

## การตรวจเอกสาร

### 1. แกลบ (Rice husk)

แกลบ คือ ส่วนเปลือกของเมล็ดข้าวที่ได้หลังจากการสีข้าว จัดเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร แกลบส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน ลักษณะรูปทรงกระบอก หัวท้ายปิดเป็นรูปทรงรีที่มีแกนตามยาวเป็นแนวสมมาตร มีความยาวอยู่ในช่วง 6-10 มิลลิเมตร ความหนาของผนังเซลล์ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่น (bulk density) โดยประมาณ 0.148 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากที่ผิวด้านนอกของแกลบมีซิลิกาสะสมอยู่เป็นปริมาณสูงทำให้แกลบมีคุณสมบัติแตกหักง่าย ซิลิกาในแกลบเมื่อเทียบความแข็งตามโมห์สเกล (Mohs Scale) เท่ากับ 5.5 ถึง 6.5 (อัจฉริยา, 2538) ผิวนอกของแกลบมีลักษณะเป็นเซลล์ที่เป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งมีความเข้มข้นของซิลิกาสูงและถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (cuticle) หนาและมีขนสั้นๆอยู่บนผิวโครงสร้างภายในประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ ส่วนชั้นกลางมีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำกว่าชั้นนอก

Park *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาถึงพื้นผิวและโครงสร้างภายในของแกลบ เพื่อดูการกระจายตัวของซิลิกา โดยใช้เทคนิคของการศึกษาอนุภาคขนาดเล็ก (Microscopic technique) ได้แก่ Scanning electron microscopy และ field-emission SEM (FE-SEM) พบว่า แกลบมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือชั้น lemma และ palea อันประกอบไปด้วยผนังเซลล์ด้านนอก (outer epidermis) ชั้นไฟเบอร์ กลุ่มเส้นใยและท่อลำเลียงของเหลว (vascular bundles) เนื้อเยื่อที่เป็นเซลล์ผนังบาง (parenchyma cells) และผนังเซลล์ด้านใน (inner epidermis) โดยที่ผนังเซลล์ด้านนอกจะมีความหนากว่าชั้นอื่นๆ เนื่องจากเป็นชั้นของไฟเบอร์เรียงซ้อนกันสองชั้น ซึ่งซิลิกาจะมีกระจายตัวอยู่ที่บริเวณนี้สูง และจะสะสมตัวอย่างหนาแน่นในส่วนของเซลล์ที่มีลักษณะเป็นปุ่มที่มีรูปร่างคล้ายโดม (dome- shape) ซึ่งยื่นออกมาจากผิวนอกของแกลบ ส่วนซิลิกา (silica grains) ที่ได้จากการเตรียมโดยการเผาไหม้แกลบ (carbonized husk) จากงานวิจัยนี้ พบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 0.03-100  $\mu\text{m}$  มีความบริสุทธิ์ 99.66 % และอยู่ในรูปของอสัณฐานซิลิกา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ พบว่า มีปริมาณของโปรตีน ไขมัน และแป้ง ที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเมล็ดข้าว แสดงดังตารางที่ 1 แต่แกลบจะมีปริมาณเยื่อใยและเถ้าสูง ซึ่งเยื่อใยที่มีอยู่ในแกลบจะเป็นสารอินทรีย์จำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลและโพลีเมอร์ของน้ำตาล แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าวเทียบกับแกลบข้าว

องค์ประกอบ	เมล็ดข้าว	แกลบข้าว
โปรตีน	6.7-8.3	2.3-3.2
ไขมัน	2.1-2.7	0.4-0.7
เส้นใยดิบ (Crude fiber)	8.4-12.1	0.1-53.4
เถ้า (Crude ash)	3.4-6.0	15.3-24.4
แป้ง	62.1	1.8
เส้นใย (Dietary fiber)	19.1	77.3

ที่มา: Marshall and Wadsworth (1994)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบสารอินทรีย์ในแกลบข้าววิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrometry

องค์ประกอบสารอินทรีย์	สารอินทรีย์ (% wt)	คาร์บอน (% wt)
เซลลูโลส	43.30	19.22
ลิกนิน	22.00	17.93
น้ำตาล D-xylose	17.52	7.008
น้ำตาล L-arabinose	6.53	2.612
Methyl gluconic acid	6.53	1.820
น้ำตาล D-galactose	2.37	0.846

ที่มา: ก้องเกียรติ (2540)

ส่วนประกอบต่างๆของแกลบข้าวในแต่ละแห่งจะแตกต่างกัน โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของดินและธรรมชาติของการเพาะปลูก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ ดังตารางที่ 3 พบว่ามีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 22.12 % สารประกอบอินทรีย์ และความชื้นประมาณ 74 % และ

โลหะออกไซด์ ได้แก่  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  และ  $MgO$  รวมกันประมาณ 4% โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณของซิลิกาจากรายงานอื่นๆพบว่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 15-20 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบข้าววิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrometry

องค์ประกอบ	ปริมาณ (% wt)
สารอินทรีย์และความชื้น	73.87
$SiO_2$	22.12
$Fe_2O_3$	1.28
$CaO$	1.24
$Al_2O_3$	1.23
$MgO$	0.21
$MnO_2$	0.07

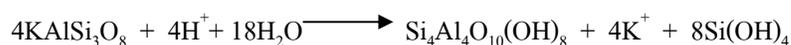
ที่มา: ก้องเกียรติ (2540)

### 1.1 การสะสมซิลิกาในต้นข้าวและบทบาทในแง่ธาตุเสริมประโยชน์ของข้าว

ข้าวจัดเป็นพืชที่สะสมซิลิกอน (silicon accumulators) ซึ่งปริมาณการสะสมซิลิกอนในแต่ละอวัยวะจะขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำ โดยซิลิกอนที่สะสมในพืชจะอยู่ในรูปของซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica,  $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) ที่จัดเรียงเป็นชั้นในผนังเซลล์ ซึ่งรูปร่างของซิลิกาที่สะสมในต้นข้าว จะเป็นเซลล์รูปร่างแท่ง (rod) มีจำนวนประมาณ 100,000 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีขนาดกว้าง 0.4 ไมครอน ยาว 2.5 ไมครอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 นาโนเมตร และมีความหนาแน่น  $1.5-2.3 \text{ g/cm}^3$  (Prychid *et al.*, 2003) ส่วนลักษณะปรากฏจะเป็นสีน้ำตาลอ่อนทึบแสงหรือไม่มีสี ซึ่งหากมีอนุภาคของคาร์บอนเจือปนจะมีผลให้สีเข้มขึ้น ซิลิกาที่สะสมในพืชจะเข้าสู่ทางรากในรูปของสารละลายกรดโมโนซิลิกิก (monosilicic acid,  $Si(OH)_4$ ) ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน พืชชั้นสูงจะมีความสามารถในการดูดซิลิกอนจากดินมาใช้ได้มากน้อยแตกต่างกัน โดยพืชที่มีซิลิกอนส่วนใหญ่เป็นพืชในวงศ์ Cyperaceae เช่น *Equisetum arvense* และพืชในวงศ์

Gramineae ซึ่งอยู่ในดินที่มีน้ำขัง เช่น พืชตระกูลข้าว ที่จะมีซิลิกาประมาณ 10-15 % และโดยทั่วไปถือว่าข้าวเป็นพืชที่สะสมซิลิกอน เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซิลิกอนได้มากกว่า (ยงยุทธ และ สุรเดช, 2521)

ยงยุทธ (2546) กล่าวว่า ซิลิกาในรูปไฮดรอกไซด์คือ  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  จะสามารถละลายได้และถูกปลดปล่อยลงสู่ดินในสภาวะที่มีอากาศและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซิลิเกต เช่น ควอร์ตซ์ (quartz) และ เฟลสปาร์ (feldspar) ยกตัวอย่างเช่น orthoclase feldspar ซึ่งเป็นธาตุที่พบในดินและถูกไฮโดรไลซ์ ด้วย  $\text{H}^+$  (ไฮโดรเจนไอออน) และ  $\text{OH}^-$  (ไฮดรอกไซด์ไอออน) ของน้ำ ทำให้เกิดการปลดปล่อย  $\text{K}^+$  (โพแทสเซียมไอออน) และ กรดโมโนซิลิก (  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ) ลงสู่ดิน ซึ่งกรดชนิดนี้สามารถละลายได้ในน้ำ มีความเข้มข้น 2 mM ที่ 25 °C ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ สามารถ ทำให้เกิดซิลิกาในรูปของโพลิเมอร์ ดังสมการ



ซิลิกอนจะเคลื่อนย้ายจากรากสู่ลำต้นซึ่งอยู่เหนือดินทางไซเลม และสะสมอยู่ในผนังของไซเลมเวสเซลค่อนข้างมาก ช่วยให้ไซเลมแข็งแรงและไม่ยุบตัวขณะที่พืชมีอัตราการคายน้ำสูง ส่วนปริมาณการสะสมซิลิกอนในแต่ละอวัยวะของส่วนเหนือดิน จะขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำเป็นหลัก โดยการสะสมจะเกิดขึ้นเสมอตรงปลายทางของกระแสการคายน้ำ ได้แก่ ด้านนอกของผนังเซลล์ชั้นผิวใบทั้งด้านบนและด้านล่าง ใบประดับ (bracts) ขนหรือไตรโคม (trichomes) และเซลล์ม้วน (bulliform cells) ของใบพืช ซิลิกอนที่สะสมในพืชจะอยู่ในรูปของซิลิกาอสัณฐาน ที่จัดเรียงเป็นชั้น ในผนังเซลล์ มีประโยชน์ต่อพืช 2 ประการคือ ช่วยลดอัตราการคายน้ำผ่านผิวเคลือบคิวทิน และช่วยขัดขวางการลวงลำของเชื้อโรคเข้าไปในเซลล์ โดยพืชตระกูลข้าวต้องการซิลิกอนปริมาณมากในช่วงเจริญพันธุ์ โดยก่อนข้าวตั้งท้องซิลิกอนจะเคลื่อนย้ายไปสะสมในใบธง และหากขาดแคลนในช่วงนี้ช่อดอกข้าวจะไม่สมบูรณ์ ซึ่งบทบาทของซิลิกอนในด้านธาตุเสริมประโยชน์ของข้าว สามารถสรุปได้ ดังนี้

- 1) ช่วยให้ใบตั้งชันซึ่งเมื่อต้นข้าวได้รับซิลิกอนเพียงพอ ก็จะเคลื่อนย้ายมาสะสมที่ผนังเซลล์ชั้นผิวนอกของใบ ทำให้ใบแข็งและตั้งชัน จึงรับแสงได้ดีขึ้น
- 2) ลดการล้ม เนื่องจากข้าวที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงมักมีลำต้นอ่อนแอและล้มง่าย ซิลิกอนจะช่วยให้ลำต้นข้าวแข็งแรงและล้มน้อยลง

3) ป้องกันการล่งล้าของเชื้อโรคเข้าไปในรากและใบเนื่องจากความแข็งแรงของเซลล์ผิวหนังที่มีซิลิกอนสูง จะช่วยป้องกันมิให้เชื้อราล่งล้าเข้าไปในเซลล์ และแมลงกัดกินใบน้อยลง

4) ป้องกันความเป็นพิษของแมงกานีสหรือเหล็ก โดยช่วยให้แมงกานีสกระจายในใบอย่างทั่วถึงไม่สะสมที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งมากเกินไป ซึ่งหากพืชไม่ได้รับซิลิกอนจะพบแมงกานีสสะสมอยู่ในใบบางบริเวณมากจนเป็นพิษและเกิดจุดสีน้ำตาล ซึ่งซิลิกอนช่วยให้ข้าวทนอยู่ได้แม้สารละลายที่ใช้ปลูกจะมีแมงกานีสและเหล็กสูง คือช่วยลดการสะสมเหล็กและแมงกานีสในส่วนเหนือดินและเพิ่มอำนาจการออกซิไดส์ของราก กล่าวคือซิลิกอนช่วยเพิ่มปริมาตรและความแข็งแรงของแอรังคิมา (arenchyma) ทั้งในรากและส่วนเหนือดิน ออกซิเจนจึงเคลื่อนย้ายลงไปถึงรากสะดวกและออกซิไดส์แมงกานีสกับเหล็กมิให้เป็นอันตรายต่อราก

5) ช่วยปลดปล่อยฟอสเฟตที่ถูกตรึงในดินไว้ ลดการคายน้ำผ่านผิวเคลือบคิวทินของใบข้าว และช่วยให้เมล็ดข้าวสาถึงอกดีขึ้นเมื่อสารละลายที่ใช้เพาะเมล็ดมีโซเดียมคลอไรด์มากกว่าปกติ

## 1.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

เถ้าคือสารอนินทรีย์ที่มีในแกลบ ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามแหล่งเพาะปลูก จากผลการวิเคราะห์เถ้าของพืชชนิดต่างๆจำนวน 24 ตัวอย่าง พบว่าแกลบมีปริมาณของซิลิกาอยู่ในเถ้าสูงที่สุด คือ 82.92 % ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่สูงกว่าในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดอื่นๆ รองลงมาคือ ส่วนใบของต้นข้าว (ฟาง) ที่มีปริมาณซิลิกา 53.08 % (เสริมศักดิ์, 2538) ส่วนที่เหลือจะเป็นสิ่งปนเปื้อน โดยสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้แตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่ปลูกและปุ๋ยที่ใช้ โดยปกติแล้วจะพบโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส เป็นส่วนใหญ่ ส่วนอลูมิเนียม เหล็ก และโซเดียม จะมีอยู่รองลงมา

เมื่อนำแกลบมาเผาจะได้เถ้าแกลบซึ่งมีประมาณ 16.4-18.3 % โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกาสูง โดยมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 86.9-97.3 % ซึ่งคุณสมบัติของเถ้าแกลบ นั้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผา เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมีสารอินทรีย์ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลงเหลืออยู่มาก แต่ถ้าเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเพียงพอจะได้ซิลิกาในรูปของผลึก (crystalline silica) ซึ่งบดละเอียดยากและเพื่อต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเผาแกลบจะทำให้ได้ซิลิกาในรูป

อสัณฐาน (amorphous silica) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง โดยความว่องไวในการทำปฏิกิริยาขึ้นกับขนาดของเถ้าแกลบ โดยเถ้าแกลบที่ถูกลบละเอียดจะมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescent

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	86.9-97.3
K <sub>2</sub> O	0.58-2.50
Na <sub>2</sub> O	0.00-1.75
CaO	0.20-1.50
MgO	0.12-0.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00-0.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20-2.85
SO <sub>3</sub>	0.10-1.13
Cl <sub>2</sub> O	0.00-0.42

ที่มา: ก้องเกียรติ (2540)

โดยทั่วไปเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) เถ้าแกลบดำ เกิดจากการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่มาก (5-30%) เถ้าแกลบลักษณะนี้มักนำไปทำสารดูดสี และคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon)
- 2) เถ้าแกลบขาว เกิดจากการเผาเถ้าแกลบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600-800 °C และมีอากาศเพียงพอ เถ้าแกลบชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุทนไฟ ซึ่งทนได้ถึง 1,400 °C ใช้หลอมทำแก้วแทนทรายขาว หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบซิลิกาอื่นๆ

### 1.3 การใช้ประโยชน์จากแกลบ (นารา และ ณัฐวุฒิ, 2531)

1) ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่โบราณกาล เช่น ใช้ในการหุงต้ม หรือใช้ในการเผาอิฐ ปัจจุบันได้มีการดัดแปลงเตาหุงต้มให้มีความเหมาะสม มากขึ้น เพื่อเป็นการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ฟืนหรือถ่าน โดยแกลบจะให้พลังงานความร้อน ประมาณ 3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ที่ให้พลังงานความร้อน 4,500-5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) และมีค่าความร้อนสูงพอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี ในการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย เช่น เมื่อนำไปเผาไหม้หมดแล้ว แกลบจะให้ปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 16-20 % แต่เถ้าจากแกลบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลิตวัสดุก่อสร้าง หรือใช้เป็นผงขัด เป็นต้น

- 2) ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ ซึ่งทำให้อิฐที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
- 3) ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ไก่ และ สุกร
- 4) ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช โดยใช้ผสมกับปุ๋ยแอมโมเนีย ช่วยให้เกิดผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นจากการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวถึง 5-24 %
- 5) ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลาย
- 6) ใช้ผสมกับดิน ทำให้ร่วนซุยไม่แน่นทึบ และช่วยให้ดินอุ้มน้ำได้ดีขึ้น

## 2. ซิลิกา

ซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide:  $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารประกอบของธาตุซิลิคอน และออกซิเจนซึ่งมีสูตรอย่างง่ายคือ  $\text{SiO}_2$  หรือซิลิกาที่อยู่ในรูปไฮเดรตคือ  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ซิลิกาจัดเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในดินและเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน (อัจฉริยา, 2538) ซิลิคอน(Si) เป็นธาตุที่ก่อให้เกิดซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยการรวมตัวกับออกซิเจนและธาตุอื่น ซิลิเกตที่ได้จากการรวมตัวระหว่าง Si กับ  $\text{O}_2$  แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิดคือ (อายุวัฒน์, 2543)

- 1) นีโซซิลิเกต (Nesosilicate) มีอัตราส่วน  $\text{Si} : \text{O}_2 = 1 : 4$
- 2) โซโรซิลิเกต (Sorosilicate) มีอัตราส่วน  $\text{Si} : \text{O}_2 = 2 : 7$
- 3) ไซโคลซิลิเกต (Cyclosilicate) มีอัตราส่วน  $\text{Si} : \text{O}_2 = 1 : 3$
- 4) ไอโนซิลิเกต (Inosilicate) มีอัตราส่วน  $\text{Si} : \text{O}_2 = 4 : 11$
- 5) ฟิโลซิลิเกต (Phyllosilicate) มีอัตราส่วน  $\text{Si} : \text{O}_2 = 2 : 5$

## 6) เทกโทซิลิเกต(Tectosilicate) มีอัตราส่วน $Si : O_2 = 1 : 2$

ซิลิกาที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีสี มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1,500-1,700 องศาเซลเซียส มีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถปรากฏอยู่ใน 2 รูปแบบ โดยแบบแรกเป็นรูปผลึกมีขนาดแตกต่างกันไป ตั้งแต่หินเจียวนูมาน (quartz) ไปจนถึงขนาดเล็กๆ เช่น ทราย ส่วนอีกแบบหนึ่งคือซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) จัดเป็นเป็นซิลิกาอสัณฐาน เช่น ซิลิกาที่มีอยู่ในพวกสาหร่ายเปลือกแข็ง (kieselguhr) หรือไดอะตอม ซึ่งจะประกอบด้วยซิลิกาที่มีความเป็นรูพรุนสูงอยู่ภายใน แม้ว่าซิลิกาผลึกและซิลิกาอสัณฐานจะมีสูตรเคมีที่เหมือนกัน แต่มีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุเนื่องจากซิลิกาทั้ง 2 รูปแบบ มีลักษณะทางโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกัน กล่าวคือซิลิกาอสัณฐานที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตจะมีขนาดเล็กกว่าซิลิกาในรูปผลึกมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

### 2.1 ซิลิกาผลึก (Crystalline silica)

ผลึก หมายถึง ของแข็งที่มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างอย่างมีระเบียบและต่อเนื่อง มีรูปร่างสมมาตรเป็นระบบผลึกที่แน่นอน รูปผลึกของซิลิกาภายใต้ความดันปกติแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอร์ตซ์ (quartz) ไทรดิไมท์ (tridymite) และ คริสโตบาไลท์ (cristobalite) ซึ่งซิลิกา ในรูปผลึกควอตซ์จะพบมากมายในธรรมชาติ แสดงให้เห็นรูปผลึกอย่างสมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั้งสามรูปผลึกนี้สามารถจะเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (Inversion) นี้มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างใหม่ ส่วนแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็วโดยมีการกระทบกระเทือนพื้นระเพียงเล็กน้อย และสามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ง่าย โดยที่อุณหภูมิ 573 °C  $\beta$ -quartz จะเปลี่ยนเป็น  $\alpha$ -quartz อย่างรวดเร็ว ส่วนที่อุณหภูมิ 1,025 °C ผลึก quartz ที่มีความบริสุทธิ์สูง (มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า 0.01%) จะสามารถเปลี่ยนมาเป็นคริสโตบาไลท์ได้ แต่ถ้าหากมีสิ่งเจือปนมาก จะสามารถเปลี่ยนเป็น  $\alpha$ -tridymite ที่อุณหภูมิประมาณ 870 °C และจะเปลี่ยนแปลงต่อไปเป็น  $\alpha$ -cristobalite ที่อุณหภูมิ 1,470 °C โดยที่อุณหภูมิประมาณ 1,720 °C ก็จะเกิดการหลอมเหลวขึ้น ส่วนในระหว่างการทำให้เย็นลงพบว่าลำดับการเปลี่ยนแปลงจะแตกต่างกัน โดยพบว่าไทรดิไมท์ และ คริสโตบาไลท์ จะไม่เปลี่ยนมาเป็นควอร์ตซ์ ตามเงื่อนไขปกติ อย่างไรก็ตาม จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาเป็น  $\gamma$ -tridymite และ  $\beta$ -cristobalite ตามลำดับ (ปริดา, 2539)

ตารางที่ 5 รูปผลึกของซิลิกาที่ความดันบรรยากาศ

รูปการเปลี่ยนแปลง	ระบบผลึก	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
$\beta$ -quartz	trigonal	2.65
$\alpha$ -quartz	hexagonal	2.53
$\gamma$ -tridymite	orthorhombic	2.26
$\beta$ -tridymite	hexagonal	-
$\alpha$ -tridymite	hexagonal	2.22
$\beta$ -cristobalite	tetragonal	2.32
$\alpha$ -cristobalite	cubic	2.20

ที่มา: อัจฉริยา (2538)

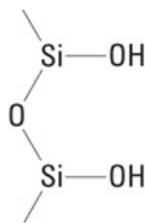
Ibrahim *et al.* (1979) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการเผาเคลือบที่มีผลต่อโครงสร้างและขนาดของผลึกซิลิกา โดยทดลองเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 500 700 900 และ 1100 °C เป็นเวลา 3 6 9 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 500 - 700 °C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงของซิลิกาจากรูปออสถฐานไปเป็นรูปผลึก ซึ่งวิเคราะห์โดยเครื่อง X-ray crystallographic แต่การเผาที่อุณหภูมิสูงคือ 900 และ 1100 °C นั้นจะทำให้เกิดซิลิกาในรูปผลึก ซึ่งหากเพิ่มเวลาในการเผาในช่วงอุณหภูมิที่สูงนี้จะเป็นการเพิ่มขนาดของรูปผลึกและมีผลทำให้พื้นที่ผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำคือ 500 °C นั้น หากต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวของอนุภาคสามารถทำได้โดยเพิ่มเวลาในการเผาให้นานขึ้น ซึ่งการหาพื้นที่ผิวนั้นตรวจสอบโดยวิธี Nitrogen adsorption และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาในแก้วเคลือบเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆกันในช่วง 500 -1,400 °C โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะในซิลิกา คือพันธะ Siloxane (Si-O) และ พันธะ Silanol (Si-OH) ซึ่งตรวจสอบโดยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพันธะดังกล่าวด้วยวิธี Infrared Spectroscopy ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างการเผาจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกที่ 700 °C จะเริ่มเกิดการสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพันธะ Silanol ขึ้นต่อมาที่ 900 °C จะเริ่มเกิดรูปผลึก คริสโตบาไลต์ และมีการทำลายพันธะ Silanol และขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C จะทำให้เกิดซิลิกาในรูปผลึกคริสโตบาไลต์และไพโรซิไมต์ เนื่องมาจากการสูญเสียหมู่ -OH ทำ

ให้เกิดเปลี่ยนแปลงของพันธะ จาก Silanol ไปเป็น Siloxane ซึ่งความสัมพันธ์ของการดูดกลืนรังสีของพันธะ ทำให้สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาในแก้วเคลือบได้

Hamad and Khattab (1981) พบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปจากซิลิกาอสัณฐานไปเป็นซิลิกาในรูปผลึก จะเกิดได้โดยมีปัจจัยของอุณหภูมิเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งพบว่าการเกิดผลึกคริสโตบาไลต์ จะตรวจพบเมื่อเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 800 °C และหากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1,150 °C จะเกิดทั้งผลึกคริสโตบาไลต์ และ ไทรคิมิต ในขณะที่ยกเลิกที่ผ่านการต้มด้วยสารละลายกรดหาคำนำไปเผาโดยเพิ่มอุณหภูมิในการเผาให้สูงกว่า 1,150 °C มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดซิลิกาในรูปผลึกคริสโตบาไลต์ได้ แสดงให้เห็นว่าการนำเคลือบไปต้มด้วยสารละลายกรดก่อนการเผาจะช่วยลดอัตราการเกิดซิลิกาในรูปผลึกให้ช้าลงได้

## 2.2 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

ของแข็งที่มีรูปอสัณฐานหมายถึงของแข็งที่ไม่สามารถจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างให้เป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งอสัณฐานซิลิกาก็คือโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือ แอนไฮเดรต (Anhydrate) พันธะเคมีในอสัณฐานซิลิกามีอยู่หลายชนิดได้แก่ siloxane (-Si-O-Si-), silanol (-Si-O-H) และ อยู่ที่ผิวเป็น silane (-Si-H) หรือ Organic silicon (-Si-O-R หรือ -Si-C-R) ซึ่งพันธะเคมีดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พันธะ Silanol (-Si-O-H) ในอสัณฐานซิลิกา

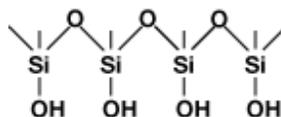
ที่มา: Liou (2004)

ซิลิกาชนิดอสัณฐานสามารถแบ่งออกอย่างกว้างๆได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.2.1 วิเทียสซิลิกา (vitreous silica) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซิลิกาแก้ว (silica glass) มีลักษณะแข็ง ไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นจากการแข็งตัวจากการหลอมเหลวของผลึกซิลิกา หรือการหลอมผงซิลิกาอสัณฐาน และค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำมากอยู่ในช่วง  $0.5 - 0.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

2.2.2 ซิลิกาเจล (silica gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

- 1) อะควาเจล (aquagel) เกิดจากสารละลาย
- 2) อัลโคเจล (alcogel) เกิดจากสารประกอบอัลคอกซี-ไฮดรอกไซด์
- 3) ซีโรเจล (xerogel) มีลักษณะแห้ง โครงสร้างเดิมจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับกระบวนการทำแห้ง
- 4) แอโรเจล (aerogel) มีลักษณะแห้ง เกิดจากกระบวนการทำแห้งที่เหนือจุดวิกฤต เพื่อป้องกันการเสียรูปร่างของเจลเนื่องจาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟส



ภาพที่ 2 โครงสร้างของซิลิกาเจล

ที่มา: Hunt *et al.* (1984)

2.2.3 ซิลิกาผง (powder silica) มีการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง โครงสร้างมีขนาดเล็กมากหรือไม่มีโครงสร้าง และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง

- 1) อะควาจีนิค (aquagenic) เกิดจากการตกตะกอนของสารละลายโดยตรง หรือจากอะควาเจล
- 2) ไพโรจีนิค (pyrogenic) เกิดจากการระเหยของซิลิกาโดยใช้เปลวไฟ หรือการอาร์ค (arc) ในสถานะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน และเกิดการรวมตัวกันทางกายภาพ หรือเกิดจากการรวมตัวกันทางเคมีของไอสารประกอบซิลิคอนจากเปลวไฟของไฮโดรเจนกับออกซิเจน
- 3) ไบโोजีนิค (biogenic) เป็นประเภทของอะควาจีนิคชนิดพิเศษประเภทหนึ่งที่พบในพืช และไดอะตอม

ในทางการค้าที่มีการสังเคราะห์หรือสังเคราะห์ขึ้น เพื่อให้ได้คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถพบได้ในซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ต้องการความบริสุทธิ์สูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการสังเคราะห์เพื่อให้ได้คุณสมบัติซิลิกาด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันจะทำให้ได้สารที่มีสมบัติเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

การนำซิลิกาชนิดอสังเคราะห์มาใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยาง พลาสติก และ โพลีเมอร์
- 2) เป็นสารเพิ่มแรงยึดในกาวบางชนิด
- 3) เป็นสารลดแรงยึดระหว่างผิวของแข็งในของเหลวที่มีของแข็งผสมอยู่
- 4) เป็นสารเพิ่มความหนืด และปรับคุณสมบัติของการไหล (thixotropy) ในของเหลว เช่น จารบี สี หมึก ยา และเครื่องสำอาง
- 5) เป็นสารช่วยปรับคุณสมบัติของพื้นผิวต่างๆ เช่น เกิดการผสมของน้ำกับน้ำมัน เป็นอย่างดี ป้องกันการเกิดโฟม และปรับสภาพพื้นผิวของสารให้มีคุณสมบัติชอบน้ำเป็นต้น
- 6) เป็นสารเพิ่มความเงา
- 7) เป็นสารดูดความชื้น

### 2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมซิลิกาจากแกลบ

กนกอร (2543) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของชนิดของกรดที่ใช้ อุณหภูมิ และเวลาในการเผา ต่อกระบวนการผลิตซิลิกาขาวจากแกลบ โดยทดลองใช้กรด 3 ชนิดคือ กรดไฮโดรโบรมิก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก พบว่าสภาวะที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของซิลิกาสูงสุด คือแกลบที่ผ่านการกระบวนการทางเคมีด้วยสารละลายกรดไฮโดรโบรมิก 5 M ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่สุดคือ 490 °C นาน 6 ชั่วโมง เนื่องจากพบซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด

มณี (2545) ได้ทดลองเตรียมซิลิกาจากแกลบจำนวน 3 วิธี คือ การนำแกลบที่ผ่านกา

ต้มด้วยกรดแล้วไปเผาภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน การเผาแลกเปลี่ยนด้วยเตาฟลูอิดไคซ์เบด และการสกัดด้วยด่าง เพื่อนำซิลิกาที่เตรียมได้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากผลการทดลอง พบว่า ซิลิกาที่เตรียมได้จากทั้ง 3 วิธีเป็นอสังฐานซิลิกา ส่วนวิธีที่ให้ความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูงที่สุดคือ การต้มแลกเปลี่ยนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M นาน 3 ชั่วโมง และเผาภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที โดยสามารถสังเคราะห์ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึง 99.90 % รองลงมาคือการเผาแลกเปลี่ยนด้วยเตาฟลูอิดไคซ์เบด และการสกัดด้วยด่าง ที่ให้ความบริสุทธิ์ของซิลิกา 99.8% และ 96.6% ตามลำดับ โดยวิธีการสกัดด้วยด่าง สามารถให้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดคือ 404 m<sup>2</sup>/g

ชีวารัตน์ (2546) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์ โดยการรีฟลักซ์แลกเปลี่ยนด้วยกรดไฮโดรคลอริก และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 500 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า การเผาแลกเปลี่ยนที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N เป็นเวลา 15 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C นาน 5 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดซิลิกา โดยถ้าแลกเปลี่ยนที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว และมีความบริสุทธิ์ 99.33 %

Hunt *et al.* (1984) ได้ทำการทดลองเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์ โดยทำการกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแลกเปลี่ยน ได้แก่พวกออลอนบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่างๆ โดยการต้มกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1:10 เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีสลงได้ 40 ถึง 100 เท่า และลดปริมาณโซเดียม ฟอสฟอรัส กับกำมะถันได้ถึง 3 ถึง 8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งเจือปนที่มีอยู่เดิม จากนั้นนำแลกเปลี่ยนไปเผาในเตาฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักผลิตภัณฑ์จะลดลง 1 ใน 3 ส่วนจากน้ำหนักเริ่มต้น และประมาณ 65 % ของแลกเปลี่ยนที่จะเปลี่ยนไปเป็นสารระเหย ซึ่งภายหลังการเผาไหม้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนอะตอมต่อโมเลกุลของคาร์บอนต่อซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 4:1 ซึ่งสามารถปรับให้ค่าลดลงเป็น 2:1 ได้ เพื่อให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ได้โดยควบคุมการเผาไหม้

Chakraverty *et al.* (1988) ได้ศึกษาถึงการเผาไหม้แลกเปลี่ยนที่ผ่านการล้างด้วยกรด และไม่ผ่านการล้างด้วยกรด เพื่อผลิตอสังฐานซิลิกาบริสุทธิ์ โดยใช้กรดชนิดต่างๆคือ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ผลการทดลองพบว่า แลกเปลี่ยนที่ไม่ผ่านการล้างกรดจะมีปริมาณโลหะ

ปนเปื้อนสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม โดยกรดซัลฟูริกมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะปนเปื้อนได้น้อยกว่ากรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก เนื่องจากเกิดซัลเฟตของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทที่ละลายน้ำได้น้อยจึงกำจัดโลหะออกได้ไม่มากนัก และจากการเปรียบเทียบระหว่างการใช้กรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก พบว่ากำจัดโลหะได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน ยกเว้นโลหะออกไซด์ของเหล็กที่กรดไนตริกกำจัดออกได้น้อยกว่า ดังนั้นกรดไฮโดรคลอริกจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรดชนิดอื่นๆ นอกจากนี้การเผาแกลบที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 500 °C 600 °C และ 700 °C เป็นเวลานาน 5 3.5 และ 1.5 ชั่วโมงตามลำดับ จะได้เถ้าแกลบสีขาว ซึ่งเป็นซิลิกาชนิดอสัณฐาน

Krishanaro and Mahajan (1995) ได้กล่าวว่างค์ประกอบหลักที่พบในแกลบ ได้แก่ สารอินทรีย์ และซิลิกา ซึ่งสารอินทรีย์นั้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากการทดลองถึงปัจจัยของความเข้มข้นกรดที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของซิลิกา พบว่าแกลบที่ผ่านการต้มด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N นาน 1 ชั่วโมง จะมีปริมาณของสารอินทรีย์ (organic material) ลดลงเป็น 74.67 % และมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 25.36 % เมื่อเทียบจากแกลบเริ่มต้นซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์ถึง 81.52 % และปริมาณของซิลิกาเพียง 18.48 % ตามลำดับ นอกจากนี้การต้มแกลบด้วยสารละลายกรดยังช่วยลดปริมาณของสิ่งเจือปนในแกลบ (metallic impurity) ซึ่งเป็นโลหะขี้พวกให้ถูกสารละลายกรดที่มีขี้พวกละลายออกไป โดยเฉพาะโพแทสเซียม (K) จะถูกกำจัดออกไปคิดเป็นปริมาณสูงที่สุด ซึ่งธาตุชนิดดังกล่าวถือเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการหลอมเหลวของผิวซิลิกาและเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดซิลิกาในรูปผลึก

Krishnarao *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาสาเหตุของการเกิดอนุภาคสีดำ ในเถ้าซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบ พบว่าอนุภาคสีดำนั้นเกิดจากการรวมตัวของคาร์บอนกับเถ้าซิลิกา (carbon fixed) ซึ่งสาเหตุสำคัญมาจากสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแกลบ นั่นคือโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวของพื้นผิวอนุภาคเมื่อได้รับความร้อน ทำให้อนุภาคของคาร์บอนถูกหลอมรวมไปด้วยและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศได้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในกรณีที่มีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (sudden heating) กับแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรด แล้วเผาที่อุณหภูมิสูงคือ 600 และ 700 °C ทำให้มีปริมาณอนุภาคสีดำมาก นอกจากนี้  $K_2O$  ยังเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของอสัณฐานซิลิกาไปเป็นซิลิกาผลึกด้วย ซึ่งการกำจัด  $K_2O$  นั้นทำได้โดยให้แกลบทำปฏิกิริยากับกรด ก่อนการเผา

Yalcin and Sevinc (2000) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมซิลิกา คือการต้ม แกลบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 % เพื่อกำจัดโลหะเจือปนออกไปก่อน (acid leaching) และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C นาน 4 ชั่วโมง ซึ่งจากสภาวะดังกล่าว จะได้ผลผลิตคือซิลิกาที่มีคุณภาพ ดีกว่าการเตรียมด้วยวิธีอื่น เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ สม่ำเสมอ และการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C นี้ สามารถผลิตซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึง 99 % ซึ่ง มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญใน การผลิตซิลิกา คือ ชนิดของกรดที่เลือกใช้ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟริก แต่กรดที่มีประสิทธิภาพดีก็คือกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากให้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูงกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความว่องไวและความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ขั้นตอนการต้มแกลบด้วยกรดก็มีผลเช่นกัน ซึ่งหากต้มแกลบด้วยกรดก่อนนำไปเผาจะได้ซิลิกาที่มี พื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า เมื่อเทียบกับขั้นตอนที่ต้มภายหลังการเผาไหม้ ซึ่งนอกจากจะเสียเวลาและ เปลืองต้นทุนแล้วยังได้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ดังนั้นการต้มแกลบด้วยกรดก่อนการเผาไหม้ จึงเป็นขั้นตอนและทางเลือกที่ดีที่สุดของการผลิตซิลิกา

Della *et al.* (2002) ได้ทดลองผลิตซิลิกาจากเถ้าแกลบ พบว่าจะสามารถผลิตซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงได้โดยมี 2 ขั้นตอนคือ 1) ขั้นตอนการเผา ซึ่งได้ทดลองเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิ 400 500 600 และ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากให้ความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูงที่สุด คือ 94.95 % และซิลิกาที่ได้อยู่ในรูปอสัณฐานซิลิกา และมีปริมาณคาร์บอนลดลงเมื่อเทียบกับ ก่อนทำการเผาจาก 18.60 % ลดลงเหลือ 0.14 % โดยปริมาณคาร์บอนที่ลดลงนั้น เนื่องมาจากการ เพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเผา และ 2) ขั้นตอนการบด โดยเถ้าแกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 177 m<sup>2</sup>/g แต่เมื่อหลังจากเผาที่ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เป็น 54 m<sup>2</sup>/g เนื่องมาจากเกิดการรวมกันของอนุภาค (agglomeration effect) ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคได้โดยทำการบด (wet milling) เป็นเวลา 80 นาที ทำให้ได้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 81 m<sup>2</sup>/g

Liou (2004) ได้ศึกษาถึงปริมาณโลหะเจือปนในแกลบ ภายหลังการต้มด้วยสารละลาย กรด ไฮโดรคลอริก พบว่า แกลบที่ผ่านการต้มด้วยสารละลายกรด จะมีปริมาณโลหะเจือปนรวม ทั้งหมดลดลงจากเดิม 6 เท่า (จาก 40,840 ppm ลดลงเป็น 6,290 ppm) อันได้แก่ แมกนีเซียม แคล ซียม เหล็ก โซเดียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมงกานีส และ สังกะสี โดยเฉพาะโพแทสเซียม มี

ปริมาณลดลงสูงที่สุดถึง 200 เท่า (8,970 ppm ลดลงเป็น 40 ppm) เมื่อเทียบกับปริมาณที่พบใน แกลบที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ (water-rinsed) เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ แคลซียม มีปริมาณลดลงน้อย ที่สุดเพียง 3 เท่า เท่านั้น นอกจากนี้อุณหภูมิและความร้อนในขณะการเผาไหม้ก็มีส่วนช่วยในการ กำจัดโลหะเจือปนออกไปได้เช่นกัน โดยความร้อนขณะการเผาไหม้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ โลหะเจือปนที่เป็นของแข็งไปสู่สถานะก๊าซ และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสารระเหยชนิดต่างๆ ทำให้ปริมาณโลหะเจือปนภายหลังการเผาไหม้มีค่าลดลง ซึ่งอัตราการเผาไหม้ที่  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  เป็น สภาวะที่ทำให้โลหะเจือปนมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนการเผาไหม้แกลบภายใต้สภาพบรรยากาศ ปกติหรือในบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะได้ซิลิกาที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ฟุ้งกระจาย แดก ปร่าง่าย ทำให้ง่ายต่อการบดเป็นผงขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูงกว่าเมื่อเทียบกับการเผาภายใต้ บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

#### 2.4 การใช้ประโยชน์ของซิลิกาในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นในทางการค้าเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง จัด เป็นชนิดออสันฐาน โดยสามารถควบคุมสภาวะในการผลิตเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมได้ เช่น มีความบริสุทธิ์สูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนสูง รวมถึงให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ สามารถเข้ากันได้ดีกับสารประกอบชนิดอื่นในสูตร โดยไม่ทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ซึ่งซิลิกาที่ใช้เป็น ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางประเภทต่างๆ มีหลายชนิด ดังนี้

##### 2.4.1 การใช้ซิลิกาเป็นสารขัดผิวในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว

(Baines and Stanier, 2001)

ในทางอุตสาหกรรมจะมีการสังเคราะห์ซิลิกาเพื่อใช้เป็นเม็ดขัดผิว (particulates) ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์ของใช้งาน ทั้งในด้านขนาด รูปร่าง ความเป็นรูพรุน (porosity) และความแข็งแรงของอนุภาค โดยการสังเคราะห์ซิลิกาจะต้องมีการ ควบคุมสภาวะในกระบวนการผลิต เริ่มจากการสังเคราะห์ซิลิกานาโนเริ่มต้น (primary particle) จากสารละลายซิลิเกต (soluble silicate) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ซิลิกาที่มีขนาดเล็ก คือ 2 นาโนเมตร จากนั้นจะใช้พันธะทางเคมีเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของซิลิกานาโนเริ่มต้นดังกล่าว เพื่อให้เกิดเป็น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (secondary particle) คือ 10-50 นาโนเมตร และขั้นตอนต่อมาจะใช้พันธะ ไฮโดรเจน (hydrogen bond) ในการรวมตัวของอนุภาคซิลิกาในลำดับขั้นต่างๆ จาก secondary

particle ให้เป็น product particle ซึ่งจะมีความใหญ่ขึ้นคือ 0.5-100 ไมครอน และต่อเนื่องไปเป็น เม็ดขัดผิว (granules) ที่มีความใหญ่กว่า 100 ไมครอน ตามลำดับ โดยความแข็งแรงของซิลิกา จะขึ้นกับพลังงานของพันธะไฮโดรเจนที่ใช้เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันนั่นเอง เพื่อให้เกิดเป็นเม็ดขัดผิว ชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในด้านการนำไปใช้ประโยชน์

ซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นเม็ดขัดผิวจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ที่แตกต่างกัน ในคุณสมบัติด้านกายภาพ คือ ชนิดที่แตกตัวไม่ได้ (do not breakdown in use) และชนิดที่แตกตัวได้ (can breakdown during use) โดยเทคโนโลยีในด้านการแตกตัวขณะใช้ขัดบนผิวหนัง เป็นคุณสมบัติพิเศษที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาดผิว ด้วยขนาดอนุภาคของซิลิกาที่เล็กกว่า 45 ไมครอน ซึ่งถือว่าไม่ให้ความรู้สึกทางด้านประสาทสัมผัส (non-sensory particle) เมื่อใช้ขัดบนผิวหนัง เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าระดับความรู้สึกในการรับรู้ (below the skin feel threshold) โดยจะใช้เป็นอนุภาคที่อยู่ภายในเม็ดขัดผิวชนิดที่สามารถแตกตัวได้ ซึ่งเมื่อใช้ขัดบนผิวหนังแรงจากการขัดจะส่งผลให้เม็ดขัดผิวชนิดดังกล่าวแตกตัวออก และปลดปล่อยซิลิกาขนาดเล็กที่เป็น non-sensory particle ออกมา เพื่อทำความสะอาดด้วยการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากผิวหนังอย่างอ่อนโยนในส่วนที่ยากแก่การเข้าถึง โดยไม่เกิดการระคายเคือง จึงเหมาะที่จะใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวที่ใช้เป็นประจำทุกวัน (daily cleansing) และใช้ในสูตรที่ต้องการลดระดับของสารทำความสะอาด (surfactant) ให้น้อยลง ส่วนซิลิกาชนิดที่แตกตัวไม่ได้นั้นจะมีความอยู่ในช่วง 75-1000 ไมครอน และด้วยขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า จึงมีประสิทธิภาพในการขัดและนวดผิว โดยสามารถข้อมสีที่ผิวได้เพื่อความสวยงามเมื่อใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์

ก. คุณภาพทางประสาทสัมผัส (sensory feeling) ของซิลิกา เมื่อใช้ขัดบนผิวหนัง จะขึ้นกับคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) ขนาด (size) ซึ่งขนาดที่ใช้เป็นตัวแบ่งทางด้านความรู้สึก ในการรับรู้เมื่อใช้ขัดบนผิวหนัง (skinfeel threshold) คือ 45 ไมครอน

2) รูปร่าง (shape) มีทั้งรูปร่างแบบกลม (rounded shape) และแบบที่มีเหลี่ยมและมุม (angular shape) ที่ให้ความรู้สึกในการขัดที่ต่างกัน

3) ความแข็งแรง (strength) คือแรงที่ใช้ในการขัดเพื่อให้เม็ดขัดผิวแตกตัวออก ซึ่งขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะทางเคมีที่ใช้

ข. ประสิทธิภาพของซิลิกาในด้านการทำความสะอาดเมื่อใช้เป็นสารขัดผิว ขึ้นกับคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) ขนาด (size) ที่นิยมใช้คือในช่วง 100-700 ไมครอน ที่สามารถทำความสะอาดโดยไม่ทำร้ายผิวหรือเกิดรอยขีดข่วนบนผิว (micro abrasion)

2) รูปร่าง (shape) ซึ่งรูปร่างที่กลมจะทำให้มีประสิทธิภาพในการขัดดีกว่า เนื่องจากกระจายตัวบนผิวหนังได้ดี

3) ความเป็นรูพรุน (texture / porosity) เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกไว้ในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนได้ดี

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อใช้เป็นสารขัดผิวในทางการค้า

คุณลักษณะ	ชื่อทางการค้า		
	Neosil CBT60S	Neosil PC50S	Neosil CL2000
ชนิดของสารขัดผิว	เม็ดขัดผิวสังเคราะห์ ชนิดออสซิลฐานซิลิกา	เม็ดขัดผิวสังเคราะห์ ชนิดออสซิลฐานซิลิกา	เม็ดขัดผิวสังเคราะห์ ชนิดออสซิลฐานซิลิกา
ค่าคุณภาพ			
ลักษณะปรากฏ	เม็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น	เม็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น	เม็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น
ขนาด	180-300 ไมครอน	106-500 ไมครอน	45 ไมครอน
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.3-0.45	-	-
ความชื้น (ที่ 105 °C)	สูงสุด ที่ 7 %	สูงสุด ที่ 5 %	สูงสุด ที่ 8 %
ค่าความเป็นกรดต่าง ( 5% suspension )	6.0-8.0	5.5-7.5	6.5-8.0
ปริมาณโลหะเจือปน	-	Iron (Fe) <100 ppm Arsenic (As) < 2 ppm Lead (Pb) < 5 ppm Sulphate ( SO <sub>4</sub> ) < 1ppm	-
คุณสมบัติ	เม็ดขัดผิวที่สามารถแตก ตัวได้ ซึ่งภายในมี ซิลิกาขนาดเล็ก ชนิดที่ เป็น non-sensory particle	เม็ดขัดผิวที่ไม่สามารถ แตกตัวได้	เม็ดขัดผิวที่ไม่สามารถ แตกตัวได้ และมีขนาด เล็ก จัดเป็นชนิด non-sensory particle

ที่มา: Anonymous (n.d.)

Baines and Stanier (2001) ได้ทำการทดสอบคุณภาพทางด้านคลินิกของซิลิกาที่ใช้เป็นเม็ดขัดผิว ทั้งชนิดที่แตกตัวได้และแตกตัวไม่ได้ เพื่อดูประสิทธิภาพในด้านการทำความสะอาดผิว เทียบกับเม็ดขัดผิวชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ในทางการค้า ได้แก่ เม็ดเมล็ดแอพริคอต (apricot seed powder) เม็ดโพลีเอทิลีน (polyethylene beads) ทั้งชนิดที่แตกตัวได้ (breakdown polyethylene HEC granules) และแตกตัวไม่ได้ โดยนำเม็ดขัดผิวชนิดต่างๆ ผสมลงในสูตรผลิตภัณฑ์เจลอาบน้ำในปริมาณ 5 % และทำการทดสอบกับอาสาสมัครจำนวน 25 คน ในห้องที่ควบคุมสภาวะอุณหภูมิ  $20 \pm 2$  °C และความชื้นสัมพัทธ์  $45 \pm 5$  % RH โดยดูประสิทธิภาพของเม็ดขัดผิวเมื่ออยู่ในสูตรผลิตภัณฑ์ในการกำจัดคราบลิปสติกชนิดติดทนนาน (long lasting lipstick) ออกจากผิวหน้า ซึ่งจะทำการวัดค่าสี ( $L^* a^* b^*$ ) ของผิวหน้า เปรียบเทียบระหว่างก่อนและภายหลังการใช้เจลอาบน้ำล้างคราบลิปสติกออกไป จากนั้นจะนำผลต่างของค่าสีมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพ ในการทำความสะอาด (% cleansing) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ซิลิกาชนิดที่แตกตัวไม่ได้ ซึ่งมีขนาด 250 ไมครอน จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในด้านการทำความสะอาด เมื่อเทียบกับเมล็ดแอพริคอตและเม็ดโพลีเอทิลีนที่มีขนาดเท่ากัน เป็นการยืนยันถึงคุณสมบัติในด้านรูปร่างและความเป็นรูพรุนของซิลิกา ส่วนซิลิกาชนิดที่แตกตัวได้และมีอนุภาคภายในเป็น non-sensory particle จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเมล็ดแอพริคอตแต่สูงกว่าเม็ดโพลีเอทิลีน ดังนั้นจึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ผสมลงในสูตรผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการลดระดับของสารทำความสะอาด (surfactant) ให้น้อยลง หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความอ่อนโยนกับผิวหน้า โดยไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

#### 2.4.2 การใช้ซิลิกาเป็นสารขัดฟันและเพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์ยาสีฟัน

ยาสีฟันจัดเป็นผลิตภัณฑ์ทางเครื่องสำอางที่ใช้ในการทำความสะอาดฟัน เพื่อลดการสะสมของคราบสกปรกและหินปูน ซึ่งสารที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารสำหรับขัดฟัน (abrasive agent) นั้น นอกจากต้องถูกสุขลักษณะสำหรับช่องปากแล้ว ยังต้องไม่ทำให้เกิดการสึกหรอของฟันอันเนื่องมาจากการขัดสีด้วย (low abrasion)

Penzeri (2001) ได้ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างของสารขัดฟัน 17 ชนิด ที่มีการใช้ในผลิตภัณฑ์ยาสีฟัน ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope พบว่าลักษณะรูปร่างส่วนใหญ่ จะไม่มีความสม่ำเสมอ และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน อีกทั้งมีลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Navarre (1975) ที่กล่าวว่าอนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการขัดสีสูงกว่าอนุภาคที่มีความเป็นระเบียบ หรือมีลักษณะรูปร่างที่มีความสม่ำเสมอ

Camargo *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพหรือประเมินคุณสมบัติในการขัดสี (abrasiveness evaluation) ของตัวอย่างซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งใช้เป็นสารสำหรับขัดฟันในผลิตภัณฑ์ยาสีฟัน โดยการประเมินคุณสมบัติในการขัดสีสามารถทำได้โดยใช้เทคนิค radiometric method ซึ่งจะรายงานผลเป็นค่า RDA (Radioactive dentine abrasion) หรือความสามารถในการขัดทำความสะอาด จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการขัดสีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขัดเมื่อสารทั้ง 2 ชนิดมีขนาดอนุภาคเท่ากัน พบว่าซิลิกามีประสิทธิภาพในการขัดสีสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต โดยพิจารณาจากค่า RDA ที่มีค่าสูงกว่าประมาณ 2-3 เท่า เนื่องมาจากรูปร่างของอนุภาคซิลิกาที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือมีความไม่เป็นระเบียบซึ่งเป็นธรรมชาติของซิลิกาชนิดออสติฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Penzeri *et al.* (2001) และ Navarre (1975) ที่ได้กล่าวว่าอนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการขัดสีสูง นอกจากนี้ยังมีซิลิกาชนิดที่ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด โดยจะมีค่า RDA ที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งข้อควรพิจารณาในการเลือกสารที่จะใช้สำหรับการขัด นอกจากขนาดอนุภาคที่ควรพิจารณาแล้ว ยังต้องคำนึงถึง ความแข็งแรงรูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคด้วย เพราะปัจจัยดังกล่าวล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพในการขัด

Anonymous (n.d.) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของซิลิกาที่ใช้เป็นสารขัดฟัน ที่มีจำหน่ายในทางการค้า ถึงความสัมพันธ์แบบดั้งเดิมระหว่างประสิทธิภาพในการทำความสะอาดผิวฟันของซิลิกากับการขูดขีดผิวฟันให้สึกกร่อน (abrasion) พบว่า ซิลิกาที่สามารถทำให้เกิดรอยสึกกร่อนบนผิวฟันสูง (high abrasion silica) จะมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงตามไปด้วย โดยหากค่า RDA ของซิลิกาดำกว่า 70 จะให้ผลการทำความสะอาดที่ไม่น่าพึงพอใจ เว้นเสียแต่ว่าจะใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่ผ่านมาเป็นความเชื่อที่ผิดเพราะรอยขูดขีดหรือการสึกกร่อนอาจก่อให้เกิดอันตรายกับผิวฟันได้ ดังนั้นในปัจจุบันผู้ผลิตจึงมีการพัฒนารูปแบบของซิลิกาที่ใช้เป็นสารขัดฟัน ให้มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูง และในขณะเดียวกันก็ไม่ทำอันตรายกับผิวฟันหรือเกิดการสึกกร่อนน้อยที่สุด ซึ่งซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จัดเป็นชนิดออสติฐาน มีความบริสุทธิ์สูง และเมื่อทำการทำปฏิกิริยากับสารอื่นในส่วนประกอบ โดยปริมาณที่ใช้ในสูตรจะขึ้นกับค่า RDA หรือความสามารถในการขัดทำความสะอาดเป็นหลัก ตามข้อกำหนดทั่วไปในทาง

อุตสาหกรรม พบว่า หากค่า RDA อยู่ในช่วง 135-180 จะใช้เพียง 1-4 % เท่านั้น โดยนิยมใช้ใน สูตรยาสีฟันเพื่อฟันขาว (whitening paste) หากมีค่า RDA 105-125 จะใช้ในปริมาณ 5-20 % และ ถ้าหากมีค่าเพียง 50 จะใช้ในยาสีฟันสำหรับเด็กในปริมาณ 10-20 % โดยหากค่า RDA ต่ำ และมี ค่าประมาณ 20 จะถูกนำไปใช้เป็นส่วนเพิ่มความหนืดในยาสีฟันแทน เนื่องจากประสิทธิภาพในการขัดที่ต่ำ

ซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นนอกจากจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงแล้ว ยังมีความสำคัญ ในด้านปัจจัยของขนาดอนุภาคและความเป็นรูพรุน โดยเมื่อใช้ในสูตรต้องไม่เกิดการตกตะกอน และความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการซึมผ่าน และด้านการกระจายตัว (wetting agent) จึงมีผลให้ยาสีฟันมีความหนาแน่นต่ำและมีความคงตัวทั้ง คุณสมบัติในด้านกายภาพและทางเคมี

นอกจากนี้คุณสมบัติในการกระจายของแสง (transmission characteristic) ซึ่งรายงานผลเป็นค่า Refractive index (RI) ก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยซิลิกาที่ใช้เป็นส่วน ขัดฟัน จะมีค่าการกระจายของแสงในช่วง 1.447-1.456 ทำให้สามารถใช้ได้ดีกับสูตรยาสีฟันทั้งใน รูปแบบเจลใส (clear gel pastes) และรูปแบบสีทึบ (opaque toothpastes) และด้วยคุณสมบัติ ของซิลิกาที่สามารถเข้ากันได้ดีกับสารประกอบอื่นในสูตร ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบฟลูออไรด์ สมนไพร์ และสารแต่งกลิ่นรสในยาสีฟัน จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารเหล่านั้น

สำหรับคุณสมบัติของซิลิกาที่ใช้เพื่อเพิ่มความหนืด (rheology control) ในยาสี ฟันที่มีจำหน่ายในทางการค้า จะถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนของสารประกอบซิลิเกต (hydrophilic precipitated silica) โดยจะมีการควบคุมโครงสร้างให้มีความเป็นรูพรุนสูงและ อนุภาคขนาดเล็ก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสูงและสามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อยาสีฟันได้ดี นอกจากนี้ยังมีซิลิกาที่ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของซิลิคอนเตตระคลอไรด์ ( $\text{SiCl}_4$ ) ในเปลวไฟที่ อุณหภูมิสูง จนได้ฟุ้งซิลิกา (fumed silica) ที่จะช่วยให้เกิดพฤติกรรมการไหลแบบทิกโซโทรปิก (Thixotropic) ในยาสีฟัน นั่นคือความหนืดจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และด้วยโครงสร้างของซิลิกาที่เป็นตาข่ายสามมิติที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงช่วยเพิ่มความหนืดให้ยาสีฟันได้ดี โดยเมื่อให้ แรงเฉือนกระทำกับระบบ จะมีผลให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลายไป และทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลคล้ายของเหลว จึงทำให้ง่ายต่อการบรรจุยาสีฟันลงหลอด และเมื่อผ่านไปสักระยะพันธะ

ไฮโดรเจนจะกลับมายึดเหนี่ยวกันเช่นเดิม ทำให้ยาสีฟันกลับคืนสู่สภาพเจลอีกครั้ง (Anonymous, n.d.)

การเพิ่มความข้นหนืดให้กับยาสีฟันด้วยพุ่มซิลิกา จะช่วยเสริมคุณสมบัติในด้านความคงตัวเมื่อบีบออกจากหลอด ทำให้เนื้อยาสีฟันบีบออกจากหลอดได้ง่ายและคงรูปร่างอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังช่วยให้สารขัดทำความสะอาดฟัน (polishing agent) แขนงลอยตัวอยู่ได้ และช่วยป้องกันการแยกชั้นของน้ำมันหอมระเหย (aromatic oil) และน้ำ ที่อยู่ในสูตรได้ดี (Steinman and Samule, n.d.) โดยวิธีการผลิตยาสีฟันที่มีส่วนผสมของพุ่มซิลิกา จะเริ่มจากการละลายตัวเชื่อมประสาน เช่น carboxymethyl cellulose ในน้ำ จนละลายหมด จากนั้นเติมพุ่มซิลิกาและผสมให้เข้ากันโดยใช้แรงเฉือนสูง ถ้าหากมีผงสีก็สามารถเติมลงไปในช่วงตอนนี้ได้ ซึ่งการเติมซิลิกาลงในเฟสน้ำจะช่วยป้องกันการดูดซับน้ำมันไว้ที่ผิว จากนั้นใส่สารเก็บกักความชุ่มชื้น (humectant) และตามด้วยผงขัดฟันส่วนอนุพันธ์ของตัวยาสามารถเติมได้หลังจากทำการผสมเรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้พุ่มซิลิกายังช่วยป้องกันการสึกกร่อนของผนังหลอดยาสีฟันอลูมิเนียม ชนิดที่ไม่ได้เคลือบแลคเกอร์ (non-lacquered aluminum tubes) ในกรณีที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นผงขัดฟัน เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยผลการทดสอบพบว่าสามารถป้องกันการสึกกร่อนได้นานมากกว่า 5 ปี ทั้งในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ  $45^\circ\text{C}$

นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดฟันในรูปแบบผง (dental powder) ซึ่งนิยมผสมพุ่มซิลิกาลงในสูตรเช่นกัน เพื่อช่วยดูดซับน้ำมัน (flavoring oil) และป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking) ทำให้ผงขัดฟันเคลื่อนตัวได้สะดวกในหลอดพลาสติก และป้องกันการเกิดคราบยางเหนียวของน้ำมันบางชนิด (gummy oil) เช่น น้ำมันสะระแหน่ (peppermint oil) ที่มีกจะเกาะตัวกันบริเวณส่วนบนของภาชนะบรรจุ ซึ่งจะส่งผลต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่สั้นลง

สำหรับในประเทศไทย การสังเคราะห์ซิลิกาขึ้นทางการค้านั้นโดยส่วนมากนิยมสังเคราะห์โดยใช้ทรายเป็นวัตถุดิบ ซึ่งซิลิกาที่ผลิตได้ถูกนำมาใช้เป็นทั้งสารขัดฟัน และสารเพิ่มความหนืด โดยมีข้อกำหนดทางการค้า ในด้านค่าคุณภาพแสดงดังตารางที่ 7

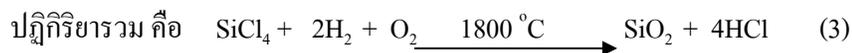
ตารางที่ 7 ข้อกำหนดด้านคุณภาพของชิลิกาที่ใช้เป็นสารขัดฟัน และเพิ่มความหนืดในยาสีฟัน

คุณลักษณะ	ข้อกำหนด	
	สารขัดฟัน	สารเพิ่มความหนืด
ความบริสุทธิ์ของชิลิกา	มากกว่า 96%	มากกว่า 97.0 %
ปริมาณ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ไม่เกิน 0.2 %	ไม่เกิน 0.2 %
ปริมาณโลหะหนัก	ไม่เกิน 20 ppm	ไม่เกิน 30 ppm
ความชื้น	ไม่เกิน 9.0 %	ไม่เกิน 7.0 %
ค่าความเป็นกรดต่าง	6.5-7.5	6.4-7.4
ขนาดอนุภาค	6-11 ไมครอน	5.5-8.5 ไมครอน
จำนวนอนุภาคที่ใหญ่กว่า 325 Mesh	ไม่เกิน 2.0 %	-
ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด	ไม่เกิน 500 cfu/g	ไม่เกิน 500 cfu/g
ยีสต์และรา	ไม่เกิน 500 cfu/g	ไม่เกิน 500 cfu/g
<i>Staphylococcus aureus</i> .	<10 cfu/g	-
Gram Negative Bacilli	<10 cfu/g	-
ลักษณะปรากฏ	ผงละเอียดสีขาว ไม่มีกลิ่น	ผงละเอียดสีขาว ไม่มีกลิ่น

ที่มา: นรินาม (ม.ป.ป.)

### 2.4.3 การใช้ซิลิกาในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสำหรับผิวหน้า (Anonymous, n.d.)

ซิลิกาที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง จะถูกสังเคราะห์ขึ้น ให้มีคุณสมบัติเฉพาะเพื่อให้ถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ทั้งนี้คุณสมบัติของซิลิกาจะขึ้นกับเทคนิคในกระบวนการผลิต ในทางการค้านอกจากจะทำการผลิตซิลิกาโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนแล้ว ยังมีการผลิตโดยใช้เทคนิคการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของไอระเหย ของสารประกอบซิลิคอนเตตระคลอไรด์ ( $\text{SiCl}_4$ ) ในเปลวไฟ (flame) ของออกซิเจนไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิสูงคือ  $1800\text{ }^\circ\text{C}$  ซึ่งผลลัพธ์จะให้ซิลิกา (fumed silica) ที่มีคุณภาพสูง โดยมีขึ้นของการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



โดยจากกระบวนการเผาไหม้ (combustion) ดังกล่าว จะให้ผลลัพธ์เป็นซิลิกาซึ่งเปลี่ยนสภาพจากของเหลวกลายเป็นของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็ก ที่เกิดจากการเผาไหม้จนเกาะติดกันโดยซิลิกาที่ผลิตได้จะมีโครงสร้างตาข่ายสามมิติ (three-dimensional branched) มีความยาวของอนุภาคเฉลี่ย 0.2-0.3 ไมครอน มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว เบาเป็นปุยนุ่ม (puffy powder) มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 44 ไมครอน (ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 Mesh ได้) และมีปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์น้อยกว่า 100 ppm โดยในทางการค้าจะเรียกซิลิกาชนิดนี้ว่าฟุ้งซิลิกา (fumed silica) ซึ่งสามารถเพิ่มคุณสมบัติด้วยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบชนิดอื่น เพื่อเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น โดยสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เพื่อทำหน้าที่ดังนี้

#### ก. ในเครื่องสำอางประเภทของเหลว ฟุ้งซิลิกาจะทำหน้าที่ดังนี้

1) ควบคุมการไหลและความหนืด (rheology control) โดยประสิทธิภาพในการเพิ่มความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวของซิลิกาที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยซิลิกาจะช่วยให้ของเหลวมีคุณสมบัติการไหลแบบ Thixotropic ด้วยโครงสร้างของซิลิกาที่เป็นตาข่ายสามมิติ จึงช่วยเพิ่มความหนืดได้ดีในระบบของเหลว นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เจลและยาสีฟัน

2) สารแขวนลอย (suspension) โดยจะช่วยป้องกันการตกตะกอนของ เม็ดสี (hard pigment) เช่น เม็ดสีแบบเป็นประกายในยาทาเล็บ (pearlescent fingernail polish) อีกทั้งยังช่วยให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาคในผลิตภัณฑ์ประเภทสเปรย์ (aerosol products) เพื่อป้องกันการอุดตันที่บริเวณปลายท่อ

3) ป้องกันการเกิดความชื้น (moisture resistance) ในผลิตภัณฑ์ประเภทครีมและเจล นิยมใช้มากใน ลิปสติก มาสคาร่า ผลิตภัณฑ์ดับแต่งใบหน้า และผลิตภัณฑ์ที่ทาหลังออกแดด (suntan lotion) เป็นต้น

4) ช่วยให้มีเสถียรภาพด้านความหนืด (viscosity stability) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นิยมใช้ใน ลิปสติก มาสคาร่า และผลิตภัณฑ์กันแดด

5) ช่วยในการผสมน้ำและน้ำมันให้เข้ากัน หรือทำหน้าที่เป็นตัวทำอิมัลชัน โดยสามารถใช้ได้กับทั้งอิมัลชันชนิด W/O และ O/W ซึ่งซิลิกาจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานอันดับรอง (secondary binder) อันจะทำหน้าที่ช่วยป้องกันการแยกตัวของน้ำมันและน้ำหอมในสูตรผลิตภัณฑ์ โดยแนะนำให้ใส่ในเฟสของน้ำมัน

ข. ในเครื่องสำอางประเภทผง (powder) พุ่มซิลิกาจะทำหน้าที่ดังนี้

1) ป้องกันไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking) ในผลิตภัณฑ์ประเภทแป้ง เนื่องจากความชื้น

2) ให้ผลิตภัณฑ์แห้งไม่ชื้นง่าย (dry carrier) ด้วยคุณสมบัติที่มีพื้นที่ผิวสูง จึงสามารถดูดซับองค์ประกอบของสารอื่น เช่น น้ำหอม น้ำมันจากพืชธรรมชาติ และน้ำมันสังเคราะห์บางชนิด ไว้บนผิวได้ดี จึงนิยมใช้ในเครื่องสำอางที่เป็นผงแห้ง (dry products) เพื่อช่วยรักษาคุณสมบัติในด้านอัตราการไหล (free-flow properties) ของผงแป้งให้คงที่

โดยทั่วไปพุ่มซิลิกาจะมีอยู่ 2 เกรด คือ เกรดที่มีการนำไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบ อื่นเพื่อเพิ่มคุณภาพ (treated grade) และเกรดที่ไม่ได้ผ่านการทำปฏิกิริยา (untreated grade) โดยเกรดชนิดหลังนี้จะนิยมใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด (thickening agent) สารแขวนลอย และสารที่ช่วยป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking in powder) ซึ่งการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งาน ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะขึ้นกับค่าพื้นที่ผิว (surface area) ของซิลิกาเป็นหลัก โดยทั่วไปต้องมีพื้นที่ผิวมากกว่า  $200 \text{ m}^2/\text{g}$  ( $200\text{-}380 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ซึ่งถ้าหากมีค่าต่ำกว่า  $200 \text{ m}^2/\text{g}$  จะไม่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์

เครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมยิ่งถ้าหากซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวสูง จะต้องผสมที่แรงเฉือนสูงเพื่อให้ละลายได้ง่ายในสารละลาย

ค. ฟวมซิลิกาที่นำมาทำปฏิกิริยากับสารอื่น (treated grad) เพื่อเพิ่มคุณภาพในทางการค้า ที่พบมีดังนี้คือ

1) การนำฟวมซิลิกามาทำปฏิกิริยากับโพลีเมอร์ของซิลิโคน (dimethyl silicone polymer) เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrophobic) ซึ่งจะทำให้ในสูตรที่ใช้ น้ำมันแร่ (mineral oil) มีความข้นหนืดขึ้น ช่วยป้องกันความชื้นและเพิ่มความคงตัวด้านความหนืดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2) ทำปฏิกิริยากับ dimethyldichlorosilane เพื่อใช้เป็นสารก่อเจล สารแขวนลอย และช่วยป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking) ในแป้ง

3) ทำปฏิกิริยากับ hexamethydisilazane ทำให้ได้ซิลิกาที่มีคุณสมบัติไม่ชอบทำปฏิกิริยากับน้ำสูง (extremely hydrophobic) ซึ่งจะใช้เพื่อช่วยป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking) ในแป้ง และป้องกันความชื้นให้กับผลิตภัณฑ์

การประยุกต์ใช้ฟวมซิลิกา เพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางประเภทต่างๆ จะทำหน้าที่แตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การประยุกต์ใช้พอลิซิลิกาในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางประเภทต่างๆ

การประยุกต์ใช้	หน้าที่ของซิลิกา	ปริมาณการใช้ (wt.%)
1. ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่น กายแบบสเปรย์ (Aerosol anti- perspirant)	ช่วยให้ส่วนประกอบแขวนลอยตัว (Suspension) ป้องกันการ เกาะตัวของอนุภาคโดยการเคลือบที่ผิว ช่วยไม่ให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด และรักษาคุณสมบัติด้านการไหล	0.25-1.0
2. ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่น กายแบบแท่ง (Stick anti-perspirant)	ควบคุมการไหล (Rheology) เพิ่มความหนืด (Viscosity) ช่วยป้องกันการแยกชั้นของส่วนผสมที่เป็นของเหลว เช่น ซิลิโคนที่ระเหยได้ (volatile silicone fluids) และช่วยให้ เกิดความคงตัวต่ออุณหภูมิ (Temperature Stability)	1.0-3.0
3. ครีมและเจล (Creams and Gels)	ควบคุมการไหลและเพิ่มความหนืด ช่วยให้มีพฤติกรรม ไหลแบบ Thixotropic และช่วยให้มีเม็ดสี น้ำหอม และ น้ำมัน แขวนลอยตัวในสูตรได้	1.0-3.0 (ครีม) 4.0-8.0 (เจล)
4. ผงทำความสะอาด ฟัน (Dental powder)	ป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Anti-caking) และช่วยดูดซับ (Adsorbent) น้ำมันในสูตร เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บ	0.25-2.0 (Anti-caking) 20.0-40.0 (Adsorbent)
5. น้ำหอม (Fragrances)	กลิ่นหอมสกัดจากธรรมชาติในรูปแบบผง (powdered plant extract) ต้องการสารที่จะทำหน้าที่ดูดซับ (Adsorbent) กลิ่น หอมไว้ที่ผิว ซึ่งซิลิกามีความเหมาะสม เนื่องจากมีพื้นที่ผิว สูง ขนาดเล็ก และมีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้ยังสัมพันธ์ กับการปลดปล่อยกลิ่นหอมออกมาอย่างช้าๆ ด้วย	20.0-40.0
6. ผลิตภัณฑ์จัดแต่ง ทรงผม (Hair Preparations)	ป้องกันการจับตัวเป็นก้อนในผลิตภัณฑ์กัศมีผสมชนิดผง และ เพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์เจลจัดแต่งทรงผม	0.25-2.0 (Anti-caking) 3.0-8.0 (Viscosity)
7. ลิปสติค	เพิ่มความหนืด ช่วยให้เกิดความคงตัวต่ออุณหภูมิสูงทำให้ ลิปสติคไม่อ่อนตัว และเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้ ทาและเกลี่ยบนริมฝีปากได้ง่าย	1.0-3.0

## ตารางที่ 8 (ต่อ)

การประยุกต์ใช้	หน้าที่ของซิลิกา	ปริมาณการใช้ ( wt.% )
8. มาสคาร่าและ เครื่องสำอางแต่งหน้า (Mascara & Makeup)	ช่วยแว่นลอย และเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวต่ออุณหภูมิ ป้องกันความชื้น	0.25-1.0 1.0-3.0 1.0-3.0
9. ยาทาเล็บ (Nail Polish)	ช่วยในการแว่นลอยของเม็ดสี ป้องกันการตกตะกอน และ การเกิดคราบแห้งแข็งที่ปากขวด ซึ่งมีผลต่อการยึดอายุการ เก็บ แต่หากมีการตกตะกอนก็สามารถเขย่าและคนให้เข้ากัน ได้ง่าย ช่วยเพิ่มคุณภาพในด้านการทาโดยป้องกันการเกิดชั้น ของเม็ดสี	0.25-1.0
10. แป้งทาตัว (Powders)	ช่วยอนุภาคขนาดเล็กของซิลิกา จะช่วยลดแรงเสียดทาน ระหว่างเม็ดแป้งขนาดใหญ่ ทำให้ลื่นไหลได้ง่าย และช่วย ป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของแป้ง ส่วนในกรณีที่ใช้กับแป้ง ทาหน้า จะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ลื่นไหล (slipping agent ) ทำให้แป้งเกลี่ยง่าย เมื่อใช้ทาบนผิว	0.25-2.0
11. ผลิตภัณฑ์กันแดด (Sunscreen Products)	เพิ่มความหนืดทั้งประเภทครีมและโลชั่น (gelling agent) ช่วยให้เกลี่ยง่ายและกระจายตัวดีบนผิว เพิ่มความคงตัวต่อ อุณหภูมิ และป้องกันความชื้น (moisture resistance)	1.0-3.0
12. ยาสีฟัน (Toothpaste)	ควบคุมการไหล (Rheology)	2.0-3.5

ที่มา: Anonymous (n.d.)

### 3. กริมขัดผิว

เป็นผลิตภัณฑ์ประเภททำความสะอาดและบำรุงผิว ซึ่งการขัดผิวนั้นเป็นการขจัดเซลล์ผิวแห้งที่ตายแล้ว นั่นคือส่วนชั้นบนสุดของชั้นคอร์เนียม (stratum corneum) ให้หลุดลอกออกไป เพราะเป็นเซลล์ที่ไม่สามารถทำหน้าที่เก็บกักความชุ่มชื้นได้อีกแล้ว การขัดผิวจึงช่วยให้ผิวมีความสดใสร ช่วยลดการอุดตันของรูขุมขน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการหลุดลอกเซลล์ผิวที่เสื่อมสภาพออก โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จะประกอบด้วยส่วนผสมของสารขัดผิวเม็ดเล็กๆ ที่ไม่ทำลายผิว และครีมประเภทนี้มักอยู่ในรูปอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W emulsions) และมีส่วนผสมของอนุภาคเม็ดขัดผิว ซึ่งอาจเป็นเม็ดขัดผิวสังเคราะห์ เช่น โพลีเอทิลีน หรือ สารชนิดอื่นที่เนือยต่อการทำปฏิกิริยา เช่น เมล็ดพืชที่มีเปลือกแข็ง (ground seed-husks) ซึ่งหากต้องการใช้ในปริมาณมากควรใช้อย่างระมัดระวัง เนื่องจากกลไกในการขัดอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวได้ (Williams and Schmitt, 1996)

การขัดผิวหรือการสครับผิว นอกจากจะเป็นการทำทำความสะอาดสิ่งสกปรกส่วนเกินบนผิวแล้ว ยังช่วยกระตุ้นการไหลเวียนของของเหลวใต้ผิว และกระตุ้นให้ผิวผลิตเซลล์ใหม่ออกมาทดแทนได้เร็วยิ่งขึ้น สำหรับผิวมันและผิวผสมควรขัดผิวอาทิตย์ละหนึ่งครั้ง ส่วนผิวแห้งสองอาทิตย์ต่อครั้ง โดยผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยเม็ดขัดผิวสังเคราะห์จะออกแบบเป็นรูปทรงกลมและอ่อนโยนกับผิวมากกว่าเม็ดขัดผิวจากเมล็ดผลไม้ เช่น เมล็ดวอลนัท หรือแอปเปิ้ลคอต ซึ่งอาจมีเหลี่ยม ทำให้เกิดการระคายเคืองได้ การขัดผิวควรเริ่มต้นจากการนวดเนื้อสครับเป็นวงกลมให้ทั่วใบหน้าที่ยืดหมาดๆ นาน 1-2 นาที และห้ามขัดแรงเกินไป เพราะชั้นปกป้องผิวอาจหลุดออกไปด้วย และควรหลีกเลี่ยงการขัดผิวหน้าในบริเวณที่มีเส้นเลือดฝอย และไม่ควรที่จะทำในขณะที่ใบหน้าที่มีการอักเสบหรือสิวเกิดขึ้น เพราะอาจทำให้มีการระคายเคือง และการอักเสบกำเริบมากขึ้นได้ หลังจากนั้นล้างออกด้วยน้ำสะอาด และควรทามอยส์เจอร์ไรเซอร์เพื่อคืนความชุ่มชื้นให้กับผิว สำหรับคนที่มีประวัติผิวแพ้ง่าย มีสิวบ่อย ผิวบอบบางมาก ควรหลีกเลี่ยงการขัดหน้า

อิมัลชัน (Emulsion) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยของเหลวอย่างน้อย 2 ชนิดซึ่งไม่เข้ากันหรือไม่ละลายในกันและกัน เช่น น้ำและน้ำมัน ถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้โดยอาศัยตัวทำอิมัลชัน (emulsifier) อิมัลชันที่ได้เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็น 2 วัฏภาค คือ หยดเล็กๆของของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งเป็นวัฏภาคภายใน (internal or dispersed phase) กระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าวัฏ

ภาคภายนอก (external or continuous phase) โดยหยดของวัฏภาคภายใน มีขนาดตั้งแต่ 0.05 ถึง 25 ไมครอน ถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะทำให้มองเห็นอิมัลชันมีลักษณะขุ่นขาวทึบ (พิมพร, 2544)

ครีมขัดผิวจัดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W emulsion) ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน และวัฏภาคภายนอกเป็นน้ำ มีความเหนอะหนะน้อย ทาแล้วกระจายตัวดี ล้างน้ำออกง่าย เป็นที่นิยมมากในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น ครีมและโลชั่นทาผิว ซึ่งลักษณะทั่วไปของอิมัลชันชนิด O/W ที่ควรทราบ มีดังนี้ (พิมพร, 2544)

- 1) เตรียมได้ตั้งแต่เหลว (โลชั่น) จนถึงหนืด (ครีม)
- 2) นิยมใช้มากกว่าชนิด W/O เพราะไม่เหนอะหนะ ไม่เป็นมัน ล้างน้ำออกง่าย และถูกใจจางด้วยน้ำ
- 3) อาจมีน้ำในสูตรได้มากถึง 90 %
- 4) มีความคงตัวต่ออุณหภูมิดีกว่าชนิด W/O
- 5) ทาแล้วเกิดฟิล์มบางบนผิว แต่กระจายง่าย ใช้กับผิวหนังบริเวณกว้างได้
- 6) ทาแล้วรู้สึกเย็น เนื่องจากการระเหยของน้ำ
- 7) ถ้าเก็บรักษาไม่ดี น้ำจะระเหยไป ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งง่าย ไม่นำใช้
- 8) เชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนได้ง่ายต้องใช้สารกันบูดที่เหมาะสมในปริมาณที่เพียงพอ

### 3.1 ส่วนประกอบของครีมขัดผิว

ผลิตภัณฑ์อิมัลชันในรูปแบบครีมขัดผิว มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

#### 3.1.1 วัฏภาคน้ำ (water phase)

ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สามารถละลายได้ในวัฏภาคน้ำ ยกตัวอย่างเช่น สารฮิวแมกแตนต์ ที่สามารถดูดเก็บความชื้นจากบรรยากาศมาเก็บไว้ในตัวได้ดี ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากเนื้อครีม ทำให้ครีมไม่แห้งง่ายเมื่อเก็บไว้นาน และรักษาความคงตัวให้กับผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น กลีเซอริน นอกจากนี้ยังมีสารกันเสีย ซึ่งต้องมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ ออกฤทธิ์ได้กว้างกับจุลินทรีย์ทุกชนิด ไม่เป็นพิษ ไม่ระคายเคืองต่อผิวหนัง และไม่ทำ

ให้เกิดอาการแพ้หรือระคายเคือง ตัวอย่างเช่น สารกลุ่มพาราเบน (Paraben) และ ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) โดยทั่วไปแล้ว สารที่ใช้ในวิทยาศาสตร์ของน้ำส่วนใหญ่จะเป็นสารเพิ่มความหนืด ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มความหนืดแล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชัน และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการไหล โดยสารเพิ่มความหนืดที่ใช้เป็นส่วนประกอบในสูตรมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1.1 คาร์โบพอลโพลีเมอร์ (Carbopol polymer) เป็นสารก่อเจล (gelling agent) ที่เป็นโพลีเมอร์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ยิ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากจะเพิ่มความหนืดได้มีลักษณะเป็นผงฟูสีขาว มีกลิ่นค่อนข้างเปรี้ยว และดูดความชื้นได้ง่าย ในโครงสร้างจะมี acrylic acid เป็นหน่วยเล็กที่เชื่อมกันแบบไขว้ (cross-linked) เมื่อกระจายตัวในน้ำจะแสดงฤทธิ์เป็นกรด ทั้งนี้เพราะโมเลกุลมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) อยู่มาก และละลายในน้ำได้จำกัด ทำให้มีความหนืดน้อย ดังนั้นการนำมาใช้ต้องนำมาละลายน้ำและปรับให้เป็นกลางด้วยด่าง เช่น Triethanolamine (TEA) ซึ่งในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดกรดเกลือ ซึ่งมีผลต่อระบบไอออนของโพลีเมอร์ ทำให้เกิดการดูดน้ำ (swelling) เข้าไปในโครงสร้างอย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นเจล ซึ่งการเกิดเจลจะขึ้นกับขั้นตอนการทำให้เป็นกลางด้วยด่างเป็นสำคัญ ความหนืดจะคงตัวในช่วงค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 4-10 เท่านั้น แต่จะทำให้เกิดความหนืดได้สูงสุดในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง 6-8 ในการใช้เพื่อเป็นสารก่อเจล จะใช้ประมาณ 0.3-1.0 % ข้อดีของการใช้คาร์โบพอล คือ สามารถละลายน้ำได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้ประหยัดเวลาในการผลิต เจลที่เตรียมได้จะใส ไม่เป็นอันตราย ไม่ก่ออาการแพ้ มีแนวโน้มที่จะติดเชื้อมีน้อย สามารถเข้ากันได้ดีกับสารประกอบชนิดอื่นในสูตร เมื่อทาบนผิวหนังจะไม่เหนียวเหนอะหนะ ให้แผ่นฟิล์มที่แข็งแรงและไม่แตกเป็นเกล็ด (Tesluk and Wong, 2001) โดยคาร์โบพอลจะทำให้เกิดพฤติกรรมกรไหลแบบพลาสติก (Plastic flow)

3.1.1.2 เซลลูโลสติกติกเคนเนอร์ (Cellulosic thickeners) ทำหน้าที่เป็นทั้งสารเพิ่มความหนืดและความคงตัวของอิมัลชัน โดยมีผลให้อิมัลชันมีพฤติกรรมกรไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) หรือ Shear thinning นอกจากนี้ยังมีความสามารถเข้ากันได้กับสารประกอบชนิดที่มีประจุ มีความคงตัวในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่กว้าง ที่จำหน่ายในทางการค้าจะมีหลายน้ำหนักโมเลกุล โดยสามารถเพิ่มความหนืดได้ตั้งแต่ 50 cP จนถึงมากกว่า 10,000 cP เมื่อถูกใช้ในรูปสารละลาย 1 % (พรรณวิภา และ แก้วนภา, 2544)

3.1.1.3 เฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) เป็นกัมชนิดหนึ่งที่เกิดได้จากกระบวนการไบโอโพลีเมอร์ไรเซชัน (biopolymerisation) จากเชื้อแบคทีเรีย ชื่อ *Xanthomonas campestris* โดยที่มีจำหน่ายในทางการค้าจะมีลักษณะเป็นผง เมื่อนำไปละลายใน

น้ำเย็นจะได้ของเหลวที่มีความหนืดสูง และมีความคงตัว การเตรียมทำได้โดยเติมลงในน้ำและคนแรงๆ และควรเติมเป็นอันดับแรก กัมชนิดนี้สามารถทนต่อการทำให้เสื่อมสภาพด้วยเอนไซม์ (enzymatic degradation) และมีความคงตัวต่อความเป็นกรด่างในช่วงกว้าง ช่วยควบคุมการไหลและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic หรือ Shear thinning (พรรณวิภา และ แก้วภา, 2544)

### 3.1.2 วัฏภาคน้ำมัน (oil phase)

องค์ประกอบที่เป็นวัฏภาคน้ำมันในผลิตภัณฑ์รูปแบบอิมัลชันอาจเป็นน้ำมัน (oils) ไขมัน (fats) ไขแข็ง (waxes) ซึ่งอาจได้จากธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ โดยมีคุณสมบัติด้านคุณภาพต่อผิวหนังที่สำคัญ ได้แก่ เป็นสารอิมอลเลียนซึ่งเป็นสารให้ความชุ่มชื้นแก่ผิว (moisturizer) ที่ทำหน้าที่หล่อลื่นผิวให้นุ่ม และสิ้นต่อการสัมผัสช่วยรักษาความชุ่มชื้น และเพิ่มความยืดหยุ่นให้ผิว โดยการทำให้เกิดชั้นปิดกั้น (occlusive layer) บาง ๆ บนผิวเป็นการป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากผิว ส่วนคุณภาพเมื่อใช้ทาบนผิว เช่น การหล่อลื่น ความอ่อนนุ่ม ความเหนอะหนะ และการกระจายบนผิว ส่วนคุณภาพต่อรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เป็นตัวพา (carrier) ที่ดีของน้ำหอม และสี ช่วยให้มีสีและกลิ่นกระจายตัวดีทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอและน่าใช้ รวมทั้งสามารถเป็นสารเพิ่มเนื้อครีม (bodying or stiffening agents) หรือสารควบคุมความหนืด (consistency regulating agent) หรือเป็นตัวช่วยทำอิมัลชัน (auxiliary or co-emulsifier) เป็นต้น ซึ่งสารที่ใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ ได้แก่

3.1.2.1 ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) สารกลุ่มนี้ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีหิน และมีความคงตัวดีได้แก่ น้ำมันแร่ (mineral oil) และพาราฟิน (paraffin wax) มีคุณสมบัติคือทำให้เกิดฟิล์มกั้นน้ำบนผิวโดยไม่ซึมเข้าสู่ผิวหนัง จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ปกป้องผิว (Protective preparation) และผลิตภัณฑ์ป้องกันแสงแดด ซึ่งไม่ต้องการให้มีการดูดซึมของการออกฤทธิ์ แต่ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เพราะไม่สามารถทดแทนไขผิวหนังและยังละลายส่วนประกอบของไขมันบนผิวหนังด้วย

3.1.2.2 กรดไขมัน (Fatty acids) นิยมใช้กรดไขมันที่มี C<sub>12-18</sub> ในครีมสำหรับผิวหนังเพื่อให้เกิดฟิล์มบางๆคลุมผิว พบว่า กรดสเตียริก (stearic acid) นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถอุ้มน้ำไว้ใน โมเลกุลทำให้เกิดความชุ่มชื้นแก่ผิวหนังได้มาก

3.1.2.3 แอลกอฮอล์ไขมัน (Fatty alcohols) สารเหล่านี้ทำให้เกิดฟิล์มที่คลุมผิว

แต่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ผิวทำให้ผิวนุ่มนวลขึ้นได้ และใช้เพื่อเพิ่มความหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ นิยมใช้ สเตียร์ลแอลกอฮอล์ (Stearyl alcohol) ซีทิลแอลกอฮอล์ (Cetyl alcohol) หรือใช้ทั้ง 2 ตัวร่วมกัน

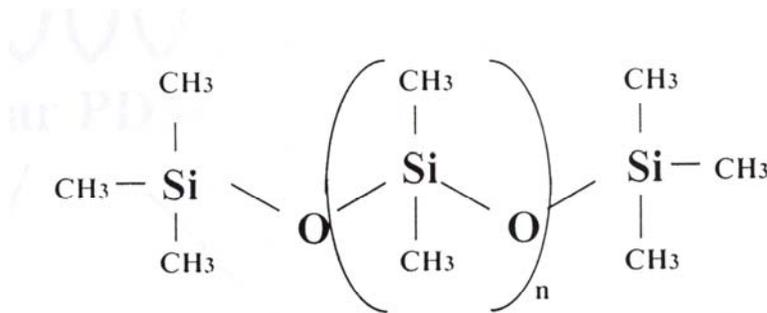
3.1.2.4 เอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid esters) ได้แก่ โพลีออลเอสเทอร์ (Polyol esters) เช่น กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (Glyceryl monostearate) เป็นสารกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่นิยมใช้ในอิมัลชัน โดยใช้ความเข้มข้น 1-10 % สำหรับครีม

3.1.2.5 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ไขมันที่ได้จากพืชและสัตว์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันสายตรงน้ำหนักโมเลกุลสูงทั้งชนิดอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว และยังมีกลุ่มเอสเทอร์ซึ่งชอบน้ำบ้าง ดังนั้นไขมันเหล่านี้จึงไม่ละลายน้ำแต่ไม่ติดกับน้ำ (Non polar) เท่ากับน้ำมันแร่ โดยพบว่ามีอำนาจการดูดซึมสู่ผิวหนังกำพร้าชั้นบนได้ดี ใช้เป็นสารอิมอลเลียนด์และอาหารแก่ผิวหนัง (skin nourishing) ข้อดีของไขมันจากพืชและสัตว์คือ อุดมด้วยวิตามิน สเตอรอยด์ และสารอาหารอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ไขมันอโวคาโด ไขมันรำข้าว ไขมันมะกอก การใช้น้ำมันกลุ่มนี้ควรระวังไม่ให้ใช้ความร้อนมากเกินไปเพราะจะสลายตัวได้ และควรใส่สารต้านออกซิเดชันลงไปเพื่อป้องกันการหืน เนื่องจากมีส่วนประกอบของไขมันไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย

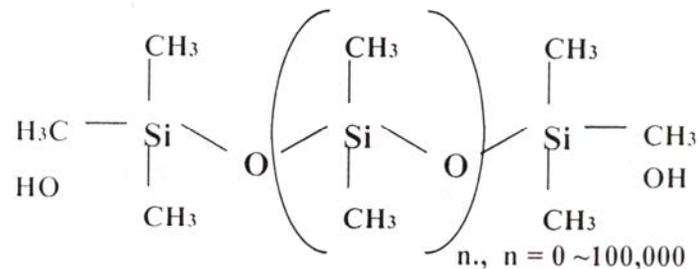
3.1.2.6 ลาโนลินและอนุพันธ์ลาโนลิน (Lanolin and derivatives) เป็นสารที่สกัดได้จากต่อมไขมันของแกะ ไม่ละลายน้ำแต่อุ้มน้ำไว้ในตัวเองได้ เช่น liquid lanolins, lanolin wax, lanolin alcohols และ modified lanolin เป็นต้น ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อทำให้น้ำหนักกำพร้าที่แห้งกลับคืนสภาพชุ่มชื้นและยืดหยุ่นได้ ลาโนลินมีคุณสมบัติเป็นสารอิมอลเลียนด์ที่มีประสิทธิภาพดีมาก มีองค์ประกอบใกล้เคียงไขมันมากที่สุด แต่มีข้อเสียคือ กลิ่นแรง ทิ้งไว้นานสีจะเข้มขึ้น ผสมเข้ากับสารอื่นๆยากและเหนอะหนะผิว

3.1.2.7 ซิลิโคน (Silicones) เป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งสูตรโครงสร้างไม่ใช่คาร์บอน แต่เป็นสายของอะตอมซิลิคอนต่อกับอะตอมของออกซิเจน (-O-Si-O-Si) ซึ่งที่อะตอมของซิลิคอนจะมีกลุ่มเมทิลหรือเมทิลฟีนิลติดต่อกัน อาจเรียก Di-methylpolysiloxanes ลักษณะเป็นของเหลวใส มีความหนืดต่างๆกัน ได้ตั้งแต่เหลวจนถึงกึ่งแข็ง สารกลุ่มนี้อาจอยู่ในรูป cyclic molecules เช่น cyclomethicone และ phenyldimethicone คุณสมบัติที่สำคัญของซิลิโคน คือ มีความคงตัวทางเคมีสูง ทนความร้อนสูง กันน้ำได้ดีจึงไม่ถูกชะล้างออกด้วยน้ำ (Wash-off resistant) จึงทำหน้าที่เคลือบเป็นแผ่นฟิล์มบางบนผิว เข้ากันได้ดีกับอิมัลชัน มีแรงดึงผิวต่ำ เกาะติดผิวหนังโดยไม่ทำให้รู้สึกเหนอะหนะ ความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อตา (พรรณวิภา และ แก้วนภา, 2544) โดยซิลิโคนที่ใช้ในสูตรครีมขัดผิวนี้เป็นชนิดที่มีกัมเป็นส่วนประกอบ (silicone gum blends) จะมีที่มาจากกา

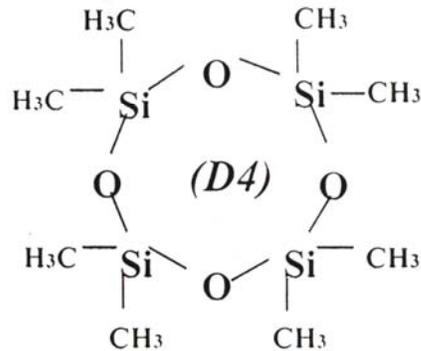
ซิลิโคนกัม ซึ่งเป็นของแข็งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มาละลายในตัวทำละลายเพื่อให้ได้เป็นน้ำมันเหลวที่มีความหนืดต่าง ๆ กัน ซึ่งขึ้นกับปริมาณ (%) ของซิลิโคนกัมที่ใช้ โดยชนิดที่ใช้ในสูตร เป็นซิลิโคนมีส่วนประกอบ คือ Dimethiconol ซึ่งเป็นซิลิโคนกัม (Dimethicone) ที่มีโครงสร้างเป็นโพลีเมอร์สายตรง (chain polymer) และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่ง Dimethiconol จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด จึงต้องใช้ตัวทำละลายเพื่อให้ความข้นหนืดลดลง โดยใช้ Cyclomethicone ที่มีโครงสร้างเป็นโพลีเมอร์วงแหวน (ring polymer) ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ทำให้ได้ซิลิโคนที่เป็นน้ำมันเหลว และมีความหนืด 6,300 cP โดยคุณสมบัติของซิลิโคนชนิดนี้ คือ มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ลุกเป็นไฟของน้ำมัน (Flash point , °C) คือ 52 °C ค่าดัชนีการหักเหแสง (Refractive index) คือ 1.397 และมีค่าความหนาแน่น (specific gravity) เท่ากับ 0.96 (Anonymous, n.d.) ซึ่งภาพโครงสร้างของ Dimethicone, Dimethiconol และ Cyclomethicone แสดงดังภาพที่ 3 และ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 โครงสร้างของ Polydimethylsiloxane (PDMS) หรือ Dimethicone (CTFA name)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของ Dimethiconol



ภาพที่ 5 โครงสร้างของ Cyclomethicone

ที่มา: Anonymous (n.d.)

โดยคุณสมบัติที่สำคัญของซิลิโคนชนิดนี้เมื่อผสมลงในผลิตภัณฑ์ มีดังนี้คือ

- 1) เพิ่มความสามารถในด้านการกระจายตัว เมื่อทาผลิตภัณฑ์บนผิวหนังให้เกลี่ยและกระจายตัวได้ง่าย และทำให้เกิดชั้นบางๆปกคลุมผิว
- 2) เพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิว เมื่อทำการวัดค่าด้วยเครื่องมือตามหลักการของการวัดประจุไฟฟ้าที่ผิวหนัง (conductance or capacitance) ส่งผลต่อคุณภาพทางด้านคลินิก คือช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของผิวหนังกำพร้าชั้นบนสุด (stratum corneum) ส่วนคุณภาพที่สัมผัสได้ คือปรับปรุงลักษณะปรากฏของผิว ให้ผิวมีความอ่อนนุ่ม (soft) เรียบเนียน (smooth) ไม่แตกแห้งเป็นเกล็ด (nonflaking)
- 3) ไม่เกิดชั้นที่ปิดกั้นผิว (non-occlusive) ดังนั้นเมื่อทาผลิตภัณฑ์บนผิว จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยของน้ำออกจากผิว
- 4) ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้และระคายเคือง (non-irritating)
- 5) ช่วยในการดูดซึมเข้าสู่ผิวอย่างรวดเร็ว ของสารประกอบอื่น เมื่อทาและถูบนผิว
- 6) ช่วยลดลักษณะปรากฏที่เป็นมันเยิ้ม (reduced greasiness) ของสารประกอบอื่นในสูตร และเมื่อทาบนผิวจะช่วยเป็นตัวหล่อลื่นให้เกลี่ยและกระจายตัวได้ง่าย
- 7) ให้ความเรียบเนียน และความชุ่มชื้น (smooth feel/emolliency) กับผิว
- 8) ไม่ถูกชะล้างออกด้วยน้ำ (wash-off resistance) เป็นความสามารถในการต่อต้านการถูชำระล้างด้วยน้ำของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะนิยมใช้มากในผลิตภัณฑ์กันแดดชนิดกันน้ำ

ด้วยการรักษาประสิทธิภาพในการป้องกันแสงแดด ให้ค่า SPF ของผลิตภัณฑ์ ไม่เปลี่ยนแปลง (Glombitza and Goymann, 2000)

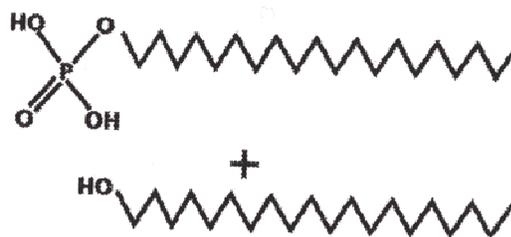
ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำซิลิโคนชนิดนี้ไปใช้ในผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์โกนหนวด เจลและครีมอาบน้ำ โลชั่นและครีม ผลิตภัณฑ์กันแดด เครื่องสำอางแต่งหน้า ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นกาย แชมพูและครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์จัดแต่งทรงผม เป็นต้น (อรัญญา และ จีระเดช, 2546)

3.1.2.8 ตัวทำอิมัลชัน (Emulsifier) ตัวทำอิมัลชันเป็นตัวสำคัญในการผสมให้วัฏภาคน้ำและน้ำมันเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยทั่วไปตัวทำอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ จะต้องทำให้เกิดฟิล์มที่หุ้มรอบหยดน้ำมันที่มีประจุไฟฟ้า และต้องมีปริมาณมากพอ เพื่อให้เกิดการผลึกกันของหยดน้ำมันที่ถูกหุ้มไว้ ส่วนที่ไม่มีประจุไฟฟ้าของตัวทำอิมัลชันจะต้องจับกันด้วยแรงที่มากพอ เพื่อให้ฟิล์มเกิดความแข็งแรง แรงที่จับกันนี้จะมากน้อย ขึ้นกับโครงสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ หรือส่วนที่ละลายในน้ำมัน ซึ่งเป็นแกนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมัน ถ้าเป็นไขมันอิ่มตัวแกนตรง (saturated straight chain) จะเกิดฟิล์มที่แข็งแรงได้อิมัลชันมีความหนืดสูงและคงตัวดี ถ้าเป็นไขมันไม่อิ่มตัวแบบทรานส์ (trans-unsaturated chain) จะได้อิมัลชันที่คงตัวแต่ความหนืดลดลง แต่ถ้าเป็นไขมันไม่อิ่มตัวแบบทรานส์ (trans-unsaturated chain) จะได้อิมัลชันที่คงตัวแต่ความหนืดลดลง แต่ถ้าเป็นไขมันไม่อิ่มตัวแบบซิส (cis-unsaturated chain) จะได้อิมัลชันที่ไม่คงสภาพ เพราะแรงจับกันของโมเลกุลไม่แข็งแรงพอและการเรียงตัวไม่ใกล้ชิดหนาแน่น นอกจากนี้ตัวทำอิมัลชันที่ดีควรละลายได้ทั้งในน้ำและน้ำมันอย่างสมดุลกัน ถ้าละลายได้ในน้ำมันมากเกินไปจะทำให้เกิดไมเซลล์ (micelle) ในน้ำ ดังนั้นจะไม่มีกั้นชน (protective film) หุ้มรอบหยดน้ำมัน ซึ่งจะทำให้หยดน้ำมันรวมตัวกันและอิมัลชันแยกตัวได้ (พิมพ์, 2544)

ตัวทำอิมัลชันที่ใช้ในสูตรเป็นชนิดประจุลบ (anionic emulsifier) ที่มีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้ในอิมัลชันชนิด O/W เป็นส่วนประกอบระหว่าง alkyl phosphates และ fatty alcohols ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเกลือของกรดฟอสฟอรัส (phosphatization process) โดยไม่ทำให้เกิดอนุพันธ์ของธาตอลูโห (เช่น ฟลูออรีน คลอรีน และ ไอโอดีน) เข้าไปในสารประกอบและการสังเคราะห์จะไม่ใช้เอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) และสารละลายอินทรีย์ (organic solvents) ชนิดอื่นๆ นอกจากคุณสมบัติที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำอิมัลชันแล้ว สารชนิดนี้ยังช่วยเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ช่วยให้อิมัลชันเคลือบง่าย ไม่เหนอะหนะ มีผิวสัมผัสที่อ่อนนุ่ม ค่อยๆปกคลุมบนผิวหนัง และติดทนบนผิวได้นาน นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติที่กันน้ำ จึงนิยมใช้

ในผลิตภัณฑ์กันแดดชนิดติดทนนาน (long-lasting sunscreen) เครื่องสำอางแต่งหน้า และในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว ด้วยคุณสมบัติที่สามารถเข้ากันได้ดีกับสารประกอบอื่นในเฟสน้ำมันและเม็ในสูตรที่มีไอออนของเกลือ จึงสามารถใช้ในสูตรที่มีปริมาณของเฟสน้ำมันมากกว่า 50% โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือมีผลกระทบต่อความคงตัวของอิมัลชัน สามารถใช้ในปริมาณน้อยเพียง 1-3% ในสูตร และเนื่องจากเป็นตัวทำอิมัลชันชนิดประจุลบ จึงมีค่าความเป็นกรดสูง (Acid value = 80-100) และมีค่าความเป็นกรดต่ำ (ที่สารละลาย 5 %) เท่ากับ 2-4 ดังนั้นเมื่อเติมในสูตรจะมีผลให้ค่าความเป็นกรดต่ำของสูตรลดลง และความหนืดเพิ่มขึ้น

การใช้ alkyl phosphates and fatty alcohols เพื่อเป็นตัวทำอิมัลชันในสูตร ทำได้โดยเติมลงในเฟสของน้ำมัน และหลอมที่อุณหภูมิ 80 °C เนื่องจากจุดหลอมเหลวของสารชนิดนี้จะอยู่ที่ 70-75 °C จากนั้นเทเฟสของน้ำที่ผ่านการปรับให้เป็นกลางแล้ว ลงในเฟสของน้ำมันที่ผ่านการหลอมเหลว ซึ่งอุณหภูมิของการทำอิมัลชันที่ดีควรใช้ที่ประมาณ 80 °C การใช้แรงกวนผสมที่ความเร็วรอบสูงๆ (high shear rate) จะทำให้ได้อิมัลชันที่มีความคงตัวมากขึ้น และให้ลักษณะปรากฏที่สวยงามน่าใช้ การเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันที่ใช้ alkyl phosphates and fatty alcohols สามารถใช้ร่วมกับคาร์โบเมอร์ ที่ 0.2 % ซึ่งผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลางแล้ว และใช้ร่วมกับแซนแทนกัม ที่ 0.2 % ซึ่งเป็นสารก่อเจลในเฟสของน้ำ เพื่อให้ได้ลักษณะของอิมัลชันที่มีความคงตัวดีขึ้น (Anonymous, n.d.)



ภาพที่ 6 ภาพโครงสร้างของ alkyl phosphates and fatty alcohols

ที่มา: Anonymous (n.d.)

3.1.2.9 สารกันเสีย (Preservatives) เนื่องจากผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางมีสารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ จึงต้องมีการใช้สารกันเสียเพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการผลิตและเมื่อผลิตภัณฑ์ถึงมือผู้บริโภคแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้คือประสิทธิภาพ ในการยับยั้งเชื้อ สามารถเข้ากันได้กับส่วนผสมอื่นๆ ในสูตร ความปลอดภัยในการใช้ และราคา ตัวอย่างสารกันเสีย เช่น 5-Bromo-5-nitro-1,3-dioxane, diazolydinyl urea & idodopropynyl butylcarbamate in propylene glycol, Methylparaben และ Propylparaben เป็นต้น

3.1.2.10 สารผสมอื่นๆ เช่น สารแต่งกลิ่น (perfumes) และสารแต่งสี (coloring agent) หรือสารที่ช่วยเพิ่มคุณลักษณะเฉพาะให้ผลิตภัณฑ์ เช่น สารกันแดด สารสกัดจากธรรมชาติ หรือ วิตามินต่าง ๆ เป็นต้น

### 3.1.3 สารขัดผิว (Exfoliating/Scrubbing agent)

สารขัดผิว คือวัตถุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กละเอียด ซึ่งอาจได้มาจากธรรมชาติ เช่น เมล็ดพืชที่นำมาบดให้ละเอียด (fine powder of seeds or shells) หรืออาจได้มาจากการสังเคราะห์ขึ้นเองทางการค้า เช่น สไตรีน (styrene) และ โพลีเอทิลีน (polyethylene) ซึ่งสารขัดผิวนี้นิจะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว และต้องมีการเติมสารที่ช่วยให้เกิดความคงตัว เช่น แชนแทนกัม หรือ คาราจีแนน เพื่อให้ช่วยเม็ดขัดผิวแขวนลอยอยู่ได้ (Barel *et al.*, 2001)

ประสิทธิภาพของสารขัดผิวในการทำทำความสะอาดที่สำคัญตามความต้องการในทางการค้า คือ มีความระคายเคืองต่ำ มีความบริสุทธิ์สูง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นในสูตร นอกจากนี้ในทางการค้ามีการเพิ่มคุณสมบัติและประสิทธิภาพในด้านการทำความสะอาด และคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส โดยการสังเคราะห์อนุภาคชนิดพิเศษ เพื่อให้สามารถใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ได้ค่อนข้างหลากหลาย เช่น เม็ดขัดผิวชนิดแตกตัวได้และภายในบรรจุน้ำมันบำรุงผิว หรือที่มีส่วนผสมของเอนไซม์เพื่อช่วยในการทำทำความสะอาดผิว เป็นต้น ซึ่งหน้าที่หลักที่สำคัญของสารขัดผิวที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ คือช่วยขจัดเซลล์ผิวที่ตายแล้วเพื่อช่วยให้ผิวเนียนเรียบสดใส (rejuvenated appearance) กระตุ้นการไหลเวียนของโลหิต อันเนื่องมาจากการขัดและนวดผิว ช่วยให้ผิวเนียนนุ่ม ช่วยขจัดสิ่งสกปรกออกจากรูขุมขน (Baines and Stanier, 2001)

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ขัดผิวที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มีการนำสารขัดผิวหลากหลาย

ชนิดมาใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณภาพทางประสาทสัมผัส คุณภาพทางกายภาพ เคมี และข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9 ดังนี้

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของสารขัดผิวชนิดต่างๆที่นิยมใช้ในท้องตลาด

แหล่งที่มา	ตัวอย่างสารขัดผิว	คุณสมบัติ
1. จากธรรมชาติ	เมล็ดแอฟริคอต (apricot seeds) และวอลนัต (walnut seeds)	เป็นเมล็ดพืชจากธรรมชาติ ที่นำมาบดให้ละเอียด มีลักษณะแข็ง หยาบ และสาก อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ง่าย ไม่ค่อยบริสุทธิ์ ลักษณะปรากฏไม่สวยงาม
	โจโจบา เอสเทอร์ (jojoba esters)	เป็นชนิดที่แตกตัวไม่ได้ มีราคาแพง ไม่มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง
2. สารอินทรีย์ ที่ได้จากการสังเคราะห์	เม็ดโพลีเอทิลีน (polyethylene beads)	ความหนาแน่นต่ำ มีโอกาสที่เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญได้ มีความคงตัวในช่วง pH ที่แคบ คือในช่วง 6-9 และ ไม่มีความคงตัวในด้านสี โดยถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด จะทำให้สีของเม็ดขัดผิวเปลี่ยน
	โพลีเมทาคริลเลท (Cross-linked polymethacrylate)	เป็นชนิดที่แตกตัวไม่ได้ มีราคาแพง มีความหนาแน่นสูง จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่ำ
	แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	ค่อนข้างแข็ง หยาบ และสาก ก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ง่าย

ที่มา: Baines and Stanier (2001)

นอกจากนี้ยังมีสารขัดผิวชนิดอื่นๆ ทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว แสดงดังตารางที่ 10 ดังนี้

ตารางที่ 10 สารขัดผิวที่มีการใช้ในผลิตภัณฑ์ขัดผิวทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์

สารขัดผิว	จากธรรมชาติ	จากการสังเคราะห์
Adzuki beans	√	
Almond ( <i>Prunus amygdalus</i> ) meal, shell granules	√	
Aluminium silicate		√
Apricot ( <i>Prunus armeniaca</i> ) kernal shell powder	√	
Apricot / peach seed powder	√	
Corn cob	√	
Hydrated silica	√	
Jojoba beads	√	
Jojoba ( <i>Buxus chinensis</i> ) seed powder	√	
Luffa cylindrical	√	
Maize scape powder	√	
Olive stone granules	√	
Oyster shell powder	√	
Peach ( <i>Prunus persica</i> ) pit powder	√	
Peach ( <i>Prunus persica</i> ) stone granules	√	
Polyethylene beads		√
Polyethylene HEC granules		√
Polyethylene oxidize, Polyethylene sphere		√
Polystyrene beads		√
Pumice	√	
Rice ( <i>Oryza sativa</i> ) bran	√	
Silica and S. colloidal		√
Sodium chloride		√
Walnut ( <i>Juglans regia</i> ) shell powder	√	

ที่มา: Barel *et al.* (2001) and Susan (1996)

ในทางอุตสาหกรรมเครื่องสำอางนิยมใช้ซิลิกาเป็นสารขัดผิวในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสาเหตุที่ซิลิกามีความเหมาะสม ที่จะใช้เป็นสารขัดผิว เนื่องมาจากข้อได้เปรียบดังต่อไปนี้

- 1) ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นในส่วนประกอบ (inert)
- 2) สามารถเข้ากันได้ดีกับส่วนผสมอื่นที่มีในสูตร
- 3) มีความคงตัวดี เมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูง และในช่วงความเป็นกรด่างที่

กว้าง (pH 1-9)

- 4) สามารถควบคุมขนาดอนุภาคด้วยการสังเคราะห์ เพื่อไม่ให้เกิด

ความรู้สึกรคายและสากเมื่อใช้บนผิว

- 5) สามารถใช้เทคนิคการผลิตเพื่อให้เป็นเม็ดขัดผิวที่แตกตัวได้
- 6) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำมาสะอาด
- 7) มีความเป็นรูพรุนในโครงสร้าง ทำให้สามารถดูดซับสิ่งสกปรกได้ดี

ซิลิกาที่ใช้เป็นสารขัดผิวในทางการค้า จะมีขนาดอยู่ในช่วง 100-700 ไมครอน แบ่งได้เป็นชนิดที่แตกตัวได้ ซึ่งเป็นเม็ดขัดผิวที่ภายในบรรจุซิลิกาขนาดที่เล็กกว่า 45 ไมครอน และชนิดที่สองคือ ชนิดที่แตกตัวไม่ได้ ที่จะมีขนาดใหญ่กว่า คืออยู่ในช่วง 100-700 ไมครอน โดยทั้งสองชนิดมีทั้งแบบที่เคลือบและไม่เคลือบสีบนผิว จึงสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์และความสวยงามของผลิตภัณฑ์ โดยประโยชน์ในการใช้งานจะขึ้นกับขนาดเป็นสำคัญ ซึ่งหากมีขนาด 100 ไมครอน จะใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวชนิดอ่อนโยน (mild cleansers) และผลิตภัณฑ์ขัดผิวชนิดโลชั่น (skin polishing lotions) ส่วนอนุภาคขนาด 250 และ 300 ไมครอน จะนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์สำหรับขัดผิวกาย (body scrub) และชนิดที่แตกตัวได้จะนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์สำหรับขัดผิวหน้า โดยปริมาณที่ใช้ในสูตรทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1-10% ด้วยคุณสมบัติของซิลิกาที่เข้ากันได้ดีกับสารอื่นในสูตรจึงไม่เกิดปัญหาการแยกชั้น ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา สามารถแขวนลอยได้ในสูตรที่ใช้ กัม และโพลีเมอร์ และแนะนำให้ใส่ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต

### 3.2 การประเมินคุณภาพของครีมขัดผิว

อิมัลชันทางเครื่องสำอาง เช่น โลชั่น และ ครีมขัดผิว ที่ผลิตขึ้นก่อนออกจำหน่ายจำเป็น

อย่างยิ่งที่จะต้องประเมินคุณภาพเพื่อเป็นหลักประกัน ในด้านคุณภาพและความปลอดภัยต่อผู้ใช้ ตลอดจนภาพพจน์ที่ดีของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ด้วย เพื่อสร้างการยอมรับและความเชื่อถือ ความมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

### 3.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

การทดสอบในห้องปฏิบัติการในคุณภาพดังกล่าวที่ควรประเมิน ได้แก่ ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค การสูญเสียน้ำและสารระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ค่าความเป็นกรดต่าง การเปลี่ยนแปลงสี ความเนียน การแยกชั้น การปนเปื้อน และความคงตัวของสารสำคัญและสารปรุงแต่งในผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้จะรวมถึงการวัดความหนืดและคุณสมบัติการไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (พรรณวิภา และ แก้วนภา, 2544)

รีโอโลยี (Rheology) หมายถึง การไหล (flow) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ซึ่ง Rheology ทางเครื่องสำอาง มีบทบาททั้งในขบวนการเตรียม เช่น การคน การผสม และการบรรจุ และมีผลต่อการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ เช่น การเทผลิตภัณฑ์ออกจากขวด การบีบออกจากหลอด และการทาผลิตภัณฑ์บนผิว ซึ่งการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอเหมือนกันทุกครั้ง ทำได้โดยการควบคุมคุณสมบัติทาง Rheology นั้นเอง

อิมัลชันทางเครื่องสำอางส่วนใหญ่มีการไหลแบบ non-newtoniant นั่นคือมีความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Shear rate อยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งอาจเป็นพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic คือของเหลวจะเริ่มไหลทันทีเมื่อเริ่มให้แรง และการไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงให้มากขึ้น ในขณะที่ความหนืดจะยิ่งลดลง หรืออาจเรียกอีกอย่างได้ว่า Shear thinning ซึ่งผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมการไหลเช่นนี้ ส่วนอีกรูปแบบได้แก่ พฤติกรรมการไหลแบบ Plastic นั่นคือต้องให้หรือเพิ่มแรงกระทำจนถึงจุดหนึ่งของเหลวจึงจะเริ่มไหล และหลังจากนี้เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกก็จะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic ซึ่งค่าแรงที่ทำให้ของเหลวเริ่มไหลได้ เรียกว่าค่า yield value โดยการไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของแข็งที่อยู่ภายในของเหลวนั้นให้หมดไป นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบยังขึ้นกับเวลา โดยของเหลวในระบบ Pseudoplastic เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงภายนอก จะมีการคืนรูปอย่างช้าๆ ซึ่งต้องอาศัยเวลานั่นคือความหนืดจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เรียกว่าเป็นพฤติกรรมการไหลแบบทิกโซโทรปิก (Thixotropic behavior)

คุณสมบัติการไหลหรือความหนืดของอิมัลชัน มีบทบาทสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพและคุณภาพด้านความสวยงามของเนื้อครีม ซึ่งอิมัลชันชนิด O/W เมื่อเตรียมใหม่ๆ จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นทันที ต่อมาเมื่อทิ้งไว้นาน ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ความหนืดจะลดลง เรียกว่าการเกิด flocculation ดังนั้นการวัดความหนืดที่เปลี่ยนจะสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอิมัลชันได้ และมักใช้ในการทำนายความคงสภาพของอิมัลชันได้ด้วย

โดยในการศึกษา Rheology ทางเครื่องสำอาง ต้องทำการศึกษาทั้ง Shear stress และ Shear rate แล้วนำค่ามาพลอตกราฟ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมวัดค่าความหนืด แต่การวัดความหนืดเพียงอย่างเดียวมิได้แสดงถึงคุณสมบัติทาง Rheology เนื่องจากการวัดแต่เพียงค่า Shear stress ของระบบ เมื่อได้รับ Shear rate ค่าหนึ่ง แต่เป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพมากกว่า เพราะทำได้ง่ายและรวดเร็ว เครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดความหนืดของอิมัลชัน ควรเป็นชนิด Rotational viscometers เช่น Rotating spindle viscometer หรือ Cone-plate viscometer ได้แก่ Brookfield viscometer และ HAAKE VT 500 Rotational viscometer เป็นต้น

### 3.2.2 การทดสอบผลต่อร่างกาย (Physiological test)

เป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์มีผลเสียหรือเป็นอันตรายต่อร่างกายหรือไม่ โดยการทำให้ Patch test และ Sensitization test และทดสอบว่าทำให้เกิดความเป็นพิษหรือไม่ โดยการทำให้ toxicity test เป็นต้น การทดสอบในข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงเพราะสารที่ใช้ผลิตอิมัลชัน โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิว น้ำหอมบางชนิด อาจทำให้เกิดอันตรายกับร่างกายได้ ทำให้ไม่ปลอดภัยในการใช้แต่โดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตควรเลือกใช้สารที่ได้มีข้อมูลยืนยันความปลอดภัยแล้ว

### 3.2.3 การทดสอบด้านความคงสภาพของผลิตภัณฑ์ (Stability test)

(พิมพร, 2544)

ความคงสภาพของอิมัลชันเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทดสอบ เพราะผลิตภัณฑ์ที่เมื่อผลิตเสร็จใหม่ๆ ภายหลังการเก็บไว้นาน หรืออยู่ในท้องตลาดก่อนถึงมือผู้ใช้ อาจถูกกระทบโดยปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การขนส่ง แสง เป็นต้น ซึ่งมีผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ตกตะกอนหรือแยกชั้น การเปลี่ยนแปลงสี กลิ่น การแห้งของเนื้อครีม การเสื่อมหรือแตกตัวของภาชนะบรรจุ ตลอดจนการเสื่อมเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนมา เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นไม่

เป็นที่ยอมรับ การดูผลด้านความคงสภาพของผลิตภัณฑ์ มักมีการเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (shelf life test) เพื่อสัมผัสสภาวะภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ซึ่งต้องใช้เวลานานเป็นปี หรือสองปี ทำให้ไม่สะดวกต่อการนำออกจำหน่าย จึงมีการทดสอบแบบสภาวะเร่ง (accelerated test) หรือการทดสอบในสภาวะที่รุนแรง (tortured test) เพื่อย่นให้ระยะเวลาในการทดสอบให้เร็วขึ้น โดยการสร้างสถานการณ์เลียนแบบโอกาสที่ผลิตภัณฑ์อิมัลชันจะสลายตัวไป

#### การทดสอบความคงสภาพในสภาวะเร่ง (accelerated storage test)

เป็นการทดสอบก่อนนำผลิตภัณฑ์ออกจำหน่าย ในระยะเวลาสั้นเท่ากับอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นการคาดคะเนอายุการเก็บ โดยทั่วไปในทางปฏิบัติอิมัลชันควรมีอายุการเก็บไม่ต่ำกว่า 2 ปี แต่การเก็บเพื่อทดสอบเป็นเวลา 2 ปี เป็นวิธีที่ไม่สะดวก จึงมีการใช้วิธีทดสอบการเก็บแบบเร่ง ซึ่งใช้ระยะเวลาสั้นๆ ทำการศึกษาโดยการเร่งให้สลายตัวเร็วขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิ แสง ความชื้น สัมผัส เพื่อช่วยย่นระยะเวลาการศึกษาให้น้อยลง เป็นประโยชน์มากในการเปรียบเทียบสูตรที่ดีที่สุด และช่วยในการคาดคะเนวันสิ้นอายุชั้นต้น จึงนำมาใช้ทุกขั้นตอนของการพัฒนาสูตรของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆ ต่อความคงสภาพของผลิตภัณฑ์ การคัดเลือกสูตร การกำหนดวันหมดอายุของผลิตภัณฑ์ใหม่ ตลอดจนการปรับปรุงสูตรใหม่ซึ่งใช้เปรียบเทียบความคงสภาพกับผลิตภัณฑ์เดิมที่จำหน่ายมานานได้ โดยการทดสอบในสภาวะเร่ง มีดังนี้

#### 3.2.3.1 การเร่งโดยอุณหภูมิ อุณหภูมิถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งการ

สลายตัวของสารเคมีในสูตรผลิตภัณฑ์ แต่การเร่งการสลายตัวโดยอุณหภูมิสูงนี้ จะใช้เป็นเกณฑ์ในการแปลผลมาที่สภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องนั้นยังไม่เป็นที่ยอมรับเพราะอิมัลชันเป็นระบบ 2 วัฏภาค เมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้การละลายของตัวทำอิมัลชันเปลี่ยนไป ทำให้ค่า HLB ของระบบเปลี่ยนไป อาจทำให้อิมัลชันแยกชั้นหรือกลับวัฏภาค จึงใช้การคาดคะเนความคงสภาพที่อุณหภูมิห้องได้ยาก อย่างไรก็ตามการคัดเลือกสูตรอิมัลชันที่ดี โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีนี้อยู่ เพราะอิมัลชันที่คงทนต่อความร้อนได้ดีมักจะคงทนต่ออุณหภูมิห้องได้ดีด้วย การทดสอบมักทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 50 °C ที่นิยมคือ ระหว่าง 37 °C ถึง 45 °C ในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาประเมินผลโดยตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การแยกชั้น การเปลี่ยนสี กลิ่น การตกตะกอน คุณสมบัติทางกายภาพเคมี เช่น ค่าความเป็นกรดค่า ความหนืด คุณสมบัติการไหล วัดขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค เป็นต้น

3.2.3.2 การเร่งโดยแสง พลังงานแสงอาจเป็นสาเหตุเร่งให้เกิดการซีดจาง การเปลี่ยนสี กลิ่น หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบางชนิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสารแต่งสี กลิ่น ตัวทำอิมัลชัน และน้ำมันบางชนิด อาจสลายตัวเมื่อโดนแสง การทดสอบทำโดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืน โดยผลิตภัณฑ์นั้นมากที่สุด โดยใช้ Spectrophotometer หรือหลอดไฟที่ให้แสงคู่กับผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินจะซีดขาวเร็วโดยหลอดไฟทั้งสแตนด์ สแตนด์จะซีดจางเร็วในหลอดนีออน เป็นต้น วิธีทำแสงแดดเทียมช่วยเร่งการสลายตัว คือ ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 1,860 วัตต์ จะให้ความเข้มแสง 110 แรงเทียน คิดเป็นประมาณ 20 เท่าของแสงที่พบในห้องเก็บยาหรือชั้นวางของที่จำหน่ายสินค้าทั่วไป

3.2.3.3 การเร่งโดยแรงโน้มถ่วงโลก แรงโน้มถ่วงเป็นสาเหตุหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดการแยกชั้น ซึ่งทดลองได้โดยใช้การปั่นเหวี่ยง (centrifuge) หรือการเขย่า (shake) โดยการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงจะเร่งการตกตะกอนของอิมัลชัน การปั่นเหวี่ยงอาจทำที่ 3,750 รอบต่อนาที รัศมี 10 เซนติเมตร นาน 5 ชั่วโมง ซึ่งเทียบได้กับการตั้งทิ้งไว้ 1 ปี หรือที่ 5,000 – 10,000 รอบต่อนาทีได้ นาน 30 นาที โดยไม่แยกชั้น หรือเขย่า 60 ครั้งต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง และที่ 45 องศาเซลเซียส โดยไม่แยกชั้น

#### 4. การตรวจสอบคุณภาพของผิวหนังทางด้านคลินิก

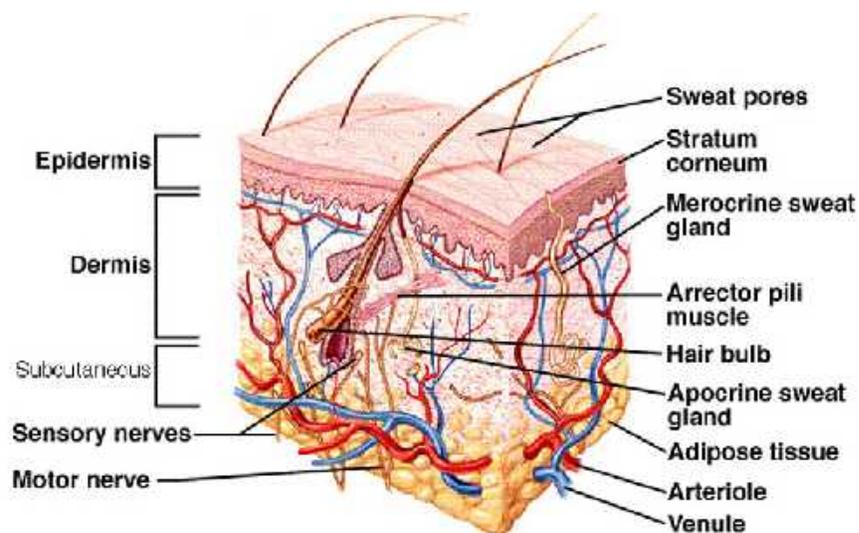
##### 4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นผิวหนัง (นันทกาญจน์, 2547)

ผิวหนังเป็นอวัยวะที่ใหญ่ที่สุดของร่างกายมนุษย์ คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 16% มีหน้าที่คอยคุ้มกันปกป้องอวัยวะสำคัญภายในและช่วยควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย โดยทั่วไปผิวหนังแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นหนังกำพร้า (epidermis) ชั้นหนังแท้ (dermis) และชั้นไขมันใต้ผิวหนังและรากเส้นขน (hypodermis) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ชั้นหนังกำพร้า (epidermis) เป็นผิวหนังชั้นนอกสุด แบ่งออกเป็น 5 ชั้นย่อย ดังนี้

1) Stratum corneum (SC) อยู่ชั้นนอกสุดมีความหนาประมาณ 10-20 ไมครอน เป็นชั้นที่มีความสำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นตัวกลางในการส่งผ่านน้ำและสารโมเลกุลต่างๆ ไปยังผิวหนังอื่น ๆ ประกอบด้วยกลุ่มเซลล์รูปร่างแบน (keratinized cells) ที่ไม่มีชีวิต มีลักษณะเหมือนเกล็ด

เรียกว่า corneocytes เรียงตัวกันเป็นชั้นประมาณ 15-20 ชั้น โดยเซลล์แต่ละเซลล์จะลักษณะค่อนข้างหยาบ มีรูปร่างคล้ายหกเหลี่ยม มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 25 ไมครอน และหนาประมาณ 1-2 ไมครอน ซึ่งเซลล์ดังกล่าวจะฝังตัวอยู่ในชั้นไขมัน (intercellular lipid matrix) อันประกอบด้วย โมเลกุลของไขมันที่เชื่อมอยู่กับโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบหลักคือ โปรตีนเคราติน ซึ่งมีเซลล์ห่อหุ้มที่มีความเหนียว (tough cell envelop) ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงและแน่นหนาของโปรตีน โครงสร้างนี้อาจเรียกว่าเป็น protein bricks เรียงตัวซ้อนอยู่ใน lipid mortar โดยภาพแสดงองค์ประกอบของชั้นผิวหนัง แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นผิวหนัง

ที่มา: Wickett (2001)

โปรตีนเคราติน (keratins) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของชั้นผิวหนังกำพร้าซึ่งคิดเป็น 30 % ของน้ำหนักแห้งของ epidermis cells ทั้งหมด และคิดเป็น 80 % ของน้ำหนักแห้งเมื่อเทียบกับเซลล์ในชั้น stratum corneum โดยเคราตินสามารถพบได้ในเซลล์เยื่อผิวของร่างกาย โดยจะปรากฏที่บริเวณเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ โครงสร้างหลักของเคราตินจะมีลักษณะเป็นเกลียว อันประกอบด้วยกรดอะมิโน ได้แก่ กรดแอสพาร์ติก กลูตามิก ไกลซีน และโพรลีน จำนวนเล็กน้อย ส่วนองค์ประกอบของโปรตีนอีกกลุ่มหนึ่งที่พบในชั้นหนังกำพร้าคือ keratohyalin granules ที่พบในชั้น granulosum หรือ granular layer มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกที่ประกอบด้วย

กรดอะมิโนฮิสทีดีน (histidine) และ อาร์จินีน (arginine) และส่วนที่สองคือ ซิสเทอีน (cysteine) โดยทั้งสองส่วนจะเป็นกรดอะมิโนที่ไม่ละลายในน้ำ โดยกรดอะมิโนฮิสทีดีน จะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าฟิลาเกรริน (filaggrin) เนื่องจากพบว่ามียับยั้งสำคัญต่อการเข้าร่วมตัวกับเส้นใยของเคราตินที่อยู่ในชั้นผิว stratum corneum ด้วยกระบวนการเคราติไนเซชัน (keratinization process) ซึ่งต้องอาศัยระยะเวลา โดยหากเกิดขึ้นช้าหรือเร็วเกินไปจะมีผลต่อความผิดปกติของ ชั้น stratum corneum ได้ โดยในกระบวนการรวมตัวดังกล่าวเมื่อสิ้นสุดลง filaggrin จะถูกเปลี่ยนด้วยเอนไซม์ให้เป็นสารที่ไม่มีประจุ และแยกตัวออกมาจากเคราติน จากนั้นจะถูกย่อยให้กลายเป็นกรดอะมิโนด้วยเอนไซม์โปรทีโอไลติก (proteolytic enzyme) ซึ่งเกิดขึ้นที่ชั้น stratum corneum โดยกรดอะมิโนดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “Natural Moisturizing Factor” (NMF) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความชุ่มชื้นผิวในชั้น stratum corneum (Wickett, 2001)

ส่วนไขมันในชั้น stratum corneum จะประกอบด้วย คอเลสเตอรอล และกรดไขมันอิสระโดยจะมีลักษณะเป็นชั้นบางๆเรียงซ้อนกันและไม่พบฟอสโฟลิปิด (phospholipids) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งโครงสร้างของไขมันในชั้นนี้จะค่อนข้างซับซ้อน เพราะประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) และ ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สลับกัน ส่วนใหญ่มักเรียงตัวเป็น 2 ชั้น โดยส่วนของ hydrophobic จะประกอบด้วยสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของไขมัน ซึ่งเป็นบริเวณที่สารต่างๆรวมทั้งน้ำสามารถผ่านเข้าออกได้ยาก

ชั้น stratum corneum เมื่อเปียกหรือได้รับน้ำ จะสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 60-70 % w/w ซึ่งโดยทั่วไปการวัดค่าคุณภาพของผิวหนังไม่ว่าจะเป็นการวัดค่าความชุ่มชื้น และค่าความยืดหยุ่นจะกระทำที่ผิวชั้น stratum corneum เป็นหลัก

- 2) Stratum lucidum จะพบเฉพาะตามฝ่ามือ ฝ่าเท้า เป็นเซลล์มีลักษณะแบน
- 3) Stratum granulosum ภายในเซลล์จะเกิดเป็นแกรนูลแล้วถูกขับออกมาจนเซลล์กลายเป็นสารที่อยู่ระหว่างเซลล์ในชั้นบนสุด ส่วนเซลล์จะกลายเป็นชั้น stratum corneum
- 4) Stratum spinosum เป็นเซลล์ที่มีลักษณะกลม หรือหลายเหลี่ยมแล้วจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเซลล์แบน ซึ่งนิวเคลียสจะหดตัวทำให้เซลล์เชื่อมต่อกัน และมีการสร้างโปรตีน keratohyalin
- 5) Stratum germinativum (basal layer) เป็นเซลล์รูปไข่เรียงตัวเป็นชั้นแถวเดียว และมีเซลล์ melanocyte ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างเม็ดสี

4.1.2 ชั้นหนังแท้ (dermis) จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ papillary dermis และ reticular dermis โดยจะมีความหนาแตกต่างกันตามตำแหน่งของร่างกาย ประกอบด้วยเส้นใยโปรตีน คือ คอลลาเจน (75 % ของน้ำหนักแห้ง) ทำให้มีความเหนียว และมีอีลาสติน (elastin) 4 % ทำให้มีความยืดหยุ่น และมีโพลีแซคคาไรด์ 20 % ที่สำคัญคือ chondroitin sulfate dermatan sulfate และ heparin ในชั้นนี้จะมีเส้นเลือดฝอย ท่อน้ำเหลือง ปลายประสาทและต่อมต่างๆ

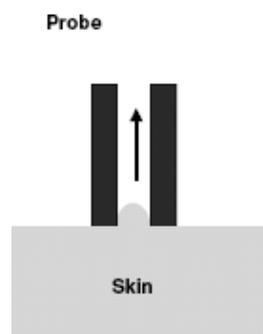
4.1.3 เนื้อเยื่อไขมันใต้ผิวหนัง (subcutaneous fatty tissue) หรือเรียกอีกอย่างว่าชั้น hypodermis เป็นชั้นผิวที่มีความยืดหยุ่น ป้องกันแรงกระแทก และเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ประกอบด้วยเซลล์ไขมันเป็นส่วนใหญ่ และมีคอลลาเจน แทรกตัวอยู่ประปราย

## 4.2 กระบวนการสร้างเซลล์ผิวใหม่ (Stratum corneum renewal)

ชั้นของผิว stratum corneum จะมีการหลุดลอกออกตามธรรมชาติ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Desquamation เพื่อให้เกิดการสร้างเซลล์ผิวใหม่ที่จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวชั้นใน โดยที่ชั้น basal layer ของชั้นผิวหนังกำพวดจะมีเซลล์กลุ่มหนึ่งเรียกว่า slow-cycling stem cells ซึ่งเซลล์กลุ่มนี้จะทำการแบ่งตัวออกเป็น 2 ส่วน ทำให้ได้เซลล์ลูกที่เรียกว่า daughter cell โดยเซลล์ลูกตัวแรกจะยังอยู่ที่ชั้น basal layer ในรูปของ stem cell ส่วนอีกเซลล์ที่เหลือจะทำหน้าที่ในการขยายตัวหรือแบ่งตัวชั่วคราว (transient amplifying cell) ซึ่งเซลล์ดังกล่าวจะทำการแบ่งตัวเพื่อให้เกิดเซลล์ลูกจำนวนมาก จนกระทั่งหมดอายุขัยของเซลล์นั้น ต่อจากนั้นเซลล์ใหม่ที่เกิดจากการแบ่งตัวที่เรียกว่า post-miotic (PM) cell ก็จะเคลื่อนตัวสู่ผิวในชั้น granular layer และเคลื่อนตัวต่อไปจนกระทั่งถึงผิวชั้นบนสุด คือ stratum corneum และผลักให้เซลล์ผิวเก่าที่ตายแล้วหลุดลอกออกไป โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายใน 28 วัน ซึ่งถือเป็นอัตราที่ปกติ แต่ถ้าหากผิวหนังถูกรบกวนด้วยสภาวะแวดล้อม เช่น มลภาวะ ความร้อน แสงแดด และอายุที่เพิ่มขึ้น ก็อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างเซลล์ผิวใหม่ให้เกิดช้าขึ้นกว่าเดิม ผลที่ตามมาก็คือผิวหนังดูหมองคล้ำไม่สดใส ดังนั้นการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ช่วยกระตุ้นการผลิตเซลล์ผิว และกำจัดเซลล์ผิวที่ตายแล้ว จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ (Wickett, n.d.)

### 4.3 การวัดความยืดหยุ่นของผิวหนัง (Skin elasticity)

เป็นการการศึกษาคุณสมบัติทางกล (mechanical properties of skin) ของผิวหนัง โดยอาศัยหลักการของการดูดผิว (suction method) เข้าไปในรูหรือช่องเปิดเล็กๆ ของ probe ด้วยแรงดันคงที่ในทิศทางตรงกันข้าม (negative pressure) และภายในเวลาที่กำหนด จากนั้นเมื่อถอนแรงออกหรือหยุดให้แรงกระทำ ผิวหนังจะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิมหรือจุดเริ่มต้น ซึ่งผลจากการวัดค่าจะแสดงผลในรูปของกราฟที่พลอตระหว่าง ระยะทางที่เกิดการสูญเสียรูปร่าง (deformation: mm.) กับเวลา (time:seconds) ซึ่งข้อดีของการใช้ probe ขนาดเล็ก คือจะไม่เข้าไปทำลายโครงสร้างของผิวหนังชั้นใน ได้แก่ ชั้น dermis และ hypodermis โดยการวัดค่าความยืดหยุ่นนั้นจะเป็นการวัดเฉพาะผิวหนังชั้นบนสุด หรือชั้น epidermis เท่านั้น (Dobrev, 2000) โดยค่าปัจจัย (parameters) ต่างๆ ที่ได้จากกราฟจะใช้อธิบายถึงสภาพความยืดหยุ่นของผิวหนังได้ ซึ่งองค์ประกอบของกราฟจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ผิวหนังถูกกระทำด้วยแรงดูด (suction phase) ซึ่งค่าความชันของกราฟจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง และส่วนที่สองคือส่วนที่ผิวหนังพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิมภายหลังจากถอนแรงดูดออก (relaxation phase) ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดหนึ่งจะโค้งงอจนแบนราบเนื่องด้วยความพยายามที่จะกลับสู่จุดเริ่มต้นของการวัดค่า เนื่องด้วยชั้นผิวหนังของคนจะมีส่วนประกอบที่เป็นของเหลวภายใต้ผิว ได้แก่ เลือด และ ชั้นไขมัน ดังนั้นผิวหนังจึงจัดเป็นวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) และ พลาสติก (plastic material) ที่ทำให้ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ 100 % ซึ่งเป็นธรรมชาติของผิวที่ต้องมีการสูญเสียรูปร่างไปบ้างเนื่องจากมีแรงกระทำซึ่งผิดกับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น บอลูน ที่มีสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมได้เต็ม 100 % ซึ่งการวัดค่าความยืดหยุ่นของผิวโดยใช้หลักการของแรงดูดผิว แสดงดังภาพที่ 8



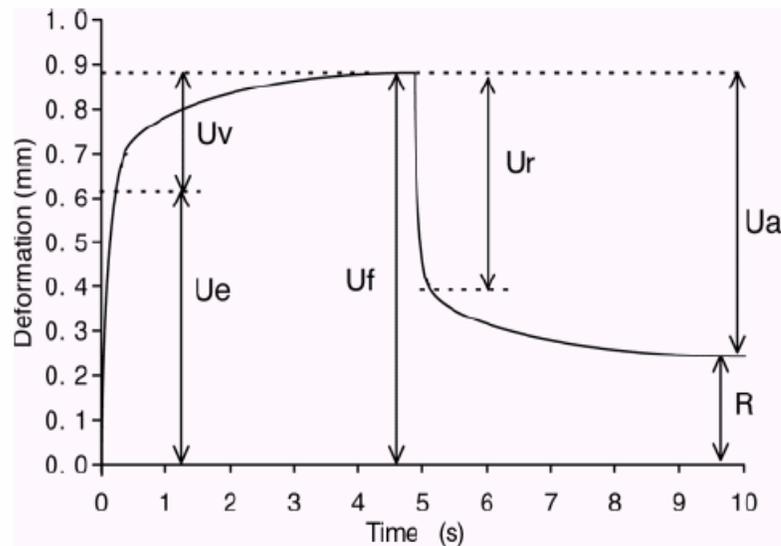
ภาพที่ 8 การวัดค่าความยืดหยุ่นของผิวโดยใช้หลักการของแรงดูดผิว

ที่มา: Schlangen *et al.* (2003)

เครื่องวัดความยืดหยุ่นของผิวหนังที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Cutometer MPA 580 ของบริษัท Courage & Khazaka ประเทศเยอรมัน ประกอบด้วยหัว probe ที่ภายในเป็นแท่งแก้วปริซึม (prisms glass) ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดการสะท้อนของแสง ที่หัว probe จะมีรูหรือช่องเปิดเล็กๆ (small aperture) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm. เพื่อให้ผิวหนังถูกกดเข้าไป ด้วยแรงดันคงที่ในทิศทางตรงข้าม (constant negative pressure) ซึ่งค่าแรงดันที่เหมาะสมที่นิยมใช้คือ 400-500 mbar การกำหนดสถานะในการวัดค่าจะประกอบด้วย ระยะเวลาที่ผิวหนังถูกกดเข้าไปใน probe (On-time) โดยทั่วไปถูกกำหนดไว้ที่ประมาณ 2-5 วินาที ต่อมาคือระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ผิวหนังกลับสู่สภาพเดิม (Relaxation time or Off-time) ที่นิยมจะกำหนดไว้ที่ 2-4 วินาที และสุดท้ายคือซ้ำหรือรอบ (cycle) ของการวัดค่า ซึ่งขึ้นกับเวลาของการให้แรงและหยุดแรงกระทำกับผิว และจำนวนของการวัดค่าซ้ำจะช่วยบอกถึงความอ่อนล้า (fatigue) ของผิว ที่เกิดจากการให้แรงกดกระทำซ้ำๆ ที่จุดเดิม แสดงด้วยเส้นกราฟที่จะค่อยๆ สูงขึ้นในรอบถัดไป โดยทั่วไปนิยมกระทำที่ 3 ซ้ำ แต่ถ้าหากวัดค่าเป็นจำนวน 10 ซ้ำ จะทำให้เกิดพื้นที่ของกราฟ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแปลผลได้ (Anonymous, 2002)

บริเวณที่นิยมใช้วัดค่าความยืดหยุ่นคือ ท่อนแขนด้านใน (volar forearm) ขมับ (temporal) และบริเวณรอบดวงตา ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง การวัดค่าความยืดหยุ่นจำเป็นต้องมีการควบคุมสถานะของผู้ทดสอบ โดยจะกระทำในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 20 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 40-60 % ซึ่งผู้ทดสอบต้องเข้าไปนั่งปรับสภาพร่างกายเป็นเวลา 10 นาที เพื่อปรับสภาพการไหลเวียนของโลหิตให้สู่สภาพปกติ และความเครียดทางอารมณ์มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำออกจากผิว ดังนั้นหากการไหลเวียนของเลือดและการระเหยของน้ำอยู่ในอัตราที่สูง จะมีผลกระทบต่อการวัดค่าความยืดหยุ่นของผิวหนังได้ นอกจากนี้ข้อสำคัญอีกประการของการวัดค่าคือควรยึดหัววัด (probe) ให้ติดกับผิว โดยใช้สติ๊กเกอร์สองหน้า เพื่อลดแรงเสียดทาน และเพื่อให้ probe อยู่ในมุมที่ถูกต้อง ทั้งนี้ไม่ควรกด probe ให้ติดแน่นกับผิวเกินไป เพราะจะเป็นการรบกวนระบบการไหลเวียนของเลือด (Khazaka, 2005)

กราฟที่ได้จากการวัดค่าความยืดหยุ่นของผิวด้วยเครื่อง Cutometer MPA 580 แสดงดังภาพที่ 9 พร้อมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการแปลผลมีความหมายดังนี้



ภาพที่ 9 กราฟอธิบายการสูญเสียรูปร่างของผิวหนัง (skin deformation curve) จากการวัดความยืดหยุ่นของผิวหนังด้วยเครื่อง Cutometer MPA 580

ที่มา: Dobrev (2000)

จากกราฟจะพบว่ามียปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการแปลผลความยืดหยุ่น ดังนี้

$R0 = Uf$  หมายถึง ค่าความสูงของกราฟที่มากที่สุดหรือจุดสูงสุดของกราฟที่ 1 ใช้อธิบายถึงความแน่นและความกระชับ (firmness) ของผิวหนัง โดยค่าดังกล่าวจะแสดงถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดที่มากกระทำกับผิวหนัง (passive behavior)

$R1 = Uf - Ua$  หมายถึง ค่าความสูงที่จุดต่ำสุดของกราฟที่ 1 หรือค่าผลต่างที่ใช้อธิบายถึงความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเริ่มต้นของผิวหนัง ยิ่งหากมีค่าน้อยจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในการกลับคืนสภาพเดิม

$R2 = Ua / Uf$  หมายถึง สัดส่วนระหว่างค่าความสูงที่จุดสูงสุดของกราฟที่ 1 ( $Uf$ ) และค่าความสูงของกราฟในช่วงที่เกิดการสูญเสียรูปร่างและพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม (gross elasticity) ซึ่งค่าสัดส่วนดังกล่าวหากมีค่าเข้าใกล้ 1 (100 %) แสดงถึงผิวหนังที่มีสภาพความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นจึงถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาก ที่จะใช้ในการประเมิน

$R3 = \text{last max amplitude}$  หมายถึง ค่าความสูง ณ จุดสูงสุดของกราฟสุดท้ายที่มีค่าสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับจุดสูงสุดของกราฟเริ่มต้น หรือหมายถึงการสูญเสียรูปร่างมากที่สุดภายหลัง

จากวัดค่าเป็นซ้ำสุดท้าย แสดงให้เห็นถึงความอ่อนล้าของผิวหนังที่เกิดจากการให้แรงดูดกระทำอย่างต่อเนื่อง (tiring effect) ซึ่งเป็นสาเหตุจากการวัดค่าซ้ำๆ ที่ผิวหนัง ณ.จุดเดิม (ในการทดลองนี้ วัดค่า 10 ซ้ำ) โดยจุดสูงสุดของกราฟในทุกรอบถัดไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดูดกระทำเมื่อทำการวัดค่าซ้ำ และสามารถสังเกตได้จากกราฟ

$R4 = \text{last min amplitude}$  หมายถึง ค่าความสูงที่จุดต่ำสุดของกราฟสุดท้ายที่จะมีค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับจุดต่ำสุดของกราฟเริ่มต้น เป็นผลเนื่องมาจากการเกิด tiring effect เช่นกัน แสดงถึงความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมของผิวหนังจะลดลง เมื่อทำการวัดค่าซ้ำ ณ.จุดเดิมอย่างต่อเนื่อง

$R5 = U_r/U_e$  หมายถึง ความยืดหยุ่นของผิวหนังสุทธิ (net elasticity) โดยคิดเฉพาะส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความเป็น elastic ของผิว ซึ่งหากมีค่าเข้าใกล้ 1 (100%) มากเท่าไร จะหมายถึงสภาพผิวหนังที่มีความยืดหยุ่นสูง

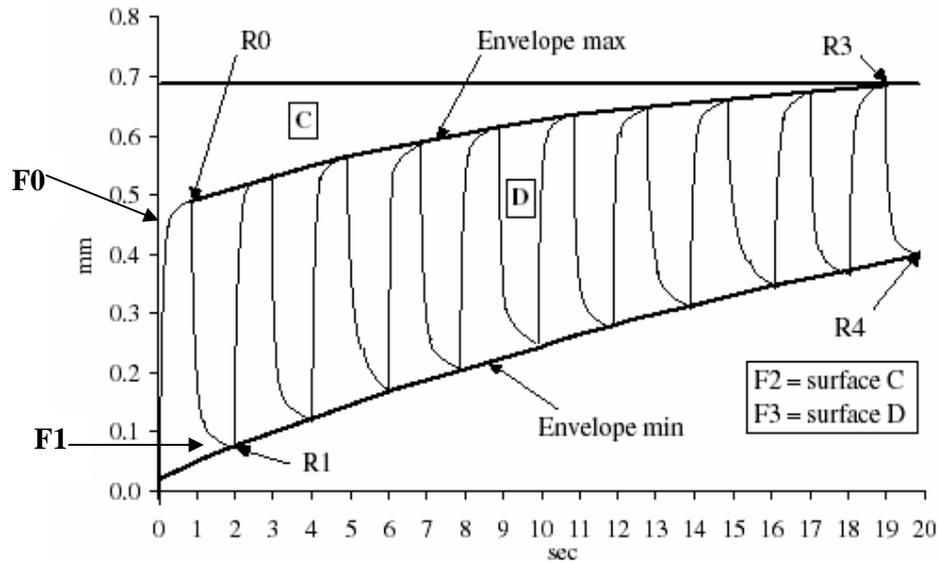
$R6 = U_v/U_e$  หมายถึง อัตราส่วนที่แสดงถึงความเป็น visco-elasticity ของผิวหนัง แสดงด้วยกราฟในช่วงที่ถูกแรงดูดกระทำ ซึ่งจะมีกราฟทั้งส่วนที่เป็นเส้นตรงคือ  $U_e$  (elastic) และส่วนโค้งงอ คือ  $U_v$  (plastic component) อันเนื่องมาจากของเหลวใต้ผิว ซึ่งหากสัดส่วนดังกล่าวมีค่าน้อย (นั่นหมายถึงความเป็น elastic มีมากกว่า) จะแสดงถึงสภาพความยืดหยุ่นของผิวหนังที่มีค่าสูง

$R7 = U_r/U_f$  หมายถึง อัตราส่วนที่แสดงถึงความยืดหยุ่น (elastic) ของผิวหนัง ด้วยกราฟที่เป็นเส้นตรง ( $U_r$ ) ในการกลับคืนสภาพเดิม เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่นทั้งหมดจากกราฟ ( $U_f$ ) ซึ่งหากมีค่าเข้าใกล้ 1 (100%) มากเท่าไร จะหมายถึงกราฟที่มีความยืดหยุ่นสูง

$R8 = U_a$  หมายถึง ความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมของผิวหนัง ซึ่งหากค่า  $U_a$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $U_f$  มากเท่าไร จะแสดงถึงความยืดหยุ่นสูงและมีความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเริ่มต้นที่ดี

$R9 = R3-R0$  หมายถึง ค่า tiring effect ของผิวหนังภายหลังจากมีแรงดูดมากระทำ เนื่องจากการวัดค่าซ้ำ ซึ่งหากมีค่าน้อยจะแสดงถึง tiring effect ที่มีค่าต่ำเช่นกัน

เนื่องจากการวัดค่าและแปลผลข้อมูลด้วยค่า R-parameter นั้น จำเป็นต้องขึ้นกับค่า  $U_f$  เป็นสำคัญ ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นกับ ค่าความชุ่มชื้นภายในผิวหนัง ค่าความดัน และการจัดวางหัว probe ที่ถูกต้องบนผิวขณะทำการวัดค่า ดังนั้นโปรแกรมที่ประมวลผลข้อมูลจึงได้ใช้ปัจจัยในด้านอื่นมาใช้ในการแปลผลค่าความยืดหยุ่นของผิวหนังด้วย นั่นคือใช้ปัจจัยของพื้นที่ (Area parameter) ที่เกี่ยวข้องกับกราฟที่ได้จากการวัดค่าความยืดหยุ่นมาใช้ ซึ่งจะต้องทำการวัดค่าซ้ำอย่างน้อย 10 ครั้ง หรือ 10 repetition โดยปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการประเมินผล ดังแสดงด้วยภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ค่า Envelope function และ ปัจจัยที่ใช้ในแปลผลของ Area-parameter จากการวัดความยืดหยุ่นของผิวหนังด้วยเครื่อง Cutometer MPA 580

ที่มา: Dobrev (2004)

ความหมายของปัจจัยต่างๆ จาก Area-parameter สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

F0 หมายถึง พื้นที่ภายในบริเวณสามเหลี่ยมเหนือเส้นกราฟที่แสดงความเป็น visco elastic ของผิวหนัง เกิดจากค่า  $U_f \times$  เวลาในการดูดผิว (suction time) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ทั้งหมดของกราฟ (rectangular max x amplitude and time) สำหรับวัตถุที่มีความยืดหยุ่นเต็ม 100 % จะไม่ปรากฏพื้นที่ของ F0 ให้เห็น ดังนั้นหากค่า F0 ที่ได้จากการวัดมีค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไร จะแสดงถึงความยืดหยุ่นของผิวหนังที่มีค่าสูง

F1 หมายถึง พื้นที่ภายในบริเวณสามเหลี่ยมภายใต้เส้นกราฟ ในช่วงที่พยายามกลับคืนสู่สภาพเดิมของผิวหนัง เกิดจากค่า  $U_f \times$  เวลาที่ปล่อยให้ผิวกลับสู่สภาพเดิม (relaxation time) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ทั้งหมดของกราฟ (rectangular max x amplitude and time) เช่นเดียวกับ F0 สำหรับวัตถุที่มีความยืดหยุ่นเต็ม 100 % จะไม่ปรากฏพื้นที่ของ F1 ให้เห็น ดังนั้นหากค่า F1 ที่ได้จากการวัดมีค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไร จะแสดงถึงความยืดหยุ่นของผิวหนังที่มีค่าสูง

สำหรับปัจจัย F2 และ F3 จะสามารถประมวลผลได้เฉพาะการวัดค่าอย่างต่ำจำนวน

10 ซ้ำ เท่านั้น ซึ่งวัตถุประสงค์ของการคำนวณค่าปัจจัย ทั้ง 2 คือต้องการค่าปัจจัยที่เป็นอิสระจากค่า  $U_f$  ซึ่งทั้ง  $F_2$  และ  $F_3$  จะคำนวณได้จาก เส้นกราฟทั้งบนและล่างซึ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มกราฟทั้งหมดเอาไว้ โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยของค่า  $\log$  ของจุดสูงสุดและต่ำสุด (maximum and minimum amplitude) ของกราฟ โดยปัจจัยทั้งสองต่างก็มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ภายในกราฟที่ถูกห่อหุ้มไว้ ซึ่งพื้นที่ของบริเวณ  $F_2$  และ  $F_3$  แสดงดังภาพที่ 10

$F_2$  หมายถึง พื้นที่บริเวณเหนือกราฟซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ (envelope-curve)

$F_3$  หมายถึง พื้นที่ภายในบริเวณกราฟซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ (envelope-curve)

Dobrev (2000) ได้ทำการวัดค่าความชุ่มชื้นของชั้นผิวหนังกำพร้า (epidermal hydration) ด้วยหลักการวัดประจุไฟฟ้าบนผิว (skin capacitance) ด้วยเครื่อง Corneometer CM 820 และวัดค่าความยืดหยุ่นด้วยหลักการของแรงคูดผิวด้วยเครื่อง Cutometer SEM 474 จากการใช้สารเพิ่มความชุ่มชื้นผิว ชนิดต่างๆ ได้แก่ พีโตรลาทัม (petrolatum) น้ำมันพาราฟิน (paraffin oil) กลีเซอริน (glycerin) อิมัลชันชนิด O/W ที่มีปริมาณไขมัน 65 % และ 25 % โดยวัดค่าภายหลังการใช้เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยทดสอบบริเวณท่อนแขนด้านใน ซึ่งวัตถุประสงค์คือต้องการทดสอบความไวของปัจจัยทางกล (mechanical parameter) ที่ได้จากการวัดค่าความยืดหยุ่น ที่มีผลต่อความชุ่มชื้นของผิวหนัง และหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองดังกล่าว ผลการทดลองพบว่า กลีเซอรินจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความชุ่มชื้นผิวสูงที่สุด จากการวัดค่าภายหลังการใช้เป็นเวลา 60 นาที ส่วนการวัดค่าความยืดหยุ่นพบว่า ค่าปัจจัยของ  $U_v/U_e$  และ  $U_v$  ซึ่งแสดงถึงความ เป็น viscoelastic จะมีผลอย่างมากต่อความชุ่มชื้นผิวและเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของน้ำใต้ผิวได้เป็นอย่างดี เนื่องจากภายในผิวหนังชั้น dermis จะประกอบด้วยของเหลวที่อยู่ระหว่างเซลล์เนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ซึ่งมีความข้นหนืดสูงเนื่องจากมีโครงสร้างของเส้นใยอยู่มาก คือ โกลโคซามิโนไกลแคน (glycosaminoglycans) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ  $U_v/U_e$  และ  $U_v$  จะแสดงถึงความข้นหนืดที่ลดลงของของเหลวระหว่างเซลล์เนื้อเยื่อภายในชั้นดังกล่าว เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบคือ โปรทีโอไกลแคน (proteoglycan) ซึ่งการสะสมของน้ำในชั้นผิวจะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยใต้ผิว และช่วยให้ของเหลวระหว่างเซลล์เคลื่อนตัวได้สะดวกขึ้น ซึ่งผลต่อผิวหนังชั้นบน (epidermis) ในส่วนของ stratum corneum ให้เกิดความชุ่มชื้น และ นุ่มเนียนขึ้น นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างความชุ่มชื้นผิวกับปัจจัยทางกลที่มีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่  $U_e$ ,  $U_f$ ,  $U_r$ ,  $U_r/U_e$  และ  $U_r/U_f$  ซึ่งการวัดค่าความยืดหยุ่นด้วย probe ที่มีรูเปิดขนาดเล็กจะช่วยบอกถึง

ความชุ่มชื้นในผิวหนังกำพวดิได้ดี ในขณะที่การใช้ probe ที่รูเปิดใหญ่จะบอกถึงปริมาณน้ำในชั้นหนังแท้แทน

Vijiver *et al.* (2003) ได้ทำการวัดค่าความยืดหยุ่นของผิวหนังด้วยเครื่อง Cutometer SEM 575 กับผู้ทดสอบจำนวน 302 คน เพศชายและหญิงอายุระหว่าง 18-75 ปี ซึ่งปัจจัยที่ใช้ประเมินผลได้แก่  $U_r/U_e$  = elastic function,  $U_v/U_e$  = viscoelastic index,  $U_a/U_f$  = biological elasticity และ  $U_r/U_f$  = elastic recovery เพื่อดูผลของปัจจัยและข้อมูลส่วนบุคคลที่ได้จากการตอบแบบสอบถาม ที่มีผลต่อค่าความยืดหยุ่น โดยพบว่าผู้ที่มีริ้วรอย (fine lines) และเกิดความหย่อนยานของผิว (flabbiness) จะส่งผลให้ค่า elastic function, biological elasticity และ elastic recovery มีค่าลดลง แต่ viscoelastic index มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอายุที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของผิวหนังน้อยลง นอกจากนี้ความเครียดจากการทำงานและในชีวิตประจำวันก็ส่งผลต่อความยืดหยุ่น เช่นกัน โดยมีผลต่อค่า viscoelastic index ซึ่งบุคคลที่มีความเครียดจะมีค่า viscoelastic index เท่ากับ 0.49 ในขณะที่ผู้ที่ไม่มีเครียดจะให้ค่าเท่ากับ 0.55 ตามลำดับ

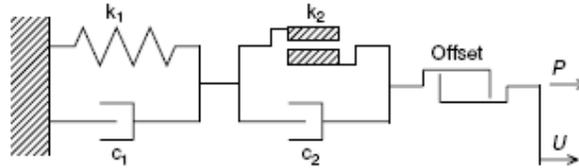
Schlangen *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยที่ใช้ในประเมินค่าความยืดหยุ่นของผิวหนัง ได้แก่  $U_v$ ,  $U_r$ ,  $U_e$  และ  $U_f$  จากการวัดค่าด้วยเครื่อง Cutometer SEM 474 เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง (model) เพื่อใช้ในการอธิบายผลคุณสมบัติทางกลของผิวหนัง โดยวัดค่าที่บริเวณใบหน้าของผู้ทดสอบเพศหญิง อายุระหว่าง 37-68 ปี จำนวน 68 คน วัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ (3 cycle) โดยได้อธิบายถึงการตอบสนองของผิวหนังต่อการวัดค่าด้วยแรงกด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) อธิบายถึงการขยายตัวและพองตัวของผิวในทันที (immediate irreversible plastic extension) อันเนื่องมาจากการแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก ที่ใช้อธิบายผลของปัจจัย  $U_f$  ได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปัจจัย  $U$  parameters ทั้งหมด

2) กล่าวถึงการตอบสนองในทันที เนื่องมาจากพฤติกรรมแบบ visco-elastic ของผิวหนังซึ่งอธิบายได้จากลักษณะของกราฟที่สูงขึ้นและลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ทำการวัดค่าในแต่ละ cycle ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของค่า  $U_e$  และ  $U_r$  ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่าการตอบสนองแบบ visco-elastic

3) กล่าวถึงการตอบสนองอย่างช้าๆ อันเนื่องมาจากพฤติกรรมแบบ visco-plastic ของผิวหนัง ซึ่งแสดงผลจากกราฟที่ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆขณะที่การวัดค่าที่ดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ของแต่ละ cycle ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่าเป็นการตอบสนองแบบ visco-plastic โดยสามารถใช้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของค่าปัจจัยต่างๆ จาก cycle ที่ 1 ถึง 3 ได้เป็นอย่างดี

จากความรู้พื้นฐานในคุณสมบัติของความเป็น visco-elastic ของผิวหนังประกอบกับ ข้อมูลด้านการตอบสนองของผิวหนังต่อแรงคูดใน 3 ส่วนข้างต้น สามารถนำไปใช้ในการสร้าง แบบจำลอง (model) ของผิวหนัง ได้ดังภาพที่ 11 ดังนี้



ภาพที่ 11 แบบจำลองที่ใช้อธิบายถึงคุณสมบัติทางกลของผิวหนังจากการวัดค่าด้วยเครื่อง

Cutometer SEM 474

ที่มา: Schlangen *et al.* (2003)

จากภาพคือแบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายคุณสมบัติทางกลของผิวหนัง หรือ mechanical model โดย  $P$  หมายถึง ความดันที่กระทำกับระบบซึ่งก็คือแรงคูดผิวหนังทำให้เกิดการยกตัวสูงขึ้นเป็นระยะทางหนึ่งๆ (mm) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $U$  ต่อมาคือ ค่าคงที่  $k_1$  ใช้แทนสปริงที่แข็งตัวไม่ยืดหยุ่น (stiffness) และ  $k_2$  แทนสปริงที่เสียสภาพและไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ (irreversible spring) ส่วน  $c_1$  และ  $c_2$  แทนค่าคงที่ของเครื่องลดการสั่นสะเทือน (damping constant) และ off set ที่เป็นส่วนเริ่มต้นของระบบ โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยชุดของสปริงที่ต่อขนานกับเครื่องลดการสั่นสะเทือน (spring-damper sets) รวมทั้งหมด 2 ชุด  $[(k_1+c_1) (k_2+c_2)]$  และทั้ง 2 ชุดจะเชื่อมกันแบบอนุกรม โดยชุดแรกของระบบ  $(k_1+c_1)$  จะใช้อธิบายถึงการตอบสนองต่อแรงคูดด้วยพฤติกรรมแบบ visco-elastic ของผิวหนัง ส่วนชุดที่สอง  $(k_2+c_2)$  จะใช้อธิบายพฤติกรรมแบบ visco-plastic ของผิวหนัง เนื่องจากส่วนนี้จะประกอบด้วยสปริงที่กลับคืนรูปร่างเดิมไม่ได้ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของผิวหนังที่ถูกทำให้เสียรูปร่างไปแล้วจึงมีความยืดหยุ่นลดลง แสดงด้วยกราฟที่ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละ cycle ของการวัดค่า ที่บอกถึงความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมของผิวหนังที่ค่อยๆต่ำลง ส่วน off set จะใช้อธิบายถึงขยายตัวและพองตัวของผิวหนังในทันทีจากการที่ถูกกระทำด้วยแรงคูด ที่ใช้เป็นตัวแทนของ  $U_f$  อย่างไม่รู้ก็ตามการถึงแม้การเสียรูปร่างของผิวหนังจะเพิ่มขึ้นตาม cycle ของการวัดค่า แต่ผิวหนังนั้นไม่ได้มีคุณสมบัติแบบของเหลว (viscous) เพียงอย่างเดียว ดังนั้นการเสียรูปร่างของผิวหนังจึงไม่ได้เพิ่มขึ้นตามเวลาของการวัดค่า เพราะการเสียรูปร่างย่อมมีค่าจำกัด (limit) เช่นกัน

Dobrev (2004) ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดค่าของปัจจัย R-parameters กับ Area-parameter ในการวัดค่าความยืดหยุ่นของผิว โดยเน้นการประเมินผลในด้านความอ่อนล้า (skin fatigue) และการสูญเสียความยืดหยุ่นของผิวอันเนื่องมาจากอายุที่เพิ่มขึ้น โดยวัดค่าที่บริเวณ ขมับและท่อนแขนด้านใน ด้วยเครื่อง Cutometer SEM 474 กับผู้ทดสอบ 40 คน ที่มีอายุระหว่าง 12-82 ปี ซึ่งผลการทดลองพบว่า อายุของผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดริ้วรอยเหี่ยวย่น ซึ่งจะมีผลต่อค่า R4, R9 และ F2 ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ F3 มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผิวของคนที่มีอายุน้อยกว่า โดยปัจจัยด้านเพศไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ ส่วนในด้านความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย พบว่า F2 มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับปัจจัย R3, R4 และ R9 ในขณะที่ F3 มีความสัมพันธ์ในทางลบ R4 โดยในการทดลองนี้ได้ชี้ให้เห็นว่า R4 และ F3 เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการบ่งชี้ถึงอายุผิวที่เพิ่มขึ้น โดยปัจจัยของ Area-parameters สามารถประยุกต์ใช้กับการวัดความอ่อนล้าเนื่องจากอายุผิวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการใช้ประเมินผลผลิตภัณฑ์สำหรับต่อต้านริ้วรอย

#### 4.4 การวัดความชุ่มชื้นหรือปริมาณน้ำบนผิวหนัง (พิมพร, 2544)

เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties of skin) ของผิวหนัง เนื่องจากโปรตีนคีราตินบนผิวจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างอ่อน หากอยู่ในสภาวะที่มีความชุ่มชื้นจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผิวจะขึ้นกับปริมาณน้ำในผิวหนัง วิธีที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

4.4.1 ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) โดยใช้หัววัดแตะลงบนผิวหนังที่ต้องการวัด ประมาณ 1 วินาที อ่านค่าเป็น arbitrary unit (a.u.) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบนผิวจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ตำแหน่งที่วัด ซึ่งที่บริเวณแผ่นหลังจะวัดค่าได้สูงสุด ส่วนบริเวณท้องแขน และ หน้าผาก จะให้ค่าปานกลาง ส่วนข้อเท้าจะให้ค่าต่ำสุด นอกจากนี้ยังขึ้นกับสภาพผิว ถ้าผิวแห้งค่าที่วัดได้จะต่ำ ส่วนผิวชุ่มชื้นจะได้ค่าสูง และสุดท้ายคือจะขึ้นกับภาวะของโรคผิวหนัง

ตัวอย่างเครื่องมือ เช่น NOVA DPM (Dermal Phase Meter) ของอเมริกา และ Corneometer ของประเทศเยอรมัน

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความความชุ่มชื้นของผิวหนัง ในการทดลองนี้คือ

Skin Diagnostic SD 27 (Courage & Khazaka, Colong, Germany) ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือเพียงใด จะขึ้นกับปัจจัยด้านอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ของสภาพแวดล้อมเป็นหลัก โดยค่าที่อ่านได้จะช่วยบอกถึงสภาพความชุ่มชื้นของผิวหนัง ตามสภาพแวดล้อมภายนอก ดังนี้ (Anonymous, 2000)

1) ถ้าอุณหภูมิภายนอกต่ำกว่า  $20^{\circ}\text{C}$  ค่าที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 00-50 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้ง (very dry) 51-60 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้งถึงผิวธรรมดา (normal to dehydrated) และ 61-99 a.u. หมายถึง ผิวธรรมดา (normal)

2) ถ้าอุณหภูมิภายนอกเท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$  ค่าที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 00-55 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้ง 56-66 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้งถึงผิวธรรมดา และ 67-99 a.u. หมายถึง ผิวธรรมดา

3) ถ้าอุณหภูมิภายนอกสูงกว่า  $20^{\circ}\text{C}$  ค่าที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 00-60 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้ง 61-71 a.u. หมายถึง สภาพผิวแห้งถึงผิวธรรมดา และ 72-99 a.u. หมายถึง ผิวธรรมดา

อย่างไรก็ตามค่าที่กำหนดขึ้นนั้น เป็นการกำหนดโดยบริษัทของผู้ผลิตอย่างคร่าวๆซึ่งตามความเป็นจริงนั้น ค่าที่วัดได้อาจแตกต่างจากช่วงดังกล่าวข้างต้น ขึ้นกับปัจจัยของสภาพแวดล้อมในแต่ละท้องถิ่นที่เป็นหลัก เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ สภาพทางภูมิศาสตร์ และฤดูกาล เป็นต้น ดังนั้นการแปลผลข้อมูลจึงควรพิจารณาตามความเหมาะสมตามค่าที่วัดได้เป็นหลัก

4.4.2 ค่าการนำไฟฟ้า (conductance) ปกติผิวหนังมีความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่สภาพผิวหนังที่ชุ่มชื้นจะทำให้หน้าไฟฟ้านี้ลดลง และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจะมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของผิวเพิ่มขึ้น จึงสามารถเปรียบเทียบค่าที่วัด เพื่อบอกสถานะของผิวได้ ว่าเป็นผิวแห้ง ผิวปกติ หรือผิวชุ่มชื้น ในทำนองเดียวกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าของผิว ตัวอย่างเครื่องมือ เช่น Skin Surface Hygrometer (Skicon 200 SSH ของญี่ปุ่น)

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้านี้ เป็นการประเมินความชุ่มชื้นของผิวหนังซึ่งเกิดจากสาร moisturizer ได้เป็นอย่างดี และมักใช้ประเมินสภาพผิวเช่น ผิวแห้งมาก ผิวแห้ง หรือผิวปกติได้ด้วย นอกจากนี้การประเมินความชุ่มชื้นบนผิว (stratum corneum hydration) ยังสามารถใช้วิธีอื่นในการประเมินได้ด้วย เช่น การวัดความยืดหยุ่นของผิว การใช้คุณสมบัติทาง spectroscopy

เช่น FITR, NMR และ Magnetic resonance imaging (MRI) ซึ่งไม่ค่อยนิยมใช้เท่ากับการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

Ismail *et al.* (2005) ได้ทำการวัดค่าความชุ่มชื้นบนผิวหนัง ด้วยเครื่อง Corneometer CM 820 (Courage & Khazaka) ของประเทศเยอรมัน ซึ่งใช้หลักการของการวัดค่าประจุไฟฟ้า ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารให้ความชุ่มชื้นผิว เพื่อศึกษาผลของบริเวณที่ทำการทดสอบว่าให้ค่าที่แตกต่างกันหรือไม่ โดยทำการวัดค่าที่บริเวณท้องแขนด้านบนและด้านล่าง (lower and upper volar forearm) ทั้งข้างซ้ายและขวา ภายหลังจากทาครีมเพิ่มความชุ่มชื้น เป็นเวลา 30 60 90 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าผู้ทดสอบที่คัดเลือกมามีสภาพผิวที่แห้ง เนื่องจากค่าเฉลี่ยของความชุ่มชื้นผิวก่อนทาครีม มีค่าที่วัดได้อยู่ระหว่าง 60-75 a.u. โดยภายหลังการทาครีมบำรุงผิวและวัดค่าที่ระยะเวลาต่างๆ แล้ว พบว่าค่าความชุ่มชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และนอกจากนี้ผลการทดสอบยังช่วยชี้ให้เห็นว่าบริเวณที่ทดสอบคือท้องแขนด้านในทั้งบนและล่าง ให้ค่าความชุ่มชื้นผิวที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งก่อนและภายหลังการทาครีมบำรุงผิว ดังนั้นบริเวณที่ทดสอบในการทดลองนี้จึงไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้

##### 5. การจำแนกกลุ่มตัวแปรด้วยเทคนิค Factor Analysis ในงานวิจัยผู้บริโภค (กัลยา, 2548)

Factor Analysis หรือ การวิเคราะห์ปัจจัย หรือบางครั้งเรียกว่าการวิเคราะห์ตัวประกอบ เป็นเทคนิคที่จะจับกลุ่ม หรือรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันมาไว้ในกลุ่มหรือแฟกเตอร์ (Factor) เดียวกัน ซึ่งตัวแปรที่อยู่ในแฟกเตอร์เดียวกัน จะมีความสัมพันธ์กันมาก โดยความสัมพันธ์นั้นอาจเป็นไปในทิศทางบวก (ในทิศทางเดียวกัน) หรือทางลบ (ในทิศทางตรงกันข้าม) ก็ได้ ส่วนตัวแปรที่อยู่คนละแฟกเตอร์จะไม่มีความสัมพันธ์กันหรือมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก โดยวัตถุประสงค์ของเทคนิค Factor Analysis มีดังนี้

1) เพื่อลดจำนวนตัวแปรโดยรวมตัวแปรหลายๆตัวให้อยู่ในกลุ่ม หรือปัจจัยเดียวกัน โดยที่จำนวนปัจจัยจะต่อน้อยกว่าจำนวนตัวแปร เช่นงานวิจัยหนึ่งมี 15 ตัวแปร เมื่อใช้เทคนิค Factor Analysis แล้วอาจจะเหลือเพียง 3 ปัจจัย และอาจจะต้องการตั้งชื่อหรือกำหนดชื่อปัจจัยที่แสดงถึงความหมายของตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในปัจจัยนั้นๆ เช่น คำถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคล ซึ่งอาจประกอบไปด้วย รายได้, อายุ และรายจ่าย เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าตัวแปรทั้ง 3 ตัว ดังกล่าว มี

ความสัมพันธ์กันมาก จะรวมอยู่ในปัจจัยเดียวกัน และอาจเรียกชื่อปัจจัยว่าฐานะทางสังคม (social class) ก็ได้

2) เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง (Confirmatory) ในงานวิจัยบางเรื่อง ผู้วิจัยต้องกำหนดความสำคัญหรือน้ำหนักให้กับตัวแปร เช่น ถ้าต้องการสร้างดัชนีวัดประสิทธิภาพการทำงาน ที่ต้องพิจารณาจากตัวแปรหลายๆตัว เช่น ผลงาน ( $X_1$ ) ระยะเวลาการปฏิบัติงาน ( $X_2$ ) จำนวนวันลา ( $X_3$ ) โดยสมการที่แสดงความสัมพันธ์คือ

$$P = W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3$$

โดย  $P =$  ประสิทธิภาพการทำงาน  
 $W_1, W_2, W_3$  เป็นน้ำหนักของตัวแปร  $X_1, X_2, X_3$  ตามลำดับ

ผู้วิจัยสามารถใช้เทคนิค Factor Analysis ในการกำหนดค่า  $W_1, W_2, W_3$  และตรวจสอบความถูกต้องของค่าดังกล่าวได้

### 5.1 ประโยชน์ของเทคนิค Factor Analysis

5.1.1 เพื่อลดจำนวนตัวแปร โดยการรวมตัวแปรหลายๆตัวให้อยู่ในปัจจัยเดียวกัน โดยถือว่าปัจจัยใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรใหม่ ที่สามารถหาค่าของปัจจัยที่สร้างขึ้นได้ เรียกว่า Factor score จึงสามารถนำปัจจัยดังกล่าวไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป เช่น การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์ (Regression and Correlation Analysis) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การทดสอบสมมติฐาน  $t$ -test,  $Z$ -test และการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis) เป็นต้น

5.1.2 ใช้ในการแก้ปัญหาการที่ตัวแปรอิสระของเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย มีความสัมพันธ์กัน (Multicollinearity) ซึ่งวิธีการหนึ่งของการแก้ปัญหานี้คือการรวมตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันไว้ด้วยกัน โดยสร้างเป็นตัวแปรใหม่ หรือเรียกว่าปัจจัย แล้วนำปัจจัยดังกล่าวไปเป็นตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์ความถดถอยต่อไปเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะไม่มี ความสัมพันธ์กัน

5.1.3 ทำให้เห็นโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา เนื่องจากเทคนิค Factor

Analysis จะหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของตัวแปรที่ละคู่แล้วรวมตัวแปรที่สัมพันธ์กันมาไว้ในปัจจัยเดียวกัน จึงสามารถวิเคราะห์ถึงโครงสร้างที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในปัจจัยเดียวกันได้

5.1.4 ทำให้สามารถอธิบายความหมายของแต่ละปัจจัยได้ ตามความหมายของตัวแปรต่างๆที่อยู่ในปัจจัยนั้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในด้านการวางแผนได้ ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษาถึงปัจจัยหรือตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้า ที่ผู้วิจัยคาดว่าจะมีตัวแปรซึ่งมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อมากถึง 14 ตัวแปร ซึ่งได้ให้คะแนนความสำคัญของการตัดสินใจซื้อในระดับ 1-5 โดย 1 หมายถึง ให้ความสำคัญน้อยที่สุด และ 5 หมายถึง ให้ความสำคัญมากที่สุด ซึ่งเมื่อใช้เทคนิค Factor Analysis แล้ว สมมติว่าสามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้เป็น 4 ปัจจัย จากนั้นให้นิยามความหมายของแต่ละปัจจัย โดยทั่วไปแล้วผลการวิเคราะห์จะพบว่า ปัจจัยที่ 1 มีความสำคัญมากที่สุดต่อการตัดสินใจซื้อ เนื่องจากเป็นการรวมกลุ่มของตัวแปรที่มีคะแนนความสำคัญสูงมาไว้ด้วยกัน รองลงมาจะเป็น ปัจจัยที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลสำคัญที่ทำให้ผู้ผลิตได้ทราบว่าควรจะคำนึงถึงปัจจัยใดเป็นอันดับแรกในการผลิตสินค้า

## 5.2 หลักเกณฑ์ของเทคนิค Factor Analysis

ปัจจัยใหม่ที่ได้จากการจัดกลุ่มตัวแปร จะเป็น Linear combination ของตัวแปรเดิม โดยจะพยายามนำรายละเอียดจากตัวแปรเดิมต่างๆ มาไว้ในปัจจัยให้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น จากตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้า ซึ่งปัจจัยที่ 1 ประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ  $X_1$ ,  $X_2$  และ  $X_3$  นั้นหมายความว่าตัวแปร  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  มีความสัมพันธ์กันมาก และสามารถนำรายละเอียดจากตัวแปร  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  มาไว้ใน แฟกเตอร์ที่ 1 ได้มากที่สุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$F_1 = W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3 + e$$

สำหรับการวัดปริมาณรายละเอียดของแต่ละแฟกเตอร์จะวัดจากความแปรปรวน (variance) ของปัจจัยนั้นๆ และโดยทั่วไปแล้วตัวแปรต่างๆ มักจะมีหน่วยต่างกัน เช่น อายุมีหน่วยเป็นปี รายได้มีหน่วยเป็นบาท เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ตัวแปรที่ค่ามาก เช่น รายได้ มีความสำคัญมากที่สุด (มีค่าสัมประสิทธิ์ หรือค่าน้ำหนักมากที่สุด) ดังนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Factor Analysis ควรทำการปรับตัวแปรทุกตัวให้มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็น 1

หรือทำการ Standardized ข้อมูลนั่นเอง ซึ่งตัวแปรที่ผ่านการ Standardized แล้ว และนำมาสร้างเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรซึ่งเป็น Linear combination ของแฟกเตอร์ต่างๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ หรือที่เรียกว่า Factor loading ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) ที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง +1 โดยค่า Factor loading จะใช้ในการพิจารณาว่าตัวแปรแต่ละตัวควรจัดอยู่ใน Factor ไດ

### 5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ของเทคนิค Factor Analysis

การนำเทคนิคนี้ไปใช้เพื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปร สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

5.3.1 การตรวจสอบว่าตัวแปรต่างๆ มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยถ้ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะสามารถใช้เทคนิค Factor Analysis ได้ แต่ถ้าไม่มีความสัมพันธ์กันหรือสัมพันธ์กันน้อยไม่ควรใช้เทคนิคนี้ ซึ่งการพิจารณาจะดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละคู่ ซึ่งหากมีค่าใกล้ +1 หรือ -1 แสดงว่าตัวแปรคู่่นั้น มีความสัมพันธ์กันมาก ควรอยู่ในแฟกเตอร์เดียวกัน แต่ถ้ามีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน หรือควรอยู่คนละแฟกเตอร์และถ้าตัวแปรใดไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆเลย ควรตัดออกจากการวิเคราะห์ หรือถ้าต้องการทราบถึงความเหมาะสมของตัวแปรในการวิเคราะห์แบบ Factor Analysis สามารถตรวจสอบได้จากค่าทางสถิติ คือ ค่า KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ โดยทั่วไปถ้าค่า KMO น้อยกว่า 0.5 ถือว่าข้อมูลที่มีอยู่ไม่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคนี้ แต่ถ้ามีค่าเข้าใกล้หนึ่งยิ่งมากเท่าไรก็แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลในการวิเคราะห์แบบ Factor Analysis

5.3.2 การสกัดปัจจัย (Factor Extraction) โดยมีวัตถุประสงค์คือ การหาจำนวน Factor ที่สามารถใช้แทนตัวแปรทั้งหมดทุกตัวได้ วิธีการสกัดปัจจัยมีหลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี Principle Component Analysis หรือ PCA ซึ่งเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยเป็นเทคนิคที่มีวัตถุประสงค์ที่จะนำรายละเอียดของตัวแปรที่มีจำนวนมากๆ มาไว้ในปัจจัยที่มีเพียงไม่กี่ปัจจัย ซึ่งจะพิจารณารายละเอียดทั้งหมดจากแต่ละตัวแปร โดยในการวิเคราะห์ PCA จะสร้าง Linear combination ของตัวแปร โดยที่

1) แฟกเตอร์ที่ 1 จะเป็น Linear combination แรก มีรายละเอียดจากตัวแปรทั้งหมดมากที่สุด หรือกล่าวได้ว่ามีค่าความแปรปรวนสูงสุด

2) แฟกเตอร์ที่ 2 ก็เป็น Linear combination ของตัวแปรเช่นกัน และสามารถนำรายละเอียดที่เหลือจากแฟกเตอร์ที่ 1 โดยพยายามนำรายละเอียดจากที่เหลือมาใส่ในแฟกเตอร์ที่ 2 ให้มากที่สุด และตั้งฉาก (Orthogonal) กับแฟกเตอร์แรก ซึ่งหมายความว่าแฟกเตอร์ทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน เพื่อแก้ปัญหาในการเกิด Multicollinearity

3) แฟกเตอร์ที่ 3 เป็น Linear combination ของตัวแปรเช่นกัน และไม่มีความสัมพันธ์กับแฟกเตอร์ 2 ตัวแรก และสามารถนำข้อมูลที่เหลือจากตัวแปร มาใช้ให้มากที่สุด

และในการทำงานเกี่ยวกับการสร้างแฟกเตอร์ ที่ 4 5 และ ต่อๆ ไป ก็ใช้หลักเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้น และในขั้นตอนนี้จะทำให้ประมาณค่าของ Factor loading ได้ โดยที่ค่าดังกล่าวจะเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาว่ามีตัวแปรใดบ้างที่ควรอยู่ในแฟกเตอร์เดียวกัน และในแต่ละแฟกเตอร์ให้พิจารณาค่า Factor loading ของแต่ละตัวแปร โดยถ้าค่าดังกล่าวมีค่ามาก (เข้าสู่ +1 หรือ -1) ควรจัดตัวแปรนั้นให้อยู่ในแฟกเตอร์เดียวกัน แต่ในกรณีที่มีค่า Factor loading ของตัวแปรใดมีค่าอยู่ในระดับกลางๆ ทำให้ไม่แน่ใจว่าควรจัดให้อยู่ในแฟกเตอร์ใด ในกรณีนี้จะใช้การหมุนแกนเข้ามาช่วย ดังที่จะกล่าวในขั้นต่อไป

5.3.3 การหมุนแกนปัจจัย (Factor Rotation) ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือเพื่อทำให้ค่า Factor loading ของตัวแปร มีค่ามากขึ้นหรือลดลงจนกระทั่งทำให้ทราบว่าตัวแปรนั้นควรอยู่ใน แฟกเตอร์ใด โดยวิธีการหมุนแกนปัจจัย มี 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

1) Orthogonal Rotation เป็นการหมุนแกนปัจจัยที่ยังคงทำให้แฟกเตอร์ตั้งฉากกัน และมีผลให้ค่า Factor loading มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

2) Oblique Rotation เป็นการหมุนแกนปัจจัยไปในลักษณะที่แฟกเตอร์ไม่ตั้งฉากกัน หรือไม่เป็นอิสระต่อกันนั่นเอง แต่จะมีผลให้ค่า Factor loading มากขึ้นหรือลดลง

เมื่อผ่านการหมุนแกนปัจจัยแล้ว จะทำให้ค่า Factor loading ของตัวแปรชัดเจนขึ้น จึงทำให้สามารถจัดตัวแปรให้อยู่ในแต่ละแฟกเตอร์ได้ชัดเจนมากขึ้น

#### 5.4 เงื่อนไขของเทคนิค Factor Analysis

5.4.1 ค่า Factor (F) และ error (e) ในสมการจะต้องเป็นอิสระกัน

5.4.2 ตัวแปรที่นำมาจัดกลุ่มควรเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ และกรณีที่มีตัวแปรเชิงกลุ่มผสมอยู่ด้วย จะต้องเปลี่ยนตัวแปรเชิงกลุ่มให้อยู่ในรูปตัวแปรเทียม (Dummy variable) ก่อน

5.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์และตัวแปรจะอยู่ในรูปเชิงเส้นเท่านั้น

5.4.4 สำหรับเทคนิค Principle component analysis ตัวแปรแต่ละตัว หรือข้อมูลไม่จำเป็นต้องมีการแจกแจงแบบปกติ แต่ถ้าตัวแปรบางตัวมีการแจกแจงเบ้ค่อนข้างมาก และมีค่าผิดปกติ ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะไม่ถูกต้อง

5.4.5 จำนวนข้อมูล (case) ควรมากกว่าจำนวนตัวแปร โดยควรมีค่ามากกว่าอย่างน้อย

10 เท่า