



บทที่ 4

## ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองสามารถแยกอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

### 4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินเบื้องต้น

ในงานทดลองใช้ถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ คือ แม่เมาะ (MM) 12 ตัวอย่าง บางปูดำ (PD) 2 ตัวอย่าง คลองห้วยเล็ก (KV) 3 ตัวอย่าง บ้านปู (PO) 4 ตัวอย่าง ป่าคา (PA) หนองห้วยปล่อง (NO) และนาดวง (NA) อย่างละ 1 ตัวอย่าง วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น คือ วิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์ค่าความร้อน (gross heating value) วิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวม (total sulfur) และรูปแบบกำมะถัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ มีคุณสมบัติแตกต่างกันมีปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงร้อยละ 6.71-42.43 ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ร้อยละ 8.01-44.79 มีปริมาณกำมะถันรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.61-10.10 และมีรูปแบบของกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur) ในช่วงร้อยละ 0.53-2.84 กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur) ในช่วงร้อยละ 0.06-3.05 และกำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur) ในช่วงร้อยละ 0.02-5.17 แตกต่างกันตามแหล่งถ่านหิน และมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 1,926-7,213 แคลอรีต่อกรัม ค่าความร้อนนี้ขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนคงตัว และสารระเหยที่เพิ่มขึ้น แต่ลดลงตามปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น จากค่าความร้อนดังกล่าว เมื่อนำไปเทียบกับตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการแบ่งถ่านหินตามศักดิ์โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D388 พบว่า ถ่านหินแหล่งนาดวงให้ปริมาณความร้อนสูงสุด จัดเป็นถ่านหินประเภท เซมิแอนทราไซต์ ถ่านหินแหล่งหนองห้วยปล่องจัดเป็นถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส ซี ถ่านหินแหล่งป่าคาเป็นถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส เอ ถ่านหินแหล่งคลองห้วยเล็กเป็นถ่านหินซับบิทูมินัส บี ถ่านหินแหล่งบ้านปู และบางปูดำเป็นถ่านหินซับบิทูมินัส บี และซับบิทูมินัส ซี ส่วนถ่านหินแหล่งแม่เมาะ เป็นทั้งถ่านหินลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บี และ ซับบิทูมินัส ซี ถ่านหินที่นำมาวิเคราะห์ส่วนใหญ่จึงเป็นถ่านหินประเภทซับบิทูมินัส

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผ้าดิบ

ลำดับ	ยี่ห้อ (รายละเอียด)	ความชื้น	สีสาระใย	เก่า	คาร์บอน คงตัว	กำมะถัน รวม	กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไนโตรเจน	กำมะถัน ลิทเรียม	ค่าความรวม * (เปอร์เซ็นต์รวม)	สีผ้าดิบ
1	MM1 *	14.30	38.58	12.07	35.05	3.08	1.12	0.63	1.33	4,527	ชั้นย้อมสี ซี
2	MM2 *	12.26	35.39	23.27	29.08	3.06	1.16	0.70	1.20	3,479	ชั้นย้อมสี ซี
3	MM3 *	9.00	29.77	42.43	18.80	3.77	1.48	0.61	1.68	2,696	ชั้นย้อมสี ซี
4	MM4 *	13.05	38.93	13.50	34.52	2.79	0.73	0.53	1.53	4,602	ชั้นย้อมสี บี
5	MM5 *	11.64	32.45	40.32	15.59	10.10	4.21	3.05	2.84	1,926	สีดิบ บี
6	MM6 *	8.70	42.85	28.41	20.04	4.87	3.27	0.07	1.53	3,653	ชั้นย้อมสี บี
7	MM7 *	9.73	44.79	31.15	14.33	7.26	5.17	0.15	1.94	2,801	สีดิบ เอ
8	MM8 *	10.25	37.47	28.97	23.32	5.61	3.10	0.49	2.02	3,225	ชั้นย้อมสี ซี
9	MM9 *	12.26	35.26	25.47	27.00	5.57	2.79	0.69	2.09	3,135	สีดิบ เอ
10	MM10 *	11.92	38.61	21.24	28.24	7.36	3.23	1.54	2.59	3,526	ชั้นย้อมสี ซี
11	MM11 *	11.66	42.85	6.88	38.61	2.26	0.25	0.20	1.81	4,783	ชั้นย้อมสี ซี
12	MM12 *	16.61	34.59	8.05	40.75	1.88	0.24	0.71	0.93	4,866	ชั้นย้อมสี บี
13	PD1 *	12.01	36.73	19.54	31.73	3.33	0.84	0.87	1.62	4,174	ชั้นย้อมสี บี
14	PD2 *	9.69	36.13	25.00	29.17	4.49	1.56	1.21	1.72	3,510	ชั้นย้อมสี ซี

หมายเหตุ \* air-dried basis หมายถึง สีภาวะที่แห้งอย่างไ้บนกรวยทดสอบสีความชื้นอยู่กับแสงแดด

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของยางดิบ (ต่อ)

ลำดับ	แหล่ง (ร้อยละ)	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	ค่าขอบ คงตัว	กำมะถัน รวม	กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน อินทรีย์	ค่าความร้อน* (แคลอรีต่อกิโลกรัม)	สีที่ถ่ายเท
15	FO1 *	12.71	42.86	7.64	36.80	1.04	0.12	0.22	0.70	4,754	ชั้นที่ 1 ถึง 3
16	FO2 *	11.23	41.42	8.69	38.67	2.19	0.32	0.24	1.63	4,915	ชั้นที่ 1 ถึง 3
17	FO3 *	11.99	43.09	6.71	38.21	1.63	0.20	0.38	1.05	4,900	ชั้นที่ 1 ถึง 3
18	FO4 *	13.48	36.23	16.40	33.89	2.46	0.26	0.66	1.54	4,251	ชั้นที่ 1 ถึง 3
19	KV1 *	12.35	37.49	16.16	34.01	4.22	0.12	1.44	2.66	4,617	ชั้นที่ 1 ถึง 3
20	KV2 *	9.86	31.68	36.78	21.68	4.00	0.16	1.19	2.65	3,325	ชั้นที่ 1 ถึง 3
21	KV3 *	15.12	39.58	7.64	37.66	2.30	0.21	0.38	1.71	4,864	ชั้นที่ 1 ถึง 3
22	PA1 *	9.90	39.23	10.32	40.55	1.03	0.14	0.13	0.76	5,655	ชั้นที่ 1 ถึง 3
23	NO1 *	6.61	32.26	19.38	41.76	0.65	0.02	0.08	0.55	5,526	ชั้นที่ 1 ถึง 3
24	NA1 *	3.00	8.01	12.04	76.95	0.61	0.02	0.06	0.53	7,213	ชั้นที่ 1 ถึง 3

หมายเหตุ \* air-dried basis หมายถึง สีเกาะที่แห้งอย่างช้าๆ บนกระดาษสีขาวที่อุณหภูมิห้อง



#### 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก้วด้านหิน

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก้วด้านหินแหล่งต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาถ่านหินในตารางที่ 4.1 โดยวิธีทางเคมี พบว่า สารประกอบที่พบในปริมาณสูง ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 5.63-54.15 อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในช่วงร้อยละ 8.88-31.53 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 5.98-40.40 แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 1.07-32.75 และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ร้อยละ 0.05-33.71 ส่วนสารประกอบที่พบในปริมาณน้อย ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 0.19-10.20 โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 0.19-4.90 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ร้อยละ 0.59-10.20 ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ร้อยละ 0.0-0.03 และ ทิตานียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ร้อยละ 0.0-0.71

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของแก้วด้านหิน

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของแก้วด้านหินจากแหล่งต่าง ๆ ในสภาวะออกซิไดส์ พบว่าคุณสมบัติการหลอมของแก้วด้านหินมีช่วงกว้างตั้งแต่เริ่มหลอมจนหลอมหมด ตั้งแต่  $1200^\circ\text{C}$  จนถึงสูงกว่า  $1400^\circ\text{C}$  แสดงคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D1857 ได้ดังนี้ คุณสมบัติเริ่มผิครูป (IDT) เป็นคุณสมบัติแรกที่แก้วเริ่มเกิดการหลอมช่วง  $1200$  ถึง  $1400^\circ\text{C}$  คุณสมบัติอ่อนตัว (ST) ช่วง  $1240^\circ\text{C}$  ถึงสูงกว่า  $1400^\circ\text{C}$  คุณสมบัติครึ่งทรงกลม (HT) ช่วง  $1280^\circ\text{C}$  ถึงสูงกว่า  $1400^\circ\text{C}$  และคุณสมบัติของไหล (FT) เป็นคุณสมบัติสุดท้ายที่แก้วหลอมหมด ช่วง  $1320^\circ\text{C}$  ถึงสูงกว่า  $1400^\circ\text{C}$  มีคุณสมบัติการหลอมของแก้วด้านหิน 3 ตัวอย่างที่ไม่สามารถแสดงได้ เพราะขีดจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ทดลอง ได้แก่ คุณสมบัติเริ่มผิครูป คุณสมบัติอ่อนตัว คุณสมบัติครึ่งทรงกลม และ คุณสมบัติของไหล ของแก้วจากแหล่งนาค้าง และ ป่าคา คุณสมบัติอ่อนตัว คุณสมบัติครึ่งทรงกลม และ คุณสมบัติของไหลของแก้วจากคลองหวายเล็ก (KV3) คุณสมบัติครึ่งทรงกลม และ คุณสมบัติของไหลของแก้วหนองหญ้าปล้อง นอกจากนี้ พบว่าคุณสมบัติการหลอมของแก้วด้านหินมีความแตกต่างกันตามชนิดด้านหิน แก้วของด้านหินที่มีศักดิ์สูงให้คุณสมบัติการหลอมสูงกว่าแก้วของด้านหินที่มีศักดิ์ต่ำ เช่น ตัวอย่างของแก้วด้านหินจากแหล่งนาค้างที่มีศักดิ์ของด้านหินเป็น เซมิแอนทราไซต์ มีคุณสมบัติการหลอมสูงกว่า  $1400^\circ\text{C}$  ในขณะที่แก้วด้านหินจากแหล่งแม่เมาะ บ้านปู และบางปูดำ เป็นแก้วของด้านหินศักดิ์ ชั้นบีทูมินัส บี และ ซี มีคุณสมบัติการหลอมน้อยกว่า  $1400^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของแก้วนำมัน

ลำดับ	คำศัพท์	เลขที่	องค์ประกอบของแก้วนำมัน (ร้อยละ)										คุณสมบัติทางเคมีของแก้วนำมัน (°ซ)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	IDT	ST	HT	FT
1	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM1	9.72	9.58	24.92	19.56	6.02	26.73	trace.	trace.	trace	2.68	0.79	1270	1300	1330	1360
2	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM2	38.36	22.89	14.14	6.88	4.52	6.09	trace	trace	0.14	3.50	3.48	1310	1330	1340	1360
3	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM3	48.17	31.53	8.65	3.80	1.17	1.89	trace	trace	0.18	1.70	2.91	1300	1360	1380	1400
4	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM4	25.37	19.59	17.23	12.73	3.81	14.16	trace	trace	0.01	4.90	2.19	1220	1240	1270	1300
5	สีทับเคลือบ บี	MM5	33.25	28.52	22.73	6.35	1.36	5.11	trace	trace	0.50	2.18	1300	1350	1360	1370	
6	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM6	16.97	25.38	19.43	10.27	2.92	23.64	trace	trace	0.05	0.19	1.14	1200	1240	1280	1300
7	สีทับเคลือบ เอ	MM7	10.13	20.85	17.89	19.53	0.59	30.06	trace	trace	0.03	0.24	0.67	1280	1320	1340	1360
8	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM8	18.25	25.79	17.20	10.80	10.20	14.73	trace	trace	0.28	0.61	2.14	1250	1300	1320	1350
9	สีทับเคลือบ เอ	MM9	38.46	19.99	27.67	4.35	2.40	3.08	trace	trace	0.17	0.88	3.00	1300	1350	1360	1370
10	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM10	14.24	15.54	40.40	10.82	2.87	14.37	trace	trace	0.86	0.91	1280	1310	1320	1340	
11	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM11	14.60	20.87	14.42	13.95	5.98	28.47	trace	trace	0.43	0.41	0.86	1200	1230	1310	1330
12	ชั้นกึ่งนำมัน บี	MM12	11.35	20.99	17.82	12.57	8.76	25.41	trace	trace	0.25	2.15	0.69	1280	1290	1310	1330
13	ชั้นกึ่งนำมัน บี	PD1	36.61	26.89	13.97	6.99	3.28	5.75	trace	trace	0.27	3.48	2.75	1290	1310	1325	1340
14	ชั้นกึ่งนำมัน บี	PD2	44.18	23.16	18.49	4.67	2.57	3.87	trace	trace	0.61	0.35	2.11	1280	1350	1370	1390

หมายเหตุ IDT คือ คุณสมบัติเริ่มสีชมพู ST คือ คุณสมบัติอ่อนตัว HT คือ คุณสมบัติทั้งทางเคมี FT คือ คุณสมบัติของโซล



ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติการหลอมของแก้วนำมัน (ต่อ)

ลำดับ	ศัพท์	แหล่ง	องค์ประกอบของแก้วนำมัน (ร้อยละ)										คุณสมบัติการหลอมของแก้วนำมัน (°C)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	IDT	ST	HT	FT
15	ซันดิวินิล ดี บี	PO1	24.54	16.62	27.05	12.66	1.55	13.40	0.01	trace	0.05	2.47	1.65	1300	1310	1320	1340
16	ซันดิวินิล ดี บี	PO2	28.32	27.24	13.48	13.51	1.13	14.19	trace	trace	0.42	0.43	1.29	1220	1240	1280	1320
17	ซันดิวินิล ดี บี	PO3	11.17	11.40	18.82	23.67	2.68	31.25	trace	trace	0.23	0.36	0.41	1250	1280	1300	1330
18	ซันดิวินิล ดี บี	PO4	46.26	29.57	10.32	5.22	0.75	4.36	trace	trace	0.71	0.30	2.51	1280	1350	1380	1400
19	ซันดิวินิล ดี บี	KV1	24.72	29.05	12.66	12.61	2.64	16.69	trace	trace	trace	0.33	1.30	1260	1300	1330	1350
20	ซันดิวินิล ดี บี	KV2	38.46	28.12	5.98	4.61	1.16	18.84	trace	trace	0.56	0.33	1.93	1400	>1400		
21	ซันดิวินิล ดี บี	KV3	5.63	8.88	12.02	32.75	5.51	33.71	trace	trace	trace	0.98	0.51	1220	1300	1340	1369
22	ซันดิวินิล ดี บี	PA1	54.15	29.82	6.55	2.22	1.59	0.82	0.03	trace	0.29	1.01	3.51	>1400			
23	บิวินิล ดี บี	NO1	53.05	12.21	25.37	1.07	1.74	0.05	trace	trace	0.16	2.17	4.18	1350	1390	>1400	
24	เซมิแอม- ทราไซด์	NA1	40.83	29.48	8.77	8.97	3.02	5.17	trace	trace	0.51	1.63	1.63	>1400			

หมายเหตุ IDT คือ อุณหภูมิเริ่มตีคูล ST คือ อุณหภูมิอ่อนตัว HT คือ อุณหภูมิครึ่งทางหลอม FT คือ อุณหภูมิของไหล



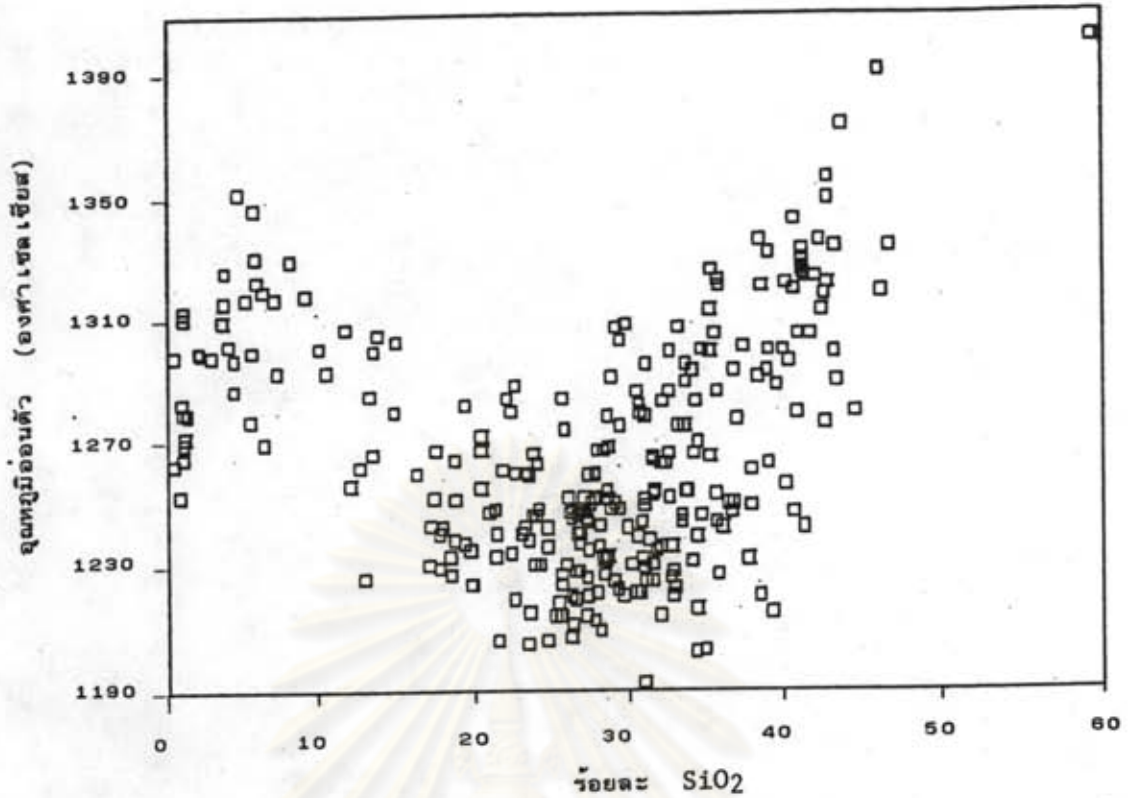
#### 4.4 การสร้างความสัมพันธ์เพื่อประมาณอุณหภูมิการหลอมของแก้วด้านหินจากองค์ประกอบ แก้วด้านหิน

ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการหลอมของแก้วด้านหิน และองค์ประกอบแก้วด้านหิน ควรใช้ข้อมูลแก้วด้านหินที่มีจำนวนมาก แต่จากผลการทดลองที่ได้มีตัวอย่างแก้วด้านหินที่ได้วิเคราะห์ขึ้นจากหลาย ๆ แหล่ง มีจำนวนเพียง 24 ตัวอย่าง และ ในจำนวนนี้มี 3 ตัวอย่าง ที่ไม่สามารถประมาณอุณหภูมิการหลอมได้จึงเหลือเพียง 21 ตัวอย่าง ที่สามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการหลอมของแก้วด้านหินและองค์ประกอบแก้วด้านหินได้ ในขณะที่มีข้อมูลผลการวิเคราะห์ของแก้วด้านหินเหมืองแม่เมาะที่รวบรวมได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต มีจำนวนมากถึง 285 ตัวอย่าง และเป็นข้อมูลของแก้วด้านหินในแหล่งเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เป็นข้อมูลผลวิเคราะห์ของแก้วด้านหินที่รวบรวมจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิการหลอมของแก้วด้านหินและองค์ประกอบ แก้วด้านหิน และใช้ข้อมูลผลการวิเคราะห์ของผู้วิจัยในการตรวจสอบความสัมพันธ์

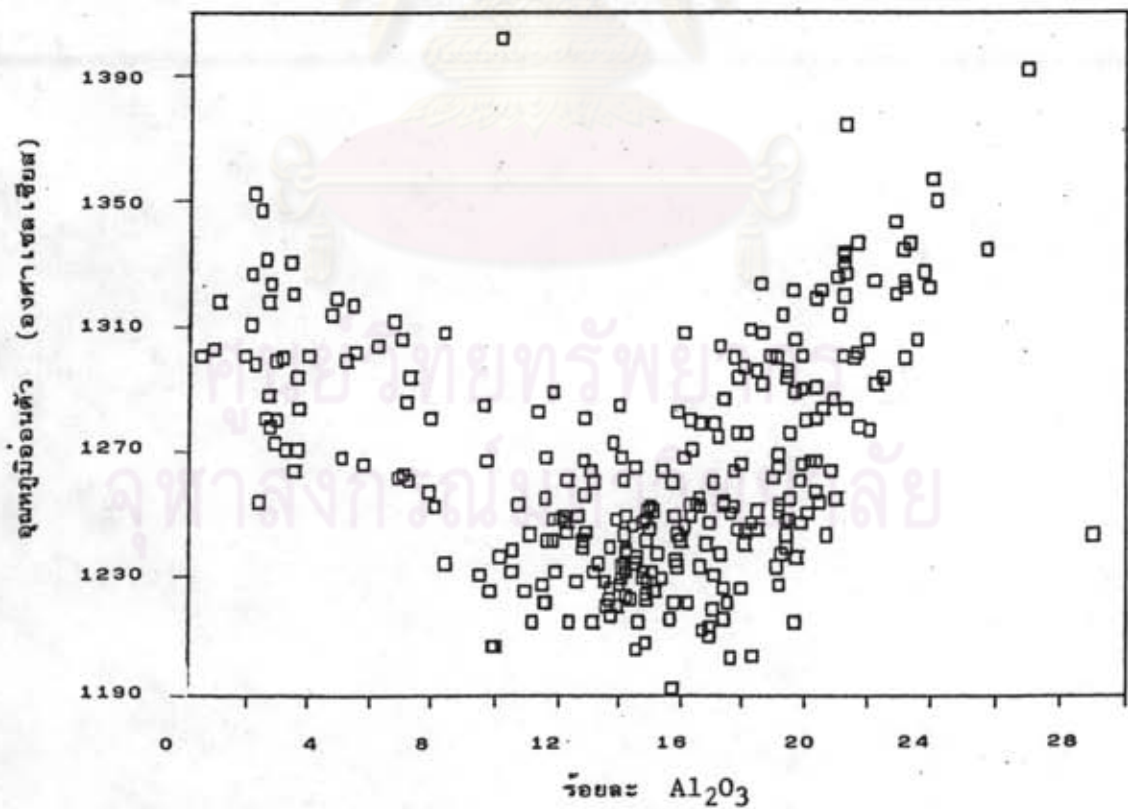
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วด้านหิน พบว่าแก้วด้านหิน เป็นของผสมของสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งตามสมบัติความเป็นกรด และ เบส คือ  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$  และ  $\text{ZnO}$  เป็นเบส  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  และ  $\text{SO}_3$  เป็นกรด จากรูปที่ 4.1-4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบออกไซด์  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  กับอุณหภูมิอ่อนตัวของแก้วด้านหินเหมืองแม่เมาะ 285 ตัวอย่าง ให้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  กับอุณหภูมิอ่อนตัว ที่มีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกมีการลดลงของอุณหภูมิอ่อนตัว เมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เพิ่มถึงประมาณร้อยละ 25,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มถึงประมาณร้อยละ 14 และ  $\text{CaO}$  เพิ่มถึงประมาณร้อยละ 19 แล้วจึงมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอ่อนตัว ตามปริมาณสารประกอบที่เพิ่มขึ้นโดยลำดับ จึงเห็นได้ว่า อุณหภูมิการหลอมของแก้วขึ้นกับสารประกอบเหล่านี้ แต่ไม่สามารถอธิบายถึงผลของสารประกอบแต่ละตัวว่ามีผลต่ออุณหภูมิการหลอมของแก้วได้ เพราะกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นผลของแก้วด้านหินจากหลาย ๆ ตัวอย่าง ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบต่าง ๆ ในแก้วที่แตกต่างกันมาก การอธิบายว่าสารประกอบตัวใดในแก้วมีต่ออุณหภูมิการหลอมอย่างไรใด จำเป็นต้องใช้แก้วด้านหินที่มีองค์ประกอบของแก้วคงที่ แล้วเพิ่มปริมาณของสารประกอบตัวที่ต้องการทราบผลลงในแก้วนี้ เพื่อผลของอุณหภูมิการหลอมใหม่ที่ได้ แล้วนำเสนอเป็นกราฟของความสัมพันธ์ใหม่ต่อไป

ดังนั้น การประมาณอุณหภูมิการหลอมของแก้วด้านหินจึงต้องคำนึงถึงอิทธิพลของสารประกอบทั้งหมดในรูปของฟังก์ชันขององค์ประกอบแก้วใน เหมืองต่าง ๆ ดังวิธีการประมาณอุณหภูมิการหลอมของแก้ว ต่อไปนี้



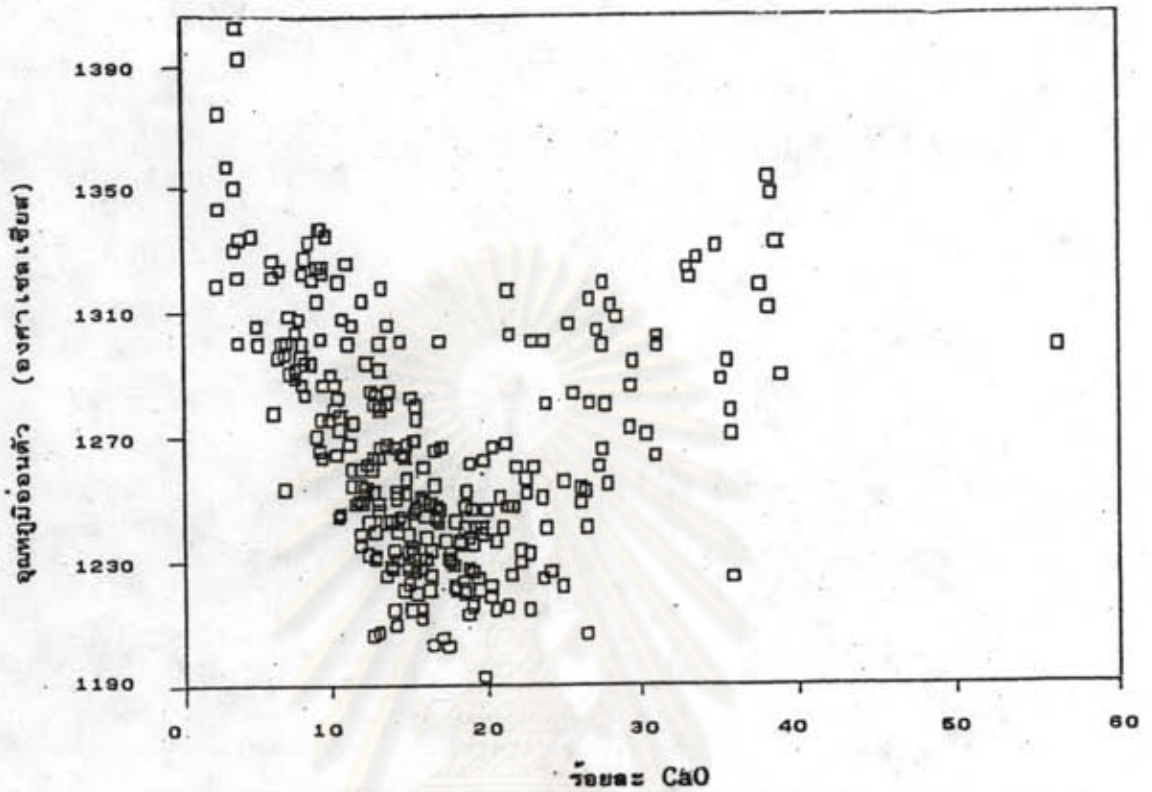


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอ่อนตัวกับร้อยละของ  $\text{SiO}_2$  ของ  
 แก้วด้านหินเหมืองแม่เมาะ 285 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอ่อนตัวกับร้อยละของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของ  
 แก้วด้านหินเหมืองแม่เมาะ 285 ตัวอย่าง





รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดหมึกอ่อนตัวกับร้อยละของ CaO ของ  
 ใต้อ่านหินเหมืองแม่เมาะ 285 ตัวอย่าง

#### 4.4.1 ผลการประมาณอุณหภูมิการหลอมของใต้อ่านหินโดยใช้ไดอะแกรมกราฟสาม เหลี่ยม

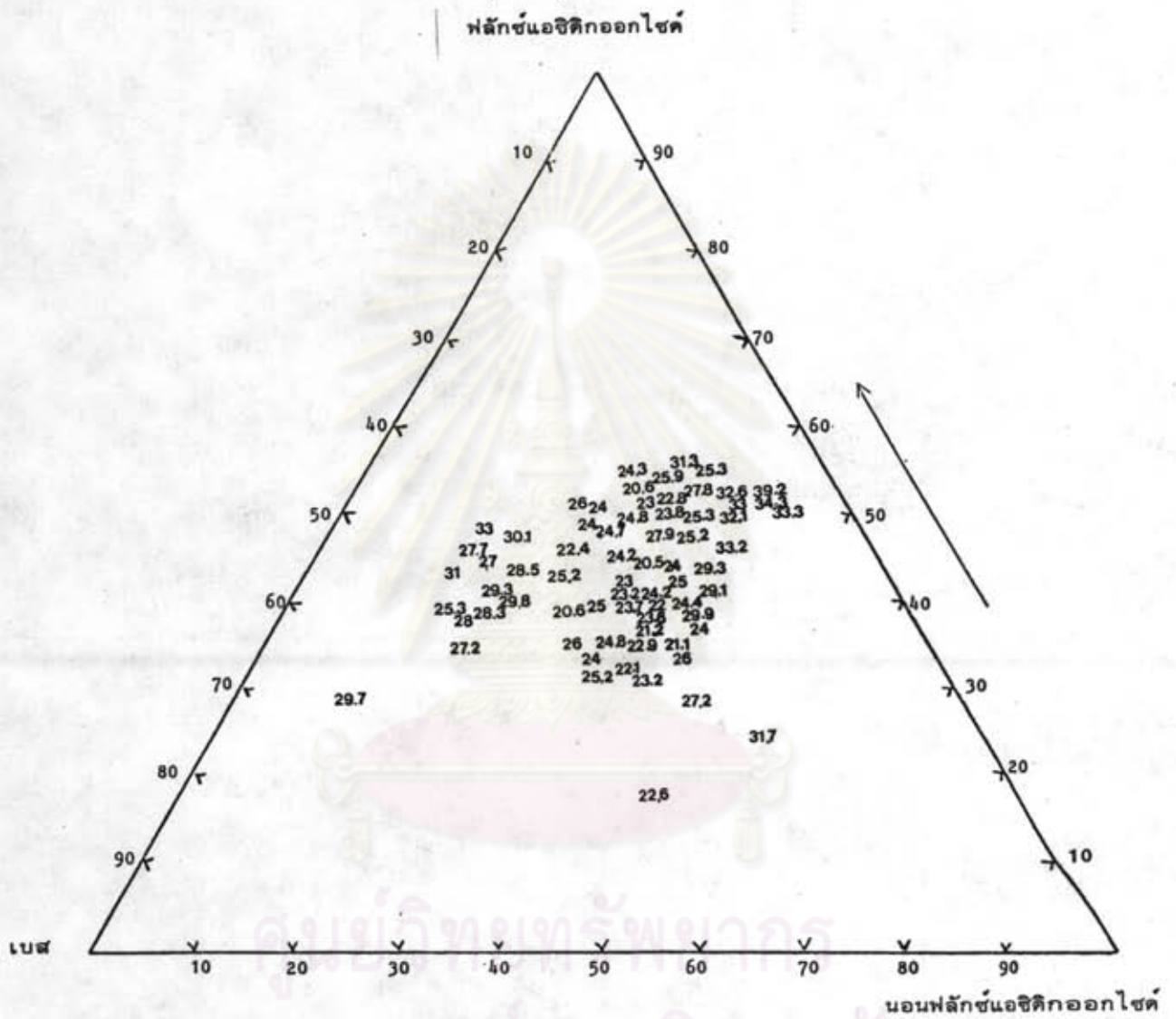
โดยวิธีนี้ องค์ประกอบในใต้อ่านหินถูกจัดให้อยู่ใน เทอมของร้อยละ เบส  
 ฟลักซ์แอซิดออกไซด์ และ นอนฟลักซ์แอซิดออกไซด์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เบส} &= \text{ร้อยละ (CaO + MgO + Na}_2\text{O + K}_2\text{O)} \\ \text{ฟลักซ์แอซิดออกไซด์} &= \text{ร้อยละ (SiO}_2\text{ + TiO}_2\text{ + P}_2\text{O}_5\text{ + SO}_3\text{)} \\ \text{นอนฟลักซ์แอซิดออกไซด์} &= \text{ร้อยละ (Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{)} \end{aligned}$$

เมื่อใช้ผลของเก้าอี้ด้านหินเหมืองแม่เมาะ (กพผ.) ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ของเก้าอี้ แสดงในภาคผนวก ข และได้คำนวณร้อยละ เบส ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ และนอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ ไว้ในตารางที่ ง.1 (ของภาคผนวก ง) และอุณหภูมิอ่อนตัว เขียนลงในกราฟสามเหลี่ยม (ดังรายละเอียดที่อธิบายในภาคผนวก ค) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งมีการกระจายของกลุ่มตัวเลขของอุณหภูมิเกาะ เป็นกลุ่มและมีบางบริเวณที่ไม่พบตัวเลขอุณหภูมิอ่อนตัว จากไออะแกรมกราฟสามเหลี่ยมที่ได้ เมื่อนำไปประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวของเก้าอี้ด้านหินจากแหล่งต่าง ๆ ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4.2 และได้คำนวณร้อยละ เบส ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ และนอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ ไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่า ได้ผลของอุณหภูมิที่ประมาณได้จากไออะแกรมข้างต้น และผลต่างแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลในตาราง เก้าอี้ 21 ตัวอย่าง มีเก้าอี้ 16 ตัวอย่าง ที่ประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวได้โดยมีผลต่างของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้อยู่ในช่วงกำหนดของมาตรฐาน ASTM D1857 ( $\pm 55^{\circ}\text{C}$ ) และมีเก้าอี้ 1 ตัวอย่าง ที่ให้ผลต่างของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้เกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  และมีเก้าอี้ 4 ตัวอย่าง ที่ไม่สามารถประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวได้ เพราะเก้าอี้ส่วนนี้มีร้อยละ เบส ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ และนอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ อยู่นอกบริเวณของไออะแกรมที่มีตัวเลขอุณหภูมิอ่อนตัวกระจายอยู่

ในทำนองเดียวกับการประมาณอุณหภูมิเริ่มผิครูป อุณหภูมิครึ่งทรงกลม และอุณหภูมิของไหล ของเก้าอี้ด้านหินดังกล่าวสามารถทำได้เช่นกัน ดังผลแสดงในตารางที่ 4.4 กรณีของอุณหภูมิเริ่มผิครูป จากเก้าอี้ 21 ตัวอย่าง มีเก้าอี้ 1 ตัวอย่าง ที่มีผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้เกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิครึ่งทรงกลม และ อุณหภูมิของไหล มีเก้าอี้ 3 ตัวอย่าง ที่มีผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้เกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  จึงเห็นว่ากรณีของอุณหภูมิดังกล่าวให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้สูงกว่า และมีจำนวนของเก้าอี้ที่มีผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้เกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  อยู่มากกว่ากรณีของอุณหภูมิอ่อนตัว ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ประมาณนี้มาจากขั้นตอนของผลเฉลี่ยอุณหภูมิจากไออะแกรมบริเวณที่มีร้อยละ เบส ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ และนอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ อยู่ในบริเวณเดียวกันแต่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก ดังนั้นไออะแกรมกราฟสามเหลี่ยมที่ตีควรมีบริเวณที่มีการกระจายของร้อยละ เบส ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ และนอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ กว้าง และให้ผลต่างอุณหภูมิที่ประมาณได้ของเก้าอี้ ควรอยู่ในช่วงตามกำหนดของมาตรฐาน ASTM D1857 ( $\pm 55^{\circ}\text{C}$ ) นอกจากนี้วิธีการของไออะแกรมกราฟสามเหลี่ยมนี้ ไม่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน เพราะมีความยุ่งยากในการแสดงผล





รูปที่ 4.4 โคอะแกรมกราฟสามเหลี่ยมของเต้าถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละ เบส, ฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์, นอนฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ ของแก้วถ่านหิน  
ตารางที่ 4.2

ลำดับ	แหล่ง	(%)			อุณหภูมิที่ทดลองได้ในรูป ตัวเลข C/10-100			
		Base	Fluxing acidic oxides	Non fluxing acidic oxides	IDT	ST	HT	FT
1	MM1	29.05	36.45	34.50	27	30	33	36
2	MM2	18.38	44.59	37.03	31	33	34	36
3	MM3	9.58	50.24	40.18	30	36	38	40
4	MM4	23.63	39.55	36.82	22	24	27	30
5	MM5	10.39	38.36	51.26	30	35	36	37
6	MM6	14.52	40.67	44.82	20	24	28	30
7	MM7	21.04	40.22	38.75	28	32	34	36
8	MM8	23.74	33.27	42.99	25	30	32	35
9	MM9	10.63	41.71	47.67	30	35	36	37
10	MM10	15.45	28.61	55.94	28	31	32	34
11	MM11	21.21	43.51	35.29	20	23	31	33
12	MM12	24.18	37.01	38.81	28	29	31	33
13	PD1	16.51	42.63	40.86	29	31	32.5	34
14	PD2	9.70	48.66	41.65	28	35	37	39
15	PO1	18.33	38.00	43.67	30	31	32	34
16	PO2	16.36	42.93	40.72	22	24	28	32
17	PO3	27.12	42.65	30.23	25	28	30	33
18	PO4	8.78	51.33	39.89	28	35	38	40
19	KV1	16.88	41.41	41.70	26	30	33	35
20	KV2	8.03	57.86	34.11	40			
21	KV3	39.75	39.35	20.90	22	30	34	36.9
22	PA1	8.34	55.29	36.37				
23	NO1	9.16	53.26	37.58	35	39		
24	NA1	15.24	46.51	38.25				





#### 4.4.2 ผลการประมาณอุณหภูมิกการหลอมของเต้าดำนหินโดยใช้หลักของสมการถดถอยเชิงซ้อน

โดยวิธีนี้ องค์ประกอบออกไซด์ในเต้าดำนหินถูกจัดให้อยู่ในรูปกลุ่มออกไซด์ต่าง ๆ คือ ร้อยละ เบส (B) แอซิดฟลักซ์แฟกเตอร์ ( $F_A$ ) และ เบสิกฟลักซ์แฟกเตอร์ ( $F_B$ ) โดยกำหนดให้

$$\text{เบส (B)} = \text{ร้อยละ (CaO + MgO + Na}_2\text{O + K}_2\text{O)}$$

$$\text{แอซิดฟลักซ์แฟกเตอร์ (F}_A\text{)} = \frac{\text{ร้อยละ (SiO}_2\text{ + TiO}_2\text{ + P}_2\text{O}_5\text{ + SO}_3\text{)}}{\text{ร้อยละ (Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{)}}$$

$$\text{เบสิกฟลักซ์แฟกเตอร์ (F}_B\text{)} = \frac{\text{ร้อยละ (Na}_2\text{O + K}_2\text{O + MnO)}}{\text{ร้อยละ (CaO + MgO)}}$$

เมื่อใช้ผลของเต้าดำนหินเหมืองแม่เมาะ (กพผ.) จำนวน 285 ตัวอย่าง ที่มีองค์ประกอบเต้าในภาคผนวก ข และได้คำนวณของร้อยละ เบส แอซิดฟลักซ์แฟกเตอร์ และ เบสิกฟลักซ์แฟกเตอร์ ไว้ในตารางที่ ง.2 (ของภาคผนวก ง) และอุณหภูมิอ่อนตัวในหน่วยองศาเซลวิน มาสร้างความสัมพันธ์โดยใช้หลักการถดถอยจากตัวแปร B, B<sup>2</sup>, F<sub>A</sub>, F<sub>B</sub> (ดังรายละเอียดที่อธิบายในภาคผนวก ค) ได้ความสัมพันธ์ 2 สมการ คือ

ก. เมื่อร้อยละ เบสน้อยกว่า 28 เต้า 211 ตัวอย่าง

$$ST = 1777.93 - 16.11 B + 0.27 B^2 - 22.39 F_A \quad \text{----- (4.1)}$$

$$\text{ได้ } R^2 = 0.65$$

ข. เมื่อร้อยละ เบสมากกว่า 28 เต้า 74 ตัวอย่าง

$$ST = 1310.51 + 8.7 B - 0.1 B^2 + 25.1 F_A \quad \text{----- (4.2)}$$

$$\text{ได้ } R^2 = 0.69$$



จากสมการ (4.1) และ (4.2) เมื่อนำผลของสมการทั้งสองมาตรวจสอบโดยใช้ค่าอุณหภูมิอ่อนตัวของเด้าด้านหินแหล่งต่าง ๆ ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งมีเทอมของร้อยละ เบส แอซิดฟลักซ์แพกเตอร์ และ เบลิกฟลักซ์แพกเตอร์ ในตารางที่ 4.5 ของเด้า 21 ตัวอย่าง มีเด้า 2 ตัวอย่าง ที่มีร้อยละ เบสมากกว่า 28 และมีเด้า 19 ตัวอย่าง ที่มีร้อยละ เบสน้อยกว่า 28 ผลของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้โดยใช้สมการทั้งสองเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ่อนตัวที่ทดลองได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากผลในตาราง มีเด้าด้านหิน 17 ตัวอย่าง ที่ให้ผลต่างของอุณหภูมิไม่เกินข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D1857 ( $\pm 55^{\circ}\text{C}$ ) และมีเด้า 4 ตัวอย่าง ที่มีผลต่างของอุณหภูมิเกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  เพื่ออธิบายให้ชัดเจนถึงผลการใช้สมการ (4.1) และ (4.2) จึงแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้ และอุณหภูมิอ่อนตัวจริง ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีเส้นตรงเป็นตัวแทนของเส้นอุณหภูมิอ่อนตัวจริง และมีจุดต่าง ๆ เป็นตัวแทนของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้ของเด้าด้านหินแหล่งต่าง ๆ จากสมการ (4.1) และ (4.2) พบว่า แนวโน้มของจุดดังกล่าวมีการเบี่ยงเบนจากแนวเส้นอุณหภูมิอ่อนตัวจริง และมีบางจุดที่มีการกระจายอยู่ห่างเส้นอุณหภูมิอ่อนตัวจริง ดังนั้นผลการใช้งานของสมการนี้จึงใช้ได้กับเด้าด้านหินทั่วไป แต่ยังมีผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้ของเด้าบางตัวอย่างสูงเกินข้อกำหนด ASTM D1857 อยู่บ้าง ผลการใช้งานของสมการนี้จึงไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งถ้าเป็นสมการที่ดี ผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้ควรอยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 55^{\circ}\text{C}$  ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D1857

และ เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้สมการถดถอยเชิงซ้อนเพื่อประมาณอุณหภูมิของเด้าด้านหินกับการใช้ไดอะแกรมกราฟสามเหลี่ยม พบว่าการใช้สมการถดถอยให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับการใช้ไดอะแกรมกราฟสามเหลี่ยม แต่การใช้สมการถดถอยให้รูปของสมการความสัมพันธ์ที่ง่ายแก่การนำไปใช้งาน โดยคำนวณตัวแปร  $B, B^2, F_A, F_B$

#### 4.4.3 ผลของการประมาณอุณหภูมิการหลอมของเด้าด้านหินโดยใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการหลอมของสารอุดมคติกับสัดส่วนโมลของตัวละลายที่มีอยู่ นำมาประยุกต์เพื่อประมาณอุณหภูมิการหลอมของเด้าด้านหิน ตามสมการ (2.22) ที่ Attar และผู้ร่วมงาน (24) เสนอไว้

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \sum_{i=1}^n \frac{R}{A_i} \ln(1 - \Delta X_i) \quad \dots \dots \dots (2.22)$$

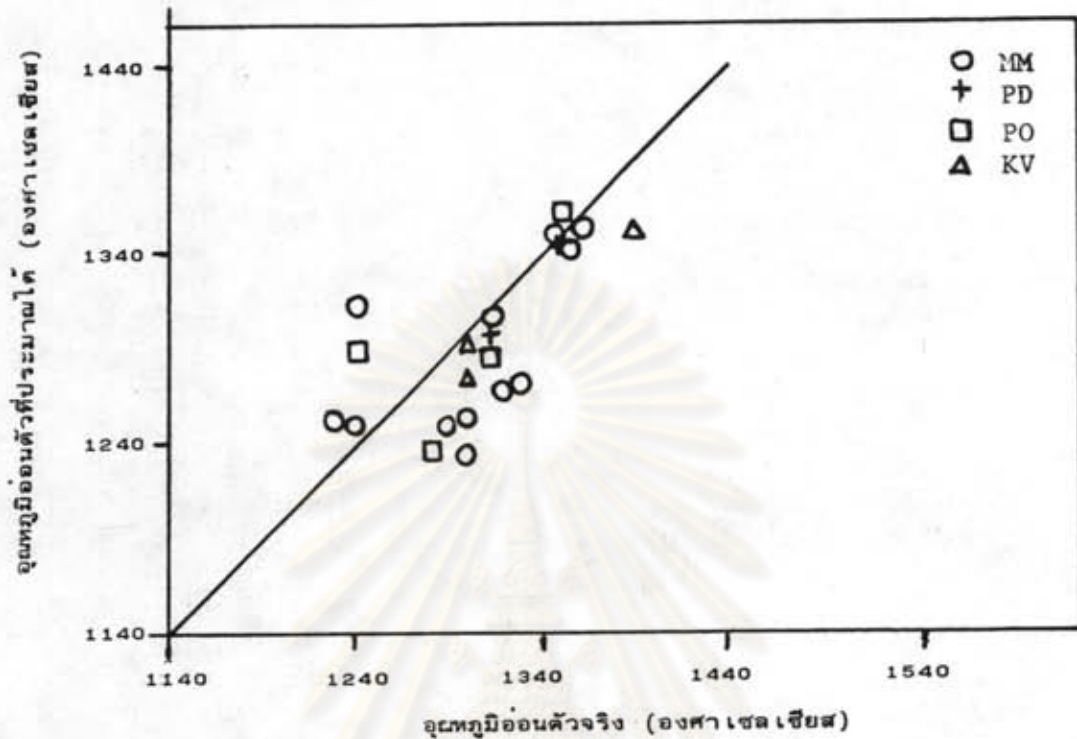
ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละ เบส, แอซิดฟอสเฟตเตอร์ (FA), เบสฟอสเฟตเตอร์ (FB) ของเม็ดถ่านหินตารางที่ 4.2

ลำดับ	แหล่ง	%			คุณสมบัติการหลอมของเม็ดถ่านหิน (°ซ)			
		Base	FA	FB	IDT	ST	HT	FT
1	MM1	29.05	1.06	0.14	1270	1300	1330	1360
2	MM2	18.38	1.20	0.61	1310	1330	1340	1360
3	MM3	9.58	1.25	0.93	1300	1360	1380	1400
4	MM4	23.63	1.07	0.43	1220	1240	1270	1300
5	MM5	10.39	0.75	0.35	1300	1350	1360	1370
6	MM6	14.52	0.91	0.10	1200	1240	1280	1300
7	MM7	21.04	1.04	0.05	1280	1320	1340	1360
8	MM8	23.74	0.77	0.13	1250	1300	1320	1350
9	MM9	10.63	0.88	0.57	1300	1350	1360	1370
10	MM10	15.45	0.51	0.13	1280	1310	1320	1340
11	MM11	21.21	1.23	0.06	1200	1230	1310	1330
12	MM12	24.18	0.95	0.13	1280	1290	1310	1330
13	PD1	16.51	1.04	0.61	1290	1310	1325	1340
14	PD2	9.70	1.17	0.34	1280	1350	1370	1390
15	PO1	18.33	0.87	0.29	1300	1310	1320	1340
16	PO2	16.36	1.05	0.12	1220	1240	1280	1320
17	PO3	27.12	1.41	0.03	1250	1280	1300	1330
18	PO4	8.78	1.29	0.47	1280	1350	1380	1400
19	KV1	16.88	0.99	0.11	1260	1300	1330	1350
20	KV3	39.75	1.88	0.04	1220	1300	1340	1369
21	KV2	8.03	1.70	0.39	1400	>1400		
22	PA1	8.34	1.52	1.19	>1400			
23	NO1	9.16	1.42	2.26	1350	1390	>1400	
24	NA1	15.24	1.22	0.27	>1400			



ตารางที่ 4.6 แสดงผลการประมาณค่าต้นทุนวิชาการของเก่าเท่ากับโดยวิธีสมการถดถอยเชิงพหุ

ลำดับ	แหล่ง	ต้นทุนที่ลดลงได้ (๐บ)			ต้นทุนที่ประมาณได้ (๐บ)			ผลต่างต้นทุนที่ประมาณได้ (๐บ)					
		IDT	ST	HT	FT	IDT	ST	HT	FT	IDT	ST	HT	FT
1	MM1	1270	1300	1330	1360	1221	1233	1244	1260	49	67	86	100
2	MM2	1310	1330	1340	1360	1254	1272	1285	1302	56	58	55	58
3	MM3	1300	1360	1380	1400	1316	1347	1362	1381	-16	13	18	19
4	MM4	1220	1240	1270	1300	1235	1250	1261	1277	-15	-10	9	23
5	MM5	1300	1350	1360	1370	1318	1350	1365	1384	-18	0	-5	-14
6	MM6	1200	1240	1280	1300	1283	1307	1321	1339	-83	-67	-41	-39
7	MM7	1280	1320	1340	1360	1245	1261	1273	1290	35	59	67	70
8	MM8	1250	1300	1320	1350	1240	1256	1268	1284	10	44	52	66
9	MM9	1300	1350	1360	1370	1314	1344	1360	1378	-14	6	0	-8
10	MM10	1280	1310	1320	1340	1284	1308	1322	1340	-4	2	-2	0
11	MM11	1200	1230	1310	1330	1240	1256	1268	1284	-40	-26	42	46
12	MM12	1280	1290	1310	1330	1236	1250	1262	1278	44	40	48	52
13	PD1	1290	1310	1325	1340	1267	1289	1302	1319	23	21	23	21
14	PD2	1280	1350	1370	1390	1316	1348	1363	1382	-36	2	7	8
15	PO1	1300	1310	1320	1340	1260	1280	1293	1310	40	30	27	30
16	PO2	1220	1240	1280	1320	1268	1289	1303	1320	-48	-49	-23	0
17	PO3	1250	1280	1300	1330	1221	1233	1244	1260	29	47	56	70
18	PO4	1280	1350	1380	1400	1323	1355	1371	1390	-43	-5	9	10
19	KV1	1260	1300	1330	1350	1266	1287	1300	1317	-6	13	30	33
20	KV2	1400	>1400			1322				78			
21	KV3	1220	1300	1340	1369	1255	1274	1287	1303	-35	26	53	66
22	PA1	>1400				1323							
23	NO1	1350	1390	>1400		1317	1348	1363	1382	33	42		
24	NA1	>1400				1272							



รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้จากสมการ (4.1) และ (4.2) โดยหลักของสมการถดถอยเชิงซ้อน เทียบกับอุณหภูมิอ่อนตัวจริงของเด้าด้านหินตารางที่ 4.2

เมื่อใช้สมการ (2.22) นี้กับเด้าด้านหินเหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) จำนวน 285 ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของเด้าดังแสดงในภาคผนวก ข เพื่อหาค่า  $T_0$  และ  $A_1$  ของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ ออกไซด์ตัวอื่น ๆ กับอุณหภูมิอ่อนตัว (ST) ในหน่วยองศาเซลวิน (ดังรายละเอียดที่ได้อธิบายในภาคผนวก ค) ได้ผลดังแสดงตารางที่ 4.7 เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{1}{ST} = 6.64 \times 10^{-4} + 5.64 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{SiO}_2}) + 5.33 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{Al}_2\text{O}_3}) + 4.62 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{Fe}_2\text{O}_3}) + 6.51 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{CaO}}) + 6.98 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{MgO}}) + 5.61 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{SO}_3}) + 6.02 \times 10^{-4} \ln(1 - \Delta X_{\text{others}}) + \dots \quad (4.3)$$





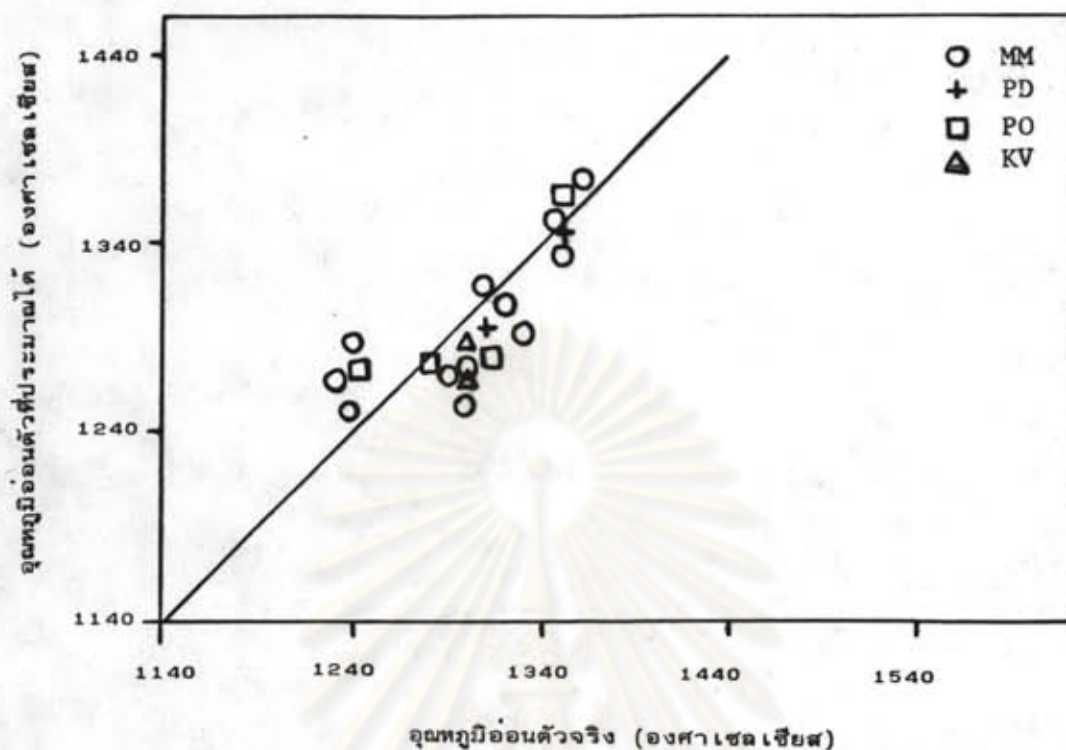
ตารางที่ 4.7 แสดงผลของสหสัมพันธ์ และสัมประสิทธิ์ของสารประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากสมการ (4.3)

อุณหภูมิตาม ASTM D1857	ST					
จำนวนข้อมูล	285					
$R^2$	0.68					
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, องศาเซลเซียส	48					
$T_0$ , องศาเซลเซียส	1506					
$A_{SiO_2}$ แคลอรีต่อโมล	3521					
$A_{Al_2O_3}$ "	3721					
$A_{Fe_2O_3}$ "	4299					
$A_{CaO}$ "	3048					
$A_{MgO}$ "	2843					
$A_{SO_3}$ "	3536					
$A_{others}$ "	3299					
ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนโมล						
$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	others
0.3459	0.1119	0.0671	0.2237	0.0686	0.1579	0.0248

จากผลของตารางที่ 4.7 หรือ สมการ (4.3) เมื่อนำสมการที่ได้มาตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิอ่อนตัวของแก้วด้านหินแหล่งต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4.2 ได้ผลของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณและผลต่างแสดงในตารางที่ 4.8 จากผลในตาราง แสดงให้เห็นว่าแก้วด้านหินทั้ง 21 ตัวอย่าง มีผลต่างอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้ในช่วงไม่เกิน  $\pm 55$  °ซ ซึ่งแสดงเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้กับอุณหภูมิอ่อนตัวจริง ได้ดังรูปที่ 4.6 แนวโน้มจุดต่าง ๆ ที่เป็นตัวแทนของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้ของแก้วด้านหินแหล่งต่าง ๆ มีการเบี่ยงเบนจากแนวเส้นอุณหภูมิอ่อนตัวและมีการกระจายน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบ







รูปที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้จากสมการ (4.3) โดยใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เทียบกับอุณหภูมิอ่อนตัวจริงของเด้าด้านหินคารางที่ 4.2

กราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.5 ซึ่งผลของการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวจากสมการ (4.1) และ (4.2) ที่ใช้หลักของสมการถดถอย และกราฟรูปที่ 4.6 ซึ่งผลของการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวจากสมการ (4.3) ที่สร้างจากการใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า กราฟของสมการที่สร้างจากการใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์รูปที่ 4.6 ให้ผลของอุณหภูมิอ่อนตัวที่ประมาณได้และผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้ดีกว่ากราฟของสมการที่สร้างจากการถดถอยรูปที่ 4.5 ดังนั้นสมการที่สร้างจากการใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมการ (4.3) จึงเป็นสมการที่เหมาะสม และดีที่สุดในการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัว เมื่อเทียบกับสมการอื่นทั้งหมดที่ผ่านมา

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด อาจสรุปผลของความสัมพันธ์ที่เสนอไว้ เพื่อประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวของเด้าด้านหิน จาก 3 วิธีข้างต้น ที่ได้ใช้ข้อมูลของเด้าด้านหินเหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) จำนวน 285 ตัวอย่าง เป็นข้อมูลพื้นฐานในการ สร้างความสัมพันธ์ และนำผลของความสัมพันธ์ที่ได้มาตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิอ่อนตัวของเด้าด้านหินแหล่งต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ไว้จำนวน 21 ตัวอย่าง ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัว (ST) ของเด้าด้านหินตารางที่ 4.2 จำนวน 21 ตัวอย่างโดยใช้ความสัมพันธ์ที่สร้างจากข้อมูลเด้าด้านหินเหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) 285 ตัวอย่าง

การประมาณอุณหภูมิอ่อนตัว (ST)	R <sup>2</sup>	ผลต่างอุณหภูมิที่ประมาณได้ (°ซ)	N
1) ใช้โต๊ะแกมกราฟสามเหลี่ยม	-	+70	1
2) ใช้หลักของสมการถดถอยเชิงซ้อน  ST = 1777.93-16.11B+0.27B <sup>2</sup> -22.39FA ... <28% B ST = 1310.51+8.7B-0.1B <sup>2</sup> +25.1FA ... >28% B	0.51	+67	4
3) ใช้สัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์  $\frac{1}{ST} = 6.64 \times 10^{-4} + 5.64 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{SiO_2}) + 5.33 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{Al_2O_3}) + 4.62 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{Fe_2O_3}) + 6.51 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{CaO}) + 6.98 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{MgO}) + 5.61 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{SO_3}) + 6.02 \times 10^{-4} \ln(1-\Delta X_{others})$	0.68	+51	0

N เป็นจำนวนข้อมูลที่มีผลต่างอุณหภูมิเกิน  $\pm 55$  °ซ

จากตารางแสดงให้เห็นผลเปรียบเทียบการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวโดยวิธีต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า R<sup>2</sup> และผลต่างของอุณหภูมิที่ประมาณได้ ตลอดถึงจำนวนตัวอย่างเด้าที่ใช้ได้ พบว่าใน 3 วิธี วิธีการประมาณอุณหภูมิอ่อนตัวของเด้าด้านหิน โดยใช้สัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นวิธีที่ดีที่สุด เพราะมีผลต่างอุณหภูมิที่ประมาณได้ของเด้าด้านหินทั้งหมดอยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 55$  °ซ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM D1857



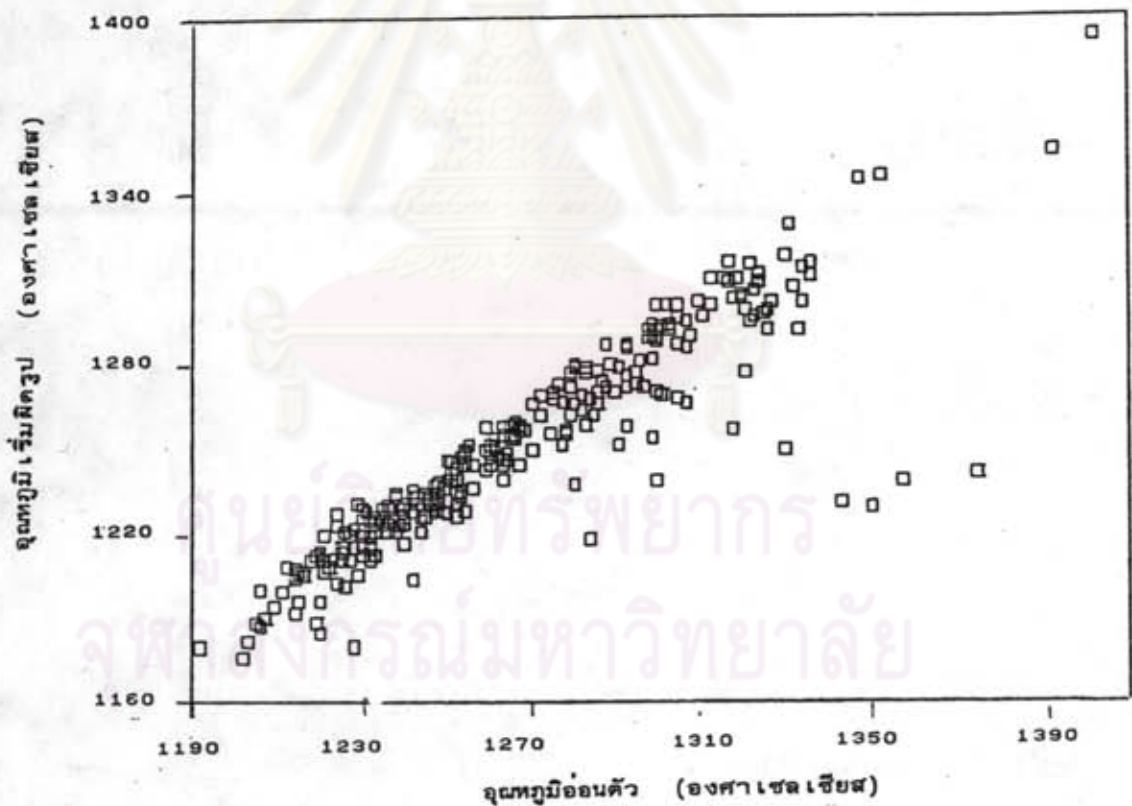
นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มผิครูป อุณหภูมิเครื่องทรงกลม และอุณหภูมิของไหล ในเชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิก่อนตัว ดังรูปที่ 4.7-4.9 ซึ่งแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$IDT = 243.08 + 0.83 ST \quad R^2 = 0.81 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

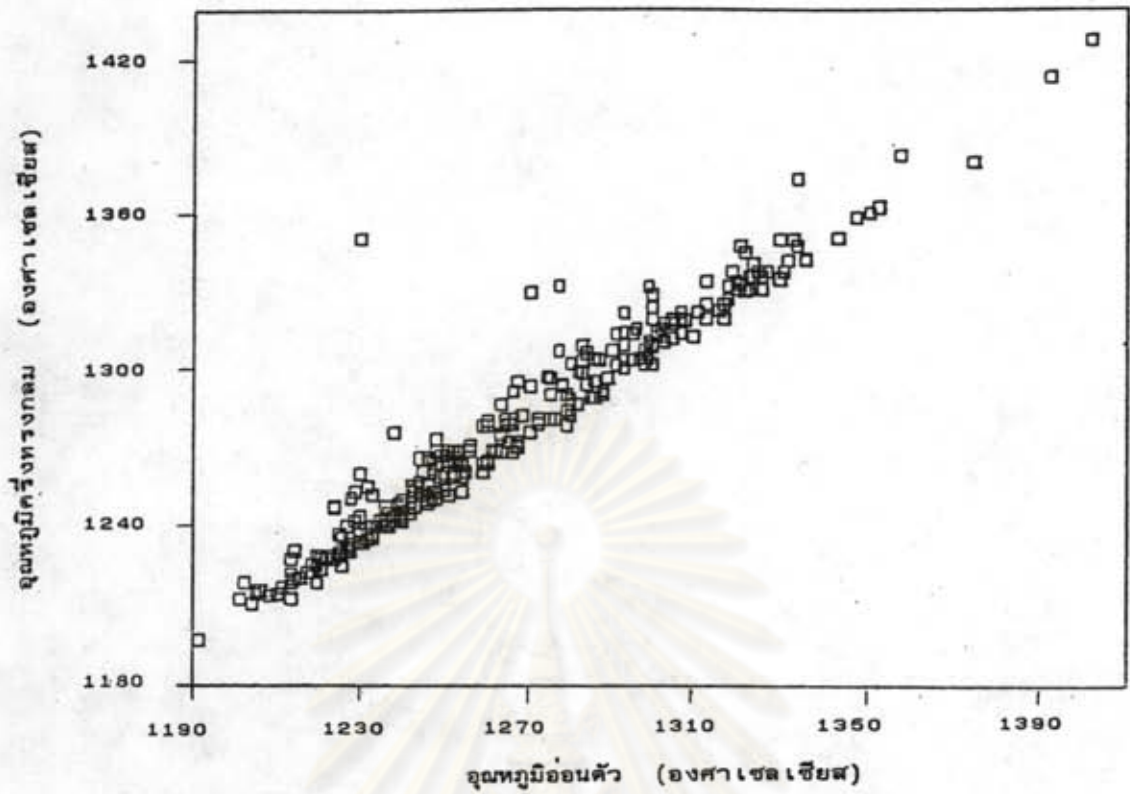
$$HT = -39.87 + 1.03 ST \quad R^2 = 0.94 \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$FT = -72.10 + 1.06 ST \quad R^2 = 0.87 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

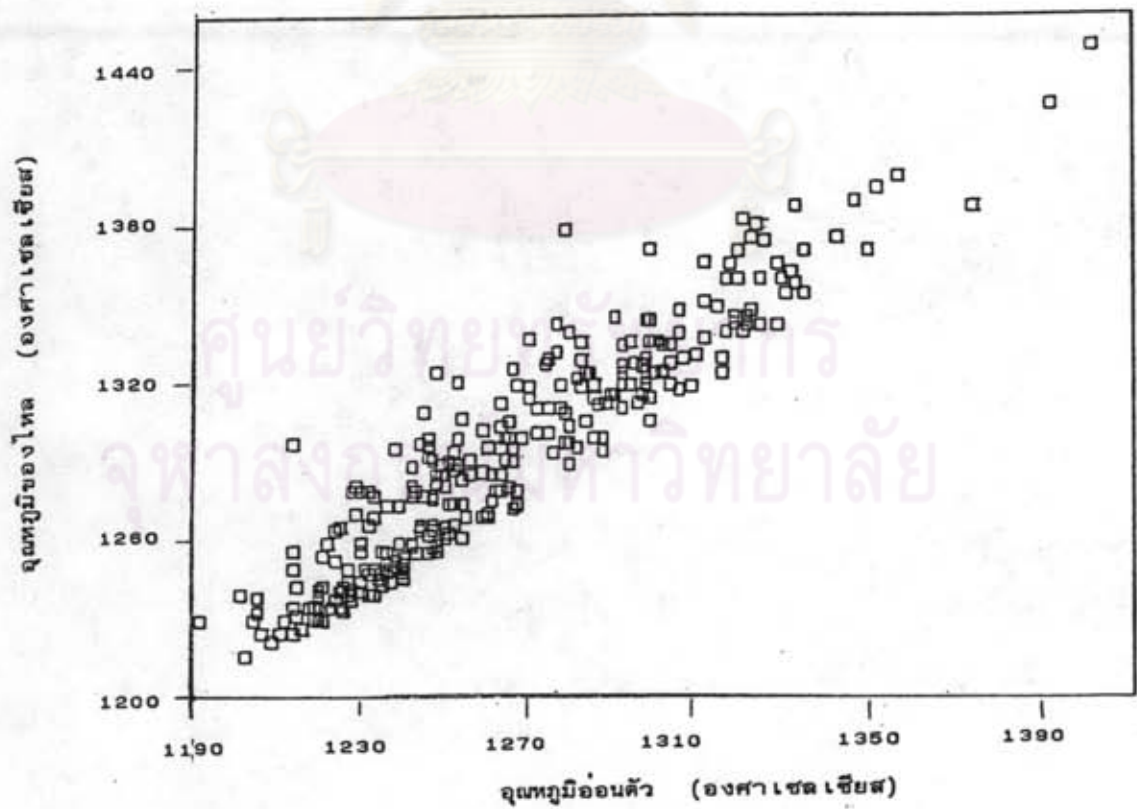
จากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถประมาณอุณหภูมิเริ่มผิครูป อุณหภูมิเครื่องทรงกลม และ อุณหภูมิของไหล จากอุณหภูมิก่อนตัวที่ประมาณได้



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก่อนตัวกับอุณหภูมิเริ่มผิครูป



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภูมิภาคโรงเรียนกับอนุภูมิภาคอ่อนตัว



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภูมิภาคของไหลกับอนุภูมิภาคอ่อนตัว



ผลการประมาณอุทกหภูมิได้ดำเนิน 3 วิธีที่ผ่านมาของงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของต่างประเทศ งานวิจัยนี้ใช้หลักของสมการถดถอยเชิงซ้อน และโคอะแกรมกราฟสามเหลี่ยม ตามแนวของ Vincent แต่ได้ปรับปรุงโดยเพิ่ม  $SO_3$  ให้เป็นฟลักซ์แอซิดิกออกไซด์ โดยกำหนด  $B$ ,  $F_A$  และ  $F_B$  ของสภาวะออกซิเดชันใหม่ ส่วนสหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ได้ใช้แนวของ Attar และผู้ร่วมงาน ที่เสนอไว้ แต่ได้เพิ่มตัวแปร  $SO_3$  เป็น 8 ตัวแปร ต่างจากที่เสนอไว้เพียง 7 ตัวแปร ผลของการประมาณอุทกหภูมิที่ผ่านมาทั้ง 3 วิธี พบว่า การใช้สหสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นวิธีที่ดีที่สุด ให้ผลต่างของอุทกหภูมิที่ประมาณได้ต่ำกว่าวิธีอื่น และดีกว่าผลงานวิจัยของต่างประเทศที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ดีผลของงานวิจัยนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้กับงานวิจัยต่างประเทศที่กล่าวมาแล้วได้โดยตรง เพราะ ผลงานวิจัยต่างประเทศใช้สภาวะรีดิคซ์ ส่วนงานวิจัยนี้ใช้สภาวะออกซิเดชัน



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย