

ผลของตัวแปรในกระบวนการโซลเจลต่อสมบัติของฟิล์ม
TEOS-SiO₂-PDMS

นางสาวธิดารัตน์ เจริญแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**EFFECT OF SOL-GEL PROCESSING
PARAMETERS ON PROPERTIES OF TEOS-SiO₂-
PDMS FILM**

Thidarat Prertkaew

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

ผลของตัวแปรในกระบวนการโซลเจลต่อสมบัติของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษาชั้นปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุเกษม กิ่งวานตระกูล)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.ลดา พันธุ์สุขุมธนา)

กรรมการ

(รศ. ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธิดารัตน์ เพรศแก้ว : ผลของตัวแปรในกระบวนการโซลเจลต่อสมบัติของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS (EFFECT OF SOL-GEL PROCESSING PARAMETERS ON PROPERTIES OF TEOS-SiO₂-PDMS FILM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก, 130 หน้า.

การพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิวเซรามิกให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ มีประโยชน์ช่วยให้พื้นผิวเคลือบเซรามิกสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล โดยการแปรผันปริมาณของซิลิกา (0.5, 5 และ 10 wt%) ขนาดอนุภาค (12 และ 20 nm) และอุณหภูมิที่เผา (300 และ 400 °C) ที่มีผลต่อมุมสัมผัส พลังงานพื้นผิวอิสระ ความสามารถในการให้แสงส่องผ่านและความขรุขระพื้นผิว ใช้โปรแกรม Design expert[®] version 8.0.1 ออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผล ทดสอบความทนทานต่อการขัดสี และหาความต้านทานการเกิดคราบสกปรก จากการทดลองพบว่า ปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา มีผลต่อมุมสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ มีมุมสัมผัสสูงสุด 152° ที่ซิลิกา 10wt% ขนาด 20nm อุณหภูมิการเผา 400°C ปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3mN/m ที่ซิลิกาปริมาณ 10 wt% ขนาด 20 nm อุณหภูมิการเผา 300°C ปริมาณซิลิกาและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณซิลิกาและขนาดของซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 90% ที่ซิลิกาปริมาณ 0.5 wt% ขนาด 20 หรือ 12 nm อุณหภูมิการเผา 300 °C ปริมาณซิลิกามีผลต่อความขรุขระพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบความทนทานต่อการขัดสีฟิล์มบนกระเบื้องจากโรงงานอุตสาหกรรมค่ามุมสัมผัสลดลงจาก 142.13 เหลือ 63.44° เมื่อได้รับการขัดสีจำนวน 2000 รอบและผลการทดสอบการเกิดคราบของฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่ได้ผ่านการทดสอบ จัดอยู่ใน class 4

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

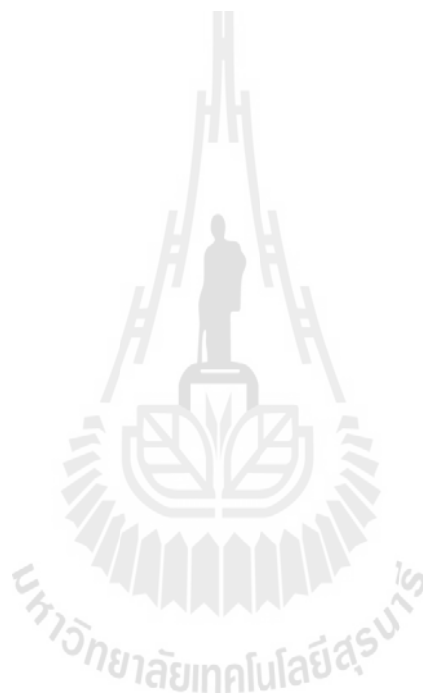
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

THIDARAT PRERTKAEW : EFFECT OF SOL-GEL PROCESSING
PARAMETERS ON PROPERTIES OF TEOS-SiO₂-PDMS FILM. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. SUTHAM SRILOMSOK, D.Eng., 130 PP.

Developed ceramic coating technology with hydrophobic properties. Useful for surface ceramic coating can clean be self cleaning. The research aims to identify the factors that affect the properties of the film. TEOS-SiO₂-PDMS. Prepared by sol-gel process. By varying the amount of silica (0.5, 5 and 10 wt%) silica particle size (12 and 20 nm) and the heat treatment temperature (300 and 400 °C) effecting on the contact angle, surface free energy, light transmittance and surface roughness by using Design expert ® version 8.0.1 experimental design and analysis. Tested for abrasion resistance and stain resistance. The results showed that silica content and heat treatment temperature effects on the contact angle significantly. Have the highest exposure to silica in 152° by 20nm 10wt% silica amount and heat treatment temperature 400°C Heat treatment temperature effects on the surface free energy significantly. Minimum of surface free energy is 3mN / m at 10 wt% silica amount and heat treatment temperature 300°C 20 nm silica amount and have interaction between the silica amount and silica particle size effect on the light transmittance significantly. Has a maximum value 90% at 0.5 wt% silica amount, 20 or 12 nm silica heat treatment temperature 300 °C .And silica amount effect on the surface roughness significantly. Abrasion resistant of film on the tiles from the factory to

the contact angle decreased from 142.13 to 63.440° after abrasion cycles 2000 cycles and stain resistance of film that has been tested is in class 4.



School of Ceramic Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่าน ดังต่อไปนี้

คุณรุ่งโรจน์ เพรศแก้ว และคุณจารวี เพรศแก้ว บิดา มารดาผู้ให้การดูแล เลี้ยงดู สนับสนุน และให้โอกาสทางการศึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ลดา พันธุ์สุขุมธนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความเมตตาและให้ความรู้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

เพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาตลอด

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและประสานงานทางด้านเอกสาร ตลอดระยะเวลาศึกษา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ได้คำแนะนำและช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือวิจัย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนทุนทำวิจัย ครูอาจารย์ในอดีตทุกท่าน ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งผู้ช่วยเหลือ และให้กำลังใจที่ได้เอ่ยนาม จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ธิดารัตน์ เพรศแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการไหลเจด.....	4
2.2 การออกแบบการทดลอง.....	6
2.3 การเก็บและการเผยแพร่.....	8
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	17
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	18
3.3 วิธีการทดลอง.....	18
3.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	18
3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	20
3.3.3 การทดสอบ.....	25
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	35
4.1 ผลการวัดมุมสัมผัส.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการวัดพลังงานพื้นผิวอิสระ.....	52
4.3 ผลการวัดความสามารถให้แสงส่องผ่าน.....	63
4.4 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิว.....	74
4.5 การวิเคราะห์ผลทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Design-expert® version 8.0.1.....	85
4.5.1 มุมสัมผัส.....	85
4.5.2 พลังงานพื้นผิวอิสระ.....	90
4.5.3 ความสามารถในการให้แสงส่องผ่าน.....	96
4.5.4 ความขรุขระพื้นผิว.....	102
4.6 การตรวจสอบความขรุขระพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	107
4.7 การทดสอบความทนทานต่อการขัดสี.....	117
4.8 การเกาะติดคราบสกปรก.....	121
5 สรุปผลการวิจัย.....	123
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	123
รายการอ้างอิง.....	125
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ข. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	130

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว.....7
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....17
3.2	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....18
3.3	การออกแบบการทดลอง ตัวแปรตาม (dependence variables) ในงานวิจัยนี้มี 4 ตัว คือ 1) มุมสัมผัส (contact angle) 2) พลังงานพื้นผิวอิสระ 3) ความสามารถในการแสงส่องผ่าน (light transmittance) 4) ความขรุขระพื้นผิว (surface roughness)19
4.1	ผลการวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% และเผาการอุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C.....35
4.2	พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C.....52
4.3	ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาการอุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C.....63
4.4	ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C74
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อมุมสัมผัส แบบแสดงผล ของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่.....85
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อมุมสัมผัส หลังจาก ตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกไปแล้ว.....87
4.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ แบบแสดงผลของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่.....90
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ หลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ออกไปแล้ว.....92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความสามารถให้ แสงส่องผ่าน แบบแสดงปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่.....	96
4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความสามารถให้ แสงส่องผ่าน หลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่าง มีนัยสำคัญออกไปแล้ว.....	98
4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความขรุขระพื้นผิว แบบแสดงผลของปัจจัยต้น และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่.....	102
4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความขรุขระพื้นผิว หลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่าง มีนัยสำคัญออกไปแล้ว.....	104
4.13 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมด.....	107
4.14 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิว.....	107
4.15 มุมสัมผัสหลังจากการทดสอบการขัดสีของกระเบื้องระบบ $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ ผลิตในห้องปฏิบัติการ(กระเบื้อง A).....	118
4.16 มุมสัมผัสหลังจากการทดสอบการขัดสีของกระเบื้องระบบ $\text{Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ ที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม (กระเบื้อง B).....	120
4.17 แสดงผลการทดสอบการเกาะติดคราบสกปรก.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงมุมสัมผัสของน้ำเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุชนิดที่ไม่ชอบน้ำและชนิดที่ชอบน้ำ.....2
2.1	ลักษณะฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับ.....9
2.2	ของเหลวที่อยู่บนผิวฟิล์มหรือแผ่นรองรับ อาจจะแสดงลักษณะของของเหลวได้ 3 แบบ ได้แก่ ลักษณะที่แพร่กระจายของของเหลวจนทั่วผิวฟิล์ม (θ , contact angle (θ)=0), ของเหลวมีลักษณะนูน ด้วยรัศมีน้อยกว่าส่วนโค้ง (θ , $0 < \theta < 90^\circ$) หรือ มีรัศมีมากกว่าส่วนโค้ง (θ , $\theta > 90^\circ$).....9
2.3	มุมสัมผัส (contact angle, θ) และแรงตึงผิว (surface tension, γ) ของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สัญลักษณ์ SV, SL และ LV แทน ของแข็ง-ก๊าซ, ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ.....11
3.1	แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ (แผ่นรองรับฟิล์ม).....21
3.2	แสดงขั้นตอนสารละลาย TEOS-SiO ₂ -PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจล.....22
3.3	แสดงวิธีการถนอมแบบไหลย้อน.....24
3.4	เครื่อง spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE.....25
3.5	เครื่องวัดมุมสัมผัส (OCA20).....26
3.6	เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer.....27
3.7	แสดงเครื่องวัดความขรุขระพื้นผิว (ก) แสดงส่วนเครื่องวัด (ข) แสดงเครื่องประมวลผลการวัดด้วยคอมพิวเตอร์.....28
3.8	แสดงวิธีการวัดความขรุขระพื้นผิว.....29
3.9	เครื่อง Atomic force Microscope (AFM) รุ่น XE-70 ยี่ห้อ Park System.....30
3.10	โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบเซรามิกระบบ Li ₂ O-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -TiO ₂ (กระเบื้อง A).....31
3.11	โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบกระเบื้องระบบ Na ₂ O-CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -ZrO ₂ (กระเบื้อง B).....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แสดงวิธีการจำแนกผลการทดสอบความต้านการเกิดคราบ	34
4.1 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C.....	37
4.2 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C.....	38
4.3 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	39
4.4 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	40
4.5 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	41
4.6 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	42
4.7 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	43
4.8 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาด 12 และ 20nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	44
4.9 แสดงมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาด 12 และ 20nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	45
4.10 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C การทดลองเลขที่ 1 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106° และการทดลอง เลขที่ 2 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106 °C.....	46
4.11 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C การทดลองเลขที่ 3 มุมสัมผัส มีค่าเท่ากับ 111° และการทดลอง เลขที่ 4 มุมสัมผัส มีค่าเท่ากับ 109°.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 5 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 132° และการทดลอง เลขที่ 6 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 118°	47
4.13 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 7 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 114° และการทดลอง เลขที่ 8 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 108°	48
4.14 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 5wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C การทดลองเลขที่ 9 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 117° และการทดลอง เลขที่ 10 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 123°	48
4.15 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 11 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143° และการทดลอง เลขที่ 12 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 135°C	49
4.16 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 13 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 108° และการทดลอง เลขที่ 14 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106°	49
4.17 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 15 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 110° และการทดลอง เลขที่ 16 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 113°	50
4.18 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 17 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143° และการทดลอง เลขที่ 18 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 117°	50
4.19 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 19 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 111° และการทดลอง เลขที่ 20 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 115°	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 21 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 121° และการทดลองเลขที่ 22 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 126°	51
4.21 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 23 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 152° และการทดลองเลขที่ 204 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143°	52
4.22 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C	54
4.23 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 °C	55
4.24 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 °C	56
4.25 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C	57
4.26 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C	58
4.27 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 5 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C	59
4.28 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C	60
4.29 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C	61
4.30 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C	62
4.31 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	66
4.33 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	67
4.34 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	68
4.35 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	69
4.36 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	70
4.37 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	71
4.38 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	72
4.39 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	73
4.40 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	77
4.42 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	78
4.43 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	79
4.44 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	80
4.45 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	81
4.46 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	82
4.47 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C.....	83
4.48 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	84
4.49 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของมุมสัมผัส.....	88
4.50 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของมุมสัมผัสกับค่าที่ถูกทำนาย.....	89
4.51 พื้นผิวดอปสนองของมุมสัมผัส.....	90
4.52 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ.....	93
4.53 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของพลังงานพื้นผิวอิสระกับค่าที่ถูกทำนาย.....	94
4.54 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและอุณหภูมิการเผาต่อพลังงาน พื้นผิวอิสระ.....	94
4.55 พื้นผิวดอปสนองของพลังงานพื้นผิวอิสระ.....	95
4.56 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน.....	99
4.57 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของความสามารถให้แสงส่องผ่านกับค่าที่ถูกทำนาย.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและอุณหภูมิการเผาของ ความสามารถให้แสงส่องผ่าน.....	100
4.59 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและขนาดอนุภาคซิลิกาของ ความสามารถให้แสงส่องผ่าน.....	100
4.60 พื้นผิวตอบสนองของความสามารถให้แสงส่องผ่าน.....	101
4.61 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความขรุขระพื้นผิว.....	104
4.62 กราฟส่วนตกค้างของความขรุขระพื้นผิวกับค่าที่ถูกทำนาย.....	105
4.63 พื้นผิวตอบสนองความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม.....	106
4.64 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ที่มีขนาด 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	108
4.65 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ที่มีขนาด 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C.....	109
4.66 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 60.00 nm.....	110
4.67 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 34.75 nm.....	110
4.68 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 62.78 nm.....	111
4.69 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 8.00 nm.....	112
4.70 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 35.53 nm.....	112
4.71 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 38.89 nm.....	113
4.72 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 0.5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 33.65 nm.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.73 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 66.25 nm.....	114
4.74 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 108.59 nm.....	115
4.75 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 0.5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 32.67 nm.....	116
4.76 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 61.53 nm.....	116
4.77 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 142.40 nm.....	117
4.78 มุมสัมผัสหลังจากการขัดสีของกระเบื้อง A ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 3M และ TEOS-SiO ₂ -PDMS.....	119
4.79 มุมสัมผัสหลังจากการขัดสีของกระเบื้อง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 3M และ TEOS-SiO ₂ -PDMS.....	120
4.80 การทดสอบการเกาะติดคราบไอโอดีนบนแผ่นตัวอย่าง.....	122

บทที่ 1

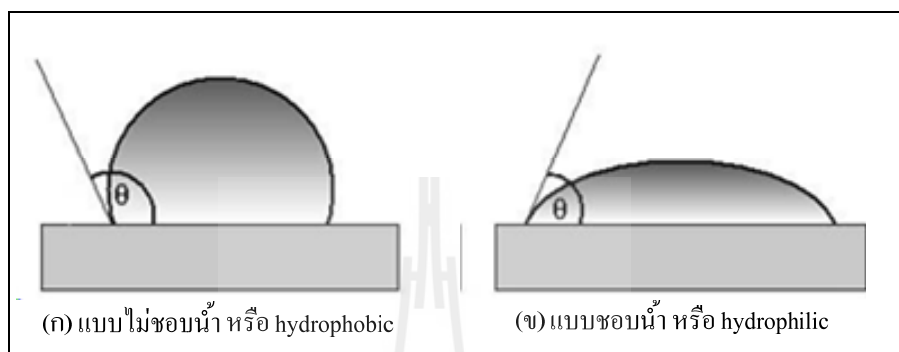
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีการเคลือบผิวแก้วด้วยวิธี Wet Coating Technologies for Glass เป็นวิธีที่ไม่มีเครื่องมือที่เป็นมาตรฐาน และเทคโนโลยีการเคลือบผิวมักเป็นของผู้ผลิตเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการสังเคราะห์ทางเคมีที่มีสมบัติพิเศษสำหรับการเคลือบผิวและเครื่องมือที่ใช้มีราคาถูก วิธีการเคลือบได้แก่ Dip coating techniques, Spray coating technique, Flow coating process, Spin coating process, Capillary coating, Roll coating, Printing technique, Chemical coating และ Dry and curing technique วัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวได้แก่ Oxide layer, Hydrophobic coating และ Hydrophilic coating เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุต่าง ๆ ให้มีความสามารถในการทำสะอาดตัวเองได้ดี โดยที่วัสดุนั้นจะต้องมีพื้นผิวที่มีความขรุขระในระดับนาโน เพื่อไม่ให้น้ำหรือของเหลวเกาะติดพื้นผิว ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเหมือนกับใบบัว (Lotus effect) โดยการพัฒนาเทคโนโลยีนี้มีการทำอย่างต่อเนื่องแต่ยังพบปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานของวัสดุที่เคลือบผิวคุณสมบัตินี้คือไม่ทนทานต่อการขูดขีด ไม่ทนต่อแสง ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุต่ำลง และความโปร่งใสของสารเคลือบผิว ที่อาจจะทำให้วัสดุที่นำมาเคลือบผิวสูญเสียลักษณะทางกายภาพ เช่น สี เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิวเซรามิกให้มีสมบัติพิเศษ ในอุตสาหกรรมสุขภาพที่มีการศึกษาการลดความหยาบบนผิวเคลือบเพื่อช่วยในเรื่องการทำความสะดวกสบายการศึกษาเคลือบที่มีผิวเรียบสวย โดยการเคลือบผิวมากกว่า 1 ชั้น และการพัฒนาเคลือบที่มีสมบัติขจัดคราบสกปรก (antistaining) ซึ่งใช้เคลือบเซรามิกที่มีองค์ประกอบเคมีและสมบัติกายภาพและกระบวนการเผาแตกต่างกัน ความสามารถในการเปียก แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ของของเหลวเมื่อสัมผัสผิววัสดุ มี 3 เฟสที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ สามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยค่า contact angle โดยผิวที่มีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะมีค่า contact angle สูงกว่าผิวที่มีสมบัติชอบน้ำ ด้วยการพัฒนาผิวที่มีสมบัติทำความสะอาดเองได้ ให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำของ fluoroalkylalkoxysilane, fluoroalkylalkoxysiloxane หรือ partly fluorinated vinyl polymer มุมสัมผัส (contact angle) สามารถบอกความสามารถของการเปียกของของเหลว เช่น น้ำ, น้ำมัน สามารถวัดค่ามุมสัมผัส (contact angle) ได้โดยเครื่องวัดมุมสัมผัส ความสามารถต่อการเปียกของของเหลวเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. แบบไม่ชอบน้ำ หรือ hydrophobic หรือ non-wetting แสดงสมบัติแบบไม่ชอบน้ำ เมื่อของเหลวสัมผัสกับผิววัสดุ ทำมุมกันมากกว่า 90° (ดังรูปที่ 1.1 ก)
2. แบบชอบน้ำ หรือ hydrophilic หรือ wetting แสดงสมบัติแบบชอบน้ำ เมื่อของเหลวสัมผัสกับผิววัสดุ ทำมุมกันน้อยกว่า 90° (ดังรูปที่ 1.1 ข)



รูปที่ 1.1 แสดงมุมสัมผัสของน้ำเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุชนิดที่ไม่ชอบน้ำและชนิดที่ชอบน้ำ

<http://www.kruss.de/uploads/pics/contact-10-en.jpg>

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจล
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาการเคลือบผิวเซรามิกให้มีสมบัติพิเศษ คือ ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Design-Expert®

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจล โดยการแปรผันตัวแปรดังต่อไปนี้ ปริมาณซิลิกา, ขนาดอนุภาคซิลิกา, อุณหภูมิการเผา
- 1.3.2 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติพิเศษของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยการทดสอบ contact angle, surface roughness และ UV-vis spectrophotometer
- 1.3.3 วิเคราะห์ตัวแปรที่แปรผัน ด้วยโปรแกรม Design-Expert®

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมสาร TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจลได้

1.4.2 ทำให้ทราบผลของตัวแปรต่าง ๆ และอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติพิเศษของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design - Expert®

1.4.3 ทำให้ทราบผลของความแตกต่างของวิธีการเคลือบฟิล์ม



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโซลเจล

โดยทั่วไป กระบวนการโซลเจล หมายถึง การสังเคราะห์โครงสร้างร่างแหอนินทรีย์ โดยกระบวนการทางปฏิกิริยาทางเคมีในสารละลาย ณ อุณหภูมิต่ำ ซึ่งคำว่ากระบวนการโซล-เจลมาจาก การที่สารเปลี่ยนสถานะของเหลว (สารละลายหรือคอลลอยด์) เป็นของแข็ง (สารผสมที่มีมากกว่าสองวัฏภาคขึ้น (di- or multi- phases) โดยไม่จำเป็นต้องเกิดในระบบที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจล ต้องเป็นสารอนินทรีย์ประเภทโมโนเมอร์ (monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, 2552)

2.1.1 กระบวนการโซลเจล ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 การผสมสารตั้งต้นให้เป็นสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ได้แก่ สารอนุพันธ์ของโลหะ (อินทรีย์) ให้สารมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันถึงขั้นระดับโมเลกุล เพื่อให้ได้โซลที่เป็นสารประกอบออกไซด์ เช่น โซลของโลหะออกไซด์

ขั้นตอนที่ 2 การเชื่อมต่อเป็นร่างแหของโซลให้มีความสม่ำเสมอเพื่อให้เกิดเป็นเจล ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากสำหรับการทำให้สารเคมีเป็นเนื้อเดียว (กับผลิตภัณฑ์ที่ได้) ขณะทำให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปขณะที่สารเป็นเจลให้เป็นวัสดุชิ้นใหญ่ (bulk materials) มีลักษณะกลวง (hollow materials) เส้นใย (fiber) หรือวัสดุเคลือบผิว (coating materials) เป็นต้นก่อนนำไปเผา

สารตั้งต้นที่สามารถใช้ในกระบวนการโซล-เจลได้ เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลาย ได้แก่

- เกลือที่มีอออนลบ ได้แก่ ไนเตรท ($-\text{NO}_3$) อะซิเตต ฟอมีเอต ($\text{HCO}-$) จะง่ายต่อการแตกตัว รวมถึงเกลือของสาร เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ไนเตรท ($\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$)
- ออกไซด์ของสาร เช่น ออกไซด์ของโซเดียม หรือ โปแตสเซียม
- ค่าง ได้แก่ ไฮดรอกไซด์
- สารเชิงซ้อน ได้แก่ สารคีเลต เช่น ไททาเนียมแอลคอกไซด์
- สารแอลคอกไซด์ประเภทอะซิเตต หรือเอมีน

สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการ โคลเจล จำเป็นต้องผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เกิดอนุพันธ์ไฮดรอกไซด์ของโลหะ ซึ่งอนุพันธ์นี้สามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อ

- ความเป็นขั้วของพันธะระหว่างโลหะและลิแกนด์เพิ่มขึ้น
- ความเสถียรของสารที่ละลาย (solvate) หรือสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นลดลง
- ความเข้มข้นของตัวเร่ง
- ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เช่น กรดหรือด่าง
- อุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้น ถ้าต้องการให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่อุณหภูมิต่ำลง

(โดยเฉพาะเมื่อใช้สารแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น) ควรเพิ่มความยาวของหมู่อัลคิลและใช้สารเชิงซ้อน

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจล

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเจล ได้แก่ (สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, 2552)

• การทำให้ประจุที่ผิวอนุภาคเป็นกลาง สามารถทำได้โดยการปรับความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอชของระบบ

- การเกาะตัว
- การเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อเนื่องจากหมู่ที่ว่องไวบนผิวอนุภาค
- การเกิดเจล มีผลให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้นจนได้เป็นเจลแข็ง

ดังนั้นตัวแปร ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดเจล คือ

- สารตั้งต้น เช่น เกลือ ออกไซด์ แอคโคกไซด์ สารเชิงซ้อน คอลลอยด์
- สภาพที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และ

พีเอช

- ตัวแปรเชิงกล เช่น การกวน การกั่นไหลกลับ การใช้อัตราไซคลิก

2.1.3 การตรวจสอบเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโคล-เจล

การเกิดปฏิกิริยาจากโมโนเมอร์ไปเป็นของแข็งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นร่างแหที่ค่อนข้างซับซ้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่สารเป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นสารโมเลกุลเล็ก (homogenous or molecular regime) ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการหาโครงสร้างและขนาดของโมเลกุล ขั้นตอนที่สองคือ ขั้นตอนที่ไม่มีเนื้อเดียวกัน (heterogeneous multiphase polymeric regime) ซึ่งตรวจสอบได้จากการใช้หลักของการกระเจิง เช่น เครื่องเอกซเรย์นิวตรอน หรือ สมบัติเชิงกล (สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, 2552)

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (statistical design of experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ (ปารเมศ ชูติมา, 2545) วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และหากปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ สิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่นำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลกเคชัน (replication) แรนดอมไมเซชัน (randomization) และ บล็อกกิง (blocking) (ปารเมศ ชูติมา, 2545) ในที่นี้กำหนดให้ว่า เพลกเคชัน หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เพลกเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเพลกเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเพลกเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

แรนดอมไมเซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การแรนดอมไมเซชันการทดลอง ทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

บล็อกกิง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

2.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเท่ากันของมัชฌิมหลายค่า สมมติว่าเรามีระดับซึ่งแตกต่างกันของปัจจัยเดียวที่เราต้องการทำการ

เปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรมีลักษณะเหมือนในตารางที่ 2.1 ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่แสดงในตาราง (เช่น y_{ij}) หมายถึง ค่าสังเกตที่ j ภายใต้ระดับที่ i หรือโดยทั่วไปจะมีค่าสังเกต n ค่าภายใต้ระดับ i

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment (level)	Observations				Totals	Averages
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
.	
.	
.	
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{an}	$\frac{y_{a.}}{y_{..}}$	$\frac{\bar{y}_{a.}}{y_{..}}$

เราสามารถอธิบายค่าสังเกตต่าง ๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้น คือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่ y_{ij} เป็นค่าสังเกต ij และ μ คือพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า “มัชฌิมรวม (overall Mean)” τ_i คือ พารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i และ ϵ_{ij} คือองค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (random error) จุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่าง ๆ และทำการประมาณค่า สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติฐานให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่น การออกแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น

ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าเป็นปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เปรดิกเต (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

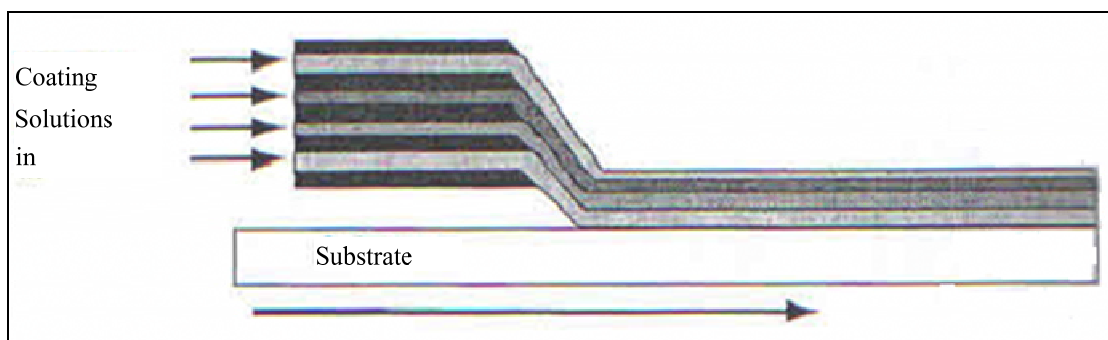
ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิด จากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามัน เกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง

2.3 การเปียกและการแผ่ขยาย (Wetting and Spreading)

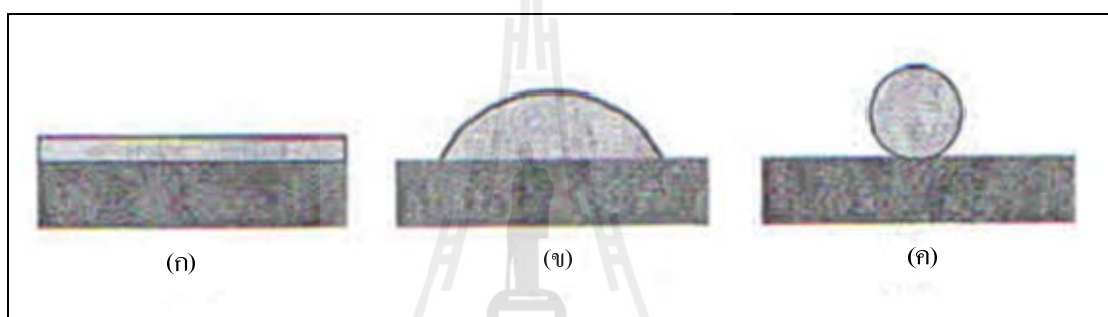
การเปียกของพื้นผิวด้วยน้ำและขอบเขตของการแผ่ขยายของของเหลวที่มีความสำคัญใน ลักษณะของพื้นผิวจริง พิจารณาจากของเหลวที่เคลือบบนพื้นผิวแผ่นรองรับ ดังรูป 2.1 การเคลือบ สารละลายบนแผ่นรองรับ เมื่อหยดน้ำหรือของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็ง ของเหลวนั้นจะ แผ่กระจายออกบนพื้นผิว จนมีลักษณะเป็นฟิล์ม ดังรูป 2.2(a) การวัดความสามารถในการเปียกบน พื้นผิว ของของเหลวหรือสมบัติการเปียกของของเหลวบนพื้นผิว วัดจากมุมสัมผัส (contact angle, θ) ของของเหลวบนพื้นผิวนั้น

เมื่อหยดของเหลวบนพื้นผิวของของแข็ง ของเหลวนั้นจะแผ่ขยายไปเคลือบพื้นผิวแบบ บาง ๆ กลายเป็นฟิล์ม ดังรูป 2.2 (ก) หรือ แผ่ขยายแบบมีขอบเขต คงเหลือเป็นหยดอยู่บนพื้นผิว เงื่อนไขของการหยดของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งจะนำมาเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของการเปียก ของพื้นผิว (wettability of the surface) หรือ ความสามารถในการเปียกของของเหลวที่อยู่บนพื้นผิว โดยการวัดมุมสัมผัส θ (contact angle) ด้วยการทำให้ที่บ่งชี้ดังรูป 2.2 (ข)

ในกรณีที่ของเหลวกระจายอยู่บนผิวของของแข็งอย่างสม่ำเสมอหรือเปียกด้วยของเหลวนั้น เปียกสมบูรณ์ คือ มีค่ามุมสัมผัส $\theta=0^\circ$ กรณีมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นไม่เป็นศูนย์ คือ มุมสัมผัส $\theta>0^\circ$ จะอธิบายสมบัติการเปียกได้เมื่อมุมสัมผัสมีค่าระหว่าง $0 - 30^\circ$ แสดงว่านั้นมีการเปียกเมื่อของเหลวมี มุมสัมผัสระหว่าง $30-89^\circ$ เรียกว่า เปียกเป็นบางส่วน (partially wetting) และเมื่อมีมุมสัมผัสมากกว่า หรือเท่ากับ 90° เรียกว่า ไม่เปียก (nonwetting) หรือ ระบบใด ๆ ที่มี $0^\circ < \theta < 90^\circ$ จะเป็นการเปียก บางส่วน (partially wetting) และ $\theta=180^\circ$ เป็นการไม่เปียกเลย (nonwetting) (Drew Mayer, 1946)



รูปที่ 2.1 ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้นบนแผ่นรองรับ (Drew Mayer, 1946)



รูปที่ 2.2 ของเหลวที่อยู่บนผิวฟิล์มหรือแผ่นรองรับ

อาจจะแสดงลักษณะของของเหลวได้ 3 แบบ ได้แก่ ลักษณะที่แพร่กระจายของของเหลวจนทั่วผิวฟิล์ม (ก, contact angle (θ) = 0), ของเหลวมีลักษณะนูน ด้วยรัศมีน้อยกว่าส่วนโค้ง (ข, $0 < \theta < 90^\circ$) หรือ มีรัศมีมากกว่าส่วนโค้ง (ค, $\theta > 90^\circ$) (Drew Mayer, 1946)

การดูดซับและการเปียก (adsorption and wetting) (Drew Mayer, 1946) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ จะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (physical attraction) เช่นการเปียก (wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถเกิดการสัมผัสกันได้ ในกรณีของเหลวบนของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดมากหรือน้อยแสดงได้ด้วย “มุมสัมผัส” (contact angle, θ) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียก (wettability) บนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิว ของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีค่ามุมสัมผัส θ น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มีค่ามุมสัมผัส θ มากสมบัติการเปียกของของเหลวบนพื้นผิว

ของแข็ง สามารถแสดงในรูปสมการง่าย ๆ ของดูปรี (Dupre equation) แสดง งานของการยึดเกาะ (work of adhesion, WA) ของของเหลวบนของแข็งดังนี้ (Drew Mayer, 1946)

$$WA = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{12} \quad (2.2)$$

เมื่อ γ_1 คือพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) ของของแข็งและก๊าซ γ_2 คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวและของแข็ง γ_{12} คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถโยงให้สัมพันธ์กับกรณีของเหลวบนพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็งดังรูปที่ 2.3 โดยใช้สมการของยัง (Young equation) (Drew Mayer, 1946)

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.3)$$

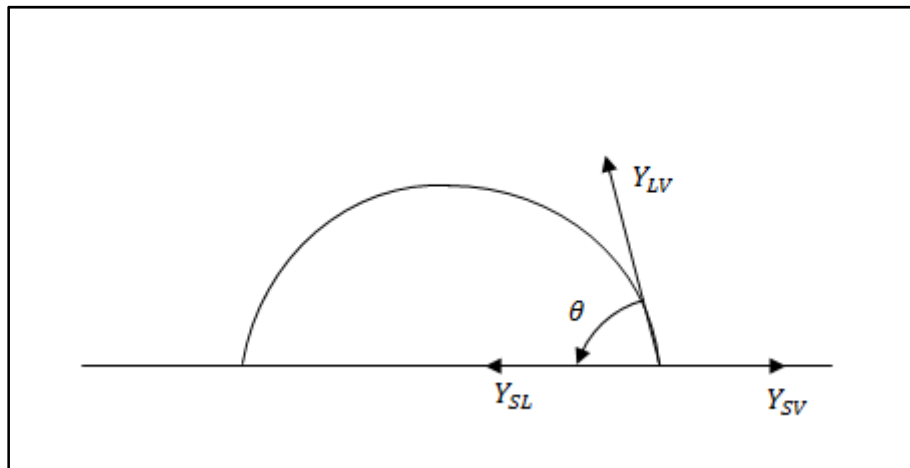
เมื่อ γ_{sv} , γ_{sl} และ γ_{lv} คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) หรือแรงตึงผิว (surface tension) ของอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของแข็ง-ก๊าซ ตามลำดับ และ θ คือมุมสัมผัส (contact angle) พื้นของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่เราสามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย

การหาค่าแรงตึงพื้นผิวของของแข็งสามารถทำได้โดยการใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเปรียบบนผิวของแข็ง โดยมีนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (critical surface tension, γ_c) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ($\gamma_{lv} < \gamma_c$) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด เราสามารถรวมสมการ (2.2) และ (2.3) โดยให้ $\gamma_1 = \gamma_{sv}$, $\gamma_2 = \gamma_{lv}$ และ $\gamma_{12} = \gamma_{sl}$ ทำให้ได้สมการ (Drew Mayer, 1946)

$$WA = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - \gamma_{sl} \quad (2.4)$$

$$WA = \gamma_{lv} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.5)$$

ค่างานของการยึดเกาะ (WA) แสดงถึงแรงหรือพันธะทางกายภาพที่เกิดเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่างโมเลกุล (intermolecular dispersion force) ที่สัมผัสและเกิดการเปียกหรือการยึดเกาะกัน



รูปที่ 2.3 มุมสัมผัส (contact angle, θ) และแรงตึงผิว (surface tension, γ) ของหยดของเหลว บนพื้นผิวของแข็ง สัญลักษณ์ SV, SL และ LV แทนของแข็ง-ก๊าซ, ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ (ปรับปรุงจาก Drew Mayer, 1946)

ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการทำให้ผิววัสดุเกิดสมบัติไม่ชอบน้ำโดยใช้สารตั้งต้นจาก TEOS (Tetra Ethlyorthosilicate) ในการเตรียมสาร ทำให้เกิดสมบัติพิเศษได้โดยการเติม organosilane compound, SiO_2 , วิธีการเตรียมและอุณหภูมิการเผา ดังนี้

Chin et al. (2001) ได้ศึกษา การเตรียมและวิเคราะห์ SiO_2 - TiO_2 -PDMS composite films ด้วยกระบวนการโซลเจลและเคลือบฟิล์มบนกระจก soda-lime silicate ด้วยการจุ่มโดยเตรียม TEOS (Tetraethylorthosilicate) และ PDMS (Polydimethylsiloxane) เติมกรดไฮโดร คลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ titanium isopropoxide เจือจางด้วยเอทานอล ผสมรวมกันและผ่านการ hydrolysis ที่อุณหภูมิ 80°C และ condensation 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ stabilized sol แต่ถ้า condensation 90°C เป็นเวลา 3 วัน จะได้ผงเจล จากนั้นนำตัวอย่างจุ่มลงใน stabilized sol และอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที และผ่านการเผา วิเคราะห์ผลด้วย FT-IR, DTA วัดความหนาของฟิล์มได้ขนาด 450-750 nm วัดค่าดัชนีหักเห (refractive index) ได้ 1.56-1.68 และค่าความโปร่งใส (transmittance) เท่ากับ 88-94% ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ PDMS อุณหภูมิการเผาและอัตราการเผา

Venkateswararao and Ravindra (2004) ได้ศึกษา การทำ organic modification ของ TEOS base ด้วยวิธี co-precursor และ derivatization โดยเลือกใช้ organosilane compounds หรือ hydrophobic reagent (HR) ได้แก่ MTMS, MTES, ETES, PTES, DMCS, TMES, HMDS การทดลองวิธี co-precursor ด้วยการเติม HR ลงในสารละลายได้โดยปั่นผสมให้เข้ากันผลการทดลองพบว่า

วิธีนี้สามารถเพิ่มสมบัติ hydrophobic ได้ดี วัดค่า contact angle ได้เท่ากับ 136° และ HR ที่สามารถให้ความโปร่งใสได้ดีคือ MTMS และ MTES ขณะที่วิธี derivatization ต้องทำให้ TEOS เกิดการ hydrolysis และ เกิด polycondensation ให้เป็นเจล จากนั้นเติม HR ชนิดต่าง ๆ ลงใน TEOS เจล ผลการทดลองพบว่า HR ทุกตัวสามารถให้สมบัติไม่ชอบน้ำและโปร่งใส

Jones et al. (2004) ศึกษาการประยุกต์ใช้เจลซึ่งวิธีเตรียมเจลที่สามารถขึ้นรูปเป็นผิวแบบไม่ชอบน้ำ พบว่าน้ำจะทำมุม contact angle อย่างน้อย 150° โดยเจลจะทำหน้าที่เป็น cross-linking agent เพื่อเป็นประสานวัสดุชนิดพิเศษ ตัวอย่างการทดลองใช้ TEOS ปริมาณ 5 กรัมเป็นสารตั้งต้น ผสมกับไฮโดรคลอริก pH 4 และ เอทานอล ปริมาณ 2.7 กรัมผสมให้เข้ากัน ผ่านการกลั่น (reflux) จากนั้นส่วนผสมจะกลายเป็นเจลขั้นต่อไปคือ เติมผงซิลิกาปริมาณ 0.5-2.5 กรัมผสมให้เข้ากับเจล และเติม PDMS ปริมาณ 0.5-5 กรัม, isopropanol ปริมาณ 50 กรัมผสมใน ultrasonic bath เป็นเวลา 15-30 นาที ส่วนผสมจะกลายเป็น slurry จากนั้นกลั่นเป็นเวลา 6-24 ชั่วโมง เพื่อเป็นเจลที่เชื่อมด้วยผงซิลิกาและ PDMS พร้อมทั้งจะนำเคลือบผิวบนตัวอย่างด้วยวิธี spin coating เมื่อเคลือบผิวเสร็จให้ความร้อน 400°C เป็นเวลา 10-30 นาที วัดค่า contact angle ได้เท่ากับ 150° - 172° และพบว่าพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำคือ PDMS เป็นสารที่ ความคงทน สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 400°C โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และสามารถทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต

Richard and Shingles (2004) ได้ศึกษาการทำฟิล์มแบบหลายชั้น (multilayer) บนตัวอย่างโปร่งใส เช่น กระจก พลาสติก และวัสดุอื่น ๆ ที่โปร่งใส เพื่อเพิ่มความคงทนและความทนต่อสภาพอากาศ ด้วยการเคลือบ organo-siloxane ชั้นแรก จากนั้นเคลือบเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ซิลิกา (SiO_2) ในชั้นที่สอง และเคลือบ perfluoroalkylsilane ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ในชั้นที่สาม การเคลือบหลายชั้นทำให้เกิดความคงทนและการทนต่อการขีดสี จากการทดสอบการขีดดูจำนวน 300 รอบพบว่าตัวอย่างจากทดลอง (อะคริลิก) มีความเสียหายไป 2.8% และตัวอย่างจากสินค้าที่เคลือบด้วยฟิล์มจากห้องตลาด มีความเสียหาย 7.5 %

Wu et al. (2005) ได้ศึกษา hydrophobic hard coating แบบโปร่งใส ด้วยกระบวนการ sol-gel โดยใช้ Methyl-trithoxysilane (MTES) และ TEOS เป็นเนื้อหลัก (matrix) ที่ให้ความแข็งแรงต่อการเคลือบ (coating) เติมคอลลอยด์ซิลิกาปริมาณ 13% กับ 30% และเปลี่ยนแปลงปริมาณ Polydimethyldisiloxane (PDMS) จากนั้นสเปรย์บนกระจกให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ $100, 150, 200, 250$ และ 300°C ผลการทดลองพบว่า การเติมซิลิกาทำให้ความขรุขระของผิวเพิ่มขึ้น และค่า contact angle เพิ่มขึ้น เมื่อเติม PDMS จะทำให้ค่า contact angle เพิ่มสูงขึ้น โดย PDMS ปริมาณ 50vol% มีค่า contact angle สูงสุด 133° เมื่อเติมคอลลอยด์ซิลิกา 30vol% มีความแข็ง (hardness) ประมาณ 0.85 GPa

Wu et al. (2005) ได้ศึกษา ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณซิลิกาในส่วนผสมและความแตกต่างลักษณะพื้นผิวเพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำของ sol-gel hard coating ด้วยกระบวนการโซลเจล โดยใช้ methyltrimethoxysilane (MTMS), TEOS เป็น base sol และเติม Octyltrimethylsilane (C8) ที่ให้สมบัติไม่ชอบน้ำจากนั้นเติมซิลิกาให้กระจายตัวอยู่ใน base sol แล้วสเปรย์ลงบน Aluminium alloy AA6061 ให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 15 นาที จากผลการทดลองพบว่า การแปรผันปริมาณซิลิกามีผลให้ความขรุขระบนผิวเคลือบและลักษณะพื้นผิวมีความแตกต่างกัน และสังเกตได้ว่า contact angle เพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อลักษณะพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของใบบัว จากการทดลองวัด contact angle มีค่าเท่ากับ 123°

Minglin and Randal (2006) ได้รวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับ superhydrophobic surfaces แล้วกล่าวว่า ผิวที่มีสมบัติ ไม่ชอบน้ำจะต้องมีค่า contact angle สูง และหยดน้ำไหลตัวได้ง่าย จึงจะเรียกว่า superhydrophobic หรือ ultrahydrophobic ในการศึกษา งานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา พยายามหาวิธีการเตรียมแบบใหม่เพื่อให้พื้นผิวมีช่วงการใช้งานแบบการทำความสะดวกตัวเองที่ดีและแข็งแรงขึ้น โดยใช้หลักสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของพื้นผิว (surface morphology) ความสามารถในการเปียก (wettability) และการไหลตัวของหยดน้ำ (droplet sliding) นอกจากนี้ยังได้แยก วัสดุที่มีผิวขรุขระ และมี surface energy ต่ำ เป็น 4 แบบ คือ 1. Fluorocarbons ซึ่งมีส่วนประกอบของฟลูออรีนทำให้ผิวขรุขระ 2. Silicones จะทำให้เกิด low surface energy เช่น การใช้ PDMS จะทำให้เกิดลักษณะคล้ายใบบัว 3. Organic material เป็นวัสดุที่เตรียมขึ้นง่ายและราคาไม่แพง แล้วให้สมบัติไม่ชอบน้ำที่ดี เช่น polyamide, polycarbonate เป็นต้น 4. Inorganic materials เช่น เซอร์โคเนีย (ZrO₂) และ ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) การทำให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระและ low surface energy มีหลายวิธี เช่น การใช้วิธีการกัดกร่อน (Etching) และ lithography การเตรียมแบบโซลเจล การเตรียมแบบ Layer-by-Layer และคอลลอยด์ (colloidal) เป็นต้น ผู้รวบรวมยังวิเคราะห์ว่าการศึกษาในปัจจุบันจะศึกษาเฉพาะการวัด contact angle แบบหยุดนิ่ง (static) ยังไม่ค่อยมีการศึกษา sliding angle มากนัก

Kuisma et al. (2007) ได้ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของตัวอย่างเซรามิกที่มีเคลือบแตกต่างกัน ได้แก่ เคลือบด้านและเคลือบมันวาวของกระเบื้องและเคลือบสุขภัณฑ์จากโรงงานอุตสาหกรรม แล้วนำตัวอย่างดังกล่าว มาเคลือบฟิล์มด้วยสารฟลูออโรพอลิเมอร์ เซอร์โคเนียและไททานเนียม ผลการทดลองพบว่า การเคลือบฟิล์มมีผลต่อความขรุขระของผิวบางตัวอย่าง ความขรุขระที่ได้มีค่าระหว่าง 0.06-2.44 μm จากนั้นทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดของตัวอย่างทั้งหมดพบว่าสามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกได้ดี มีดินตกค้างน้อย โดยเฉพาะตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารฟลูออโรพอลิเมอร์สามารถทำความสะอาดได้ง่าย เนื่องจากมีค่าแรงตึงผิว (surface tension) ต่ำ ผลการวัดค่ามุมสัมผัสของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 90° และหลังจากที่ผ่านการทดสอบการทำความสะอาดสิ่งสกปรกมุมสัมผัสมีค่าลดลงเหลือ 75°

Maata et al. (2007) ได้ศึกษาการเพิ่มสมบัติการทำความสะอาดบนเคลือบเซรามิก ด้วยการเปรียบเทียบ สามารถในการทำความสะอาดของตัวอย่าง (เคลือบเซรามิก) ที่มีพื้นผิวแตกต่างกัน โดยทดลองเคลือบไททาเนีย (titania) เซอร์โคเนีย (zirconia) และฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymer) ลงบนเคลือบเซรามิก เพื่อให้มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันผลการทดลองพบว่า ลักษณะพื้นผิวเซอร์โคเนียและไททาเนียมีผลต่อการทำความสะอาดน้อยเนื่องจากความสามารถในการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับค่า contact angle ทั้งนี้ไททาเนีย และเซอร์โคเนียที่เคลือบผิวบนเซรามิกจะให้ค่า contact angle ไม่สูงนัก จึงมีสมบัติแบบชอบน้ำขณะที่ฟลูออโรพอลิเมอร์จะให้ค่า contact angle ที่สูงกว่า (ฟลูออโรพอลิเมอร์มีค่า contact angle เท่ากับ 93°) ดังนั้นตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์จะทำความสะอาดได้ดีกว่าในกรณีที่ตั้งสกปรกหรือดินมีน้ำมันเป็นส่วนผสม แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับการเกาะติดของอนุภาคบนพื้นผิวที่ขรุขระ แต่การเกาะติดของส่วนประกอบที่มีน้ำมันจะขึ้นอยู่กับค่า contact angle

Tian et al. (2007) ได้ศึกษาการทำ PDMS-SiO₂-TiO₂ บนกระจกด้วยกระบวนการโซลเจล โดยใช้สารตั้งต้นดังนี้ TEOS, TBT (tetrabutyltitanate) และ PDMS เคลือบฟิล์มบนกระจกด้วยการจุ่ม แล้วอบที่ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ความร้อน 200 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ทางความร้อนด้วย TG-DTA พบว่า เมื่อเติม PDMS 20% ที่อุณหภูมิช่วง 230-560 °C เกิดการสลายตัวของ PDMS และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย IR-chromatograph spectrometer พบ peak ของ Si-O-Si bond ที่ 1096 cm⁻¹ และพบ peak ของ Si-O-Ti bond ที่ 926 cm⁻¹ และ peaks ของ Si-CH₃ และ PDMS ที่ 2905 และ 2965 cm⁻¹ จากผลการวิเคราะห์แสดงว่า ฟิล์มที่ได้มีส่วนประกอบของ PDMS-SiO₂-TiO₂ ร่วมกันอยู่

Hwag et al. (2008) ได้ศึกษาการทำ hydrophobic organic-inorganic nanocomposite ฟิล์มแบบโปร่งใสโดยใช้ซิลิกาขนาด 50nm เป็นตัวประสาน (reinforce) ใน 3-Glycidoxypolytrimethoxysilane (GPTS) และ tetramethylorthosilicate (TMOS) และเคลือบทับด้วย isobutyltrimethoxysilane (IBTMS) เพื่อปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและวัดมุมสัมผัสจากการศึกษาพบว่า GPTS และ TMOS ที่ประสานด้วยซิลิกาทำให้ผิวขรุขระและโปร่งใส ชั้นฟิล์มมีความหนาประมาณ 40 nm เมื่อเคลือบด้วย IBTMS ทับอีกครั้งจะมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 130° ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่เคลือบแล้วไปทดสอบความทนต่อการขัดถูจำนวน 100 รอบ และวัดมุมสัมผัสอีกครั้ง พบว่ามุมสัมผัส มีค่าลดลงจาก 130° เหลือเพียง 90° การศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าความหนาของ IBTMS ฟิล์มมีผลต่อค่ามุมสัมผัสและจากการทดลองพบว่า ซิลิกาทำให้ผิวมีความขรุขระ โปร่งใสและมีความคงทน

Nimitrakoolchai and Supothina (2008) ได้ศึกษา การทำฟิล์มแบบ organic-base ให้สมบัติแบบไม่ชอบน้ำและทำความสะอาดตัวเองได้ ด้วยการควบคุมความขรุขระของพื้นผิวภายใต้วิธีการตก

กัดกร่อน (chemical etching) ของชั้นฟิล์ม จุ่มลงในสารละลายของผงซิลิกา (aerosol 200) และ trichlorosilane จากนั้นให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิด cross link ทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัส พบว่ามีค่ามากกว่า 150° และยังสามารถทดสอบการทำความสะอาดตัวเองและการเกาะติดของผงสีแดง โดยการโรยผงสีแดงลงบนแผ่นตัวอย่างเอียงทำมุม 45° หยคน้ำลงบนตัวอย่าง สังเกตการทำความสะอาดด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) พบว่าตัวอย่างมีการทำความสะอาดตัวเองได้ดี ผงสีแดงไม่เกาะติด

Wu et al. (2008) ได้ศึกษาการเพิ่มความคงทนของฟิล์มไม่ชอบน้ำ บนแก้วด้วยกระบวนการโซลเจลซึ่งมีส่วนประกอบของ pre-linked hydrophobic nano-cluster จาก PDMS, titanium tetraisopropoxide (TIP) และ silica-based sol-gel matrix ที่เติมด้วยผงซิลิกานาอนุภาค 20 nm ด้วยการทดลองแปรผันปริมาณ PDMS ส่วนผสมในปริมาณ 10, 20, 30 และ 50%vol ผลการทดลองพบว่า การเพิ่ม PDMS ขึ้นไปถึง 50%vol จะทำให้ค่า contact angle เพิ่มขึ้นเป็น 130° แต่ค่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PDMS เพิ่มขึ้น จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า ปริมาณ PDMS 10%vol ให้ค่า contact angle เท่ากับ 118° ค่าความแข็งได้เท่ากับ 0.68 GPa และมีความทนต่อการขีดข่วนที่ดี ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวพบว่า พื้นผิวเป็นแบบ nano-structure มีลักษณะยอด (peak) คล้ายดอกเห็ด

Branson et al. (2009) ศึกษาวิธีการเตรียมสารเคลือบผิวไม่ชอบน้ำด้วยการใช้สารตั้งต้นแบบสารละลายที่ประกอบด้วย metal alkoxide เช่น TEOS และ Tetramethylorthosilicate (TMOS) ตัวทำละลาย (solvent) เช่น มีทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) ตัวเร่งปฏิกิริยา (basic catalyst) fluoroalkyl compound และ น้ำ เตรียมสารด้วยกระบวนการโซลเจล จากนั้นเคลือบผิวสารละลายดังกล่าวลงบนผิวของตัวอย่าง (substrate) ด้วยวิธี spin coating สเปรย์ และจุ่ม แล้วให้ความร้อน เกิดเป็นฟิล์มที่มีส่วนผสมของ silane ที่สมบัติแบบไม่ชอบน้ำและมีค่า contact angle 150° ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้นได้เมื่อฟิล์มเป็น hydrophobic silane compound จากกระบวนการทดลองใช้ tetramethyl-orthosilicate (TMOS)/methanol (MeOH)/trifluoropropyl-trimethoxysilane (TFPTMOS)/ น้ำกลั่น ผสมเป็นสารละลายเคลือบบนผิว substrate ให้ความร้อน 100°C เพื่อกำจัดแอลกอฮอล์แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปเคลือบผิวด้วยสารละลาย TMOS/MeOH/ $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ อีกครั้ง เป็นฟิล์มชั้นที่ 2 ให้ความร้อน 100°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นให้เคลือบผิวด้วย HMDS (hexamethyldisilazane) โดยการ treatment ให้เกิดเป็นไฮดรอกซิล hydrophilic hydroxyl group จะถูกแทนที่ด้วย methyl group เกิดเป็นผิวแบบ super hydrophobic ที่มีค่ามุมสัมผัสสูงสุดที่ 170°

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้น สังเกตได้ว่า TEOS เป็นสารอนินทรีย์ แบบ metal alkoxide ที่นิยมนำมาเตรียมให้ได้ซิลิกาเจล และเป็นตัวหลักในการเติม ผงซิลิกาและสารที่ทำให้เกิดสมบัติไม่

ขบนำด้วยกระบวนการโซลเจล และมีการศึกษาอนุกรมการเผา ปริมาณการเติมของสารต่าง ๆ การเติมสาร organosilane compound เป็นตัวประสานในส่วนผสมทำให้เคลือบมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีผลต่อค่า contact angle เพื่อให้งานวิจัยนี้เป็นไปอย่างถูกต้องมีประสิทธิภาพสูงและสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น งานวิจัยจึงจะใช้โปรแกรม Design-Expert[®] version 8.0.1 ในการออกแบบการทดลอง โดยจะใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงฟอกทอเรียล และใช้สถิติวิเคราะห์ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย โปรแกรม Design-Expert[®] version 8.0.1 เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปของบริษัท State-Ease Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา เขียนขึ้นมาเพื่อใช้ออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงสถิติ เหมาะสำหรับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ดังรายละเอียดที่กล่าวในหนังสือ Design And Analysis of Experiments ของ Douglas C. Montgomery และหนังสือการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมของ รศ.ดร. ปารเมศ ชูติมา



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทั้งหมด
ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
X-Ray Diffractometer (XRD)	Bruker	D5005
Contact angle Device	Data physics	OCA20
Scanning Electron Microscope (SEM)	Hitachi	S-2500
Surface Roughness Tester	Taylor-Hobson	Talysulf Series2
Atomic force microscope (AFM)	Park System	XE-70
UV-Visible spectrophotometer (UV-vis)	Varian	Cary 1E
High Temperature Furnace (1500°C)	Nabertherm	P320
Ultrasonic	Vibra-cell	sonic
Hot Plate	Fisher Scientific	Fisher Scientific Hotplate
Thermometer		
Spin Coater	Laurell Technologies corporation	WS-400B-8NPP/LITE
Dryer	ELE	Model SDO 225E1

3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสาร	ชื่อการค้า	ชนิด/เกรด	ผู้ผลิต
สารตั้งต้น	Tetraethyl orthosilicate (TEOS)	98%	Acros Organics
สารตั้งต้น	Poly- dimethylsiloxane(PDMS)	d=0.965	Carioerba
สารตั้งต้น	Aerosil®200	Primary particle size 12nm	Silicadegussa
สารตั้งต้น	Aerosil®90	Primary particle size 20nm	Silica degussa
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Ethanol	99.8%	
ตัวทำละลาย	Isopropyl alcohol	99.7%	Carioerba
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Hydrochloric	37%	Carioerba
ตัวทำละลาย	Acetone	99.8%	Carioerba
สารตั้งต้น	Ferric Oxide		
สารตั้งต้น	Olive oil		
สารตั้งต้น	Iodine		

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การออกแบบการทดลอง ด้วยโปรแกรม Design-expert® มีตัวแปรต้น

(independence variables) 3 ตัวแปรดังนี้

ปริมาณซิลิกา คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงซิลิกาที่เติมลงไปสังเคราะห์ฟิล์มมีระดับการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ (levels) คือ 0.5, 5 และ 10 wt%

อุณหภูมิการเผา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นทดสอบมีระดับการเปลี่ยนแปลง 2 ระดับ คือ 300 และ 400°C

ขนาดซิลิกา คือ ขนาดซิลิกาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มมีระดับการเปลี่ยนแปลง 2 ระดับคือ 12 และ 20 nm

ออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลมีรูปแบบการทดลอง $3 \times 2 \times 2 = 12$ รูปแบบเพื่อให้ผลการทดลองน่าเชื่อถือ ทำการทดลองแต่ละรูปแบบซ้ำ 2 ครั้ง หรือ 2 เปรตพลีเคต (replicate) จึงได้ทำการทดลองแบบ $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$ การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง ตัวแปรตาม (dependence variables) ในงานวิจัยนี้มี 4 ตัว
คือ (1) มุมสัมผัส (contact angle) (2) พลังงานพื้นผิวอิสระ (3) ความสามารถ
ให้แสงส่องผ่าน (light transmittance) (4) ความขรุขระพื้นผิว (surface roughness)

Std.	Run	ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)
1	13	0.5	300	12
2	4	0.5	300	12
3	1	5	300	12
4	3	5	300	12
5	21	10	300	12
6	23	10	300	12
7	14	0.5	400	12
8	16	0.5	400	12
9	11	5	400	12
10	18	5	400	12
11	5	10	400	12
12	19	10	400	12
13	10	0.5	300	20
14	2	0.5	300	20
15	6	5	300	20
16	24	5	300	20
17	17	10	300	20
18	20	10	300	20
19	9	0.5	400	20

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง ตัวแปรตาม (dependence variables) ในงานวิจัยนี้มี 4 ตัว

คือ (1) มุมสัมผัส (contact angle) (2) พลังงานพื้นผิวอิสระ (3) ความสามารถ

ให้แสงส่องผ่าน (light transmittance) (4) ความขรุขระพื้นผิว (surface roughness) (ต่อ)

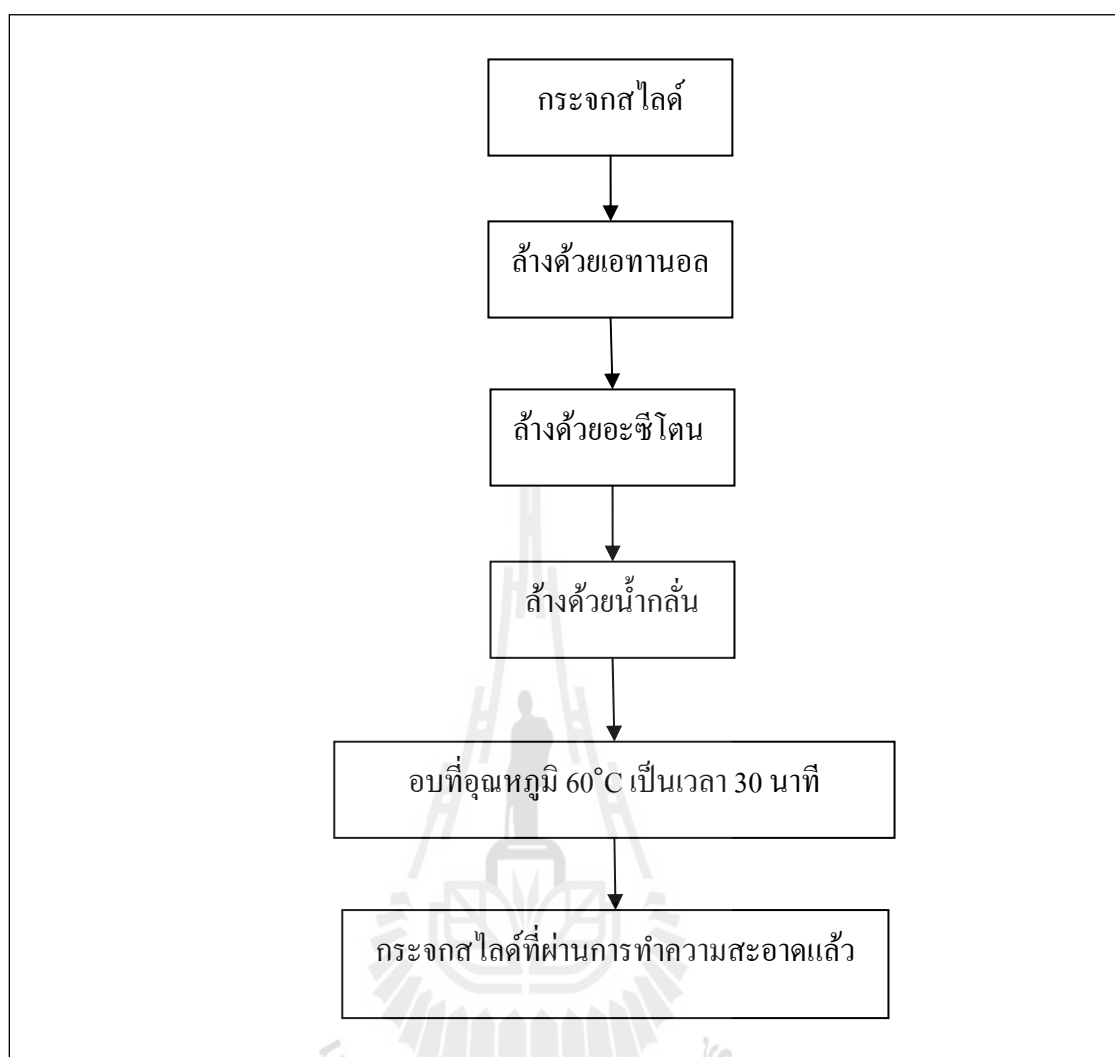
Std.	Run	ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)
20	22	0.5	400	20
21	7	5	400	20
22	12	5	400	20
23	8	10	400	20
24	15	10	400	20

Std. ย่อมาจาก Standard Order ลำดับการทดลองที่เรียงเป็นระเบียบตามการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น

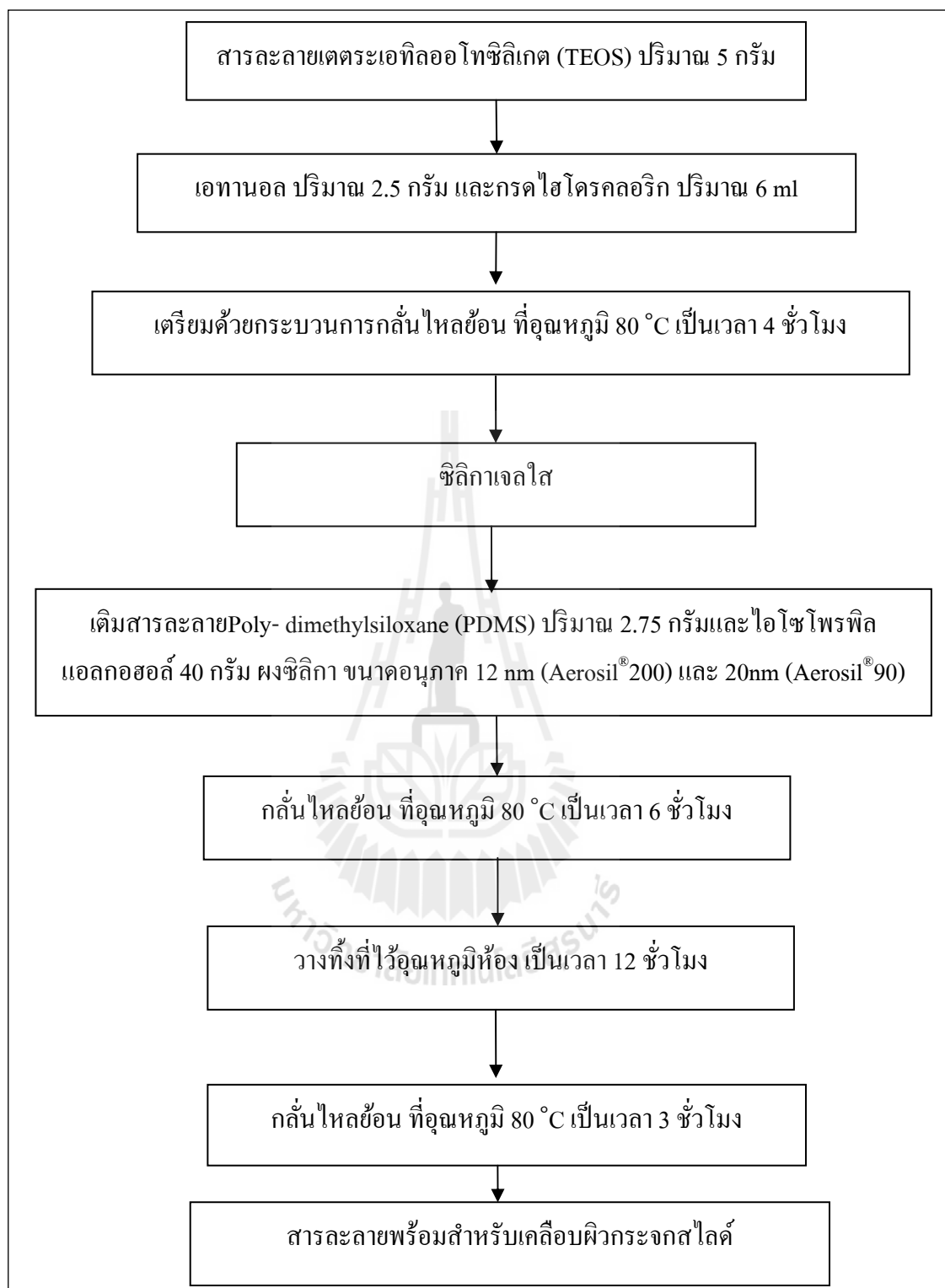
Run หมายความว่า ลำดับการทดลองที่ทำการเก็บข้อมูล เพื่อลดสิ่งรบกวนจากตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ โปรแกรมจึงได้ลำดับเก็บข้อมูลแบบสุ่มให้ขั้นตอนและวิธีการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.1-3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกสไลด์

3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

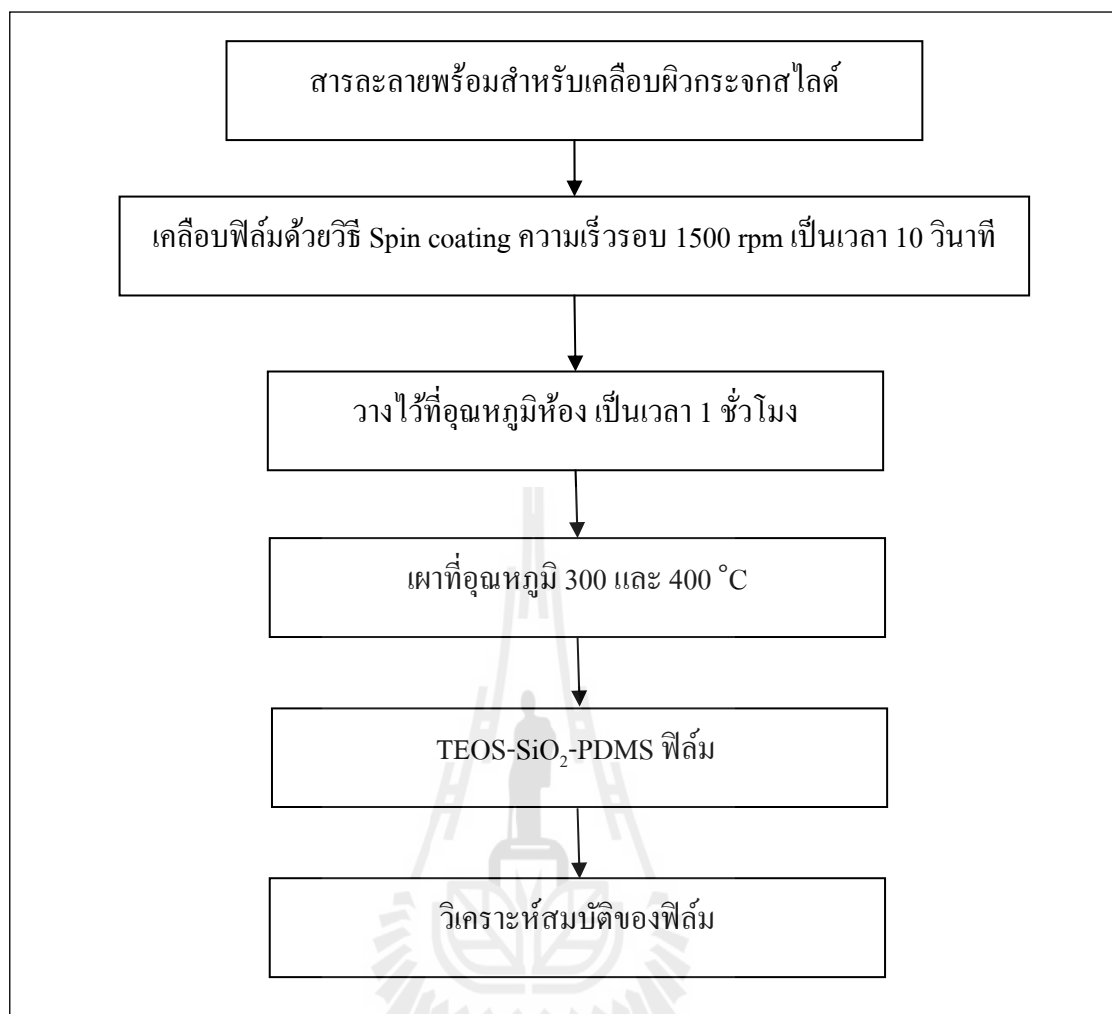
การทำความสะอาดกระจกสไลด์ ทำเพื่อล้างสิ่งสกปรก คราบไขมันบนผิวของกระจกสไลด์ เพื่อง่ายต่อการเคลือบฟิล์ม โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ (แผ่นรองรับฟิล์ม), (On-Uma Nitmitttrakookchai and SitthisuntornSupothina, 2008)



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนสารละลาย TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจล

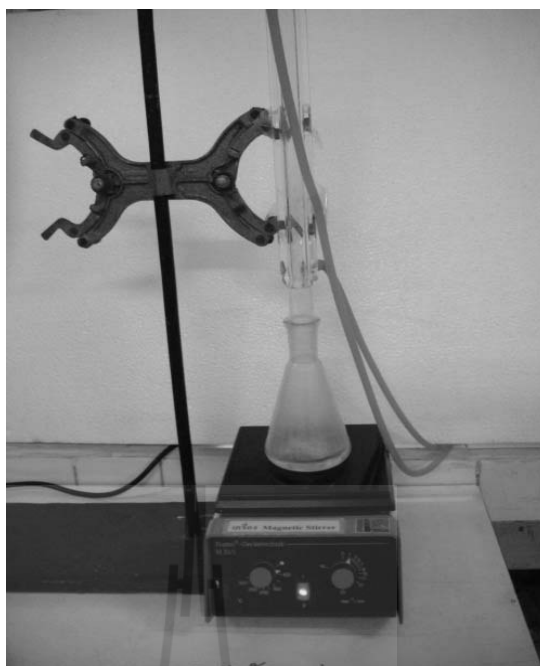


รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนสารละลาย TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจลเคลือบฟิล์มบนกระจกสไลด์ (ต่อ)

การเตรียมสารละลาย TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจลแล้วนำสารละลายไปเคลือบบนกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ปริมาณ 5 กรัม เอทานอล ปริมาณ 2.5 กรัมและกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1M ปริมาณ 6 ml

2. จากสารละลายข้อที่ 1 เตรียมให้เป็นซิลิกาเจล ด้วยวิธีกลั่นไหลย้อน (reflux) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 80 °C พร้อมทั้งกวนผสมขณะทำการกลั่นไหลย้อน แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการกลั่นแบบไหลย้อน

3. เมื่อได้ซิลิเจลใส จากนั้นเติมสารละลาย Poly-dimethylsiloxane (PDMS) ปริมาณ 2.75 กรัม, ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ปริมาณ 40 กรัม และผงซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 nm (Aerosil®200) และ 20nm (Aerosil®90) โดยแปรผันปริมาณและขนาดอนุภาค ของผงซิลิกาตามตารางการทดลองที่ 3.3
4. ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผง ซิลิกาละลายในสารละลายทั้งหมด
5. หลังจากสารละลายทั้งหมดผ่านการอัลตราโซนิก จากนั้นนำไปกลั่นไหลย้อน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง อุณหภูมิ 80 °C
6. เก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. กลั่นไหลย้อนสารละลาย อีกครั้ง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 80 °C
8. นำสารละลายที่ผ่านการกลั่นไหลย้อน ไปเคลือบบนกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ด้วยวิธี spin coating ด้วยเครื่อง spin coater (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นเวลา 10 วินาที โดยตั้งค่าการเคลือบฟิล์ม เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้
 - 8.1 ขั้นตอนที่ 1 ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที
 - 8.2 ขั้นตอนที่ 2 เพิ่มความเร็วรอบเป็น 1500 rpm ใช้เวลา 10 วินาที
 - 8.3 ขั้นตอนที่ 3 ลดความเร็วรอบมาที่ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที



รูป 3.4 เครื่อง spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE

9. วางแผ่นตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ฟิล์มแห้ง
 10. จากนั้นให้ความร้อนเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C โดยแปรผันอุณหภูมิการเผาตามตารางการทดลองที่ 3.4

11. ได้กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม

12. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

หลังจากที่ได้ขึ้นตัวอย่าง กระจกที่เคลือบด้วย TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม นำขึ้นตัวอย่างทดสอบสมบัติ ดังนี้

- 1) ทดสอบมุมสัมผัส (contact angle)
- 2) ทดสอบพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy)
- 3) ทดสอบความสามารถให้แสงส่องผ่าน (transmittance)
- 4) ทดสอบความขรุขระพื้นผิว (surface roughness)
- 5) ตรวจสอบความขรุขระพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 6) ทดสอบความทนทานต่อการขัดสี
- 7) ทดสอบความยากง่ายในการทำความสะอาด

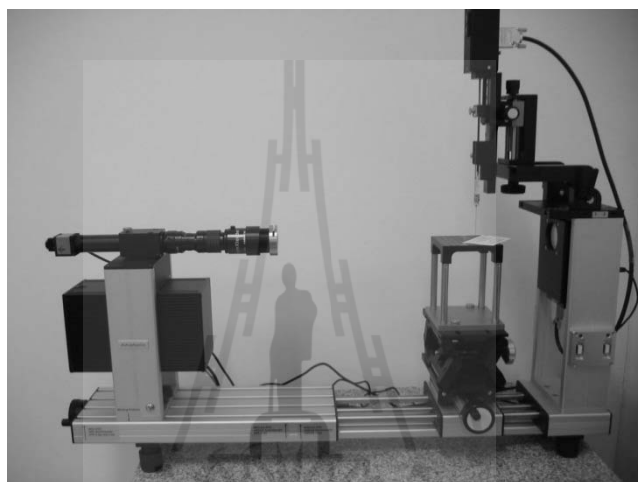
3.3.3 การทดสอบ

1) ทดสอบวัดมุมสัมผัส (contact angle)

การทดสอบวัดมุมสัมผัส ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส Contact angle measurement (OCA20) เพื่อวิเคราะห์สมบัติการเปียกของฟิล์ม ซึ่งบ่งสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของฟิล์ม

ขั้นตอนการทดสอบ

- นำหลอดฉีดของเหลว ดูดน้ำกลั่นปริมาณ 500 μ l
- หยดของเหลวออกจากหลอดฉีด ปริมาณประมาณ 5 μ l ลงบนฟิล์ม
- วัดค่ามุมสัมผัส ด้วยโปรแกรม มีหน่วยเป็น องศา ($^{\circ}$)
- สุ่มวัดมุมสัมผัส จำนวน 3 ตำแหน่ง บนฟิล์ม แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่ามุมสัมผัส
- ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส (OCA20)

2) ทดสอบพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy)

การทดสอบวัดพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (OCA20) มีหลักการมาจากการวัดมุมสัมผัสของของเหลว 3 ชนิดขึ้นไป ที่มีค่าพลังงานพื้นผิวแตกต่างกัน แล้วนำไปคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ ด้วยโปรแกรม ของเหลวสำหรับการทดสอบมีดังนี้

1. น้ำกลั่น
2. ไดเอทิลีน ไกลคอล (Diethylene glycol)
3. เอทิลีน ไกลคอล (Ethylene glycol)

วิธีการคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ คำนวณด้วยวิธี OWRK (Owens-Wendt-Rabel and kaelble¹¹) โดยใช้ของเหลวในการทดสอบอย่างน้อย 3 ชนิด

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำหลอดจี้ดของเหลว คูคของเหลวปริมาณ 500 μl
2. หยดของเหลวออกจากหลอดจี้ด ปริมาณประมาณ 5 μl ลงบนฟิล์ม
3. วัดค่ามุมสัมผัส ด้วยโปรเกรม มีหน่วยเป็น องศา ($^{\circ}$)
4. สุ่มวัดมุมสัมผัส จำนวน 3 ตำแหน่ง บนฟิล์ม แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่ามุมสัมผัส
5. นำค่าเฉลี่ยที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิวอิสระด้วยโปรเกรม
6. ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ มีหน่วยเป็น mN/m
7. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

3) ทดสอบความสามารถให้แสงส่องผ่าน (light transmittance)

การทดสอบความให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม ด้วยการวัดค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน (Transmittance, %T) ด้วยเครื่องมือ UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Cary 1E ทดสอบด้วยแสง UV-Visible (UV-VIS) ช่วงความยาวคลื่น (wavelength) 400-700 nm



รูปที่ 3.6 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

ขั้นตอนการทดสอบ

1. วางตัวอย่างในช่องวางตัวอย่าง เพื่อให้แสง UV-VIS ผ่านตัวอย่าง
2. วัดค่าความสามารถให้แสงส่องผ่านด้วยโปรเกรม
3. ได้ค่าความสามารถให้แสงส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm
4. หาค่าเฉลี่ยของค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm มีหน่วยเป็น %

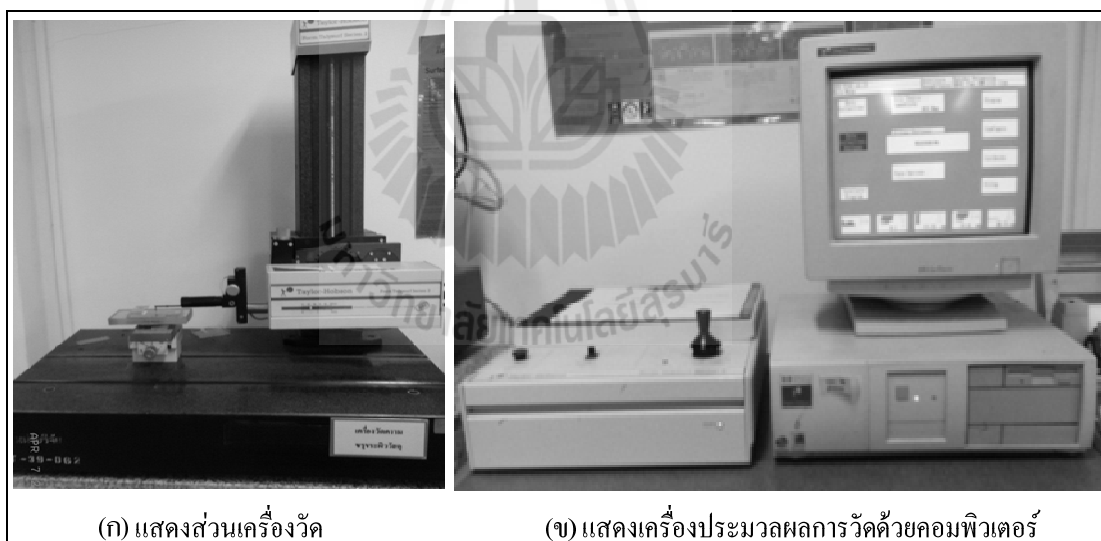
4) ทดสอบความขรุขระพื้นผิว (Surface Roughness)

เครื่องวัดความขรุขระพื้นผิววัสดุ (Surface Roughness Tester) บริษัท Taylor-Hobson รุ่น Talysurf Series 2 (คณะทันตแพทย มหาวิทยาลัยมหิดล) โดยใช้หลักการวัดความสูง-ต่ำของพื้นผิวด้วยหัววัดเป็น ไก่ง มีรัศมี $2\ \mu\text{m}$

ขั้นตอนการทดสอบ

1. แรงกด 100 mg
2. อัตราการเคลื่อนที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
3. Filter type คือ Gaussian
4. ความยาวในการวัด 1 cm
5. การแสดงผล แสดงค่า Ra คือความขรุขระพื้นผิว มีหน่วยเป็น μm
6. วางแผ่นตัวอย่าง บนแท่นวางตัวอย่าง ให้ตัวอย่างระนาบกับแท่นวางตัวอย่าง
7. ใช้คำสั่งจากคอมพิวเตอร์ ให้หัวกด กดลงบนผิวตัวอย่าง แล้วอ่านค่าที่วัดได้จาก

คอมพิวเตอร์



(ก) แสดงส่วนเครื่องวัด

(ข) แสดงเครื่องประมวลผลการวัดด้วยคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องวัดความขรุขระพื้นผิว



รูปที่ 3.8 แสดงวิธีการวัดความขรุขระพื้นผิว

5) การตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การทดสอบความขรุขระพื้นผิว ด้วยเครื่อง Atomic force Microscope (AFM) รุ่น XE-70 ซีรี่ส์ Park System ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แบบการทดสอบ non-contact mode ทดสอบการวัดความขรุขระพื้นผิว

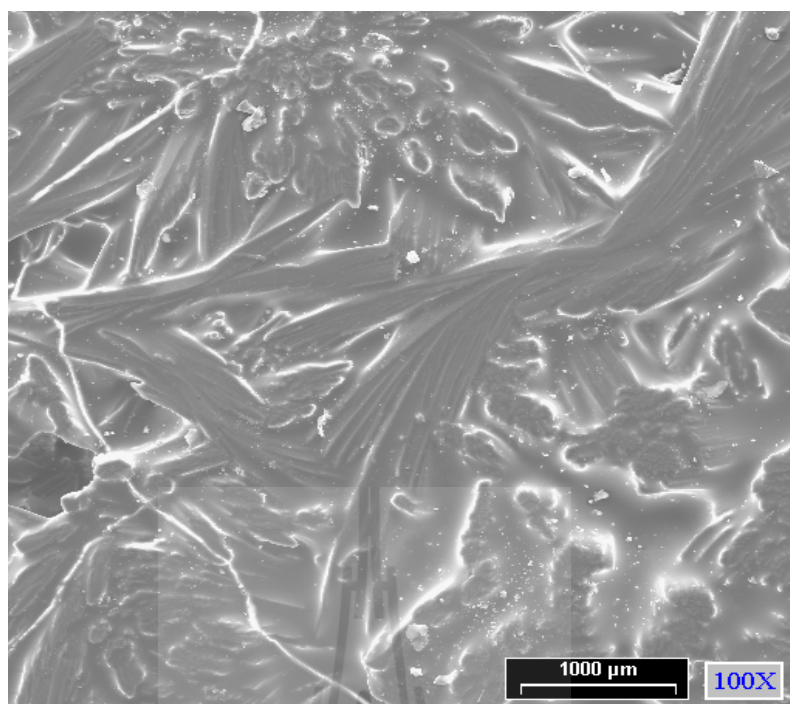
การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS พิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) หรือ AFM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ชนิดหนึ่ง AFM มีหลักการทำงานโดยการใช้หัวอ่านซึ่งเป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นตัววัดแรงดึงดูดหรือแรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นภาพ โดยเมื่อกดหัวอ่านลงบนพื้นผิวที่จะตรวจวัด จะเกิดแรงที่กระทำต่อก้าน(cantilever) ของหัวอ่าน จะทำให้หัวอ่านเอียงด้วยมุมต่าง ๆ กันตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังก้านของหัวอ่าน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบได้ โดย AFM มีความสามารถพิเศษคือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งที่เป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ และมีระดับความสูงต่ำ (roughness) ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตรโดยแปรผันปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะของพื้นผิวฟิล์ม



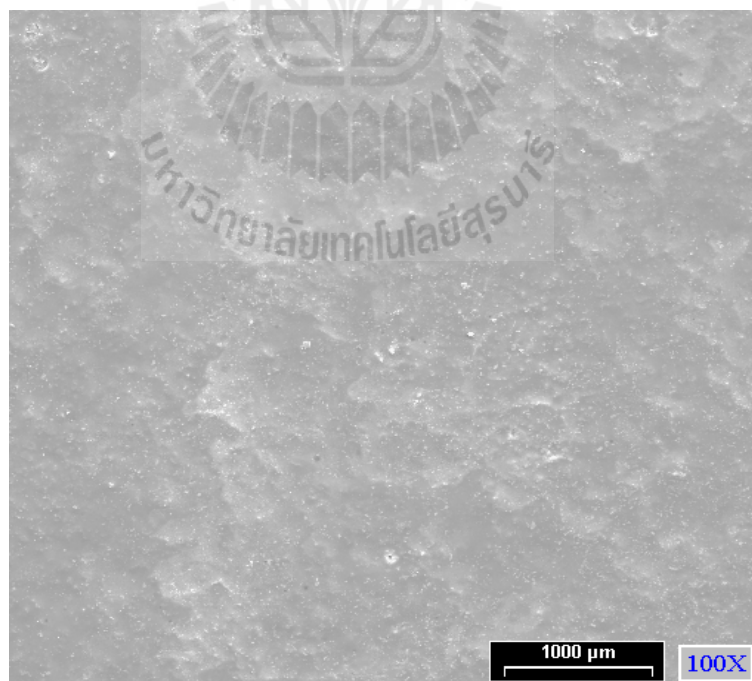
รูปที่ 3.9 เครื่อง Atomic force Microscope (AFM) รุ่น XE-70 ยี่ห้อ Park System

6) ทดสอบความทนทานต่อการขัดสี

ทดสอบมุมสัมผัสของฟิล์มหลังการขัดสีการขัดผิวฟิล์มใช้ สก็อตช์-ไบรต์® แผ่นใยขัดสีเชิงวงขนาด 10×14 เซนติเมตร ที่ติดกับแผ่นกระจกที่มีน้ำหนัก 420 กรัม ขัดบนผิวตัวอย่างที่แบบราบด้วยน้ำผสมผงซักฟอกบนจานหมุน ทดสอบมุมสัมผัสหลังการขัดตามจำนวนรอบขัดที่กำหนดเปรียบเทียบกับมุมสัมผัสหลังการขัดของกระเบื้องที่เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS กับกระเบื้องที่เคลือบด้วย fluoropolymer (3M) แบ่งกระเบื้องที่ใช้ทดสอบความทนทานต่อการขัดสีเป็น 2 ระบบ คือกระเบื้องที่เคลือบด้วย Li₂O-MgO-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ (กระเบื้อง A) และกระเบื้องที่เคลือบด้วย Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂ (กระเบื้อง B) รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องทั้งสองระบบก่อนเคลือบด้วยฟิล์ม



รูปที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบเซรามิกระบบ $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ (กระเบื้อง A)



รูปที่ 3.11 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบกระเบื้องระบบ $\text{Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$
(กระเบื้อง B)

7) การทดสอบหาความต้านทานการเกิดคราบ (stainresistance)

ทดสอบตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 2398 เล่ม 14-2551 โดยสารละลายที่ใช้ทดสอบได้แก่ สารละลายเหล็กออกไซด์ สารละลายไอโอดีน และ olive oil จากห้องตลาด

ขั้นตอนการเตรียมสาร

การเตรียมสารละลายเหล็กออกไซด์

1. ละลายเหล็กออกไซด์ในกลีเซอรอล อัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ 40 ส่วนต่อกลีเซอรอล 60 ส่วนโดยน้ำหนัก

2. กวนผสมให้เหล็กออกไซด์ละลายในกลีเซอรอล

การเตรียมสารละลายไอโอดีน

1. ละลายเกล็ดไอโอดีนในแอลกอฮอล์ อัตราส่วนของไอโอดีน 13 กรัมต่อแอลกอฮอล์ปริมาณ 1 ลิตร

2. กวนผสมให้เกล็ดไอโอดีนละลายในแอลกอฮอล์

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หยดสารละลายที่จะทำให้เกิดคราบสกปรกลงบนตัวอย่าง ใช้ฟูกันเกลี่ยคราบสกปรกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และให้มีความสม่ำเสมอ จำนวน 3 ตำแหน่ง

2. วางตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. หลังจากวางตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำเปล่า แบบน้ำไหลผ่านบนตัวอย่าง

4. ตรวจสอบนิพจน์ผลการทดสอบ และให้ผลการทดสอบเป็นclass ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

การจำแนกผล

จากรูป 3.12 แสดงวิธีการจำแนกผลการทดสอบความต้านทานการเกิดคราบ โดยอธิบายการทดสอบ ได้ดังนี้

Class 5 คือ ผ่านการล้างแผ่นตัวอย่างด้วยน้ำร้อนด้วยอุณหภูมิ 55 ± 5 °C แบบไหลผ่าน จากนั้นเช็ดผิวด้วยผ้าขึ้น

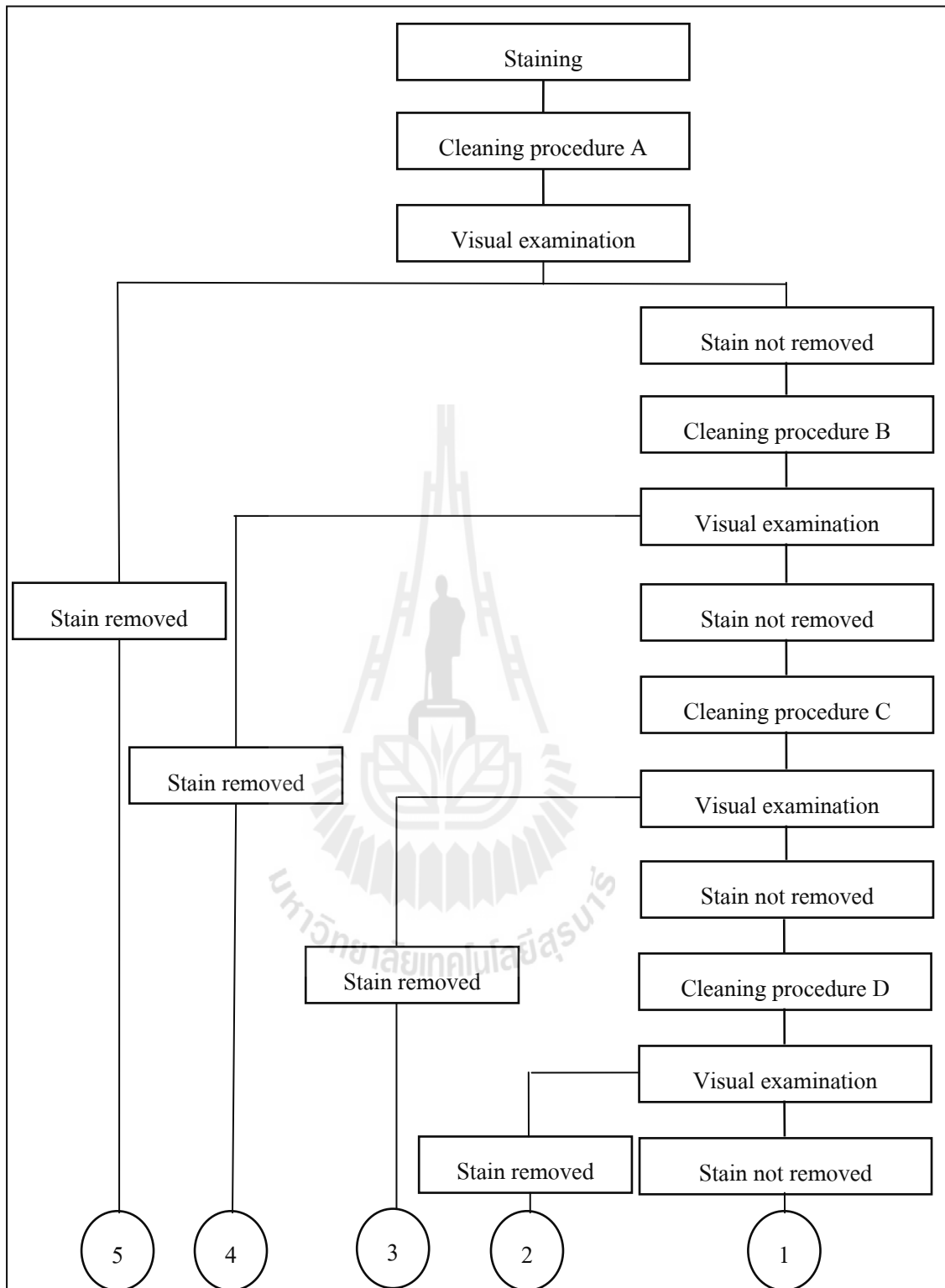
Class 4 คือ ไม่ผ่าน class 5 และต้องล้างแผ่นตัวอย่างด้วยน้ำยาทำความสะอาดจากห้องตลาด (ยี่ห้อ ซันไลต์) ที่มีค่า pH 6.5-7.5 ถูด้วยฟองน้ำ ล้างด้วยน้ำเปล่า แล้วเช็ดด้วยผ้า

Class 3 คือ ไม่ผ่าน class 5 และ 4 แล้วต้องจัดตัวอย่างแบบเชิงกล ด้วยการ
จัดบนแท่นหมุน พร้อมทั้งใช้น้ำยาทำความสะอาดที่มีความเข้มข้น pH 9-10 จากนั้นล้างด้วย
น้ำเปล่าและเช็ดด้วยผ้า

Class 2 คือ ไม่ผ่าน class 5,4 และ 3 แล้วต้องแช่ตัวอย่างลงในกรดไฮโดร
คลอริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำแบบไหลผ่าน แล้วเช็ด

Class 1 คือ ไม่ผ่านทั้ง 5, 4, 3 และ 2 จัดให้อยู่ class 1





รูปที่ 3.12 แสดงวิธีการจำแนกผลการทดสอบความต้านทานการเกิดคราบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวัดมุมสัมผัส (contact angle)

ตารางที่ 4.1 แสดงมุมสัมผัส (contact angle) ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ทั้งหมด 24 การทดลอง ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

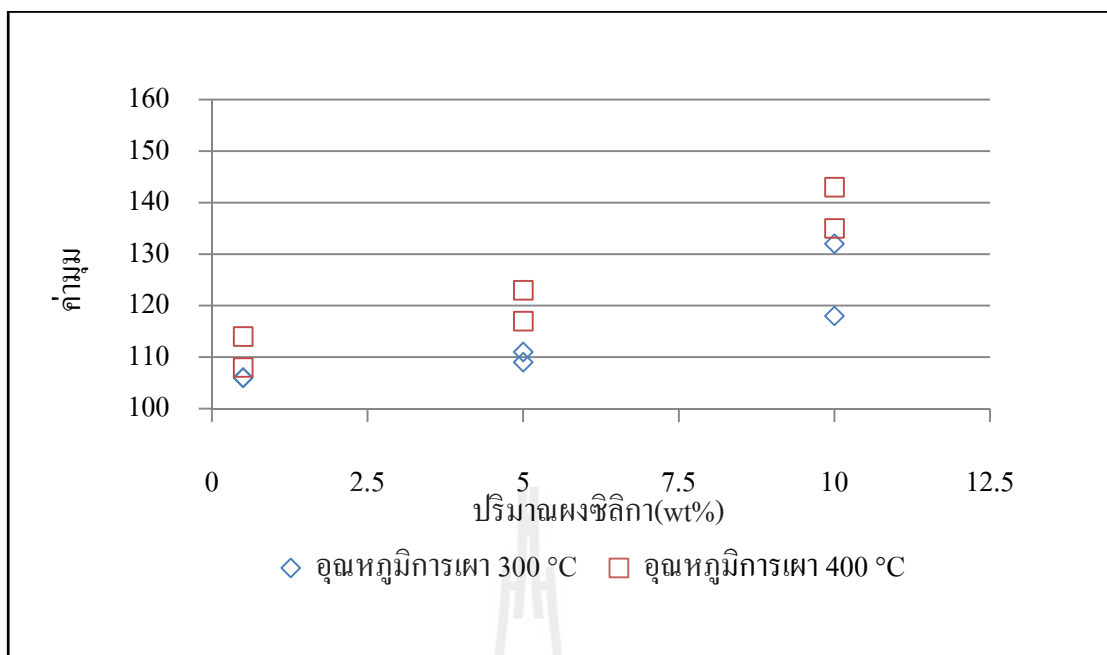
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% และเผาการอุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำการวัดมุมสัมผัส	ตัวแปรการทดลอง			มุมสัมผัส (°)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
1	13	0.5	300	12	106
2	4	0.5	300	12	106
3	1	5	300	12	111
4	3	5	300	12	109
5	21	10	300	12	132
6	23	10	300	12	118
7	14	0.5	400	12	114
8	16	0.5	400	12	108
9	11	5	400	12	117
10	18	5	400	12	123
11	5	10	400	12	143

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% และเผาการอุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

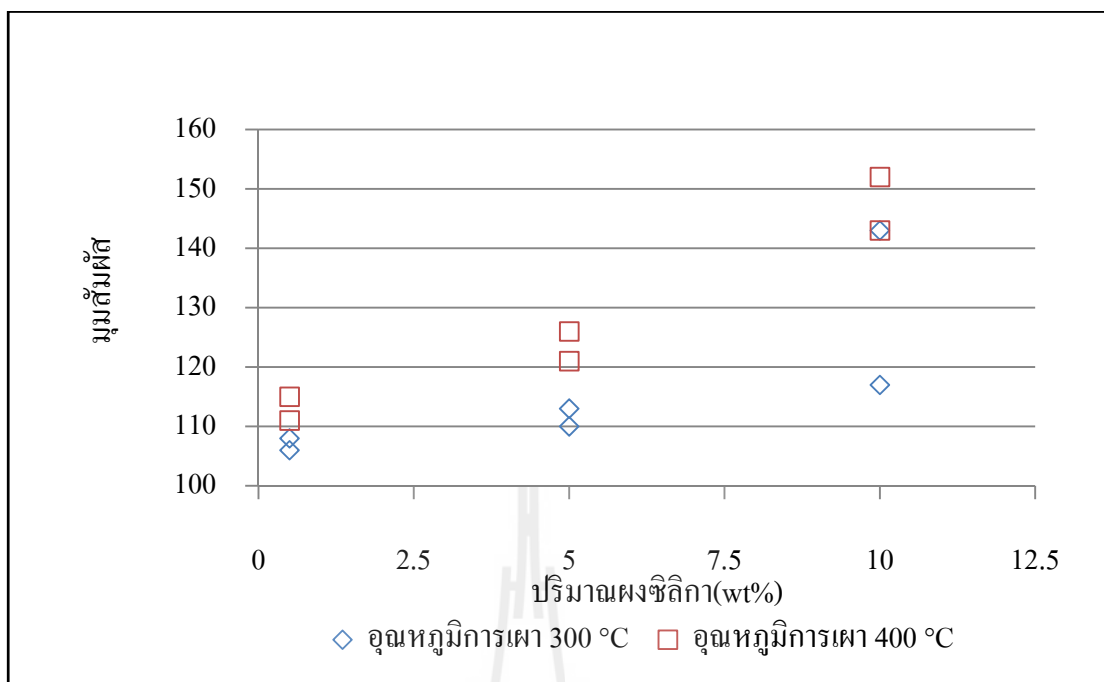
เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำการวัดมุมสัมผัส	ตัวแปรการทดลอง			มุมสัมผัส (°)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
12	19	10	400	12	135
13	10	0.5	300	20	108
14	2	0.5	300	20	106
15	6	5	300	20	110
16	24	5	300	20	113
17	17	10	300	20	143
18	20	10	300	20	117
19	9	0.5	400	20	111
20	22	0.5	400	20	115
21	7	5	400	20	121
22	12	5	400	20	126
23	8	10	400	20	152
24	15	10	400	20	143

รูปที่ 4.1 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อมุมสัมผัส กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา จาก 300 เป็น 400 °C ทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 143° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



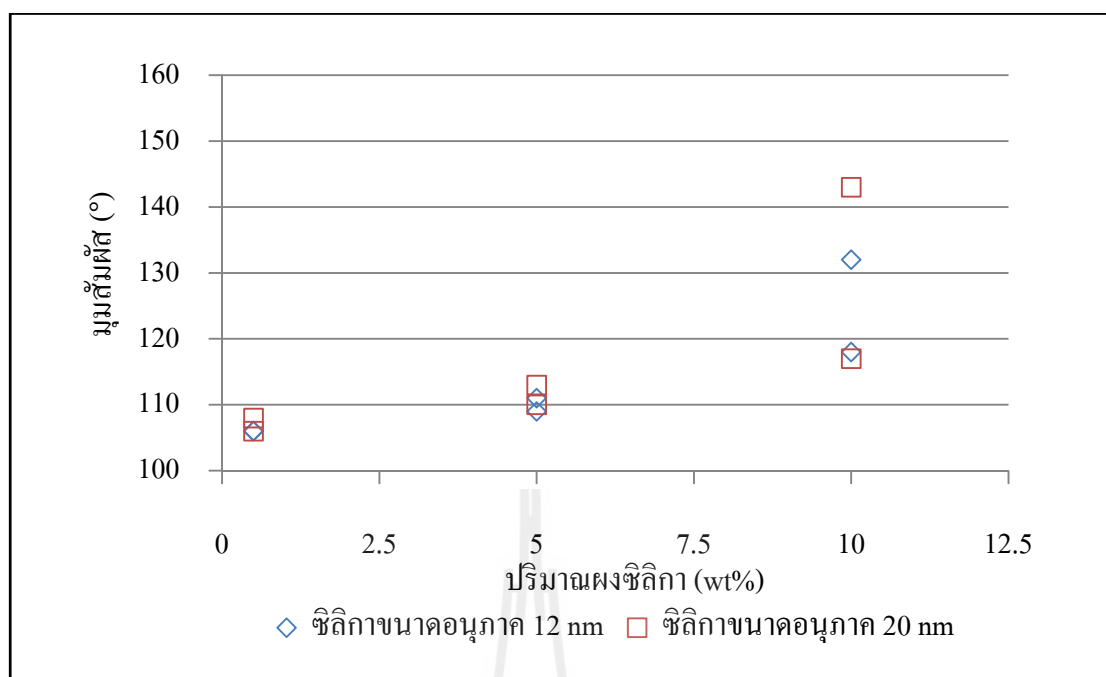
รูปที่ 4.1 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกานาอนุภาค 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

รูปที่ 4.2 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกานาอนุภาค 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิการเผา มีผลต่อค่ามุมสัมผัส กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา จาก 300 เป็น 400 °C ทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 152° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



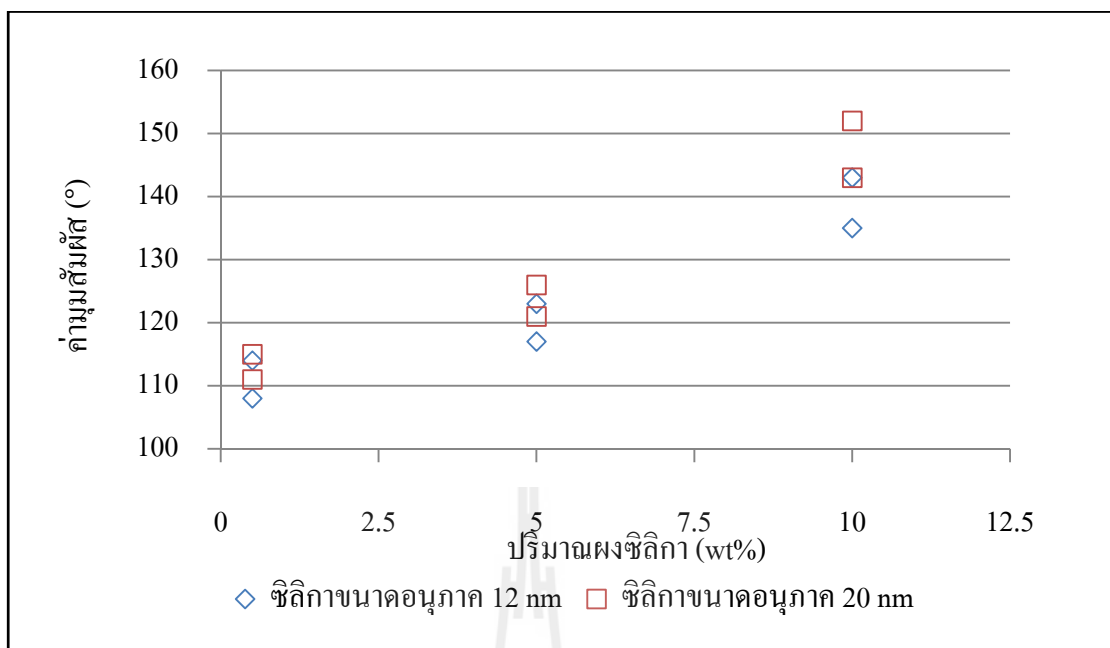
รูปที่ 4.2 แสดงมุมสัมพัทธ์ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

รูปที่ 4.3 แสดงมุมสัมพัทธ์ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ 0.5 และ 5 wt% การเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อมุมสัมพัทธ์ กล่าวคือฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีมุมสัมพัทธ์ต่างกันเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้มุมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมุมสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 143° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



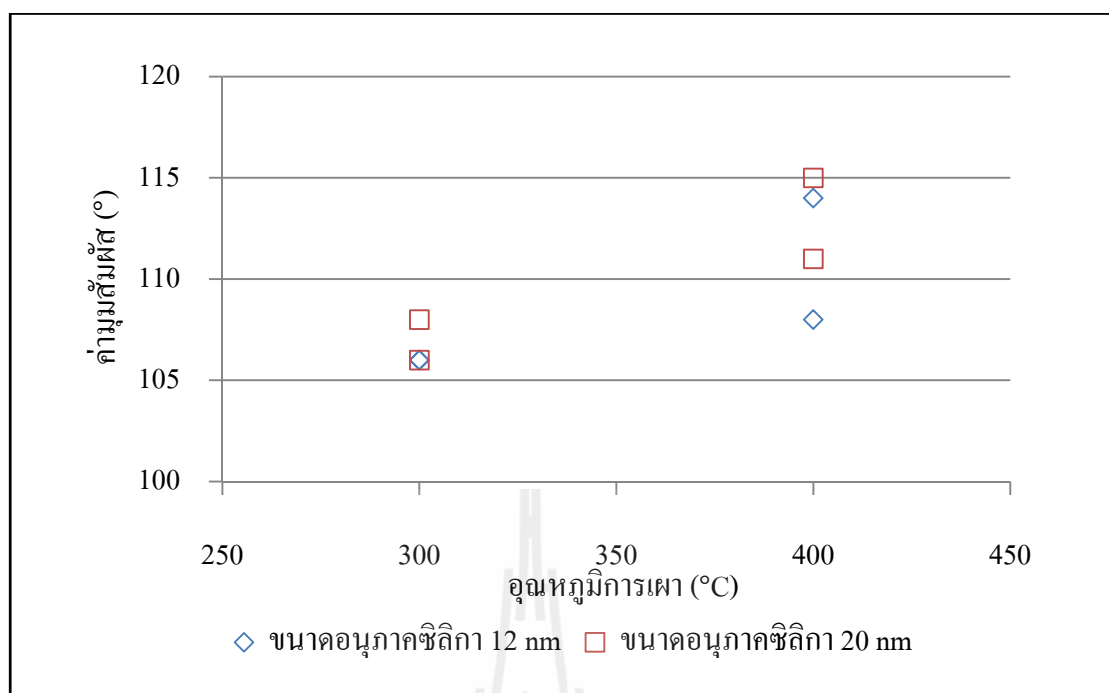
รูปที่ 4.3 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C

รูปที่ 4.4 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา มีผลต่อมุมสัมผัสเล็กน้อย กล่าวคือฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm มีมุมสัมผัสสูงกว่าฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกา 12 nm เล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 152° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



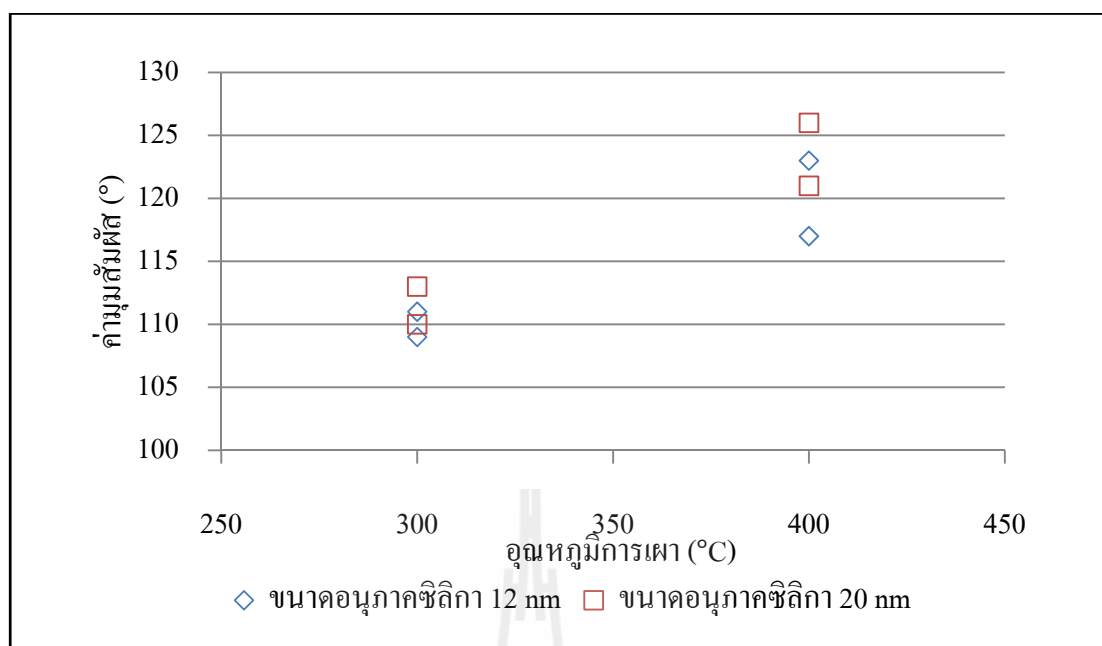
รูปที่ 4.4 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิริลิกายขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C

รูปที่ 4.5 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ปริมาณซิริลิกา 0.5 wt% ขนาดอนุภาคซิริลิกา 12 และ 20 nm แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิริลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อมุมสัมผัส กล่าวคือเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิริลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มอุณหภูมิการเผา จาก 300 เป็น 400 °C จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน โดยจะเห็นได้ว่ามุมสัมผัสมีค่าสูงสุดเท่ากับ 115° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



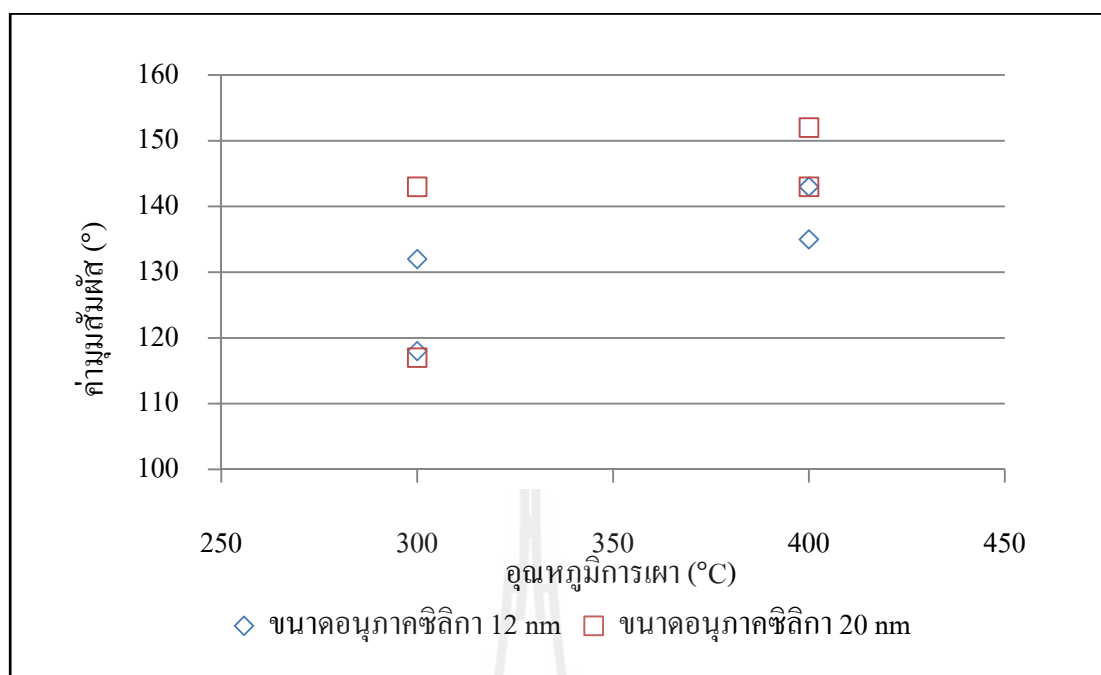
รูปที่ 4.5 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.6 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา มีผลต่อมุมสัมผัสเล็กน้อย กล่าวคือเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm มุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผา จาก 300 เป็น 400 °C จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเห็นได้ว่ามุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 126° จากผลการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลดิบเพื่อให้ทราบผลคร่าว ๆ ว่าปัจจัยใดมีผลต่อมุมสัมผัส โดยการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสรุปว่าปัจจัยใดนั้น มีผลต่อมุมสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ จะอธิบายผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.5.1



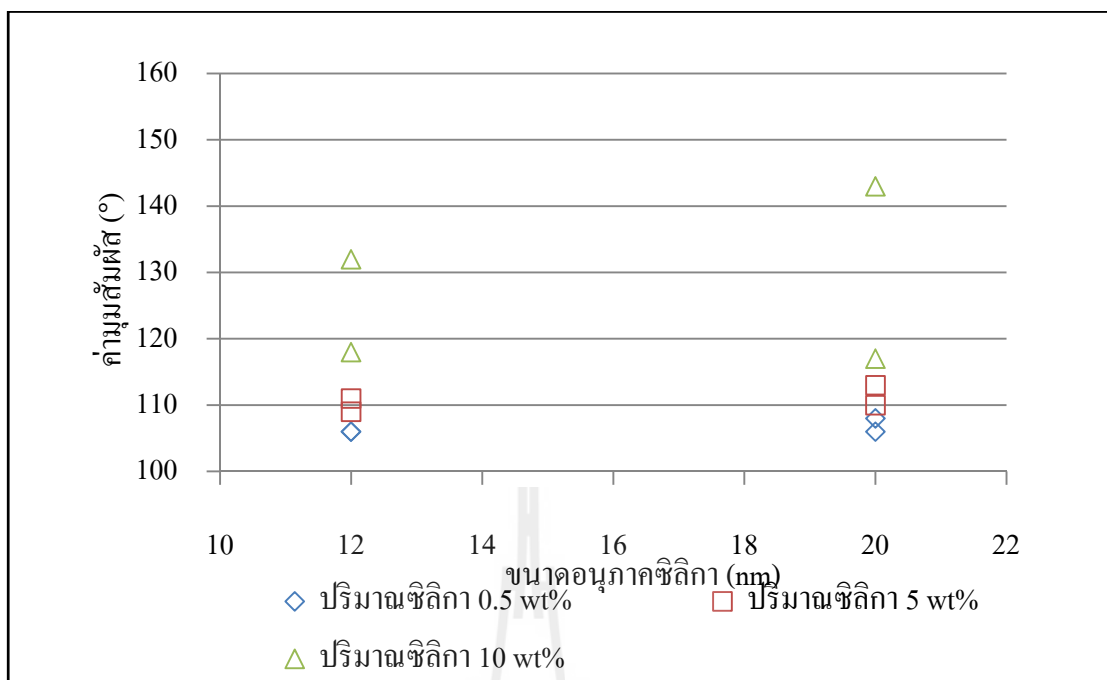
รูปที่ 4.6 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.7 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา มีผลต่อมุมสัมผัส กล่าวคือเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิการเผา จาก 300 เป็น 400 °C จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 152° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



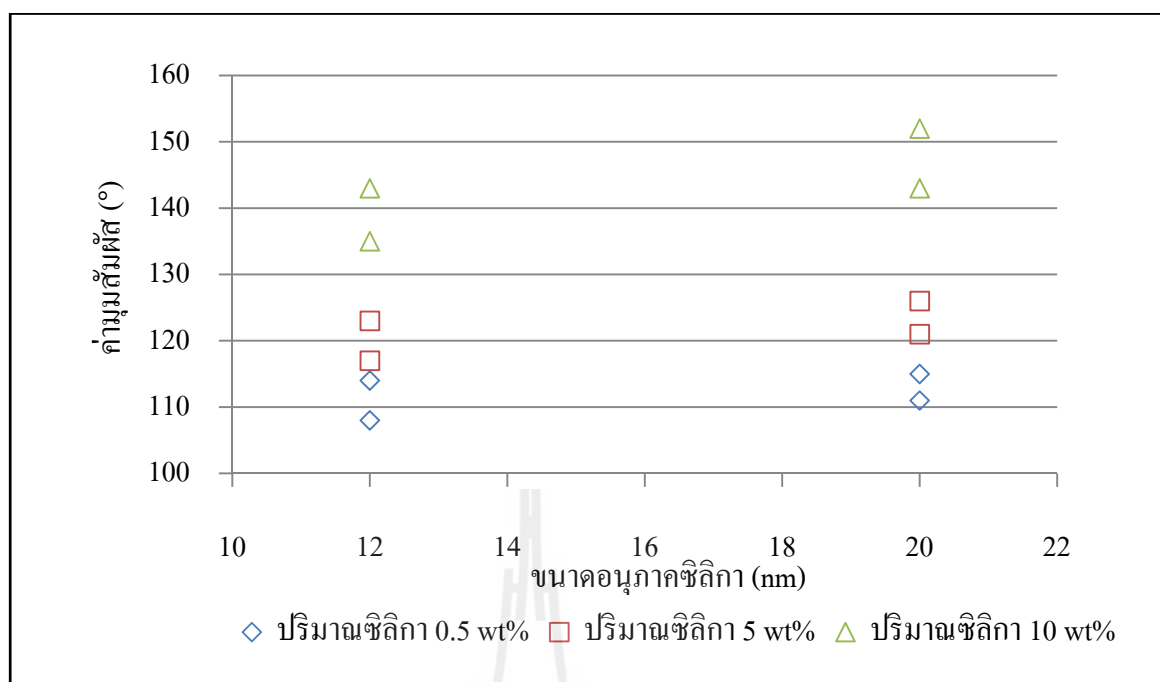
รูปที่ 4.7 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.8 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณผงซิลิกา มีผลต่อมุมสัมผัสอย่างชัดเจน กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้มุมสัมผัสของฟิล์มเพิ่มขึ้นชัดเจน แต่ขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อมุมสัมผัส เพราะการเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 143° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.8 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เฝ้าที่อุณหภูมิ 300 °C

รูปที่ 4.9 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณซิลิกา มีผลต่อมุมสัมผัสอย่างชัดเจน กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา จะทำให้มุมสัมผัสของฟิล์มเพิ่มขึ้นชัดเจน แต่ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อมุมสัมผัสเล็กน้อย เพราะการเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 152° อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.1 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.9 แสดงมุมสัมผัสของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C

รูปที่ 4.10-4.21 แสดงภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ของการทดลองเลขที่ 1-24 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า ภาพหยดน้ำบนฟิล์มที่เตรียมขึ้นทั้งหมด 24 การทดลอง มีค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 แสดงว่าฟิล์มทั้งหมดที่สังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยนี้มีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำ หรือไม่เปียก (Drew Myers, 1946) นอกจากนี้จะเห็นอีกอย่างได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิ ขนาดซิลิกา และปริมาณซิลิกาจะให้หยดน้ำมีความกลมมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกานั้นมีผลต่อค่ามุมสัมผัสอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น จาก 0.5, 5 และ 10 wt% ตามลำดับ ทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน ส่วนขนาดอนุภาคซิลิกาและอุณหภูมิการเผานั้นมีผลต่อมุมสัมผัสเล็กน้อย โดยฟิล์มที่มีค่ามุมสัมผัสสูงสุดเท่ากับ 152° เป็นฟิล์มที่ได้เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm ปริมาณ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C

อนึ่งจากรูปที่ 4.10-4.21 อาจจะเห็นว่าภาพ หยดน้ำในการทดลองที่สภาวะเดียวกัน (เช่น การทดลองเลขที่ 1 กับ 2 หรือการทดลองเลขที่ 3 กับ 4) มีลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณหยดน้ำที่เครื่องมือหยดลงไปบนฟิล์มแต่ละครั้งมีปริมาตร $5 \pm 2 \mu\text{L}$ ดังนั้น น้ำบนผิวชิ้นตัวอย่างจึงมีปริมาตรในช่วง $3-7 \mu\text{L}$ จึงทำให้ภาพหยดน้ำจากการทดลองสภาวะเดียวกัน มีลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย

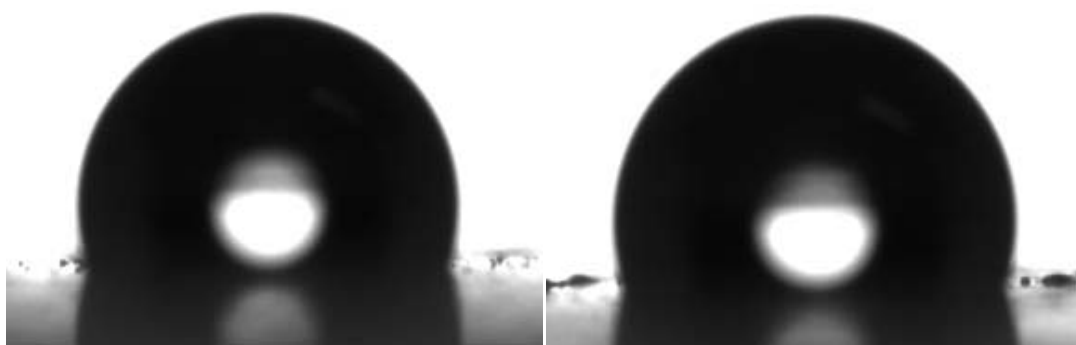
จากการทดลองสรุปได้ว่า การแปรผันปัจจัยต่าง ๆ (ปริมาณซิลิกา, ขนาดอนุภาค และ อุณหภูมิการเผา) มีผลต่อมุมสัมผัส โดยเฉพาะปริมาณซิลิกา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา การเตรียมฟิล์มที่สมบัติแบบไม่ชอบน้ำ พบว่าปริมาณซิลิกา นั้นมีผลต่อมุมสัมผัสอย่างมาก เช่น งานของ Ashley (2004) สามารถเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการโซลเจล ให้สมบัติแบบไม่ชอบน้ำ และมีมุมสัมผัสอย่างน้อย 150° ด้วยการแปรผันปริมาณซิลิกาและปริมาณ PDMS และ Linda Wu (2005) ได้แปรผันปริมาณซิลิกาในส่วนผสม ทำให้ฟิล์มมีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยเติมซิลิกาปริมาณ 30wt% เพิ่มขึ้น ทำให้มุมสัมผัสสูงสุดเท่ากับ 123° และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผา ไม่ค่อยมีผลต่อมุมสัมผัสมากนัก ทั้งนี้อุณหภูมิการเผามีข้อจำกัดสำหรับการเตรียมฟิล์มที่ส่วนผสมของ PDMS Xiaosheng Tian (2007) ใช้การวิเคราะห์ทางความร้อนศึกษาฟิล์มที่มีส่วนผสมของ PMDS พบว่า หากเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 560°C จะทำให้ฟิล์มสูญเสีย PDMS ส่วนแปรผันขนาดอนุภาคซิลิกา มีงานวิจัยที่ผ่านมาของ Ashley jone (2004); Linda Wu (2005); jin-Hyun Hwag (2008) and Wu (2008) พบว่า สามารถเตรียมฟิล์มที่มีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำจากซิลิกาขนาด 12-50 nm ได้ แต่ขนาดของซิลิกาไม่ค่อยมีผลต่อมุมสัมผัสมากนัก แต่มุมสัมผัสจะขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกามากกว่า



การทดลองเลขที่ 1

การทดลองเลขที่ 2

รูปที่ 4.10 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5wt% เผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 1 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106° และการทดลองเลขที่ 2 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106°



การทดลองเลขที่ 3

การทดลองเลขที่ 4

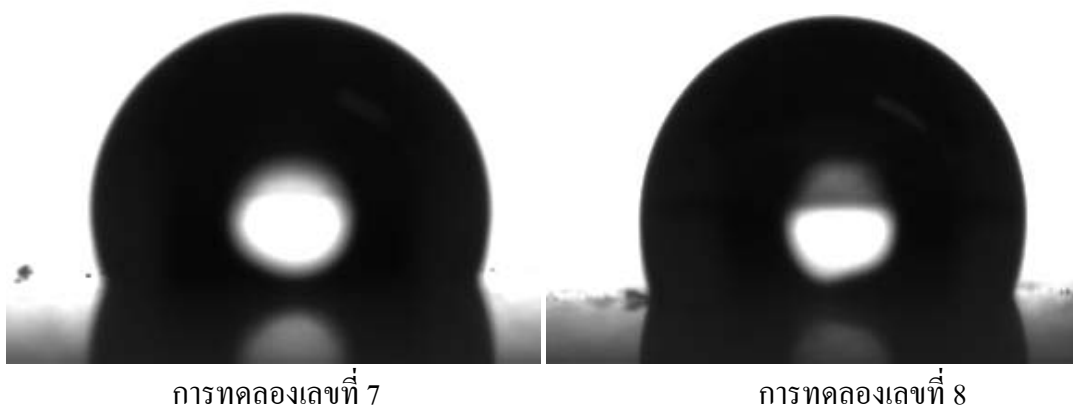
รูปที่ 4.11 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 3 มุมสัมผัส มีค่าเท่ากับ 111° และ การทดลองเลขที่ 4 มุมสัมผัส มีค่าเท่ากับ 109°



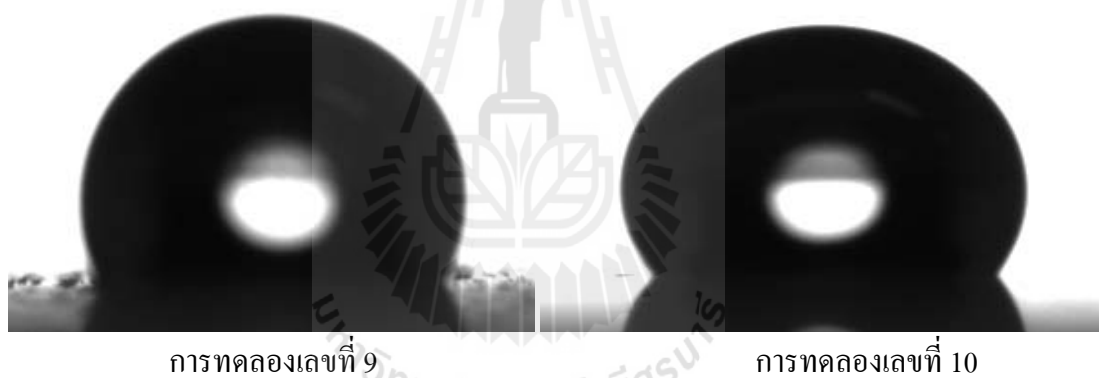
การทดลองเลขที่ 5

การทดลองเลขที่ 6

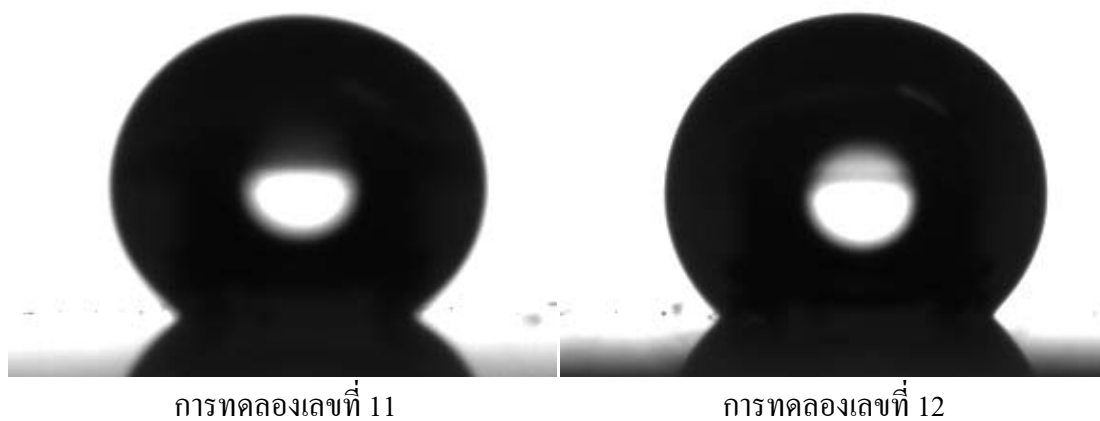
รูปที่ 4.12 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 5 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 132° และการทดลองเลขที่ 6 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 118°



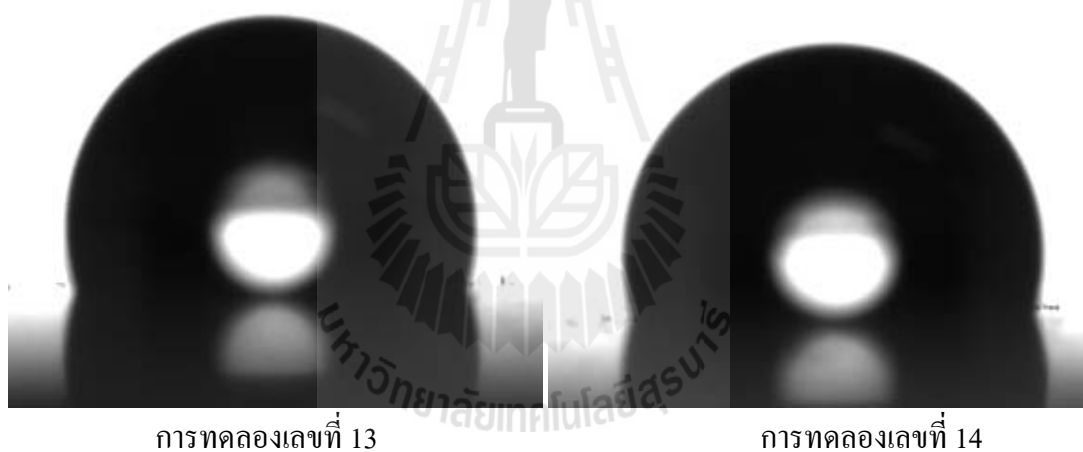
รูปที่ 4.13 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 0.5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 7 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 114° และการทดลองเลขที่ 8 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 108°



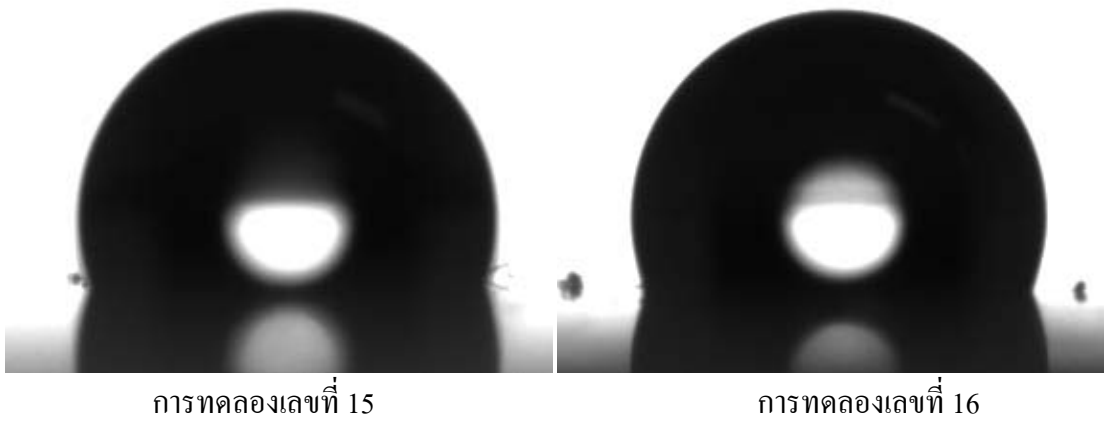
รูปที่ 4.14 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 9 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 117° และการทดลองเลขที่ 10 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 123°



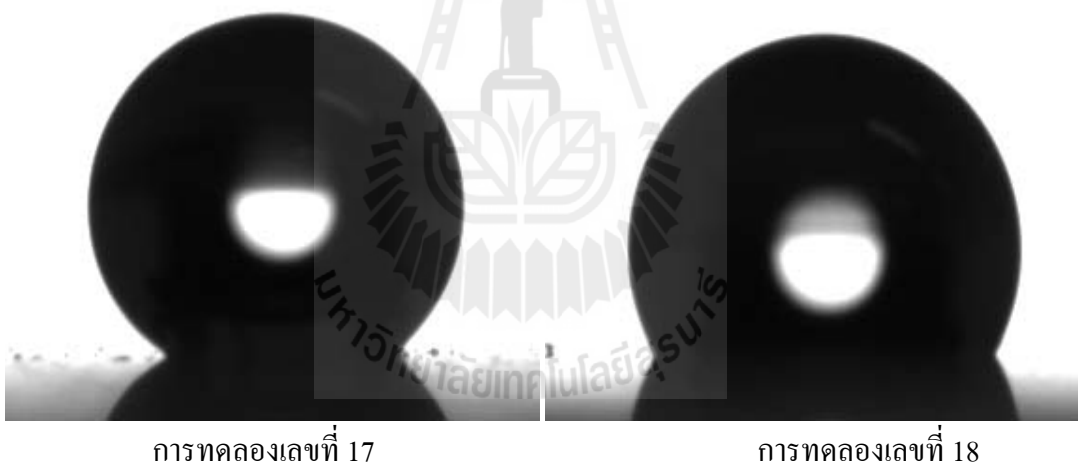
รูปที่ 4.15 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 12 nm 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 11 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143° และการทดลองเลขที่ 12 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 135°



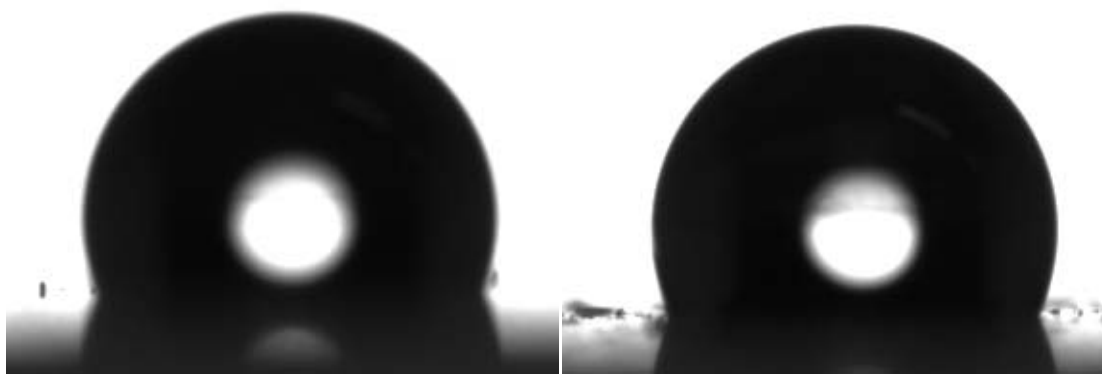
รูปที่ 4.16 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 0.5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 13 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 108° และการทดลองเลขที่ 14 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 106°



รูปที่ 4.17 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 5wt%
 เเผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 15 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 110°
 และการทดลองเลขที่ 16 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 113°



รูปที่ 4.18 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 10wt%
 เเผาที่อุณหภูมิ 300°C การทดลองเลขที่ 17 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143°
 และการทดลองเลขที่ 18 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 117°



การทดลองเลขที่ 19

การทดลองเลขที่ 20

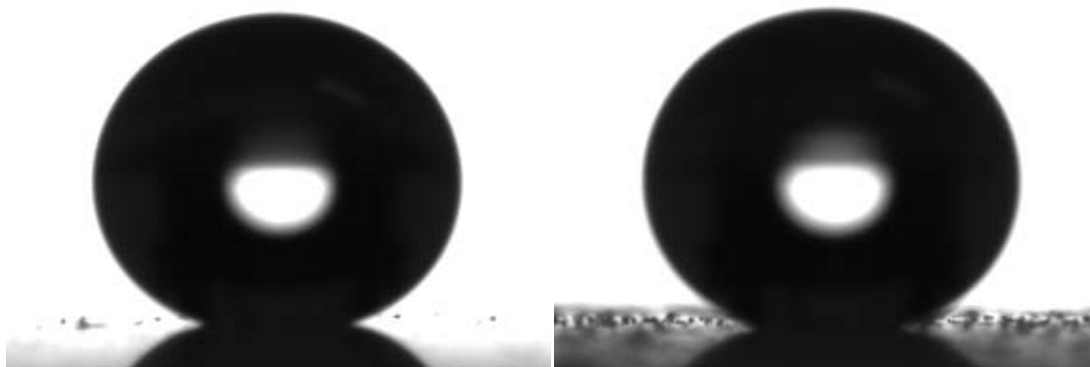
รูปที่ 4.19 ภาพหยดน้ำมันฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยซิลิกาขนาด 20 nm 0.5wt%
 เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 19 มุมสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 111°
 และการทดลองเลขที่ 20 มุมสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 115°



การทดลองเลขที่ 21

การทดลองเลขที่ 22

รูปที่ 4.20 ภาพหยดน้ำมันฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5wt%
 เเผาที่อุณหภูมิ 400°C การทดลองเลขที่ 21 มุมสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 121°
 และการทดลองเลขที่ 22 มุมสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 126°



การทดลองเลขที่ 23

การทดลองเลขที่ 24

รูปที่ 4.21 ภาพหยดน้ำบนฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ซึ่งเตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C การทดลองเลขที่ 23 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 152° และการทดลองเลขที่ 204 มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 143°

4.2 ผลการวัดพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy)

ตารางที่ 4.2 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ทั้งหมด 24 การทดลอง ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

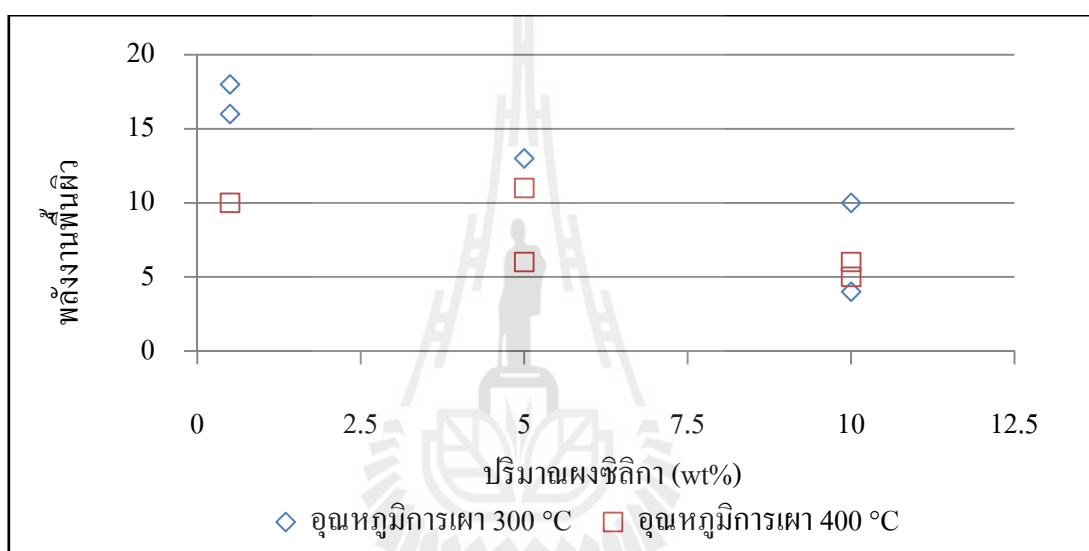
ตารางที่ 4.2 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำการวัดพลังงานพื้นผิวอิสระ	ตัวแปรการทดลอง			พลังงานพื้นผิวอิสระ (mN/m)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
1	13	0.5	300	12	18
2	4	0.5	300	12	16
3	1	5	300	12	13
4	3	5	300	12	13

ตารางที่ 4.2 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

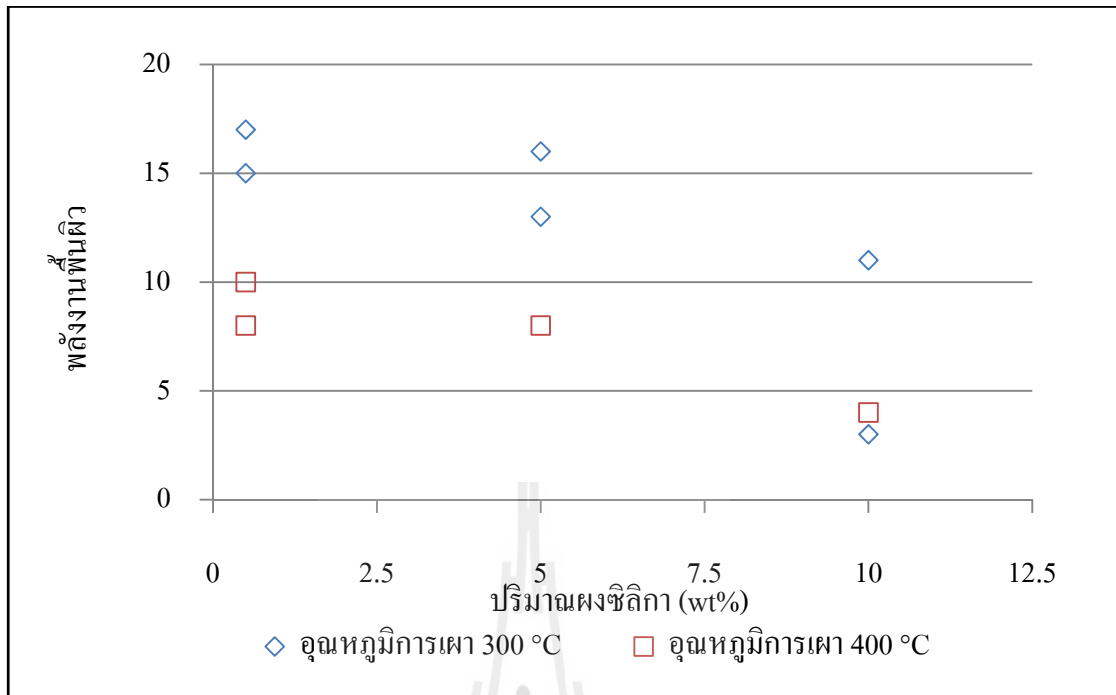
เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำการวัดพลังงานพื้นผิวอิสระ	ตัวแปรการทดลอง			พลังงานพื้นผิวอิสระ (mN/m)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
5	21	10	300	12	4
6	23	10	300	12	10
7	14	0.5	400	12	10
8	16	0.5	400	12	10
9	11	5	400	12	11
10	18	5	400	12	6
11	5	10	400	12	6
12	19	10	400	12	5
13	10	0.5	300	20	17
14	2	0.5	300	20	15
15	6	5	300	20	16
16	24	5	300	20	13
17	17	10	300	20	3
18	20	10	300	20	11
19	9	0.5	400	20	10
20	22	0.5	400	20	8
21	7	5	400	20	8
22	12	5	400	20	8
23	8	10	400	20	4
24	15	10	400	20	4

รูปที่ 4.22 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าพลังงานพื้นผิวอิสระ จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาฟิล์ม จาก 300 เป็น 400 °C และพลังงานพื้นผิวอิสระยังมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผงซิลิกา จาก 0.5 เป็น 10 wt% โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระที่มีต่ำสุดเท่ากับ 4 mN/m คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10 wt% เผาที่ 300 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้นในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



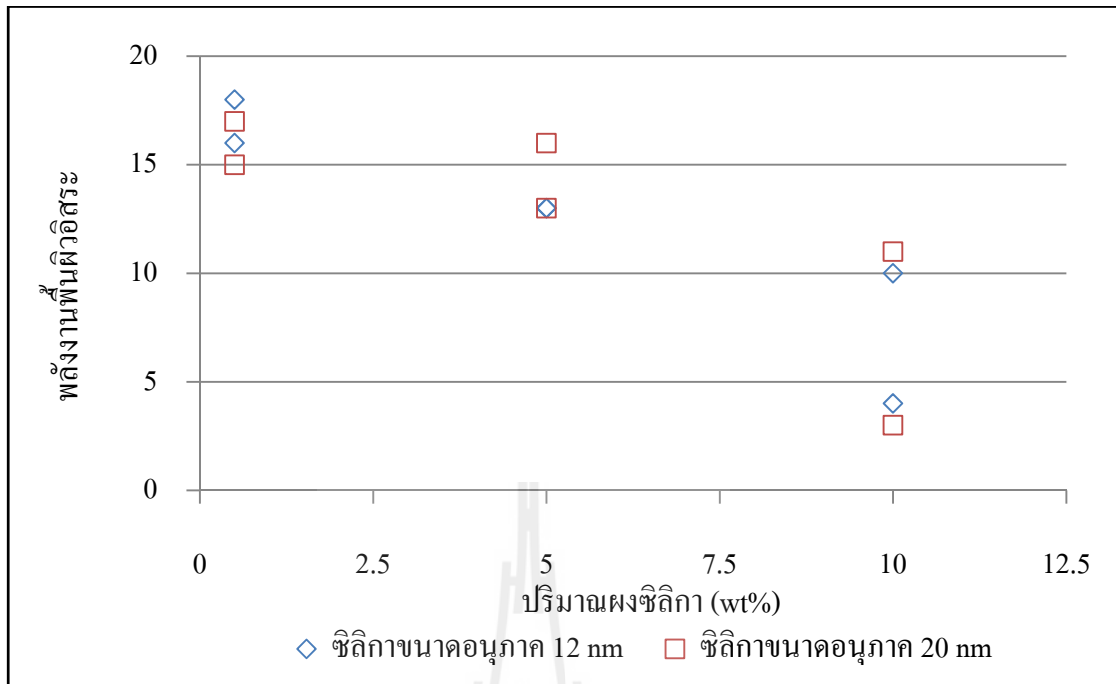
รูปที่ 4.22 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

รูปที่ 4.23 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าพลังงานพื้นผิวอิสระจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่เผาฟิล์ม จาก 300 เป็น 400 °C และพลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงด้วยเมื่อเพิ่มผงซิลิกาจาก 0.5 เป็น 10 wt% โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำสุดเท่ากับ 3 mN/m คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 20 nm 10 wt% เผาที่ 300 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



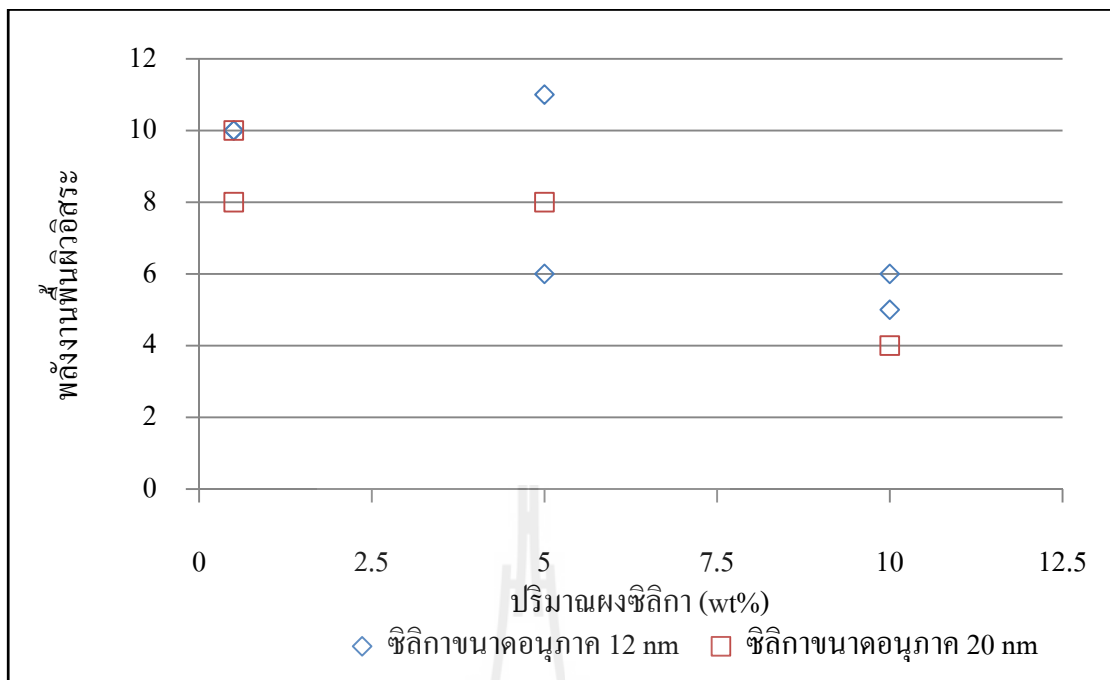
รูปที่ 4.23 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

รูปที่ 4.24 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ กล่าวคือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อย แต่จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม wt% ของผงซิลิกา จะทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำสุดเท่ากับ 3 mN/m คือฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 20 nm 10 wt% เผาที่ 300 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



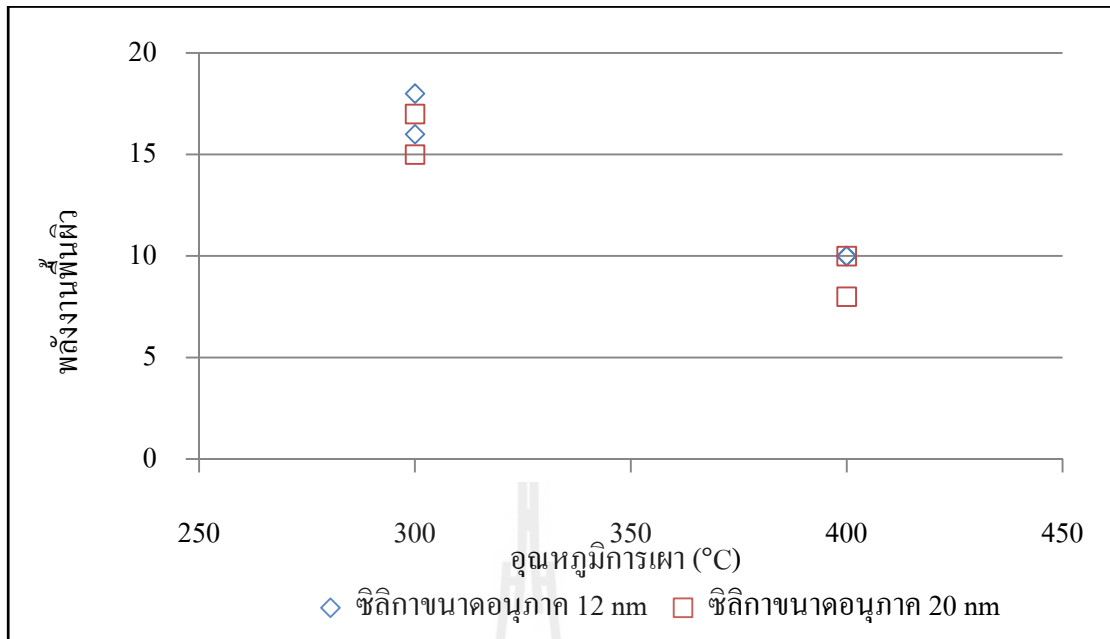
รูปที่ 4.24 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C

รูปที่ 4.25 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ กล่าวคือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อย แต่จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำสุดเท่ากับ 4 mN/m คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 20 nm 10 wt% เผาที่ 400 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



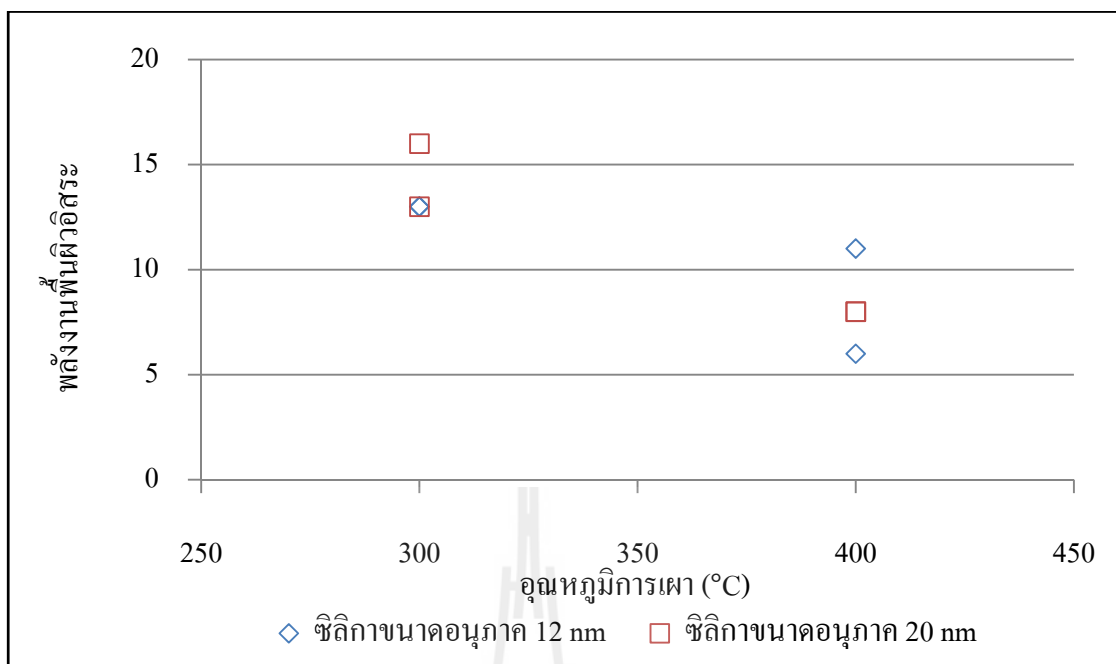
รูปที่ 4.25 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C

รูปที่ 4.26 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ กล่าวคือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อยแต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำสุดเท่ากับ 8 mN/m คือฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 20 nm 0.5 wt% เผาที่ 400 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



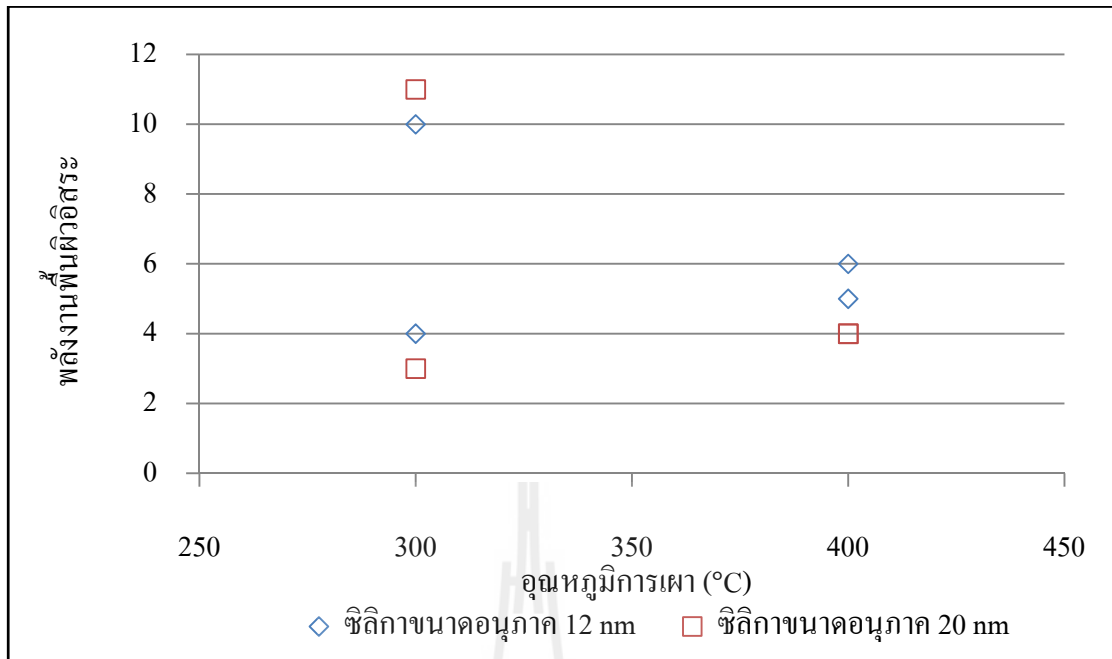
รูปที่ 4.26 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.27 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ กล่าวคือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อย แต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยฟิล์มที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำสุดเท่ากับ 6 mN/m คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยซิลิกา 12 nm 5wt% เผาที่ 400 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



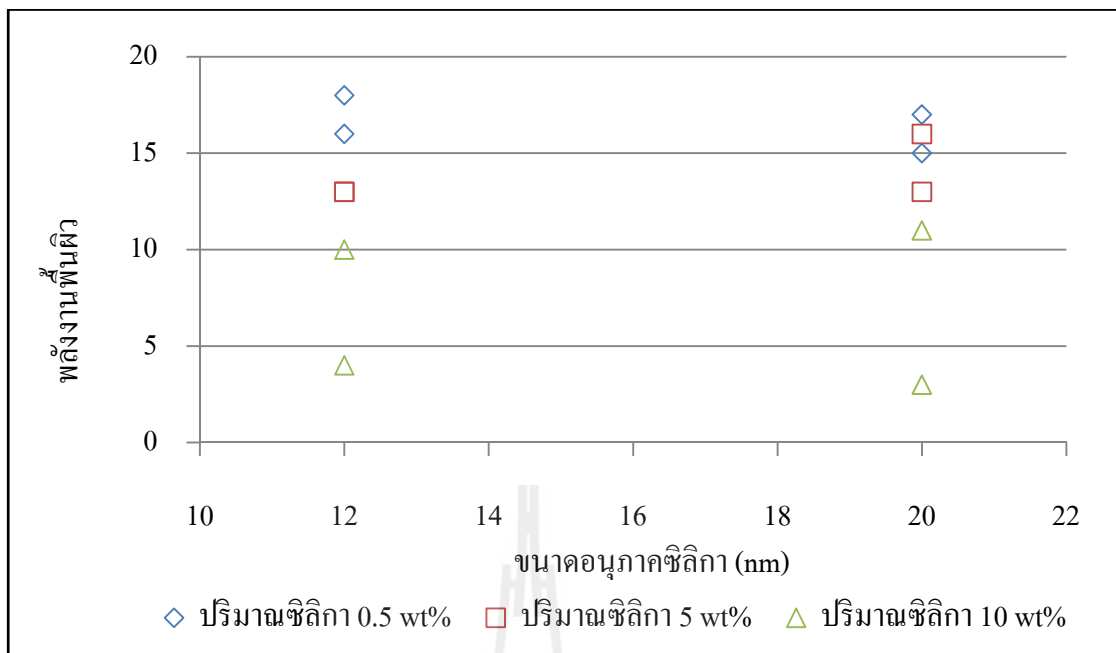
รูปที่ 4.27 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 5 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C

รูปที่ 4.28 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา ไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ กล่าวคือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 เป็น 20 nm มีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อยยอนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



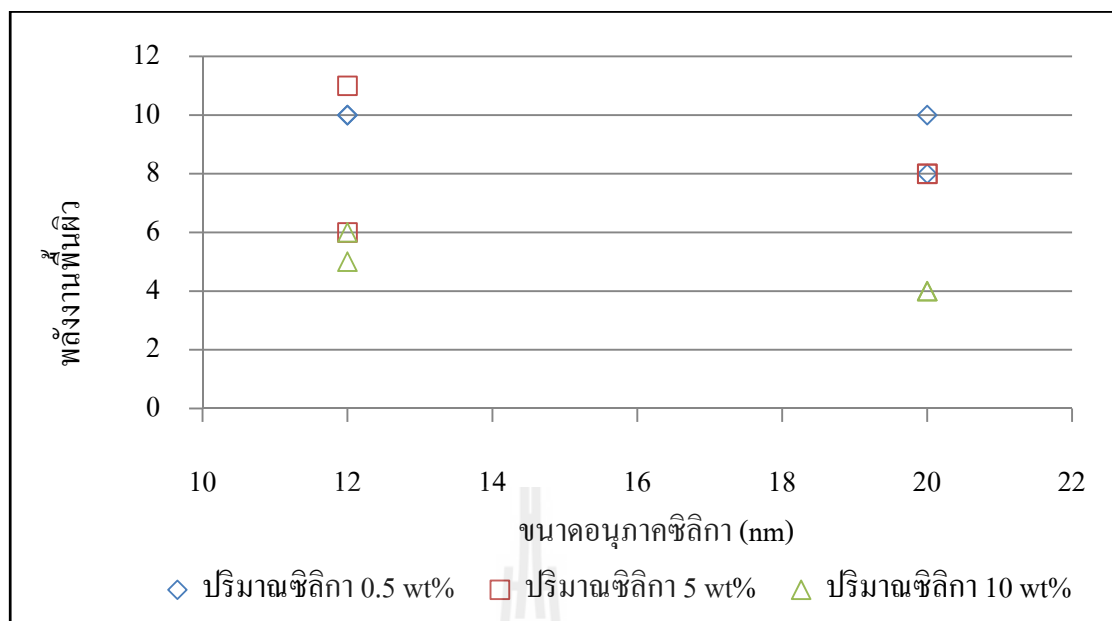
รูปที่ 4.28 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C

รูปที่ 4.29 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C จากรูปจะเห็นได้ว่า ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ wt% ของซิลิกามากขึ้นจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ฟิล์มที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดต่างกันจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อย อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.29 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300°C

รูปที่ 4.30 แสดงพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400°C จากรูปจะเห็นได้ว่า ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ wt% ของซิลิกามากขึ้นจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ฟิล์มที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดต่างกันจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระต่างกันเล็กน้อยหนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.2 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.30 พลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 °C

จากทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยต่าง ๆ (ปริมาณซิลิกา, ขนาดอนุภาคซิลิกา และอุณหภูมิการเผา) มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ โดยเฉพาะปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา การเพิ่มปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา ทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ขนาดอนุภาคซิลิกาไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระมากนัก ปกติแล้วฟิล์มที่มีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำควรจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์มต่ำซึ่งจะทำให้หยดน้ำไหลออกจากฟิล์มได้ง่าย อนึ่งพลังงานพื้นผิวอิสระมีความสัมพันธ์กับมุมสัมผัส ตามสมการของยัง (young equation) (drew mayer, 1946) จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นว่า ถ้าพลังงานพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของแข็ง-ก๊าซ มีค่าน้อยจะทำให้มุมสัมผัสมีค่ามากขึ้น และทำให้ฟิล์มมีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา Minglin Ma (2006) พบว่า พื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ จะต้องมีความสัมพันธ์สูง และมีพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำ การเพิ่มปริมาณของผงซิลิกาในส่วนผสมจึงทำให้ฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคซิลิกาและอุณหภูมิการเผาไม่ค่อยมีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ เนื่องจากสามารถทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงเล็กน้อย อนึ่งอุณหภูมิการเผาของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS จะต้องไม่มากกว่า 560 °C (Xiaosheng Tian, 2007) เพราะว่าถ้าเผาสูงกว่านี้ทำให้ฟิล์มสูญเสียสมบัติไม่ชอบน้ำ

4.3 ผลการวัดความสามารถให้แสงส่องผ่าน (light transmittance)

ตารางที่ 4.3 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่าน (light transmittance) ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ทั้งหมด 24 การทดลอง ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

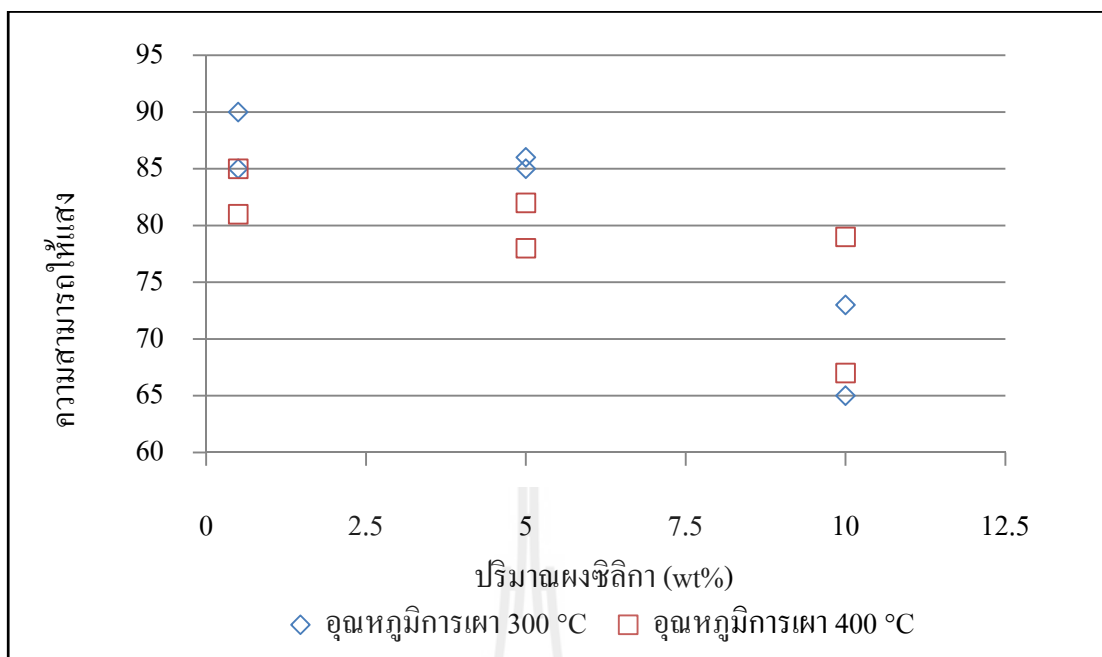
ตารางที่ 4.3 ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผการอุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

เลขที่การทดลอง	ลำดับที่การวัดความสามารถให้แสงส่องผ่าน	ตัวแปรการทดลอง			ความสามารถให้แสงส่องผ่าน (%)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของผงซิลิกา (nm)	
1	13	0.5	300	12	85
2	4	0.5	300	12	90
3	1	5	300	12	86
4	3	5	300	12	85
5	21	10	300	12	73
6	23	10	300	12	65
7	14	0.5	400	12	85
8	16	0.5	400	12	81
9	11	5	400	12	82
10	18	5	400	12	78
11	5	10	400	12	79
12	19	10	400	12	67
13	10	0.5	300	20	90

ตารางที่ 4.3 ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เฝ้าการอุณหภูมิ 300 กับ 400 °C (ต่อ)

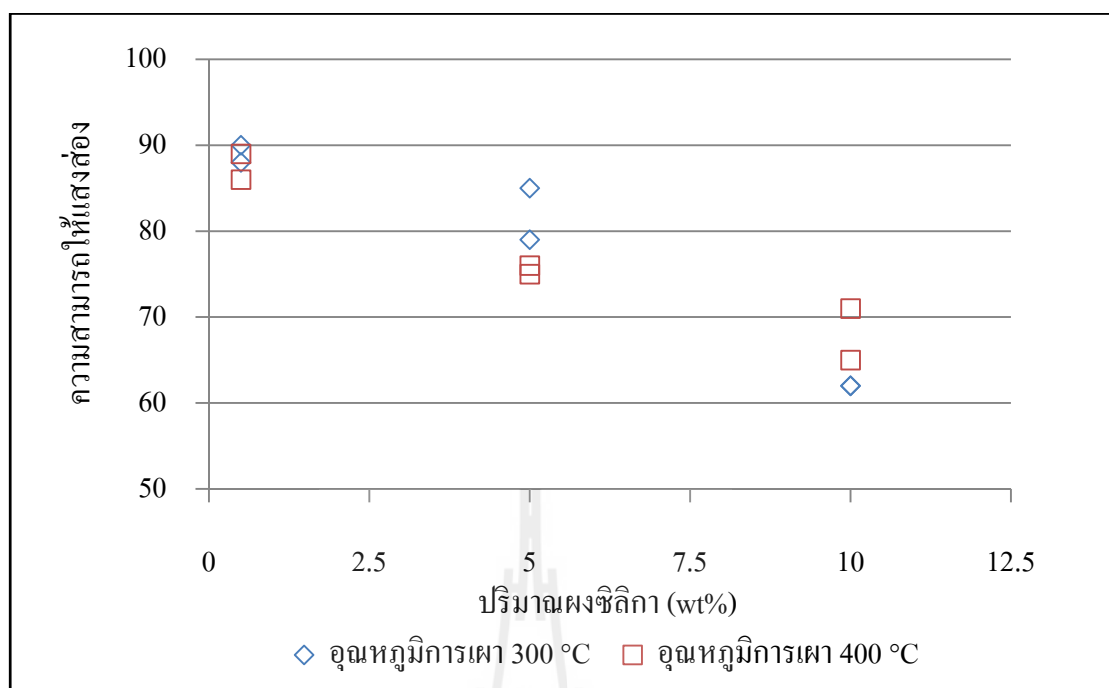
เลขที่การทดลอง	ลำดับที่การวัดความสามารถให้แสงส่องผ่าน	ตัวแปรการทดลอง			ความสามารถให้แสงส่องผ่าน (%)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของผงซิลิกา (nm)	
14	2	0.5	300	20	88
15	6	5	300	20	85
16	24	5	300	20	79
17	17	10	300	20	62
18	20	10	300	20	62
19	9	0.5	400	20	89
20	22	0.5	400	20	86
21	7	5	400	20	75
22	12	5	400	20	76
23	8	10	400	20	65
24	15	10	400	20	71

รูปที่ 4.31 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่า การเพิ่ม wt% ของซิลิกาจะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และที่ wt% ของซิลิกาน้อย ๆ (0.5-5 wt%) การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 300 เป็น 400 °C จะทำให้ความโปร่งใสของฟิล์มลดลง โดยฟิล์มที่มีความสามารถให้แสงส่องผ่านสูงสุด 90% คือฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 12 nm 0.5 wt% เฝ้าที่ 300 °C และฟิล์มที่มีความสามารถให้แสงส่องผ่านต่ำสุด 65% คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 12 nm 10 wt% เฝ้าที่ 300 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



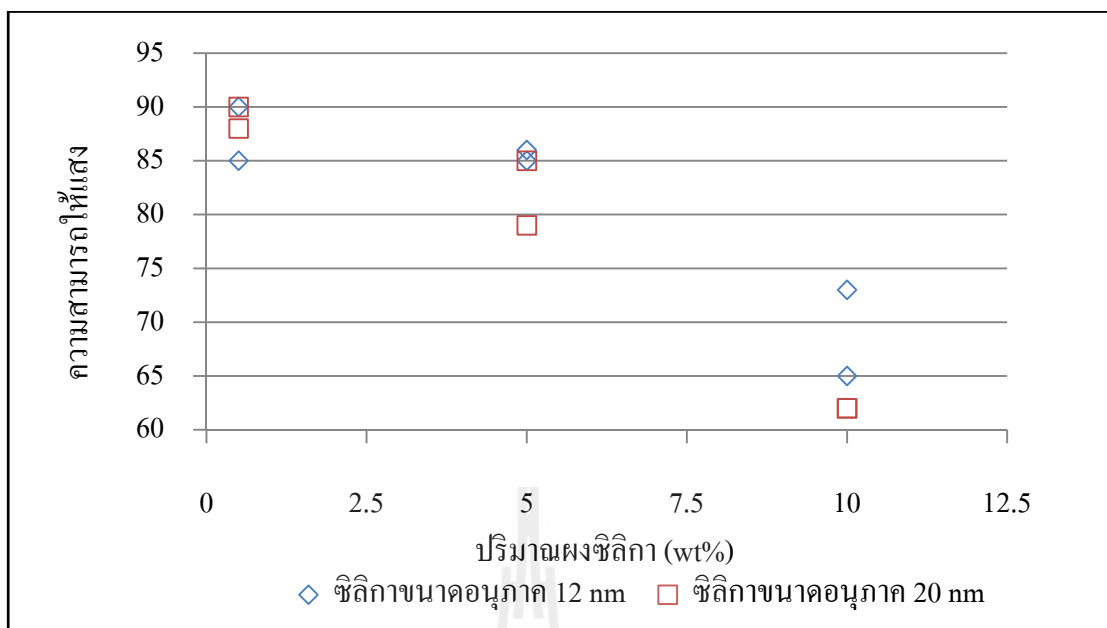
รูปที่ 4.31 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.32 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูป จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม wt% ของซิลิกาจะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มลดลง อย่างเห็นได้ชัดแต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผาไม่ผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มไม่ มาก โดยฟิล์มที่มีความสามารถให้แสงส่องผ่านสูงสุดเท่ากับ 89% คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ ซิลิกา 20 nm 0.5 wt% เผาที่ 300 °C และฟิล์มที่มีความสามารถให้แสงส่องผ่านต่ำสุด เท่ากับ 62% คือ ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา 20 nm 10 wt% เผาที่ 300 °C อนึ่งคำอธิบายผลการ ทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



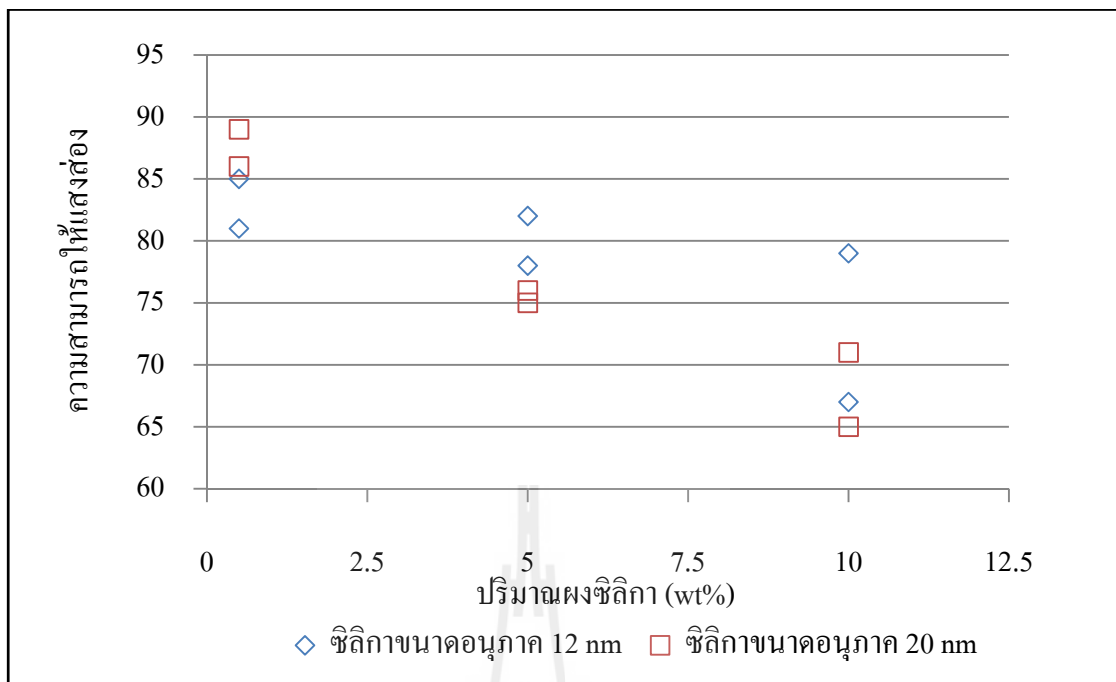
รูปที่ 4.32 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.33 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นว่า ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณผงซิลิกาจะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 62% และสูงสุดเท่ากับ 90%อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



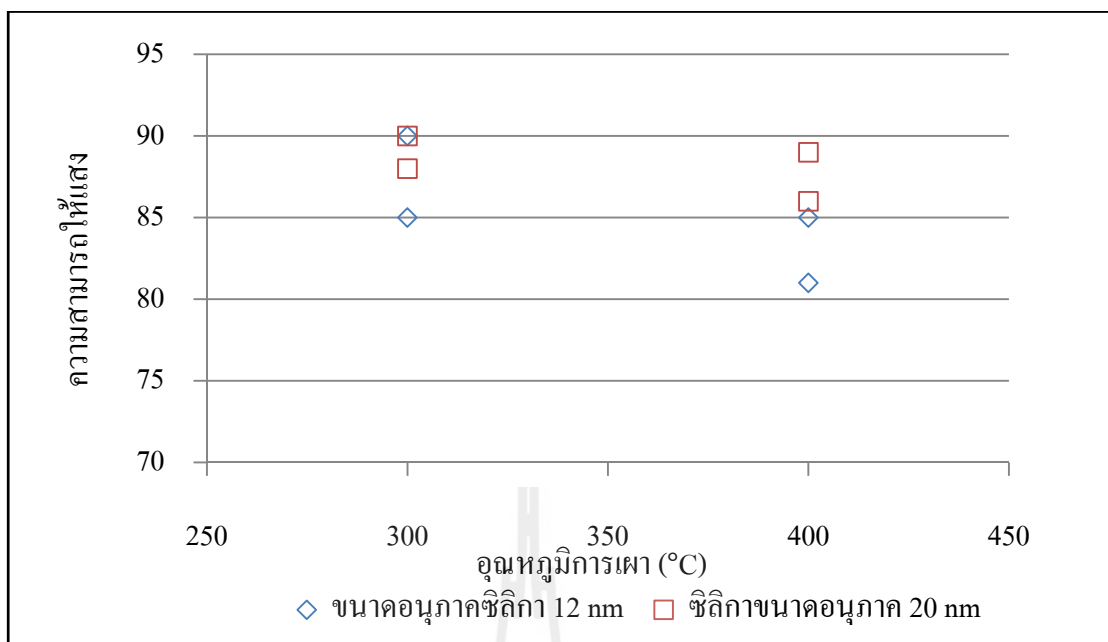
รูปที่ 4.33 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C

รูปที่ 4.34 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C จากรูป จะเห็นว่าขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณผงซิลิกา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 65% และสูงสุดเท่ากับ 89% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



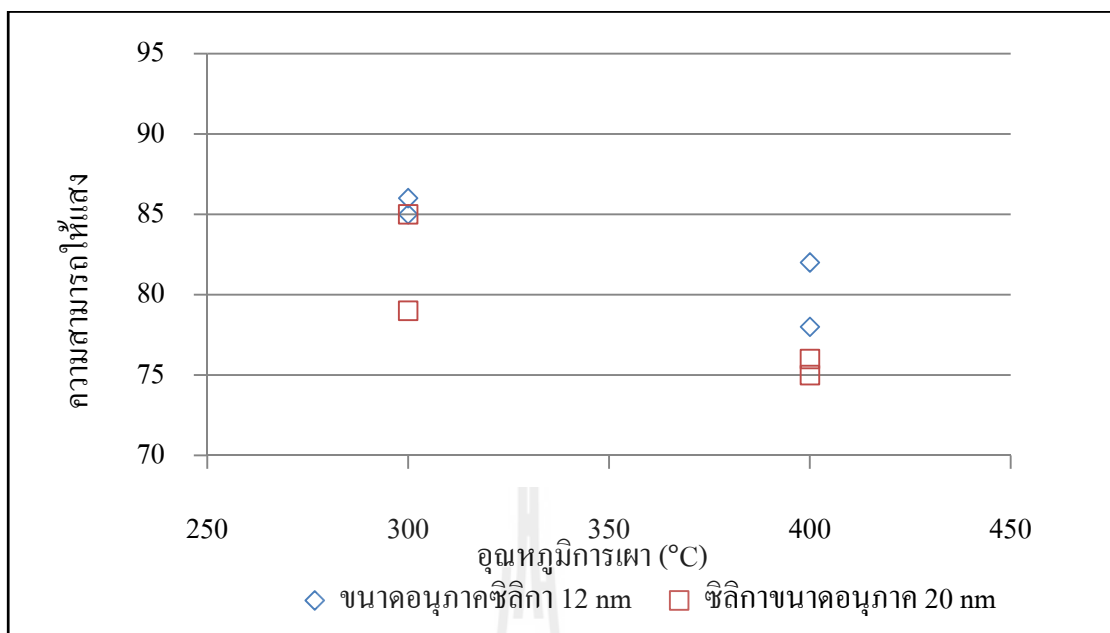
รูปที่ 4.34 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C

รูปที่ 4.35 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่า ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นกัน โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 81 % และสูงสุดเท่ากับ 90% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



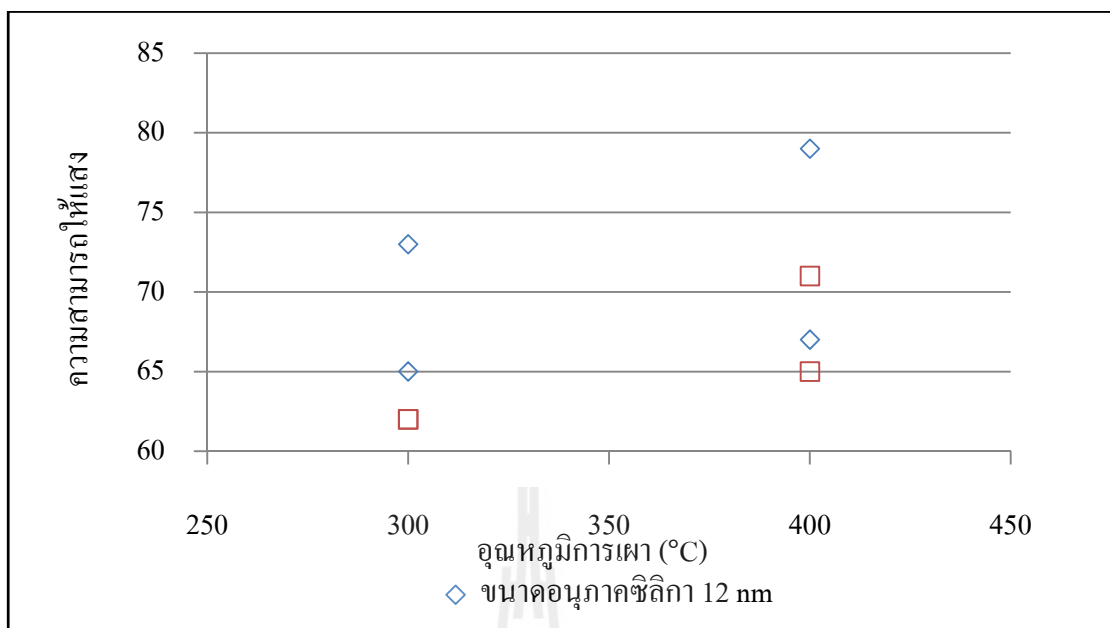
รูปที่ 4.35 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.36 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่า ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลง และเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงเช่นกัน โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 75 % และสูงสุดเท่ากับ 86% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



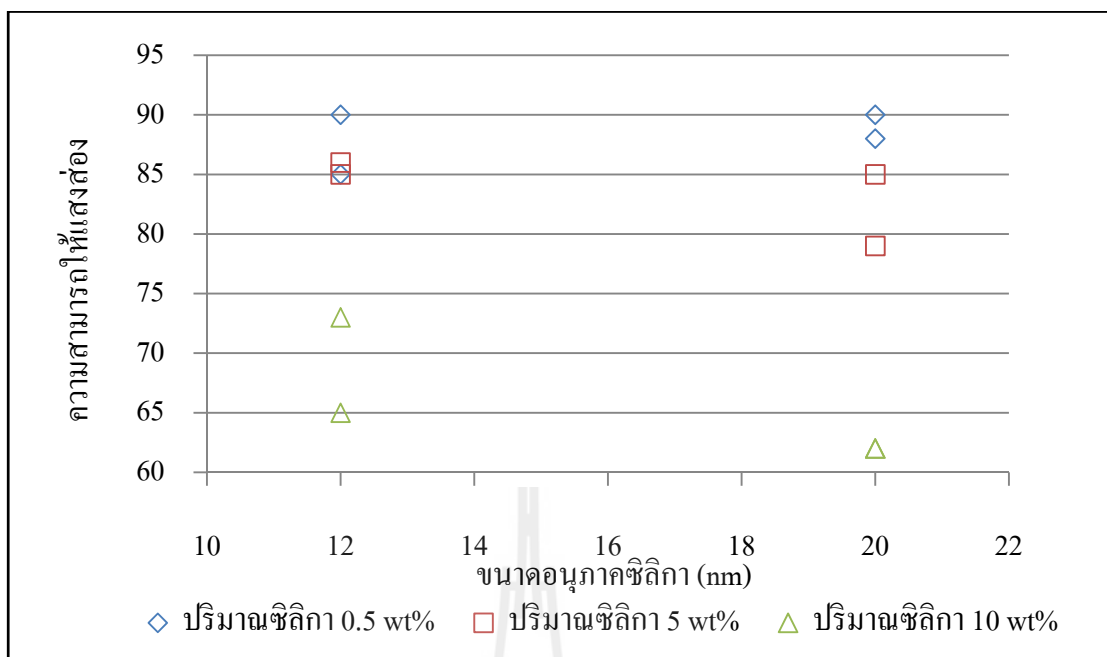
รูปที่ 4.36 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.37 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่า ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 62 % และสูงสุดเท่ากับ 79% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



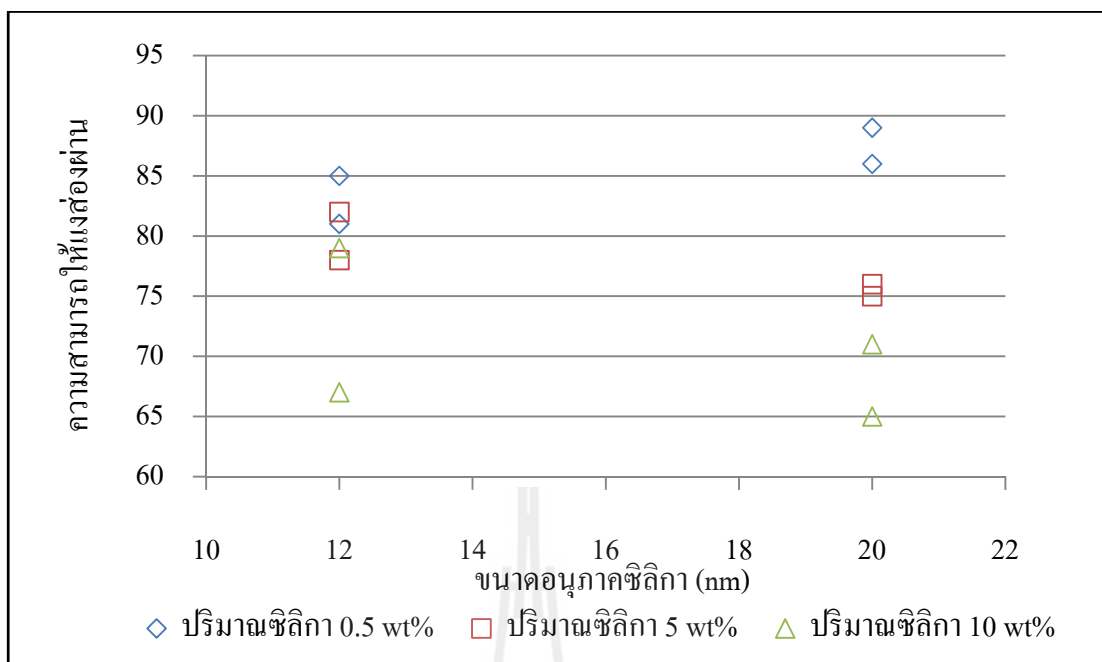
รูปที่ 4.37 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.38 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นได้ว่า ปริมาณของซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มซิลิกา จาก 5 เป็น 10 wt% ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงมาก และนอกจากนี้รูปที่ 4.38 ยังแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณซิลิกา 5-10 wt% การเพิ่มขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านลดลงเล็กน้อยโดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 62% และสูงสุดเท่ากับ 90% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.38 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 °C

รูปที่ 4.39 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่า wt% ของซิลิกามีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ การเพิ่ม wt% ของซิลิกา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลง โดยเฉพาะการเพิ่มซิลิกา จาก 5 เป็น 10 wt% ทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแต่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm จะมีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มไม่มาก โดยความสามารถให้แสงส่องผ่านที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 65% และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 89% อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.3 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.39 แสดงความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C

จากการทดลองสรุปได้ว่า การแปรผันปัจจัยต่าง ๆ (ปริมาณซิลิกา, ขนาดอนุภาค และ อุณหภูมิการเผา) มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่าน โดยเฉพาะปริมาณของซิลิกา การเพิ่มปริมาณของซิลิกาที่เติมเข้าในส่วนผสม จะทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีความสามารถให้แสงส่องผ่านลดลงอย่างมากส่วนอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มอย่างไม่แน่นอน กล่าวคือ ที่ปริมาณซิลิกาไม่มาก (0.5 และ 5 wt%) การเพิ่มอุณหภูมิที่เผาจะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มลดลง แต่ที่ปริมาณของซิลิกา 10 wt% การเพิ่มอุณหภูมิที่เผาจะทำให้ฟิล์มมีความสามารถให้แสงส่องผ่านมากขึ้นในทำนองเดียวกันขนาดอนุภาคก็มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านไม่แน่นอน กล่าวคือ ที่ซิลิกา 0.5 wt% การเพิ่มขนาดอนุภาคจาก 12 เป็น 20 nm จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถให้แสงส่องผ่านมากขึ้น แต่ที่ซิลิกา 5-10 wt% การเพิ่มขนาดอนุภาคจาก 12 เป็น 20 nm จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถให้แสงส่องผ่านลดลง

4.4 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิว (surface roughness)

ตารางที่ 4.4 แสดงความขรุขระพื้นผิว (surface roughness) ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ทั้งหมด 24 การทดลอง ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm และ 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

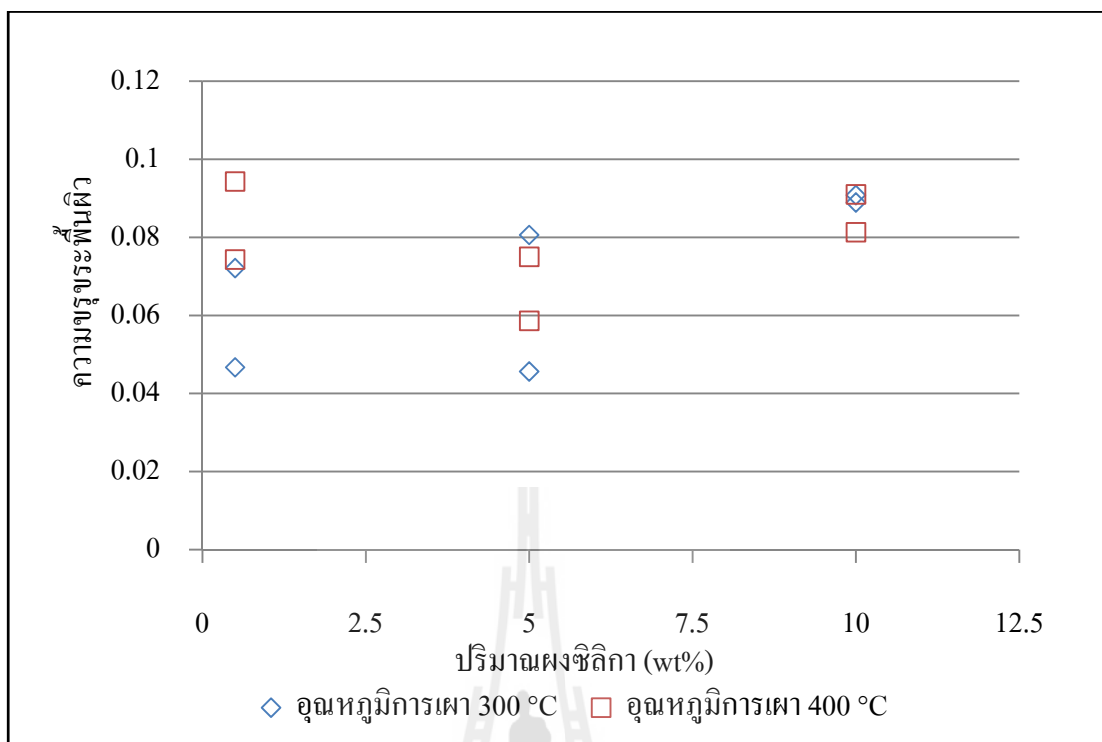
ตารางที่ 4.4 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C

เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำกรวัดความขรุขระพื้นผิว	ตัวแปรการทดลอง			ความขรุขระพื้นผิว (μm)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
1	13	0.5	300	12	0.0467
2	4	0.5	300	12	0.0721
3	1	5	300	12	0.0456
4	3	5	300	12	0.0806
5	21	10	300	12	0.0889
6	23	10	300	12	0.0908
7	14	0.5	400	12	0.0743
8	16	0.5	400	12	0.0943
9	11	5	400	12	0.0586
10	18	5	400	12	0.075
11	5	10	400	12	0.0813
12	19	10	400	12	0.091
13	10	0.5	300	20	0.0346
14	2	0.5	300	20	0.0583
15	6	5	300	20	0.035
16	24	5	300	20	0.0726

ตารางที่ 4.4 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 กับ 400 °C (ต่อ)

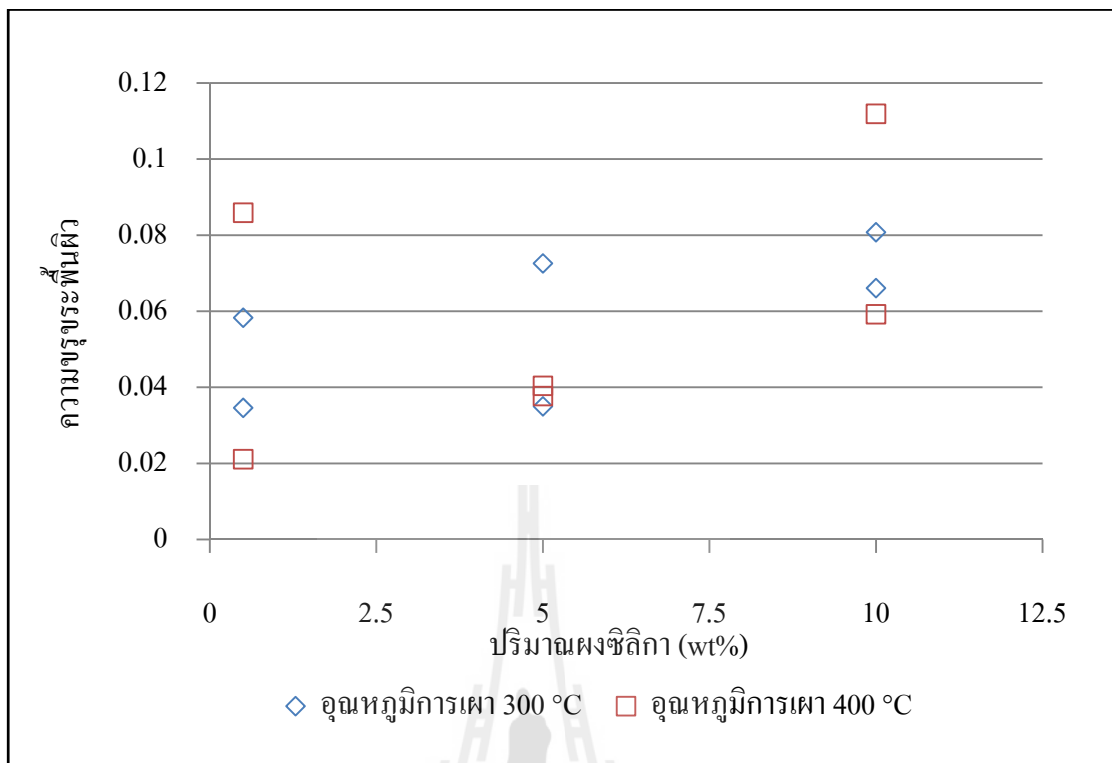
เลขที่การทดลอง	ลำดับที่ทำการวัดความขรุขระพื้นผิว	ตัวแปรการทดลอง			ความขรุขระพื้นผิว (μm)
		ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดของซิลิกา (nm)	
17	17	10	300	20	0.0661
18	20	10	300	20	0.0808
19	9	0.5	400	20	0.0211
20	22	0.5	400	20	0.0859
21	7	5	400	20	0.0377
22	12	5	400	20	0.0404
23	8	10	400	20	0.0592
24	15	10	400	20	0.1119

รูปที่ 4.40 แสดงความขรุขระพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่า สำหรับฟิล์มที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 °C การเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้นจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้น แต่สำหรับชิ้นงานซึ่งเผาที่ 400 °C การเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0.5 เป็น 5 wt% จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระน้อยลงและการเพิ่มซิลิกาจาก 5 เป็น 10 wt% จะได้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์มที่เติมซิลิกา 0.5 wt% เเผาที่อุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้นหนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



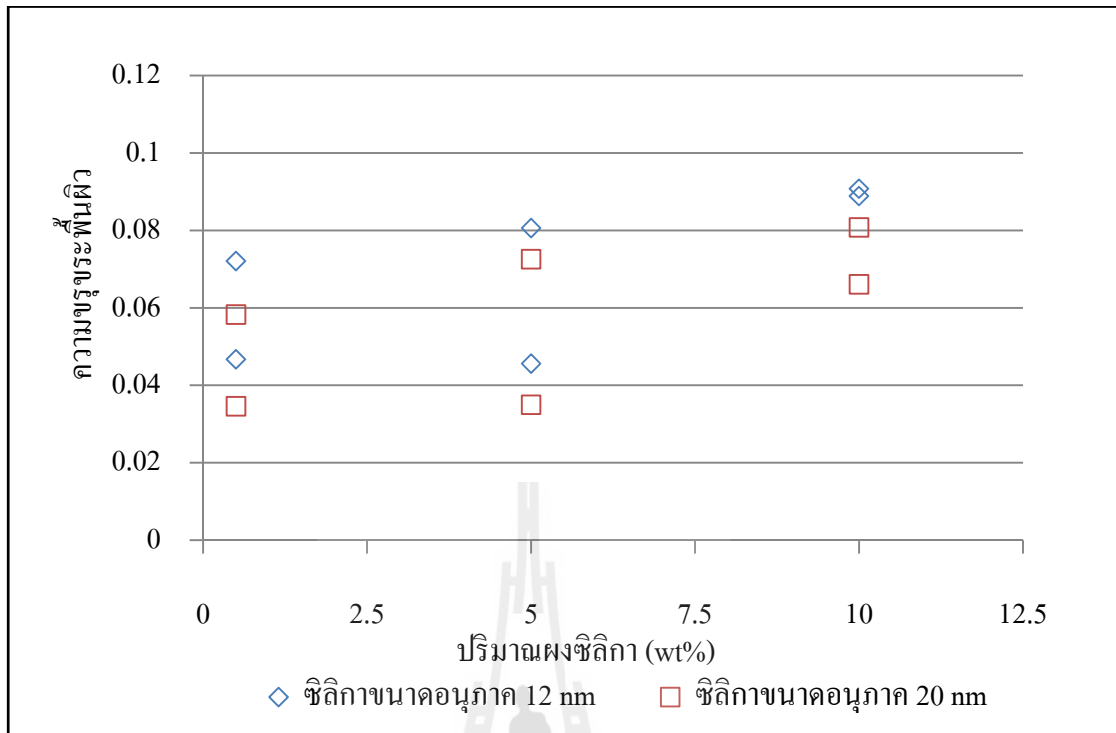
รูปที่ 4.40 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.41 แสดงความขรุขระพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นได้ว่าฟิล์มที่เผาด้วยอุณหภูมิ 300 °C การเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้นจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้น แต่สำหรับฟิล์มซึ่งเผาที่ 400 °C การเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0.5 เป็น 5 wt% จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระลดลงแต่การเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 5 เป็น 10 wt% จะได้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเผาไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มหนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



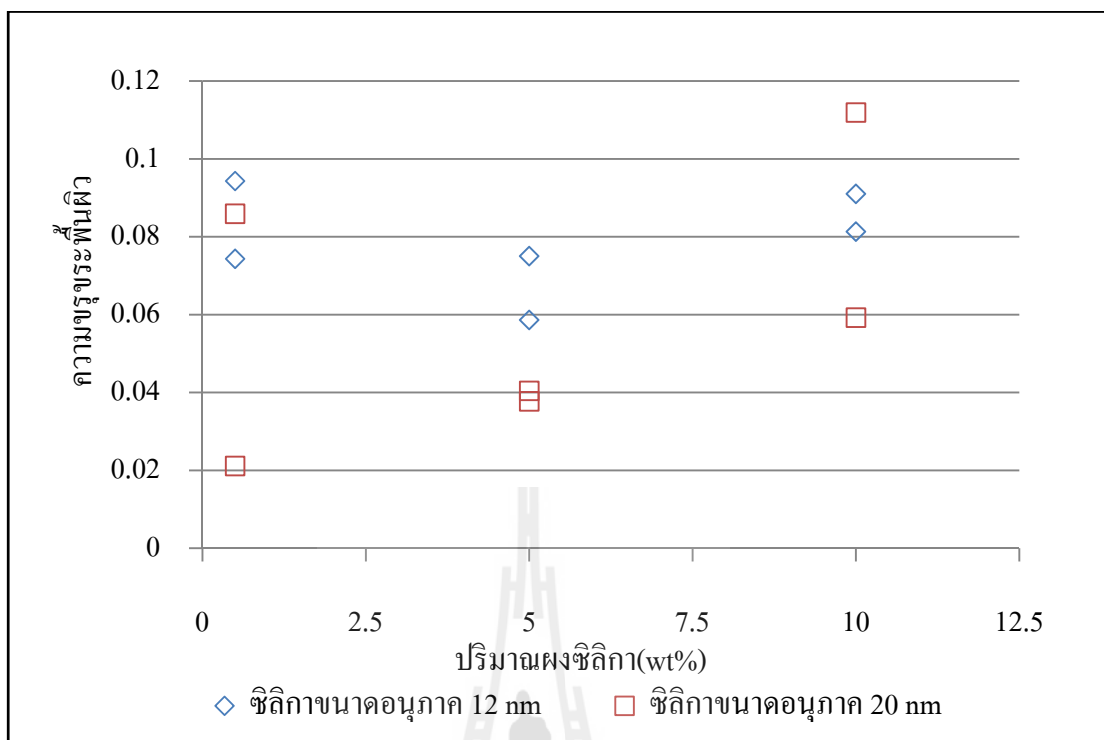
รูปที่ 4.41 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกานาอนุภาค 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.42 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม และที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกานาอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณผงซิลิกา มีผลทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระพื้นผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกา ระหว่าง 12 และ 20 nm พบว่า ฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากซิลิกานาอนุภาค 12 nm มีความขรุขระมากกว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากซิลิกานาอนุภาค 20 nm เล็กน้อย อย่างไรก็ตามคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



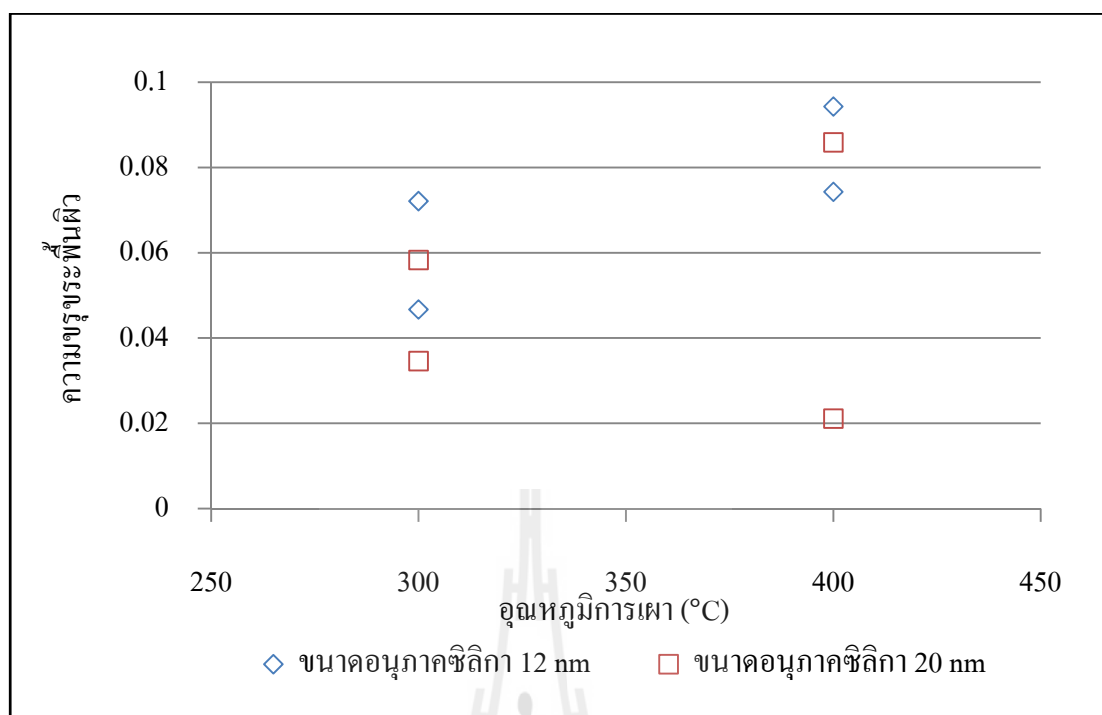
รูปที่ 4.42 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C

รูปที่ 4.43 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C จากรูปจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0.5 เป็น 5 wt% จะทำให้ฟิล์มมีความขรุขระลดลง แต่การเพิ่มซิลิกาจาก 5 เป็น 10 wt% จะทำให้ฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกา ระหว่าง 12 และ 20 nm พบว่าฟิล์มที่มีเตรียมขึ้นจากซิลิกาขนาด 12 nm มีความขรุขระมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกา 20 nm เล็กน้อยอนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



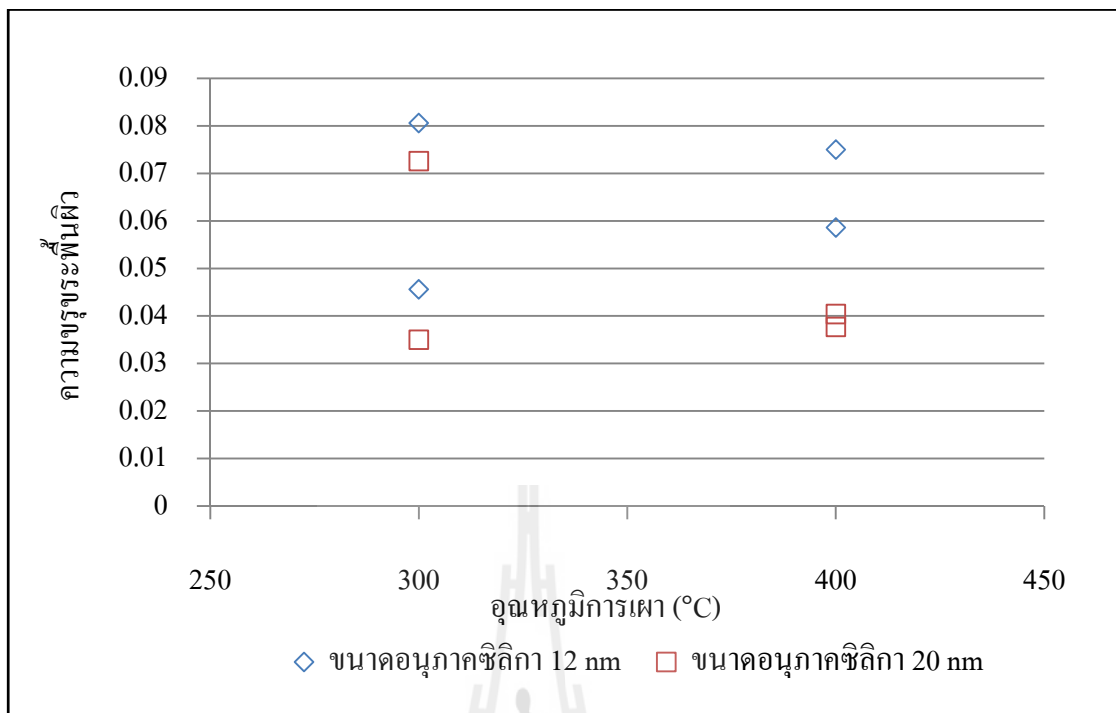
รูปที่ 4.43 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C

รูปที่ 4.44 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C จากรูปจะเห็นได้ว่า สำหรับฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากซิลิกาขนาด 12 nm การเพิ่มอุณหภูมิการเผา มีผลทำให้ความขรุขระพื้นผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกา ระหว่าง 12 และ 20 nm พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกาขนาด 12 nm มีความขรุขระมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกา 20 nm เล็กน้อยอนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



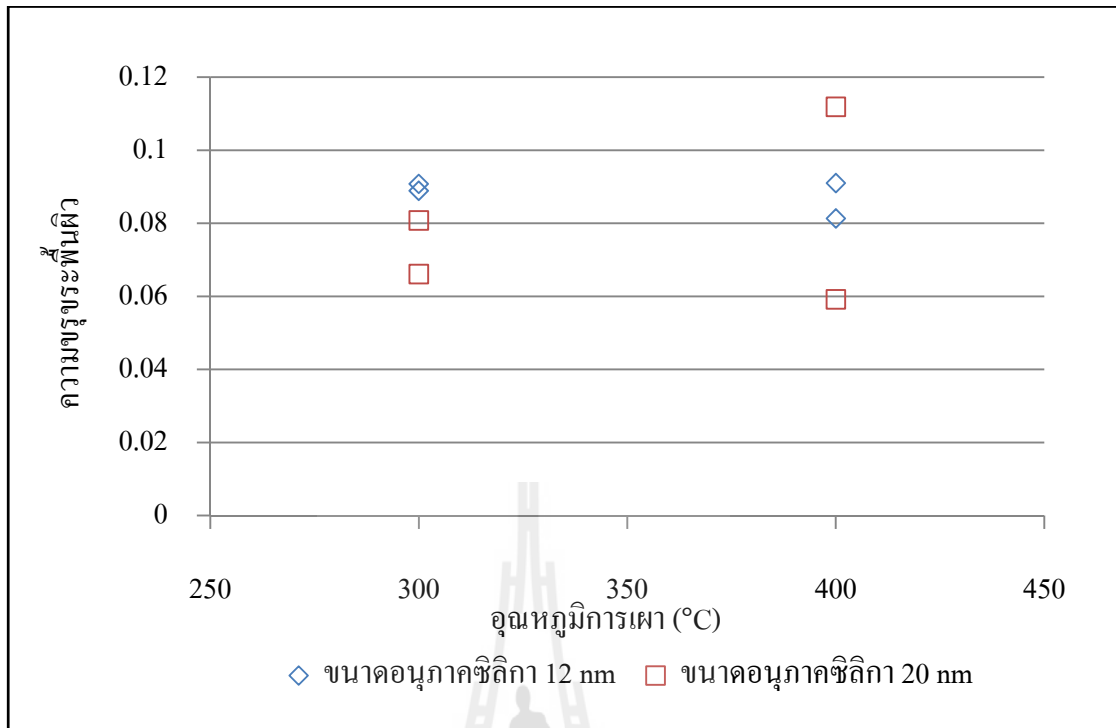
รูปที่ 4.44 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.45 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อความขรุขระพื้นผิว การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้ฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกา 20 nm มีความขรุขระน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกา ระหว่าง 12 และ 20 nm พบว่า ขนาดอนุภาคไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มซึ่งเผาที่ 300 °C แต่ขนาดอนุภาคซิลิกามีผลต่อความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มซึ่งเผาที่ 400 °C อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



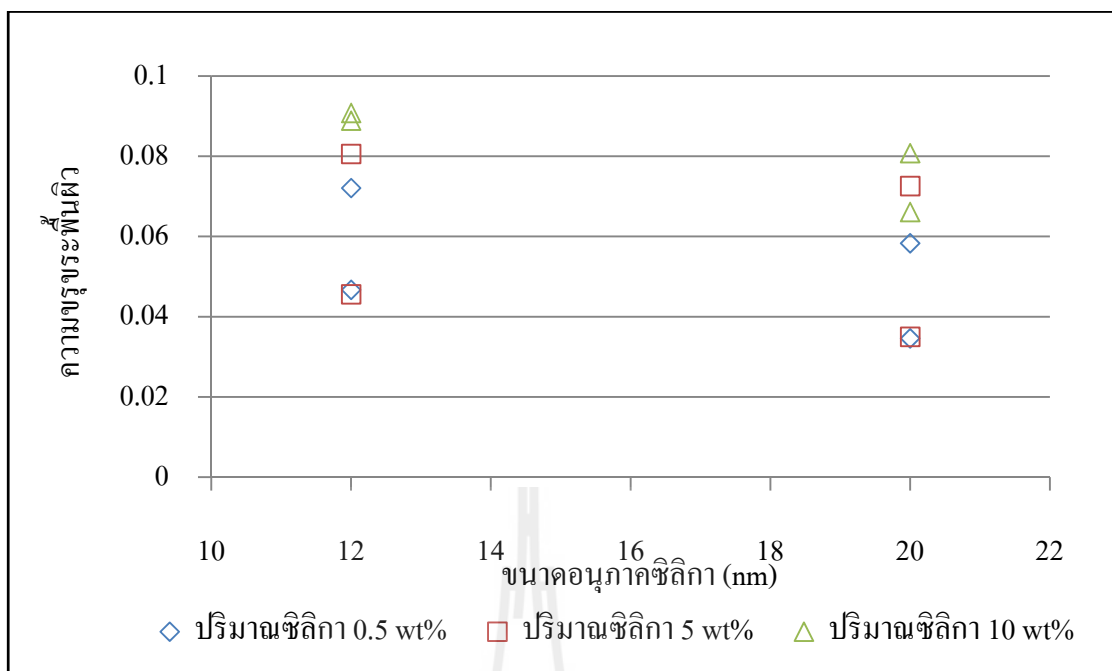
รูปที่ 4.45 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 5wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.46 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิการเผา มีผลต่อความขรุขระพื้นผิวน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกา ระหว่าง 12 และ 20 nm พบว่าขนาดอนุภาคไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระพื้นผิวมากนัก อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้น นั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



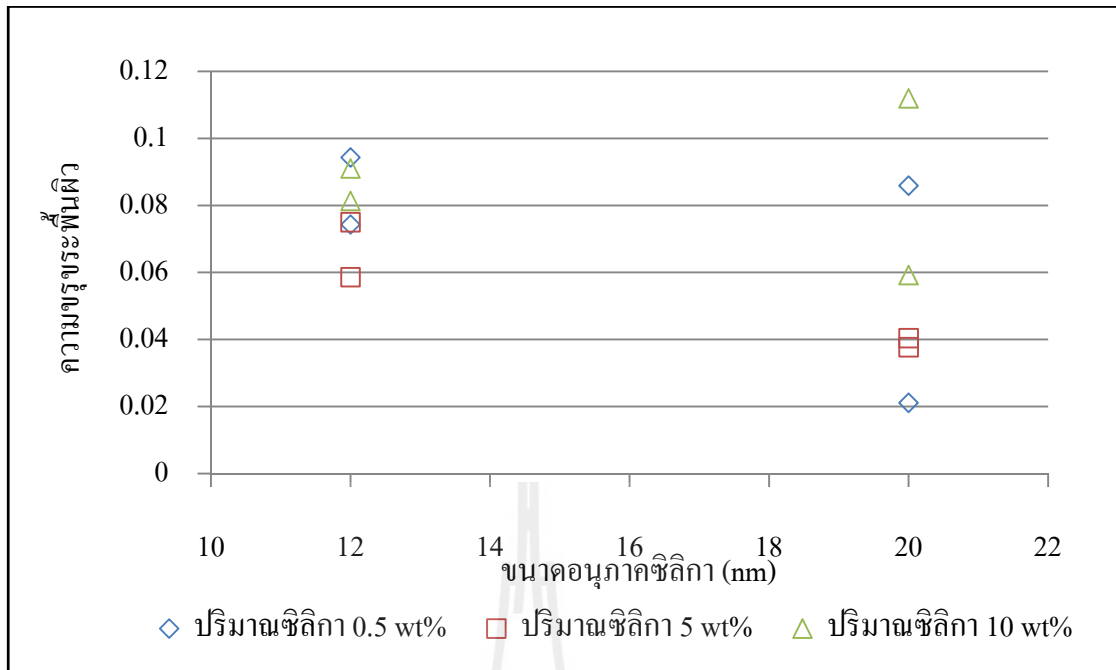
รูปที่ 4.46 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.47 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 °C จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดของซิลิกาจาก 12 เป็น 20 nm ให้ความขรุขระมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณของซิลิกา ให้ความขรุขระพื้นผิว มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คำนึงคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.47 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300°C

รูปที่ 4.48 ความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400°C จากรูปจะเห็นได้ว่า สำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกา 0.5 และ 5 wt% เมื่อเพิ่มขนาดของซิลิกาจาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ฟิล์มมีความขรุขระมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่สำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกา 10 wt% เมื่อเพิ่มขนาดของซิลิกาจาก 12 เป็น 20 nm แทนจะไม่ทำให้ความขรุขระพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปเลย อนึ่งคำอธิบายผลการทดลองข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายจากการดูข้อมูลดิบในตารางและกราฟเท่านั้น ในหัวข้อที่ 4.5.4 จะวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.48 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 nm 0.5, 5 และ 10wt% แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400°C

จากทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยต่าง ๆ (ปริมาณซิลิกา, ขนาดอนุภาคซิลิกา และอุณหภูมิการเผา) มีผลต่อความขรุขระพื้นผิว โดยเฉพาะปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา การเพิ่มปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา ทำให้ความขรุขระพื้นผิวมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ขนาดอนุภาคซิลิกาไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มมากนัก โดยฟิล์มที่มีสมบัติแบบไม่ชอบน้ำ ควรจะมีความขรุขระของฟิล์มมาก จึงจะทำให้ฟิล์มนั้นไม่ชอบน้ำหรือทำให้หยดน้ำไหลออกจากฟิล์มได้ง่าย

4.5 การวิเคราะห์ผลทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Design-expert® version 8.0.1

นำข้อมูลในตารางที่ 4.1-4.4 ไปวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในโปรแกรม Design-expert® version 8.0.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะทำให้ทราบว่าตัวแปรต้น (ได้แก่ ปริมาณของซิลิกา, ขนาดของซิลิกา, อุณหภูมิการเผา) หรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นคู่ใด ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตาม (ได้แก่ มุมสัมผัส, พลังงานพื้นผิวอิสระ, ความสามารถในการให้แสงผ่าน และ ความขรุขระพื้นผิว) โดยโปรแกรมจะคำนวณค่า p-value หรือ Prob>F ถ้า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่หนึ่ง ๆ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% แต่ถ้า p-value ของปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่ใดมีค่ามากกว่า 0.100 แสดงว่าปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างคู่หนึ่ง ๆ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามแบ่งการวิเคราะห์ตามตัวแปรตามนั้นเป็น 4 หัวข้อ คือ 1) มุมสัมผัส 2) พลังงานพื้นผิวอิสระ 3) ความโปร่งใส 4) ความขรุขระพื้นผิว

4.5.1 มุมสัมผัส

ตารางที่ 4.5 แสดงผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไปวิเคราะห์หาว่าปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมสัมผัส

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อมุมสัมผัส แบบแสดงผลของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3682.44	6	613.74	14.24	< 0.0001	significant
A-silica amount	2772.14	1	2772.14	64.33	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	704.67	1	704.67	16.35	0.0008	
C-silica particle size	79.02	1	79.02	1.83	0.1934	
AB	104.70	1	104.70	2.43	0.1375	
AC	28.14	1	28.14	0.65	0.4302	
BC	7.04	1	7.04	0.16	0.6911	

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อมุมสัมผัส แบบแสดง
ผลของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่ (ต่อ)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Residual	732.52	17	43.09			
Lack of Fit	159.02	5	31.80	0.67	0.6568	not significant
Pure Error	573.50	12	47.79			
Cor Total	4414.96	23				

หมายเหตุ : Sum of squares, df, Mean square, F Value และ p-value Prob >F เป็นชื่อของฟังก์ชันทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง สามารถดูนิยามและวิธีคำนวณหาฟังก์ชันเหล่านี้ได้จากหนังสือ ปารเมศ ชูติมา, “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 222-227, 2002

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า p-value ของปัจจัย A (wt% ของซิลิกา) และปัจจัย B (อุณหภูมิที่เผา) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า wt% ของซิลิกาและอุณหภูมิที่เผา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมสัมผัสของน้ำบน TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม ด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ในทางตรงกันข้าม p-value ของปัจจัย C (ขนาดอนุภาคของซิลิกา) และ p-value ของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่ (AB, AC และ BC) มีค่ามากกว่า 0.1 แสดงว่าปัจจัย C (ขนาดอนุภาคซิลิกา) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมสัมผัสของน้ำบนฟิล์ม

ใช้วิธี step wise ตัดปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมสัมผัสออกแล้ว วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอีกครั้งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากตารางยืนยันอีกครั้งว่าปัจจัย A (wt% ของซิลิกา) และ B (อุณหภูมิที่เผา) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมสัมผัสของน้ำบนฟิล์ม

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อมุมสัมผัส หลังจากตัดปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกไปแล้ว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3465.52	2	1732.76	38.33	< 0.0001	significant
A-silica amount	2772.14	1	2772.14	61.31	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	693.38	1	693.38	15.34	0.0008	
Residual	949.44	21	45.21			
Lack of Fit	375.94	9	41.77	0.87	0.5714	not significant
Pure Error	573.50	12	47.79			
Cor Total	4414.96	23				

ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) ใน โปรแกรม design expert สร้าง model เพื่อทำนายว่ามุมสัมผัสของน้ำบนฟิล์มแปรตามปัจจัย A และ B อย่างไร ได้ model ดังสมการ (4.1)

$$\text{contact angle}(\text{°}) = 68.35586 + 2.76983 \times \text{silica amount (wt\%)} + 0.1075 \times \text{heat treatment temperature (°C)} \quad (4.1)$$

สมการ (4-1) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายมุมสัมผัสของน้ำบนฟิล์ม (หน่วยเป็น °) ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ปริมาณของซิลิกา (หน่วยเป็น wt%) และอุณหภูมิที่เผา (หน่วยเป็น °C) อย่างไร

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตั้งอยู่บนสมมติฐานสำคัญ 2 ข้อ คือ

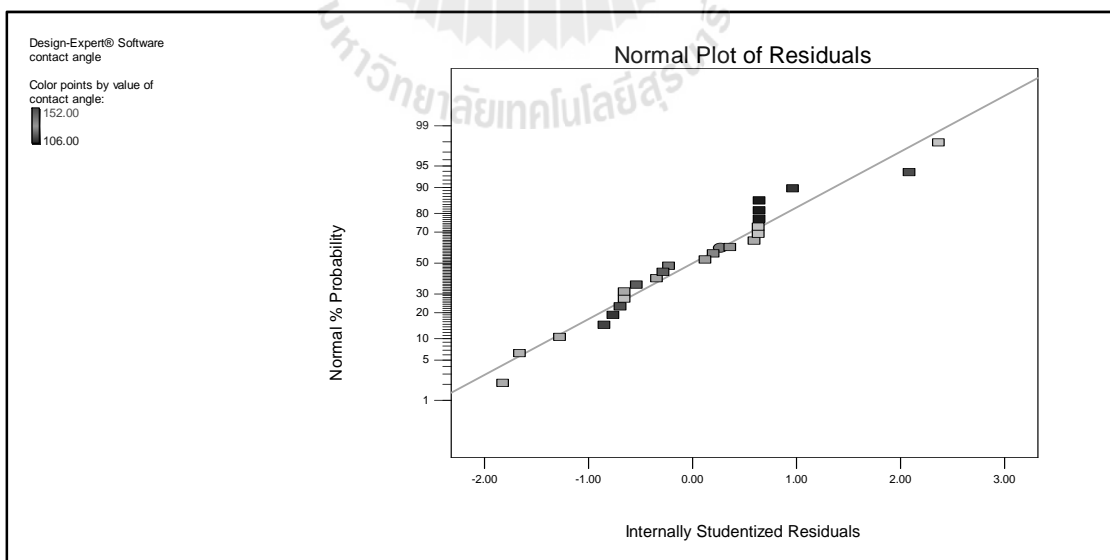
- 1) ส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด (Residual ; e_{ij}) ที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมีขมิมเท่ากับ 0
- 2) ความแปรปรวนทุกระดับของตัวแปรต้น (σ^2) มีค่าคงตัว

ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ที่ได้ข้างต้นถูกต้อง จึงต้องตรวจสอบสมมติฐานของ ANOVA สมมติฐานข้อที่ 1 ตรวจสอบโดยการพลอตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability plot) และสมมติฐานข้อที่ 3 ทดสอบโดยการพลอตกราฟส่วนตกค้างกับส่วนที่ถูกฟิต (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

รูปที่ 4.49 แสดงกราฟ normal probability plot ของส่วนตกค้างของมุมสัมผัส จากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงผิดปกติ จุดทั้งหมดถูกปกคลุมโดยเส้นตรง แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 1 ของ ANOVA ถูกต้อง กล่าวคือส่วนตกค้างมีค่ามัธยฐานเป็นศูนย์และมีการแจกแจงปกติเป็นที่ยอมรับได้

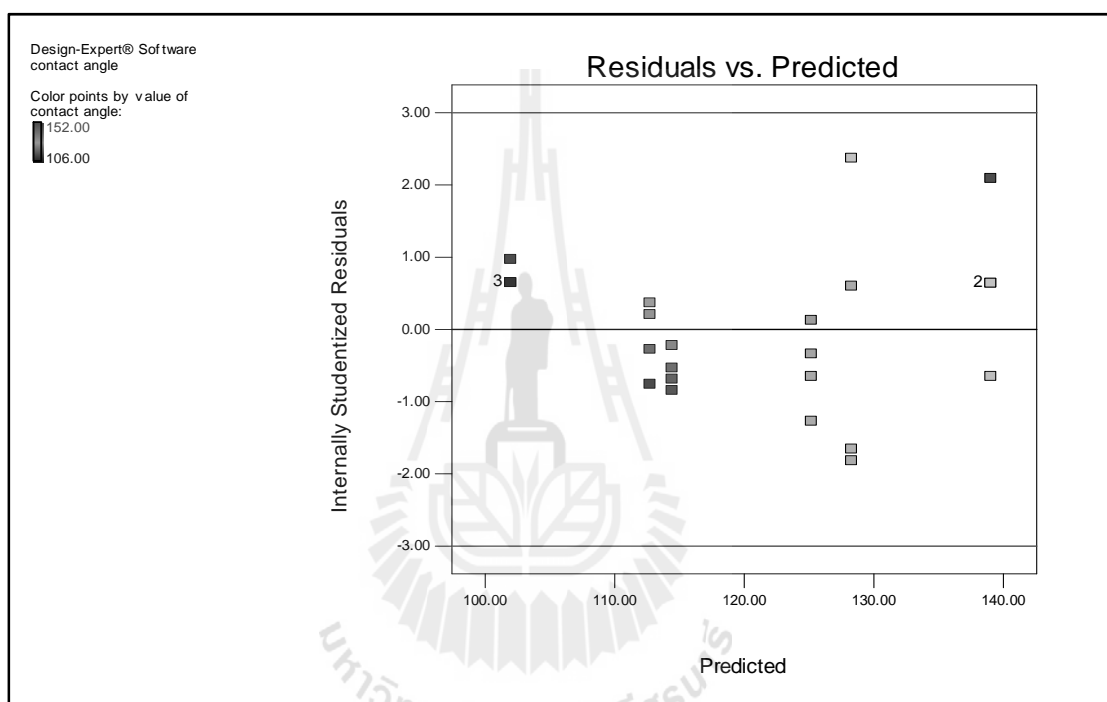
รูปที่ 4.50 แสดงกราฟของส่วนตกค้างมุมสัมผัสกับมุมสัมผัสที่ถูกฟิต จากกราฟจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงใด ๆ (pattern) แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 2 ของ ANOVA ถูกต้อง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า studentized residual ทุกตัวในกราฟไม่ได้มีค่ามากกว่า +3 หรือน้อยกว่า -3 ดังนี้แสดงว่า การทดลองเรื่องมุมสัมผัสไม่มีข้อมูลตัวใดที่บิดเบือนไปจากตัวอื่นมาก (outlier) ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ ANOVA เรื่องมุมสัมผัสที่กล่าวถึงจะเชื่อถือได้ เพราะสมมติฐานข้อที่ 2 ของ ANOVA ถูกต้อง

หมายเหตุ Studentized residual เป็นฟังก์ชันทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คำอธิบายความหมายของฟังก์ชันนี้ดูได้จากหนังสือของ อาจารย์ปารเมศ ชูติมา, “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพิมพ์ครั้งที่ 1 ref. 18 หน้า 73

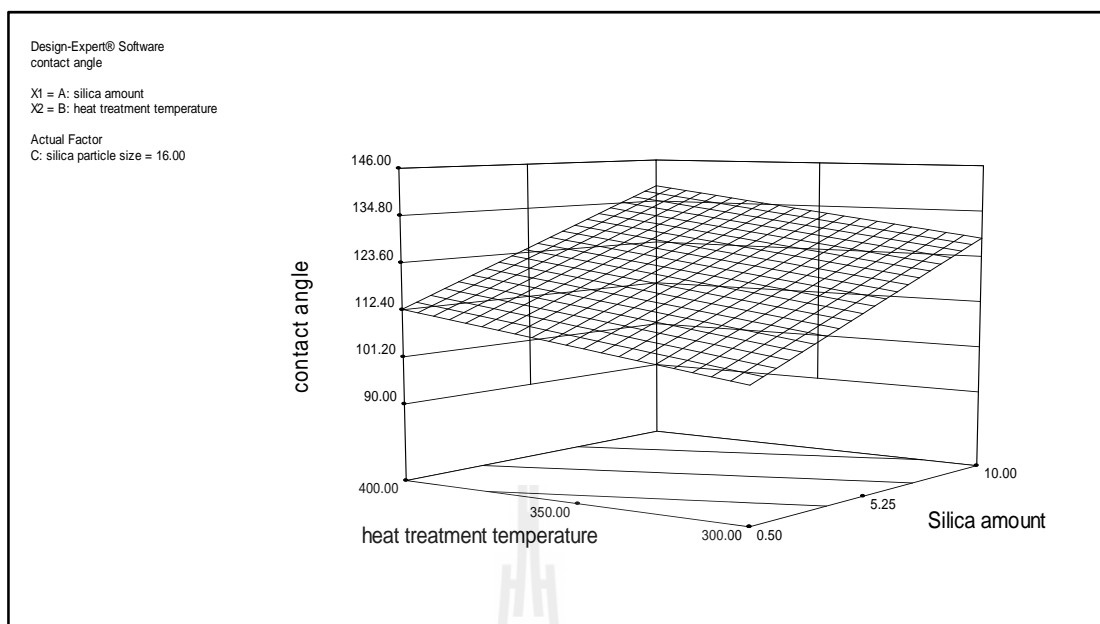


รูปที่ 4.49 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของมุมสัมผัส

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่ทำนายโดยสมการวิเคราะห์การถดถอย (สมการ 4.1) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น กับ wt% ของซิลิกา และอุณหภูมิที่เผา จึงใช้โปรแกรมเขียนภาพพื้นผิวตอบสนอง (response surface) ของมุมสัมผัสที่ทำนายโดยสมการ 4-1 ต่อ ปริมาณของซิลิกา และอุณหภูมิการเผา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.51 จากรูปพื้นผิวตอบสนองมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นฟิล์ม มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 300 เป็น 400 °C และมุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกา จาก 0.5 wt% เป็น 10 wt%



รูปที่ 4.50 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของมุมสัมผัสกับค่าที่ถูกทำนาย



รูปที่ 4.51 พื้นผิวตอบสนองของมุมสัมผัส

4.5.2 พลังงานพื้นผิวอิสระ

ตารางที่ 4.7 แสดงผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไปวิเคราะห์หาว่าปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ แบบแสดงผลของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	377.01	6	62.83	12.15	< 0.0001	significant
A-silica amount	206.01	1	206.01	39.82	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	142.51	1	142.51	27.55	< 0.0001	
C-silica particle size	1.03	1	1.03	0.20	0.6607	
AB	22.83	1	22.83	4.41	0.0509	

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ
แบบแสดงผลของปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่ (ต่อ)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
AC	0.04	1	0.04	0.01	0.9304	
BC	2.04	1	2.04	0.39	0.5382	
Residual	87.95	17	5.17			
Lack of Fit	14.45	5	2.89	0.47	0.7904	not significant
Pure Error	73.50	12	6.13			
Cor Total	464.96	23				

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า p-value ของปัจจัย A (wt% ของซิลิกา), ปัจจัย B (อุณหภูมิที่เผา) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า wt% ของซิลิกาและอุณหภูมิที่เผา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวบน TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ในทางตรงกันข้าม p-value ของปัจจัย C (ขนาดของซิลิกา) และ p-value ของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ C กับ A และ B (AC และ BC) มีค่ามากกว่า 0.1 แสดงว่าปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย C กับ A และ B ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานอิสระพื้นผิวของของเหลวบน TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม

ส่วน p-value ของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A กับ B มีค่ามากกว่า 0.05 แต่มีน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A กับ B มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวบนฟิล์มที่ความเชื่อมั่นไม่ถึง 95 %

ใช้วิธี step wise ตัดปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานพื้นผิวอิสระออกแล้ว วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอีกครั้งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากตารางยืนยันอีกครั้งว่าปัจจัย A (wt% ของซิลิกา) และ B (อุณหภูมิที่เผา) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานอิสระพื้นผิวของของเหลวบน TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% นอกจากนี้การวิเคราะห์ครั้งที่ 2 นี้ พบว่า พบอันตรกิริยาระหว่าง A (wt% ของซิลิกา) และ B (อุณหภูมิที่เผา) มี p-value น้อยกว่า 0.05 ด้วยแสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A กับ B มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพลังงานอิสระพื้นผิวด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95 %

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ หลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกไปแล้ว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	373.88	3	124.63	27.37	< 0.0001	significant
A-silica amount	206.01	1	206.01	45.24	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	142.51	1	142.51	31.30	< 0.0001	
AB	22.83	1	22.83	5.01	0.0367	
Residual	91.07	20	4.55			
Lack of Fit	17.57	8	2.20	0.36	0.9234	not significant
Pure Error	73.50	12	6.13			
Cor Total	464.96	23				

ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) ใน โปรแกรม design expert[®] สร้าง model เพื่อทำนายว่าพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวบนฟิล์มว่าแปรตามปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นอย่างไร ได้ model ดังแสดงในสมการ (4.2)

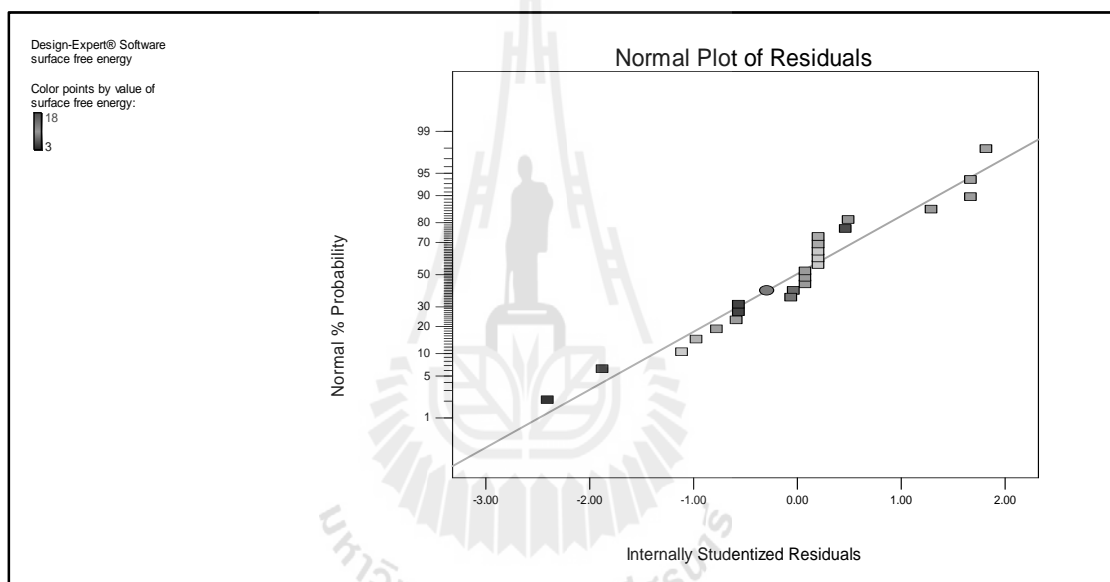
$$\begin{aligned} \text{surface free energy(mN/m)} = & 40.15959 - 2.51476 \times \text{silica amount(wt\%)} - 0.075143 \\ & \times \text{heat treatment temperature (}^{\circ}\text{C)} + 5.02768 \times 10^{-3} \\ & \times \text{silica amount (wt\%)} \times \text{heat treatment temperature (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned} \quad (4.2)$$

สมการ (4.2) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวบนฟิล์ม(หน่วยเป็น mN/m) ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ปริมาณของซิลิกา (หน่วยเป็น wt%) กับอุณหภูมิการเผา(หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$) และอันตรกิริยาระหว่าง ปริมาณของซิลิกากับอุณหภูมิการเผา (หน่วยเป็น $\text{wt\%} \times ^{\circ}\text{C}$)อย่างไร

รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability plot) ของส่วนตกค้างของพลังงานพื้นผิวอิสระ จากรูปจะเห็นได้ว่ากราฟไม่มีรูปทรงผิปกติ จุดทั้งหมดถูกปกคลุม

โดยเส้นตรง แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 1 ของ ANOVA ถูกต้อง กล่าวคือส่วนตกค้างมีค่ามัธยฐานเป็นศูนย์และมีการแจกแจงปกติเป็นที่ยอมรับได้

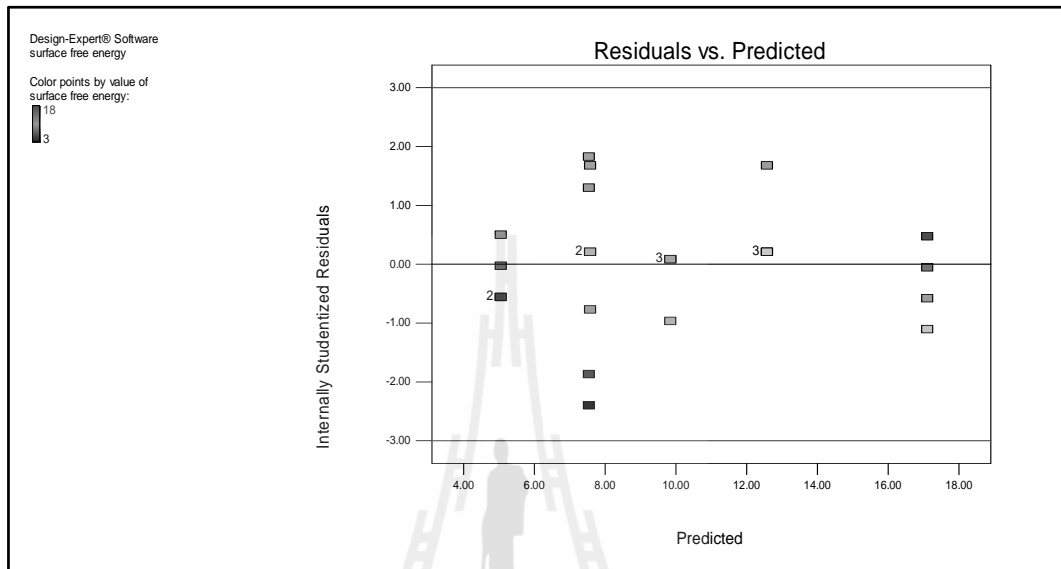
รูปที่ 4.53 แสดงกราฟของส่วนตกค้างพลังงานพื้นผิวอิสระกับพลังงานพื้นผิวอิสระที่ถูกพิด จากกราฟจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงใด ๆ (Pattern) แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 2 ของ ANOVA ถูกต้อง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า studentized residual ทุกตัวในกราฟไม่ได้มีค่ามากกว่า +3 หรือน้อยกว่า -3 ดังนี้แสดงว่า การทดลองเรื่องพลังงานพื้นผิวอิสระ ไม่มีข้อมูลตัวใดที่บิดเบือนไปจากตัวอื่นมาก (outlier) ดังนั้นผลการวิเคราะห์ ANOVA เรื่องพลังงานพื้นผิวอิสระที่กล่าวถึงจะเชื่อถือได้ เพราะสมมติฐานของ ANOVA ถูกต้อง



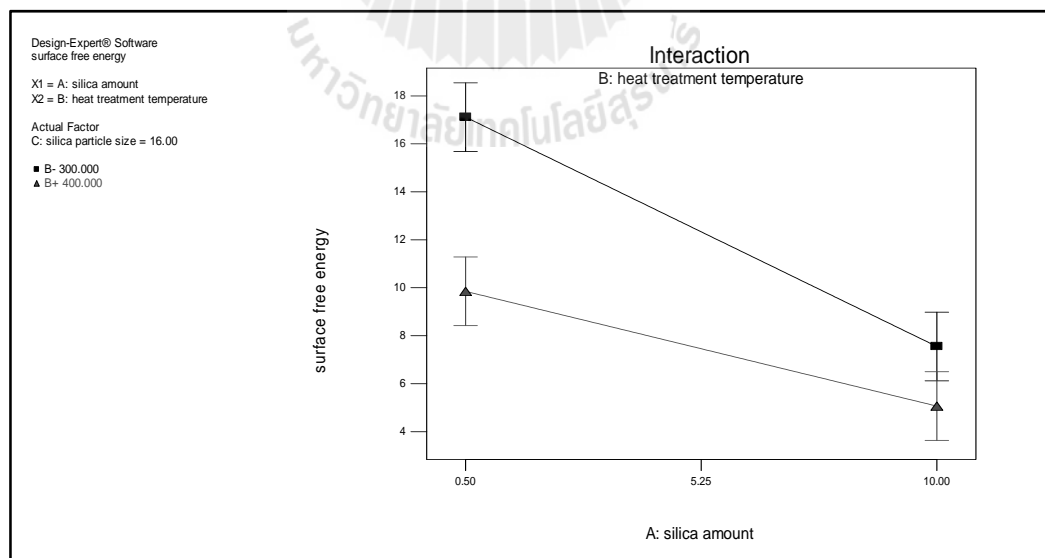
รูปที่ 4.52 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของพลังงานพื้นผิวอิสระที่ทำนายโดยสมการวิเคราะห์การถดถอย (สมการ 4.2) ที่กล่าวมาข้างต้นกับ ปริมาณของซิลิกา อุณหภูมิการเผา และอันตรกิริยาระหว่างwt% ของซิลิกากับอุณหภูมิการเผา จึง plot กราฟระหว่างปริมาณของซิลิกากับพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม สำหรับฟิล์มซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่างกัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.54 จากรูปจะเห็นว่ากราฟ 2 เส้นมีความชันต่างกันแสดงว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของซิลิกาและอุณหภูมิการเผา อันตรกิริยา ดังกล่าวคือ “ที่อุณหภูมิต่ำปริมาณซิลิกามีผลต่อพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์มซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง” นอกจากนี้ใช้โปรแกรมเขียนภาพพื้นผิวตอบสนอง (response surface) ของพลังงานพื้นผิวอิสระ ที่คำนวณจากสมการ 4.2 ต่อปริมาณของ

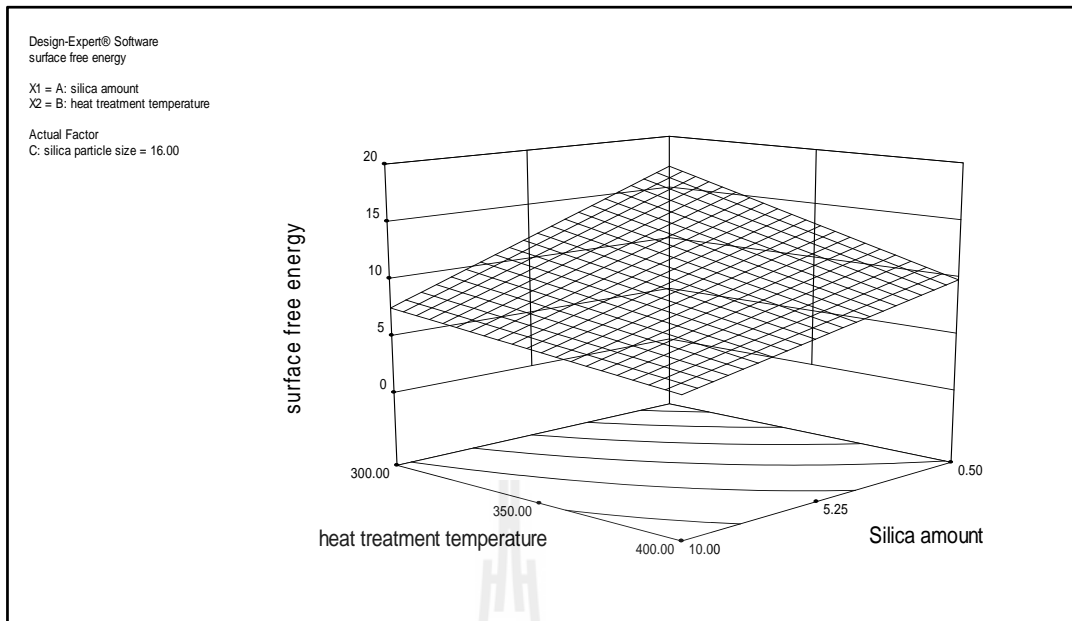
ซิลิกา และอุณหภูมิการเผา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.55 จากรูปจะเห็นว่าพลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลวบนแผ่นฟิล์ม มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 300 เป็น 400 °C และพลังงานพื้นผิวอิสระมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกา จาก 0.5 wt% เป็น 10 wt%



รูปที่ 4.53 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของพลังงานพื้นผิวอิสระกับค่าที่ถูกรักษา



รูปที่ 4.54 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและอุณหภูมิการเผาต่อพลังงานพื้นผิวอิสระ



รูปที่ 4.55 พื้นผิวตอบสนองของพลังงานพื้นผิวอิสระ

4.5.3 ความสามารถให้แสงส่องผ่าน

ตารางที่ 4.9 แสดงผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไปวิเคราะห์หาว่าปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถให้แสงส่องผ่าน

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านแบบแสดงปัจจัยต้นทุกตัวและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1616.04	6	269.34	15.47	< 0.0001	significant
A-silica amount	1422.76	1	1422.76	81.72	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	9.54	1	9.54	0.55	0.4693	
C-silica particle size	34.87	1	34.87	2.00	0.1750	
AB	67.93	1	67.93	3.90	0.0647	
AC	79.36	1	79.36	4.56	0.0476	
BC	2.67	1	2.67	0.15	0.7004	
Residual	295.96	17	17.41			
Lack of Fit	119.96	5	23.99	1.64	0.2244	not significant
Pure Error	176.00	12	14.67			
Cor Total	1912.00	23				

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่า p-value ของปัจจัย A (ปริมาณของซิลิกา) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ C (wt% ของซิลิกาและขนาดของซิลิกา) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า wt% ของซิลิกาและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ C มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ในทางตรงกันข้าม p-value ของปัจจัย B (อุณหภูมิการเผา) ปัจจัย C (ขนาดของซิลิกา) และ p-value ของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย B กับ C (BC) มีค่ามากกว่า 0.1 แสดงว่าปัจจัย B และ C และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย B กับ C ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์ม

ส่วน AB มี p-value มากกว่า 0.05 แต่น้อยกว่า 0.1 แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A กับ B มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มที่ความเชื่อมั่นไม่ถึง 95%

ใช้วิธี step wise ตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านออกแล้ว วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอีกครั้งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากตารางยืนยันอีกครั้งว่าปัจจัย A (wt% ของซิลิกา) และ AC (อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของซิลิกาและขนาดของซิลิกา) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มที่ความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% เพราะ A กับ AC มี p-value น้อยกว่า 0.05 อนึ่ง AB มี p-value มากกว่า 0.05 แต่ไม่เกิน 0.1 แสดงว่า AB มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มมีความเชื่อมั่นไม่ถึง 95% ส่วน B และ C ไม่มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มเพราะว่ามี p-value มากกว่า 0.1 ใดๆก็ตาม ไม่สามารถตัด B และ C ออกไปได้เพราะว่าอันตรกิริยาระหว่าง A กับ C (คือ AC) และอันตรกิริยาระหว่าง A กับ B (คือ AB) มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความสามารถให้แสงส่องผ่านหลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกไปแล้ว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1613.37	5	322.67	19.45	< 0.0001	significant
A-silica amount	1422.76	1	1422.76	85.76	< 0.0001	
B-heat treatment temperature	9.54	1	9.54	0.57	0.4581	
C-silica particle size	34.87	1	34.87	2.10	0.1643	
AB	67.93	1	67.93	4.09	0.0581	
AC	79.36	1	79.36	4.78	0.0422	
Residual	298.63	18	16.59			
Lack of Fit	122.63	6	20.44	1.39	0.2936	not significant
Pure Error	176.00	12	14.67			
Cor Total	1912.00	23				

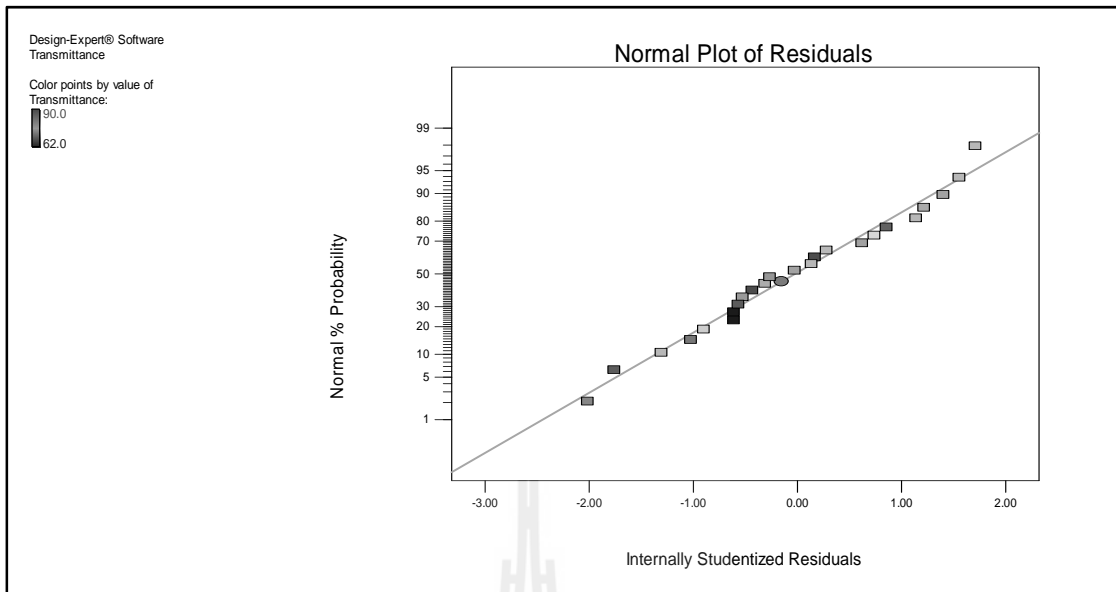
ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) ใน โปรแกรม design expert[®] สร้าง model เพื่อทำนายว่าความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มแปรตามปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นอย่างไร ได้ model ดังแสดงในสมการ (4.3)

$$\begin{aligned} \text{Transmittance}(\%) = & 104.08164 - 3.14483 \times \text{silica amount}(\text{wt}\%) - 0.058137 \\ & \times \text{heat treatment temperature } (^{\circ}\text{C}) + 0.31365 \times \text{silica particle} \\ & \text{size}(\text{nm}) + 8.67159 \times 10^{-3} \times \text{silica amount}(\text{wt}\%) \times \text{heat treatment} \\ & \text{temperature } (^{\circ}\text{C}) - 0.11716 \times \text{silica amount}(\text{wt}\%) \times \text{silica particle} \\ & \text{size}(\text{nm}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

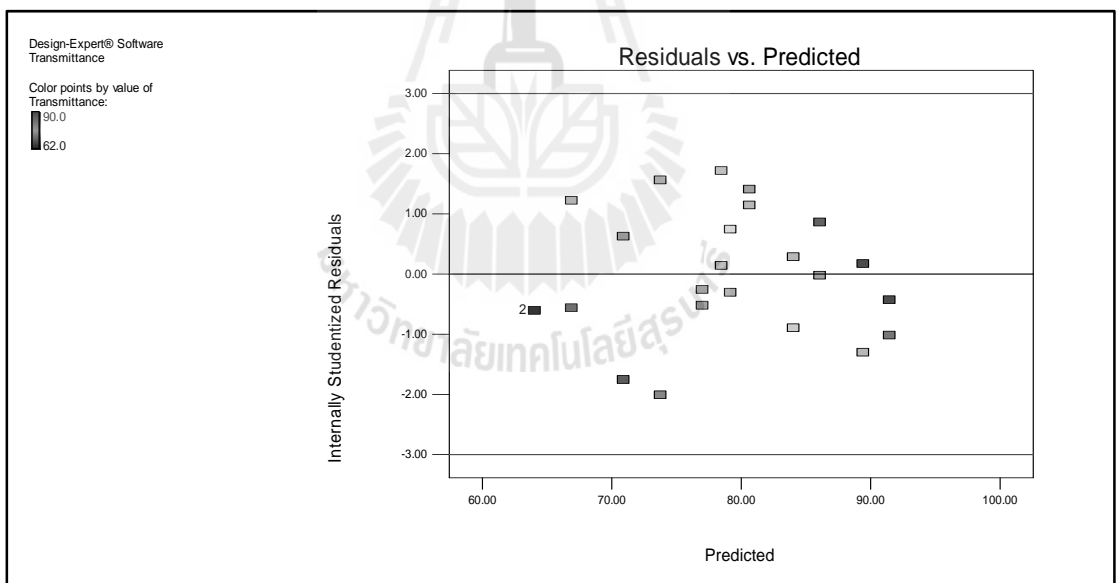
สมการ (4.3) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์ม (หน่วยเป็น %) ค่าความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มว่าจะเปลี่ยนแปลงไปตาม ปริมาณของซิลิกา (หน่วยเป็น wt%) อุณหภูมิการเผา (หน่วยเป็น °C) ขนาดของซิลิกา (หน่วยเป็น nm) และอันตรกิริยาระหว่าง ปริมาณของซิลิกา อุณหภูมิการเผาและขนาดของซิลิกา อย่างไร

รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability plot) ของส่วนตกค้างของความสามารถให้แสงส่องผ่าน จากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงผิดปกติ จุดทั้งหมดถูกปกคลุมโดยเส้นตรง แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 1 ของ ANOVA ถูกต้อง กล่าวคือส่วนตกค้างมีค่ามัธยฐานเป็นศูนย์และมีการแจกแจงปกติเป็นที่ยอมรับได้

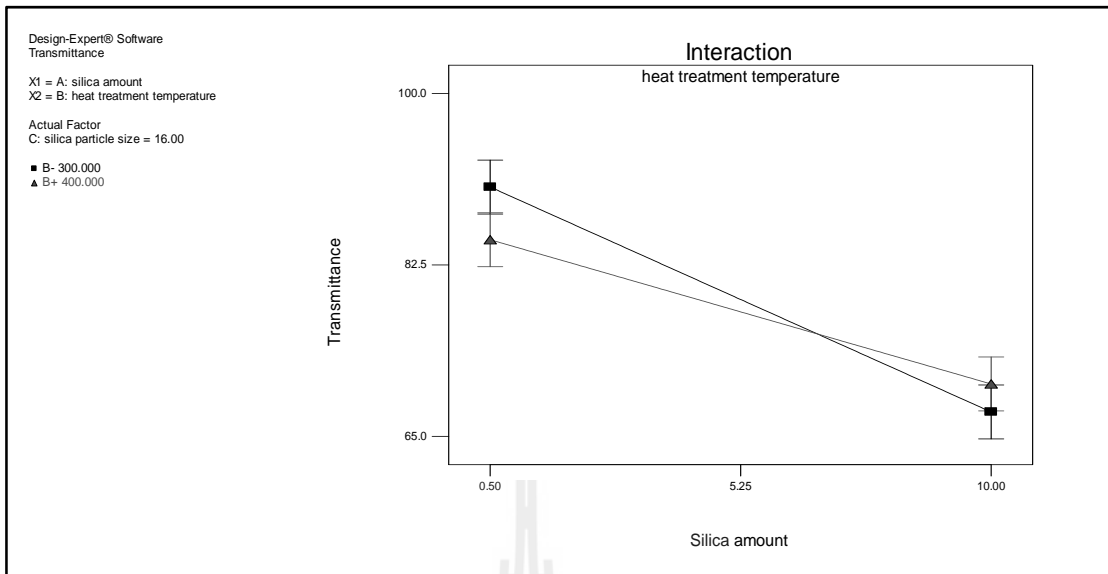
รูปที่ 4.57 แสดงกราฟของส่วนตกค้างความสามารถให้แสงส่องผ่านกับความสามารถให้แสงส่องผ่านที่ถูกพิศ จากกราฟจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงใด ๆ (pattern) แสดงว่าสมมติฐาน ข้อที่ 2 ของ ANOVA ถูกต้อง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า studentized residual ทุกตัวในกราฟไม่ได้มีค่ามากกว่า +3 หรือน้อยกว่า -3 ดังนี้แสดงว่า การทดลองเรื่องความสามารถให้แสงส่องผ่านไม่มีข้อมูลตัวใดที่บิดเบือนไปจากตัวอื่นมาก (outlier) ดังนั้นผลการวิเคราะห์ ANOVA เรื่องความสามารถให้แสงส่องผ่านที่กล่าวถึงจะเชื่อถือได้ เพราะสมมติฐานของ ANOVA ถูกต้อง



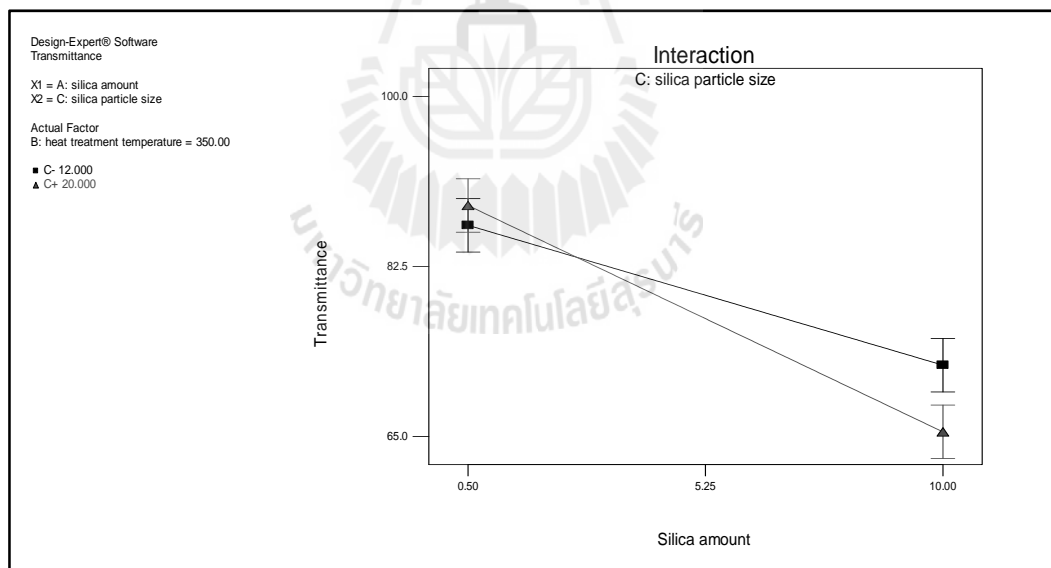
รูปที่ 4.56 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน



รูปที่ 4.57 กราฟระหว่างส่วนตกค้างของความสามารถให้แสงส่องผ่านกับค่าที่ถูกทำนาย

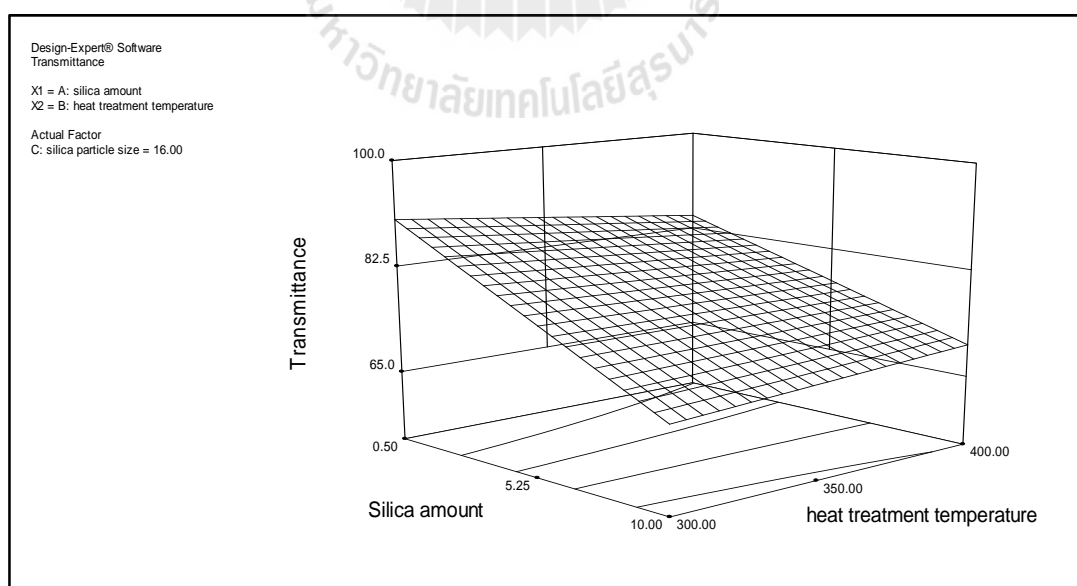


รูปที่ 4.58 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและอุณหภูมิการเผาของความสามารถให้แสงส่องผ่าน



รูปที่ 4.59 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปริมาณผงซิลิกาและขนาดอนุภาคซิลิกาของความสามารถให้แสงส่องผ่าน

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของความสามารถให้แสงส่องผ่านที่ทำนายโดยสมการวิเคราะห์การถดถอย (สมการ 4-3) ที่กล่าวมาข้างต้นกับปริมาณของซิลิกา อุณหภูมิการเผา ขนาดของซิลิกาและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของซิลิกากับอุณหภูมิการเผา และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของซิลิกากับขนาดของซิลิกา จึงได้ plot กราฟระหว่างความสามารถให้แสงส่องผ่านกับปริมาณของซิลิกาและอุณหภูมิการเผาและขนาดอนุภาคซิลิกาได้ผลดังรูปที่ 4.58 และ 4.59 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่อยู่ในรูปเดียวกันมีความชันต่างกันแสดงว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของซิลิกาและอุณหภูมิการเผาและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณซิลิกาและขนาดอนุภาคซิลิกาอันตรกิริยาดังกล่าวก็คือ 1. ปริมาณของซิลิกามีผลต่อความสามารถในการให้แสงส่องผ่านของฟิล์มซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่ำมากกว่าความสามารถในการให้แสงส่องผ่านของฟิล์มสูง 2. ปริมาณของซิลิกามีผลต่อความสามารถในการส่องผ่านของฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากขนาดอนุภาค 20 nm มากกว่าความสามารถในการให้แสงส่องผ่านของฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกาขนาดอนุภาค 12 nm นอกจากนี้ยังใช้โปรแกรมเขียนภาพพื้นผิวตอบสนอง (response surface) ของความสามารถให้แสงส่องผ่านกับปริมาณของซิลิกา และอุณหภูมิการเผา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.60 จากรูปพื้นผิวตอบสนองความสามารถให้แสงส่องผ่านของฟิล์มจะเห็นว่าความสามารถในการส่องผ่านของแสงจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 10 wt% และที่ซิลิกาปริมาณต่ำ (0.5 wt%) การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้ฟิล์มมีความสามารถให้แสงส่องผ่านลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่ซิลิกาสูง ๆ (10 wt%) การเพิ่มอุณหภูมิการเผาไม่ค่อยมีผลทำให้ฟิล์มมีความสามารถให้แสงส่องผ่านเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 4.60 พื้นผิวตอบสนองของความสามารถให้แสงส่องผ่าน

4.5.4 ความขรุขระพื้นผิว

ตารางที่ 4.11 แสดงผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ไปวิเคราะห์หาว่าปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระพื้นผิว

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความขรุขระพื้นผิว
แบบแสดงผลของปัจจัยต้น และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.004307	6	0.000718	1.523363	0.2299	not significant
A-silica amount	0.002192	1	0.002192	4.651972	0.0456	
B-heat treatment temperature	0.000137	1	0.000137	0.291375	0.5963	
C-silica particle size	0.00157	1	0.00157	3.332354	0.0855	
AB	0.000126	1	0.000126	0.267233	0.6119	
AC	0.000182	1	0.000182	0.385929	0.5427	
BC	7E-05	1	7E-05	0.14863	0.7046	
Residual	0.008011	17	0.000471			
Lack of Fit	0.002105	5	0.000421	0.855507	0.5373	not significant
Pure Error	0.005906	12	0.000492			
Cor Total	0.012319	23				

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่า p-value ของปัจจัย A (wt% ของซิลิกา) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า wt% ของซิลิกามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระพื้นผิวของ TEOS-SiO₂-PDMS ฟิล์มด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ในทางตรงกันข้าม p-value ของปัจจัย B ที่เผาอุณหภูมิ) และ p-value ของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นทุกคู่ (AB, AC และ BC) มีค่า

มากกว่า 0.1 แสดงว่าปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระพื้นผิว

ส่วน p-value ของปัจจัย C มีค่ามากกว่า 0.05 แต่น้อยกว่า 0.1 แสดงว่าปัจจัย C มีผลต่อความขรุขระพื้นผิวฟิล์ม ที่ความเชื่อมั่นไม่ถึง 95%

ใช้วิธี step wise ตัดปัจจัยต้นและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นคู่ที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระพื้นผิวออกแล้ว วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอีกครั้ง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12 จากตารางยืนยันอีกครั้งว่าปัจจัย A (ปริมาณของซิลิกา) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% และปัจจัย C มีผลต่อความขรุขระของฟิล์มที่ความเชื่อมั่นไม่ถึง 95%

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีผลต่อความขรุขระพื้นผิว หลังจากตัดปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้นที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกไปแล้ว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.003786	2	0.001893	4.659657	0.0211	significant
A-silica amount	0.002192	1	0.002192	5.395702	0.0303	
C-silica particle size	0.001594	1	0.001594	3.923613	0.0609	
Residual	0.008532	21	0.000406			
Lack of Fit	0.002626	9	0.000292	0.592886	0.7806	not significant
Pure Error	0.005906	12	0.000492			
Cor Total	0.012319	23				

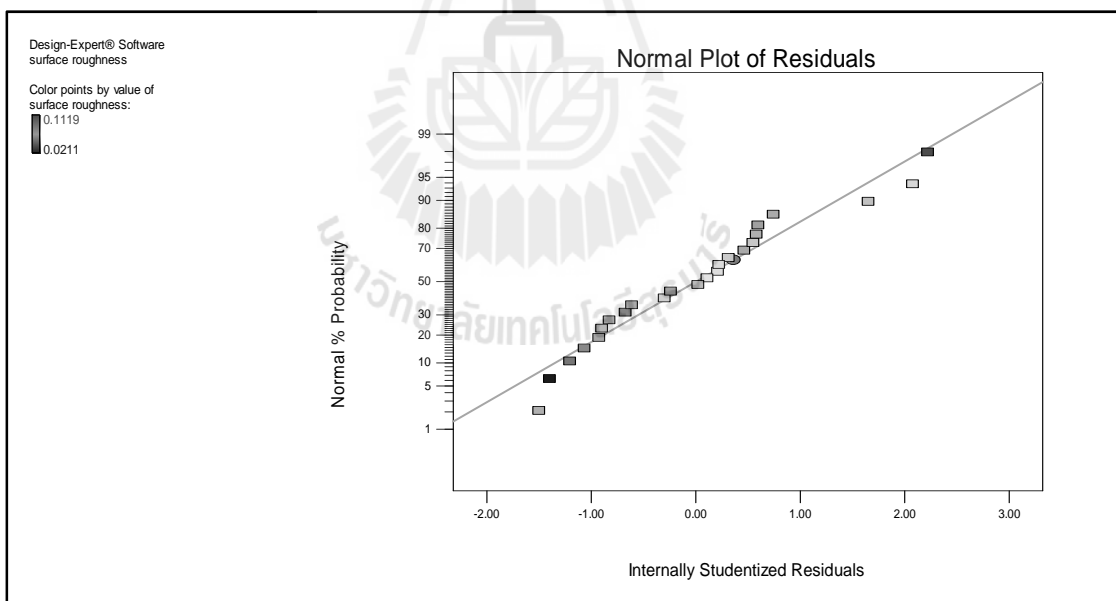
ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) ในโปรแกรม design expert สร้าง model เพื่อทำนายว่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มแปรตามปัจจัย A และ C อย่างไร ได้ model ดังสมการ (4.1)

$$\text{surface roughness } (\mu\text{m}) = 0.086657 + 2.46315 \times 10^{-3} \times \text{silica amount (wt\%)} - 2.03750 \times 10^{-3} \times \text{silica particle size (nm)} \quad (4.4)$$

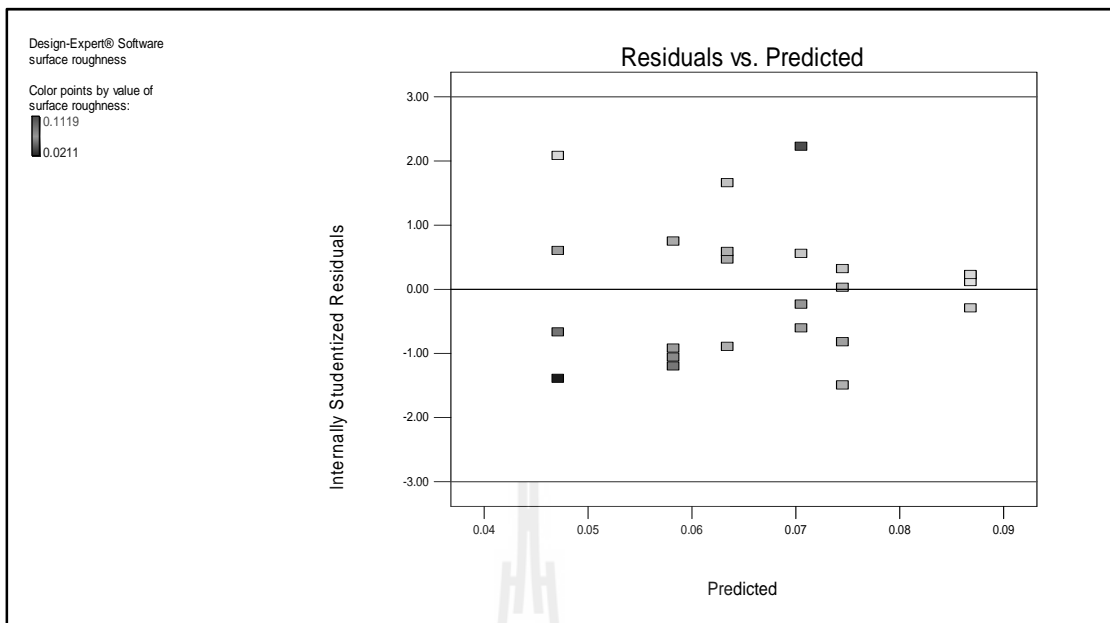
สมการ (4.4) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม (หน่วยเป็น μm) ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ปริมาณของซิลิกา (หน่วยเป็น wt%) และขนาดของซิลิกา (หน่วยเป็น nm) อย่างไร

รูปที่ 4.61 แสดงกราฟ normal probability plot ของส่วนตกค้างของขรุขระพื้นผิวของฟิล์มจากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงผิดปกติ จุดทั้งหมดถูกปกคลุมโดยเส้นตรง แสดงว่า สมมติฐานข้อที่ 1 ของ ANOVA ถูกต้อง กล่าวคือส่วนตกค้างมีค่ามัธยฐานเป็นศูนย์และมีการแจกแจงปกติเป็นที่ยอมรับได้

รูปที่ 4.62 แสดงกราฟของส่วนตกค้างขรุขระพื้นผิวกับขรุขระพื้นผิวที่ถูกฟิต จากกราฟจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงใด ๆ (pattern) แสดงว่าสมมติฐานข้อที่ 2 ของ ANOVA ถูกต้องนอกจากนี้จะเห็นได้ว่า studentized residual ทุกตัวในกราฟไม่ได้มีค่ามากกว่า +3 หรือน้อยกว่า -3 ดังนั้นแสดงว่า การทดลองขรุขระพื้นผิวของฟิล์มไม่มีข้อมูลตัวใดที่บิดเบือนไปจากตัวอื่นมาก (outlier) ดังนั้นผลการวิเคราะห์ ANOVA เรื่องขรุขระพื้นผิวที่กล่าวถึงจะเชื่อถือได้ เพราะสมมติฐานของ ANOVA ถูกต้อง

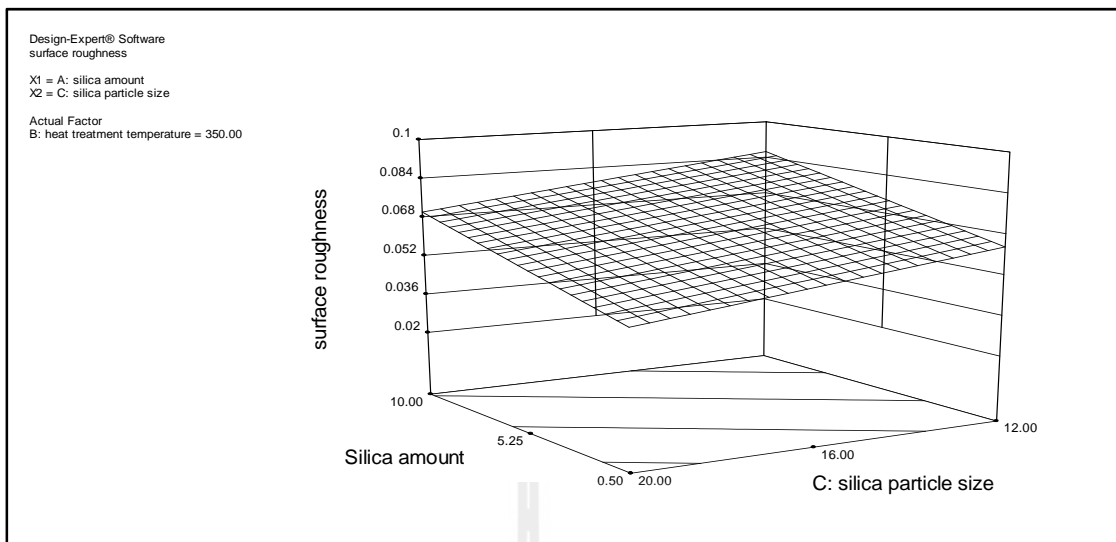


รูปที่ 4.61 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความขรุขระพื้นผิว



รูปที่ 4.62 กราฟส่วนตกค้างของความขรุขระพื้นผิวกับค่าที่ถูกทำนาย

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของความขรุขระพื้นผิวที่ทำนายโดยสมการวิเคราะห์การถดถอย (สมการ 4.4) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น กับ ปริมาณของซิลิกา และขนาดของซิลิกา จึงใช้โปรแกรมเขียนภาพพื้นผิวดตอบสนอง (response surface) ของความขรุขระพื้นผิวที่ทำนายโดยสมการ 4.4 ต่อปริมาณของซิลิกา และขนาดของซิลิกา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.62 จากรูปพื้นผิวดตอบสนองความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม จะเห็นว่า การเพิ่มขนาดของซิลิกา จาก 12 เป็น 20 nm ทำให้ความขรุขระพื้นผิวจะมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มซิลิกา 0.5 wt% เป็น 10 wt% ทำให้ความขรุขระพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.63 พื้นผิวตอบสนองความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม

4.5.5 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมด ดังตารางที่ 4.13 ว่ามีปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่ใด มีผลต่อมุมสัมผัส พลังงานพื้นผิวอิสระ ความสามารถให้แสงส่องผ่าน และความขรุขระพื้นผิว

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมด

ปัจจัย การทดสอบ	ปริมาณซิลิกา กา (A)	อุณหภูมิ การเผา (B)	ขนาดอนุภาค ซิลิกา (C)	AB	AC	BC
4.5.1 มุมสัมผัส	✓	×	✓	×	×	×
4.5.2 พลังงานพื้นผิว อิสระ	✓	✓	×	✓	×	×
4.5.3 ความสามารถ ให้แสงส่องผ่าน	✓	×	×	×	✓	×
4.5.4 ความขรุขระพื้นผิว	✓	×	×	×	×	×

หมายเหตุ ✓ คือ ปัจจัยที่มีผล × คือ ปัจจัยที่ไม่มีผล

4.6 การตรวจสอบความขรุขระพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

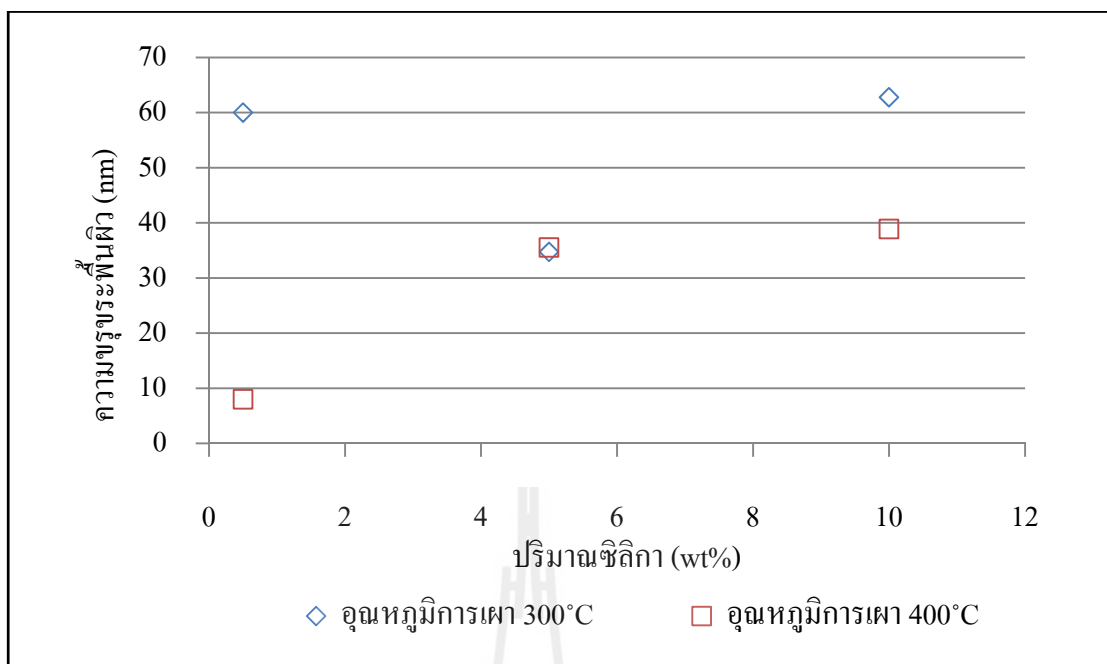
ตารางที่ 4.13 แสดงความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมในสภาวะต่าง ๆ กัน ซึ่งวัดด้วย AFM

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดความขรุขระพื้นผิว

ปริมาณผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ขนาดอนุภาคซิลิกา (nm)	ความขรุขระพื้นผิว (nm)
0.5	300	12	60.00
5	300	12	34.73
10	300	12	62.78
0.5	400	12	8.00
5	400	12	35.53
10	400	12	38.89
0.5	300	20	33.65
5	300	20	66.25
10	300	20	108.59
0.5	400	20	32.67
5	400	20	61.53
10	400	20	142.40

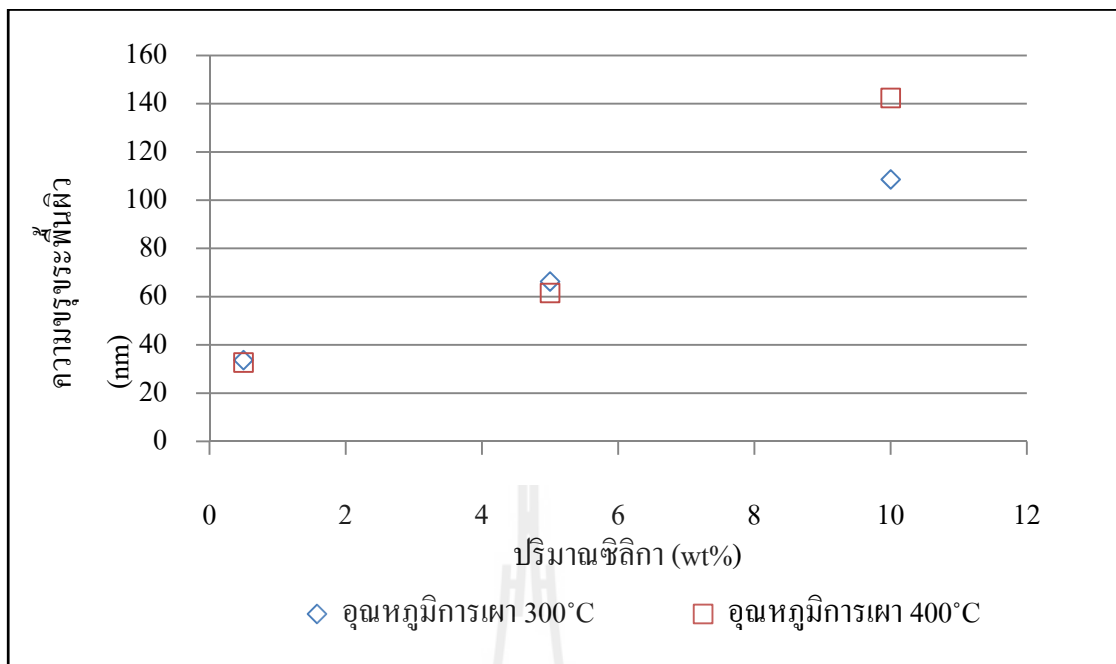
หมายเหตุ : ความขรุขระพื้นผิววัดโดยใช้หัวอ่านจากเครื่อง AFM

รูปที่ 4.64 แสดงค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาด 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C จะเห็นได้ว่าปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความขรุขระพื้นผิวเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่วนใหญ่ว่าความขรุขระพื้นผิวมีค่าลดลง ยกเว้นแต่ฟิล์มที่มีซิลิกาปริมาณ 5wt% ค่าความขรุขระพื้นผิวไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา



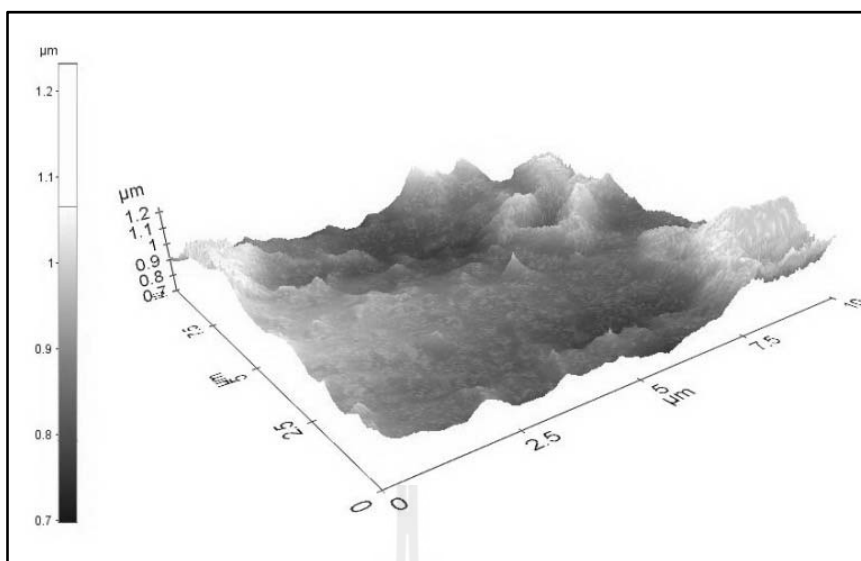
รูปที่ 4.64 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาด 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

รูปที่ 4.65 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาด 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C พบว่าปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเผาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่วนใหญ่แล้วไม่ได้ทำให้ความขรุขระพื้นผิวไม่แตกต่างกันมากนัก

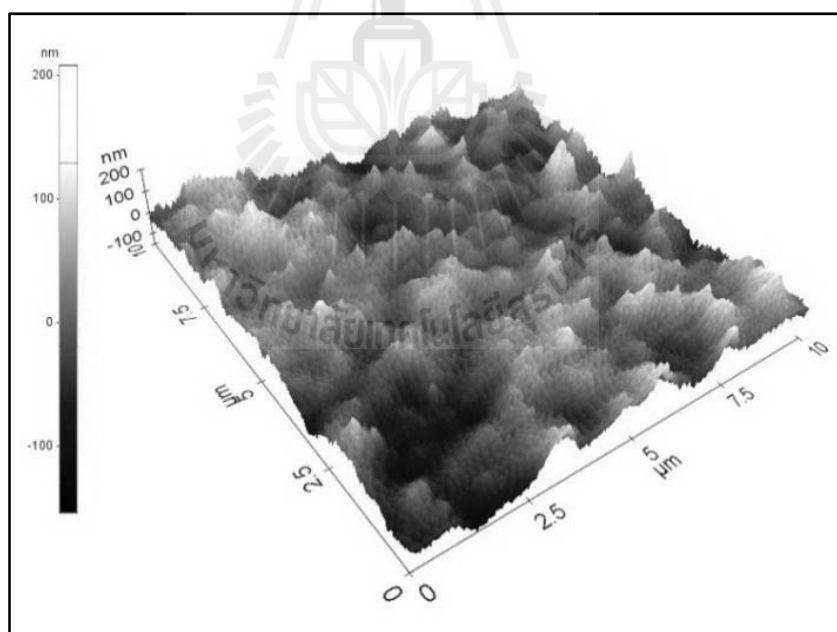


รูปที่ 4.65 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาด 20 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C

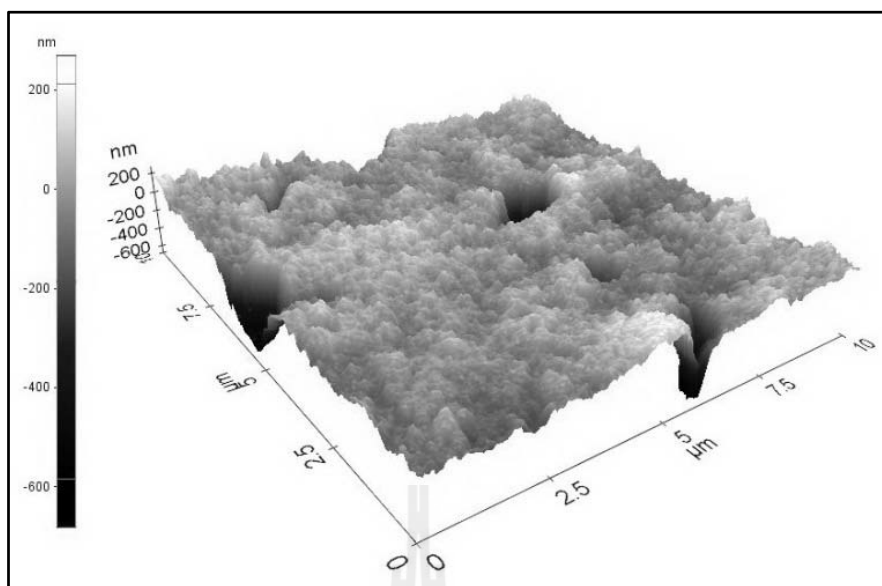
รูปที่ 4.66-4.68 แสดงภาพถ่ายจากกล้องเครื่อง AFM ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ผงซิลิกา ขนาด 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 300 °C ใช้หัวอ่านของเครื่อง AFM วัดความขรุขระของฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกา ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% มีความขรุขระพื้นผิวเท่ากับ 60.00, 34.75 และ 62.78 nm ตามลำดับ



รูปที่ 4.66 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 60.00 nm

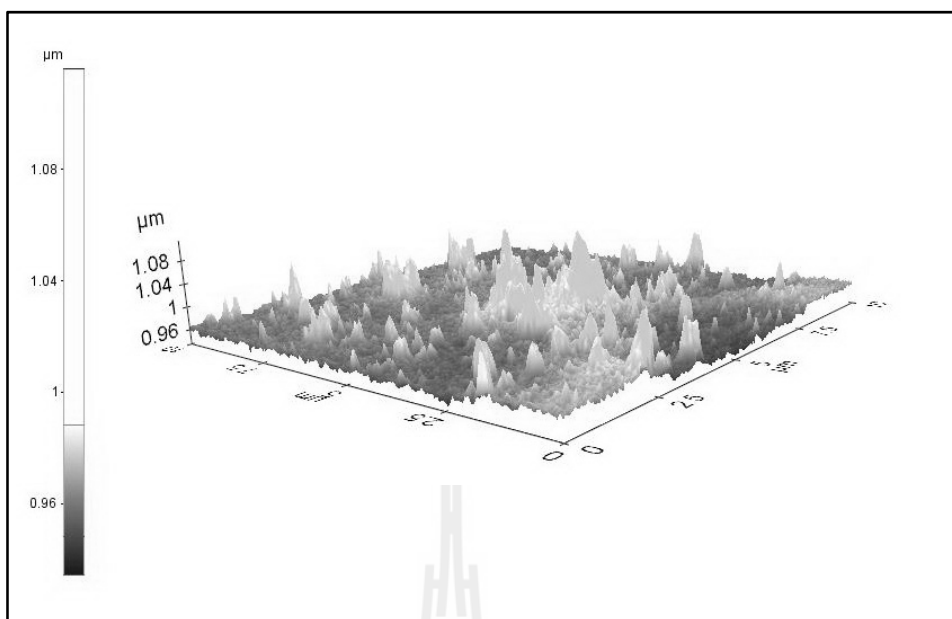


รูปที่ 4.67 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 34.75 nm

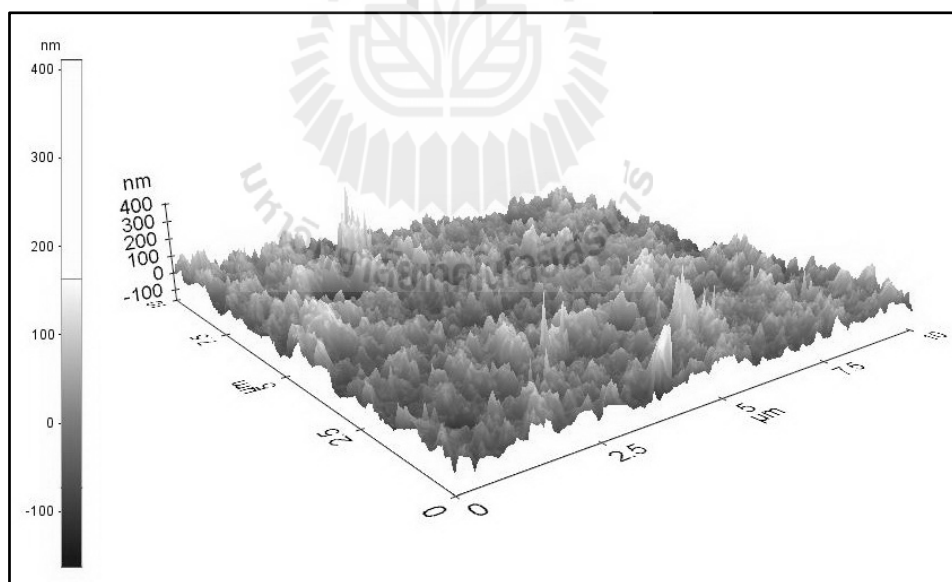


รูปที่ 4.68 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 62.78 nm

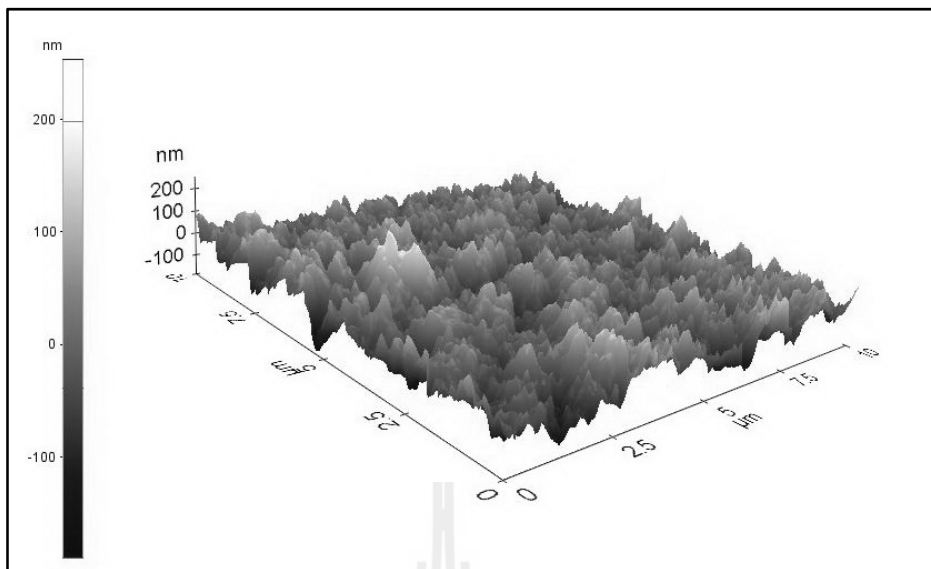
รูปที่ 4.67-4.71 แสดงภาพถ่ายจากเครื่อง AFM ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ผงซิลิกาขนาด 12 nm ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% เผาที่อุณหภูมิ 400 °C แล้วใช้หัวอ่านของเครื่อง AFM วัดความขรุขระของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกาปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% มีความขรุขระ 8.00, 35.53 และ 38.89 nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของซิลิกาทำให้ ฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบความขรุขระของฟิล์มในรูปที่ 4.66-4.68 กับฟิล์มในรูปที่ 4.69-4.71 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 300 เป็น 400 °C มีผลต่อความขรุขระพื้นผิวอย่างไม่แน่นอน กล่าวคือ สำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกา 0.5 และ 10 wt% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะได้ฟิล์มที่มีความขรุขระพื้นผิวน้อยลง แต่ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ซิลิกา 5 wt% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะได้ฟิล์มที่มีความขรุขระพื้นผิวไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก



รูปที่ 4.69 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 0.5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 8.00 nm

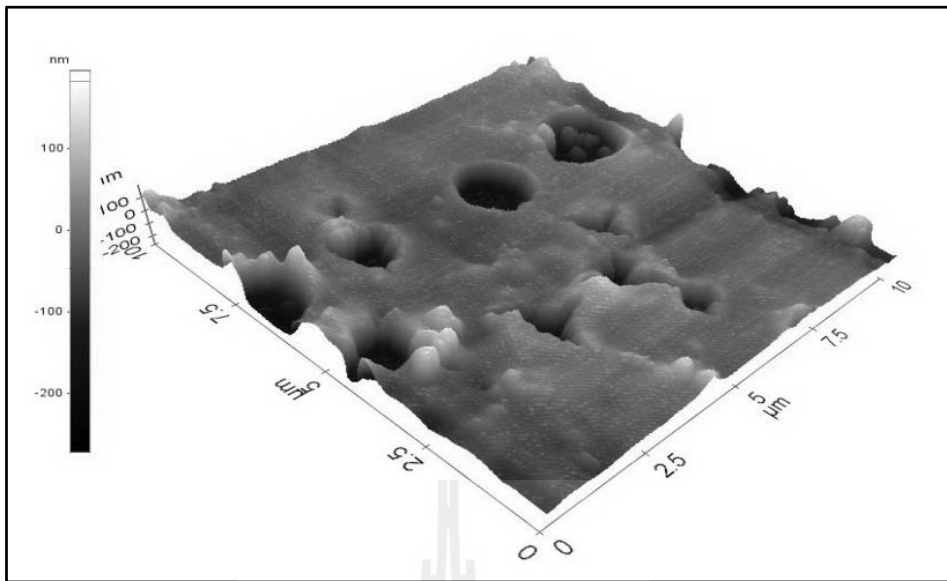


รูปที่ 4.70 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 35.53 nm

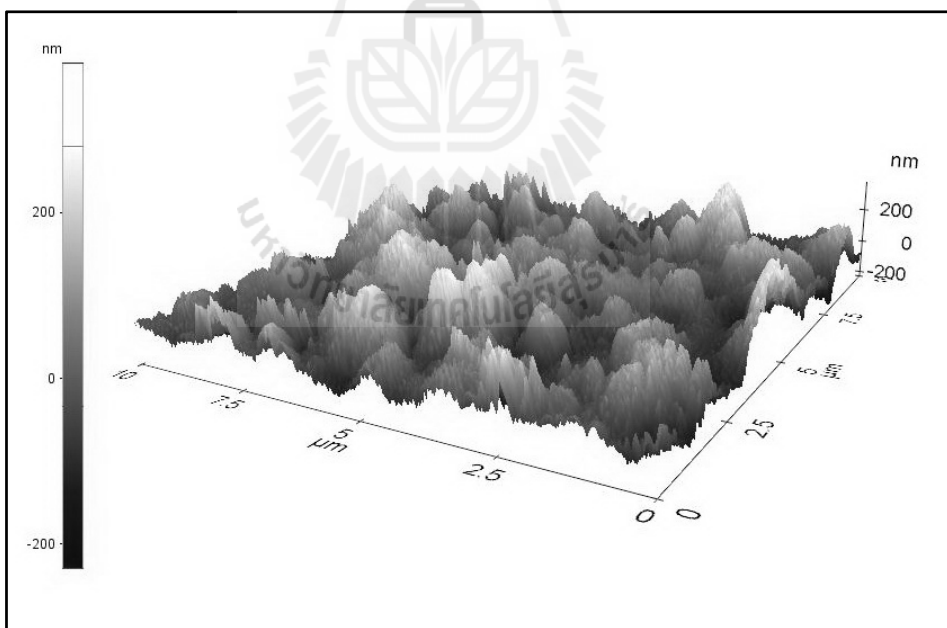


รูปที่ 4.71 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 12 nm 10 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 38.89 nm

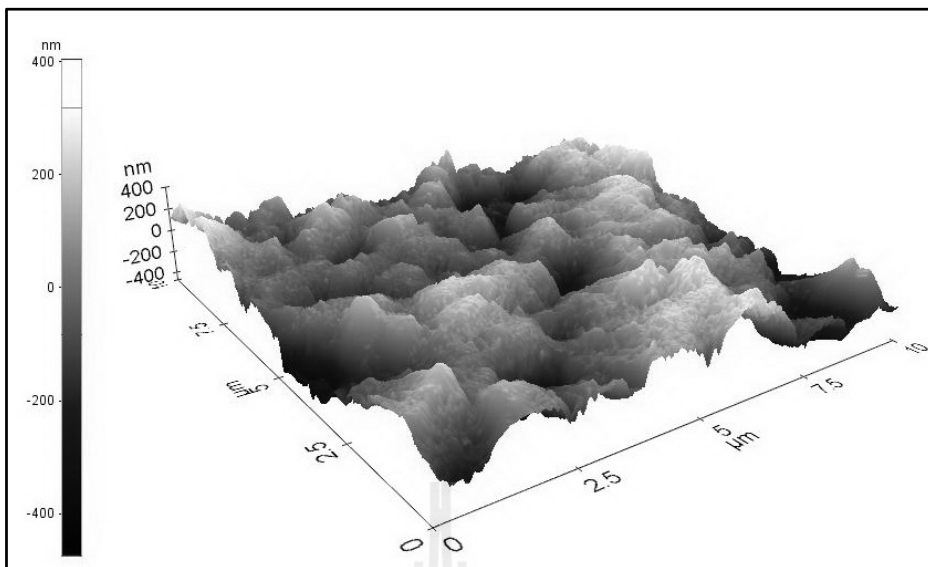
จากรูปที่ 4.72-4.74 แสดงภาพถ่ายจากเครื่อง AFM ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ผงซิลิกาขนาด 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เมื่อเคลือบเสร็จแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 °C ใช้หัวอ่านของเครื่อง AFM วัดความขรุขระของฟิล์มในภาพ พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกาปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% มีความขรุขระ 33.65, 66.25 และ 108.59 nm ตามลำดับแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณผงซิลิกาทำให้ได้ฟิล์มที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.72 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 0.5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 33.65 nm

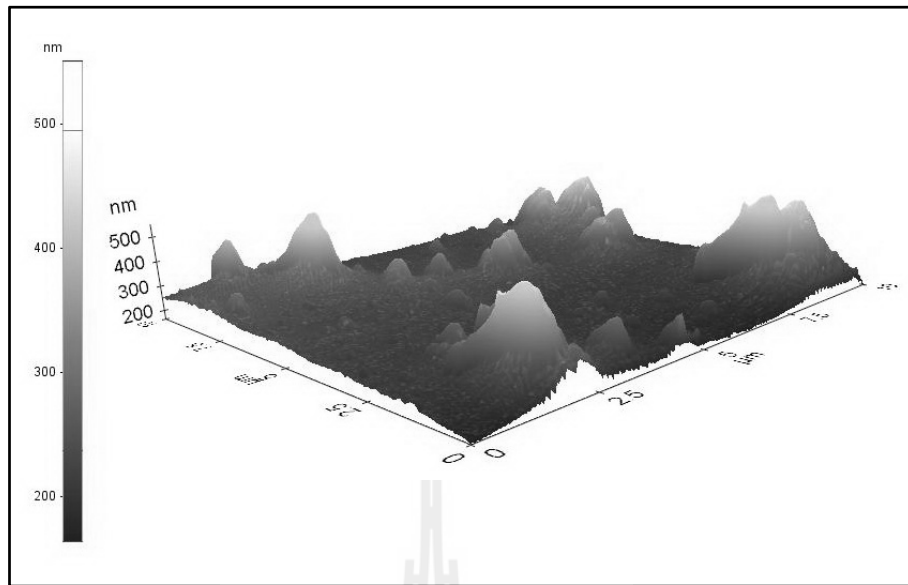


รูปที่ 4.73 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้น โดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 66.25 nm

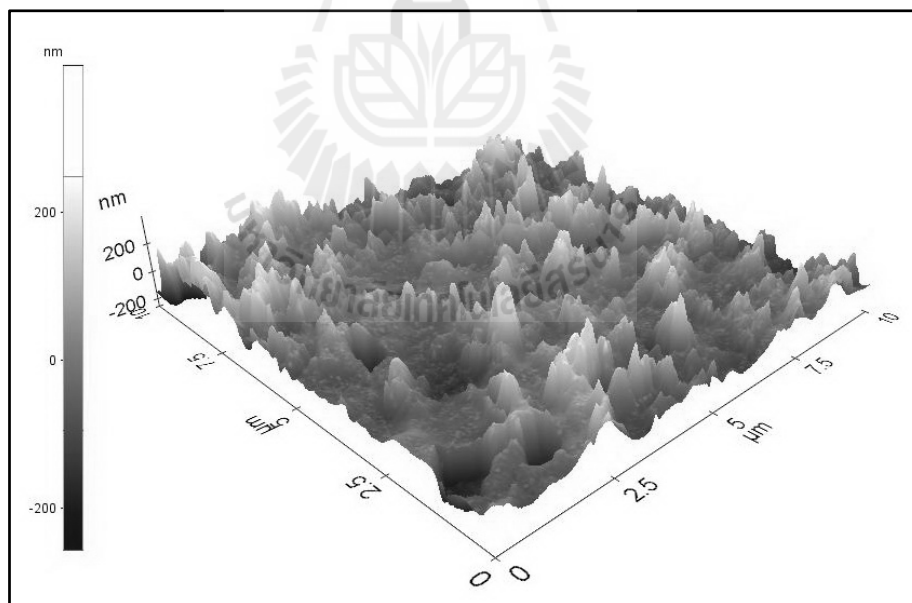


รูปที่ 4.74 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 108.59 nm

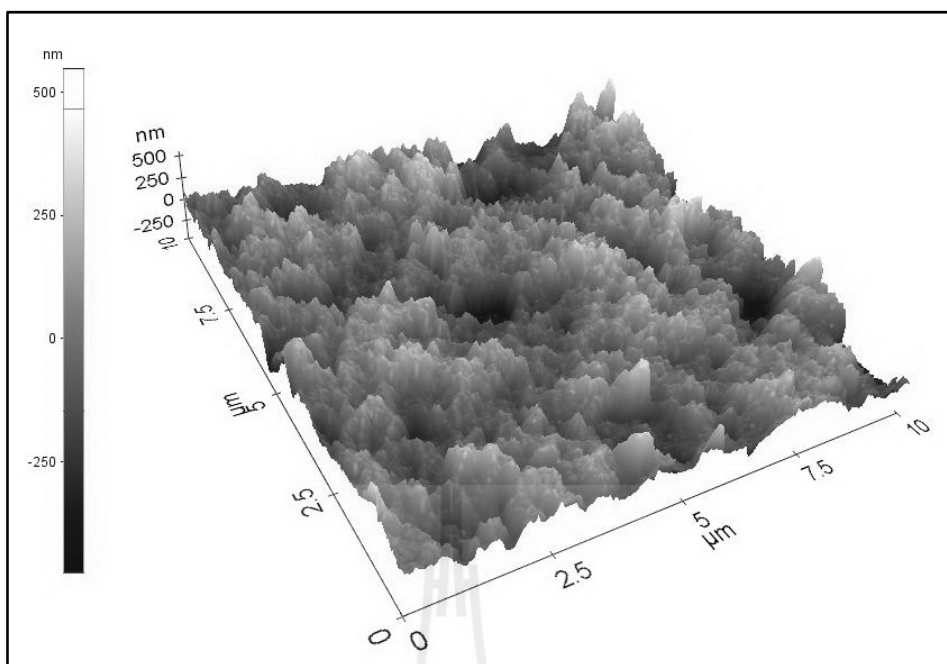
รูปที่ 4.75-4.77 แสดงภาพถ่ายจากเครื่อง AFM ของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้ผงซิลิกา ขนาด 20 nm 0.5, 5 และ 10 wt% เมื่อเคลือบเสร็จแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C แล้วใช้หัวอ่านของเครื่อง AFM วัดความขรุขระของฟิล์ม ในภาพพบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากซิลิกา ปริมาณ 0.5, 5 และ 10 wt% มีความขรุขระ 32.67, 61.53 และ 142.40 nm ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณ ผงซิลิกาจะทำให้ผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบความขรุขระของฟิล์ม ในรูปที่ 4.72-4.74 กับฟิล์มในรูปที่ 4.75-4.77 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 300 เป็น 400 °C ไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระพื้นผิวมากนัก เนื่องจากค่าความขรุขระพื้นผิวระหว่าง 300 และ 400 °C มีค่าไม่ ค่อยแตกต่างกัน แสดงว่าอุณหภูมิการเผาไม่ค่อยมีผลต่อความขรุขระพื้นผิว แต่ปริมาณผงซิลิกาจะมี ผลต่อความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มมากกว่า



รูปที่ 4.75 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 0.5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 32.67 nm



รูปที่ 4.76 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 5 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 61.53 nm



รูปที่ 4.77 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยใช้ซิลิกาขนาด 20 nm 10 wt%
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ความขรุขระที่วัดจาก AFM เท่ากับ 142.40 nm

จากภาพ AFM เกือบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มมีผลทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ถึงแม้ว่าความขรุขระพื้นผิวของเครื่องมือ 2 ชนิด คือ เครื่อง surface roughness measurement และเครื่อง AFM ได้ความขรุขระที่วัดได้มีค่าที่แตกต่างกัน(ความขรุขระที่วัดได้ด้วยวิธีแรกอยู่ในช่วง 21-111 nm และความขรุขระที่วัดได้ด้วย AFM อยู่ในช่วง 8-142 nm) แต่ผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณของซิลิกา จะมีผลทำให้ความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มเพิ่มขึ้นจากการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Linda Wu (2005)

4.7 การทดสอบความทนทานต่อการขัดสี

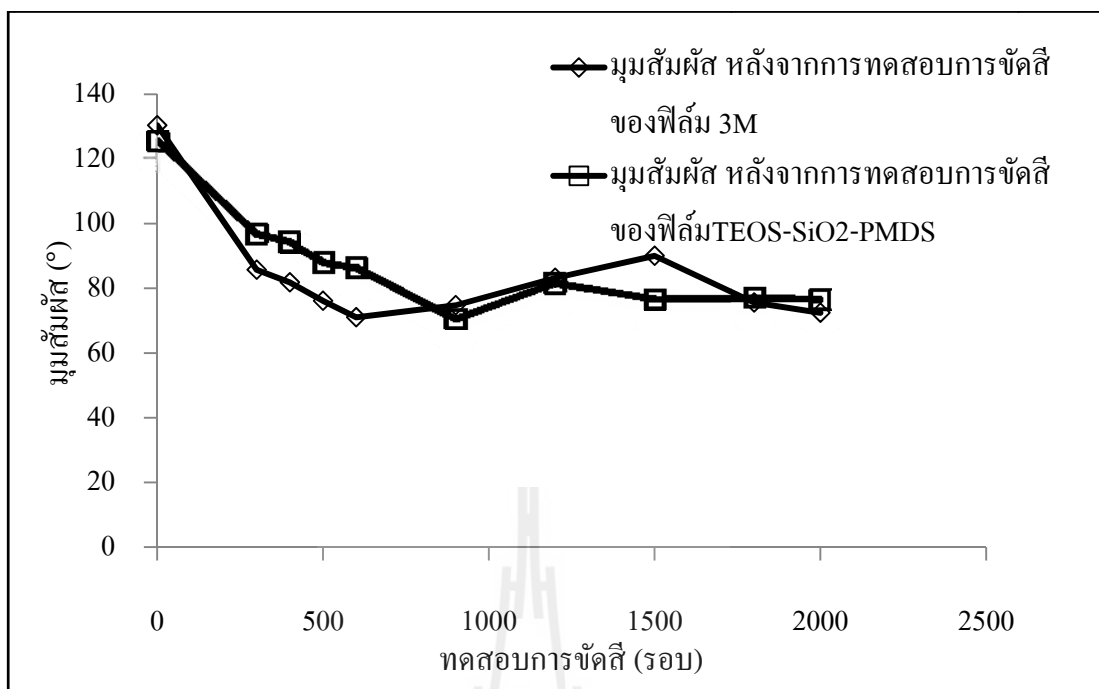
ตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.78 แสดงมุมสัมผัสของกระเบื้อง A ที่เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS และฟิล์ม 3M หลังผ่านการทดสอบความทนทานต่อการขัดสีที่จำนวนรอบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.15 มุมสัมผัสหลังจากการทดสอบการขัดสีของกระเบื้องระบบ $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ ผลิตในห้องปฏิบัติการ (กระเบื้อง A)

จำนวนรอบที่ขัดทดสอบ (รอบ)	มุมสัมผัส ($^{\circ}$) ของกระเบื้อง A	
	เคลือบด้วย 3M	เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS
0	130.41	125.53
300	85.75	96.61
400	81.85	94.21
500	76.15	88.17
600	71.06	86.62
900	74.78	70.64
1200	83.24	81.6
1500	90.06	76.6
1800	75.6	76.93
2000	72.46	76.43

หมายเหตุ : ก่อนเคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS และฟิล์ม 3M กระเบื้องระบบ $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ มีมุมสัมผัสเท่ากับ 60°

ตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.78 จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการทดสอบจำนวนรอบมากขึ้น มุมสัมผัสของกระเบื้องที่เคลือบด้วยฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นอีกอย่างได้ว่าหลังจากขัดที่จำนวนรอบต่าง ๆ มุมสัมผัสของกระเบื้อง A ที่เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีค่าไม่แตกต่างจากมุมสัมผัสของกระเบื้องที่เคลือบของ 3M นอกจากนี้หลังการขัดทดสอบ 2000 รอบ มุมสัมผัสของกระเบื้องที่เคลือบด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์จากการทดลองนี้และฟิล์ม 3M ยังมีค่าสูงกว่ามุมสัมผัสของกระเบื้องที่ไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มทั้งสอง (ซึ่งเท่ากับ 60°) แสดงว่าฟิล์มทั้งสองยังคงช่วยให้กระเบื้องมีสมบัติไม่ชอบน้ำถึงแม้จะถูกขัดไปแล้ว 2000 รอบ



รูปที่ 4.78 มุมสัมผัสหลังจากการขัดสีของกระเบื้อง A ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 3M และ TEOS-SiO₂-PDMS

ตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.79 แสดงมุมสัมผัสของกระเบื้อง B ที่เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS และฟิล์ม 3M หลังผ่านการทดสอบความทนทานต่อการขัดสีที่ 0-2000 รอบ

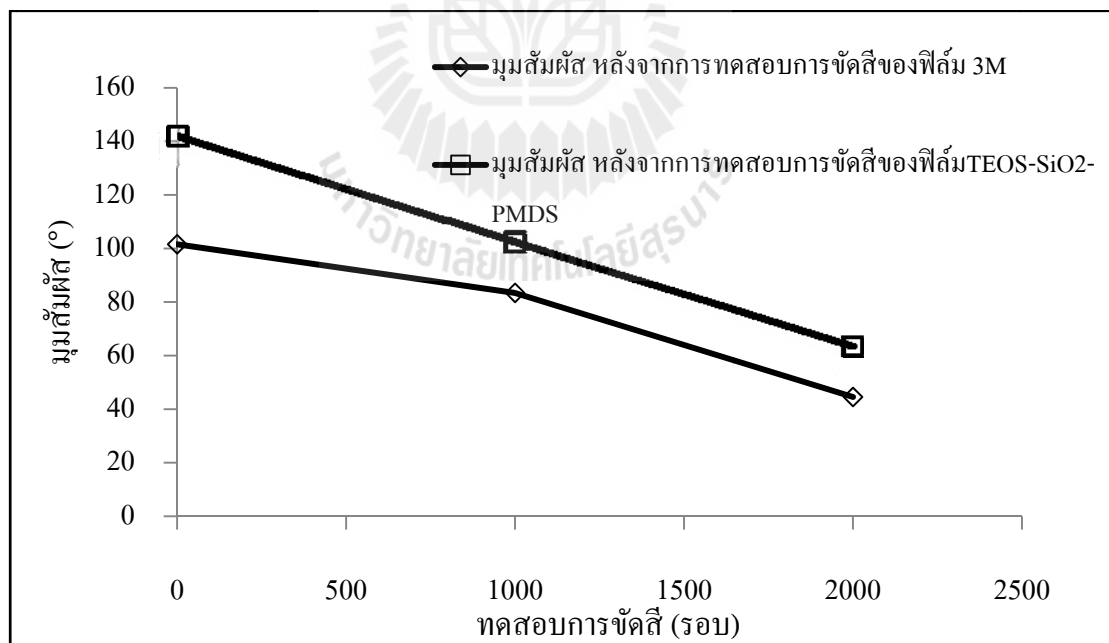
นอกจากนี้รูปที่ 4.79 และตารางที่ 4.15 ยังแสดงให้เห็นได้ว่ามุมสัมผัสหลังจากการทดสอบความทนทานต่อการขัดสีของกระเบื้องระบบ Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂ (กระเบื้อง B) ที่เคลือบด้วยฟิล์ม 3M และ ฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS กระเบื้องจะมีมุมสัมผัสลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการขัดสีทำให้ฟิล์มที่เกาะติดบนกระเบื้องได้หลุดออกจากกระเบื้องไปบางส่วน อย่างไรก็ตามแต่มุมสัมผัสยังมีค่ามากกว่ากระเบื้องที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และหลังจากการทดสอบขัด 2000 รอบ กระเบื้องที่เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ค่ามีมุมสัมผัสมากกว่ากระเบื้องที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 3M แสดงว่าฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ที่สังเคราะห์จากการทดลองนี้มีสมบัติที่ดีกว่าฟิล์ม 3M ที่ขายในท้องตลาด

ตารางที่ 4.16 มุมสัมผัสหลังจากการทดสอบการขีดสีของกระเบื้องระบบ $\text{Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ ที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม (กระเบื้อง B)

จำนวนรอบที่ขีดทดสอบ (รอบ)	มุมสัมผัส ($^\circ$) ของกระเบื้อง B	
	เคลือบด้วย 3M	เคลือบด้วยฟิล์ม TEOS-SiO ₂ -PDMS
0	101.57	142.13
1000	83.42	102.36
2000	44.55	63.44

หมายเหตุ ก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มกระเบื้อง B มีมุมสัมผัสน้ำเท่ากับ 18°

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าก่อนเคลือบด้วยฟิล์มกระเบื้องระบบ $\text{Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (กระเบื้อง B) ซึ่งเป็นกระเบื้องที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมมีมุมสัมผัส เท่ากับ 18° แต่เมื่อเคลือบกระเบื้อง B ด้วยฟิล์ม 3M และ ฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS กระเบื้องมีค่ามุมสัมผัส เท่ากับ 101.57 และ 142.13 ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มทั้งสองชนิดสามารถทำให้กระเบื้องมีสมบัติไม่ชอบน้ำได้



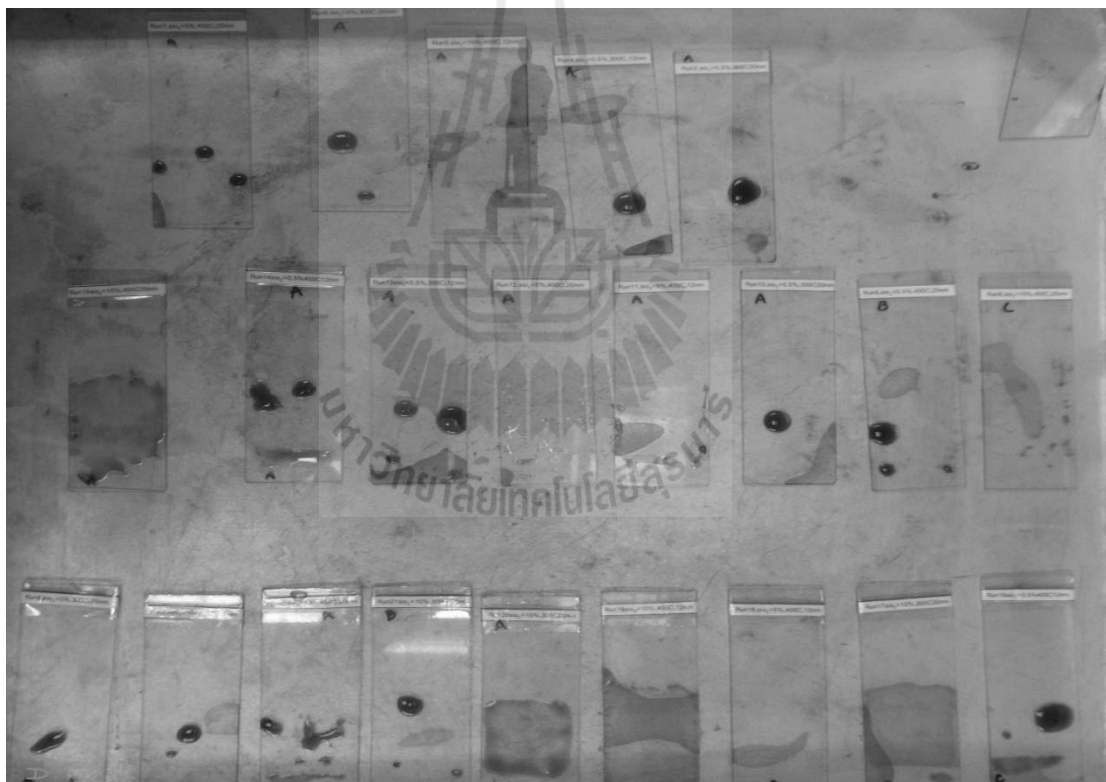
รูปที่ 4.79 มุมสัมผัสหลังจากการขีดสีของกระเบื้อง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 3M และ TEOS-SiO₂-PDMS

4.8 การเกาะติดคราบสกปรก (stain resistance)

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบการเกาะติดคราบสกปรก

Std.	Run	ผงซิลิกา (wt%)	อุณหภูมิการ เผา (°C)	ขนาดของ ซิลิกา (nm)	น้ำมัน มะกอก	ไอโอดีน	สารละลาย เหล็ก
1	13	0.5	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
2	4	0.5	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
3	1	5	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
4	3	5	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
5	21	10	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
6	23	10	300	12	Class 4	Class 4	Class 4
7	14	0.5	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
8	16	0.5	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
9	11	5	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
10	18	5	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
11	5	10	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
12	19	10	400	12	Class 4	Class 4	Class 4
13	10	0.5	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
14	2	0.5	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
15	6	5	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
16	24	5	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
17	17	10	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
18	20	10	300	20	Class 4	Class 4	Class 4
19	9	0.5	400	20	Class 4	Class 4	Class 4
20	22	0.5	400	20	Class 4	Class 4	Class 4
21	7	5	400	20	Class 4	Class 4	Class 4
22	12	5	400	20	Class 4	Class 4	Class 4
23	8	10	400	20	Class 4	Class 4	Class 4
24	15	10	400	20	Class 4	Class 4	Class 4

จากตารางที่ 4.16 พบว่าผลการทดสอบของตัวอย่างทั้งหมดจะอยู่ใน class 4 หมายความว่า ตัวอย่างได้ผ่านการล้างด้วยน้ำไหล และผ่านการขัดด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ทำความสะอาด จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ล้างด้วยน้ำอย่างเดียว จะมีคราบเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม เนื่องจากพื้นผิวมีความขรุขระจึงทำให้สารละลายที่ใช้ทดสอบฝังตัวอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม จากรูปที่ 4.80 พบการทดสอบการเกาะติดคราบสกปรกของไอโอดีน โดยในการทดสอบนี้ใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ ไอโอดีน น้ำมันมะกอก และสารละลายหลัก ซึ่งสารละลายทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมบนแผ่นตัวอย่างเหมือนกัน คือ ในตอนเริ่มทำการทดสอบ ทาสารละลายที่ใช้ทดสอบบนแผ่นตัวอย่าง สารละลายจะเริ่มรวมตัวกันเป็นทรงกลม เนื่องจากแผ่นตัวอย่างมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หลังจากวางทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง พบว่า สารละลายที่ใช้ทดสอบบางส่วนยังคงเหลือบนแผ่นตัวอย่าง ต้องทำการล้างได้น้ำแบบไหลผ่านและขัดเพื่อทำความสะอาดจึงพบว่าจะสามารถทำความสะอาดคราบสกปรกได้



รูปที่ 4.80 การทดสอบการเกาะติดคราบไอโอดีนบนแผ่นตัวอย่าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการเตรียม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซลเจล โดยเคลือบผิวเซรามิกหรือกระจกสไลด์ด้วยวิธี spin coating เพื่อพัฒนาการเคลือบผิวเซรามิกให้มีสมบัติพิเศษ คือ ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) รวมทั้งศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Design-Expert® version 8.0.1 โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจลได้ฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ด้วยการวิเคราะห์มุมสัมผัส ได้ค่าสูงสุดเท่ากับ 152° ด้วยการเตรียม TEOS-SiO₂-PDMS ซิลิกาขนาดอนุภาค 20 nm 10 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมทางสถิติพบว่า ปริมาณซิลิกาและอุณหภูมิการเผา มีผลต่อมุมสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อวิเคราะห์พลังงานพื้นผิวอิสระพบว่า มุมสัมผัสสูงขึ้น ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระจะลดต่ำลง มีค่าต่ำสุด 3mN/m ทำให้ฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น

ความสามารถให้แสงส่องผ่านสูงสุดของฟิล์ม TEOS-SiO₂-PDMS มีค่าเท่ากับ 90% ที่ปริมาณซิลิกา 0.5 wt% ขนาดอนุภาค 20 หรือ 12 nm อุณหภูมิการเผา 300 °C จากการวิเคราะห์พบว่าความสามารถให้แสงส่องผ่านจะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกา จะทำให้ความสามารถให้แสงส่องผ่านมีค่าลดลง

ความขรุขระพื้นผิว จะขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกา เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัส เมื่อมุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น ความขรุขระพื้นผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design expert® version 8.0.1 พบว่า โปรแกรมสามารถช่วยตัดสินใจและยืนยันผลการทดลองได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกรณีที่ผลการทดลองมีความไม่แน่นอน หรือไม่แน่ใจในการวิเคราะห์ผล และสามารถทำนายผลการทดลองได้ ดังนั้นจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้สูตรหรือการทดลองที่ต้องการได้

การทดสอบความทนทานต่อการขัดสี การนำเคลือบฟิล์มบนกระเบื้องทำให้กระเบื้องมีความไม่ชอบน้ำ จากการทดสอบพบว่า มุมสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อได้รับการขัดสี และยังคงให้สมบัติแบบไม่ชอบน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม 3M ทำให้ทราบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นเองสามารถให้มุมสัมผัสที่ดีกว่า

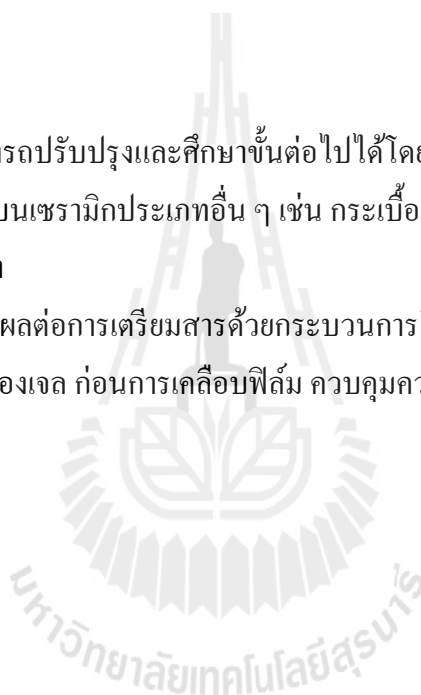
การทดสอบความต้านทานการเกิดคราบ เมื่อทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน น้ำมันมะกอก และเหล็ก พบว่า ตัวอย่างจัดอยู่ใน class 4 คือ ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำอุณหภูมิ 55 ± 5 °C และน้ำยาทำความสะอาดทั่วไปที่มี pH 6.5-7.5 ขัดด้วยฟองน้ำ จากนั้นล้างด้วยน้ำเปล่า และเช็ด จึงจะสามารถทำความสะอาดคราบบนตัวอย่างได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ สามารถปรับปรุงและศึกษาขั้นต่อไปได้โดยสามารถเพิ่มเติมได้ดังนี้

- เตรียมตัวอย่างบนเซรามิกประเภทอื่น ๆ เช่น กระเบื้อง สุขภัณฑ์ เป็นต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

- ควบคุมปัจจัยที่ผลต่อการเตรียมสารด้วยกระบวนการโซลเจล
- วัดความหนืดของเจล ก่อนการเคลือบฟิล์ม ควบคุมความหนาของฟิล์ม



รายการอ้างอิง

- ปารเมศ ชูติมา, (2002). “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 217,
- สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, (2552). “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระบวนการ โซล-เจล”. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- Ashley, J. and Norman, L. (2004). “**Hydrophobic Material**” United States Patent ,Patent No US6, pp. 743,467.
- Chin, M.W., Chang, S.Y., and Yoo, H.K. (2001). “**Preparation and Characterization of Sol-Gel Derives SiO₂-TiO₂-PDMS composite Films**” Bull. Korean Chem. Soc.2001, Vol.22, No.12.
- David, A.R., and Shingles, S. (2004). “**Multilayered hydrophobic coating and method of manufacturing the same**” United States Patent , Patent No US6,737,105.
- Dunglas, C.M., (2001).“**Design and Analysis of Experiments**”, 5th edition, John Wiley&Sons, Inc., 2001, New York.
- Eric, D.B., Pratik, B.S., Seema, S., and Jeffrey, Brinker, C. (2009). “**Preparation of hydrophobic coatings**”, United States Patent ,Patent No US7, pp. 485,343.
- Hwang, J.H., Burtrand, I.L., Viktor, K., and Igor, L. (2008). “**Transparent hydrophobic organic-inorganic nanocomposite films**” Material Research Bulletin 43 pp. 2652-2657.
- Kuisma, R., Linda, F., Kymalainen, H.R., Eija, P.L., Minna, P., Pauliina, M., Mikko, H., Anna, M.S., and Leena, H. (2007). “ **Microstructure and cleanability of uncoated and fluotopolymer,zirconia and titania coated ceramic glazed surfaces**” Journal of the European Ceramic Society 27 pp. 101-108.
- Linda, Y.L., Wu, A.M., and Zeng, X.T. (2005). “**Increasing hydrophobicity of sol-gel hard coating by chemical and morphological modifications**”, Surface & Coating Technology 198 pp. 420-424.
- Maata, J., Piispanen, M., Kuisma, R., kymalainen, H.R., Rauva A.U., Hurme K.R., Areva, S., Sjoberg A.M., and Hupa, L. (2007). “**Effect of coating on cleanability of glazed surface**” Journal of the European Ceramic Society 27 pp. 4555-4560.

- Minglin Ma and Randal M. Hill, (2006). **“Superhydrophobic surfaces”**, Current Opinion in Colloid & Interface Science 11 pp. 193-202.
- Myers, D (1946). **“Surface, Interfaces, and Colloids Principles and Applications”**, John Wiley & Sons. Second edition.
- Nitmitttrakookchai, O.U., and Sitthisuntorn, S., (2008). **“Deposition of organic-based superhydrophobic films for anti-adhesion and self-cleaning applications”**, Journal of the European Ceramic Society 28 pp. 947-952.
- Venkateswara, R.A., and Ravindra R.K. (2004). **“Organic Surface Modification of TEOS Based Silica Aerogels Synthesized by Co-Precursor and Derivatization Methods”** Journal of Sol-Gel Science and Technology 30,141-147.
- Wu, L.Y.L., Tan, G.H., Qian, M. and Li, T.H. (2005). **“Formulation of transparent hydrophobic sol-gel hard coating”** SIM technical reports Vol.6 Number2.
- Wu, Y.L., Chen, Z., and Zeng, X.T. (2008). **“Nanoscale morphology for high hydrophobicity of hard sol-gel thin film”** Applied Surface Science 254 pp. 6952-6958.
- Xiasheng, T, Qi, C., Li, S., Yiqun, W. and Huiping, L., **“Formation of alkali resistant PDMS-TiO₂-SiO₂ hybrid coatings”**, Material Letters 61 pp. 4432-4434.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Prertkaew, T., and Srilomsak, S. (2013). **Effects of sol-gel processing factors on transmittance and surface free energy of TEOS-SiO₂-PDMS films**, Suranaree Journal of Science and Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
(Acceptance)





บันทึกข้อความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน่วยงาน..... Suranaree Journal of Science and Technology.Tel./Fax.: 4756 / 4750.....
ที่ No. 5621/ C.52 วันที่ 23 January 2013.....
เรื่อง Letter of acceptance.....

Dear Associate Professor Dr. Sutham Srilomsak,

I am pleased to inform you that your article entitled "Effects of sol-gel processing factors on transmittance and surface free energy of TEOS-SiO₂-PDMS films" has been accepted to be published in Suranaree Journal of Science and Technology. The galley proof will be later sent to you for the final corrections.

Thank you for publishing with Suranaree Journal of Science and Technology.

Sincerely,

Suksun Horpibulsuk, Ph.D.

Professor

Editor in Chief

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวธิดารัตน์ เจริญแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดสกลนคร เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านอากาศ จังหวัดสกลนคร ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนอากาศอำนวยศึกษาจังหวัดสกลนคร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2551

