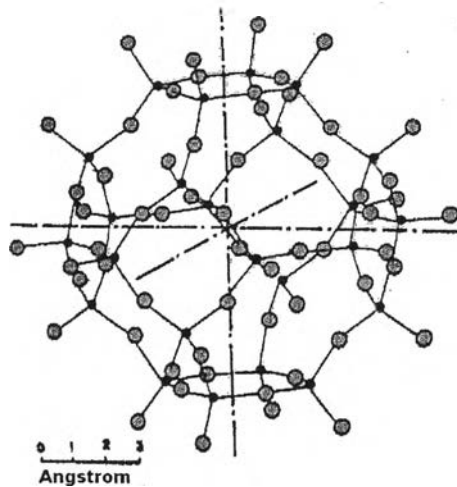


## บทที่ 2

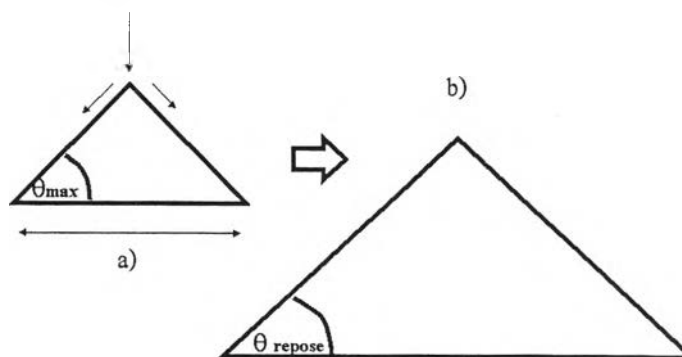
### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ธรรมชาติของทราย

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของทรายคือซิลิกอนไดออกไซด์ มีโครงสร้างเป็นเททโรซิลิเกต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 เป็นผลึกแบบเฮกซะโกนอล ผิวของทรายประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล<sup>[4]</sup> ซึ่งมีความเป็นขั้วลบอย่างอ่อน ทำให้ทรายมีสมบัติเป็นดินประเภทไม่มีแรงยึด ทรายแห้งจึงมีสมบัติสำคัญคือมีมุมสูงสุดของความชันผิวที่จะทำให้กองทรายเสถียร โดยไม่ว่าจะใส่ทรายเพิ่มเข้าไปให้สูงขึ้นเท่าไร ความชันผิวก็จะไม่เพิ่มขึ้นเพราะทรายที่ผิวจะพังทลายลงมาจนเหลือความชันผิวที่มุมสูงสุดเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

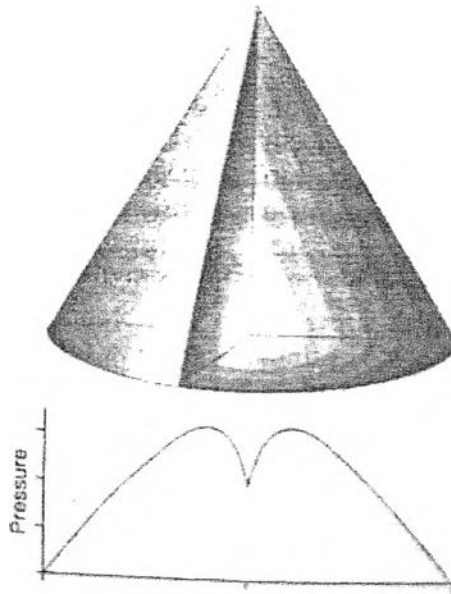


รูปที่ 2.1 โครงสร้างเททโรซิลิเกตของทราย<sup>[5]</sup>



รูปที่ 2.2 มุมสูงสุดของความชันผิวของทรายที่เสถียร<sup>[6]</sup>

เนื่องจากการถ่ายน้ำหนักของแต่ละเม็ดทรายมีทิศทางเฉียงออกไปสู่ผนังกองทรายซึ่งแสดงในรูป 2.3 ทำให้ผิวกองทรายที่แห้งไม่สามารถตั้งชันได้<sup>[7, 8]</sup>



รูปที่ 2.3 ทิศทางของแรงที่เกิดจากมวลของทราย<sup>[7]</sup>

## 2.2 แรงหรือพันธะที่เกี่ยวข้อง

แรงหรือพันธะที่เกิดขึ้นในประติมากรรมทรายคือแรงวัลเดอรัวาล ซึ่งประกอบไปด้วยแรงไดโพลไดโพล แรงลอนดอนและพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมีแรงไอออนไดโพลเกิดขึ้นเมื่อมีสารละลายเข้ามาเกี่ยวข้อง แรงดังกล่าวทั้งหมดนี้เกิดจากแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากส่วนของความเป็นบวกและลบของสารกระทำต่อกันดังนี้

1) แรงไอออนไดโพลเกิดในสารละลายของโมเลกุลมีขั้วที่มีตัวถูกละลายแตกเป็นไอออนอยู่ เป็นแรงที่กระทำกันระหว่างไอออนกับประจุที่ปลายของโมเลกุลมีขั้ว ซึ่งโมเลกุลมีขั้วจะมีทั้งปลายที่แสดงขั้วบวกและปลายที่แสดงขั้วลบ การคิดประจุในโมเลกุลมีขั้วหาได้จากค่าไดโพลโมเมนต์ ไอออนประจุบวกจะดึงดูดกับขั้วลบของโมเลกุล เช่นเดียวกับไอออนประจุลบก็จะดึงดูดกับขั้วบวกของโมเลกุล แรงที่กระทำต่อกันขึ้นกับประจุของไอออน ( $Q$ ) ไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุล ( $\mu$ ) และระยะทางจากศูนย์กลางของไอออนไปยังกึ่งกลางระหว่างขั้วของโมเลกุล ( $d$ ) ดังแสดงในสมการดังนี้

$$E \propto Q\mu/d^2$$

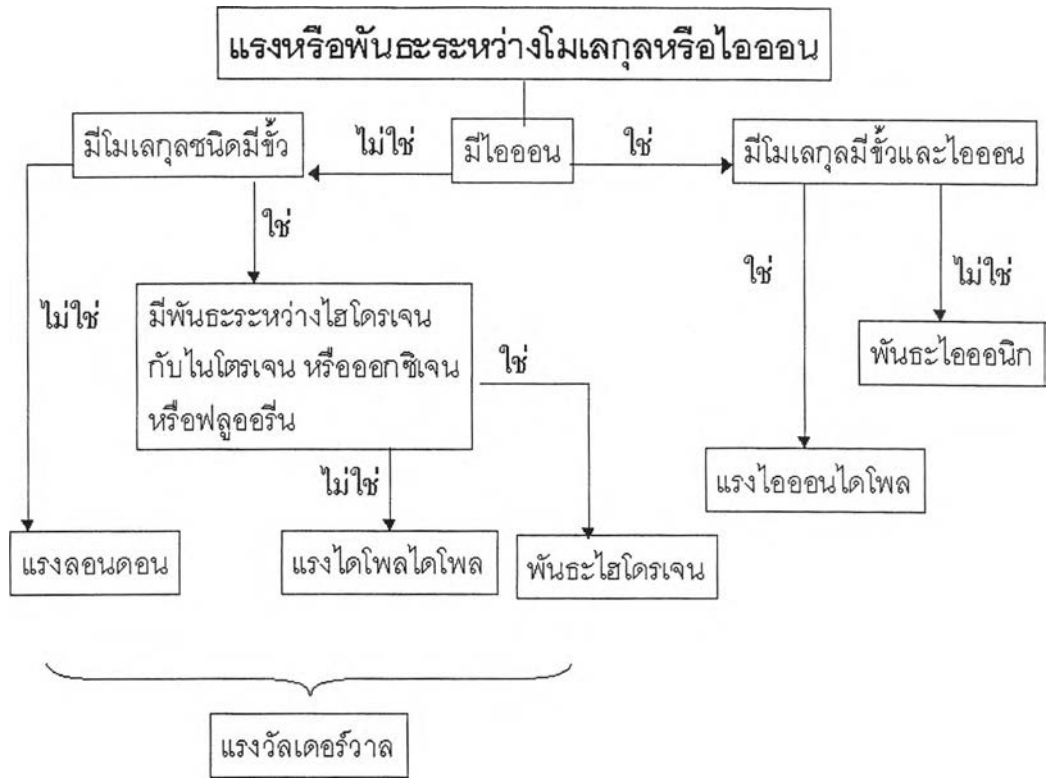
2) แรงไดโพลไดโพลเป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วดึงดูดกันด้วยขั้วตรงกันข้าม ซึ่งแรงนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อโมเลกุลดังกล่าวอยู่ชิดกันมากๆ เท่านั้น แรงไดโพลไดโพลจะอ่อนกว่าแรงไอออนไดโพล โมเลกุลที่มีขั้ว 2 แบบในของเหลวจะหมุนเป็นอิสระ บางครั้งเกิดแรงดึงดูดและบางครั้งก็เกิดแรงผลักดันในแนวการเรียงตัวต่อกันและแนวการเรียงตัวขนานกัน ผลของแรงที่เกิดขึ้นโดยรวมจะเป็นแรงดึงดูด กรณีที่โมเลกุลมีมวลและขนาดเท่ากันแรงดึงดูดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ขั้วเพิ่มขึ้น

3) แรงลอนดอนเกิดในโมเลกุลหรืออะตอมที่ไม่มีขั้ว เกิดจากการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนที่สร้างไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวขึ้นมาขับพลังจากอิทธิพลของอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง แรงลอนดอนเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อเวลาโมเลกุลอยู่ชิดกันมากๆ ซึ่งแรงนี้สามารถถูกทำลายโดยสนามแม่เหล็กภายนอก แรงลอนดอนเพิ่มขึ้นตามขนาดของโมเลกุล เนื่องจากขนาดของโมเลกุลและมวลจะมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นแรงลอนดอนจึงเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น

4) พันธะไฮโดรเจนเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง เป็นแรงที่เกิดขึ้นเฉพาะกับโมเลกุลที่มีพันธะมีขั้วของไฮโดรเจนอะตอมกับไนโตรเจน ออกซิเจนหรือฟลูออรีนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ เนื่องจากไฮโดรเจนขนาดเล็กและไม่มีชั้นอิเล็กตรอนภายในมาขวางความใกล้ชิดนี้ทำให้ขั้วลบดึงดูดไฮโดรเจนได้อย่างแข็งแรง

น้ำอยู่ในรูปของหยดน้ำเมื่ออยู่บนพื้นผิวที่มีความมัน ลักษณะของพื้นผิวดังกล่าวเกิดจากการปรับสมดุลของแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของน้ำ โมเลกุลของน้ำภายในหยดนั้นกระทำต่อกันทุกทางด้วยแรงที่เท่ากัน ทำให้โมเลกุลของน้ำที่ผิวหยดน้ำถูกแรงดึงเข้าไปข้างใน หยดน้ำจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดที่ปริมาตรนั้น แรงที่ดึงเข้าไปนี้จะส่งผลให้โมเลกุลน้ำชิดอัดกันแน่น แรงที่เกิดขึ้นจากการกระจายผิวของน้ำออกไปเรียกว่าแรงตึงผิว แรงตึงผิวหมายถึงพลังงานที่ของเหลวต้องการใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเช่น แรงตึงผิวของน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่า  $7.29 \times 10^2$  จูล/ ตารางเมตร หมายความว่าน้ำจะต้องใช้พลังงาน 7.29 จูลในการทำให้พื้นที่ผิวของน้ำกระจายเป็นบริเวณ 1 ตารางเมตร น้ำมีแรงตึงผิวสูงเป็นผลมาจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจน แรงที่ดึงดูดกันเองระหว่างโมเลกุลเดียวกันนี้เรียกว่าแรงโคฮีซีฟ และแรงที่ยึดระหว่างวัสดุที่ต่างกันเรียกว่าแรงแอดฮีซีฟ น้ำในหลอดแก้วมีแรงยึดกับแก้วเนื่องจากแรงแอดฮีซีฟระหว่างน้ำและแก้ว ผิวของน้ำชั้นบนจะเว้าลงเป็นรูปตัวยู (U) เนื่องจากแรงแอดฮีซีฟมากกว่าแรงโคฮีซีฟ ทั้งประติมากรรมทราย

ถูกยึดด้วยแรงตึงผิว พื้นที่ผิวของทรายมีมากพอที่แรงของน้ำจะยึดมันไว้ด้วยกันได้ แรงยึดระหว่างโมเลกุลภายในของทรายมีสมดุลทางไฟฟ้าเป็นกลางและความสมดุลทางไฟฟ้าจะลดลงเมื่อใกล้ผิวทรายโดยจะเกิด surface free energy ขึ้น ซึ่งจะไปทำลายแรงที่ยึดกันระหว่างโมเลกุล ลักษณะดังกล่าวพบในสารอินทรีย์บริสุทธิ์ซึ่งจะมีค่าพลังงานผิวมาก โดยวัดได้จากแรงตึงผิวที่มีค่ามากกว่า 200 ไดน์/ ตารางเซนติเมตร การรักษาสมดุลของผิวของวัสดุที่มี surface free energy สูงๆจะดูดซับความชื้นในอากาศมาเป็นชั้นฟิล์ม เนื่องจากสารอินทรีย์เช่นน้ำจะมีแรงตึงผิวต่ำกว่า 100 ไดน์/ ตารางเซนติเมตรจะช่วยลดพลังงานผิวให้น้อยลงมากที่สุดจนถึงจุดสมดุลทางไฟฟ้าของผิวทราย สมบัติของผิวทรายที่ปรากฏเป็นของหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากผิวฟิล์มของน้ำ เมื่อทรายสัมผัสกับน้ำ น้ำจะแสดงลักษณะของกรดและเบสที่ตรงข้ามกับผิวของทรายทำให้เกิดความเป็นกลางพบว่าแรงตึงผิวจะเปลี่ยนแปลงตามชั้นความหนาของฟิล์มที่อยู่บนผิวทรายเช่นแรงตึงผิวของน้ำบนวัสดุพลังงานผิวสูงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.6-95 % จะมีค่าอยู่ระหว่าง 45 ไดน์/ ตารางเซนติเมตร ลดลงถึง 36 ไดน์/ ตารางเซนติเมตร เมื่ออนุภาคทรายมีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงที่กระทำกันระหว่างน้ำและอนุภาคทรายเพิ่มขึ้นตาม ในโครงสร้างหลักของประติมากรรมทราย จะเกิดปรากฏการณ์คาปิลารีคือการที่น้ำพยายามลดพื้นที่ผิวของตัวมัน ประกอบกับส่วนของผิวทรายที่สัมผัสกับน้ำมีพลังงานผิวมากกว่าจึงพยายามดึงน้ำให้แผ่บนพื้นผิวเพื่อลดพลังงานผิวลง ทำให้แรงตึงผิวของน้ำนั้นดึงทรายให้เข้ามาชิดกัน จึงทำให้เกิดความแข็งแรงสามารถตั้งอยู่ได้ การที่ช่องระหว่างทรายเล็กลงทำให้ปริมาณของน้ำลดลงสามารถถูกดึงไปทั่วทั้งกองทรายจนถึงจุดที่สมดุลกับแรงตึงดูดของโลก แต่เนื่องจากมีอัตราการระเหยที่ผิวของกองทรายมากกว่าอัตราของน้ำที่ถูกดูดขึ้นมาทดแทนเนื่องจากความร้อนของแสงแดดและแรงลมตลอดเวลา บริเวณผิวของทรายจึงทลายลงเพราะไม่มีน้ำมาช่วยยึดไว้<sup>[9]</sup> เมื่อพ่นกาวทับไว้ กาวจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดทรายแทนน้ำแรงหรือพันธะที่เกิดขึ้นบนผิวของประติมากรรมทรายเมื่อพ่นกาวสามารถพิจารณาได้จากแผนผังในรูปที่ 2.4 น้ำกาวจะยึดทรายไว้ด้วยแรงคาปิลารีเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีกาว แรงหรือพันธะระหว่างน้ำกาวและทรายเป็นแรงไอออนไดโพลเพราะมีไอออนของเกลือกระทำกับหมู่ไฮดรอกซิลของผิวทรายและโมเลกุลของกาว น้ำทะเลจะให้ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักดีกว่าน้ำประปา<sup>[11]</sup> เมื่อน้ำระเหยไปกาวจะแห้งกลายเป็นของแข็งยึดทรายด้วยแรงวัลเดอรัวาลทั้งแรงไดโพลไดโพลแรงลอนดอนและพันธะไฮโดรเจน รวมทั้งความแข็งแรงของเนื้อกาวที่เกิดจากสายโมเลกุลที่พันกัน ความแข็งแรงของกาวจึงมากกว่าแรงคาปิลารี เมื่อปริมาณกาวเพิ่มขึ้นทำให้กาวมีจำนวนแรงหรือพันธะยึดเพิ่มขึ้นตามจุดสัมผัสของกาวและทรายที่เพิ่มขึ้น<sup>[12]</sup>



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงแรงหรือพันธะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของประติมากรรมทราย<sup>[10]</sup>

## 2.3 การใช้กาวในงานประเภทต่างๆ

กาวถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการยึดอนุภาคดินทรายในจุดมุ่งหมายต่างกัันดังนี้

มีการนำเจลาตินผสมกับแป้ง เกลือ และทราย เพื่อใช้ในการสร้างปราสาททรายด้วยวิธีการผสมหัวทั้งกองทราย<sup>[13]</sup>

ในงานปั้นแบบ<sup>[14]</sup>มีการใช้กาวหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1

### ตารางที่ 2.1 ชนิดของกาวที่ใช้ในงานปั้น

Polymers used for malleable sand	Referent Patent no.
Manogalactan gum	3384498
Poly(vinyl alcohol)	3632786 3886112 5171766 5506290 5873933
Hydrocarbon petroleum wax	3804654 5374384 5711795 <sup>[15]</sup>
Cellulose ether and ceresin wax	4336071
Salt of carboxymethylcellulose	3873485 4618491 2541851
Crosslink guar gum	4735660
Guar gum	5258068
Crosslink sodium alginate	5310421

ในงานหล่อโลหะ<sup>[14]</sup>มีการใช้กาวหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.2

### ตารางที่ 2.2 ชนิดของกาวที่ใช้ในงานหล่อโลหะ

Polymers used for sand cast mold	Referent Patent no.
Phenolic	4459375 4459377 4460716
Alkali metal phosphate modified starch	3977236
Pullulan binder	4080213
Polyurethane	4231914

ในงานปรับปรุงความแข็งแรงของถนน<sup>[11,16]</sup> มีการใช้ 2% ของซิลิโคนพอลิเมอร์เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ และยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์กับไซเดียมคลอไรด์ 25%

ในงานป้องกันผิวหน้าดินทราย<sup>[17]</sup> มีการใช้ซิลิโคนที่มีไซเดียมลิโนซิลโฟเนทผสมอยู่กับซิลิโคนที่มีโพลิโกลิเมอร์ไฮเทอโรไซลอกซาโนเลข

ในงานสร้างผนังป้องกันมลพิษ<sup>[18]</sup> มีการใช้ซิลิกาในลักษณะของคอลลอยด์ และมีการศึกษาสมบัติเชิงกลของซิลิเกตเกรดที่แซนด์ โดยใช้ไฮเดรท โซเดียมซิลิเกต 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 40 เปอร์เซ็นต์และรีเอเจนท์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยที่รีเอเจนท์คือเอทิลอะซิเทตผสมกับฟอร์มามายดีในอัตราส่วนที่เท่ากัน<sup>[19]</sup>

## 2.4 กาวที่เลือกใช้ในงานวิจัย

กาวสมบัติของกาวที่ต้องการในงานวิจัยนี้คือ

1) ไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม โดยใช้กาวสูตรน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นพิษจากตัวทำละลาย และเมื่อถูกปล่อยเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจะย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์เล็ก ๆ ที่ไม่เป็นพิษกับแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม

2) สามารถเตรียมให้ได้ความหนืดต่ำพอที่จะใช้การฉีดพ่นให้เปียกทั่วบริเวณชั้นผิวของประติมากรรมทราย และไม่ขัดขวางแรงคาปิลารีที่เกิดขึ้นในความพรุนของเนื้อทรายที่จะกระจายเนื้อกาวไปทั่วบริเวณ ปกติความหนืดที่ใช้ในการฉีดพ่นที่เหมาะสมแสดงไว้ตามตารางที่ 2. 3 ซึ่งขึ้นกับแรงอัดอากาศที่ใช้ด้วย

### ตารางที่ 2.3 สมบัติการไหลที่ใช้ในงานฉีดพ่น<sup>[20]</sup>

แนวรับของวัสดุ	ความหนืด (poise) : Brookfield 20 rpm	อัตราส่วนของ 2 rpm / 20 rpm
แนวตั้ง	<100 – 300	>3
แนวนอน	<100 – 300	1-2

3) สามารถละลายน้ำได้หลังจากกลายเป็นของแข็งแล้ว เนื่องจากแรงยึดของกาวกับทรายเป็นเพียงแรงวัลเดอร์วาลและกาวยังคงมีหมู่ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นจึงสามารถละลายน้ำได้อีกครั้ง แม้จะกลายเป็นของแข็งแล้ว ยกเว้นพอลิไวนิลอะซิเทตที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ถ้าใช้ใน

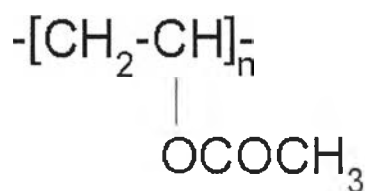
ปริมาณที่เมื่อกาบแห้งแล้วเนื้อกาบไม่มีความต่อเนื่องจนคลุมเม็ดทรายไว้ ความแข็งแรงที่ได้จากเนื้อกาบไม่พอให้เกิดการจับเป็นก้อนแข็งของทรายได้

## 2.5 ชนิดของกาบที่เลือกใช้

### 2.5.1 พอลิไวนิลอะซิเตต

#### 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต

พอลิไวนิลอะซิเตตได้จากการพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคอล การใช้งานตามปกติจะอยู่ในรูปของการกระจายตัวของเนื้อของแข็งในน้ำหรือที่เรียกว่าลาเท็กซ์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลอะซิเตต

#### 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งโดยการระเหยน้ำ<sup>[21]</sup> แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ในขั้นแรกน้ำระเหยด้วยอัตราคงที่จนถึงจุดที่แต่ละหยดของกาบมาชิดกันแน่นโดยมีอัตราส่วนของของแข็งประมาณ 0.74 ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ เพราะระยะห่างใกล้กันมากเกิดความไม่เป็นระเบียบของหยด ขั้นที่ 2 การระเหยของน้ำเริ่มลดลง อนุภาคกาบเริ่มเห็นได้ที่ผิวของลาเท็กซ์ เกิดแรงกระทำที่ด้านการเปลี่ยนรูปร่างของหยดกาบ เนื้อพอลิเมอร์จะมาอยู่ในช่องว่างทำให้หยดกาบเปลี่ยนจากทรงกลมมาเป็นทรงเหลี่ยม 12 หน้า (dodecahedra) ขั้นที่ 3 เกิดการเชื่อมกันที่รอยต่อ โดยสายโซ่พอลิเมอร์แพร่ไปยังหยดกาบข้างๆ พันกันและหยุดเคลื่อนไหวเมื่อน้ำระเหยไปหมดกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้พอลิไวนิลอะซิเตตจะไม่ละลายน้ำอีก

#### 3) ความหนืด

ความหนืดของพอลิไวนิลอะซิเตตขึ้นกับปริมาณของแข็งในน้ำกาบ ที่ความเข้มข้นเนื้อกาบ 50 เปอร์เซ็นต์เนื้อกาบจะจับกันใหญ่กว่าหยดกาบ แต่ในลาเท็กซ์ พอลิเมอร์จะถูกทำให้อยู่



เป็นหยดแยกกันภายในเนื้อของเหลว ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลจึงไม่มีผลต่อความหนืด ปกติพบความเข้มข้นของเนื้อขาวจะอยู่ที่ 35-55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ 55 เปอร์เซ็นต์ความหนืดจะมาก

#### 4) อิทธิพลจากเกลือ

เกลือไม่มีอิทธิพลกับพอลิไวนิลอะซิเตต เนื่องจากโมเลกุลของพอลิไวนิลอะซิเตตมีความเป็นกลางในสารละลาย

#### 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

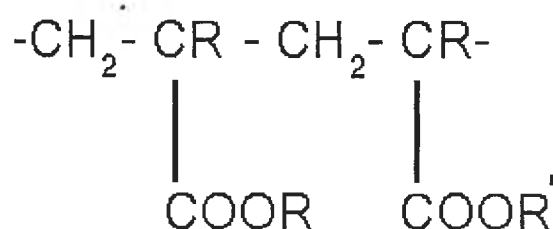
ไม่เป็นพิษ และไม่ย่อยในร่างกาย

#### 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลเชิงเส้นของพอลิไวนิลอะซิเตตทำให้ย่อยสลายได้ง่าย<sup>[36]</sup> โดยจะถูกย่อยสลายไปเป็นโมเลกุลอินทรีย์เล็ก ๆ ที่ไม่รบกวนในการเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เป็นอันตราย และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

### 2.5.2 พอลิอะคริลิกโคพอลิเมอร์

#### 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต

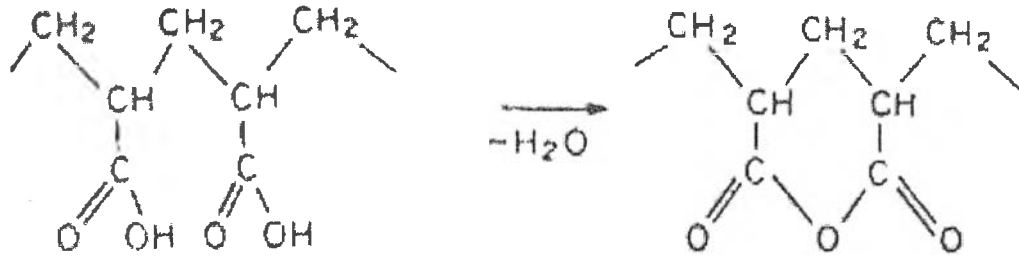


รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิอะคริลิกโคพอลิเมอร์

เมื่อ R เป็น H หรือ CH<sub>3</sub> และ R' เป็น H หรืออัลคิล หรือเมทอลแคทไอออน ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น อะคริลิกแอซิด โมนิวาเลนท์เมทอล และเกลือแอมโมเนียม จะให้พอลิเมอร์ที่ละลายน้ำ พอลิอะคริลิกโคพอลิเมอร์โดยมากใช้งานเป็นกาวและสารเพิ่มความหนืด มีการนำมาใช้เป็นสารปรับสภาพดิน ทำให้ดินยึดกันดี ป้องกันน้ำระเหยจากดินและป้องกันฝนชะหน้าดิน โดยใช้ร่วมกับพอลิออกซีเอทิลีน

## 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งโดยการระเหยน้ำสายโซ่โมเลกุลจะพันกันก่อนที่จะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้พอลิอะคริลิกจะสามารถละลายน้ำได้อีก ยกเว้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นพอลิอะคริลิกแอนไฮดราไรต์ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อะคริลิกพอลิเมอร์หลังจากระเหยน้ำที่อุณหภูมิสูง

## 3) ความหนืด

ความหนืดขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของเนื้อกาว

## 4) อิทธิพลจากเกลือ

เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดประจุในสารละลายอันเป็นผลจากหมู่คาร์บอกซิลิก เกลือจะทำให้สายโซ่หดตัว ความหนืดจึงลดลง

## 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

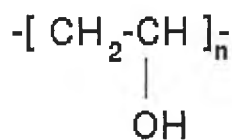
จัดอยู่ในสารก่อมะเร็ง แต่เสถียรที่อุณหภูมิปกติ และระคายเคืองระบบย่อยอาหาร ยังไม่มีการศึกษาถึงอันตราย มีการอนุญาตให้ใช้ภายใต้มาตรฐานอาหารและยาของระบบสากลเลขที่ 175.105

## 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ละลายน้ำ ไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

### 2.5.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

#### 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ได้จากการไฮโดรไลซิสพอลิไวนิลอะซิเตต มีการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ในการปรับปรุงดินเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของหน้าดิน

#### 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งโดยการระเหยน้ำสายไซโมเลกุลจะพันกันก่อนที่จะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถละลายน้ำได้อีก

#### 3) ความหนืด

ความหนืดขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของเนื้อกา

#### 4) อิทธิพลจากเกลือ

ทนต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์

#### 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

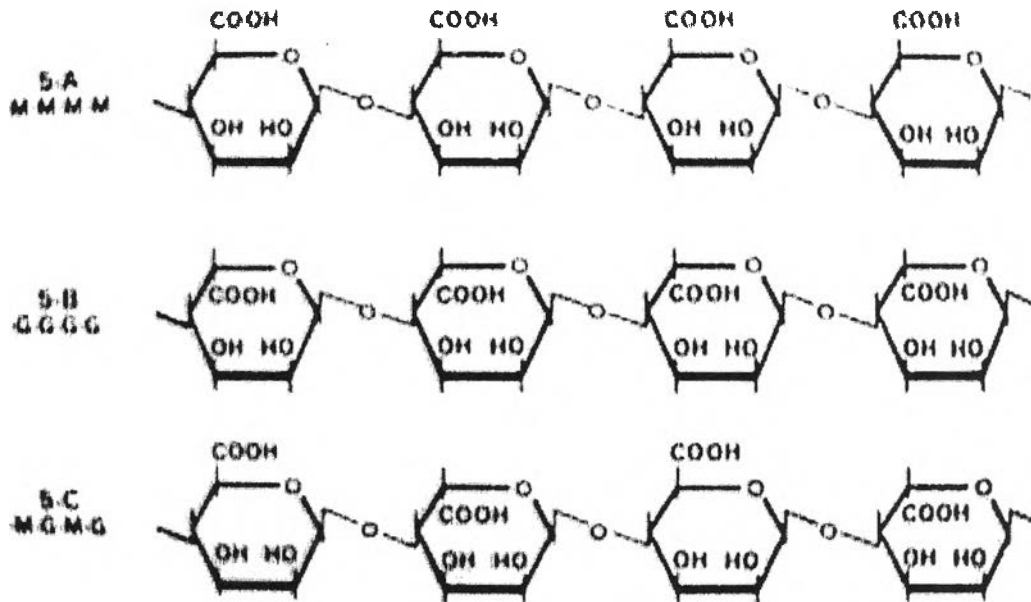
ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการแพ้ มีการอนุญาตให้ใช้ภายใต้มาตรฐานอาหารและยาของระบบสากลเลขที่ 175.105

#### 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ละลายน้ำ ให้ค่าบีโอดีหรือค่าออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิกรัมใช้ ออกซิเจน 0.02 มิลลิกรัมในเวลา 20 วัน ไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

## 2.5.4 อัลจีเนท

### 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของอัลจีเนท

อัลจีเนทเป็นเกลือของพอลิแซคคาไรด์ไกลคูโรแนน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยดีแมนูโรนิกและแอลกูดูโรนิกแอซิดซึ่งได้จากสาหร่ายทะเล

### 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งเริ่มต้นจากโครงสร้างสามมิติที่อุ้มน้ำ จากนั้นโดยการระเหยน้ำจะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้อัลจีเนทจะสามารถละลายน้ำได้อีก

### 3) ความหนืด

ความหนืดของอัลจีเนทมีค่าสูง เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงและโครงสร้างโมเลกุลที่แข็ง เนื่องจากการขีดพันต้องการความหนืดที่ต่ำจึงควรเตรียมสารละลายอัลจีเนทโดยใช้อัตราเร็วในการผสม 1- 100 รอบต่อนาที สารละลายที่ได้จะมีลักษณะเป็นนิวโทเนียน

### 4) อิทธิพลจากเกลือ

เกลือจะลดความหนืดของสารละลายอัลจีเนท

## 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

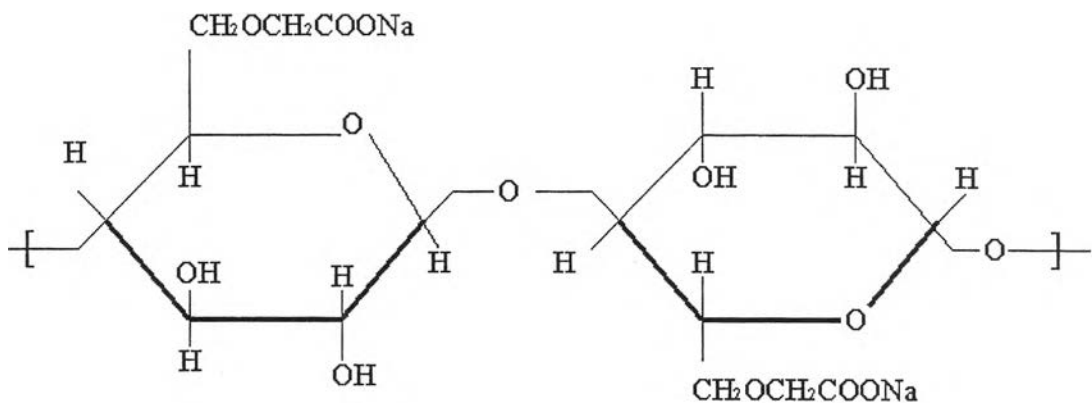
ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารได้โดยตรง ไม่ย่อยในระบบย่อยอาหารของร่างกาย

## 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ละลายน้ำ ให้ค่าบีโอดีหรือค่าออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายทางชีวภาพ อัลจีเนท 1 กรัมให้ ออกซิเจน 285 มิลลิกรัมในเวลา 5 วัน เนื่องจากกฎกระทรวงอนุญาตให้ปล่อยน้ำเสียที่มีค่าบีโอดี ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือขึ้นกับบริเวณแต่ต้องไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร อัลจีเนทเข้มข้น 0.2 กรัมจึงสามารถปล่อยสิ่งแวดล้อมได้ อัลจีเนทไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

## 2.5.5 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

## 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นชนิดแอนไอออนิก ประกอบด้วยเบตาแอนไฮโดรกลูโคส ได้จากการทำปฏิกิริยาของผงอัลฟาเซลลูโลสกับคอสติกโซดาไลย์ในตัวกลางเมทานอลภายใต้บรรยากาศเฉื่อยจะได้อัลคาไลด์เซลลูโลส จากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยากับโมโนคลอโรอะซิติกแอซิด

## 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งโดยการระเหยน้ำสายโซ่โมเลกุลจะพันกันก่อนที่จะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะสามารถละลายน้ำได้อีก

## 3) ความหนืด

ความหนืดของไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของเนื้อขาว ความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนเนื่องจากเป็นซูโดพลาสติก

## 4) อิทธิพลจากเกลือ

เกลือทำให้ความหนืดของสารละลายไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดลง การใส่ไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในสารละลายเกลือจะมีผลต่อความหนืดมากกว่าการใส่เกลือลงในสารละลายไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

## 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการแพ้ ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและยาโดยตรง

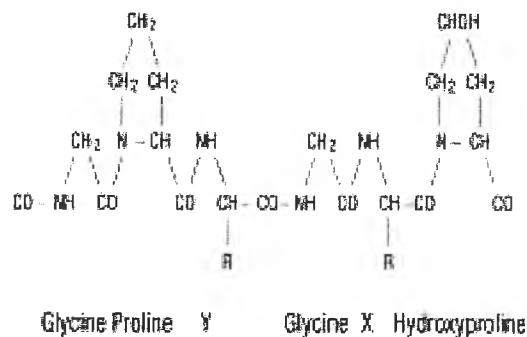
## 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ละลายน้ำ ให้ค่าบีโอดีหรือค่าออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 1 มิลลิกรัมใช้ ออกซิเจน 10 ส่วนในล้านส่วน ในเวลา 5 วัน ไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

## 2.5.6 เจลาติน

## 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต

เจลาตินเป็นพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงประเภทโปรตีน ได้จากเอ็น กระดูก และหนังสัตว์ ประกอบด้วยกรดอะมิโนของไกลซีน โพรลีนและไฮโดรโพรลีนเรียงกันทำให้เกิดโครงสร้างแบบทริปปเปิลเฮลิก ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดเจล



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของเจลาติน<sup>[23]</sup>

## 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

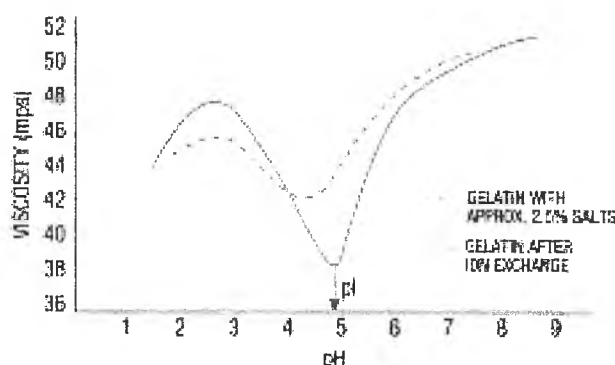
ความหนืดของเจลาตินจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปจนกลายเป็นเจล จากนั้นเมื่อระเหยน้ำ เจลาตินจะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้เจลาตินจะสามารถละลายน้ำได้อีก

## 3) ความหนืด

ความหนืดของเจลาตินขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของเจลาติน นอกจากนี้ความหนืดจะลดลงเมื่อให้ความร้อนแก่เจลาติน

## 4) อิทธิพลจากเกลือ

เกลือทำให้ความหนืดของสารละลายเจลาตินเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่พีเอช 5.0 ซึ่งเป็นค่าของน้ำกาวที่เตรียมได้จากเจลาติน ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของเกลือที่มีผลต่อความหนืด<sup>[23]</sup>

## 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

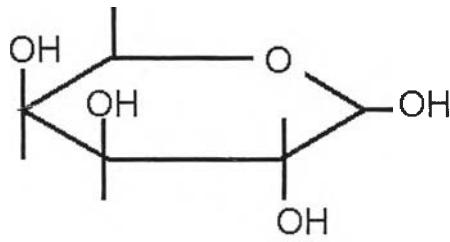
ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการแพ้ ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและยาโดยตรง

## 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

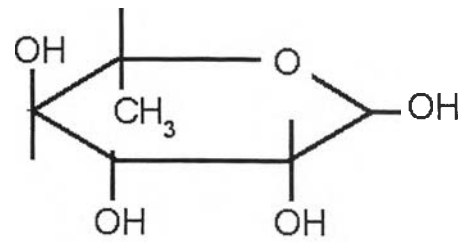
ย่อยสลายได้ ไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

## 2.5.7 กัมอะราบิก

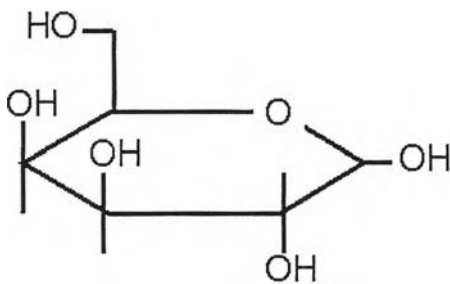
### 1) โครงสร้างโมเลกุลและการผลิต



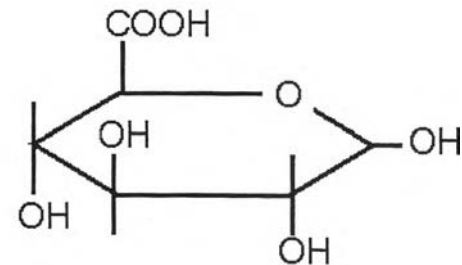
L-arabinose



L-rhamnose



L-galactose



D-glucuronic acid

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสารในโมเลกุลของกัมอะราบิก<sup>[24]</sup>

ได้จากน้ำยางของต้น *Acacia senegal* โมเลกุลสั้น เป็นเกลียวแข็งและมีหมู่แทนที่จำนวนมาก ประกอบด้วย แอลอะราบิโนส แอลแรมโนส แอลกาแลกโตสและดีกลูคูโรนิกแอซิด

### 2) การเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

การเปลี่ยนไปเป็นของแข็งโดยการระเหยน้ำ สายไซโมเลกุลจะพันกันก่อนที่จะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งหลังจากนี้กัมอะราบิกจะสามารถละลายน้ำได้อีก

### 3) ความหนืด

ความหนืดของกัมอะราบิกขึ้นกับความเข้มข้น ความหนืดค่อนข้างต่ำแม้ความเข้มข้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ จะให้สมบัติการไหลเป็นแบบนิวโทเนียน



## 4) อิทธิพลจากเกลือ

เกลือทำให้ความหนืดของสารละลายกัมอะราบิกลดลง

## 5) ความเป็นพิษต่อผู้ใช้

ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการแพ้ ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและยาโดยตรง

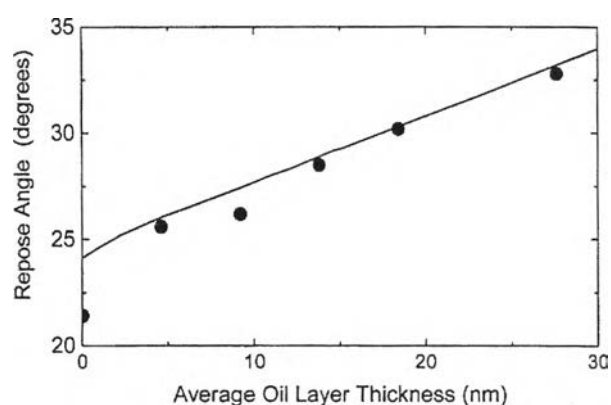
## 6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ย่อยสลายได้ ไม่อยู่ในขอบเขตของการกำจัดสารพิษในอุตสาหกรรม และไม่พบในรายชื่อสารอันตรายที่ระบุไว้ในกฎหมาย

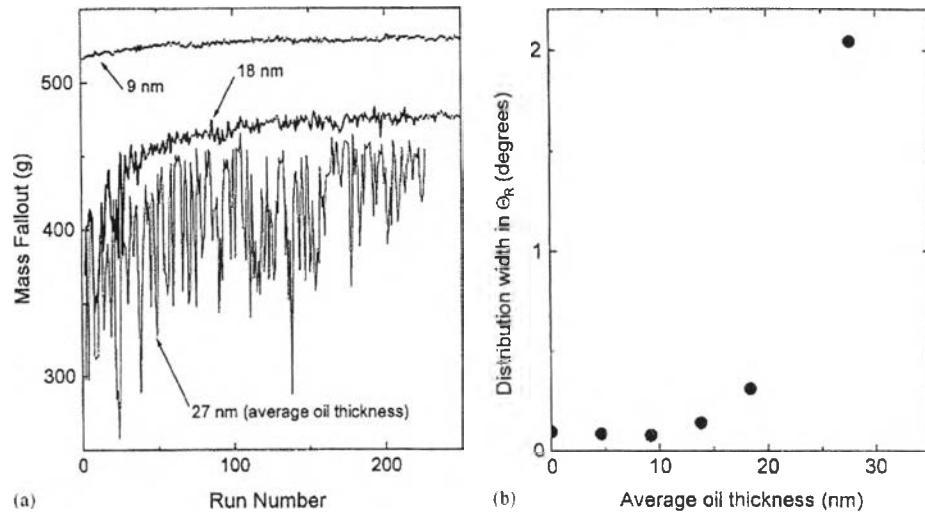
## 2.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างประติมากรรมทราย

การอัดตัวของทรายที่แน่นจะทำให้ช่องว่างระหว่างทรายลดลง ทำให้การแพร่ของน้ำไปตามช่องว่างเป็นไปได้ดียิ่งขึ้นอนุภาคและทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวด้วยแรงคาปิลารีดีขึ้น

งานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติสูงสุดของความชันผิวที่เกิดขึ้นในปราสาททราย<sup>[25,26]</sup> โดยใช้แบบจำลองของเม็ดแก้วและชั้นน้ำมัน พบว่าเมื่อความหนาของชั้นของเหลวในระดับนาโนเมตรเพิ่มขึ้น คุณสมบัติสูงสุดของความชันผิวจะเพิ่มขึ้นตามรูป 2.14 ความหนาของชั้นของเหลวที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกาะตัวของกลุ่มเม็ดทรายเพิ่มขึ้นแสดงในรูป 2.15

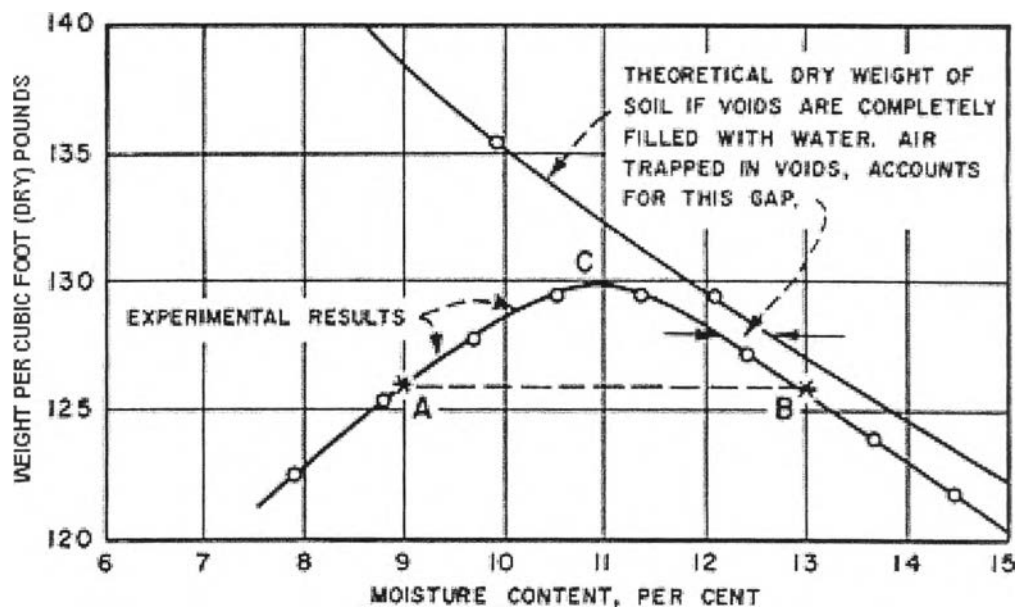


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นของเหลวและคุณสมบัติสูงสุดของความชันผิว<sup>[25]</sup>



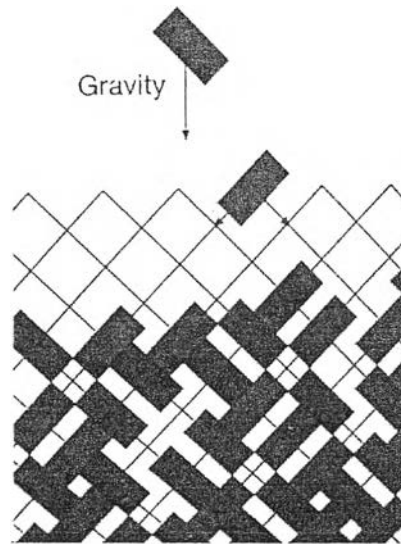
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของการเกาะกลุ่มของอนุภาคและความหนาของชั้นฟิล์ม<sup>[25]</sup>

ตามทฤษฎีเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในเนื้อทราย ความหนาแน่นของเนื้อทรายจะหลวมขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแรงคาปิลารีจะดึงอนุภาคทรายให้มาชิดกันทำให้ความหนาแน่นเนื้อทรายเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำที่ให้แรงคาปิลารีสูงสุดจะได้ความหนาแน่นเนื้อทรายสูงสุด ปริมาณน้ำที่เพิ่มจากจุดนี้ไปจะลดความหนาแน่นของเนื้อทราย ชิดจำกัดของปริมาณน้ำเกิดจากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มขึ้น แรงตึงผิวไม่พอที่จะทำให้เกิดแรงคาปิลารี<sup>[27]</sup> ตามรูปที่ 2.16

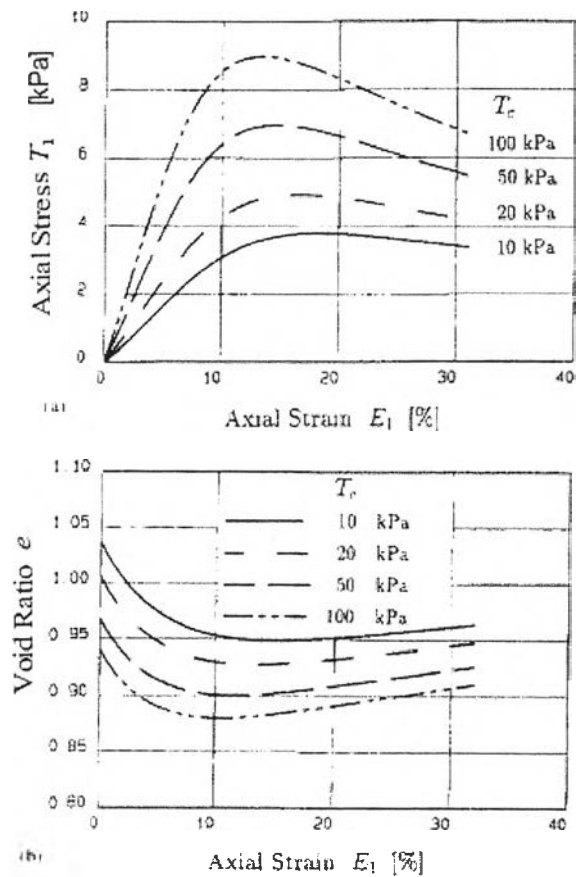


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเนื้อทรายกับปริมาณน้ำในทราย<sup>[27]</sup>

การสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคทรายมีการจัดตัวในลักษณะที่ทำให้ระบบมีพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งมีผลต่อการอัดตัวของเนื้อทราย โดยลดปริมาณรวมและเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อทราย ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของอนุภาคในลักษณะของเททริส<sup>[8]</sup>

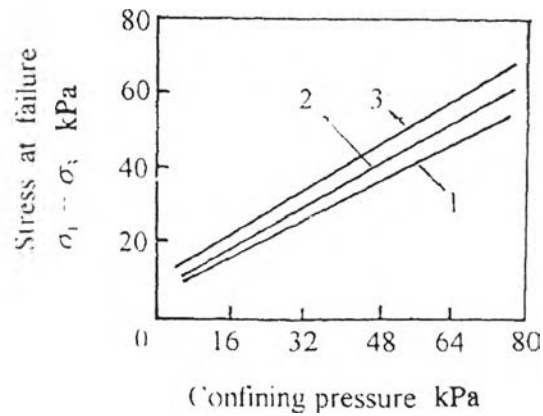


รูปที่ 2.17 แบบจำลองเททริส<sup>[8]</sup>



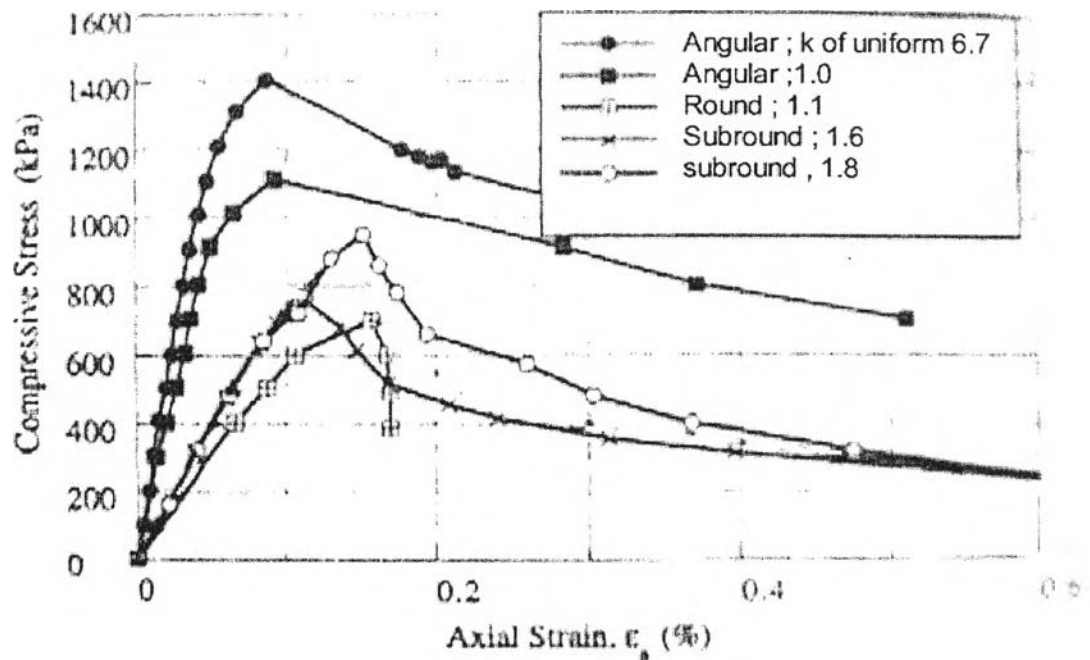
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของความเค้นและอัตราส่วนของช่องว่างที่ใช้แรงกดอัดต่างกัน<sup>[28]</sup>

การอัดตัวของเนื้อทรายมีผลมาจากแรงกดอัด การใช้แรงกดอัดที่มากกว่าเนื้อทรายจะมีความหนาแน่นมากกว่า เส้นกราฟของความเค้นจะมากกว่าซึ่งแสดงในรูป 2.18 เมื่อใช้แรงกดอัดที่มากเนื้อทรายจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น<sup>[28]</sup>



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของความเค้นที่จุดแตกหักและแรงกดอัดที่อัตราส่วนของช่องว่างต่างกัน เส้นกราฟที่ 1, 2 และ 3 มีอัตราส่วนช่องว่างคือ 1.000, 0.853 และ 0.699 ตามลำดับ<sup>[29]</sup>

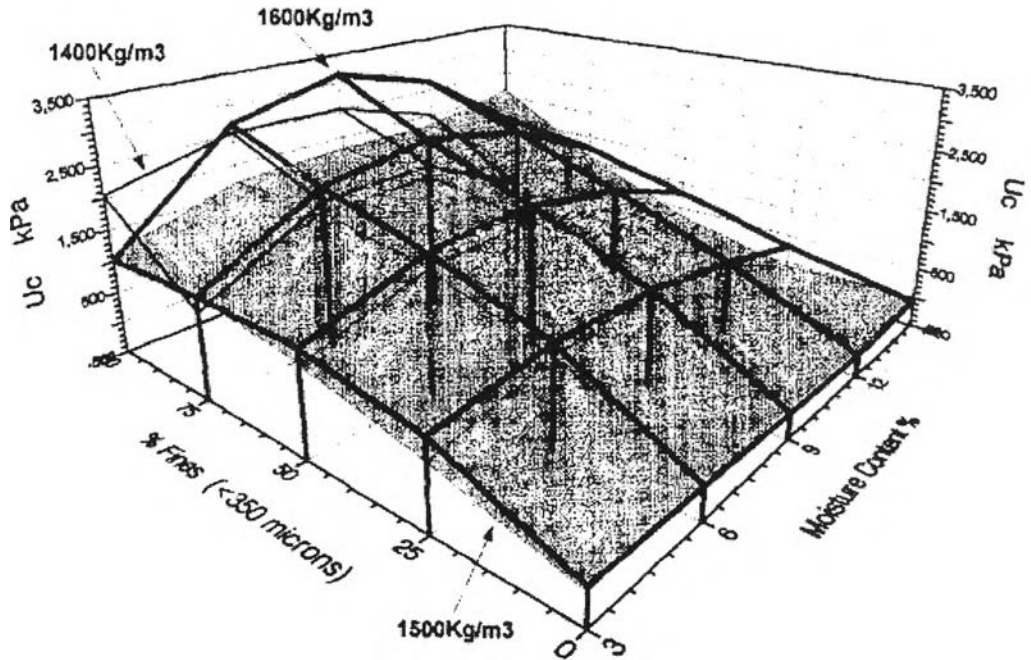
จากรูปที่ 2.19 ที่แรงกดอัดเดียวกัน อัตราส่วนของช่องว่างที่มากกว่าจะให้ค่าความเค้นที่จุดแตกหักต่ำกว่า<sup>[29]</sup>



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของทรายต่างชนิดกัน<sup>[19]</sup>

การคละกันของทรายหลายขนาดและรูปร่างของเม็ดทรายที่เป็นเหลี่ยมมุมช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงกด<sup>[19]</sup> ดังแสดงในรูป 2.20

จากรูปที่ 2.21 เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดทราย ปริมาณน้ำและแรงกดอัด ซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดของแต่ละพื้นผิว<sup>[30]</sup>



รูปที่ 2.21 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงกด<sup>[30]</sup>

## 2.7 การควบคุมตัวแปรในการทดลอง

เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของกาวที่ยึดอนุภาคทราย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความต้านทานการทนแรงกดของชิ้นงานทดสอบเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของกาว ชิ้นงานทดสอบจะประกอบด้วยกาวและทรายโดยไม่มีน้ำ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบเป็นตัวแทนของผิวผนังประติมากรรมทรายที่แห้ง เมื่อให้แรงกดชิ้นงานทดสอบ เนื้อทรายจะถูกอัดให้แน่นขึ้น ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่แรงกดทำให้เกิดแรงเฉือนทำลายกาวที่ยึดทรายภายในชิ้นงานทดสอบ โดยค่าอัตราส่วนของช่องว่างในเนื้อทรายจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงานเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นค่าความเค้นจะเริ่มลดลงจนถึงจุดที่แตกหัก จุดสูงสุดของความเค้น ( $\sigma$ )

เป็นค่าความต้านทานแรงกดซึ่งใช้เป็นตัวแทนความแข็งแรงของกาวที่ใช้ยึดทรายเข้าด้วยกัน หาได้จากแรงที่ให้ชิ้นงาน (P) บนพื้นที่ผิวชิ้นงาน (A) ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = P/A$$

ความแข็งแรงของชิ้นงานประกอบด้วยความแข็งแรงของเนื้อทรายที่อัดตัว และความแข็งแรงของกาวที่ยึดทราย เพื่อให้แน่ใจว่าความแข็งแรงของเนื้อทรายที่อัดตัวจะต้องไม่มากกว่าความแข็งแรงของกาวที่ยึดทราย จึงเลือกการอัดตัวของชิ้นงานที่มีความหนาแน่นของเนื้อทรายอยู่ระหว่างความหนาแน่นของทรายแห้งที่อัดตัวกันได้แน่นและความหนาแน่นของทรายแห้งที่อัดตัวกันได้หลวม

เนื่องจากไม่พบเครื่องมือที่สามารถให้แรงต่ำๆ เพื่อไม่ให้เกิดการอัดตัวของทรายที่แน่นเกินไป จึงควบคุมการอัดตัวของทรายด้วยการควบคุมน้ำหนักของทรายที่ถูกอัดในแม่พิมพ์ให้มีปริมาตรคงที่

เนื่องจากการขึ้นรูปต้องอาศัยน้ำ จากขีดจำกัดของปริมาณน้ำในทรายที่จะส่งผลกระทบต่อ การอัดตัวของทราย จึงควบคุมปริมาณน้ำกาวที่ผสมในทรายให้คงที่

เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถเตรียมกาวได้ที่ความหนืดที่ต้องการภายใต้สภาวะของสารละลายเกลือ จึงเลือกใช้น้ำทะเลจากแหล่งเดียวกัน