



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ลักษณะทางกายภาพของแกลบ (Antal, 1982)

แกลบเป็นส่วนเปลือกของเมล็ดข้าวที่ได้หลังจากการสีข้าวแล้วจัดเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร แกลบส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อนลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหัวท้ายปิดเป็นรูปทรงรีที่มีแกนตามยาวเป็นแนวสมมาตร มีความยาวอยู่ในช่วง 6-10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-2.5 มิลลิเมตร ความหนาของผนังเซลล์ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่น (bulk density) โดยประมาณ 0.148 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากที่ผิวด้านนอกของแกลบมีซิลิกาสะสมอยู่เป็นปริมาณสูงทำให้แกลบมีคุณสมบัติแตกหักง่าย ซิลิกาในแกลบเมื่อเทียบความแข็งตามโมห์สเกล (Mohs Scale) มีความแข็งเท่ากับ 5.5 ถึง 6.5

สัณฐานวิทยาของแกลบ (Antal, 1982)

ผิวนอกของแกลบมีลักษณะเป็นเซลล์ที่เป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งมีความเข้มข้นของซิลิกาสูง ถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (cuticle) หนาและมีขนสั้น ๆ อยู่บนผิว ภายในประกอบด้วยเส้นใยและเซลล์ที่ประกอบด้วยเส้นใยต่าง ๆ ชั้นกลางมีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำกว่าชั้นนอก โดยทั่วไปอาจสรุปโครงสร้างเนื้อเยื่อของแกลบได้ดังนี้

- ผนังเซลล์ด้านนอกประกอบด้วยเซลล์ลักษณะเป็นปุ่มที่มีปริมาณซิลิกาอยู่สูง
- สเคลอเรนไคมา (Sclerenchyma) ประกอบด้วยเส้นใยต่าง ๆ อันประกอบด้วย ลิกนิน และซิลิกา
- พาเรนไคมา (Parenchyma) เป็นเซลล์ลักษณะคล้ายฟองน้ำมีรูพรุนและมีรูปร่างแตกต่างกันไป
- ผนังชั้นในประกอบด้วยเส้นใยที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน

องค์ประกอบของแกลบ (Antal, 1982)

องค์ประกอบของแกลบจะแตกต่างกันไปตามแหล่งเพาะปลูก ส่วนมากประกอบด้วย สารอินทรีย์ ซิลิกา และสิ่งปนเปื้อน (impurities) องค์ประกอบหลัก ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในแกลบพบว่าเป็น คาร์บอน 51.2 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 6.9 เปอร์เซ็นต์ และออกซิเจน 41.9 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สารอินทรีย์นี้ประกอบด้วยพวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาล และโพลีเมอร์ของน้ำตาล ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในแกลบ

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (%)
เถ้า	13 - 29
เซลลูโลส	34 - 44
ลิกนิน	19 - 47
น้ำตาล	17 - 26

D-xylose, L-arabinose, Methylglucuronic acid, D-galactose

ที่มา : Hunt, Dismukes และ Amick (1984)

1. เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นเส้นใยของโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่เป็นส่วนประกอบหลัก ในผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด งานวิจัยที่ผ่านมาได้ รายงานไว้ว่าเซลลูโลสเป็น โพลีแซคคาไรด์สายตรงที่ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรเซลลูโลสมา เชื่อมต่อกันด้วย 1-4 กลูโคสิติก โครงสร้างของเซลลูโลสส่วนใหญ่จะเป็นรูปผลึกที่มีระเบียบ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบพวกแซคคาไรด์ และลิกนิน

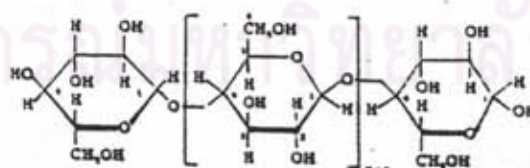
Component	Chemical Formula	Molar mass
Monosaccharides		
Xylose [*]	$C_5H_{10}O_5$	150
D-glucose ⁺ (corn/grape sugar)	$C_6H_{12}O_6$	180
Mannose [*]	$C_6H_{12}O_6$	180
Disaccharides		
Sucrose (cane/beer sugar)	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342
Maltose (malt sugar)	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342
	Monomer building block	Molar mass
Polysaccharide		
Cellulose (-C ₆ H ₁₀ O ₅ -)	D-glucose	> 100000
Starch (-C ₆ H ₁₀ O ₅ -)	D-glucose	35000-39000
Hemicellulose	Various sugar [*]	10000-35000
Lignin	Hydroxyphenyl-propane [#] (C ₉ H ₇ C ₈ H ₄ OH)	5000-10000

^{*} Xylose and mannose are the principle sugar constituent of hemicellulose

⁺ Also called dextrose

[#] A compound related to phenol, C₆H₅OH

ที่มา : Antal (1982)



ที่มา : Antal (1982)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส

2. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลสแต่จะอยู่ในรูปอสังฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลสและมีมวลต่ำกว่ามากดังแสดงในตารางที่ 2.1 เซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวพวก ดี-กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่มดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายกับพวกเซลลูโลสยกเว้นพวกโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยหน่วยย่อย 50-200 หน่วย และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง

3. ลิกนิน

ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของพืช ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (aliphatic chain) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลิกนินมีคุณลักษณะที่เหมาะสมที่จะเป็นผนังเซลล์ของพืชที่จะช่วยทำตัวเสมือนการยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช นอกจากนี้ลิกนินยังอยู่ในรูปอสังฐานเช่นเดียวกับพวกเฮมิเซลลูโลส

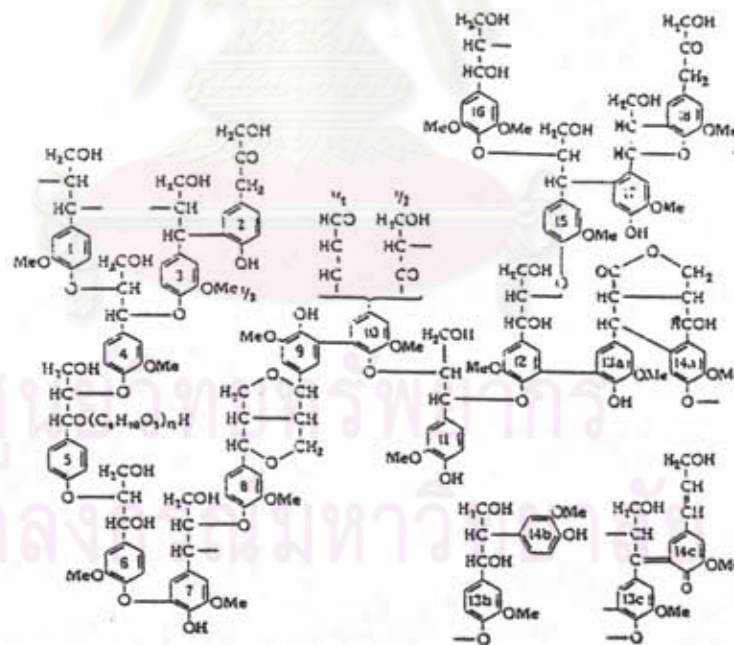


ที่มา : Antal (1982)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของน้ำตาลต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นเฮมิเซลลูโลส

4. สารอนินทรีย์

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่หมายถึงแก้ว แกลบมีปริมาณแก้วแตกต่างกันไปตามแหล่งเพาะปลูก โดยมีสัดส่วนของซิลิกาอยู่ในช่วงระหว่าง 87-97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเปรียบเทียบปริมาณแก้วซิลิกาในแกลบกับส่วนอื่น ๆ ของต้นข้าวและพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอื่น ๆ พบว่าแกลบมีปริมาณของซิลิกาอยู่สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ส่วนตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของแก้วจากแกลบเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ เห็นได้ว่าแกลบมีปริมาณของซิลิกาอยู่ในแก้วสูงมาก และส่วนที่เหลือเป็นสิ่งปนเปื้อน โดยสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้มีแตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่ปลูกและปุ๋ยที่ใช้ ตารางที่ 2.5 แสดงค่าธาตุต่าง ๆ ซึ่งปริมาณของความแตกต่างจากตารางอื่นอันเนื่องมาจากการล้างแกลบก่อนวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ปริมาณอลูมิเนียม และเหล็ก จะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อมีการล้างดินออกจากแกลบก่อนการวิเคราะห์ แต่โดยปกติแล้วจะพบโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส เป็นส่วนใหญ่ ส่วนอลูมิเนียม เหล็ก และโซเดียม จะมีอยู่รองลงมา



ที่มา : Antal (1982)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิฟีนอล

ตารางที่ 2.3 ปริมาณเถ้าและซิลิกาในส่วนต่าง ๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

Plant	Part	Ash content in (g/Kg [*])	Silica in ash (wt %)	Silica content in (g/Kg [*])
Rice	husk	200	96	192
	straw	150	82	123
Wheat	hulls	100	69	69
	leaf sheet	110	91	100
Corn	leaf sheet	120	54	77
Barley	straw	6	54	3
Oats	straw	70	47	33
Bamboo	nodes ^{**}	20	57	11

* referred to dry biomass

** inner part

ที่มา : Sacher (1988)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของเถ้าในพืชชนิดอื่น ๆ เปรียบเทียบกับเถ้าแกลบ

Plant	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ₂
Beech wood	5	6	10	50	6	20	-
Birch wood	12	8	14	30	9	23	-
Oak bark	3	3	8	57	2	26	-
Pine wood	10	9	6	25	9	27	-
Spruce wood	2	4	6	30	6	7	43
Rice husk	96	-	1.5	1.5	1.5	1.5	-

ที่มา : Matthes (1990)

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแกลบจากแหล่งต่าง ๆ

Impurity (ppm)	Arkansas	Japan	Louisiana	Malaysia	Avg.
Al	20	10	200**	10	10
Ca	1000	1000	1000	1000	1000
Fe	20	20	60**	20	20
K	4000	8000	2000	1200	3800
Mg	900	200	600	300	500
Mn	500	200	500	200	3500
Na	20	50	10	20	25

* Other impurities < 1 ppm.

** Unusually high ; not include in average.

ที่มา : Hunt และ คณะ (1984)

ลักษณะทางกายภาพของซิลิกา (Iler, 1979)

ซิลิกา (Silica) หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) มีสูตรโมเลกุลอย่างง่ายคือ SiO_2 เป็นสารประกอบของซิลิกอนและออกซิเจนซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่มากมายบนพื้นโลก มีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อให้มีคุณสมบัติเฉพาะตามต้องการ โดยทั่วไปซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีอยู่ 2 ประเภทคือ ประเภทแรกเกิดเป็นรูปผลึก (crystalline) มีขนาดแตกต่างกันไปตั้งแต่ หินเขี้ยวหนุमान (quartz rock) ไปจนถึงมีขนาดเล็ก ๆ เช่น ทราย อีกประเภทหนึ่งคือ ซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) เช่น ซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างของตัวไดอะตอม (diatom) และซิลิกาที่มีอยู่ในโครงสร้างของพืช

ถึงแม้ว่าซิลิกาทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีสูตรทางเคมีเหมือนกัน แต่ก็มีสมบัติหลายประการที่แตกต่างกันออกไป เพราะว่ามีโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน ทำให้สมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความว่องไวต่อปฏิกิริยาไม่เหมือนกัน เนื่องจากซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูปผลึกมาก

1. ซิลิกาที่เป็นรูปผลึก

ซิลิกาที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างรูปผลึก แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชนิดของซิลิกาที่มีโครงสร้างรูปผลึก

Name of crystal	Lattice type	Density in g/cm^3	Thermal expansion 10^{-6}K^{-1}
common polymorphs			
low-T quartz	trigonal	2.65	12.3
high-T quartz	hexagonal		
low-T cristobalite	tetragonal	2.33	10.3
high-T cristobalite	cubic		
low-T tridymite	monoclinic	2.27	21.1
high-T tridymite	hexagonal		
high-P polymorphs			
Katite	tetragonal	2.50	
Coesite	monoclinic	2.92	
Stishowite	tetragonal	4.35	
low-density polymorphs			
melanno phlogit fibres	cubic	2.05	
	orthorhombic	1.98	

ที่มา : Iler (1979)

2. อัดแน่นซิลิกา

อัดแน่นซิลิกา แบ่งออกได้อย่างกว้าง ๆ เป็น 3 ประเภท คือ

2.1 วิเทรียซิลิกา

หรือสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซิลิกาแก้ว (Silica glass) มีลักษณะแข็ง ไม่มีรูพรุน เกิดขึ้นจากการแข็งตัวจากการหลอมของผลึก หรือการหลอมผงอัดแน่นซิลิกา มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำมาก อยู่ในช่วง $0.5-0.8 \times 10^{-6}$ องศาเซลวิน⁻¹

2.2 ซิลิกาเจล

มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

- ก. อะควาเจล เกิดจากสารละลาย
- ข. อัลโคเจล เกิดจากสารประกอบอัลคอกซี-ไฮเลน
- ค. ซิโรเจล มีลักษณะแข็ง ลักษณะโครงสร้างเดิมจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับ

กระบวนการทำให้แห้ง

- ง. แอโรเจล มีลักษณะแข็งลักษณะโครงสร้างขึ้นอยู่กับกระบวนการทำให้แห้ง

2.3 ซิลิกาผง

มีการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง โครงสร้างมีขนาดเล็กมากหรือไม่มีโครงสร้าง และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แบ่งออกได้ดังนี้

- ก. อะควาจีนิค เกิดจากการตกตะกอนของสารละลายโดยตรงหรือจาก

อะควาเจล

ข. ไพโรจีนิค เกิดจากการระเหยของซิลิกาโดยใช้เปลวไฟหรือการอาร์ค (arc) ในสภาวะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน และเกิดการรวมตัวกันทางกายภาพหรือเกิดจากการรวมตัวกันทางเคมีของไอสารประกอบซิลิกอน (Si , SiCl_4) จากเปลวไฟของ ไฮโดรเจน กับออกซิเจน

ค. ไบโอจีนิค เป็นประเภทของอะควาจีนิคชนิดพิเศษประเภทหนึ่งที่พบในพืช และไดอะตอม

ส่วนดีไฟน์ซิลิกา เป็นอสังฐานซิลิกาชนิดหนึ่งที่ใช้กันในการการค้า มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร มีความบริสุทธิ์ของซิลิกา 99.8 เปอร์เซ็นต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 200 ถึง 400 ตารางเมตรต่อกรัม มีสีขาว

3. การสังเคราะห์อสังฐานซิลิกาในการการค้า

ในการการค้านั้นมีการสังเคราะห์อสังฐานซิลิกาขึ้นเพื่อให้ได้คุณสมบัติเฉพาะตัว บางประการที่ต้องการใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถพบได้ในซิลิกาที่เกิดเองจากธรรมชาติ เช่น ต้องการความบริสุทธิ์สูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงในเวลาเดียวกัน หรือต้องการพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก (มากกว่า 50 ตารางเมตรต่อกรัม) การสังเคราะห์อสังฐานซิลิกาด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันจะทำให้ได้อสังฐานซิลิกาที่มีสมบัติเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป อสังฐานซิลิกา ชนิดสังเคราะห์ในการการค้า แบ่งออกได้ดังนี้

3.1 พรีซิพิตเททซิลิกา

อสังฐานซิลิกาสังเคราะห์ชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซิลิกาเจล มีการกระจายขนาดของอนุภาคขั้นต้น (primary particle) อยู่ในช่วง 1-3 นาโนเมตร และการกระจายขนาดของอนุภาคขั้นที่สอง (secondary particle) อยู่ในช่วง 10-30 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาประมาณ 96.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวจำเพาะเมื่อวัดด้วยการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิว (BET, N₂) อยู่ในช่วง 500 ถึง 1000 ตารางเมตรต่อกรัม อยู่ในรูปของการรวมตัวกันเป็นก้อนทรงกลม (globular agglomeration)

3.2 ไพโรเจล เอ

อสังฐานซิลิกาสังเคราะห์ชนิดนี้ มีการกระจายขนาดอนุภาค ขั้นต้นอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 นาโนเมตร และการกระจายขนาดของอนุภาคขั้นที่สองประมาณ 10 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ของซิลิกามากกว่า 99.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เมื่อวัดด้วยการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวอยู่ในช่วง 50 ถึง 400 ตารางเมตรต่อกรัม อยู่ในรูปของการรวมตัวกันเป็นแบบแฟร็กทัล (fractal agglomeration)

3.3 ไพโรเจล บี

อสังฐานซิลิกาสังเคราะห์ชนิดนี้มีการกระจายขนาดของอนุภาคขั้นต้นในช่วงกว้างมากตั้งแต่ 10 ถึง 400 นาโนเมตร มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 50 ถึง 400 ตารางเมตรต่อกรัม เช่นเดียวกับไพโรเจล เอ มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาใกล้เคียงกับทราย คือมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อยู่ในรูปลักษณะเป็นหยด

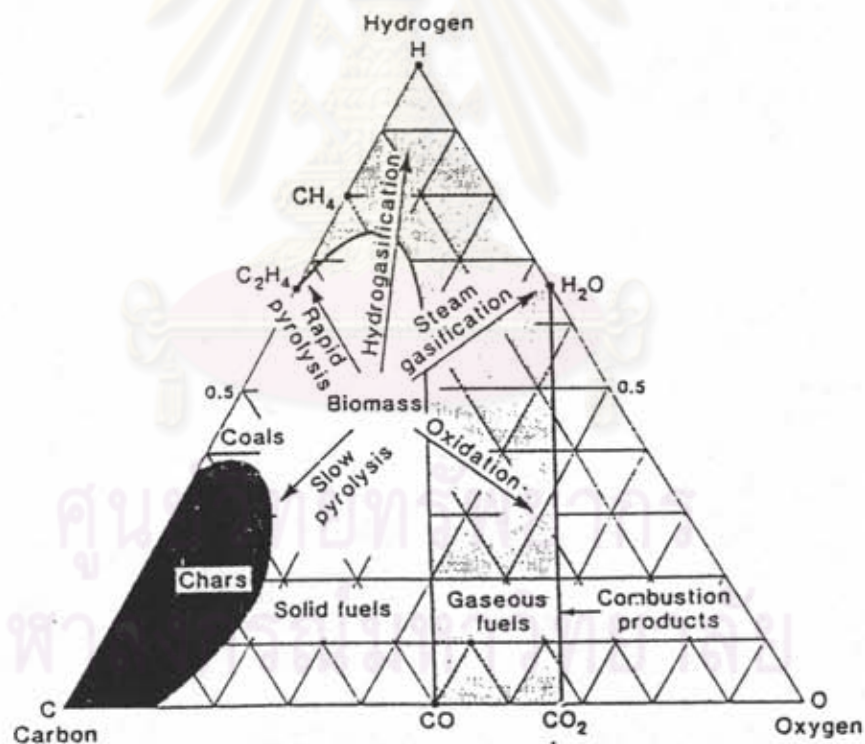
4. การนำซิลิกามาใช้ในงานอุตสาหกรรม

- ในทางอุตสาหกรรม มีการนำอสังฐานซิลิกามาใช้งานกันมาก ได้แก่
- ก. เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยาง พลาสติก และโพลีเมอร์
 - ข. เป็นสารเพิ่มแรงยึดในกาวบางชนิด
 - ค. เป็นสารลดแรงยึดระหว่างผิวของแข็งในของเหลวที่มีของแข็งเป็นส่วนผสมอยู่
 - ง. เป็นสารเพิ่มความหนืด และปรับคุณสมบัติของการไหล (thixotropy) ในของเหลว เช่น จารบี สี หมึก ยา และเครื่องสำอาง
 - จ. เป็นสารช่วยปรับ คุณสมบัติของพื้นผิวต่าง ๆ เช่น เกิดการผสมของน้ำกับน้ำมันอย่างดี, ป้องกันการเกิดโฟม และปรับสภาพพื้นผิวของสารให้มีคุณสมบัติชอบน้ำเป็นต้น

- จ. เป็นสารเพิ่มความเงา (optical effect)
- ข. เป็นสารดูดความชื้น

กระบวนการไพโรไลซิส (Probstein and Hick, 1985)

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (destructive distillation) เป็นกระบวนการแตกสลายตัวทางความร้อน (thermal degradation) ของสารอินทรีย์ที่ไม่สมบูรณ์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์) และมีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบ อัตราการให้ความร้อน และอุณหภูมิ เช่น



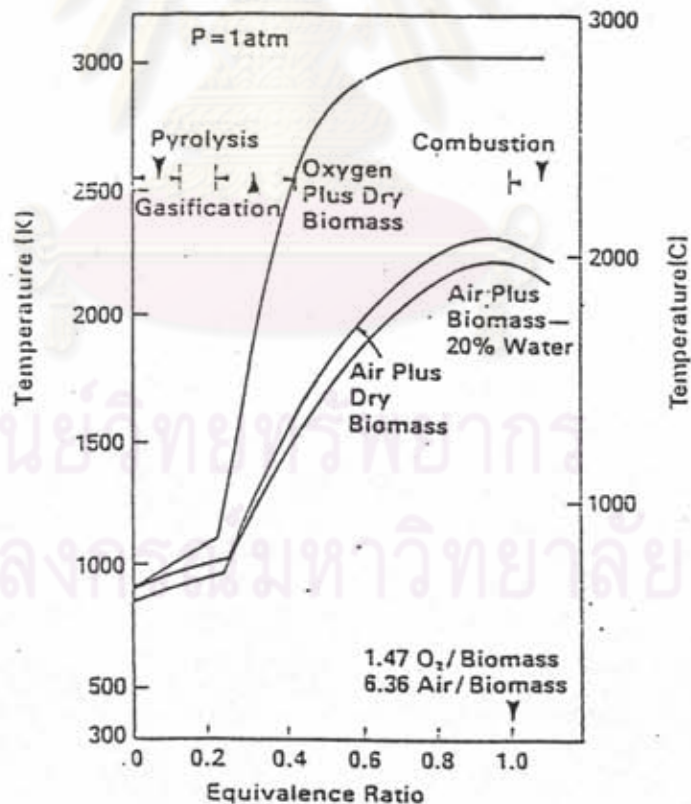
ที่มา : Probstein และ Hick (1985)

รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล

การสลายตัวของถ่านหิน, หินน้ำมันหรือทาร์แซนด์ จะได้สารระเหยที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูง และถูกกลั่นตัวอยู่ในรูปของเหลว ส่วนที่เหลือจะเป็นของแข็งที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงรวมทั้งพวกสารอินทรีย์ การไพโรไลซิสพวกชีวมวล จะให้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งโดยทางอ้อม (รีโทอร์ท) และทางตรงที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้ เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และก๊าซ เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Jones, 1978 ; Kohan and Barkordor, 1979)

Desrosiers ได้คำนวณอุณหภูมิของปฏิกิริยาสมดุลแบบอะเดียบาติกของไม้ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่าง ๆ และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะบอกถึงอาณาเขตของการไพโรไลซิส แกสซิฟิเคชัน และการเผาไหม้

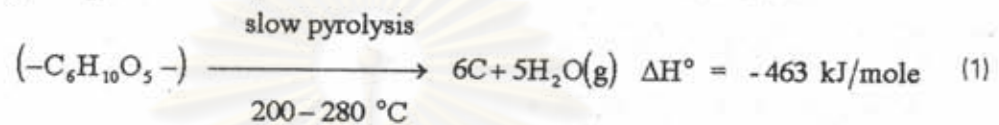


ที่มา : SERI/TR-33-239 (1979)

รูปที่ 2.5 อุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบอะเดียบาติกของชีวมวล

ไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ไพโรไลซิสแบบช้าและแบบรวดเร็ว ไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ ("local equilibrium") โดยอัตราการให้ความร้อนช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับแนวของอุณหภูมิเดิม (temperature history) ส่วนไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อน แต่ไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิกึ่งที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

การให้ความร้อนอย่างช้า ๆ และอุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นถ่านชาร์ เช่น ในทางทฤษฎี เซลลูโลสสามารถถูกไพโรไลซ์ได้เป็นคาร์บอนและน้ำ ดังสมการที่ 1



แต่ในทางปฏิบัติการสลายตัวของเซลลูโลสมักจะได้ เลวอกูโคซาน, $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ เป็นแอนไฮไดรด์ของกลูโคส

ดังเช่นเนื้อไม้มีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสนี้สามารถสลายตัวได้รวดเร็วกว่าเซลลูโลส แต่สำหรับลิกนินจะสลายตัวอย่างช้า ๆ และให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์จำนวนมาก พร้อมทั้งให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่เป็นสารประกอบอินทรีย์พวกอะโรมาติก

สำหรับการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซและของเหลว

กระบวนการแกสิฟิเคชัน (Probstein and Hick, 1985)

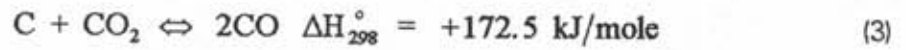
กระบวนการแกสิฟิเคชัน คือการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งหรือของเหลวให้กลายเป็นก๊าซ ด้วยพลังงานความร้อน ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการแกสิฟิเคชันมีดังนี้

1. ปฏิกิริยาออกซิโนไลซิส

โดยออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และหรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในสถานะที่มีเฉพาะก๊าซออกซิเจนหรืออากาศจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังในสมการที่ 2

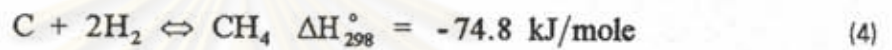


และเมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจนจะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดัง สมการที่ 3



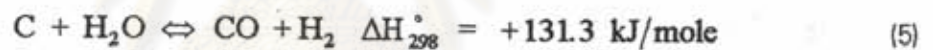
2. ปฏิกริยาไฮโดรจิโนไลซิส

คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ให้ก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 4

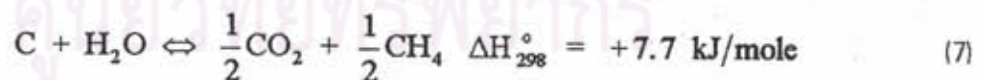
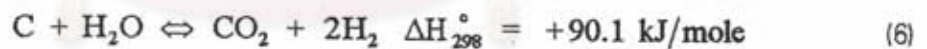


3. ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

น้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ให้ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 5



และที่บางสภาวะ น้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังในสมการที่ 6

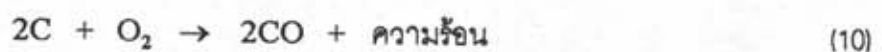
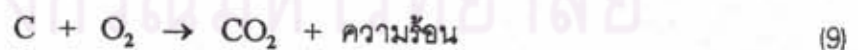
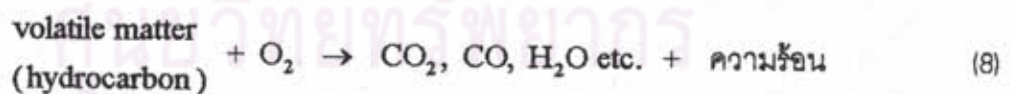


การเผาไหม้ของแกลบ (Mo Ketta, 1979)

องค์ประกอบของแกลบประกอบด้วย องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้และองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้ เรียกว่าสารเฉื่อย สารเฉื่อยนี้มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาบางอย่างแต่ต้องอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งก็ไม่ได้ให้พลังงานออกมา เช่น ความชื้นของแกลบ เป็นต้น อีกพวกหนึ่งคือสารอนินทรีย์ที่เป็นพวกสารประกอบที่มีแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ซิลิกา, แคลเซียม, แมงกานีส, เหล็ก และโปตัสเซียม สารอนินทรีย์เหล่านี้ภายหลังการเผาไหม้ของแกลบจะกลายเป็นเถ้า

องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้แบ่งเป็นสารระเหยได้ (volatile matter) และสารไม่ระเหย (non-volatile matter) สารไม่ระเหยประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอน สารระเหยได้ หมายถึงสารประกอบที่ถูกทำให้ระเหยออกมาที่อุณหภูมิที่เกิดกระบวนการเผาไหม้

การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในแกลบ สามารถเกิดได้ทั้งในส่วนหนาแน่น (condensed phase) และส่วนที่เป็นไอ (vapor phase) เริ่มจากเมื่อให้ความร้อนแก่แกลบ สารระเหยได้จะระเหยออกมาจากผิวหน้าของแกลบแล้วผสมกับอากาศบริเวณรอบ ๆ ทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้น เมื่อแกลบได้รับพลังงานความร้อนแผ่มาที่ผิวหน้าของมัน ทำให้ส่วนของผิวหน้ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งแกลบเกิดการลุกไหม้ เพื่อทำให้เกิดความสมดุลของพลังงานที่ดูดซับเข้ามาจากการให้ความร้อน แกลบก็จะปลดปล่อยพลังงานออกมา การปลดปล่อยพลังงานออกมาเกิดทั้งในส่วนหนาแน่นและส่วนที่เป็นไอของแกลบ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไพโรไลติกทำให้เกิดอนุภาคต่าง ๆ อนุภาคเหล่านี้จะแพร่ผ่านออกมาสู่บริเวณการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดในส่วนนอกสุดของแกลบ บริเวณพื้นผิวของแกลบที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องมาจากการเผาไหม้และการแตกตัวของวัตถุที่อยู่ที่ผิวหน้าของมันมีผลให้เกิดเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ขึ้น ส่วนสารระเหยได้ที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวของแกลบจะถูกทำให้ระเหยออกมา กระบวนการเกิดการเผาไหม้ของแกลบที่เหลืออยู่จะเกิดขึ้น โดยกลไกที่แตกต่างออกไปจากขั้นตอนข้างต้นคือ ขั้นตอนแรก ก๊าซออกซิเจนจะแพร่ผ่านชั้นเข้าไปสู่แกนกลางของแกลบที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา จากนั้นก๊าซออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแกลบ และปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้จนกระทั่งการเผาไหม้แกลบหมด กระบวนการนี้เรียกว่าการเผาไหม้จนหมดไป (burnt out) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้แสดงได้ดังสมการที่ 8, 9 และ 10



ถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้แกลบจนหมด ส่วนใหญ่จะเป็นพวกซิลิกา และอาจมีสารเจือปนอื่น ๆ เช่น แคลเซียม, แมงกานีส, โปตัสเซียม และเหล็ก ปนอยู่เล็กน้อย

การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิโดสเบด (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ

1. การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับการไหล กลไกของกระบวนการนี้แบ่งเป็นกระบวนการย่อย 2 ประเภทคือ ความร้อนจากของไหลถ่ายเทให้กับเม็ดของแข็งในเบดและความร้อนจากเม็ดของแข็งถ่ายเทให้กับของไหล ซึ่งกระบวนการนี้กระทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องทั้งของไหลและเม็ดของแข็ง

2. การถ่ายเทความร้อนจากผิวของหอยทดลองให้แก่เม็ดของแข็ง กลไกที่เกิดขึ้นสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบนี้มีอยู่ 3 สมมติฐาน คือ

ก. ระหว่างผนังของหอยทดลองกับเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ในเบด มีชั้นของไหลเป็นฟิล์มบาง ๆ ทำหน้าที่เหมือนเบาะ ความร้อนจากผนังจะต้องผ่านชั้นนี้ก่อนถึงจะเดินทางไปถึงเม็ดของแข็ง โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของฟิล์ม

ข. จากการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็ง บางครั้งเม็ดของแข็งวิ่งเข้าไปกระทบกับผนังเองโดยตรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ความร้อนจากผนังผ่านเข้ามาในเม็ดของแข็งด้วยวิธีการนำความร้อนทั้งนี้เกิดจากอุณหภูมิต่างระหว่างผนังกับเม็ดของแข็ง

ค. ฟองก๊าซลอยผ่านเบดตรงบริเวณใกล้ผนัง เมื่อฟองก๊าซลอยผ่านไปกลุ่มเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งก็เข้ามาแทนที่ กลุ่มเม็ดของแข็งนี้ก็จะรับความร้อนจากผนังแล้วหลุดไปเพราะฟองก๊าซที่ลอยตามมาด้านหลังดันกลุ่มเม็ดของแข็งให้อยู่ส่วนอื่นของเบด ความร้อนทั้งหมดก็จะมาสะสมอยู่ในเบดหนาแน่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยในอดีต

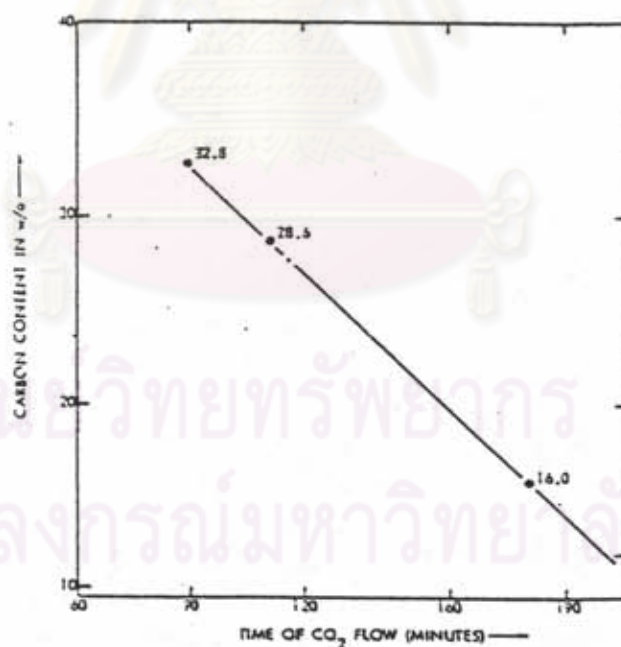
Lanning, Pannaiya และ Crumpton, (1958) กล่าวว่าซิลิกาจะเข้าสู่ลำต้นทางรากในรูปของสารละลาย อาจอยู่ในรูปของซิลิเกต หรือกรดโมโนซิลิซิก จากนั้นจะเคลื่อนที่ไปที่ผิวด้านนอก เช่นใบ ลำต้น และเปลือกนอกของเมล็ดพืชบางชนิด และเมื่อเกิดการระเหยของน้ำขึ้นที่ผิวชั้นนอก จะทำให้เกิดการโพสโมไรเซชันขึ้นเกิดเป็นผนังของเซลล์ซิลิกา ซิลิกาที่เกิดขึ้นในต้นข้าวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดินที่มีธาตุที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของข้าว เปลือกข้าวที่มีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำจะไม่ทนต่อโรค และศัตรูพืช ในภาคสนามได้มีการทดสอบโดยใช้สารประกอบของซิลิกอนที่เหมาะสมลงในดิน พบว่าเกิดจุดสีน้ำตาลมีลักษณะใหม่เป็นจุด ๆ ทั่วไป แต่ซิลิกาที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นและปริมาณของซิลิกาที่ผิวด้านนอกของเปลือกข้าวทำให้เปลือกข้าวเปราะแตกหักง่าย

Cutler, (1973) ศึกษาการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยนำแกลบมาเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่ไม่ต้องนำทรายมาผสมกับคาร์บอนก่อนแล้วจึงเผาตามวิธีการแบบเดิม เนื่องจากภายในแกลบมีซิลิกาที่มีความว่องไว และคาร์บอนของเซลล์ซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของแกลบ จากผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การสลายตัวขององค์ประกอบเซลล์ซิลิกาในแกลบจะปลดปล่อยก๊าซต่าง ๆ ออกมา ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และไอน้ำ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีมากเกินไปจะขัดขวางปฏิกิริยาการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากมีก๊าซนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน ซึ่งจะต้องมีการควบคุมสมดุลทางเคมีให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นอย่างช้า ๆ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อเติมออกไซด์ของเหล็ก สารประกอบเหล็ก หรือธาตุทรานซิลันอื่น ๆ ลงไปจะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

Ramsey, (1981) ได้ทำการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์และซิลิกาจากแกลบ ซึ่งการผลิตจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะถูกนำไปผ่านการคาร์บอนไนซ์ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ส่วนที่เหลือนำมาเผากับอากาศให้ได้เถ้าที่มีซิลิกา หลังจากนั้นนำเถ้าจากการเผาไหม้และคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มาผสมกันแล้วนำไปเผาในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1,400-1,600 องศาเซลเซียส การเติมเพอริกออกไซด์หรือเหล็กลงไปเล็กน้อยจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์เส้นยาวและมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การเผาแกลบที่อุณหภูมิเกิน 700 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดผลึกซิลิกาที่ไม่เหมาะในการใช้เป็นวัสดุดิบ เพราะจะทำให้ปฏิกิริยาช้ามาก

Mansour และ Hanna, (1984) ศึกษาถึงผลกระทบของเหล็กต่อการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ การเตรียมแกลบดำได้จากการแช่แกลบในสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตและสารละลายแอมโมเนียแล้ว นำมาเผาในที่ไม่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแกลบดำที่ได้มาเผาในบรรยากาศแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส จากการศึกษาที่กำหนด สภาวะที่เผาในบรรยากาศก๊าซเฉื่อย พบว่าการเติมเหล็กลงไปแกลบจะไม่มีผลต่อปริมาณของ ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น

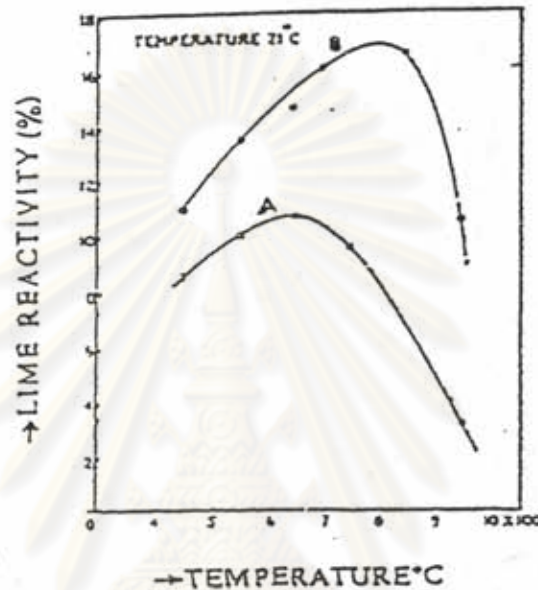
Amick, (1980) ทดลองผลิตซิลิกอนเกรดโซลาร์ (Solar grade) ที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งจะมี กระบวนการล้างวัตถุดิบ โดยนำแกลบมาชะล้างด้วยกรด และน้ำ จากนั้นนำแกลบที่ผ่านการล้าง แล้วมาเผาในบรรยากาศที่ไม่เกิดการออกซิไดซ์ แกลบดำที่ได้จะนำไปปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ซิลิกาให้ได้ประมาณ 2 ต่อ 1 โดยการควบคุมสภาวะในการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.6 แล้วนำไปรีดิวซ์ ซิลิกาให้ได้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงต่อไป



ที่มา : Amick (1980)

รูปที่ 2.6 ปริมาณคาร์บอนในแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (* แสดง C : Si = 2 : 1 โดยอะตอม)

Borthakur, Saikia และ Dutta, (1980) พบว่าอิออนบวกที่มีอยู่ในแกลบจะมีผลต่อคุณสมบัติของซิลิกา ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยากับปูนขาว นอกจากนี้ค่าความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจะให้ค่าความว่องไวของซิลิกาสูง



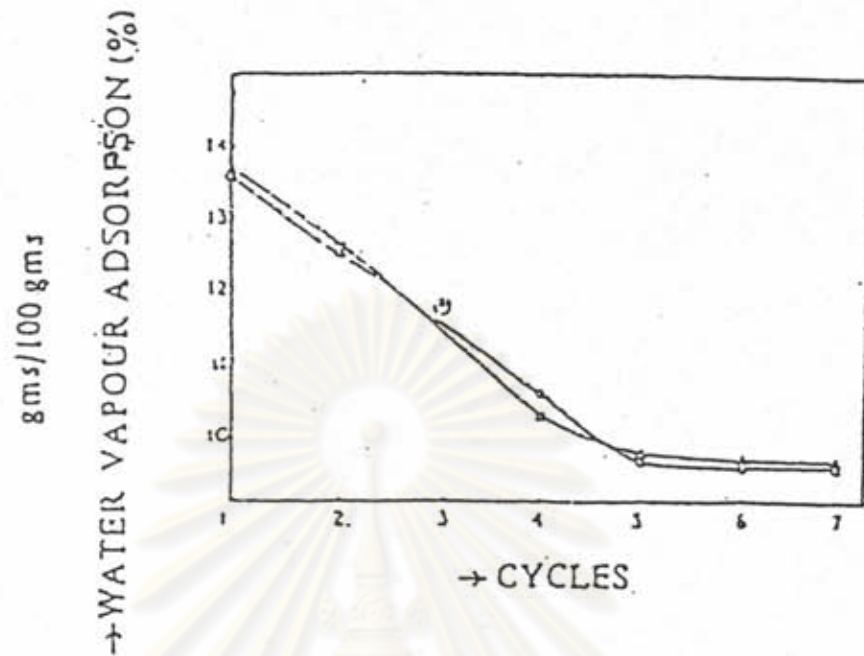
ที่มา : Borthakur และคณะ (1980)

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความว่องไวของปฏิกิริยาของเถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

A : แกลบที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ

B : แกลบที่ผ่านการปรับสภาพโดยการสกัดอิออนบวก

จากรูปที่ 2.7 ทำการตรวจสอบความว่องไวต่อปฏิกิริยาของเถ้าจากแกลบที่ผ่านการปรับสภาพโดยการสกัดอิออนบวก และแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับปูนขาว พบว่าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ความว่องไวของเถ้าที่ผ่านการปรับสภาพในทุก ๆ อุณหภูมิจะสูงกว่าแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ สำหรับแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ อุณหภูมิที่ทำให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงอยู่ในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส แสดงว่า อิออนบวกที่มีอยู่ในแกลบมีบทบาทที่สำคัญต่อความว่องไวของการทำปฏิกิริยากับปูนขาวของซิลิกา



ที่มา : Borthakur และคณะ (1980)

รูปที่ 2.8 ผลของการดูดซับไอน้ำของแกลบ

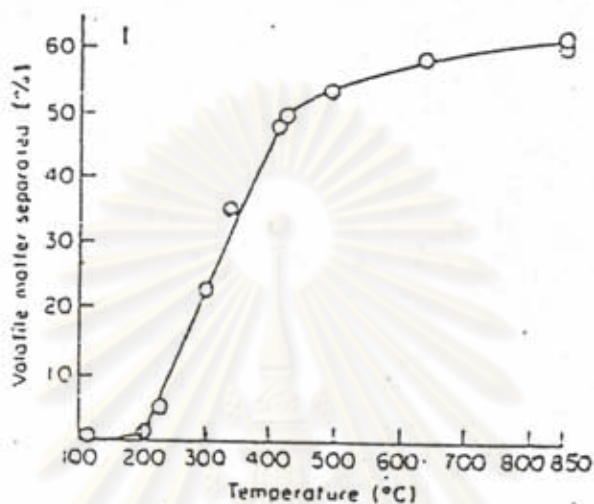
△ : แกลบที่ผ่านการปรับปรุงสภาพโดยการสกัดอิออนบวกออก

○ : แกลบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ

นอกจากนี้การเลือกสารละลายที่เหมาะสมที่จะนำมาสกัดอิออนบวกออกก็เป็นตัวแปรที่สำคัญ สารละลายที่ใช้จะต้องไม่ทำลายโครงสร้างเดิมของซิลิกาที่อยู่ในแกลบ จากรูปที่ 2.8 แสดงกราฟการดูดซับไอน้ำของแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสภาพกับแกลบที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้เหมือนกัน แสดงว่าการนำแกลบมาสกัดอิออนบวกออกก่อน ไม่ทำให้โครงสร้างเดิมของซิลิกาในแกลบซึ่งอยู่ในรูปของซิลิกาเจลเปลี่ยนแปลง

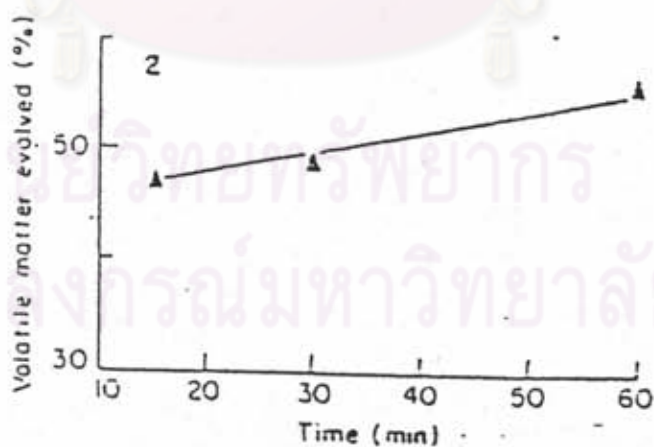
Hamad, (1981) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมทางความร้อนของแกลบ พบว่าไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 220 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบภายใน แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยออกมามากขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดย 90 เปอร์เซ็นต์ของสารระเหยทั้งหมดจะถูกปล่อยออกมาที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งการสลายตัวจะเกิดอย่างรวดเร็วและขึ้น

กับอุณหภูมิที่ใช้ นอกจากนี้เวลาที่เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของแก๊บด้วย ดังแสดง
 ในรูปที่ 2.10 ซึ่งไพโรไลซิสแก๊บที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเห็นว่ามีกาปลดปล่อยสาร
 ระเหยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลา 15 ถึง 60 นาที



ที่มา : Hamad (1981)

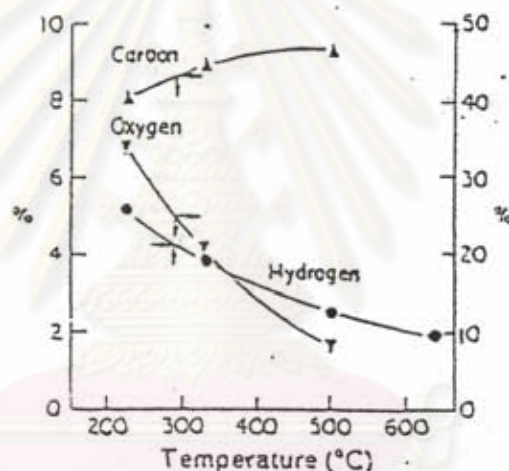
รูปที่ 2.9 ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่แต่ละอุณหภูมิ
 ใช้เวลาในการไพโรไลซิส 15 นาที



ที่มา : Hamad (1981)

รูปที่ 2.10 ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส
 400 องศาเซลเซียส

สำหรับคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์มีเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 นอกจากนี้อุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส มีปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากเกิดไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก ขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนช่วงอุณหภูมิระหว่าง 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีการเกิดก๊าซที่เผาไหม้ได้และไอต่าง ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน ขึ้นอันเป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนในแกลบลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกไล่ออกจากแกลบเป็นผลทำให้ได้มีปริมาณสูงขึ้นเช่นเดียวกัน



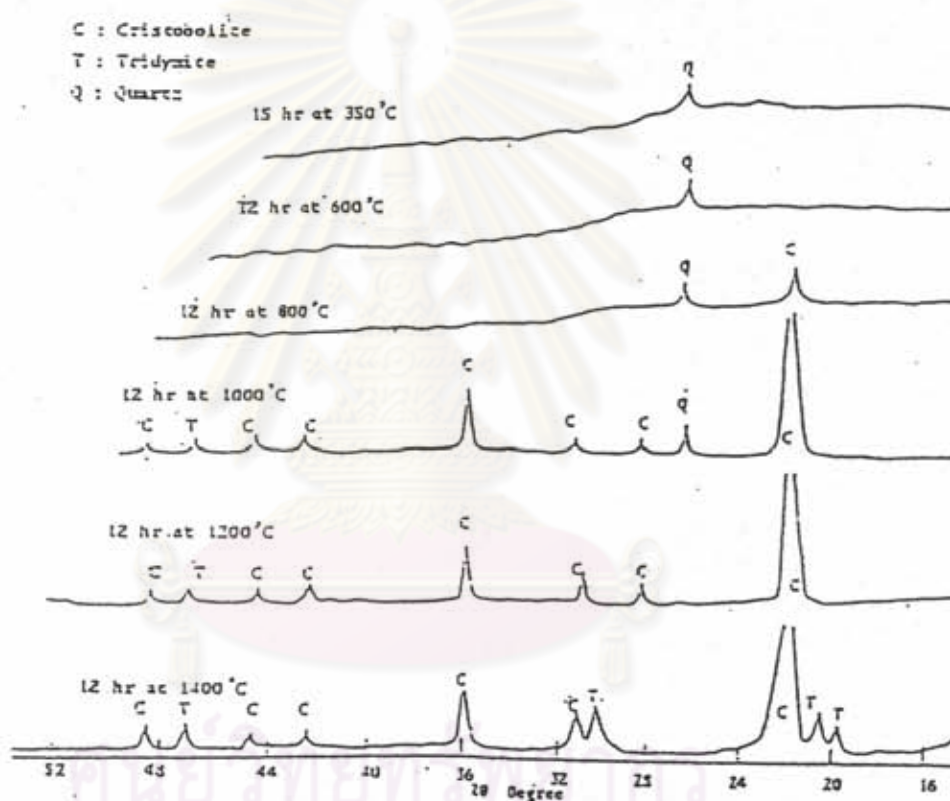
ที่มา : Hamad (1981)

รูปที่ 2.11 ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสต่าง ๆ

Kapur, (1981) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแกลบ โดยใช้เวลาในการเผา 12 ชั่วโมง ผลดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งพบชนิดของผลึกเกิดขึ้นตามอุณหภูมิของการเผา เช่น อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบแคควอซและที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียสพบรูปผลึกทั้งคริสโตบาไลต์ และไตรติไมท์

Hunt และคณะ, (1984) ได้ทำการทดลองผลิตซิลิกาจากบรีสุทธี โดยทำการสกัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในแกลบ ได้แก่ พวกอิออนบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ที่ทำการชะล้างแกลบโดยต้มกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 : 10 เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส ลงได้ 40 ถึง 100 เท่า

และลดปริมาณไซเดียม ฟอสฟอรัส กับกำมะถัน ได้ 3 ถึง 8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งเจือปนที่มีอยู่เดิมจากตารางที่ 2.5 จากนั้นนำแกลบที่ได้ไปทำการไพโรไลซิสในฟลูอิด์เบดที่ทำจากควอทซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยมีการผ่านก๊าซไนโตรเจนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที พบว่า น้ำหนักผลิตภัณฑ์จะลดลง 1 ใน 3 ส่วนจากน้ำหนักเริ่มต้น และประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของแกลบที่ใช้จะเปลี่ยนไปเป็นสารระเหยและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนอะตอมต่อโมเลกุลของคาร์บอนต่อซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 4 : 1 ซึ่งสามารถปรับให้ค่าลดลงเป็น 2 : 1 เพื่อให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ได้โดยควบคุมการเผาไหม้



ที่มา : Kapur (1981)

รูปที่ 2.12 กราฟดิฟแฟร็กโตแกรมของเถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

James และ Rao, (1986) ได้ศึกษาถึงการสลายตัวทางความร้อนของแกลบ โดยทำการตรวจสอบด้วยเครื่องมือที่ใช้การวิเคราะห์ความร้อนแบบพลวัต (dynamic thermo analytic techniques) ได้แก่ DTA (Differential Thermal Analysis), TG (Thermogravimetry), DTG (Differential Thermogravimetry) และการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่

จากรูปที่ 2.13 a', b', c' เป็นกราฟทางอุณหภูมิจากการสลายตัวของแก๊สที่สภาวะอากาศหนึ่ง พบว่ามีการสลายตัวอยู่ 2 ช่วง แต่สำหรับกราฟทางอุณหภูมิจากการสลายตัวที่ไม่มีออกซิเจน (a, b, c) เช่น บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน กราฟที่ได้จะแตกต่างกันมาก นอกจากนี้อัตราการไหลของก๊าซก็มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของแก๊สด้วย

การสลายตัวของแก๊สทางความร้อนจะอธิบายถึงพฤติกรรมของการสลายตัวของสารที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า สารพวกเซลลูโลสและลิกนินมีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 327-377 องศาเซลเซียส และ 227-500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 2.7 ปริมาณสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่หลังการต้มกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่าง ๆ

T (hr.)	0.25	0.25	5
Ratio (HCl : H ₂ O)	1 : 3	1 : 10	1 : 10
Temp. (°C)	Boil	Boil	50
Impurity	Concentration (ppmw.)		
Al	40	40	20
B	1	1	<1
Ca	30	20	150
Fe	4	4	15
K	5	5	200
Mg	15	5	90
Mn	5	3	50
Na	10	5	15
Ti	1	5	5

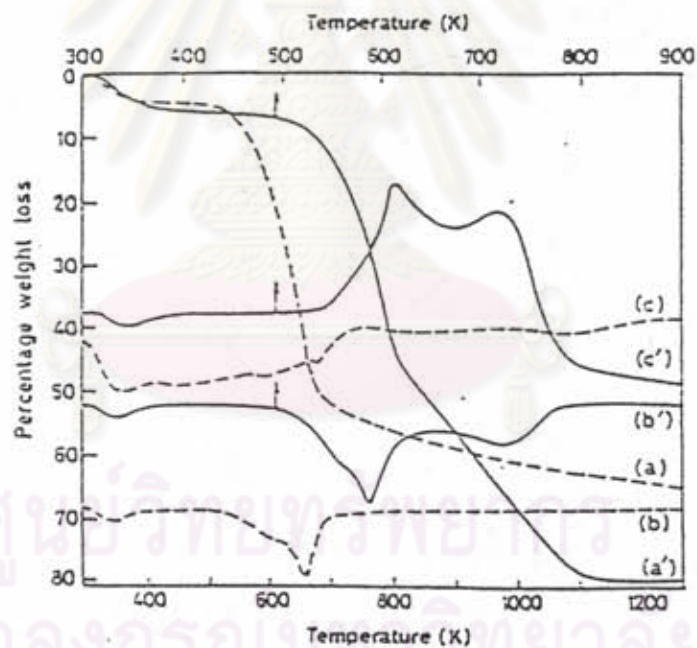
Other impurities < 1 ppmw.

ที่มา : Hunt และคณะ (1984)

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.13 กราฟ TG และ DTG พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียในช่วงอุณหภูมิ 52-102 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำเป็นส่วนใหญ่ประมาณ 45 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 350-370 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของสารอินทรีย์ไปเป็นสารระเหยที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งสารระเหยเหล่านี้เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนจะเกิดการเผาไหม้มีเปลวไฟเกิดขึ้นให้พีคแรกของการคายความร้อน ดังจะเห็นได้จากกราฟ DTA ส่วนในบรรยากาศของไนโตรเจนจะ

ไม่เกิดการเผาไหม้ของสารระเหยขึ้น และพีคที่สองของการคายความร้อนในสภาวะของอากาศนี้ เป็นการเผาไหม้ของพวกเซลลูโลสและลิกนิน

จากกราฟ DTG มีพีคปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าพีคแรกของการคายความร้อนในกราฟ DTA ซึ่งให้เห็นว่าเป็นการปลดปล่อยสารระเหยจากแกลบก่อนเกิดการเผาไหม้ สัดส่วนของความสัมพันธ์ของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับการออกซิไดซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะพบว่าพีคการคายความร้อนสูงสุดนั้นขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ซึ่งช่วยให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วทำให้เกิดการคายความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉพาะที่และอัตราการกลายเป็นก๊าซเพิ่มมากขึ้นสนับสนุนให้เกิดการเผาไหม้และการสลายตัวของพวกเซลลูโลสทำได้อย่างสมบูรณ์



ที่มา : James และ Rao (1986)

รูปที่ 2.13 กราฟ TG, DTG และ DTA ของแกลบในสภาวะ

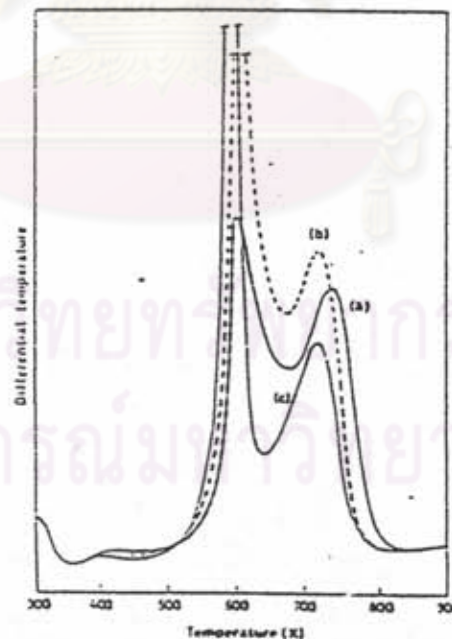
(a), (b), (c) : บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

(a'), (b'), (c') : อากาศนี้

James และ Rao, (1986) พบว่าแก้วที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อนำมาเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น แก้วที่ได้มีคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น และเช่นเดียวกับการเผาที่อุณหภูมิหนึ่ง ในช่วงเวลาหนึ่งนาน ๆ กับการเผาเป็นช่วง ๆ คุณสมบัติของแก้วที่ได้เป็นไปตามจำนวน ชั่วโมงที่ทำการเผา

แก้วที่ได้จากแคลบไม่ผ่านการปรับสภาพจะพบว่ามีผลึกเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ไม่ว่าจะใช้เวลาเผาเท่าใด นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลึกเกิดขึ้นบางส่วนในช่วงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเผา 30 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสใช้เวลาเผา 3 ชั่วโมง

ถึงแม้ว่าปกติรูปผลึกคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ไม่มีความเสถียร แต่สิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแก้วสามารถทำให้เสถียรได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งจากตัวอย่างที่มีโซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียมออกไซด์อยู่จะเร่งให้เกิดผลึกคริสโตบาไลต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ นอกจากนี้สิ่งปนเปื้อนพวกอ็อกไซด์อื่น ๆ ก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนรูปผลึกจากอสัณฐาน (amorphous) ไปเป็นผลึกรูปคริสโตบาไลต์

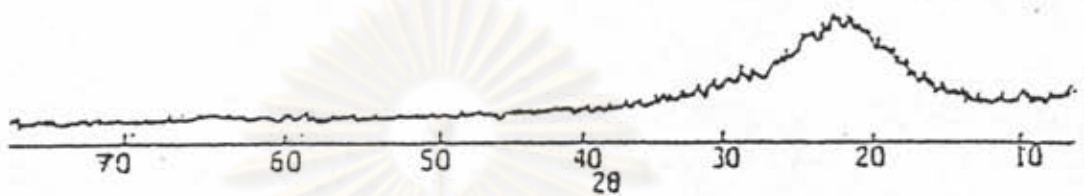


ที่มา : James และ Rao (1986)

รูปที่ 2.14 กราฟ DTA ของแคลบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

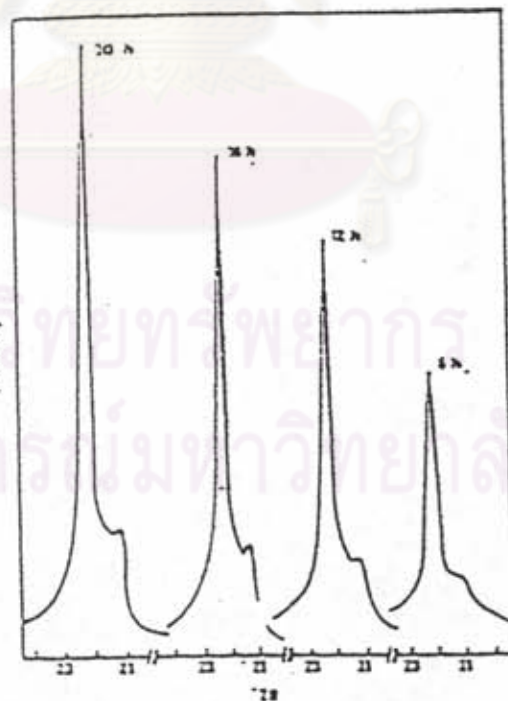
(a) 0.3 ลิตรต่อชั่วโมง (b) 0.9 ลิตรต่อชั่วโมง (c) 1.8 ลิตรต่อชั่วโมง

ในการตรวจสอบรูปผลึกของซิลิกาในได้นั้น ใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) พบว่าลักษณะการเกิดรูปผลึกจะเปลี่ยนจากรูปอสัณฐานไปเป็นผลึกคริสโตบาไลต์และไตรดิไมต์ (tridymite) ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ ซึ่งกราฟดิฟแฟรกโตแกรมที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



ที่มา : Kapur (1981)

รูปที่ 2.15 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของแก้วที่ทำการเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ที่มา : James และ Rao (1986)

รูปที่ 2.16 เวลาที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลึกซิลิกาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงเวลาในการเผาที่มีต่อปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ เวลาในการเผาเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกของซิลิกาในแก้วเพิ่มขึ้นด้วย

Lin และคณะ, (1981) ได้ทำการศึกษาถึงการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วของแกลบบน เครื่องไพโรไลซิสแบบคูรี-พอยท์ (Curie-Point Pyrolyser) ที่มีอัตราการให้ความร้อน 1,500 ถึง 2,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที จากการทดลองพบว่าการไพโรไลซิสขั้นแรกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์คือ ทาร์ สารอินทรีย์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หนักบางส่วนที่ ได้จากการไพโรไลซิสขั้นแรกจะแตกตัวไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่มีมวล โมเลกุลต่ำ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่จะลดลงจนกระทั่งคงที่ที่ 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าจากการทดลองใน TGA ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลของ เวลาต่อการปลดปล่อยสารระเหยจะมีความสำคัญที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส เพราะที่ อุณหภูมิสูงกวานี้เกิดการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วทำให้สารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างสมบูรณ์ใน ช่วงการเพิ่มความร้อน ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จากการไพโรไลซิสเซลลูโลสและลิกนิน เป็นทาร์ และชาร์ ตามลำดับ โดยปริมาณชาร์และสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิสสามารถประมาณได้จาก ปริมาณผลิตภัณฑ์ของการไพโรไลซิสเซลลูโลสรวมกับลิกนินในแต่ละตัว

Chakraverty และคณะ, (1988) ได้ศึกษาถึงการเผาไหม้แกลบบที่ผ่านการล้างด้วยกรด และไม่ได้ผ่านการล้างด้วยกรด เพื่อผลิตอสัณฐานซิลิกาบริสุทธิ์ โดยใช้กรดต่าง ๆ คือ กรดไฮโดร คลอริก กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ทำการกำจัดโลหะออกจากแกลบบ ในตารางที่ 2.8 แสดงถึง ผลของการ ชะล้างแกลบบด้วยกรด พบว่าแกลบบที่ไม่ได้ผ่านการล้างกรดจะมีปริมาณสิ่งปน เปื้อนสูง ส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม เมื่อผ่านการล้างกรดปริมาณสิ่งปน เปื้อนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณโลหะหลังจากผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกจะสูงกว่าการ ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก นอกจากนี้ยังเกิดซัลเฟตของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทที่ ละลายน้ำได้น้อยจึงกำจัดโลหะออกได้ไม่มากนัก ดังนั้นกรดซัลฟูริกจึงไม่เหมาะสมกับการล้าง แกลบบ และจากการเปรียบเทียบระหว่างการใช้กรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก พบว่ากำจัดโลหะ ได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน ยกเว้นเหล็กที่กรดไนตริกกำจัดออกได้น้อยกว่า จึงใช้กรดไฮโดรคลอริก ในการทดลอง การเพิ่มความเข้มข้นของกรดสามารถกำจัดโลหะออกได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณา ทางเศรษฐศาสตร์จะเห็นได้ว่าไม่คุ้มค่า ดังนั้นการใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่ำก็เพียงพอ ต่อการล้างแกลบบ

ตารางที่ 2.8 ผลของการชะล้างแลกเปลี่ยนด้วยกรดต่อการกำจัดโลหะที่มีอยู่

Treatment	Metallic ingredients as oxides (ppm)								
	Na	K	Ca	Fe	Mg	Mn	Zn	Cu	Total
Untreated	5125	11750	7042	946	2562	1192	179	31	28827
1 N HCl treated	46	50	58	362	187	19	19	6	747
3 N HCl treated	33	33	46	262	146	7	19	6	552
5 N HCl treated	25	HD	25	146	125	3	19	6	349
11.5 N HCl treated	12	HD	8	129	125	3	17	6	300
1 N H ₂ SO ₄ treated	87	25	2500	233	729	25	102	12	3713
4.5 N H ₂ SO ₄ treated	92	25	2417	225	646	25	98	6	3534
9 N H ₂ SO ₄ treated	75	25	2500	229	625	19	85	6	3564
18 N H ₂ SO ₄ treated	75	50	2667	217	625	24	83	6	3747
36 N H ₂ SO ₄ treated	117	100	3333	221	437	171	98	6	4483
4.5 N HNO ₃ treated	17	25	19	500	83	19	17	8	688
9 N HNO ₃ treated	8	25	11	442	83	12	12	6	599
18 N HNO ₃ treated	4	25	7	392	62	6	12	HD	508
1 N HCl + 4.5 N HNO ₃ (1 : 3)	4	25	3	375	52	12	19	6	496

ที่มา : Chakaverty และคณะ (1988)

อุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเผาเพื่อให้ได้เถ้าสีขาว ดังแสดงในตารางที่ 2.9 การใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ลดลง และแลกเปลี่ยนผ่านการล้างด้วยกรดหลังจากผ่านการเผาไหม้สมบูรณ์แล้วได้เถ้าสีขาว แสดงถึงกรดสามารถกำจัดโลหะอันตรายทำให้เถ้ามีสีอื่นเจือปน และการล้างด้วยกรดก็ไม่มีผลให้ใช้เวลาในการเผาไหม้สมบูรณ์ลดลง

Nakata, Suzuki, Okutani, Kikuchi และ Akiyama, (1989) ทำการศึกษาคุณสมบัติของแลกเปลี่ยนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ในเตาเผาที่มีการหมุนตลอดเวลา โดยแลกเปลี่ยนผ่านการเผาผ่านการใช้โรลเลอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 300 มิลลิลิตรต่ออนาที มีการสูญเสียน้ำหนัก 53.5 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 2.10 พบว่าซิลิกาที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่ได้จะต่ำกว่า 152 ไมโครเมตร และเป็นอัสพื้นฐาน ขนาดอนุภาคของซิลิกามีค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2.9 ผลของการชะล้างแกลบด้วยกรด และอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อเวลาที่ต้องการให้ได้เถ้าสีขา (ตัวอย่างใช้แกลบบด 40 เมช ปริมาณ 5 กรัม)

Treatment	Combustion temperature (°C)														
	300			400			500			600			700		
	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	Approx. time (h)	Colour of ash	
Untreated	24	Black	24	Brown	5	Light brown (whitish)	3.5	Light brown (whitish)	1.5	Light brown (whitish)	1.5	Light brown (whitish)	1.5	Light brown (whitish)	
1 N HCl treated	24	Black	24	Brown	5	White	3.5	White	1.5	White	1.5	White	1.5	White	
3 N HCl treated	24	Black	24	Brown	5	White	3.5	White	1.5	White	1.5	White	1.5	White	
5 N HCl treated	24	Black	24	Brown	5	White	3.5	White	1.5	White	1.5	White	1.5	White	

ที่มา : Chakaverty และคณะ (1988)

ของเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ไมโครเมตร ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ถึง 5 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้อยู่ในช่วง 5.3 ถึง 146.7 ตารางเมตรต่อกรัม เปอร์เซ็นต์ซิลิกาอยู่ในช่วง 89.8 ถึง 97.0 โดยน้ำหนัก และแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ซิลิกาที่ได้เป็นผลึกรูปคริสโตบาไลต์และไตรติไมต์ ผิวของอนุภาคจะถูกเชื่อมติดกัน พื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 ตารางเมตรต่อกรัม เปอร์เซ็นต์ซิลิกาอยู่ในช่วง 98.2 ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาค 40 ถึง 60 ไมโครเมตร นอกจากนี้พบว่า สารประกอบโปตัสเซียมที่มีอยู่ในแกลบเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันของอนุภาคซิลิกา และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดผลึก ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของเถ้าที่เตรียมจากการเผาแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อัตราการไหลของอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Exp. no.	Combustion temp. (°C)	SiO ₂ content(wt. %)	C content(wt. %)	Crystalline of SiO ₂	Surface area (m ² /g)	Colour
1	400	89.8	0.65	Amorphous	146.7	Black
2	500	87.0	0.46	Amorphous	130.6	Black
3	600	92.5	0.25	Amorphous	88.8	Grey
4	650	93.2	0.20	Amorphous	45.9	Greyish white
5	700	94.0	0.08	Amorphous	19.7	Pink white
6	800	97.0	0.02	Amorphous	5.3	Pink white
7	900	98.2	0	C, T	0.8	Pink white
8	1000	98.6	0	C, T	0.7	Pink white
9	1100	99.3	0	C, T	0.6	Pink white
10	1200	99.0	0	C, T	0.6	Pink white
11	1300	98.9	0	C, T	0.6	Pink white
12	1400	99.7	0	C, T	0.5	Pink white
13	1500	99.9	0	C, T	0.4	Pink white

ที่มา : Nakata และคณะ (1989)

หมายเหตุ : รูปผลึกของซิลิกา C : คริสโตบาไลต์ , T : ไตรติไมต์

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าที่เตรียมจากการเผาแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิส
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Exp. no.	Combustion Temp. (°C)	wt. (%)							
		Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	Soluble SiO ₂
PRH.	-	0.04	1.11	0.13	0.25	0.34	0.08	0.27	1.15
1	400	0.03	1.95	0.30	0.42	0.34	0.08	0.22	2.59
2	500	0.03	1.77	0.28	0.42	0.40	0.19	0.31	4.66
3	600	0.03	1.77	0.28	0.38	0.30	0.14	0.29	1.71
4	650	0.05	1.43	0.22	0.34	0.45	0.12	0.36	3.06
5	700	0.01	1.11	0.15	0.24	0.28	0.08	0.22	0.86
6	800	0.03	0.49	0.18	0.27	0.43	0.03	0.14	0.68
7	900	0.01	0.41	0.10	0.25	0.34	0.01	0.08	0.58
8	1000	0.01	0.23	0.02	0.22	0.32	0.01	0.07	0.83
9	1100	0.03	0.13	0.02	0.17	0.30	0.00	0.08	0.45
10	1200	0.01	0.08	0.00	0.07	0.32	0.00	0.08	0.83
11	1300	0.01	0.04	0.00	0.03	0.38	0.00	0.11	0.45
12	1400	0.01	0.02	0.00	0.01	0.38	0.00	0.07	0.60
13	1500	0.01	0.01	0.00	0.03	0.30	0.00	0.12	0.45

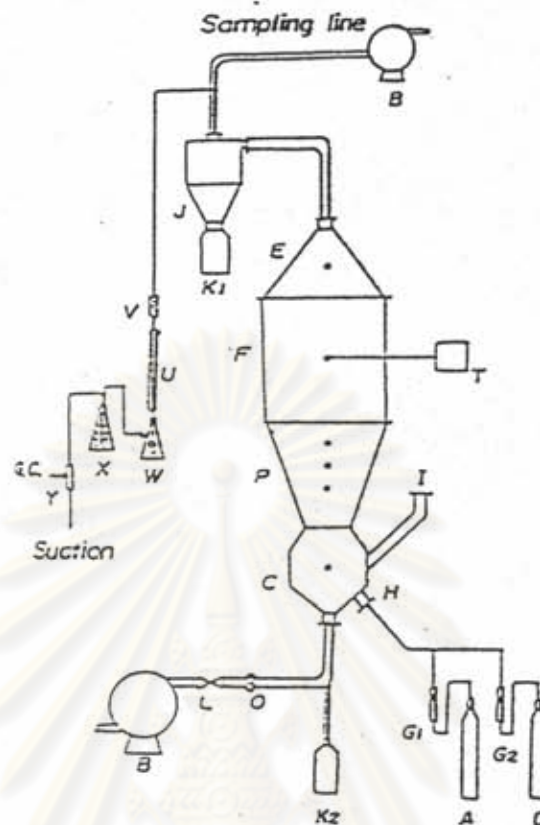
ที่มา : Nakata และคณะ (1988)

หมายเหตุ : Nakata และคณะ, (1988) ไม่ได้อธิบายความหมายของ Soluble SiO₂

PRH. เริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิของการเผา

อัตราการให้ความร้อน องศาเซลเซียสต่อนาที ในสภาวะมีอากาศไหลผ่าน

Luan และ Chou, (1990) ได้ทำการศึกษาการผลิตซิลิกาจากแกลบโดยทำการเผาในสภาวะที่มีและไม่มีถ่านหิน ในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่เปลวไฟเป็นตัวให้ความร้อน พบว่าลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าที่ได้จากส่วนบนและส่วนล่างของเบดจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว ตัวแปรแรกคือ อัตราการป้อนแกลบและองค์ประกอบของแกลบ



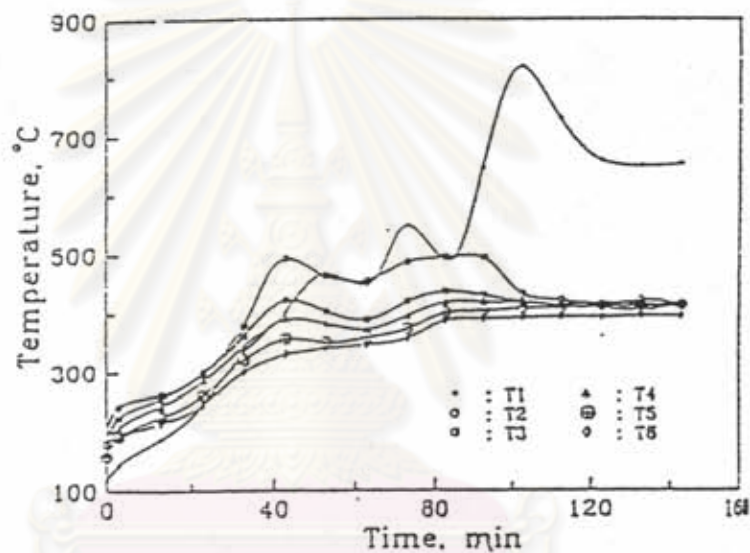
ที่มา : Luan และ Chou (1990)

รูปที่ 2.17 เตาเผาไหม้ในระบบฟลูอิโดไซเคด

A : LPG	B : blower	C : combustion chamber
D : oxygen	E : effluent section	F : fluidized section
G1,G2 : gasflowmeter	H : burner	I : feed well
J : cyclone	K1 : cyclone collector	K2 : dead-zone collector
L : gate valve	O : orifice flowmeter	P : pyrolytic section
T : temperature recorder	U : condenser	V : glass fiber filtration
W : tar trapped flask	X : dried flask	Y : gas sampling bulb

จากรูปที่ 2.18 และ 2.19 แสดงถึงการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาฟลูอิโดไซเคด พบว่าเมื่อป้อนถ่านหินพร้อมกับแกลบเมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้น จะทำให้ง่ายต่อการควบคุมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์การจับตัวกันของแกลบ ซึ่งจะเกิดบ่อยครั้งมากในกระบวนการเผาไหม้ เนื่องมาจากการสลายตัวของสารระเหยอย่างรวดเร็วและเกิดการโค้ก

ของแกลบลในขณะเกิดกระบวนการแกสฟิเคชัน ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดสภาวะฟลูอิดเซชัน นอกจากนี้ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 17.63 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 59.62 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาณคาร์บอนอยู่ 3.92-10.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิกาที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์สูงสุดเท่ากับ 88.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อัตราการป้อนแกลบล 3.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.141 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2.743 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง 2.977 ลิตรต่อนาที



ที่มา : Luan และ Chou (1990)

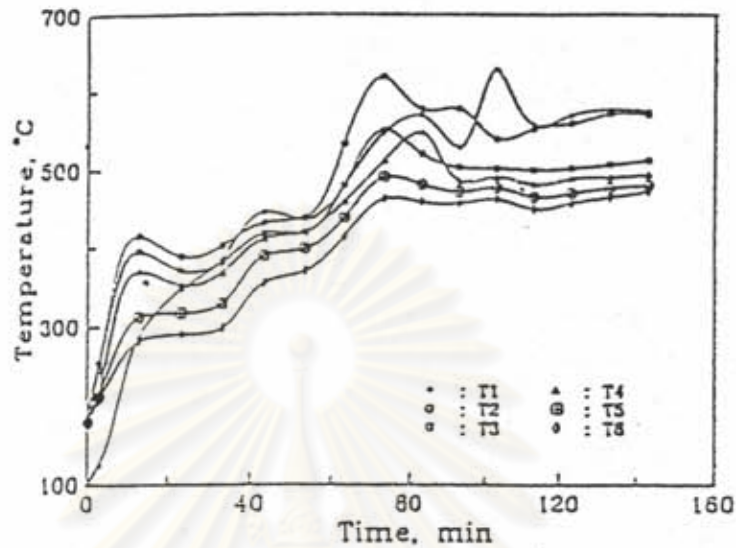
รูปที่ 2.18 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิดเบดของการเผาไหม้แกลบล

อัตราการไหลของอากาศ 1.141 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที,
 อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน สำหรับเปลวไฟ 2.743 ลิตรต่อนาที,
 อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง สำหรับเปลวไฟ 2.977 ลิตรต่อนาที,
 ความถี่ของการป้อนแกลบล 250 กรัม ต่อ 5 นาที,

ตำแหน่งอุณหภูมิที่วัดจากก้นเตาเผา

T1 : 14 Cm. ; T2 : 51 Cm. ; T3 : 67 Cm.

T4 : 121 Cm. ; T5 : 151 Cm. ; T6 : 184 Cm.



ที่มา : Luan และ Chou (1990)

รูปที่ 2.19 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิดไบนารีของการเผาไหม้พลาสติกผสมกับถ่านหิน

อัตราการไหลของอากาศ 1.141 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที,

อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน สำหรับเปลวไฟ 2.743 ลิตรต่อนาที,

อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง สำหรับเปลวไฟ 2.977 ลิตรต่อนาที,

อัตราการป้อนพลาสติก 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น : พลาสติก 70 % และ ถ่านหิน 30 %

ความถี่ของการป้อนวัสดุตั้งต้น 250 กรัม ต่อ 5 นาที

ตำแหน่งอุณหภูมิที่วัดจากกันเตาเผา

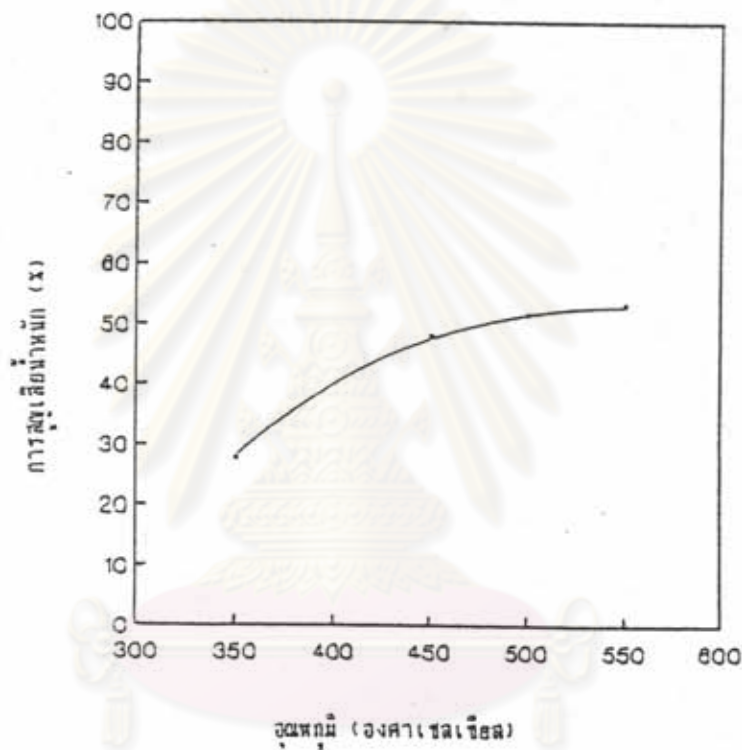
T1 : 14 Cm. ; T2 : 51 Cm. ; T3 : 67 Cm.

T4 : 121 Cm. ; T5 : 151 Cm. ; T6 : 184 Cm.

พงษ์ศักดิ์ พงษ์พันธ์, (2535) ได้ทดลองผลิตซีลีจากพลาสติกด้วยเทคนิคฟลูอิดไบนารี โดยผ่านการต้มพลาสติกกับกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วนำพลาสติกที่ได้ไปผ่านการไพโรไลซิสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 6.6 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 550

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดสารระเหยที่ขัดขวางการเกิดสภาวะฟลูอิดเซชันออกไป ซึ่งแสดงการสูญเสียน้ำหนักดังรูปที่ 2.20

จากการทดลองเผาแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสในสภาวะที่เหมาะสมจะได้เถ้าซิลิกาสีขาวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ในรูปของอสัณฐานซิลิกา และมีสิ่งปนเปื้อนที่มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียม ส่วนพวกอัลคาไลของธาตุอื่น ๆ มีอยู่เล็กน้อย



ที่มา : พงษ์ศักดิ์ ฟองเพชร (2535)

รูปที่ 2.20 เปรอเซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของแกลบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 6.6 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที