

























## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

แก้วตัวอย่างเตรียมจากสูตร  $(65-x)\text{SiO}_2 : 25\text{Na}_2\text{O} : 10\text{CaO} : x\text{Cr}_2\text{O}_3$  โดยเจือปริมาณโครเมียมที่ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% ด้วยวิธีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (normal melt-quenching technique) และหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 1200, 1300, 1400 และ 1500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อมานำแก้วที่หลอมได้เทลงสแตนเลสโมลด์อย่างรวดเร็ว และอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำแก้วตัวอย่างมาตัดที่ขนาดประมาณ  $1.0 \times 1.5 \times 0.3 \text{ cm}^3$  และขัดให้เรียบ แก้วตัวอย่างที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าแก้วตัวอย่างมีสีเหลืองอมเขียวขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์สูงขึ้น

Concentration of $\text{Cr}_2\text{O}_3$ in $(65-x)\text{SiO}_2:10\text{CaO}:25\text{Na}_2\text{O}:x\text{Cr}_2\text{O}_3$ (%mol)						
Temperatures	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
1,200						
1,300						
1,400						
1,500						

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายแก้วตัวอย่างเมื่อเจือโครเมียมที่ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% และหลอมที่อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400 และ 1500°C

ผลการหาความหนาแน่น ปริมาตรเชิงโมลาร์ ดัชนีหักเห ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล ค่าดัชนีสี และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง ATR-FTIR ของแก้วตัวอย่าง ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป

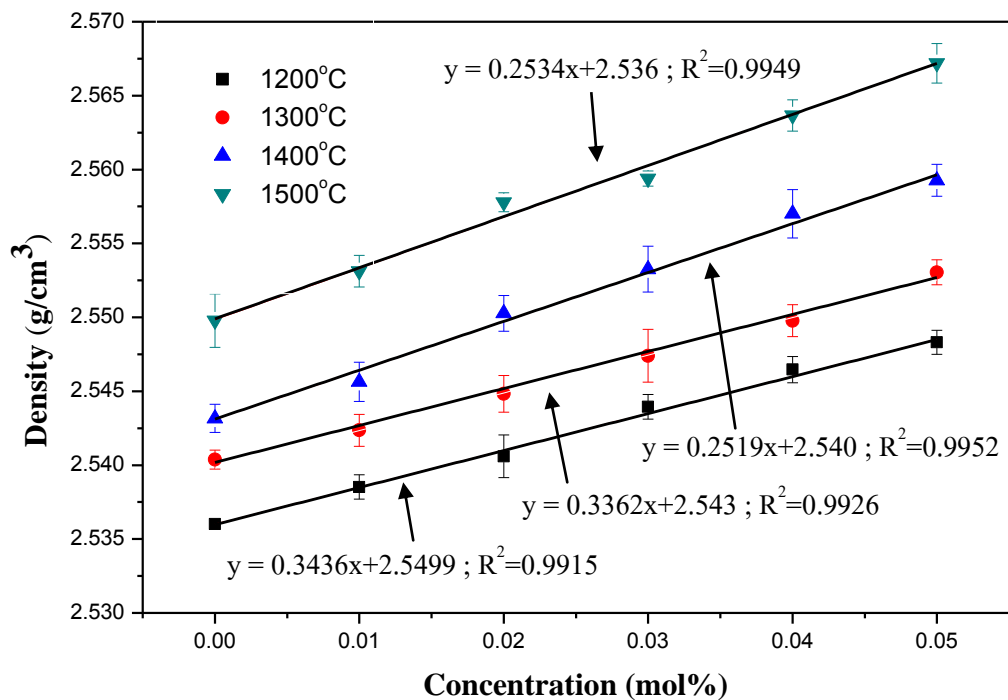
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

ผลของการหาความหนาแน่นของแก้วระบบโซดาไลม์ซิลิเกตที่ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% ที่อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400 และ 1500°C นาน 3 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์และหลอมที่อุณหภูมิต่างๆ

โครเมียม ออกไซด์ในแก้ว ตัวอย่าง (mol%)	ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง (g/cm <sup>3</sup> )			
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C
0.00	2.5360±0	2.5403±0.0006	2.5432±0.0010	2.5498±0.0018
0.01	2.5385±0.0008	2.5423±0.0010	2.5456±0.0013	2.5531±0.0011
0.02	2.5405±0.0014	2.5448±0.0012	2.5503±0.0012	2.5578±0.0006
0.03	2.5439±0.0008	2.5473±0.0018	2.5533±0.0016	2.5594±0.0005
0.04	2.5464±0.0009	2.5497±0.0011	2.5570±0.0016	2.5637±0.0011
0.05	2.5483±0.0008	2.5530±0.0008	2.5593±0.0011	2.5672±0.0013

จากตารางที่ 4.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 2.5360-2.5672 g/cm<sup>3</sup> โดยค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์และอุณหภูมิการหลอมสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ และอุณหภูมิหลอมต่างๆ

จากการศึกษาความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างดังรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมมากขึ้น ส่งผลให้แก้วตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของโครเมียมออกไซด์ ที่แทนที่ซิลิกอนออกไซด์มีค่ามากกว่า โดยโครเมียมออกไซด์ 1 โมเลกุล มีน้ำหนัก 151.9904 g/mol และซิลิกอนออกไซด์ 1 โมเลกุล มีน้ำหนัก 60.0843 g/mol และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในเงื่อนไขแล้วพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นด้วย อาจเนื่องมาจากการหดตัวของพันธะ ทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลมีค่าลดลง

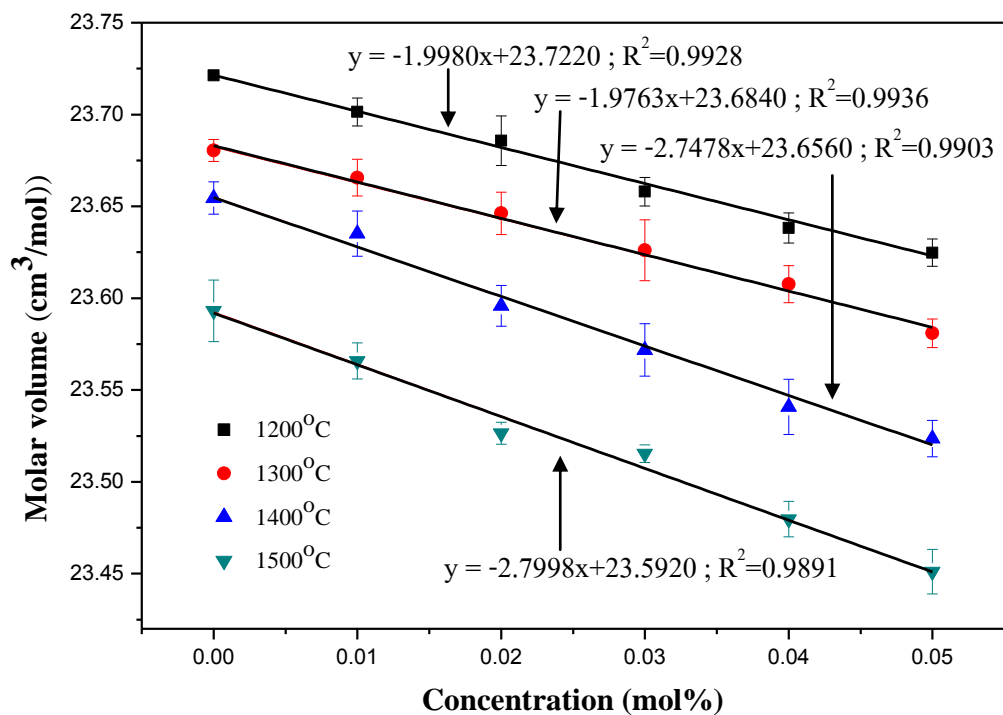
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาตรเชิงโมลาร์

ผลของการหาปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วระบบโซดาไลม์ซิลิเกตที่ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% ที่อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400 และ 1500°C นาน 3 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่างเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

โครเมียม ออกไซด์ในแก้ว ตัวอย่าง (mol%)	ปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> /mol)			
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C
0.00	23.7212±0	23.6804±0.0060	23.6545±0.0088	23.5932±0.0167
0.01	23.7013±0.0076	23.6656±0.0099	23.6545±0.0123	23.5658±0.0098
0.02	23.6857±0.0135	23.6462±0.0115	23.6351±0.0111	23.5268±0.0059
0.03	23.6580±0.0078	23.6261±0.0166	23.5958±0.0143	23.5154±0.0047
0.04	23.6383±0.0082	23.6076±0.0100	23.5408±0.0150	23.4797±0.0097
0.05	23.6248±0.0075	23.5810±0.0078	23.5239±0.0099	23.4510±0.0121

จากตารางที่ 4.2 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 23.4510-23.7212 cm<sup>3</sup>/mol โดยค่าปริมาตรเชิงโมลาร์มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์และอุณหภูมิการหลอมสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับปริมาตรเชิงโมลาร์แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาตรเชิงโมลาร์ของแก้วตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆและอุณหภูมิหลอมต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากราฟปริมาตรเชิงโมลาร์มีค่าลดลง ซึ่งตรงข้ามกับกราฟของความหนาแน่น โดยปริมาตรเชิงโมลาร์ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลของแก้วตัวอย่าง อย่างไรก็ตามผลของปริมาตรเชิงโมลาร์ที่ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ของโครเมียมซึ่งมีแขนพันธะที่สั้นกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ ส่งผลให้โครงสร้างของแก้วตัวอย่างเกิดการยุบตัวลง และมีการแพ็คตัวกันแน่นขึ้น

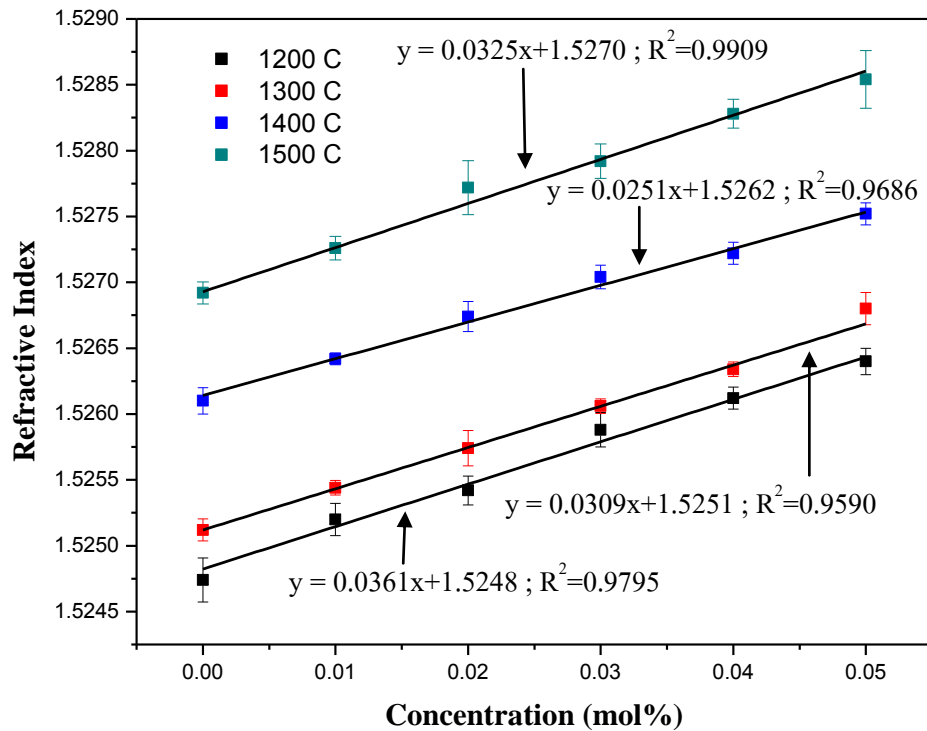
### 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห

ผลการวัดค่าดัชนีหักเหของแก้วระบบ โซดาไลม์ซิลิเกตที่ความเข้มข้น 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 mol% ที่อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400 และ 1500°C นาน 3 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

โครเมียม ออกไซด์ในแก้ว ตัวอย่าง (mol%)	ดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่าง			
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C
0.00	1.5247±0.0002	1.5251±0.0001	1.5261±0.0001	1.5269±0.0001
0.01	1.5252±0.0001	1.5254±0.0001	1.5264±0.0001	1.5273±0.0001
0.02	1.5254±0.0001	1.5257±0.0001	1.5267±0.0001	1.5277±0.0002
0.03	1.5259±0.0001	1.5261±0.0001	1.5270±0.0001	1.5279±0.0001
0.04	1.5261±0.0001	1.5263±0.0001	1.5272±0.0001	1.5283±0.0001
0.05	1.5264±0.0001	1.5268±0.0001	1.5275±0.0001	1.5285±0.0002

จากตารางที่ 4.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 1.5247-1.5285 โดยค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์และอุณหภูมิการหลอมสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าดัชนีหักเหแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ และอุณหภูมิหลอมต่างๆ

ดัชนีหักเหถูกวัดด้วยเครื่อง abbe refractometer สามารถวัดดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.30 ถึง 1.79 และมีความละเอียด 0.0001 จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวและความเข้มข้นของโครเมียมสูงขึ้น จะส่งผลให้ดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับความหนาแน่น โดยความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แสงเดินทางได้ช้าลง ซึ่งอาจถูกเปลี่ยนทิศทางหรือเกิดการหักเหขึ้น เมื่ออัตราเร็วของแสงในตัวกลางน้อยลง จะทำให้ดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากดัชนีหักเหของแสงเป็นอัตราส่วนของค่าความเร็วแสงในสุญญากาศเทียบกับค่าความเร็วแสงของตัวกลาง ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.3

ค่าดัชนีหักเหมมีความสัมพันธ์กับค่าหักเหเชิงโมลตามสมการของ Volf-Lorentz ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.3 และค่าหักเหเชิงโมลสัมพันธ์กับโพลาริซิบิลิตี ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.4 โดยค่าหักเหเชิงโมลและค่าโพลาริซิบิลิตี สามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 คำนีหักเหเชิงโมลาร์ของตัวอย่างแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ

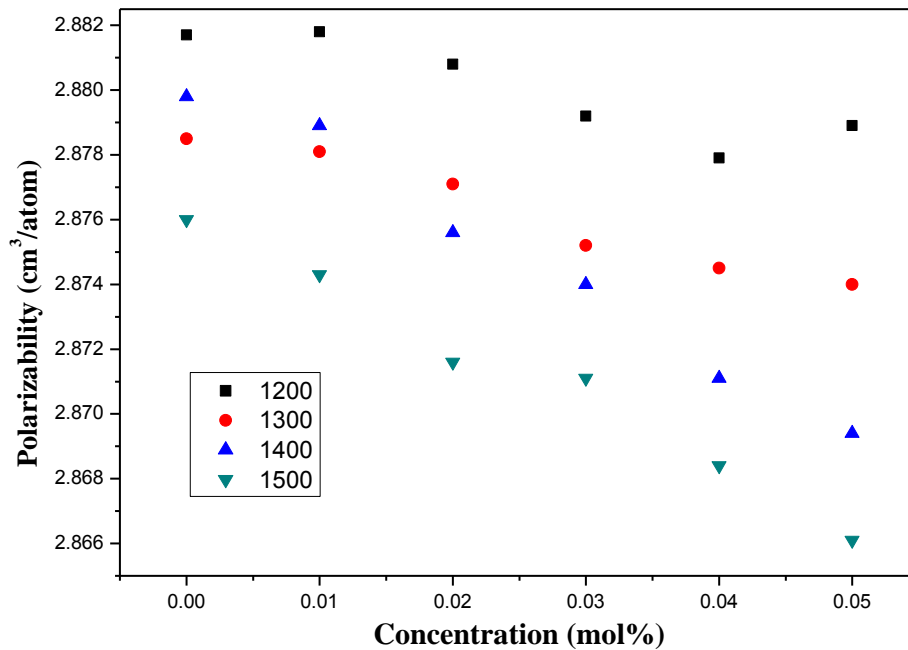
โครเมียม ออกไซด์ในแก้ว ตัวอย่าง (mol%)	ค่าหักเหเชิงโมล ( $\text{cm}^3$ )			
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C
0.00	7.2666	7.2585	7.2618	7.2525
0.01	7.2670	7.2586	7.2596	7.2480
0.02	7.2645	7.2551	7.2512	7.2412
0.03	7.2604	7.2503	7.2473	7.2400
0.04	7.2571	7.2486	7.2398	7.2332
0.05	7.2596	7.2473	7.2357	7.2273

จากตารางที่ 4.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าหักเหเชิงโมลของแก้วตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 7.2273-7.2666  $\text{cm}^3$  โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น สำหรับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีแนวโน้ม

ตารางที่ 4.5 ค่าโพลาไรซิบิลิตีของตัวอย่างแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ

โครเมียม ออกไซด์ในแก้ว ตัวอย่าง(mol%)	ค่าโพลาไรซิบิลิตี ( $\text{cm}^3/\text{atom}$ )			
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C
0.00	2.8817	2.8785	2.8798	2.8760
0.01	2.8818	2.8781	2.8789	2.8743
0.02	2.8808	2.8771	2.8756	2.8716
0.03	2.8792	2.8752	2.8740	2.8711
0.04	2.8779	2.8745	2.8711	2.8684
0.05	2.8789	2.8740	2.8694	2.8661

จากตารางที่ 4.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าโพลาไรซิบิลิตีของแก้วตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 2.8661-2.8818  $\text{cm}^3/\text{atom}$  ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์และอุณหภูมิการหลอมเพิ่มสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าโพลาไรซิบิลิตีแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



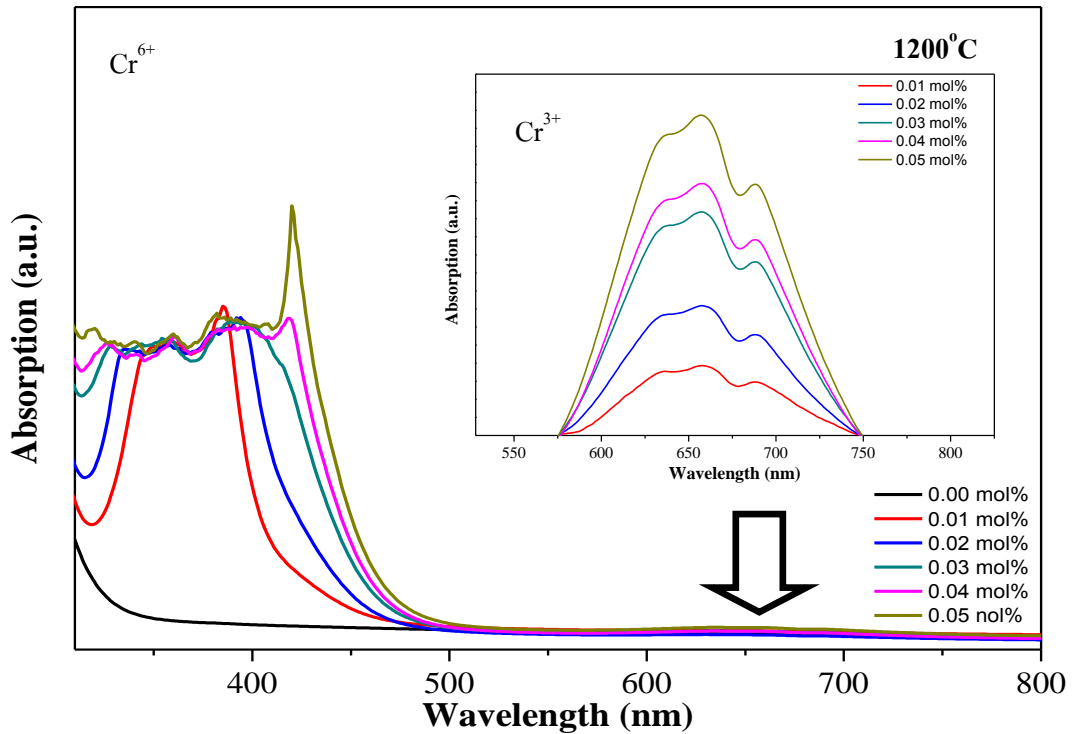
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับโพลาไรซิเบิลิตี้ของแก้วตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าดัชนีหักเหของแก้วตัวอย่างไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับค่าโพลาไรซิเบิลิตี้ด้วย โดยค่าโพลาไรซิเบิลิตี้มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกับมวลโมเลกุลของแก้วมีค่าลดลง ค่าโพลาไรซิเบิลิตี้มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าลดลงด้วย ซึ่งสามารถสนับสนุนผลการทดลองได้ว่าแก้วตัวอย่างมีช่องว่างระหว่างอะตอมน้อยลง ทำให้แก้วมีการแพ็คตัวแน่นมากขึ้น

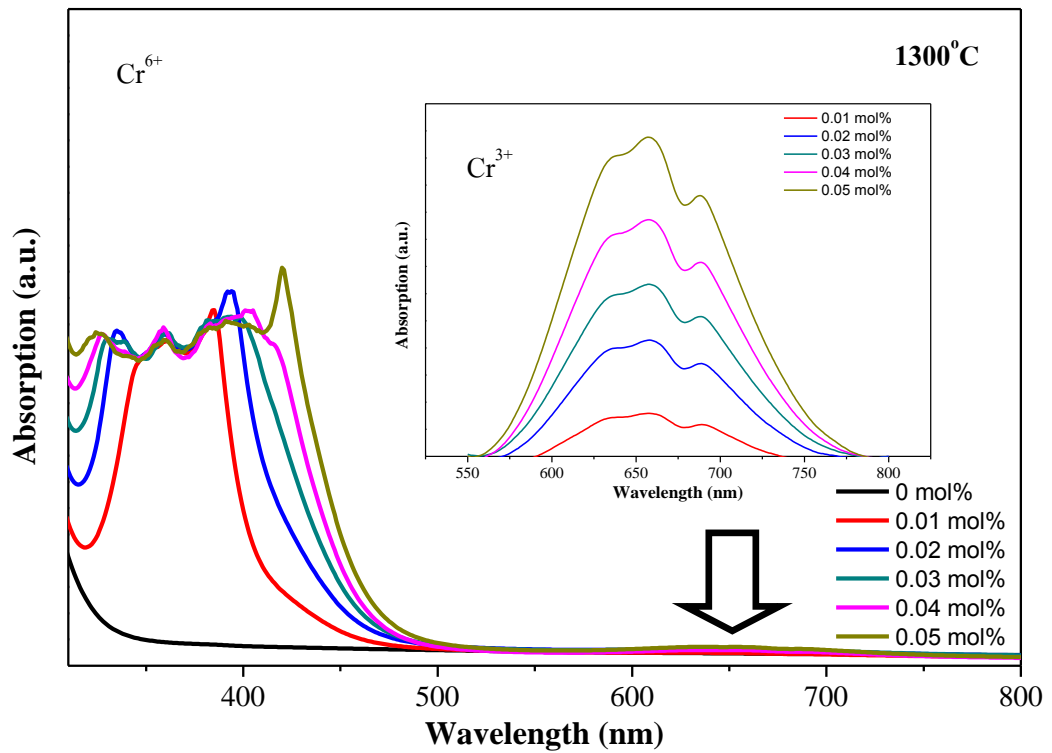
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล

การวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 nm ณ อุณหภูมิห้อง พบว่ามีแถบการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 330, 360 และ 380 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงไอออนของโครเมียมประจุ 6+ แบบทรงแปดหน้าแบบสมมาตร ในระดับชั้นพลังงาน  $^4A_2 \rightarrow ^4T_1(P)$  โดยทั้งสามแถบการดูดกลืนนี้เป็นช่วงการดูดกลืนแสงสีม่วง สีที่ให้เห็นได้ คือ สีเหลือง แต่จากการวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อสังเกตในช่วงความยาวคลื่น 550-800 nm พบการดูดกลืนแสงประมาณ 630, 655 และ 680 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงไอออนของโครเมียมประจุ 3+ แบบทรงสี่หน้า ในระดับชั้นพลังงาน  $^4A_2 \rightarrow ^4T_2$  โดยทั้งสามแถบการดูดกลืนนี้เป็นช่วงการดูดกลืนแสงสีแดง สีที่ให้เห็นได้ คือ สีเขียว ในช่วงความยาวคลื่นนี้พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแถบการดูดกลืนของโครเมียมประจุ 6+ พบว่าในช่วงความยาวคลื่นของโครเมียมประจุ 3+ มีค่าต่ำกว่ามาก ผลของการวัดจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในโหมดการวัดค่าดัชนีสี หรือ CIE  $L^*a^*b^*$  แก้วตัวอย่างก่อนเจือโครเมียมออกไซด์จะไม่มีสี

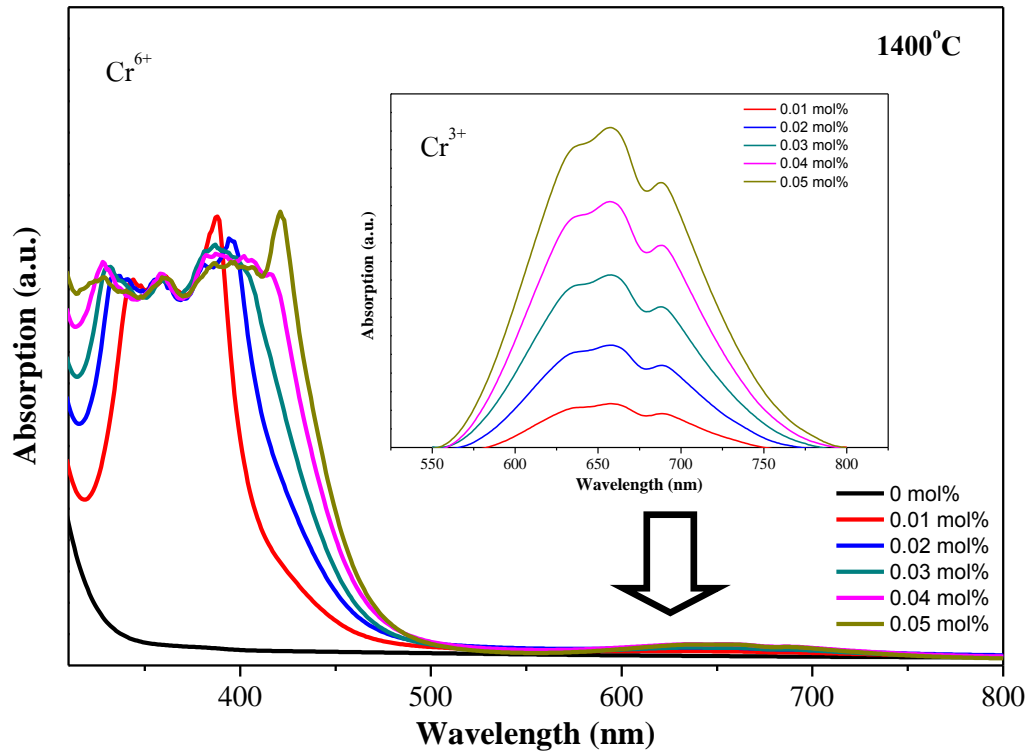
ส่วนแก้วตัวอย่างที่เจือโครเมียมออกไซด์จะมีสีเหลืองอมเขียว และมีสีเขียวเข้มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลไม่ชัดเจนกับสีของแก้วตัวอย่าง



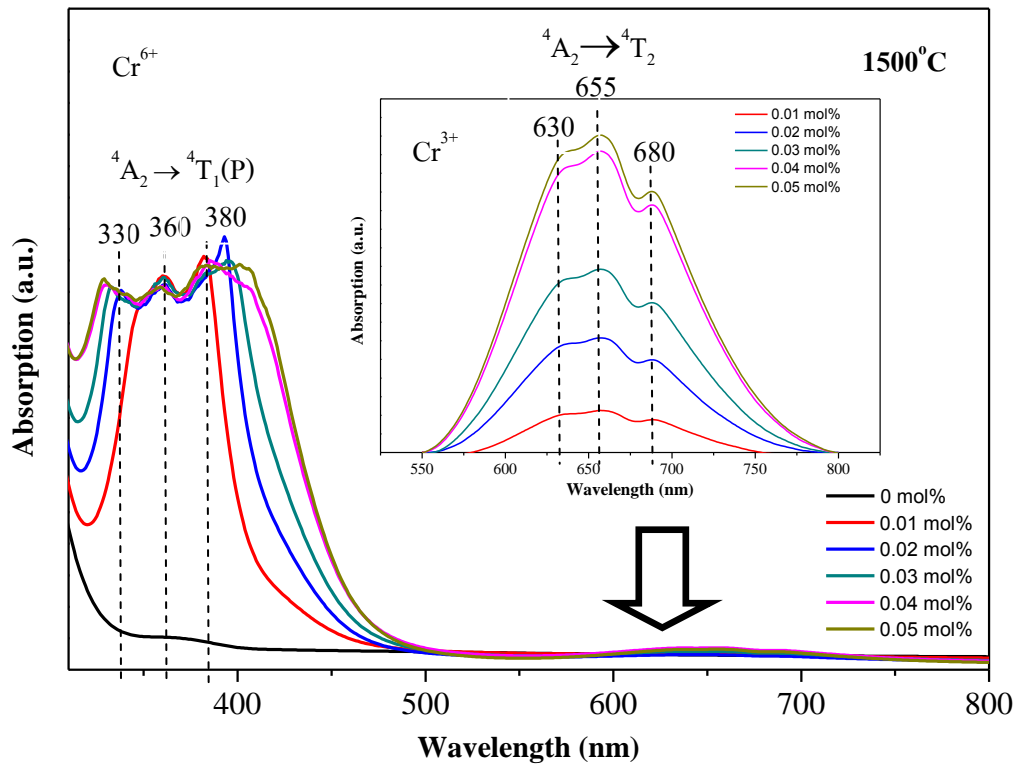
(ก)



(ข)



(ก)



(ง)

รูปที่ 4.6 กราฟการดูดกลืนแสงเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์เมื่อหลอมที่อุณหภูมิ (ก) 1200°C (ข) 1300°C (ค) 1400°C (ง) 1500°C

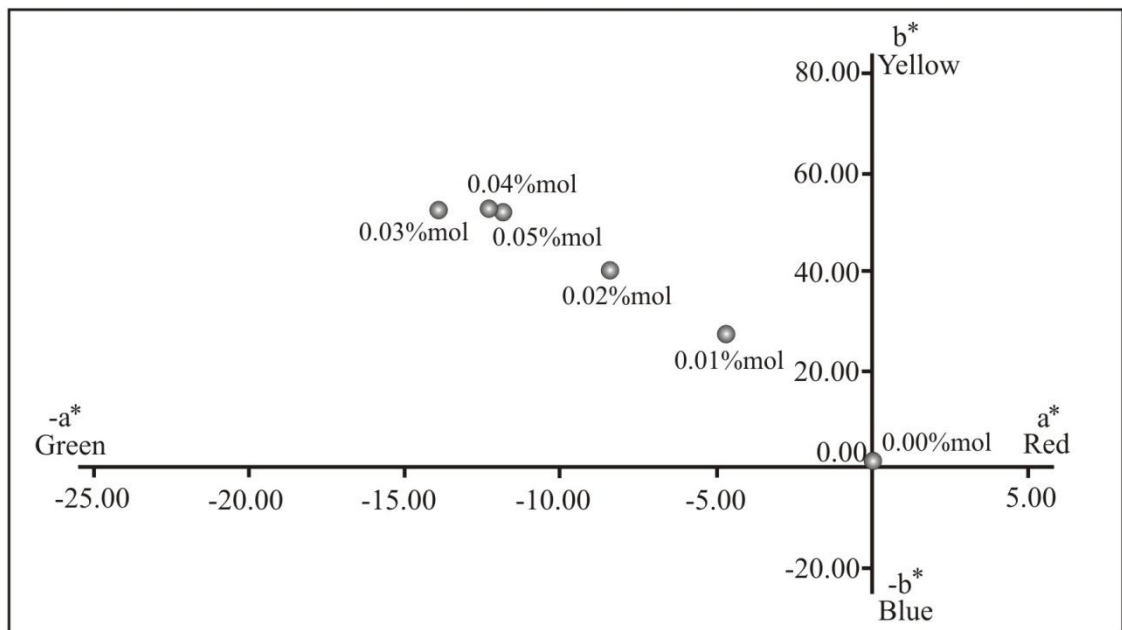
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีสี

การวัดค่าดัชนีสีจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในระบบ CIE L\*a\*b\* โดย L คือ ค่าความส่องสว่าง (a, -a) คือ ค่าแกนสีแดง-เขียว (b, -b) คือ ค่าแกนสีเหลือง-น้ำเงิน พบว่าก่อนเจือด้วยโครเมียม แก้วตัวอย่างจะใสไม่มีสี ค่าดัชนีสี (a,b) จะอยู่ที่ประมาณ (0,0) จนกระทั่งเจือความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้น สีของแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มไปทางสีเหลืองอมเขียว โดยมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเกิดจากโครเมียมประจุ 6+ ที่แถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ 330, 360 และ 380 nm เมื่อสังเกตค่าความส่องสว่าง (L) พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์ในแก้วตัวอย่างส่งผลต่อค่าดัชนีสีอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการหลอมพบว่าค่าดัชนีมีแนวโน้มไปทางสีเหลืองอมเขียวเช่นกัน แต่ไม่ชัดเจนเท่ากับการเปรียบเทียบจากความเข้มข้น และค่าความส่องสว่างของแก้วเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการหลอมพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้น ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6-4.9 และกราฟค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.7-4.10

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสีตามระบบ CIE L\*a\*b\* ของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1200°C

รหัสตัวอย่างแก้ว	x (%mol)	Color measurement		
		L*	a*	b*
T12Cr0	0.00	84.9508	0.1239	1.2817
T12Cr1	0.01	66.1174	-4.7139	27.0961
T12Cr2	0.02	71.2790	-8.4521	40.1187
T12Cr3	0.03	76.1211	-13.8406	52.1336
T12Cr4	0.04	67.0185	-12.2436	52.5263
T12Cr5	0.05	59.5749	-11.8174	51.6319

จากตารางที่ 4.6 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1200°C พบว่าค่าความสว่างอยู่ในช่วง 59.5749-84.9508 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์สูงขึ้น เมื่อวัดแนวโน้มของสีที่เกิดขึ้นพบว่าแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง-เขียว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าดัชนีสีแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

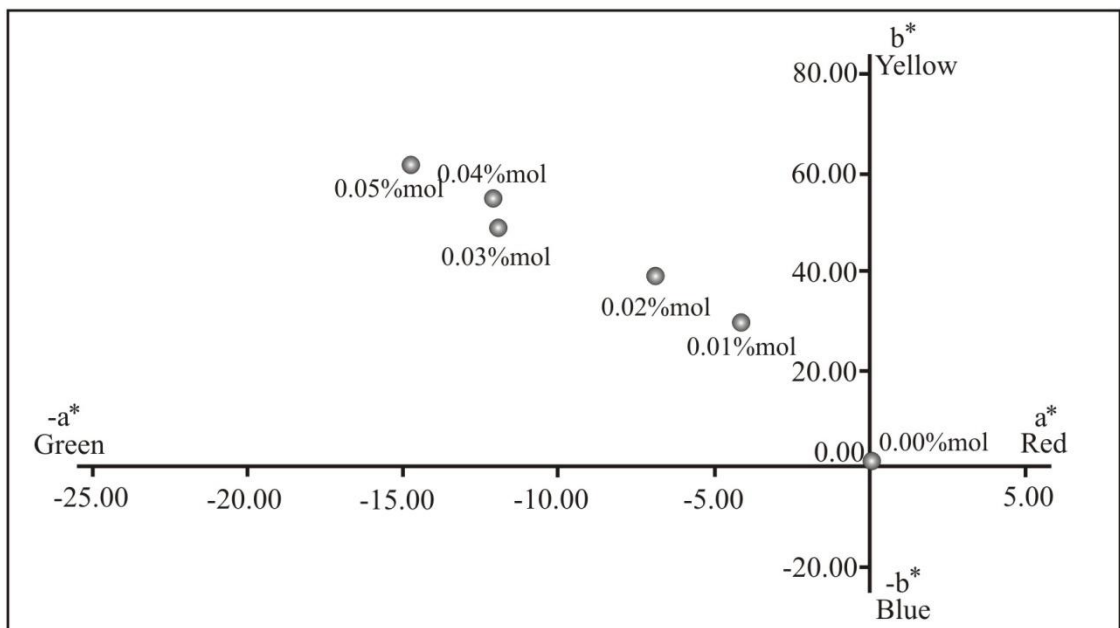


รูปที่ 4.7 ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1200°C

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสีตามระบบ CIE L\*a\*b\* ของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1300°C

รหัสตัวอย่างแก้ว	x (%mol)	Color measurement		
		L*	a*	b*
T13Cr0	0.00	81.4291	0.1239	1.2817
T13Cr1	0.01	71.2184	-4.1576	29.4819
T13Cr2	0.02	66.6031	-6.9232	39.2334
T13Cr3	0.03	73.5319	-11.9784	48.6947
T13Cr4	0.04	73.0325	-12.1230	54.5549
T13Cr5	0.05	74.3712	-14.7382	61.4925

จากตารางที่ 4.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1300°C พบว่าค่าความสว่างอยู่ในช่วง 66.6031-81.4297 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์สูงขึ้น เมื่อวัดแนวโน้มของสีที่เกิดขึ้นพบว่าแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง-เขียว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าดัชนีสีแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

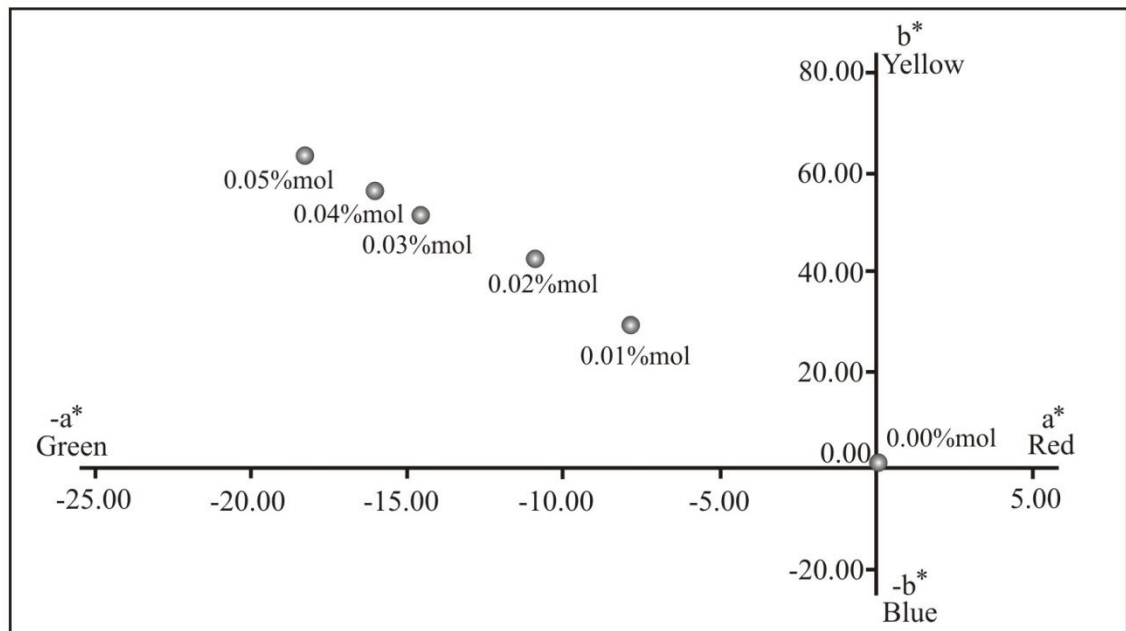


รูปที่ 4.8 ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1300°C

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสีตามระบบ CIE L\*a\*b\* ของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400°C

รหัสตัวอย่างแก้ว	x (%mol)	Color measurement		
		L*	a*	b*
T14Cr0	0.00	81.5388	0.1239	1.2817
T14Cr1	0.01	77.0029	-7.8280	29.3624
T14Cr2	0.02	76.1085	-10.9191	42.5921
T14Cr3	0.03	78.7903	-14.5568	51.4892
T14Cr4	0.04	75.3596	-16.0211	56.3629
T14Cr5	0.05	77.8394	-18.3008	63.2704

จากตารางที่ 4.8 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400°C พบว่าค่าความสว่างอยู่ในช่วง 75.3596-81.5388 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์สูงขึ้น เมื่อวัดแนวโน้มของสีที่เกิดขึ้นพบว่าแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง-เขียว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าดัชนีสีแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

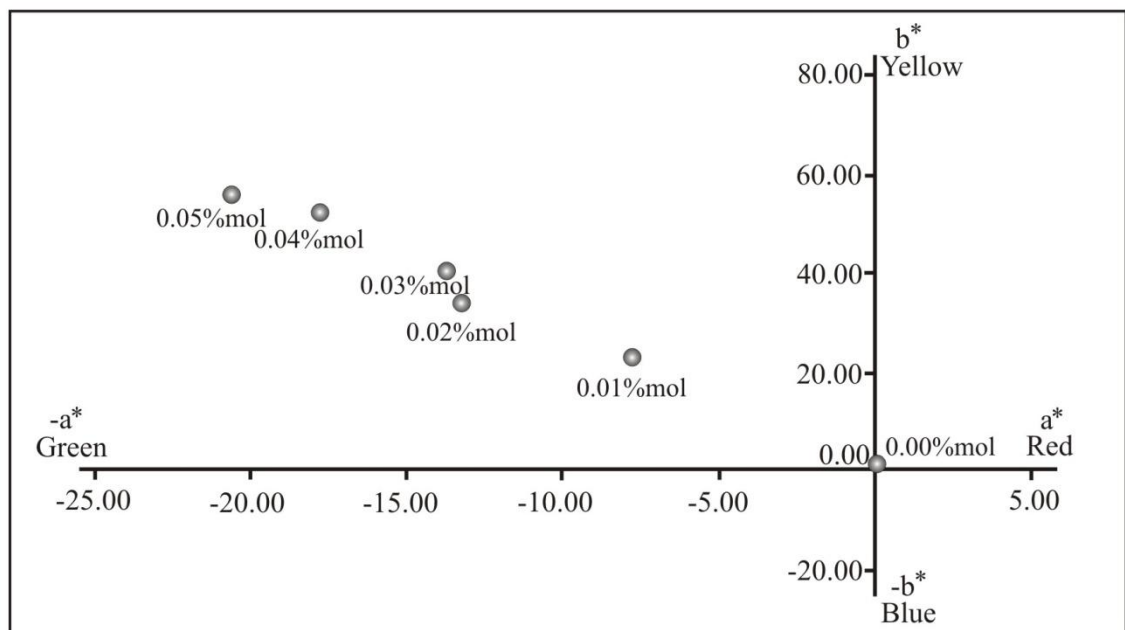


รูปที่ 4.9 ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400°C

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าสีตามระบบ CIE L\*a\*b\* ของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1500°C

รหัสตัวอย่าง แก้ว	x (%mol)	Color measurement		
		L*	a*	b*
T15Cr0	0.00	88.9247	0.1239	1.2817
T15Cr1	0.01	81.5031	-7.7978	23.2972
T15Cr2	0.02	77.4148	-13.2046	34.1159
T15Cr3	0.03	69.7656	-13.7529	40.4463
T15Cr4	0.04	76.0271	-17.7702	52.3492
T15Cr5	0.05	80.9824	-20.5565	55.8897

จากตารางที่ 4.9 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400°C พบว่าค่าความสว่างอยู่ในช่วง 69.7656-88.9247 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์สูงขึ้น เมื่อวัดแนวโน้มของสีที่เกิดขึ้นพบว่าแก้วตัวอย่างมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง-เขียว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมออกไซด์กับค่าดัชนีสีแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



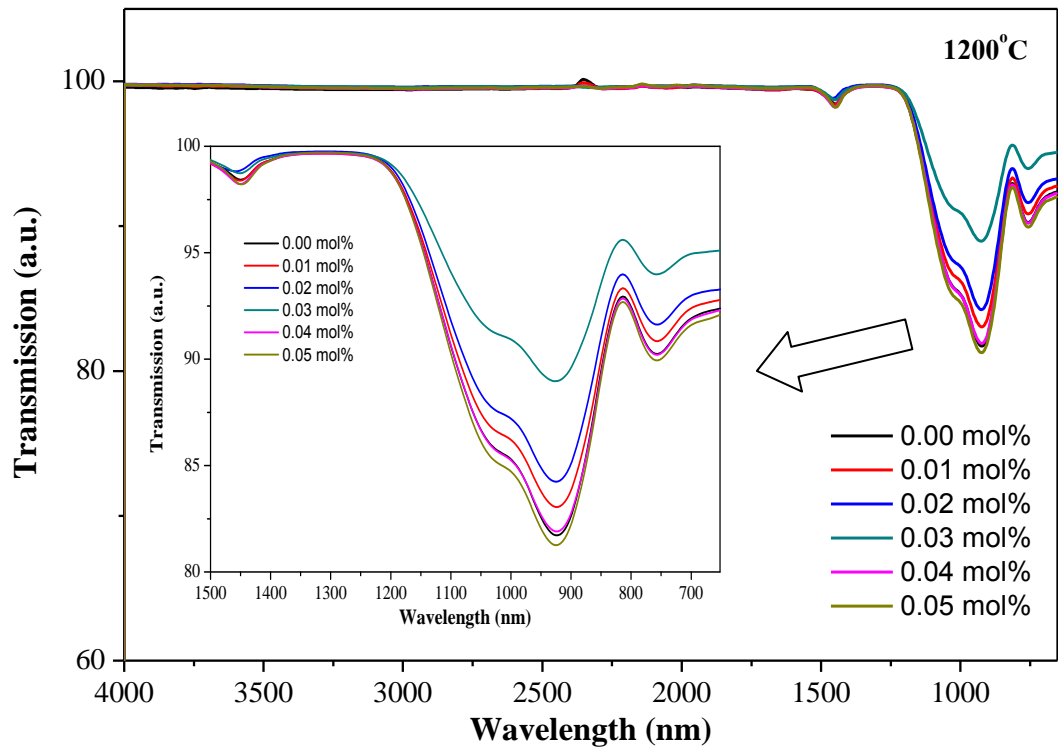
รูปที่ 4.10 ค่าดัชนีสีของแก้วตัวอย่างเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1500°C

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด

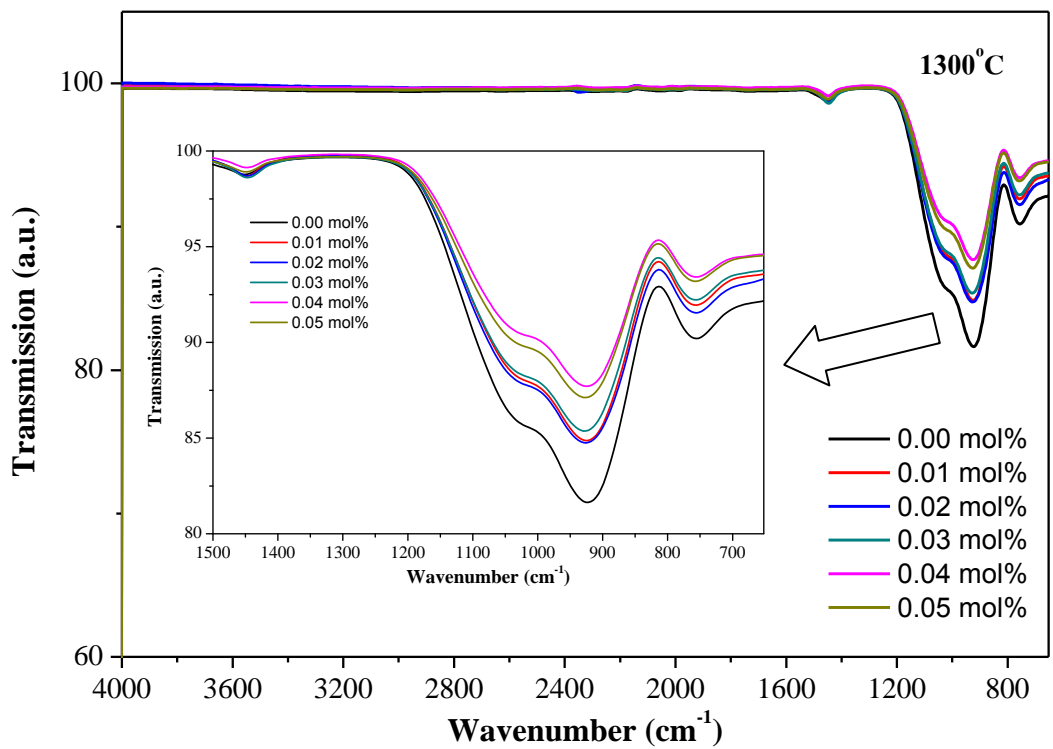
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสาร โดยศึกษาทรานซิชันการสั่นของหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะ โควา-เลนต์ของโมเลกุลของสารนั้นๆ เมื่อสารตัวอย่างได้รับรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมจะเกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วของโมเลกุล โดยโมเลกุลที่มีความถี่ตรงกับความถี่การสั่นของพันธะใดๆ จะทำให้แอมพลิจูดของการสั่นของพันธะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงโมเลกุลอยู่ในสถานะเร้า (excited vibrational state) เมื่อจะกลับคืนสู่สถานะปกติ (ground vibrational state) พลังงานที่ถูกดูดเข้าไปจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อน ทั้งนี้การดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะ และมวลของอะตอมระหว่างพันธะด้วย นอกจากนี้พันธะอย่างเดียวกันในโมเลกุลอาจดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดได้มากกว่าหนึ่งความถี่ด้วย โมเลกุลที่ดูดกลืนแสงจะมีความสัมพันธ์กับเลขคลื่น ซึ่งลักษณะสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ สำหรับการส่งผ่านอินฟราเรดบันทึกค่าตั้งแต่ความถี่  $650\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าซิลิกอนไดออกไซด์มีโหมดการสั่นหลักๆของกลุ่ม Si-O-Si 2 กลุ่ม ที่ช่วงเลขคลื่น  $759\text{-}1030\text{ cm}^{-1}$  โดยพีกแรกเกิดการดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่นประมาณ  $1030\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับการยืด-หดของพันธะ Si-O-Si แบบไม่สมมาตร ที่พันธะที่เชื่อมกับออกซิเจนเปลี่ยนทิศทางเป็นตรงกันข้ามกับซิลิกอนของอะตอมข้างเคียง และขนานกับเส้น Si-Si พีกที่สองเกิดการดูดกลืนที่เลขคลื่นประมาณ  $759\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับการหักเหของพันธะ Si-O-Si ซึ่งออกซิเจนย้ายไปที่มุมด้านขวาของเส้น Si-Si และระนาบ Si-O-Si อีกนัยหนึ่งยังพบว่าตัวทำลายพันธะซึ่งได้แก่  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{CaO}$  ได้ไปทำลายแขนของพันธะ Si-O-Si ออกจากกัน ทำให้เกิด 1 non-bridging oxygen ซึ่งสัมพันธ์กับกลุ่มของพันธะ Si-O-NBO ที่เลขคลื่นประมาณ  $940\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่ามีพีกการสั่นของกลุ่มคาร์บอเนตที่ความถี่  $1450\text{ cm}^{-1}$  [30] โดยคาร์บอเนตนี้อาจมาจากสารตั้งต้น คือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิการหลอมไม่ส่งผลต่อตำแหน่งและไม่เกิดพีกการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโครเมียมออกไซด์ สำหรับการสั่นของพันธะที่มีความถี่ต่างๆที่พบในแก้วตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.10 และกราฟการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรดของแก้วตัวอย่างทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 การสั่นของพันธะที่มีความถี่ต่างๆที่พบในแก้วตัวอย่าง [21]

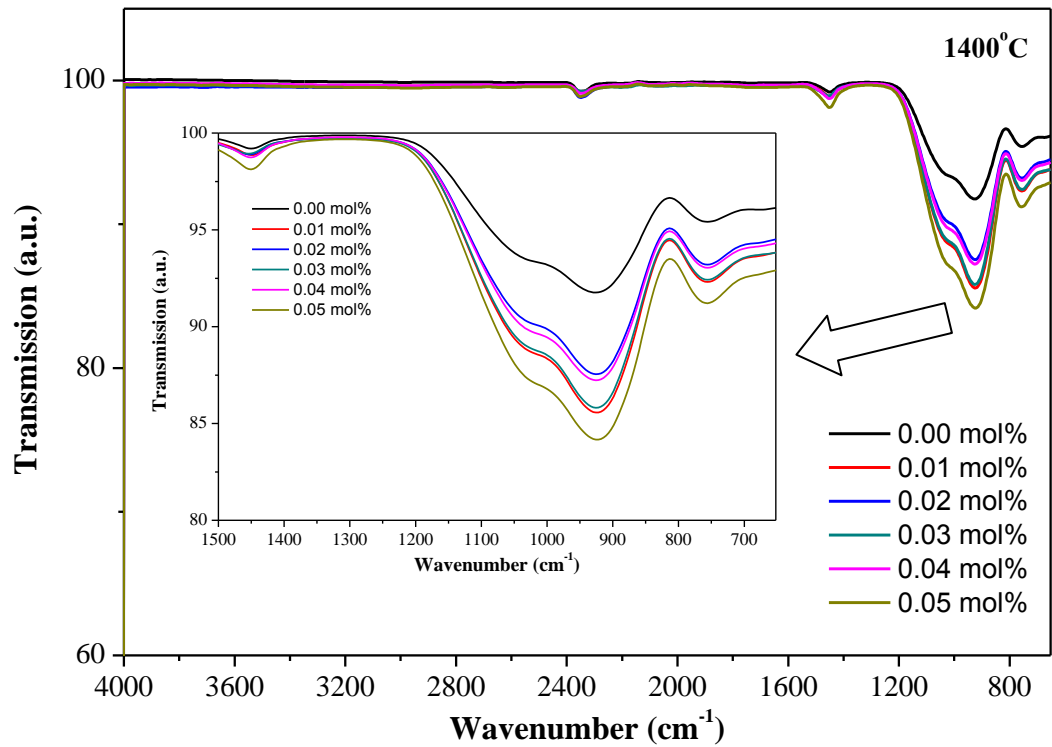
Vibration mode	Frequency ( $\text{cm}^{-1}$ )
Si-O-Si bending	759
Si-O-NBO stretching	940
Si-O-Si stretching	1030
Carbonate group	1450



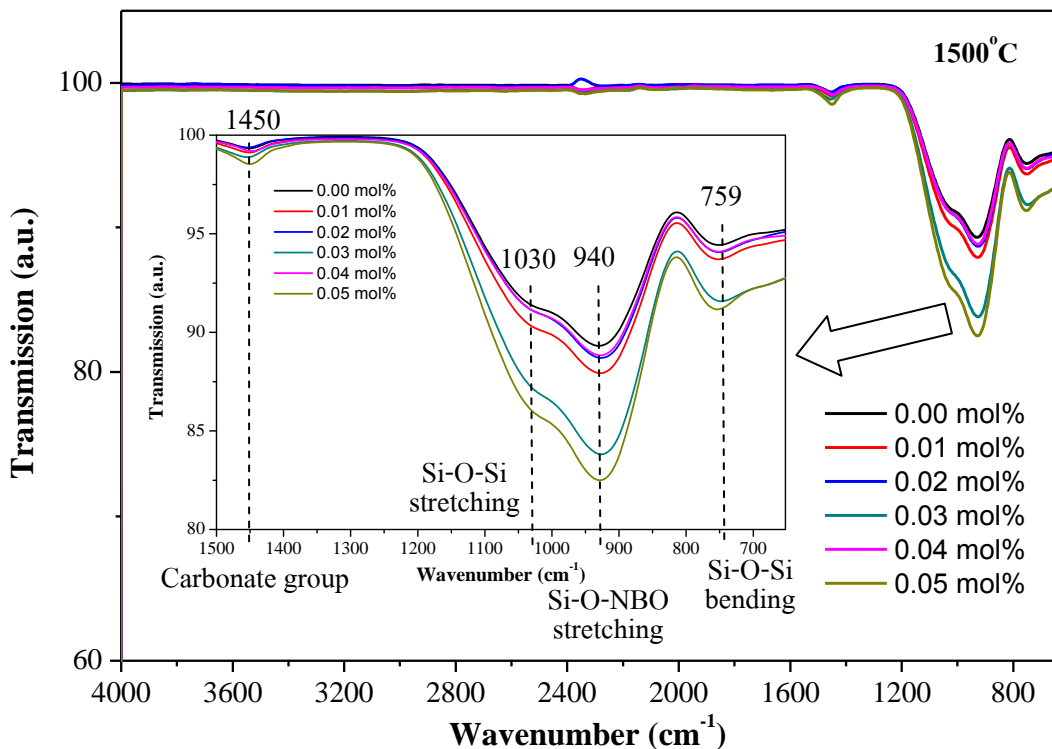
(f)



(g)



(ก)



(ง)

รูปที่ 4.11 กราฟการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรดเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์และหลอมที่อุณหภูมิ

(ก) 1200°C (ข) 1300°C (ค) 1400°C (ง) 1500°C