตะกั่ว	19
1.4.4 เฟสในแก้วซิลิเกตตะกั่ว	20
1.4.5 บทบาทของตะกั่วที่มีต่อสมบัติของแก้ว	23
1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	26
1.6 ขอบเขตการวิจัย	26
บทที่ 2 การทดลอง	27
2.1 การเตรียมส่วนผสมแก้วซิลิเกตตะกั่วสูงในระบบ $K_2O - PbO - SiO_2$ และการหลอม	29

	หน้า
2.1.1 การเตรียมส่วนผสมแก้วซิลิเกตตะกั่วสูงในระบบ $K_2O - PbO - SiO_2$ ชนิดหนึ่ง	29
2.1.2 การหลอมส่วนผสมแก้วซิลิเกตตะกั่วสูง	29
2.2 การทำฟริต	29
2.3 การขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแก้ว	31
2.3.1 การขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแก้วสำหรับหาค่า T_g	31
2.3.2 การขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแก้วสำหรับหาค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น	31
2.4 การอบแก้ว	33
2.5 การเตรียมชิ้นทดสอบแก้วและการหาค่า T_g	33
2.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบแก้วสำหรับหาค่า T_g	33
2.5.2 การหาค่า T_g	34
2.6 การเตรียมชิ้นทดสอบแก้วและการหาค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่นก่อนทดลอง	35
2.6.1 การเตรียมชิ้นทดสอบแก้วสำหรับหาค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น	35
2.6.2 การวัดค่าดรรชนีหักเหก่อนทดลองของชิ้นทดสอบแก้ว	35
2.6.3 การวัดความหนาแน่นก่อนทดลองของชิ้นทดสอบแก้ว	38
2.7 การอบแก้วที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ	40
2.8 การให้ความร้อนและลดอุณหภูมิของชิ้นทดสอบแก้วด้วยอัตราการเย็นตัวต่างๆ	40
บทที่ 3 ผลการทดลอง	43
3.1 ผลการหลอมและการทำเป็นฟริตของแก้วซิลิเกตตะกั่วสูง	43
3.2 ผลการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแก้วสำหรับหาค่า T_g หาค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น	43
3.3 ผลการอบแก้ว	44
3.4 ผลการเตรียมชิ้นทดสอบแก้วและการหาค่า T_g	44

	หน้า
3.5 ผลการเตรียมขึ้นทดสอบแก้วและการหาค่าดรรชนีหักเห และความหนาแน่นเริ่มต้น	46
3.6 ผลการวัดค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น หลังอบแก้วที่สภาวะต่างๆ	50
3.7 ผลการวัดค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่นหลัง ลดอุณหภูมิด้วยอัตราต่างๆ	62
บทที่ 4 วิจัยรณและสรุปล	77
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก	86
ภาคผนวก ข	87
ภาคผนวก ช	88
ภาคผนวก ค	89
ภาคผนวก ค	90
ภาคผนวก ชม	91
ภาคผนวก ง	92
ภาคผนวก จ	93
ประวัติผู้เขียน	96

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	องค์ประกอบโดยประมาณของแก้วซิลิเกตตะกั่วที่ใช้ในงานในด้านต่างๆ	18
2	สมบัติบางอย่างของแก้วซิลิเกตตะกั่วทางการค้า	19
3	อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของแก้วซิลิเกตตะกั่ว	19
4	องค์ประกอบและอุณหภูมิการเกิดสารประกอบในระบบของ $K_2O - PbO - SiO_2$	23
5	ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของขึ้นทดสอบแก้วเมื่อได้รับความร้อน	45
6	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบแก้วก่อนทำการทดลอง	47
7	ความหนาแน่นของขึ้นทดสอบแก้วก่อนทำการทดลอง	49
8	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 175 °ซ	50
9	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 225 °ซ	51
10	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 275 °ซ	51
11	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 175 °ซ	52
12	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 225 °ซ	52
13	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบ 275 °ซ	53
14	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 175 °ซ	62
15	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 225 °ซ	63
16	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 275 °ซ	63
17	ค่าดรรชนีหักเหของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 325 °ซ	64
18	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 175 °ซ	64
19	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 225 °ซ	65
20	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 275 °ซ	65
21	ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 5 ชิ้นและค่าเฉลี่ยเมื่อลดอุณหภูมิจาก 325 °ซ	66

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1 การเกิดแก้วที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตร	3
2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสมบัติของแก้วอย่างใดอย่างหนึ่ง (P)	5
3 การอบแก้วที่ออกแบบมาสำหรับแก้วทางการค้า	8
4 แนวทางการอบแก้วในภาคปฏิบัติจริง	9
5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหและเวลาในการอบแก้วที่อุณหภูมิ 550 °ซ	10
6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหที่จุดสมมูลและอุณหภูมิในการอบแก้ว	11
7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ	12
8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่จุดสมมูลและอุณหภูมิอบแก้ว	13
9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก้วที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน	14
10 ความหนาแน่นของแก้วบอโรซิลิเกตควาร์นเทียบกับอุณหภูมิที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน	15
11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องและอัตราการเย็นตัว	16
12 ค่าดัชนีหักเหของแก้วบอเรต (B_2O_3 glass) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	16
13 การแบ่งกลุ่มขององค์ประกอบในระบบ $K_2O - PbO - SiO_2$	21
14 แผนภาพวิภูภาคในระบบสามองค์ประกอบของ $K_2O - PbO - SiO_2$	22
15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PbO กับค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่น	24
16 ค่าดัชนีหักเห การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนและจุดเริ่มอ่อนตัวของแก้วในระบบสามองค์ประกอบของ $K_2O - PbO - SiO_2$	25
17 แผนการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการผ่อนคลายในแก้วซิลิเกตที่มีปริมาณตะกั่วสูง	28

รูป	หน้า
18 การเปิดประตูเตาและใช้คีมคีบเบ้าหลอมแก้วออกจากเตาหลอม	30
19 การทำฟริตด้วยการเทน้ำแก้วเหลวลงในน้ำ	30
20 การเทแก้วเหลวลงในแบบพิมพ์โลหะ	32
21 แก้วเหลวที่แข็งตัวแล้วในแบบพิมพ์โลหะ	32
22 การตัดชิ้นงานแก้วด้วยเครื่องตัด	33
23 การขัดชิ้นทดสอบแก้วด้วยเครื่องขัด	34
24 การติดตั้งเครื่อง Dilatometer	35
25 จุดไฟกั๊สทั้ง 3 จุดในการวัดค่าดรรชนีหักเหด้วยเทคนิค Direct method	36
26 การติดตั้งเครื่องมือและการหาค่าดรรชนีหักเหด้วยเทคนิค Direct method	37
27 การติดตั้งเครื่องมือในการหาความหนาแน่นด้วยวิธีชั่งน้ำหนักในน้ำ	39
28 การหย่อนชิ้นทดสอบแก้วลงในหลอดถ่วงน้ำหนักที่จมอยู่ในน้ำ	39
29 เตาไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแก้ว และให้ความร้อน พร้อมกับลดอุณหภูมิด้วยอัตราการเย็นตัวต่างๆ	41
30 ชิ้นทดสอบแก้วทั้งก่อนและหลังตัดเพื่อหาค่า T_g	44
31 กราฟความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นทดสอบแก้วเมื่อได้รับความร้อน	46
32 ชิ้นทดสอบแก้วทั้งก่อนและหลังตัดเพื่อหาค่าดรรชนีหักเห และความหนาแน่น	47
33 กราฟค่าดรรชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 175 °ซ	54
34 กราฟค่าดรรชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 225 °ซ	55
35 กราฟค่าดรรชนีหักเหเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 275 °ซ	56
36 กราฟค่าดรรชนีหักเหเฉลี่ยเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ	57
37 กราฟความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 175 °ซ	58
38 กราฟความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 225 °ซ	59
39 กราฟความหนาแน่นเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิ 275 °ซ	60
40 กราฟความหนาแน่นเฉลี่ยเทียบกับเวลาอบแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ	61
41 กราฟค่าดรรชนีหักเหเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 175 °ซ	67

รูป	หน้า
42 กราฟค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 225 °ซ	68
43 กราฟค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 275 °ซ	69
44 กราฟค่าดัชนีหักเหเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 325 °ซ	70
45 กราฟค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	71
46 กราฟความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 175 °ซ	72
47 กราฟความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 225 °ซ	73
48 กราฟความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 275 °ซ	74
49 กราฟความหนาแน่นเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 325 °ซ	75
50 กราฟความหนาแน่นเฉลี่ยเทียบกับอัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	76

อักษรย่อและสัญลักษณ์

T_g	อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นแก้ว
η	ความหนืด
Pa s	ปาสคาล – วินาที (หน่วยของความหนืด)
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
n	ค่าดัชนีหักเห
T_f	จุดเยือกแข็ง
T_m	จุดหลอมตัว
T_s	จุดอ่อนตัว
T_a	จุดอบแก้ว
T_{st}	จุดเครียด
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิ
ΔL	ผลต่างของความยาว
N_e	ค่าดัชนีหักเหที่จุดสมมูล
V	ปริมาตร
ρ	ความหนาแน่น
ลบ.ชม.	ลูกบาศก์เซนติเมตร
wt%	ร้อยละโดยน้ำหนัก
mol%	ร้อยละโดยโมล
psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
μ/cm	ไมครอนต่อเซนติเมตร
ASTM	American Society for Testing and Materials
S.D.	Standard deviation