บทที่ 4

ผลการเก็บรวบรวมข้อมูล ตรวจสอบ ตรวจวิเคราะห์และการทดลอง

4.1 ผลการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

จากการสำรวจและเก็บรวมรวมข้อมูลการใช้กระจกเกรียบ พบว่า กระจกเกรียบถูกใช้เป็นวัสดุในการตกแต่ง ประดับประดาตามโบราณสถานและศิลปวัตถุที่เป็นพุทธสถาน พุทธศิลป์และสิ่งสักการะต่างๆในทางพระพุทธศาสนาตั้งแต่สมัยอยุธยาเป็นต้นมา ซึ่งมีทั้งที่เป็นแก้วอังวะ กระจกอยุธยาและกระจกรัตนโกสินทร์ โดยที่มีสีขาว สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีเหลือง (หรือสีทอง) มีการใช้งานแพร่กระจายทั่วทุกภาคของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่เคยเป็นศูนย์กลางของการเผยแพร่พระพุทธศาสนา

4.2 ผลการตรวจสอบ ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างกระจก (แก้ว)โบราณ

4.2.1 ผลการตรวจวัด ทดสอบและตรวจวิเคราะห์ทางฟิสิกส์

4.2.1.1 ค่าความหนา

4.2.1.1(1) ตัวอย่างกระจก ประกอบด้วย

- กระจกอยุธยา จำนวน 7 ตัวอย่าง
- กระจกรัตนโกสินทร์ จำนวน 23 ตัวอย่าง
- กระจกปัจจุบัน จำนวน 6 ตัวอย่าง

4.2.1.1(2) ผลการตรวจวัดค่าความหนา ปรากฏตามตารางที่ 4.1

4.2.1.2 ค่าดรรชนีหักเห

4.2.1.2(1) ตัวอย่างกระจก ประกอบด้วย

- กระจกอยุธยา จำนวน 4 ตัวอย่าง
- กระจกรัตนโกสินทร์ จำนวน 4 ตัวอย่าง
- กระจกปัจจุบัน จำนวน 4 ตัวอย่าง

4.2.1.2(2) ผลการตรวจวัดค่าดรรชนีหักเห ปรากฏตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวัดค่าความหนาของตัวอย่างกระจกโบราณ

ลำดับ	แบบของแก้ว	สี	ค่าความหนา (มิลลิเมตร)
1	อยุธยา	ขาว	0.67, 0.85, 0.90
2	อยุธยา	เขียว	0.90, 0.92,1.0, 1.05
3	รัตนโกสินทร์	น้ำเงิน	0.59, 0.62, 0.68, 0.71, 0.72, 0.83, 0.86, 0.90
4	รัตนโกสินทร์	เขียว	0.47, 0.58, 0.76, 0.82, 0.91
5	รัตนโกสินทร์	เหลือง	0.57, 0.62, 0.86, 0.90
6	รัตนโกสินทร์	แดง	0.81, 0.85
7	รัตนโกสินทร์	ขาว	0.23, 0.55, 0.97
8	ปัจจุบัน	ขาว	1.02
9	ปัจจุบัน	เขียว	1.0
10	ปัจจุบัน	แดง	0.77
11	ปัจจุบัน	เหลือง	0.70
12	ปัจจุบัน	น้ำเงิน	0.55, 0.77

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดค่าดรรชนีหักเหของตัวอย่างกระจกโบราณ

ลำดับ	แบบของแก้ว	สี	ค่าดรรชนีหักเห
1	อยุธยา	ขาว	1.599
2	อยุธยา	เขียว	1.561
3	อยุธยา	น้ำเงิน	1.535
4	อยุธยา	เหลือง	1.539
5	รัตนโกสินทร์	เหลือง	1.540
6	รัตนโกสินทร์	เขียว	1.607
7	รัตนโกสินทร์	น้ำเงิน	1.531
8	รัตนโกสินทร์	ขาว	1.525
9	ปัจจุบัน	เขียว	1.520
10	ปัจจุบัน	แดง	1.510
11	ปัจจุบัน	เหลือง	1.475
12	ปัจจุบัน	น้ำเงิน	1.505

4.2.2 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบ

4.2.2.1 ตัวอย่างกระจก ประกอบด้วย

- กระจกอยุธยา จำนวน 1 ตัวอย่าง
- กระจกรัตนโกสินทร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง
- กระจกปัจจุบัน จำนวน 3 ตัวอย่าง

4.2.2.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ ปรากฏตามตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของกระจกอยุธยา*

ลำดับ	ธาตุ	ปริมาณ	หน่วย**
1	เงิน (Ag)	35.2	ppm
2	อาร์ซินิก (As)	536	ppm
3	อลูมิเนียม (Al)	0.37	%
4	แบเรียม (Ba)	462	ppm
5	แคลเซียม (Ca)	2	ppm
6	แคดเมียม (Cd)	1	ppm
7	โคบอลท์ (Co)	26	ppm
8	โครเมียม (Cr)	25	ppm
9	ทองแดง (Cu)	366	ppm
10	เหล็ก (Fe)	0.48	%
11	ปรอท (Hg)	80	ppm
12	มักนีเซียม (Mg)	<1	ppm
13	โซเดียม (Na)	3	%
14	นิกเกิล (Ni)	<1	ppm
15	ตะกั่ว (Pb)	47.71	%
16	พลวง (Sb)	2014	ppm
17	ซิลิกอน (Si)	21.84	%
18	ดีบุก (Sn)	3.01	%
19	สังกะสี (Zn)	202	ppm

---

* โดยใช้เทคนิค XRF ที่บริษัท Siemens (สหพันธสาธารณรัฐเยอรมัน)

** โดยน้ำหนัก (w/w)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของกระจกรัตนโกสินทร์*

ลำดับ	ธาตุ		ปริมาณ			หน่วย**
			สีน้ำเงิน	สีเหลือง	สีเขียว	
1	เงิน	(Ag)	17	11	35	ppm
2	อาร์ซินิก	(As)	235	459	135	ppm
3	อลูมิเนียม	(Al)	0.74	1.29	0.95	%
4	แบเรียม	(Ba)	426	424	282	ppm
5	แคดเมียม	(Cd)	1	12	14	ppm
6	โคบอลท์	(Co)	1135	-	55	ppm
7	โครเมียม	(Cr)	10	34	11	ppm
8	ทองแดง	(Cu)	287	749	14952	ppm
9	เหล็ก	(Fe)	-	2.45	0.04	%
10	ปรอท	(Hg)	37	-	55	ppm
11	มักนีเซียม	(Mg)	886	1282	443	ppm
12	มังกานีส	(Mn)	1218	1096	181	ppm
13	โซเดียม	(Na)	2.63	5.70	4.08	%
14	นิกเกิล	(Ni)	18	33	2	ppm
15	ตะกั่ว	(Pb)	41.32	26.64	50.29	%
16	พลวง	(Sb)	735	770	6597	ppm
17	ซิลิกอน	(Si)	24.96	26.34	20.54	%
18	ดีบุก	(Sn)	2.74	0.66	1.74	%
19	สังกะสี	(Zn)	-	-	1089	ppm

* โดยใช้เทคนิค ICP ที่บริษัท ผาแดงอินดัสทรี(มหาชน) จำกัด

** โดยน้ำหนัก (w/w)

Chiang Mai University

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของกระจกปัจจุบัน*

ลำดับ	ธาตุ	ปริมาณ			หน่วย**
		สีน้ำเงิน	สีเหลือง	สีเขียว	
1	เงิน (Ag)	735	820	595	ppm
2	อาร์ซินิก (As)	2224	167	2061	ppm
3	อลูมิเนียม (Al)	0.29	1.0	0.61	%
4	แบเรียม (Ba)	-	1253	40	ppm
5	แคดเมียม (Cd)	235	-	293	ppm
6	โคบอลท์ (Co)	364	29	-	ppm
7	โครเมียม (Cr)	672	13	2194	ppm
8	ทองแดง (Cu)	11090	-	6707	ppm
9	เหล็ก (Fe)	-	4.16	-	%
10	ปรอท (Hg)	-	19	11	ppm
11	มักนีเซียม (Mg)	-	9362	2707	ppm
12	มังกานีส (Mn)	-	14427	-	ppm
13	โซเดียม (Na)	11.74	14.05	12.43	%
14	นิกเกิล (Ni)	44	3	22	ppm
15	ตะกั่ว (Pb)	0.02	0.58	<0.001	%
16	พลวง (Sb)	1791	95	1741	ppm
17	ซิลิกอน (Si)	32.17	31.69	35.32	%
18	ดีบุก (Sn)	0.43	0.38	0.38	%

---

* โดยใช้เทคนิค XRF ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

** โดยน้ำหนัก (w/w)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

4.3 ผลการตรวจสอบ ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแก้วที่สร้างขึ้น

4.3.1 ผลการตรวจวัด ทดสอบและตรวจวิเคราะห์ทางฟิสิกส์

4.3.1.1 ค่าดรรชนีหักเห โดยใช้เครื่องมือ Refractometer

4.3.1.1(1) ตัวอย่างแก้ว ประกอบด้วย

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 64 ตัวอย่าง
- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก Au foil จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CoO จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีม่วง ที่ได้จาก $Nd(NO_3)_3$ จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีม่วง ที่ได้จาก MnO_2 จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีเขียว ที่ได้จาก Fe_2O_3 + CuO จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีเขียว ที่ได้จาก Cr_2O_3 จำนวน 3 ตัวอย่าง
- สีน้ำตาล ที่ได้จาก Fe_2O_3 จำนวน 3 ตัวอย่าง

4.3.1.1(2) ผลการตรวจวัดค่าดรรชนีหักเห ปรากฏตามตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจวัดค่าดรรชนีหักเหของแก้วสีต่างๆ

ลำดับ	สี/สารที่เติม	ค่าดรรชนีหักเห ตัวอย่าง			
		1	2	3	เฉลี่ย
1	น้ำเงิน/ Au Foil	1.715	1.710	1.708	1.711
2	น้ำเงิน/ CoO	1.710	1.715	1.695	1.707
3	ม่วง/ $Nd(NO_3)_3$	1.680	1.688	1.682	1.683
4	ม่วง/ MnO_2	1.705	1.695	1.700	1.700
5	เขียว/ Fe_2O_3 + CuO	1.765	1.760	1.750	1.758
6	เขียว/ Cr_2O_3	1.695	1.690	1.685	1.690
7	น้ำตาล/ Fe_2O_3	1.704	1.702	1.700	1.702

ตารางที่ 4.7 ผลการตรวจวัดค่าดรรชนีหักเหของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO

ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิเย็นตัว (°ซ)	อุณหภูมิเผา (°ซ)	ค่าดรรชนีหักเห จำนวนชั่วโมงการเผา 1	2	3
0.1	ปรกติ	1,100	1.687	1.734	1.693
0.5	ปรกติ	1,100	1.669	1.744	1.702
1.0	ปรกติ	1,100	1.653	1.709	1.675
0.5	ปรกติ	900		1.674	
0.5	ปรกติ	1,000		1.697	
0.5	ปรกติ	1,150		1.705	
0.5	ปรกติ	1,200		1.643	
0.5	ทันที	1,100		1.680	
0.5	750	1,100		1.688	
0.5	250	1,100		1.696	

หมายเหตุ ปรกติ หมายถึง ปิดเตาเมื่อถึงอุณหภูมิและชั่วโมงที่ตั้งไว้
ทันที หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส
750 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส
250 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.3.1.2 ค่า Dielectric Constant โดยใช้เครื่องมือ LCZ Meter

4.3.1.2(1) ตัวอย่างแก้ว ประกอบด้วย

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 64 ตัวอย่าง

4.3.1.2(2) ผลการตรวจวัดค่า Dielectric Constant ปรากฏตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการตรวจวัดค่า Dielectric Constant ของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO

ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิเย็นตัว (°ซ)	อุณหภูมิเผา (°ซ)	ค่า Dielectric Constant จำนวนชั่วโมงการเผา		
			1	2	3
0.1	ปรกติ	1,100	3.326	3.637	3.460
0.5			3.735	3.965	3.844
1.0			3.828	4.560	4.062
0.5	ปรกติ	900		3.791	
		1,000		4.072	
		1,150		4.559	
		1,200		4.267	
0.5	ทันที	1,100		3.716	
	750			3.854	
	250			4.221	

หมายเหตุ ปรกติ หมายถึง ปิดเตาเมื่อถึงอุณหภูมิและชั่วโมงที่ตั้งไว้

ทันที หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส

750 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

250 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 ค่าดรรชนีหักเหเปรียบเทียบของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Refractometer และที่คำนวณได้จากค่า Dielectric Constant

ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิเย็นตัว (°ซ)	อุณหภูมิเผา (°ซ)	ค่าดรรชนีหักเห ที่วัดได้			ค่าดรรชนีหักเห ที่คำนวณได้		
			จำนวนชั่วโมงการเผา					
			1	2	3	1	2	3
0.1	ปรกติ	1,100	1.687	1.734	1.693	1.823	1.907	1.806
0.5			1.669	1.744	1.702	1.933	1.991	1.961
1.0			1.653	1.709	1.675	1.957	2.135	2.015
0.5	ปรกติ	900		1.674			1.947	
		1,000		1.697			2.018	
		1,150		1.705			2.135	
		1,200		1.643			2.066	
0.5	ทันที	1,100		1.680			1.928	
	750			1.688			1.963	
	250			1.696			2.055	

หมายเหตุ ปรกติ หมายถึง ปิดเตาเมื่อถึงอุณหภูมิและชั่วโมงที่ตั้งไว้

ทันที หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส

750 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

250 หมายถึง นำตัวอย่างออกจากเตาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.3.2 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยใช้เทคนิค XRF

4.3.2.1 ตัวอย่างแก้ว

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 3 ตัวอย่าง

4.3.2.2 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบ

- ประกอบด้วย Si, Pb, Ca, K และ Cu

- ปรากฏตามรูปที่ 4.1

4.3.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ทางความร้อน โดยใช้เทคนิค DTA/TG

4.3.3.1 ตัวอย่างแก้ว

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 3 ตัวอย่าง

4.3.3.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ทางความร้อน

- มี Phase Transformation ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส

- ปรากฏตามรูปที่ 4.2

4.3.4 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง โดยใช้เทคนิค XRD

4.3.4.1 ตัวอย่างแก้ว

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 3 ตัวอย่าง

4.3.4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง

- มี X-ray Peaks ทุก Peaks ตรงกับที่ได้จากแก้วโบราณ

- ปรากฏตามรูปที่ 4.3

4.3.5 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อแก้ว โดยใช้เทคนิค SEM

4.3.5.1 ตัวอย่างแก้ว

- สีน้ำเงิน ที่ได้จาก CuO จำนวน 3 ตัวอย่าง

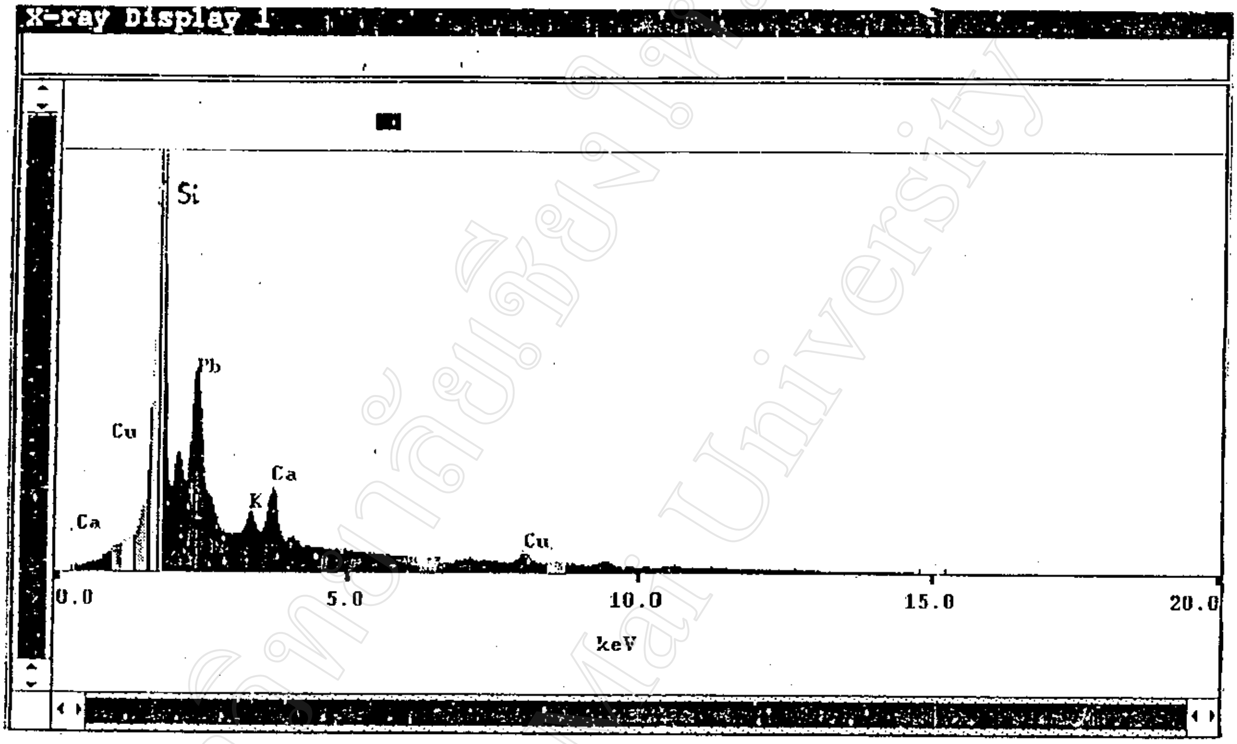
4.3.5.2 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อแก้ว

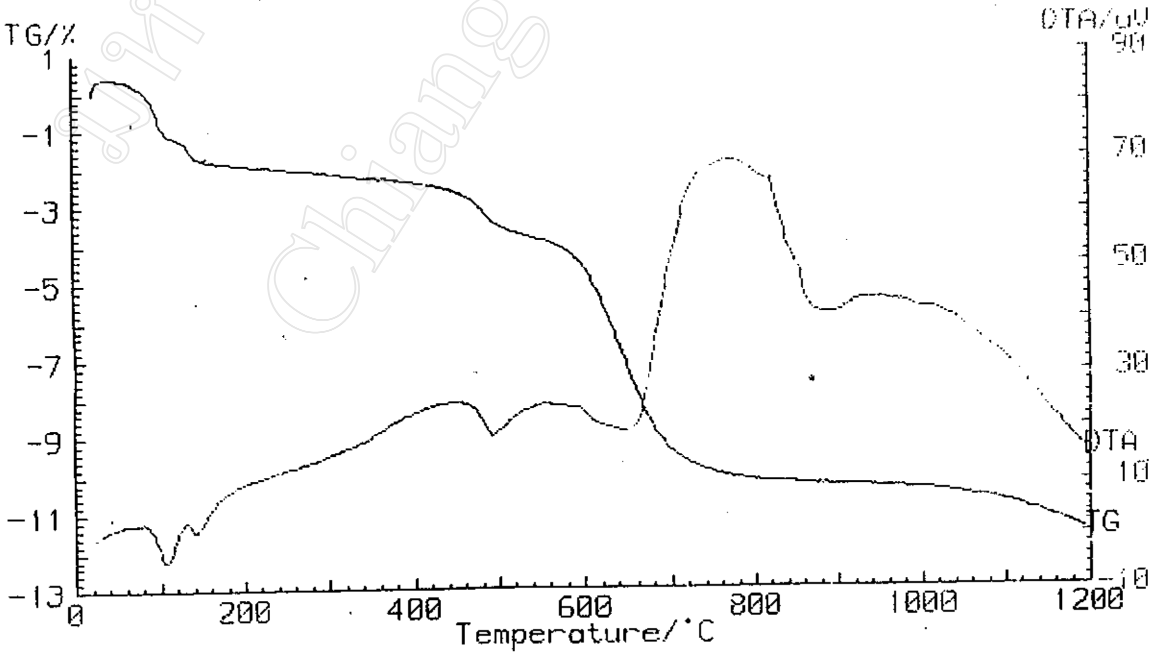
- ผิวหน้าของแก้วแสดงให้เห็นถึงการก่อตัวเป็นรูปผลึกกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อแก้ว

- ปรากฏตามรูปที่ 4.4

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO ความเข้มข้น 0.5 %
ที่อุณหภูมิ 1,100° ซ นาน 2 ชั่วโมง การเย็นตัวปรกติ ด้วย XRF

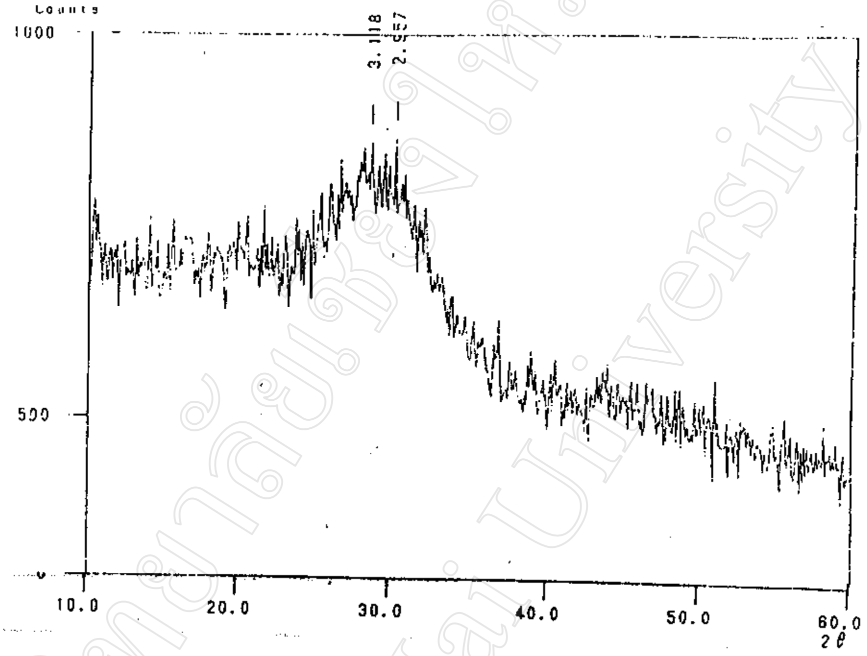




รูปที่ 4.2 แสดง Thermogram ของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO ความเข้มข้น 0.5 %

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

รูปที่ 4.3 แสดง X-Ray Diffractogram ของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO ความเข้มข้น 0.5 % ที่อุณหภูมิ 1,100° ซ นาน 2 ชั่วโมง การเย็นตัวปรกติ



รูปที่ 4.4 แสดงผิวหน้าของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จาก CuO ความเข้มข้น 0.5 % ที่อุณหภูมิ 1,100° ซ นาน 2 ชั่วโมง การเย็นตัวปรกติ ด้วย SEM ที่มีกำลังขยาย x2,400