

ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์ม
บนผิวเซรามิก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**EFFECTS OF MATERIALS AND PROCESSING
PARAMETERS ON NON-WETTING PROPERTY
OF FILM ON CERAMIC SURFACE**

The logo of Suranaree University of Technology is a large, faint watermark in the background. It features a stylized figure of a person standing on a base, with a large 'S' shape above it. The entire logo is surrounded by a circular border with a scalloped edge. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in Thai script along the bottom of the circular border.

Prapatsorn Prathungthai

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Doctor of Philosophy in Ceramic Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาตรี

คณะกรรมการ

มการสอบวิทยานิพนธ์

(

รศ.ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง)

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุขเกษม วัชรมัชสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ.ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(รศ.ดร.จรัสศรี ลอประยูร)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ปราณีชุมสำโรง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุคนธ์พงศ์ประไพ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประกาศสร ประเทองไทย : ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำ
ของฟิล์มบนผิวเซรามิก (EFFECTS OF MATERIALS AND PROCESSING
PARAMETERS ON NON-WETTING PROPERTY OF FILM ON CERAMIC
SURFACE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม วัชรมัศกุล, 106 หน้า

พื้นผิวเซรามิกที่ปราศจากการเคลือบด้วยฟิล์มที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ มักเจอปัญหาการสะสม
ตัวของสิ่งสกปรกหรือหยดน้ำที่ขีดเกาะซึ่งทำให้เกิดคราบได้ง่าย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรใน
กระบวนการผลิตฟิล์มที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำสำหรับผิวเซรามิก โดยสังเคราะห์ฟิล์มด้วยกระบวนการ
โซล-เจล สารตั้งต้นที่ใช้คือ Tetraethylorthosilicate (TEOS), Polydimethylsiloxane (PDMS),
Methyltriethoxysilane (MTES) และ ซิลิกา (SiO_2) ที่ขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร (1:1) ใน
ปริมาณต่างกัน เคลือบผิวเซรามิกด้วยเทคนิคการจุ่มและการสเปรย์ ให้ความร้อนฟิล์มด้วยการเป่า
ลมร้อน และอบที่ 300°C และ 400°C แล้วจึงตรวจวัดค่ามุมสัมผัสด้วยเครื่อง Water Contact Angle
วิเคราะห์สัณฐานวิทยาผิวเคลือบด้วย scanning electron microscope (SEM) และใช้โปรแกรม
Design -Expert[®] ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าเทคนิค SEM แสดงผิวเคลือบที่มีลักษณะคล้าย
กับผิวหน้าใบบัว และการวิเคราะห์ statistical data analysis ให้ค่ามุมสัมผัสสูงที่สุดเท่ากับ 150.3
องศา ที่อัตราส่วนของ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เท่ากับ 7.0:3.4:2.7:3.0 wt.% ซึ่งให้ผิวเคลือบ
super hydrophobic film (ค่ามุมสัมผัสมากกว่า 150 องศา) เมื่อทดสอบความสามารถในการทำ
ความสะอาดตัวเองของผิวเซรามิก พบว่าอยู่ในระดับดีเยี่ยมโดยจำแนกได้ระดับ 5 ตามมาตรฐาน
อุตสาหกรรมของกระเบื้องเซรามิก (มอก. 2398)

สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

PRAPATSORN PRATHUNGTHAI : EFFECTS OF MATERIALS AND
PROCESSING PARAMETERS ON NON-WETTING PROPERTY OF FILM
ON CERAMIC SURFACE . THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUKASEM
WATCHARAMAISAKUL, Ph.D., 106 PP.

CERAMIC/HYDROPHOBIC/SELF-CLEANING/SOL-GEL

Generally, ceramic uncoated surface with the non-wetting film, are often have the problem of accumulation of dirt or water droplets adhesion, causing stains on the surface. The self-cleaning properties are necessary to solving those problem. This research was studied on the effects of variations of the manufacturing process on non-wetting property of film on ceramic surface by a synthetic film by sol – gel method. Tetraethylorthosilicate (TEOS) and Polydimethylsiloxane (PDMS), Methyltriethoxysilane (MTES) and silica (SiO_2) with a particle size of 12 and 20 nm (1:1) were used as the precursor. Then the ceramic was coated by dipping and spraying and blowing hot air and baking at 300 °C and 400 °C. The contact angle was measured with Water Contact Angle, analysis of coated surface with scanning electron microscope (SEM) and analyzing statistical results by Design -Expert[®] program. It was found that SEM technique showed the coated surface that resembled a lotus leaf (Nano-roughness) and statistical data analysis for the contact angle was the highest ratio of 150.3 degrees. TEOS: SiO_2 : PDMS: MTES was 7.0:3.4:2.7:3.0 wt.% of a coated supper hydrophobic film with contact angle greater than 150 degrees to test the

ability of self-cleaning ceramic surface. And the result could be meet the level 5 of industry-standard ceramic tiles (TSI. 2398).



School of Ceramic Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กำลังใจจากครอบครัว และความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ซึ่งส่งผลให้ผู้วิจัยได้ทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจและโอกาสทางการศึกษา แก่ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ ผู้ให้คำแนะนำเทคนิควิธีการทำงานและคำแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม ศรีหล่มสัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม วัชรมัชสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ลดา พันธุ์สุขุมธนา อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมที่คอยให้ความรู้ทางด้านงานวิศวกรรมเซรามิก ทั้งวิธีการผลิต กระบวนการดำเนินงาน และเทคนิคต่างๆ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุทิน กุหาเรืองรอง ที่คอยแนะนำแนวทางการศึกษาและคำแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกทุกท่าน ที่ให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเซรามิกกับผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือและประสานงานทางด้านเอกสารตลอดระยะเวลาศึกษา

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนให้โอกาสและทุนทางการศึกษาแก่ผู้วิจัยในการศึกษาและทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเครือซิเมนต์ไทยที่สนับสนุนให้กระเบื้องเซรามิกแก่ผู้วิจัยในการศึกษาและทำวิจัยในครั้งนี้

และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ เป็นที่ปรึกษา และคอยให้คำแนะนำ ในปัญหาต่างๆตลอดมา ไม่ว่าจะอุปสรรคที่ขาดเหลือ และน้ำใจที่มีให้กันอยู่ตลอดเวลาจน วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จอย่างสมบูรณ์

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งผู้ช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีได้เอ่ยนาม จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจน สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่และความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการและทฤษฎีของสมบัติไม่ชอบน้ำ	5
2.2 เทคนิคและขั้นตอนการสร้างสมบัติไม่ชอบน้ำ	10
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเซรามิก	11
2.4 องค์ประกอบทางเคมีและหลักการเคลือบบนผิวหน้าเซรามิก	14
2.5 เทคนิคการเตรียมสารเคลือบผิวหน้าเซรามิก	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี	27
3.2 วิธีการทดลอง	29
3.2.1 การออกแบบการทดลอง	29
3.2.2 การเตรียมน้ำยาเคลือบ	34
3.2.3 การเตรียมพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกสำหรับการเคลือบฟิล์ม	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4 การเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยน้ำยาเคลือบ	37
3.2.5 การอบแห้งฟิล์มเคลือบ	38
3.3 การตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ	40
3.3.1 การตรวจสอบน้ำยาเคลือบ	40
3.3.2 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มเคลือบ	42
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น(Preliminary Analysis).....	48
4.1.1 ผลของซิลิกานาโน และMTES ต่อความหนืดของน้ำยาเคลือบ	48
4.1.2 ผลของปริมาณซิลิกานาโนต่อร้อยละของปริมาณแสงส่องผ่าน (Transmittance, %T) ของน้ำยาเคลือบ	52
4.1.3 ผลของปริมาณซิลิกานาโนต่อค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบ	54
4.1.4 ผลของ MTES ต่อค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบ	59
4.1.5 ผลของเทคนิคการเคลือบและเทคนิคการอบแห้งที่มีต่อค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบ	61
4.1.6 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น(Preliminary Analysis).....	63
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert [®] Software	65
4.2.1 การวิเคราะห์ค่ามอดุลัสเชิงสถิติด้วย โปรแกรม Design-Expert [®] Software ...	65
4.2.2 การประเมินความน่าเชื่อถือสมมุติฐานการวิเคราะห์ด้วย ANOVA	68
4.2.3 การวิเคราะห์ contour plot จากสมการทำนายค่ามอดุลัส ที่ (4-1) ถึง (4-6)	70
4.3 ผลการพิสูจน์ฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO ₂ :PDMS:MTES.....	80
4.3.1 ผลการพิสูจน์ฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบที่ได้จากเทคนิคเคลือบแบบสเปรย์80	
4.3.2 ผลการพิสูจน์ฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบที่ได้จากเทคนิคเคลือบแบบจุ่ม.....	82
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง	84
5 สรุปผลการศึกษา	
5.1 สรุปผลการวิจัย	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96

รายการอ้างอิง97

ภาคผนวก

 ภาคผนวก ก. รายละเอียดข้อมูลค่ามาตรฐานสัมพัทธ์ทุก Standard No..... 101

ประวัติผู้เขียน 113



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ	27
3-2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ	28
3-3 การออกแบบการทดลองตัวแปรของงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ (1) ปริมาณของ nano-silica (2) ปริมาณของ MTES (3) เทคนิคการเคลือบ (4) เทคนิคการอบแห้ง	30
4-1 ปริมาณของซิลิกานาโน, MTES (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) และเทคนิคการเคลือบสำหรับ Standard No.ต่าง ๆ ของน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO ₂ :PDMS:MTES	49
4-2 ANOVA for response surface quadratic model analysis of variance	66
4-3 การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปราะเหนียวด้วยเฟอริคออกไซด์	87
4-4 การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปราะเหนียวด้วยสารละลายไอโอดีน	91

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	พลังงานพื้นผิวของของแข็งที่ชอบและไม่ชอบน้ำ พื้นผิวแบบชอบน้ำ(ก) พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ(ข).....	2
2.1	แสดงพื้นผิวลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของใบบัว	6
2-2	ภาพด้านซ้ายคือพื้นผิวใบบัวที่มีลักษณะขรุขระส่วนภาพด้านขวาคือหยดของน้ำที่เกาะบนพื้นผิวใบบัว.....	6
2-3	โครงสร้างของน้ำ (H ₂ O) เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ทำให้เกิดโมเลกุลที่มีขั้ว	7
2-4	สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำประกอบด้วยคาร์บอน 8 อะตอม	8
2-5	แนวทิศทางของแรงดึงดูดระหว่างของแข็งกับของเหลวแสดงในรูปเวกเตอร์	8
2-6	พลังงานพื้นผิวของของแข็งที่ชอบและไม่ชอบน้ำ พื้นผิวแบบชอบน้ำ(ก) พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ(ข).....	10
2-7	การเปลี่ยนแปลงเฟสของรูปผลึกซิลิกา	15
2-8	สารเคลือบในสภาวะการกดอัดด้วยกระบวนการ cristobalite squeeze	17
2-9	การเปลี่ยนสถานะจาก โซิล กลายเป็น เจล	8
2-10	กระบวนการ โซิล-เจล.....	21
3.1	แสดงวิธีการกลั่นแบบไหลย้อน	35
3.2	แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำความสะอาดตัวอย่างเซรามิกแสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำความสะอาดตัวอย่างเซรามิก.....	36
3.3	ตัวอย่างเซรามิก	36
3.4	แสดงแผนภูมิขั้นตอนการเตรียมน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO ₂ :PDMS:MTES ด้วยกระบวนการ โซิลเจล การเคลือบฟิล์มบนตัวอย่างเซรามิก และการอบแห้งฟิล์ม	39
3.5	เครื่องมือทดสอบความหนืด Kinematic viscosity Cannon รุ่น fenske N92 size 75	41
3.6	เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer JASSC รุ่น 7800	41
3.7	เครื่อง water contact angle DataPhysic รุ่น OCA 20.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	เครื่อง SEM Zeiss รุ่น AURIGA43
3.9	การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปราะ47
4.1	กราฟระหว่างความหนืดของน้ำยาเคลือบที่ Standard No.ต่างๆ 1 ถึง 24 (0 = blank คือ TEOS + ethanol + HCl).....51
4.2	UV-Vis Spectrum ของน้ำยาเคลือบ Standard No. 1, 2, 3 และ 4.....52
4.3	แสดงแผนภาพการเกิดโซลเจลและเจลเลชัน(Gelation)ระหว่างซิลิกานาโน และMTES ...53
4.4	กราฟระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการเคลือบฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่ Standard No. ต่างๆ 1 ถึง 2456
4.5	(ก) กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบต่างๆที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณ 4.0 wt.% (ข) กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบต่างๆที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณ 2.0 wt.%.....57
4.6	ภาพถ่ายจากเครื่อง water contact angle meter แสดงภาพถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกก่อนเคลือบ (ก) และหลังเคลือบด้วยฟิล์มของ Standard No.1 (ข), 2 (ค), 3 (ง) และ 4 (จ) โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซิลิกานาโนต่อปริมาณของ MTESที่ 2.0 wt.% ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....58
4.7	ภาพถ่ายจากเครื่อง water contact angle meter แสดงหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกก่อนเคลือบฟิล์ม (ก) และหลังเคลือบฟิล์มโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ MTES 2.0 wt.% (ข), 4.0 wt.% (ค), 8.0 wt.% (ง) ต่อปริมาณของ ซิลิกานาโนที่ 4.0 wt.% ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส60
4.8	กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของฟิล์มเคลือบจากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และปริมาณ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่มและเทคนิคการสเปรย์เคลือบ และใช้เทคนิคการอบแห้งโดยการเป่าลมร้อน การอบแห้งที่ 300 องศาเซลเซียส และการอบแห้ง 400 องศาเซลเซียส.....62

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	แสดงค่ามูมสัมพันธ์ของปริมาณของซิลิกานาโนต่อปริมาณของ MTES ในเทคนิคการจุ่มเคลือบฟิล์มเคลือบและเทคนิคการสเปรย์เคลือบฟิล์มเคลือบในการอบแห้งที่การเป่าลมร้อน การอบแห้งที่ 300 องศาเซลเซียส.....	64
4.10	กราฟระหว่าง % normal probability และ internally studentized residuals	69
4.11	กราฟระหว่าง internally studentized residuals และ predicted.....	69
4.12	กราฟ contour แสดงค่ามูมสัมพันธ์ ทำนายจากสมการที่ (4-1) ที่เคลือบด้วยการเคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง.....	70
4.13	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามูมสัมพันธ์ ทำนายจากสมการที่ (4-1) ที่เคลือบด้วยการเคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง.....	71
4.14	กราฟ contour แสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-2) ที่เคลือบแบบสเปรย์อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	72
4.15	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-2) ที่เคลือบแบบสเปรย์อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	72
4.16	กราฟ contour แสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-3) ที่เคลือบแบบสเปรย์อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	73
4.17	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-3) ที่เคลือบแบบสเปรย์อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	74
4.18	กราฟ contour แสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-4) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง	75
4.19	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-4) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง	75
4.20	กราฟ contour แสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-5) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	76
4.21	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามูมสัมพันธ์ทำนายจากสมการที่ (4-5) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	77

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมพัทธ์ทำนายจากสมการที่ (4-6) ที่เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	78
4.23	กราฟ contour 3 มิติแสดงค่า มุมสัมพัทธ์ ทำนายจากสมการที่ (4-6) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	78
4.24	SEM micrograph ของผิวเคลือบที่ให้ค่ามุมสัมพัทธ์ (145.50 องศา) สูงสุดที่สูตรผสม 18 เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	69
4.21	SEM micrograph ของผิวเคลือบที่ให้ค่ามุมสัมพัทธ์ (142.90 องศา) สูงสุดที่สูตรผสม 13 เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	70
4.22	SEM micrograph ของผิวเคลือบที่ให้ค่ามุมสัมพัทธ์ (149.20 องศา) สูงสุดที่สูตรผสม 5 เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	71
4.23	SEM micrograph ของผิวเคลือบที่ให้ค่า มุมสัมพัทธ์ (148.00 องศา) สูงสุดที่สูตรผสม 1 เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	71
4.24	(ก)ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (ข)ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	81
4.25	(ก)ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (ข)ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบ ที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	83
4.26	ภาพถ่ายแสดงการกระจายของสารละลายที่ใช้ทดสอบความสามารถทำความสะอาดตัวเอง บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (ก) สารละลายเฟอริกออกไซด์ (ข)สารละลายไอโอดีน	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	ตัวอย่างผิวหน้าเซรามิกหลังการชะล้างของบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เคลือบแบบสเปรย์(ก) ขณะชะล้าง (ข) หลังชะล้าง	86
4.28	ตัวอย่างผิวหน้าเซรามิกหลังการชะล้างของบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 0.5 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่มและอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เคลือบแบบจุ่ม(ก) ขณะชะล้าง (ข) หลังชะล้าง	87



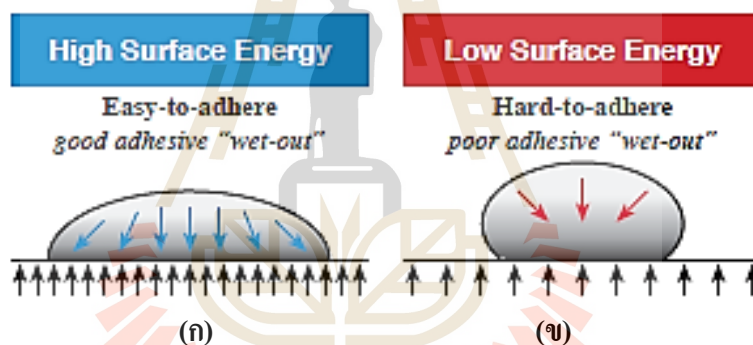
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยมีการเคลือบผิวเพียงชั้นเดียวเพื่อให้มีสมบัติที่สามารถทำความสะอาดได้ง่ายและมีสีที่สวยงาม แต่ข้อเสียของการเคลือบผิวเพียงชั้นเดียวของผลิตภัณฑ์คือพื้นผิวเคลือบมีสมบัติชอบน้ำหรือเปียกน้ำได้ง่าย และถ้าไม่มีชั้นตอนทำให้แห้งหลังการทำความสะอาดหรือหลังการใช้งานจะเกิดการบดบังน้ำเกาะบนพื้นผิวเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำลงบนพื้นผิวเซรามิกจะทำให้พื้นผิวเซรามิกและสามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง (self-cleaning) ลดการเกิดการบดบังน้ำเกาะติดบนพื้นผิวได้ (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2004) การเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำแบ่งเป็นสองรูปแบบคือ ปรับพื้นผิวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (super hydrophobic) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและหยดน้ำมากกว่า 150° และปรับพื้นผิวให้มีความขรุขระในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร (microscopically rough surfaces) โดยจากรูปแบบดังกล่าวนี้ส่งผลให้อุณหภูมิของสิ่งสกปรกไม่สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวได้ และเมื่ออยู่ในสถานที่ที่มีน้ำไม่ว่าจากธรรมชาติ (น้ำฝน) หรือจากการล้างทำความสะอาด สิ่งสกปรกจะออกจากพื้นผิวได้อย่างง่ายดายโดยการชะด้วยน้ำนั่นเอง และพบว่าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากสมบัติที่ไม่ชอบน้ำบวกกับพื้นที่ผิวที่เล็กระดับนาโนเมตรเพราะลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ (roughness) คล้ายหนาม มีความสม่ำเสมอของอนุภาคขนาดเล็กกระจายบนพื้นผิวและมีช่องว่างระดับ 5-10 ไมโครเมตร โดยสมบัติดังกล่าวทำให้พื้นผิวสามารถยึดเกาะได้ดีซึ่งสามารถวัดออกมาในรูปของมุมสัมผัส (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2004) หลักการคือเมื่อหยดน้ำลงบนพื้นผิวจะไม่เกิดการแพร่ของหยดน้ำและจะยังคงรูปและทำมุม θ กับพื้นผิวโดยเรียกว่า มุมสัมผัส (contact angle) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ดังนั้นมุมสัมผัสในจุดสมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของของแข็งจากการหยดของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การโค้งงอของผิวของเหลวและมุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 0° - 180° เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิวของของแข็งและอยู่ในสภาพเป็นหยด (ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก) หรือแผ่กระจาย (ทำให้พื้นผิวเปียก) พิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 0° - 90° ของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้นผิว มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 90° - 180° ของเหลวจะคงรูปเป็นหยดและไม่เปียกพื้นผิว (Fowkes & Zisman, 1964) ซึ่งสอดคล้องกับเรื่องของ

พลังงานพื้นผิวคือถ้าพลังงานพื้นผิวของของแข็งส่งผลทำให้ของเหลวแผ่เป็นฟิล์มบางบนพื้นผิวของแข็งจึงทำให้พื้นผิวของของแข็งนั้นมีสมบัติการเปียก ในทางตรงข้ามถ้าพลังงานพื้นผิวของของแข็งมีค่าน้อยจะส่งผลให้พื้นผิวของของแข็งนั้นมีสมบัติการไม่เปียก (Katie Sullivan, 2008) ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของเหลวที่สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวของแข็ง โดยใช้หยดน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วบนพื้นผิวของแข็ง ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวของแข็งจะมี 2 แบบคือพื้นผิวแบบชอบน้ำ (hydrophilic surface) ซึ่งพื้นผิวจะยอมให้โมเลกุลของน้ำมาเกาะกับพื้นผิวได้ลักษณะหยดน้ำที่กระทำต่อพื้นผิวมีมุมสัมผัสอยู่ในช่วง $(0^\circ < \theta < 90^\circ)$ และพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) ซึ่งพื้นผิวจะไม่ยอมให้โมเลกุลของน้ำมาเกาะกับพื้นผิว ลักษณะหยดน้ำที่กระทำต่อพื้นผิวมีมุมสัมผัสอยู่ในช่วง $(90^\circ < \theta < 180^\circ)$ (Chow, 1998) (Young, 1805) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งของเหลวมีพฤติกรรมการกลิ้งหรือไหลบนพื้นผิวได้ดีและถ้าให้ค่ามุมสัมผัสสูงกว่าหรือตั้งแต่ 150° ขึ้นไปทำให้พื้นผิวของของแข็งมีสมบัติแบบ superhydrophobic



รูปที่ 1.1 พลังงานพื้นผิวของของแข็งที่ชอบและไม่ชอบน้ำ พื้นผิวแบบชอบน้ำ(ก) พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ(ข) (Katie Sullivan, 2008)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาสมบัติไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวเซรามิกโดยการเคลือบผิวหน้าเซรามิกด้วยอนุภาคซิลิกาในระดับนาโนเมตรที่พื้นผิวอนุภาคมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อให้ได้ความขรุขระในระดับนาโนจากอนุภาคซิลิกานาโนที่ ขนาด 12 nm และ 20 nm จากการนำไปผสมกับ tetraethylorthosilicate (TEOS) เพื่อช่วยในการยึดติดระหว่างพื้นผิวฟิล์มเคลือบและพื้นผิวหน้าเซรามิก และต้องการ อิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันไม่ชอบน้ำที่เติมไปได้ครอบคลุมทั่วบริเวณของฟิล์มเคลือบคล้ายไขหรือขี้ผึ้งคลุมอยู่บนตุ่มขรุขระของอนุภาคซิลิกานาโนจาก methyltriethoxysilane (MTES) และ polydimethylsiloxane (PDMS) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติไม่ชอบน้ำเช่น ผลของปริมาณซิลิกาในระดับนาโนเมตร ผลของปริมาณ MTES ผลของเทคนิคการเคลือบฟิล์มเคลือบบน

พื้นผิวเซรามิก และผลของเทคนิคการอบแห้งเป็นต้น จากนั้นวิเคราะห์สมบัติไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคโซล-เจลที่ใช้เตรียมฟิล์มเคลือบระหว่างซิลิกานาโน , TEOS, PDMS และ MTES

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการเคลือบผิวเซรามิกให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ด้วยโปรแกรม design-expert[®]

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมฟิล์มเคลือบระหว่างซิลิกานาโน , TEOS, PDMS และ MTES ด้วยเทคนิคโซล-เจล วัดความหนืดและค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน

1.3.2 ศึกษาปริมาณซิลิกานาโน และ MTES เทคนิคการเคลือบ และอุณหภูมิการอบแห้ง

1.3.3 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มเคลือบด้วยเทคนิค water contact angle, และ Scanning Eletron Microscopy (SEM)

1.3.4 วิเคราะห์ผลของตัวแปรด้วยเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการปรับปรุงฟิล์มเคลือบให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่ดียิ่งขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจหลักการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยซิลิกานาโน , TEOS, PDMS และ MTES จากเทคนิคโซล-เจลได้ดี

1.4.2 สามารถอธิบายอันตรกิริยา (interaction) ที่เกิดขึ้นของตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำรวมถึงการวิเคราะห์ผลทางสถิติจากโปรแกรม Design-Expert[®] Software

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

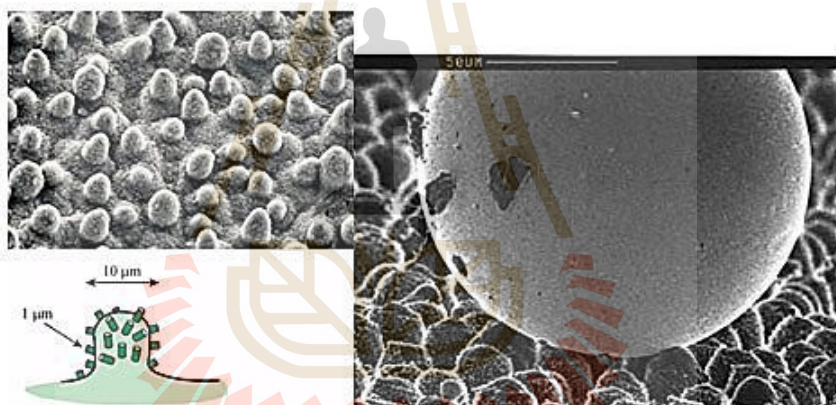
2.1 หลักการและทฤษฎีของสมบัติไม่ชอบน้ำ

การกล่าวถึงสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ต้องอาศัยคำอธิบายของศาสตร์ด้านนาโนเทคโนโลยีซึ่งเป็นศาสตร์ที่อธิบายถึงโครงสร้างขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยโครงสร้างในระดับนาโนเมตรมนุษย์สามารถเห็นได้ตามธรรมชาติมากมายอาทิเช่น ผิวใบบัวซึ่งเป็นที่รู้จักกันมาแต่โบราณว่าใบบัวเป็นใบไม้สะอาด และไม่เปียกน้ำ ทุกครั้งที่หยดน้ำตกลงบนใบบัว หยดน้ำจะไม่ไหลกระจายออกแต่ยังคงลักษณะเป็นหยดและกลิ้งไหลลงไประวมกันที่กึ่งกลางของใบบัว (รูปที่

2.1) จนกระทั่งมีคำกล่าวเปรียบเปรยว่า น้ำกลิ้งบนใบบัว ลักษณะพิเศษของใบบัวนี้เมื่อนักวิทยาศาสตร์ศึกษาโดยส่องด้วยกล้อง SEM พบว่าผิวหน้าของใบบัวประกอบด้วยโครงสร้างขนาดเล็ก คล้ายหนามจำนวนมากและมีการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยหนามแต่ละอันมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีสารเคลือบหรือขี้ผึ้งคลุมอยู่บนตุ่มขรุขระทั้งหมด ทำให้น้ำซึ่งมีความตึงผิวกลิ้งไปมาบนใบบัวได้ เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโมเลกุลของน้ำกับใบบัวน้อยมาก (หยดน้ำมีขนาดใหญ่กว่า) รวมทั้งทำให้ฝุ่นและสิ่งสกปรกอื่น ๆ หลุดออกจากผิวใบบัวติดไปกับน้ำได้ง่าย และลักษณะพื้นผิวเช่นนี้นักวิทยาศาสตร์เรียกว่า พื้นผิวทำความสะอาดได้ด้วยตนเอง (self-cleaning surface) (Lafuma & Quéré, 2003). ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว หรือโลตัสเอฟเฟกต์ (lotus effect) ด้วยคำกล่าวของ Barthlott & Neinhuis(1997)



รูปที่ 2.1 แสดงพื้นผิวไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของใบบัว
(Lotus Leaf, 2015)

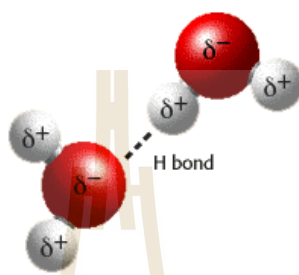


รูปที่ 2.2 ภาพด้านซ้ายคือพื้นผิวใบบัวที่มีลักษณะขรุขระ ส่วนภาพด้านขวามือคือ
หยดของน้ำที่เกาะบนพื้นผิวใบบัว (Belle Dumé, 2005)

ศาสตร์ที่สามารถอธิบายสมบัติไม่ชอบน้ำได้อย่างชัดเจนคือเคมีและฟิสิกส์ โดยหลักการแรกเกี่ยวกับแขนงวิชาเคมีซึ่งอธิบายคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ด้วยสมบัติของความมีขั้วและไม่มีขั้ว โดยรายละเอียดแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

ก. สารประกอบมีขั้ว (polarity) คือสารประกอบที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนระหว่างพันธะเคมีไม่เท่ากัน โดยอะตอมใดอะตอมหนึ่งระหว่างพันธะเคมีจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากกว่า ซึ่งจะแสดงสภาพเป็นลบในทางเคมีเรียกสภาพดังกล่าวว่า เดลตาลบ ใช้สัญลักษณ์คือ δ^- ส่วนอะตอมที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำกว่าจะแสดงสภาพเป็นบวกและ

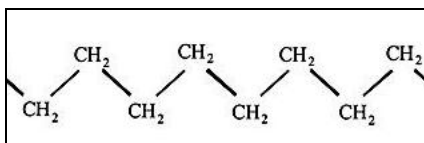
เรียกว่า เดลตาบวก ใช้สัญลักษณ์คือ δ^+ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพันธะเคมีมีขั้วสร้างเป็นสารโมเลกุลใหญ่ขึ้นทิศทางของขั้วอาจหักกลับกันหรือเสริมกัน และถ้าเป็นโมเลกุลที่มีขั้วพันธะเคมีหักกลับกันไม่หมดหรือมีตำแหน่งเดลตาลบ ยกตัวอย่างโมเลกุลมีขั้วคือน้ำ (H_2O) ประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอมและไฮโดรเจน 2 อะตอม (รูปที่ 2.3) น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่เท่ากันในอะตอมของออกซิเจนจะแสดงสภาพเป็นเดลตาลบ และ ไฮโดรเจนเป็น เดลตาบวก



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำ (H_2O) เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ทำให้เกิดโมเลกุลที่มีขั้ว (Chemistry Tutorial, 2003)

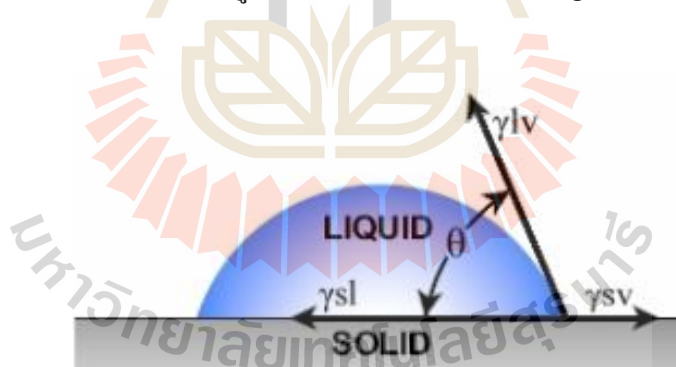
ตามหลักการแล้วถ้าเป็นสารมีขั้วเหมือนกันจะสามารถละลายกันได้ตามกฎ like dissolves like คือตัวถูกละลายที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว[5] ดังนั้นสารใดก็ตามที่มีขั้วจะละลายในน้ำได้ซึ่งจะแสดงสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) นั่นเอง ตัวอย่างสารที่มีสูตร โครงสร้างตามกลุ่ม $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$ ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีขั้วและละลายกับโมเลกุลของตัวทำละลายมีขั้ว เช่น น้ำ กรด และเบส เป็นต้น

ข. สารประกอบไม่มีขั้ว (non-polarity) คือสารประกอบที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนระหว่างพันธะเคมีเท่ากันและเมื่อสร้างเป็นสารโมเลกุลใหญ่ขึ้นไม่สามารถแยกเดลตาบวกและลบออกจากกันได้ ซึ่งมักเป็นที่มิอะตอมเหมือนกันเช่น แก๊สออกซิเจน (O_2) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ) ต่ำตัวอย่างเช่น แอลเคน แอลคีน แอลไคน์ (ที่ไม่ได้เป็นสารประกอบอะโรมาติก) และสารจำพวกน้ำมัน (ตัวอย่างโมเลกุลดังรูปที่ 2.4) จะมีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกันคือเป็นสารประกอบที่มีความมีขั้ว (low-polarity) ก่อนข้างต่ำจึงไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว (non-polar solvents) หรือที่มีขั้วน้อยเช่น เฮกเซนหรืออีเทอร์ ดังนั้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือสารจำพวกน้ำมันจึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) (Bhushan, 2012)



รูปที่ 2.4 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำประกอบด้วยคาร์บอน 8 อะตอม

หลักการต่อมาเกี่ยวกับแขนงวิชาฟิสิกส์ซึ่งอธิบายสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำด้วยหลักการของแรงตึงผิว (surface tension) คือสมบัติของพื้นผิวของเหลวที่ทำให้บางส่วนของพื้นผิวของเหลวถูกดึงดูด (ยึดเข้าไว้ด้วยกัน) คู่พื้นผิวอื่น เช่น พื้นผิวของเหลวส่วนอื่น (การรวมตัวของหยดน้ำหรือหยดปรอทที่เกาะกันเป็นลูกกลม) แรงตึงผิวถูกทำให้เกิดขึ้นด้วยการดึงดูด (การดึงดูดของโมเลกุลกับโมเลกุลที่เหมือนกัน) เมื่อโมเลกุลบนพื้นผิวของของเหลวไม่ได้ล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลที่เหมือนกันในทุกๆด้านแล้ว โมเลกุลจะมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลใกล้เคียงบนพื้นผิวมากขึ้น แรงตึงผิวมีมิติของแรงต่อความยาวหนึ่งหน่วย หรือพลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ซึ่งทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่พลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยอยู่ในพจน์พลังงานพื้นผิว และเป็นพจน์ทั่วไปที่นิยมใช้กับของแข็งมากกว่าใช้ในของเหลว โดยสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวในรูปของเวกเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.5 (Chow, 1998) (Young, 1805)



รูปที่ 2.5 แนวทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวแสดงในรูปเวกเตอร์

แรงของเวกเตอร์ทั้ง 3 ทิศทาง จะได้สมการของยัง (young's equation)

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos\theta \quad (2.1)$$

เขียนรูปสมการ (2.1) ใหม่

$$\cos\theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LV} \quad (2.2)$$

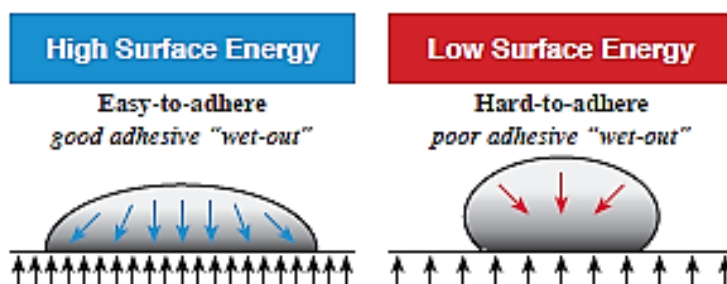
- เมื่อ γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว ณ สภาวะสมดุล
 γ_{SV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับไอน้ำ ณ สภาวะสมดุล
 γ_{LV} คือ แรงตึงผิวระหว่างไอน้ำกับของเหลว ณ สภาวะสมดุล
 θ คือ มุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของของเหลวบนของแข็ง

ดังนั้นในการวัดแรงตึงผิวโดยวิธีนี้สามารถปรับปรุงให้มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น โดยการคำนวณค่ามุมสัมผัสที่แท้จริงจากสมการแรงยกตัวในบทที่ 1 (สมการที่ 2.3)

$$\gamma = rhg\rho / 2\cos\theta \quad (2.3)$$

- เมื่อ γ คือ แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับอากาศ (J/m^2 หรือ N/m)
 θ คือ มุมสัมผัส
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
 r คือ รัศมีของหลอด (m)
 h คือ ความสูงของของเหลวในหลอด (m)
 g คือ ความเร่งอันเนื่องมาจากความโน้มถ่วง (m/s^2)

ในวิทยาศาสตร์แรงตึงผิวอยู่ในรูปความเค้นพื้นผิว (surface stress) หรือ พลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) (Defay et al. 1966) (Tolman. 1949) จากรูปที่ 2.6 อธิบายได้ว่า รูปด้านซ้ายมือมีพลังงานพื้นผิวสูงหมายความว่าพื้นผิวของแข็งติดคู่กับโมเลกุลของของเหลวได้ดีจึงแสดงสมบัติชอบน้ำ กรณีนี้เป็นกรณีที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวมีค่าต่ำกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของของแข็ง ส่วนรูปขวามือมีพลังงานพื้นผิวต่ำหมายความว่าพื้นผิวของแข็งติดคู่กับโมเลกุลของของเหลวได้ไม่ดีจึงแสดงสมบัติไม่ชอบน้ำและกรณีนี้เป็นกรณีที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของของแข็ง



รูปที่ 2.6 พลังงานพื้นผิวของของแข็งที่ชอบและไม่ชอบน้ำ พื้นผิวแบบชอบน้ำ(ก) พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ(ข) (Katie Sullivan, 2008)

2.2 เทคนิคและขั้นตอนการสร้างสมบัติไม่ชอบน้ำ

จากงานวิจัยเรื่องผิวใบบัวของ Barthlott & Neinhuis (1997) ส่งผลให้ช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยทั่วโลกพยายามคิดค้นหาทางสร้างพื้นผิวเลียนแบบผิวใบบัว โดยอาศัยความรู้ทางเคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ ในการสร้างผิวสังเคราะห์บนวัสดุหรือแผ่นรองต่างๆ เช่น กระดาษ แผ่นซิลิคอน พลาสติก และผิวเซรามิก เป็นต้น ปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้สร้างผิววัสดุให้มีสมบัติไม่เปียกน้ำเพื่อเลียนแบบผิวใบบัวมี 2 วิธี (สิทธิสุนทร และคณะ 2010) ดังต่อไปนี้

2.2.1. นำวัสดุที่มีพลังงานเชิงพื้นผิวอิสระต่ำมาปรับสภาพพื้นผิวให้มีความขรุขระที่เหมาะสมขึ้น เช่น การกัดพื้นผิวด้วยกรด (etching) การยิงด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser surface treatment) การพลาสมา (plasma surface treatment) กระบวนการลิโธกราฟี (lithography surface roughness) กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel process) การสร้างชั้นฟิล์ม (layer-by-layer assembly) การสร้างเส้นใยขนาดเล็กด้วยไฟฟ้า (electrospinning) และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical deposition) เป็นต้น

2.2.2 นำวัสดุทั่วไปมาปรับสภาพผิวให้ขรุขระแล้วเคลือบทับด้วยสารหรือโมเลกุลที่มีพลังงานเชิงพื้นผิวอิสระต่ำ ซึ่งวัสดุที่มีพลังงานเชิงผิวต่ำที่นิยมใช้มีหลายกลุ่ม เช่น วัสดุในกลุ่มเทฟลอนหรือโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE) ฟลูออรีนเอทิลีน โพรพิลีน (fluorinated ethylene propylene, FEP) ซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxane, PDMS) เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate, TEOS) และ โพลีเอทิลีน (polyethylene, PE) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างหรือปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวไม่เหมาะสำหรับการสร้างพื้นผิวในระบบขนาดใหญ่หรือการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม เพราะกระบวนการสร้างหรือการเคลือบมีความซับซ้อนและต้องทำหลายขั้นตอนนอกจากนี้ชั้นฟิล์มหรือพื้นผิวที่เกิดขึ้นยังไม่ทนทานต่อการขีดขูดอีกด้วย

2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเซรามิก

2.3.1 ประวัติความเป็นมาของเซรามิก

เซรามิกมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก *keramos* มีความหมายว่า สิ่งที่ถูกเผา โดยในอดีตวัสดุเซรามิกที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ เซรามิกแบบดั้งเดิมซึ่งทำมาจากวัสดุหลักคือดินเหนียว โดยในช่วงแรกเรียกผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ว่า ไชน่าแวร์ เพื่อเป็นเกียรติให้กับคนจีนซึ่งเป็นผู้บุกเบิกการผลิตเครื่องปั้นดินเผารุ่นแรกๆ เซรามิกสามารถประยุกต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ ได้มากมาย อาทิ หม้อไห ถ้วยชาม เครื่องเคลือบดินเผา อิฐ กระเบื้องเคลือบ วัสดุประเภทซีเมนต์ แก้ว และวัสดุทนไฟ เป็นต้น โดยตั้งแต่ปี 1950 เป็นต้นมาได้มีความเจริญก้าวหน้าในกระบวนการผลิต ตลอดจนมีความเข้าใจในลักษณะพื้นฐาน และกลไกที่สามารถควบคุมสมบัติของเซรามิกได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาเซรามิกประเภทใหม่ๆ เกิดขึ้นมากมาย คำว่า เซรามิก จึงมีความหมายที่กว้างขึ้น โดยวัสดุเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ฉนวนไฟฟ้า วัสดุขัดเจียร ชิ้นส่วนยานอวกาศ ภาชนะ และเครื่องครัว (table ware) เครื่องประดับตกแต่ง (decoration & garden ware) เครื่องสุขภัณฑ์ ชิ้นส่วนในร่างกายมนุษย์ เป็นต้น (Ryan & Radford, 1987) (Kingery, 1960)

2.3.2 วัสดุหลักของเซรามิก

วัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกสามารถแบ่งกลุ่มได้ในวงกว้างดังนี้ วัสดุประเภทดิน และวัสดุประเภทที่ไม่มีความเหนียว (non-plastic materials) ซึ่งวัสดุทั้งสองกลุ่มดังกล่าวอาจจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก โดยอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ (whiteware) แบ่งกลุ่มของวัสดุที่ใช้ออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

1. วัสดุประเภทดิน (clays) ช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียว ช่วยให้สามารถขึ้นรูปเนื้อดินได้ง่าย และช่วยให้เนื้อดินมีความแข็งแรงเพียงพอหลังการเผา ซึ่งทำให้ง่ายต่อการหยิบจับชิ้นงานในขั้นตอนการขึ้นรูปและการเผา โดยทั่วไปเชื่อว่าแร่ดินเกิดมาจากกระบวนการสลายตัวของหินอัคนี เช่น หินแกรนิต ซึ่งมีองค์ประกอบคือ โพแทสไมก้า (potash mica, $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) หินเขียวหนุมาน (quartz: SiO_2) และ โพแทสเฟลด์สปาร์ (potash feldspar, $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) ในอัตราส่วนที่เท่าๆ กัน โดยสารประกอบที่มีความเสถียรน้อยที่สุดในที่นี้คือ feldspar จะเกิดการสลายตัวขึ้น หลังจากที่มีการทำปฏิกิริยากับอากาศและน้ำมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน กระบวนการสลายตัวของเฟลด์สปาร์ดังกล่าวเรียกว่ากระบวนการสลายตัวกลายเป็นดิน (kaolinisation) ซึ่งจะทำให้ได้แร่ดินจากผลลัพท์ของสมการเคมี (2.4) (Shelby, 2005) (Weber, 1990)



เคโอลินไนด์ (kaolinite) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นผลึก (crystalline material) โดยมีผลึกเป็นแผ่นแบนรูปหกเหลี่ยม (hexagonal Shape) ขนาดเล็กมากๆ ซึ่งผลึกดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่ 5 ไมครอนจนถึงระดับเศษส่วนของความยาวไมครอน (1 ไมครอน หรือ ไมโครเมตร เท่ากับ 10^{-6} เมตร (Shelby. 2005) (Weber. 1990) (Jun. 1990) และด้วยขนาดของผลึกที่เล็กมาก ประกอบกับมีรูปร่างที่เป็นแผ่นแบนจึงทำให้แร่ดินมีสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะตัว

2. วัสดุประเภทฟลักซ์ (fluxes) หรือแก้วดัดแปลง (glass modifiers) เป็นวัสดุที่ช่วยลดอุณหภูมิของการหลอมซึ่งเรียกว่า ฟลักซ์ (flux) โดยประกอบด้วยแร่ อัลคาไลน์ เช่น ลิเทียม (Li) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ช่วยเร่งอัตราการหลอม ช่วยเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบขณะหลอม และช่วยเพิ่มความมันวาว แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้แก้วมีความทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมีลดลง เมื่อใช้ไปเป็นเวลานานแก้วจะเกิดเป็นฝ้าขาวที่เรียกว่าสนิมแก้ว (bloom) (Shelby. 2005) (Jun. 1990) สารประกอบกลุ่ม Na_2O ซึ่งได้มาจากโซดาแอช (Na_2CO_3) เป็นตัวที่นิยมใช้มากในการทำแก้วคริสตัล ส่วนอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) แบเรียม (Ba) สตรอนเทียม (Sr) จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของสารเคลือบ ทำให้ทนต่อการขีดขีดและทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ทนต่อการถูกละลายด้วยกรดอินทรีย์ที่เจือจาง สำหรับ CaO ถือเป็นทั้งฟลักซ์ และเป็น จะช่วยทำให้แก้วเสถียร (glass stabilizer) ลดการละลายน้ำของแก้ว อีกทั้งแก้วชนิดโซดาโลมยังเป็น flux ที่สำคัญซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดคือ (Zn) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความมันวาว แต่ปริมาณที่ใช้ต้องระวังให้มาก เพราะถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้แก้วทึบไฟและหนักขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเกิดสีร่วมกับ สำหรับตะกั่วถูกจัดอยู่ในกลุ่มฟลักซ์เช่นกันที่สำคัญคือเป็นฟลักซ์ที่แรงที่สุด ข้อดีอีกอย่างคือลดการตกผลึกระหว่างปล่อยให้แก้วเย็นตัวและช่วยให้ช่วงการสุกกว้างมากขึ้น ส่วนข้อเสียคือตะกั่วมีพิษ ถ้าแก้วที่มีปริมาณตะกั่วสูงจะไม่ทนต่อกรดเจือจางความทนทานต่อการขีดขีดจะลดลงเนื่องจากผิวแก้วไม่แข็งแรง

3. วัสดุประเภทสารเติมแต่ง (fillers) (Weber. 1990) (Jun. 1990) เป็นวัสดุที่ไม่มี ความเหนียวใช้เป็นส่วนประกอบของสูตรดินซึ่งไม่ใช่กลุ่มของฟลักซ์ แต่ในเชิงปฏิบัติแล้ว สารเติมแต่งสำหรับเนื้อดินสีขาว (whiteware) มักจะหมายถึงซิลิกาเสมอไม่ว่าจะอยู่ในรูปของฟลินท์ (flint) หรือทราย (sand) และถึงแม้ว่าจะมีเนื้อดินบางตัวที่หมายถึงอะลูมินาความหมายของสารแต่งเติมจะยังคงหมายถึงซิลิกาดั้งเดิม การเติมวัสดุที่ไม่มี ความเหนียวลงไปเนื้อดิน จะช่วยให้การอบแห้งของเนื้อดินทำได้ง่ายขึ้น การหดตัวหลังอบแห้ง (drying shrinkage) และความเหนียว (plasticity) ของเนื้อดินจะลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ฟลินท์ และทรายยังมีส่วนช่วยในเรื่องความขาวของเนื้อดินหลังเผา อีกทั้งยังมีความสำคัญมากในการควบคุมค่าการขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินที่ผ่าน

การเผาแล้วนอกจากวัตถุใน 3 กลุ่มหลักดังที่กล่าวข้างต้น ยังมีปูนปลาสเตอร์ (plaster of paris) รวมทั้งสารเคลือบและสีต่างๆ ซึ่งจัดว่าเป็นวัตถุที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วย

2.4 องค์ประกอบทางเคมีและหลักการเคลือบบนผิวหน้าเซรามิก

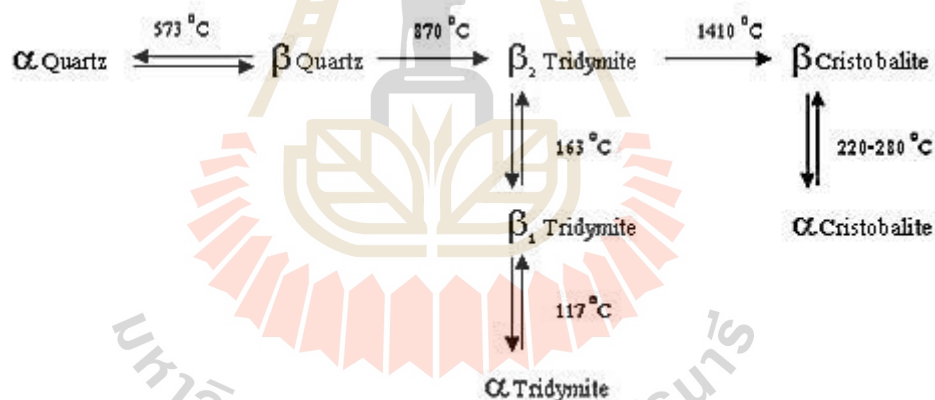
การเคลือบผิวหน้าเซรามิกเป็นการหลอมทรายหรือสารประกอบเคมีให้เคลือบติดบนแผ่นตัวรองรับเซรามิกโดยมีหลักการ และขั้นตอนที่เกี่ยวข้องหลักๆ ดังต่อไปนี้

2.4.1 การเปลี่ยนเฟสและการเปลี่ยนแปลงของซิลิกาบนตัวรองรับเซรามิก (the inversions and conversions of silica on ceramic substrate) (Ryan & Radford. 1987) รูปผลึกของซิลิกามี 3 รูปแบบหลัก ๆ ได้แก่ ควอทซ์ (quartz) ทริดีไมต์ (tridymite) และคริสโตแบไลต์ (cristobalite) ซึ่งรูปผลึกทั้งสามแบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ ซิลิกาแต่แตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอน (Si atom) และออกซิเจน (oxygen atoms) ที่อยู่ในโครงสร้างกล่าวคือในรูปผลึกของคริสโตแบไลต์ (cristobalite) และทริดีไมต์ (tridymite) อะตอมต่างๆ จะถูกจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันน้อยกว่าควอทซ์ (quartz) จึงทำให้ทั้งคริสโตแบไลต์และทริดีไมต์มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าคือ ควอทซ์ เท่ากับ 2.65 ทริดีไมต์ เท่ากับ 2.32 และคริสโตแบไลต์ เท่ากับ 2.28 โดยทริดีไมต์และคริสโตแบไลต์เป็นรูปของซิลิกาซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ ควอทซ์เป็นรูปที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสสำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทริดีไมต์มีความเสถียรจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 870 ถึง 1,470 องศาเซลเซียส ส่วนคริสโตแบไลต์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1,470 องศาเซลเซียส จนถึงจุดหลอมตัวที่ 1,710 องศาเซลเซียส สูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดแก้วซิลิกา (silica glass) หรือ แก้วควอทซ์ (fused quartz) ซึ่งเป็นซิลิกาที่ไม่ได้อยู่ในรูปผลึกเกิดขึ้น

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกาจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งนั้นจะเป็นไปอย่างช้า ๆ และจะเกิดการเปลี่ยนรูปกลับในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว (cooling) กล่าวคือจากรูปของคริสโตแบไลต์และทริดีไมต์กลับไปเป็นควอทซ์จะเกิดขึ้นช้ามาก จนแทบจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้าม จากควอทซ์ไปเป็นทริดีไมต์เกิดขึ้นช้ามากเช่นกัน และทั้งหมดนี้อาจไม่เกิดขึ้นเมื่อปราศจากการปลอมปนของสิ่งเจือปนต่าง ๆ อยู่ด้วย ในทางปฏิบัติคริสโตแบไลต์จะเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแก่ควอทซ์ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,470 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่านั้น และในระหว่างขั้นตอนการทำให้เย็นตัว (cooling) ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส ถึง 1,470 องศาเซลเซียส จะเกิดซิลิกาในรูปของทริดีไมต์ขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเร่งให้เกิดคริสโตแบไลต์และทริดีไมต์ได้เร็วขึ้น โดยการเติมวัตถุเจือปนเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ในปริมาณต่ำลงการที่มีลิม์ (lime) หรือแมกนีเซีย (magnesia) ปนอยู่ด้วยจะสามารถเร่งการเปลี่ยนรูปจากควอทซ์ไปเป็น คริสโตแบไลต์ได้เร็วขึ้น ขณะที่สารประกอบหลักจะช่วยเร่งการเกิดของทริดีไมต์

นอกจากนี้อัตราของการเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของวัตถุที่มากขึ้นด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้นนี้ทั้งที่เกิดขึ้นกับควอทซ์ ทริดีไมต์ และคริสโตแบไรต์ ล้วนเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ (major change) ภายในโครงสร้างอะตอม โดยจะเกิดการทำลายพันธะวาเลนซ์ (valency bonds) และมีการใช้พลังงานปริมาณมากเรียกว่า การเปลี่ยนแปลง (conversions)

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบผลึกหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งนั้น รูปแบบผลึกแต่ละรูปอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (minor change) ภายในโครงสร้างที่เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงเฟส (inversions) ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการหมุนตัว (rotation) ของพันธะวาเลนซ์ระหว่างอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนเท่านั้น โดยจะมีปริมาณของพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพียงเล็กน้อย และโครงสร้างที่สำคัญจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีดังกล่าว รูปแบบผลึกซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเรียกว่าอัลฟา (alpha form) ส่วนรูปแบบผลึกซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าจะเรียกว่าเบต้า (beta form) โดยการเปลี่ยนแปลงสำคัญที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 (Ryan & Radford, 1987)



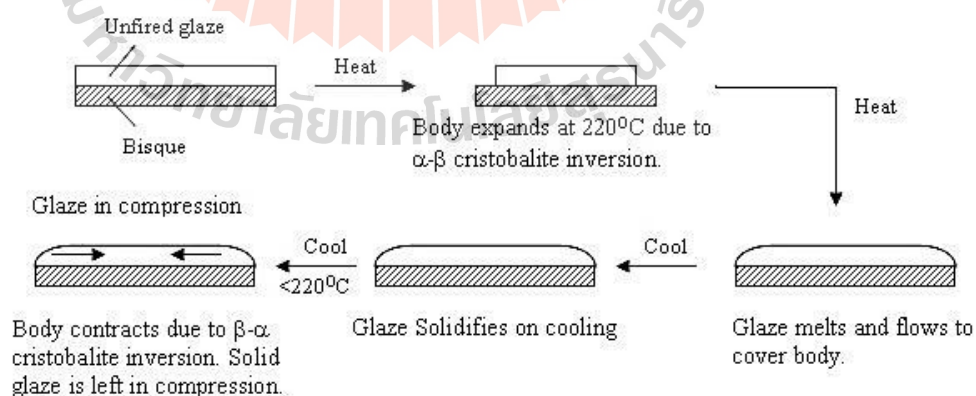
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงเฟสของรูปผลึกซิลิกา

(Ryan & Radford, 1987)

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟสของซิลิกาน้อยมากโดยซิลิกาในรูปที่ต่างกันจะแสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดของประเด็นดังกล่าวนี้คือ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อแอลฟาควอทซ์ (α -quartz) เปลี่ยนไปเป็นเบต้าควอทซ์ (β -quartz) จะเกิดการขยายตัวและเพิ่มปริมาตรขึ้น 1.0 %

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของคริสโตแบไลต์นั้นจะทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น 3 % และการเปลี่ยนแปลงเฟสของทริดีไมต์จากแอลฟาไปเป็นเบต้า (α - β tridimite) จะเกิดการขยายตัวและเพิ่มปริมาตรขึ้น 0.3 % ซึ่งไม่เหมือนกันกับการเปลี่ยนรูป (conversions) เพราะการเปลี่ยนแปลงเฟส (inversions) เกิดขึ้นเกือบจะทันทีทันใด ดังนั้น ณ อุณหภูมิใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส (inversions) เกิดขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วเช่นนี้จะนำไปสู่การแตกร้าวของชิ้นงานขณะทำการเผาได้ หากทำการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟส (inversion temperature) เร็วเกินไป

2.4.2 หลักการเคลือบผิวหน้าเซรามิก (principle coating on surface of ceramic) เป็นการเปลี่ยนแปลงเฟสของคริสโตแบไรต์จากแอลฟาไปเป็นเบต้า (α - β cristobalite) สามารถใช้ประโยชน์เพื่อป้องกันการร้าวตัวได้ ในระหว่างขั้นตอนการเผาปกติจะทำให้เบต้าควอทซ์ (β -quartz) เปลี่ยนรูปกลายเป็นเบต้าคริสโตแบไลต์ (β -cristobalite) บางส่วน และในระหว่างการให้ชิ้นงานเย็นตัว (cooling) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสเบต้า (β) ไปเป็นเฟสแอลฟา (α -cristobalite) ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีการหดตัวเกิดขึ้นร่วมด้วย ซึ่งการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจากขั้นตอนการเผาเคลือบจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสและการหดตัวเกิดขึ้นอีกครั้ง โดยในขั้นตอนการทำให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟส (inversion) สารเคลือบจะกลายเป็นของแข็ง และเนื้อดินจะเกิดการหดตัว ดังนั้นจึงทำให้สารเคลือบต้องอยู่ในสภาวะการกดอัด (compression) ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.8 (Ryan & Radford, 1987)



รูปที่ 2.8 สารเคลือบในสภาวะการกดอัดด้วยกระบวนการ cristobalite squeeze

(Ryan & Radford, 1987)

กระบวนการที่ทำให้สารเคลือบอยู่ในสภาวะการกดอัดดังกล่าวนี้เรียกว่า cristobalite squeeze สารเคลือบจะสามารถทนต่อแรงกดอัดได้มากกว่าแรงดึงมาก ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าสารเคลือบจะเสียหายน้อยกว่าหากถูกปล่อยให้อยู่ในสภาวะการกดอัด แรงดึงที่เกิดขึ้นบนสารเคลือบสามารถมีผลในทางปฏิบัติได้หากชิ้นงานเริ่มร้อนขึ้น หรือมีการดูดซึมความชื้นเข้าไปด้านในชิ้นของบิสกิต ผ่านทางส่วนของชิ้นงานที่ไม่มีสารเคลือบ หรือผ่านทางรอยตำหนิของสารเคลือบที่มีขนาดเล็กมากในระดับจุลภาค (micro imperfection) การดูดซึมของน้ำจะมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของเนื้อดิน (เรียกว่า การขยายตัวเนื่องจากความชื้น) และชั้นของสารเคลือบจะถูกทำให้อยู่ในสภาวะการดึงตัว ซึ่งอาจจะทำให้สารเคลือบเสียหายและเกิดการร้าวตัวได้ ประสิทธิภาพของกระบวนการ cristobalite squeeze จะขึ้นอยู่กับเกิดการเกิดคริสโตแบไลต์ในขั้นตอนการเผาบิสกิตและขนาดของควอทซ์ในสูตรเนื้อดิน

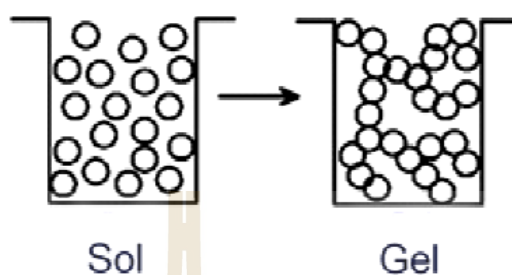
จากหัวข้อ 2.4.1 และ 2.4.2 เป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบอย่างคร่าวๆของเซรามิก สูดท้ายแล้วถ้ากล่าวถึงพื้นผิวเซรามิกจึงมีคุณสมบัติที่ขบอบน้ำ เนื่องจากมีสารประกอบที่มีขั้วผสมอยู่ไม่ว่าจะเป็น K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO และอื่นๆ เป็นต้น เมื่อนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆจึงมีข้อเสียคือ พื้นผิวเซรามิกชอบจับน้ำซึ่งทำให้เปียกและแห้งช้า ส่งผลให้เกิดความชื้นและเป็นแหล่งเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำ เชื้อรา และแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี เมื่อนานไปโดยไม่ได้รับการแก้ไข หรือทำความสะอาด พื้นผิวเซรามิกจะสูญเสียความสวยงามไปในที่สุด ดังนั้นการปรับปรุงแก้ไขพื้นผิวเซรามิกให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำขึ้นจึงเป็นแนวทางที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกยังคงความสวยงาม (เนื่องจากสมบัติของพื้นผิวที่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยตนเอง) และประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการทำความสะอาดพื้นผิวเซรามิกอีกด้วย

2.5 เทคนิคการเตรียมสารเคลือบผิวหน้าเซรามิก

กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี สารละลายที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้ จากกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการโซล-เจล (sol-gel method) การตกตะกอน (precipitation) และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีที่นิยมใช้เตรียมสารละลายเพื่อเคลือบผิวหน้าเซรามิกในปัจจุบันคือ กระบวนการโซล -เจล ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของระบบเฟสของเหลวที่เรียกว่า โซล ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งเล็กๆ ขนาด 0.1-1 ไมครอน เป็นจำนวนมากที่แขวนลอยอย่างเสถียรในสารละลายจนกลายเป็น เจล ดังรูปที่ 2.9 หรือของเหลวหนืดที่จับกันเป็นโครงร่างตาข่ายอย่าง

ต่อเนื่องในเฟสของเหลวด้วยพันธะโควาเลนต์ แรงแวนเดอร์วาลส์ และ /หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งของเหลวหนืดที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นผง เส้นใยหรือฟิล์มบาง ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะกระทำต่อไปในภายหลัง



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสถานะจาก โซล กลายเป็น เจล
(Plank. 2015)

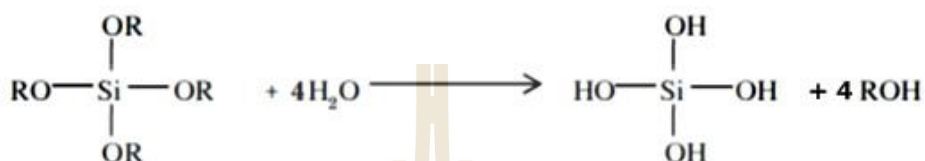
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการโซล-เจล มีอยู่หลักๆ 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis), การควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และ การควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ซึ่งแสดงตามดังสมการที่ (2.5) ถึง (2.7)



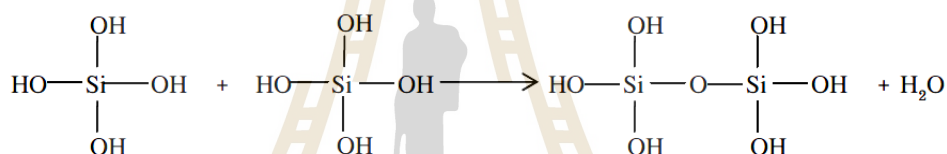
โดยให้ M แทนธาตุโลหะหรือกึ่งโลหะซึ่งได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, และ Ce ในส่วน OR แทนหมู่ Alkoxy group

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ค่า pH ของสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และอัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ ซึ่งการควบคุมปัจจัยดังกล่าวในสภาวะที่แตกต่างกันอาจทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างที่ต่างกันด้วย ขั้นตอนการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลขั้นแรกคือการผสมสารตั้งต้น (precursor) กับน้ำ โดยสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจลมักเป็นสารประกอบจำพวกโลหะหรือกึ่งโลหะที่ถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น โลหะแอลคอกไซด์ (metal alkoxide) เป็นสารตั้งต้นที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดเนื่องจากทำปฏิกิริยา

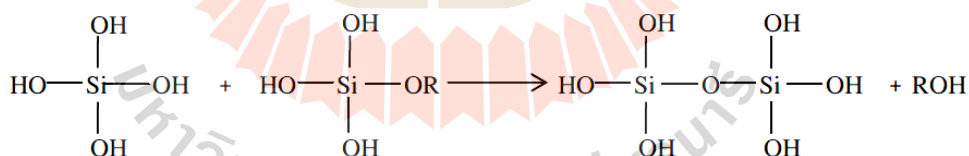
กับน้ำได้ดี เช่น tetraethylorhosilicate (TEOS) และ tetramethylorhosilicate (TMOS) เป็นต้น ส่วนแอลกอฮอล์ (alkoxide) ชนิดอื่น เช่น แอลจินต (alginate), ไททานต (titanate) และ บอเรต (borate) ถูกนำมาใช้กันแพร่หลายเช่นกันและมักใช้ร่วมกับ TEOS ยกตัวอย่างเช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ โดยให้หมู่ R แทนด้วย C_2H_5 (TEOS), CH_3 (TMOS) หรือ C_3H_7 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาด้านล่าง (จุฑารัตน์. 2009) (Hanaor. 2012)



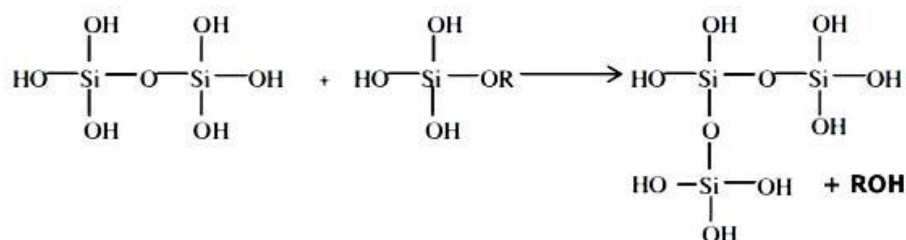
ในขณะที่เดียวกันจะเกิดปฏิกิริยา water condensation ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาด้านล่าง



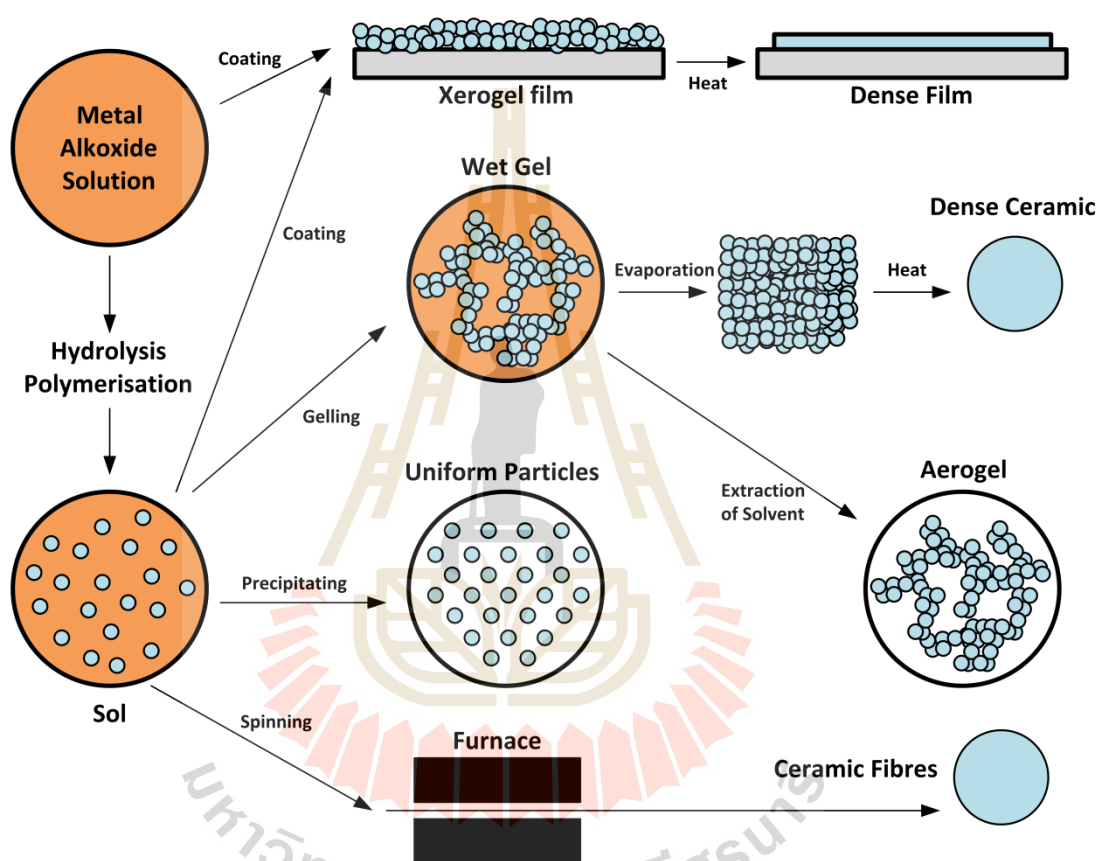
หรือเกิดปฏิกิริยา alcohol condensation ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาด้านล่าง



โดยสารประกอบที่เกิดขึ้นจะดำเนินปฏิกิริยาไปเรื่อยๆและเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นซิลิกาแบบโครงร่างตาข่ายซึ่งเรียกสถานะดังกล่าวว่า เจล หรือเรียกปฏิกิริยาการต่อสายโซ่ดังกล่าวว่าพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ดังตัวอย่างการแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาด้านล่าง



กระบวนการผลิตจากสถานะ โคล จนกลายเป็น เจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง (drying process) จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างดังแสดงในรูปที่ 2.10 เช่น ฟิล์มเคลือบ (coating film), ซีโรเจล (xerogel), แอโรเจล (aerogel) และ ผง (powder) เป็นต้นซึ่งผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกหรืออุตสาหกรรมอื่นต่อไป



รูปที่ 2.10 กระบวนการโซล-เจล

(Wikipedia, 2016)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการทำให้พื้นผิววัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น ซึ่งในปัจจุบัน กระบวนการสังเคราะห์ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำของหลายๆ งานวิจัยนิยมใช้ TEOS เป็นสารตั้งต้น สำหรับการเตรียมสารละลายและมีการเติมสารประกอบในกลุ่ม ออร์แกโนซิลิโคน (organosilane) และซิลิกาด้วยโดยตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

Nakajima et al. (2000) ศึกษาการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (super hydrophobic) และสมบัติการส่งผ่านแสง (light transmission) ของช่วงแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ด้วยเทคนิค combining a phase separation ของ tetraethylorthosilicate (TEOS) โดยการเติมโพลีเอคริลิกและ fluoroalkylsilane (FAS) เป็นส่วนประกอบ พบว่าที่ความเข้มข้น 4 wt.% ของโพลีเอคริลิกให้ค่ามุมสัมผัสสูงถึง 148° และที่ความเข้มข้น 0-1 wt.% ของโพลีเอคริลิกให้ค่าการส่งผ่านแสงมากกว่า 90% ขึ้นไปที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร และขนาดโครงสร้างในระดับไมครอนและมิติของชั้นฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับระดับของการแยกเฟส (degree of the phase separation) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคความสัมพันธ์ของพื้นผิวโดยการเปลี่ยนโหมด wenzel's mode ไปยัง cassie's mode พบว่าสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น อีกทั้งชั้นฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความแข็งแรงและสมบัติไม่ชอบน้ำใกล้เคียงกับชั้นฟิล์มของซิลิกา

Ma & Hill (2006) ศึกษาทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิววัสดุกับสมบัติความเปียกน้ำและได้อธิบายถึงเทคนิคการทำให้พื้นผิววัสดุเกิดสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (super hydrophobic) โดยเสนอขั้นตอนการสร้างพื้นผิวไม่ชอบน้ำแบบ superhydrophobic จากการเลียนแบบธรรมชาติซึ่งมีความสามารถในการทำความสะอาดผิวหน้าได้ด้วยตัวเอง (self-cleaning) ซึ่งรวบรวมเนื้อหาที่เกี่ยวข้องคือ ขั้นตอนการทำให้พื้นผิววัสดุมีค่าพลังงานอิสระต่ำลงเพื่อให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยพัฒนาขึ้นจากสารประกอบจำพวก ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon), ซิลิโคน (Silicone), สารอินทรีย์ (organic materials) และ สารอนินทรีย์ (inorganic materials) เป็นต้น และขั้นตอนการทำให้พื้นผิววัสดุมีความขรุขระเพิ่มขึ้นจากกระบวนการเตรียมสายละลายอาทิเช่น การเอชชิง (etching) และ lithography, sol-gel และ layer-by-layer (LBL) และ คอลลอยด์อย่างเป็นระเบียบ (colloidal assembly) เป็นต้น และจากการสรุปเนื้อหาพบว่ากรณีที่พื้นผิววัสดุมีความขรุขระในระดับนาโนเมตรเพิ่มขึ้นและพื้นผิววัสดุมีค่าพลังงานอิสระต่ำๆจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการเปียก (wettability) มีค่าน้อยซึ่งทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำหรือสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

Zhang et al. (2008) ศึกษาชั้นฟิล์มที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำแบบ superhydrophobic antireflective boehmite ความแตกต่างของลักษณะพื้นผิว (topography) และพารามิเตอร์ของความขรุขระด้วยเทคนิค atomic force microscope (AFM) โดยเตรียมชั้นฟิล์มด้วยกระบวนการโซล-เจล ที่มีส่วนผสมคือ aluminumtri-sec-butoxide, isopropylalcohol, ethylacetoacetate และ trimethoxysilane ที่ผ่านการ heat-treatment ณ อุณหภูมิ 100, 300 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียสมีความขรุขระของพื้นผิวที่เป็นสม่ำเสมอ (uniform) ขณะเดียวกันให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดถึง 152° และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ค่าสัดส่วนที่แสงส่องผ่านสูงสุดถึง 95%

จากนั้นใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสผ่านกระบวนการปรับความหนาของชั้นฟิล์ม (film thicknesses) ที่ความหนา 170 230 และ 320 นาโนเมตร พบว่าที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 230 และ 320 นาโนเมตรให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 152 องศา เป็น 154 องศา และจากผลการทดลองสรุปได้ว่าสมบัติ superhydrophobic จะแปรผันตรงกับความขรุขระของพื้นผิวและแปรผกผันกับค่า antireflective ของพื้นผิว

Nadargi et al. (2010) ศึกษาและอธิบายถึงการสังเคราะห์ การตรวจสอบสมบัติโปร่งแสงอย่างสูง (highly transparent) และสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางซิลิกาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเคลือบด้วยเทคนิคการจุ่ม แล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังนี้ fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal stability measurements) โดยสารประกอบของฟิล์มบางซิลิกาใช้ tetramethoxysilane (TMOS) เป็นสารตั้งต้น และ trimethylchlorosilane (TMCS) เป็นสารปรับแต่ง ในอัตราส่วนโดยโมลของ TMCS/TMOS ที่ต่างกัน และการเตรียม ฟิล์มบางซิลิกา จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 230 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ TMCS/TMOS ระหว่าง 0.6 และ 1.4 ให้ค่ามุมสัมผัสประมาณ 120 องศา การส่งผ่านแสงในช่วง visible range ให้ค่าสูงถึง 85% และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติไม่ชอบน้ำจะมีค่าลดต่ำลงเรื่อยๆ โดย อัตราส่วนโดยโมลของ TMOS:MeOH:TMCS:H₂O ที่ให้ค่าการส่งผ่านแสงและค่ามุมสัมผัสของฟิล์มบางซิลิกาดีสุดคือ 1:14.8:1.4:3.3 ตามลำดับ

Hallmann, Fink & Mitchell (2010) ศึกษาประสิทธิภาพและกระบวนการทำงานของเครื่องบดพลังงานสูง (high energy ball milling, HERBS) ในการผลิตอนุภาคซิลิกาในระดับนาโนเมตร เพื่อพัฒนาสมบัติไม่ชอบน้ำแบบ superhydrophobic ซึ่งใช้หมู่อัลคิล (alkyl = octene) ผ่านการ functionalized ลงบนผลึกของซิลิโคน (alkyl-passivated crystalline silicon) และบดที่เวลาต่างกัน ระหว่าง 0-12 ชั่วโมงจากนั้นเคลือบลงบนพื้นผิวกระจกที่ใช้เป็นตัวรองรับ โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังนี้ วิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (tunable particle-size distribution) วิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว (associated surface roughness) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี (fourier transformed Infrared, FT-IR) วิเคราะห์มุมสัมผัสของน้ำ (the static and dynamic contact angles) วิเคราะห์โครงสร้างโครงผลึก (X-ray Diffractometer, XRD) และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิว (scanning electron microscopy, SEM) พบว่าการลดขนาดอนุภาคของซิลิกาจากระดับไมโครเมตรให้เป็นนาโนเมตรสามารถควบคุมได้โดยการบดที่เวลา 4 ชั่วโมงซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดถึง 149 องศา และเมื่อใช้เวลาดบมากขึ้นจะให้ค่ามุมสัมผัสต่ำลงเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวลดน้อยลง แต่เมื่อใช้เวลาดบน้อยกว่า 4 ชั่วโมงคือที่ 0-2 ชั่วโมงอนุภาคจะมีขนาดใหญ่เป็นส่วนมากและให้ค่ามุมสัมผัสต่ำลงเช่นกัน สรุปได้ว่าถ้าต้องการให้ขนาดอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็กๆ จะต้องใช้เวลาในการบดนานหลาย

ชั่วโมงซึ่งเวลาที่เหมาะสมต่อการบดคือ ที่ 4 ชั่วโมง และพบว่าค่ามุมสัมผัสจากระบบคงที่ (static) และ เคลื่อนที่ (dynamic) จะแปรผันตรงกับปริมาณของหมู่อัลคิล ส่วนค่ามุมสัมผัสที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคความสัมผัสของพื้นผิวจากการเปลี่ยนโหมด wenzel's mode ไปยัง cassie's mode จะให้ค่ามุมสัมผัสแบบเคลื่อนที่ (dynamic advancing contact angle) สูงสุดถึง 171 องศา

Piispanen et al. (2011) ศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนเชิงกลและทางเคมี (resistance to mechanical and chemical) และความสามารถในการทำความสะอาด (cleanability) ของเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิกที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มที่ต่างกัน โดยชั้นแรกเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคโซล-เจล ซึ่งมีองค์ประกอบของฟิล์ม fluoropolymer จำนวน 2 ชนิดจากเชิงพาณิชย์และมีไทเทเนียมเป็น sol-gel derived film แล้วใช้เคลือบเป็นฟิล์มชั้นแรก ส่วนชั้นต่อไปเคลือบด้วยแก้ว (glassy) ด้วยเทคนิคการเคลือบพ่น จากนั้นวิเคราะห์ความต้านทานทางเคมีของพื้นผิวด้วยเทคนิค การแช่ (soaking) เป็นเวลา 7 วันในสารละลาย weakly alkaline detergent solution วิเคราะห์สมบัติทางกลของพื้นผิวด้วยเทคนิค การขัด (abrasion) ในวัสดุสำหรับขัดคือ ฝอยขัด (steel wool) และ ผ้าไมโครไฟเบอร์เปียก (moist microfiber cloth) วิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะพื้นผิว (topography) ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสด้วยเทคนิค water contact angle พบว่าการแช่ด้วยสารละลายเจือจางและการขัดด้วยผงเหล็กสร้างความเสียหายอย่างมากต่อฟิล์มของ fluoropolymer แล้วไทเทเนียมที่ใช้เป็น sol-gel derived film เมื่อเคลือบแบบกระจกสองชั้น (double-glazed) บนพื้นผิวเซรามิกสามารถต้านทานการสึกกร่อนเชิงกลและทางเคมีได้อย่างน่าพึงพอใจ อีกทั้งความสามารถในการทำความสะอาด (cleanability) ยังเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนชั้นฟิล์มเคลือบด้วยแก้ว พบว่าการเคลือบด้วยแก้วทำให้ความขรุขระบนพื้นผิวลดลงแต่ไม่ส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวเซรามิกเปลี่ยนแปลงไป

Hozumi, Cheng & Yagihashi. (2011) ศึกษาความสามารถของการเปียกแบบไดนามิกบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ที่ประกอบด้วย aluminum และ titanium โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยไอเคมี chemical vapor deposition (CVD) ของ 1,3,5,7-tetramethylcyclotetra-siloxane (D_4) ที่อุณหภูมิ (80 และ 180 องศาเซลเซียส) และเวลาหลังเคลือบ (1 และ 3 วัน) จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังนี้ X-ray photoelectron spectroscopy, atomic force microscopy และ advancing/ receding water contact angles พบว่าการเคลือบชั้นฟิล์ม D_4 บนพื้นผิวไม่ได้ทำให้สถานะวิทยาของพื้นผิวเปลี่ยนไปโดยความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้ ประมาณ 0.5 นาโนเมตร และพื้นผิวโลหะออกไซด์ได้เปลี่ยนสมบัติจาก hydrophilic ไปเป็น hydrophobic โดยสภาวะที่เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างน่าพึงพอใจคือที่อุณหภูมิเคลือบ 180 องศาเซลเซียสและเวลาหลังเคลือบ 1 วัน ซึ่งชั้นฟิล์มจะมีลักษณะทึบแสงขนาดของอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 500 นาโนเมตรถึง 4 ไมโครเมตรส่งผลให้พื้นผิว

มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเอื้อต่อการเพิ่มสมบัติไม่ชอบน้ำให้พื้นผิวมากขึ้นซึ่งให้ค่าของมุมสัมผัสสูงกว่า 160° โดยสังเกตได้จากหยดน้ำกลิ้งออกจากจานหมุนทดสอบได้อย่างง่ายดาย

Wen et al. (2011) ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด alkaline-catalyzed co-hydrolysis และปฏิกิริยา co-polycondensation ของ tetra-ethoxysilane (TEOS) และ methyl-triethoxysilane (MTES) ในสารประกอบ organic siloxane ที่ปรับแต่งด้วยสารละลาย polyacrylate emulsion เพื่อปรับปรุงพื้นผิวให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำแบบ superhydrophobic จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิค fourier transformed Infrared (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscope (AFM) และ transmission electron microscopy (TEM) พบว่าจากเตรียมสารละลายด้วยกระบวนการโซล-เจลระหว่าง TEOS และ MTES ในอัตราส่วนของ MTES/TEOS ที่ 4:1 โดยเติมสารละลาย polyacrylate emulsion ที่ปริมาณ 25 wt.% จะช่วยให้จูนรูปร่างโครงสร้างของฟิล์มได้เป็นอย่างดีและฟิล์มให้ค่ามุมสัมผัสสูงถึง 156° อีกทั้งอัตราส่วนของ MTES:TEOS ที่ 4:1 หรือมากกว่าจะทำให้เกิดอนุภาคของซิลิกาขึ้นในระดับนาโนเมตรส่งผลให้เพิ่มความขรุขระมากขึ้นและเกิดสมบัติไม่ชอบน้ำแบบ superhydrophobic ของพื้นผิวได้อย่างเป็นที่ยอมรับได้

Purcar et al. (2012) ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มที่มีสมบัติแบบ hydrophobic และ antireflective ที่เคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจลในสภาวะอุณหภูมิห้อง โดยมี tetraethoxysilane (TEOS) เป็นสารตั้งต้นและ methyltriethoxysilane (MTES), phenyltri-ethoxysilane (PTES), vinyltriethoxysilane (VTES) และ octyltriethoxysilane (OTES) เป็นสารปรับแต่งพื้นผิว ซึ่งสารละลายซิลิกาเตรียมโดยให้อัตราส่วนระหว่าง TEOS และ PTES ที่ 1:1 ใน alcohol ผสมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยมี titanium (IV) isopropoxide เป็นสารตัวกลางสำหรับให้ซิลิกาเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังนี้ fourier transformed Infrared (FT-IR), environmental scanning electron microscopy (ESEM) และ atomic force microscope (AFM) พบว่าเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์โดยให้หมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ ($-\text{Si}-\text{CH}_3$) เกิดขึ้นทำให้ฟิล์มซิลิกาที่ได้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำตามไปด้วยและให้ค่ามุมสัมผัสแบบคงที่ (static water contact angle) ในค่าสูงถึง $107 \pm 3^\circ$ ซึ่งได้จากสภาวะการสังเคราะห์ซิลิกาที่ดีที่สุด อีกทั้งยังพบว่าการเคลือบสามารถป้องกันการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดีจากค่าการสะท้อน (reflection) ที่ได้มีค่าต่ำในช่วงแสง visible

ธิดารัตน์ เปริศแก้ว (2013) วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี - สุรนารี ได้ศึกษาการเตรียม TEOS-SiO₂-PDMS ด้วยกระบวนการโซล-เจล จากนั้นเคลือบลงบนผิวกระจกพบว่าค่ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 152 องศา แต่เมื่อเคลือบบนพื้นผิวเซรามิกยังให้ค่ามุมสัมผัสที่ต่ำ จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้น พบว่าส่วนใหญ่สารประกอบ tetraethoxysilane (TEOS) นิยมใช้เป็น

สารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พื้นผิวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ อาทิ ช่วงอุณหภูมิการเผา ปริมาณและชนิดของสารปรับแต่ง เทคนิคการเตรียมสารละลายหรือฟิล์มเพื่อใช้เคลือบบนพื้นผิว เวลาในการดำเนินปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาจะเป็นแนวคิดในการปรับปรุงพื้นผิวเคลือบเซรามิกให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำขึ้นและมีความแข็งแรงของฟิล์มหรือสารเคลือบให้มากพอที่จะนำไปใช้งานในชีวิตประจำวันได้ และเพื่อให้งานวิจัยนี้ดำเนินงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูง จึงเลือกใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเข้าช่วยในการตัดสินใจ และวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Design-Expert[®] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พร้อมปฏิบัติงาน จากบริษัท State-Ease Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยโปรแกรมดังกล่าวถูกออกแบบขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงสถิติ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เป็นอย่างดี เพื่อสุดท้ายแล้วงานวิจัยนี้จะได้สภาวะที่ดีที่สุดในการเคลือบพื้นผิวเซรามิกให้มีความแข็งแรง และเกิดสมบัติไม่ชอบน้ำแบบ hydrophobic หรือ superhydrophobic ได้อย่างเป็นที่น่าพึงพอใจ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเซรามิกมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ

อุปกรณ์และเครื่องมือ	ผู้ผลิต	รุ่น
Spray gun	AM-Tool	K-3
Water contact angle measurement machine	DataPhysics	OCA 20
Scanning electron microscope (SEM)	Zeiss	AURIGA
High temperature furnace	Calcinator	AF 3216
Electric hair drier	Panasonic	EH 5931
UV-visible spectroscopy	Jasco	7800
Kinematic viscometer	Cannon Fenske	N92 size 75
Sonicator	Bandelin Sonorex	RK 156 BH
Hot Plate Stirrer	IKA	C-MAG HS 7
Mechanical overhead stirrer	IKA	RW 20 Digital
Thermocouple	Sper Scientific	800024

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ (ต่อ)

อุปกรณ์และเครื่องมือ	ผู้ผลิต	รุ่น
Analytical Balances	Sartorius	CP224S
Oven	Binder	FD 240

3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ

ชื่อการค้า	ชนิด/เกรด	ผู้ผลิต
Tetraethyl orthosilicate (TEOS)	98 %	Acros Organics
Methyltriethoxysilane (MTES)	98 %	Acros Organics
Poly-dimethylsiloxane (PDMS)	96 %	Acros Organics
nano-silica (ซิลิกา นาโน)	12 nm	Aerosil
nano-silica (ซิลิกา นาโน)	20 nm	Aerosil
Ethanol	Absolute	CARLO ERBA
Isopropyl alcohol	Analytical	QRëC
Hydrochloric	37 %	QRëC
Acetone	Analytical	QRëC
Ferric oxide	-	-
Glycerol	-	-
Iodine	-	-

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม design-expert® มีตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตัวแปรต้น (independence variables) 4 ตัวแปรคือ

ตัวแปร 1 (Factor1) ปริมาณของซิลิกานาโนคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกานาโนที่เติมลงไปเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบมีระดับการเปลี่ยนแปลง 4 ระดับ (levels) คือ 0.5 1.0 2.0 และ 4.0 wt%

ตัวแปร 2 (Factor2) ปริมาณของ MTES คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของ MTES ที่เติมลงไปเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบมีระดับการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ (levels) คือ 2.0 4.0 และ 8.0 wt%

ตัวแปร 3 (Factor3) เทคนิคการเคลือบ คือ เทคนิคที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบนแผ่นตัวอย่างเซรามิกมี 2 เทคนิค คือ การจุ่มเคลือบ และการเคลือบแบบสเปรย์

ตัวแปร 4 (Factor4) เทคนิคการอบแห้ง คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งฟิล์มเคลือบหลังจากการเคลือบน้ำยาเคลือบบนแผ่นตัวอย่างเซรามิกมี 3 เทคนิค คือ ใช้เครื่องเป่าแห้ง (electric hair drier) อบแห้งที่ 300 องศาเซลเซียส และอบแห้งที่ 400 องศาเซลเซียส

ในออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล โดยการเรียงลำดับการทดลองตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น 3 9 ตัวแรกเป็น Standard no สำหรับการทดลอง 24 Standard no แต่ละ Standard no อบแห้งฟิล์ม 3 วิธีดังนั้นจึงมี 72 combinations ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองตัวแปรของงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ (1) ปริมาณของ nano-silica (2) ปริมาณของ MTES (3) เทคนิคการเคลือบ (4) เทคนิคการอบแห้ง

Standard No.	Factor 1 A: nano-silica (wt.%)	Factor 2 B: MTES (wt.%)	Factor 3 C: coating method	Factor 4 D: oven method
1	4	2	Dip	electric hair drier
	4	2	Dip	300 °C Oven
	4	2	Dip	400 °C Oven
2	2	2	Dip	electric hair drier
	2	2	Dip	300 °C Oven
	2	2	Dip	400 °C Oven
3	1	2	Dip	electric hair drier
	1	2	Dip	300 °C Oven
	1	2	Dip	400 °C Oven
4	0.5	2	Dip	electric hair drier
	0.5	2	Dip	300 °C Oven
	0.5	2	Dip	400 °C Oven
5	4	4	Dip	electric hair drier
	4	4	Dip	300 °C Oven
	4	4	Dip	400 °C Oven
6	2	4	Dip	electric hair drier
	2	4	Dip	300 °C Oven
	2	4	Dip	400 °C Oven

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) การออกแบบการทดลองตัวแปรของงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ (1) ปริมาณของ nano-silica (2) ปริมาณของ MTES (3) เทคนิคการเคลือบ (4) เทคนิคการอบแห้ง

Standard No.	Factor 1 A: nano-silica (wt.%)	Factor 2 B: MTES (wt.%)	Factor 3 C: coating method	Factor 4 D: oven method
7	1	4	Dip	electric hair drier
	1	4	Dip	300 °C Oven
	1	4	Dip	400 °C Oven
8	0.5	4	Dip	electric hair drier
	0.5	4	Dip	300 °C Oven
	0.5	4	Dip	400 °C Oven
9	4	8	Dip	electric hair drier
	4	8	Dip	300 °C Oven
	4	8	Dip	400 °C Oven
10	2	8	Dip	electric hair drier
	2	8	Dip	300 °C Oven
	2	8	Dip	400 °C Oven
11	1	8	Dip	electric hair drier
	1	8	Dip	300 °C Oven
	1	8	Dip	400 °C Oven
12	0.5	8	Dip	electric hair drier
	0.5	8	Dip	300 °C Oven
	0.5	8	Dip	400 °C Oven

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)การออกแบบการทดลองตัวแปรของงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ (1) ปริมาณของ nano-silica (2) ปริมาณของ MTES (3) เทคนิคการเคลือบ (4) เทคนิคการอบแห้ง

Standard No.	Factor 1 A: nano-silica (wt.%)	Factor 2 B: MTES (wt.%)	Factor 3 C: coating method	Factor 4 D: oven method
13	4	2	spary	electric hair drier
	4	2	spary	300 °C Oven
	4	2	spary	400 °C Oven
14	2	2	spary	electric hair drier
	2	2	spary	300 °C Oven
	2	2	spary	400 °C Oven
15	1	2	spary	electric hair drier
	1	2	spary	300 °C Oven
	1	2	spary	400 °C Oven
16	0.5	2	spary	electric hair drier
	0.5	2	spary	300 °C Oven
	0.5	2	spary	400 °C Oven
17	4	4	spary	electric hair drier
	4	4	spary	300 °C Oven
	4	4	spary	400 °C Oven
18	2	4	spary	electric hair drier
	2	4	spary	300 °C Oven
	2	4	spary	400 °C Oven

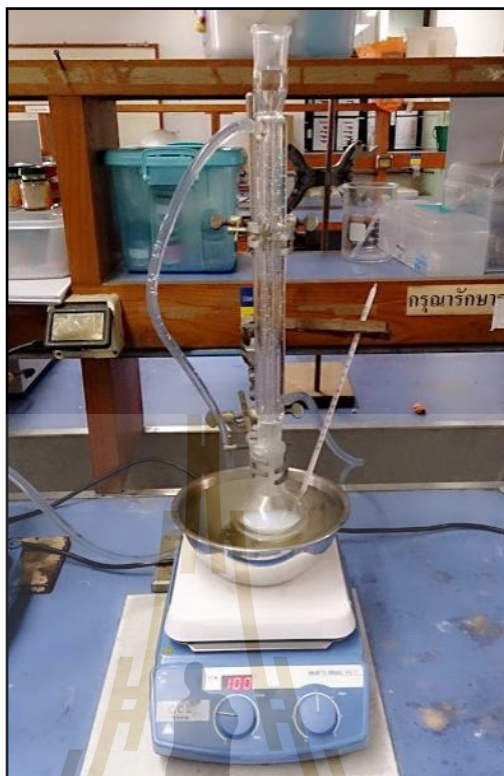
ตารางที่ 3.3 (ต่อ)การออกแบบการทดลองตัวแปรของงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปรคือ (1) ปริมาณของ nano-silica (2) ปริมาณของ MTES (3) เทคนิคการเคลือบ (4) เทคนิคการอบแห้ง

Standard No.	Factor 1 A: nano-silica (wt.%)	Factor 2 B: MTES (wt.%)	Factor 3 C: coating method	Factor 4 D: oven method
19	1	4	spary	electric hair drier
	1	4	spary	300 °C Oven
	1	4	spary	400 °C Oven
20	0.5	4	spary	electric hair drier
	0.5	4	spary	300 °C Oven
	0.5	4	spary	400 °C Oven
21	4	8	spary	electric hair drier
	4	8	spary	300 °C Oven
	4	8	spary	400 °C Oven
22	2	8	spary	electric hair drier
	2	8	spary	300 °C Oven
	2	8	spary	400 °C Oven
23	1	8	spary	electric hair drier
	1	8	spary	300 °C Oven
	1	8	spary	400 °C Oven
24	0.5	8	spary	electric hair drier
	0.5	8	spary	300 °C Oven
	0.5	8	spary	400 °C Oven

3.2.2 การเตรียมน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ด้วยกระบวนการโซลเจล

ในการเตรียมน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ด้วยกระบวนการโซลเจลเป็นขั้นตอนการเตรียมเพื่อให้ได้น้ำยาเคลือบสำหรับใช้ในการเคลือบลงบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก โดยมีขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

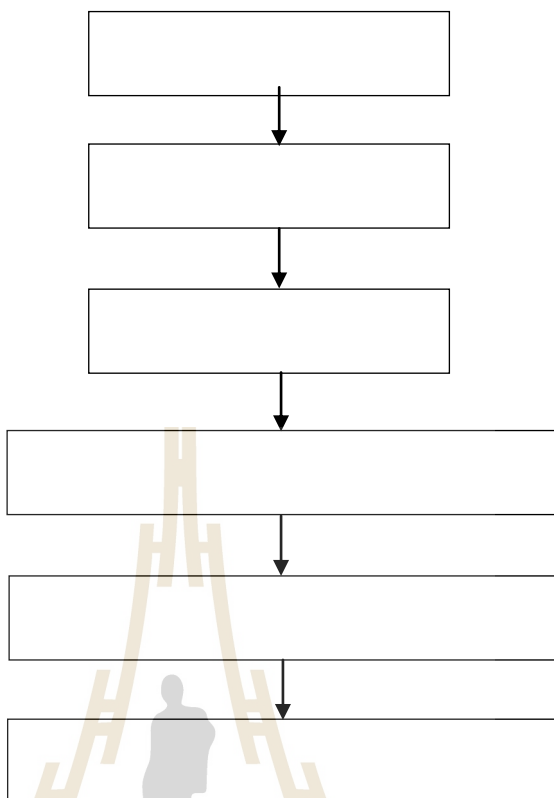
1. การเตรียมของเหลวส่วนที่ 1 โดยการชั่งสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ปริมาณ 7 กรัม เอทานอลปริมาณ 27 กรัม และกรดไฮโดรลิกความเข้มข้น 0.1 M ปริมาณ 6 กรัม
2. นำส่วนผสมข้อที่ 1 เตรียมด้วยวิธีกลั่นไหลย้อน (reflux) พร้อมทั้งกวนผสมโดยใช้เครื่องกวนสาร (Hot Plate Stirrer) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ขณะทำการกลั่นไหลย้อนได้ทำการกวนในอ่างน้ำมัน เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ 70 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จึงนำไปวัดค่าความหนืด
3. จากนั้นทำการเตรียมของเหลวส่วนที่ 2 โดยการชั่งสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) ปริมาณ 50 กรัม และซิลิกานาโน ขนาด 12 nm และ 20 nm ผสมในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแปรผันปริมาณของซิลิกานาโนตามตารางที่ 3.3 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ซิลิกานาโนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและกระจายตัวดีในของเหลว
4. เตรียมของเหลวส่วนที่ 3 โดยการชั่ง พอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน (PDMS) ปริมาณ 2.75 กรัม แมททีวไตรอิทอกซีไซเลน (MTES) โดยการแปรผันปริมาณแสดงดังตารางที่ 3.3
5. นำของเหลวทั้ง 3 ส่วนผสมกันในขวดก้นกลม (Round bottom flasks) แล้วนำไปกลั่นไหลย้อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้อุณหภูมิคงที่ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนสาร (Hot Plate Stirrer) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
6. เก็บน้ำยาเคลือบไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการกลั่นแบบไหลย้อน

3.2.3 การเตรียมพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกสำหรับการเคลือบฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

ในการทำความสะอาดพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกเพื่อล้างสิ่งสกปรกและคราบไขมันบนพื้นผิวของตัวอย่างเซรามิก เป็นขั้นตอนเพื่อให้ง่ายต่อการเคลือบฟิล์ม โดยมีขั้นตอนการแสดงในรูปที่ 3.2 โดยตัวอย่างเซรามิกในงานทดลองนี้ได้ใช้กระเบื้องติดผนังที่เคลือบด้วย Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂ ที่มีขนาด 4 x 4 นิ้ว แสดงในรูปที่ 3.2 นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน จากนั้นทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการล้างคราบไขมันที่เกาะแน่นบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยเอทานอล ตามด้วยอะซิโตน และน้ำกลั่นเพื่อให้พื้นผิวตัวอย่างเซรามิกมีความเป็นกลาง หลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก นำตัวอย่างเซรามิกไปอบเพื่อไล่น้ำออกจากพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์ม ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนและเทคนิคในการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำความสะอาดตัวอย่างเซรามิก



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเซรามิก

3.2.4 การเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

ในการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES สำหรับทดลองนี้มีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกของฟิล์ม 2 เทคนิคได้แก่เทคนิคการจุ่มเคลือบตัวอย่างเซรามิกลงในน้ำยาเคลือบ และเทคนิคการสเปรย์บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก โดยมีขั้นตอนการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เทคนิคการจุ่มเคลือบ

- 1.1 เตรียมน้ำยาเคลือบในอ่างแก้ว
- 1.2 ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเซรามิกก่อนทำการเคลือบ
- 1.3 ทำการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยการจุ่มตัวอย่างเซรามิกลงในน้ำยาเคลือบ ทำการจับเวลาที่ 5 วินาที จากนั้นนำขึ้นมาพัก
- 1.4 ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเซรามิกหลังทำการเคลือบ
- 1.5 นำตัวอย่างเซรามิกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ฟิล์มแห้ง ก่อนนำไปทำให้แห้งตามตัวแปรในการอบแห้งตามตารางที่ 3.3

2. เทคนิคการสเปรย์บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก

- 2.1 ทำการเตรียมอุปกรณ์ Spray gun ที่ความดันอากาศคงที่ 60 psi
- 2.2 ทำการตรวจปริมาณน้ำยาเคลือบที่ปริมาณ 15 มิลลิลิตร
- 2.3 ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเซรามิกก่อนทำการเคลือบ
- 2.4 ทำการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยการการพ่นสเปรย์ โดยมีระยะห่างระหว่างหัวสเปรย์และตัวอย่างเซรามิกที่ 30 เซนติเมตร
- 2.5 ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเซรามิกหลังทำการเคลือบ
- 2.6 นำตัวอย่างเซรามิกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ฟิล์มแห้ง ก่อนนำไปทำให้แห้งตามตัวแปรในการอบแห้งตามตารางที่ 3.3

3.2.5 การอบแห้งฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

การอบแห้งฟิล์มเคลือบ คือการให้ความร้อนเพื่อทำให้เนื้อฟิล์มยึดติดบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรในการอบแห้งฟิล์ม 3 ตัวแปรได้แก่

1. การเป่าลมร้อน (electric hair drier) โดยการเป่าลมร้อนด้วยเครื่องเป่าผมยี่ห้อ Panasonic รุ่น EH 5931 โดยเป่าให้ความร้อนประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2. การอบแห้งที่ 300 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที และให้ความร้อนคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3. การอบแห้งที่ 400 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ให้ความร้อนคงที่ที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนการเตรียมน้ำยาเคลือบ การเคลือบฟิล์มบนตัวอย่างเซรามิก และการอบแห้งฟิล์ม แสดงเป็นแผนภูมิดังรูปที่ 3.4



3.3 การตรวจสอบสมบัติของน้ำยาเคลือบและฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

3.3.1 การตรวจสอบน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

3.3.1.1 การตรวจสอบค่าความหนืด

การวิเคราะห์หาค่า Kinematic viscosity เป็นการวัดความต้านทานการไหลของของเหลวภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกโดยใส่ของเหลวไหลผ่าน glass capillary viscometer เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของของเหลว โดยความดันของของเหลวจะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับความหนาแน่นของของเหลว สำหรับ Kinematic viscometer นั้นเวลาที่ใช้ในการไหลของปริมาตรของเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Kinematic viscosity ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\gamma = ct \quad (3.1)$$

โดยที่

c คือ constant viscometer, cSt/s

t คือ time, s

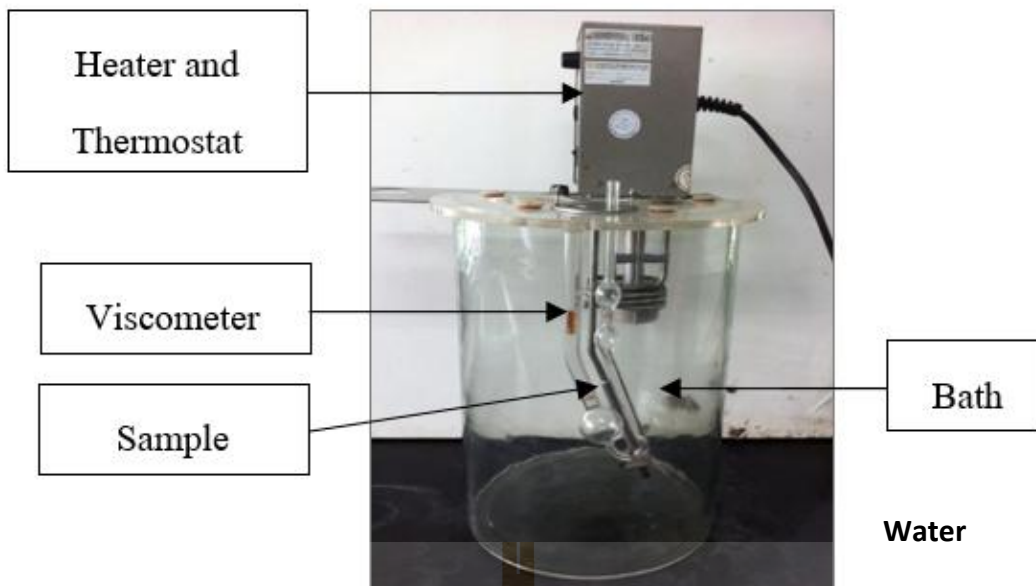
ดังนั้น Kinematic viscosity มีหน่วยเป็น cm²/s (Stokes ; St) , mm²/s (Centistokes; cSt)

ขั้นตอนการทดสอบค่าความหนืด

1. ติดตั้งเครื่องมือทดสอบความหนืดดังรูปที่ 3.5
2. เติมน้ำยาเคลือบใน Kinematic viscometer ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. นำ viscometer แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40±0.01 องศาเซลเซียส
4. ดูดน้ำยาเคลือบขึ้นให้เกินขีดบนสุดของ Kinematic viscometer จากนั้นปล่อย

และจับเวลาการไหลจนกว่าจะถึงขีดล่าง Kinematic viscometer (ถ้าเวลาในการไหลต่ำกว่า 200 วินาที ให้เปลี่ยน Kinematic viscometer ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าเดิม)

5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ย
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณ Kinematic viscosity ในสมการ(3.1)



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบความหนืด Kinematic viscosity Cannon รุ่น fenske N92 size 75

3.3.1.2 การตรวจสอบความสามารถให้แสงส่องผ่าน (% Transmittance)

การตรวจสอบความสามารถให้แสงส่องผ่านน้ำยาเคลือบ เป็นการวัดค่าความสามารถให้แสงส่องผ่าน (Transmittance, %T) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ JASSC รุ่น 7800 ทดสอบในช่วงความยาวคลื่น (wavelength) 400-700 nm (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer JASSC รุ่น 7800

3.3.2 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

ในการทดลองนี้ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกดังต่อไปนี้

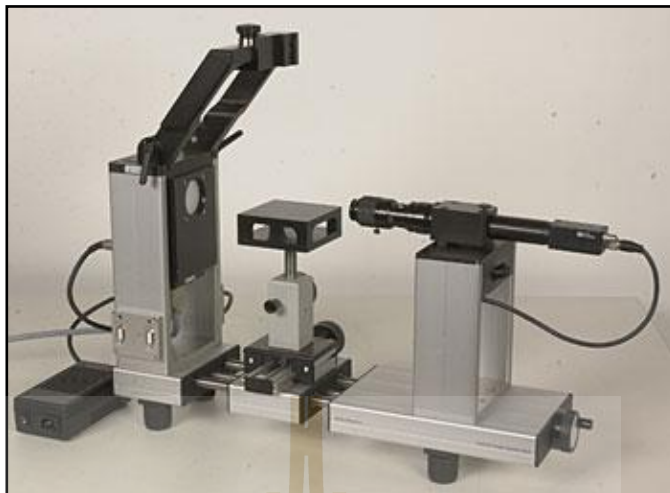
1. ตรวจสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)
2. การพิสูจน์หลักฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy
3. การทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง

3.3.2.1 การตรวจสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)

การตรวจสอบวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มที่เคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ใช้เครื่อง water contact angle meter (DataPhysic รุ่น OCA 20) (รูปที่ 3.7(ก)) เพื่อใช้ค่ามุมสัมผัสเป็นดัชนีบ่งชี้สมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ตามระดับของมุมสัมผัส โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้

ขั้นตอนการตรวจสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ

1. ทำการดูดน้ำกลั่นที่ปริมาณ 500 μ L ด้วยหลอดฉีดของเหลว
2. ทำการหยดน้ำกลั่นออกจากหลอดฉีดของเหลว ด้วยปริมาณน้ำกลั่น 5 μ L ลงบนผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES
3. วัดค่ามุมสัมผัส จำนวน 5 ตำแหน่งบนฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES โดยนับตำแหน่งขวาบนคือตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งซ้ายบนคือตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งขวาล่างคือตำแหน่งที่ 3 ตำแหน่งซ้ายล่างคือตำแหน่งที่ 4 และตำแหน่งตรงกลางคือตำแหน่งที่ 5 แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่ามุมสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข)
4. ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.7 เครื่อง water contact angle DataPhysics รุ่น OCA 20

3.3.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิคไมโครสโคปีแบบอิเล็กตรอนส่องกราด(Scanning Electron Microscopy) ด้วยเครื่อง SEM ยี่ห้อZeiss รุ่น AURIGA (รูปที่ 3.8) ซึ่งงานจะถูกเคลือบด้วยคาร์บอนเพื่อเพิ่ม phase contrast โดยพลังงานที่ใช้ในการกำเนิดอิเล็กตรอนเท่ากับ 20 keV



รูปที่ 3.8 เครื่อง SEM Zeiss รุ่น AURIGA

3.3.2.3 การตรวจสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองตามมาตรฐาน อุตสาหกรรมของกระเบื้องเซรามิก (มอก. 2398 เล่ม 14-2553)

การตรวจสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้ดำเนินการตามตาม
มาตรฐานอุตสาหกรรมของกระเบื้องเซรามิกเลขที่ มอก . 2398 เล่ม 14-2553 สารละลายที่ใช้
ทดสอบ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ สารละลายไอโอดีน และ กลีเซอรอล

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเหล็กออกไซด์

1. ละลายเหล็กออกไซด์ในกลีเซอรอล อัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ 40 ส่วนต่อ
กลีเซอรอล 60 ส่วน โดยน้ำหนัก

2. กวนผสมให้เหล็กออกไซด์ละลายในกลีเซอรอล

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไอโอดีน

1. ละลายเกล็ดไอโอดีนในแอลกอฮอล์ อัตราส่วนของไอโอดีน 13 กรัม ต่อ
แอลกอฮอล์ ปริมาณ 1 ลิตร

2. กวนผสมให้เกล็ดไอโอดีนละลายในแอลกอฮอล์

วิธีและเครื่องมือทำความสะอาด

ในขั้นตอนของวิธีและเครื่องมือทำความสะอาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของ
กระเบื้องเซรามิกเลขที่ มอก. 2398 เล่ม 14-2553 ได้กำหนดไว้ให้ทำตามวิธีการ ก. เป็นลำดับแรก
ถ้าวิธีการทำความสะอาด ก. ผ่านให้จัดอยู่ในระดับ 5 ให้ถือว่าดีเยี่ยม แต่ถ้าไม่ผ่านในวิธีการ ก. ให้
ทำการตรวจสอบในวิธีการ ข. ถ้าผ่านให้อยู่ในระดับ 4 แต่ถ้าไม่ผ่านในวิธีการ ข. ให้ทำการ
ตรวจสอบในวิธีการ ค. เป็นต้น โดยมีการแสดงขั้นตอนการตรวจสอบในรูปที่ 3.9

วิธีและเครื่องมือทำความสะอาดด้วยวิธีการ ก

ทำความสะอาดชิ้นตัวอย่างโดยปล่อยน้ำร้อนอุณหภูมิ $55 \pm 5^{\circ} \text{C}$ ให้ไหลผ่านฟิล์ม
เคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกเป็นเวลา 5 นาที แล้วเช็ดให้สะอาดด้วยผ้าขาวัวร์

วิธีและเครื่องมือทำความสะอาดด้วยวิธีการ ข

ทำความสะอาดฟิล์มบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกด้วยน้ำยาล้างจานโดยการใช้
ฟองน้ำขัดถูเพื่อไม่ทำให้เกิดรอย แล้วล้างออกโดยปล่อยให้น้ำไหลผ่านฟิล์มเคลือบบนพื้นผิว
ตัวอย่างเซรามิก จากนั้นเช็ดให้สะอาดด้วยผ้าขาวัวร์

วิธีและเครื่องมือทำความสะอาดด้วยวิธีการ ค

1. ทำความสะอาดฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกโดยการใช้ผ้าขัดห้องน้ำ
โดยมีการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ทำความสะอาดดังนี้

- แปรงหมุน มีขนแปรงแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแปรง 8 เซนติเมตร หมุนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที

- ถังใส่สารทำความสะอาด ประกอบด้วยอุปกรณ์ฉีดสารทำความสะอาดที่ เชื่อมติดกับแปรง

2. ใช้เวลาในการทำทำความสะอาด 2 นาที แล้วล้างออกโดยปล่อยให้ น้ำไหลผ่านฟิล์ม เคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก จากนั้นเช็ดให้สะอาดด้วยผ้าขาวม้า

วิธีและเครื่องมือทำความสะอาดด้วยวิธีการ ก

แช่ชิ้นทดสอบในตัวทำลายสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 3 โดยปริมาตร เตรียมจากกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ว ล้างออกโดยปล่อยให้ น้ำไหลผ่านฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก จากนั้นเช็ดให้สะอาดด้วย ผ้าขาวม้า

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หยดสารละลายที่จะทำให้เกิดคราบสกปรกลงบนตัวอย่าง ใช้พู่กันเกลี่ยคราบ สกปรกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 1 เซนติเมตร และให้มีความสม่ำเสมอ จำนวน 3 ตำแหน่ง

2. วางตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. หลังจากวางตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำความสะอาดตามวิธีการ ก. เป็นลำดับ แรกถ้าวิธีการทำความสะอาด ก. ผ่านให้จัดอยู่ในระดับ 5 ให้ถือว่าดีเยี่ยม แต่ถ้าไม่ผ่านในวิธีการ ก. ให้ทำการตรวจสอบในวิธีการ ข. ถ้าผ่านให้อยู่ในระดับ 4 แต่ถ้าไม่ผ่านในวิธีการ ข. ให้ทำ การตรวจสอบในวิธีการ ค. เป็นต้น

4. ตรวจสอบนิจผลการทดสอบ และให้ผลการทดสอบเป็นระดับ (class) ตามมาตรฐาน ที่กำหนดไว้

การจำแนกผลตามมาตรฐานการทนการเปราะเปื้อน

จากรูปที่ 3.9 แสดงการจำแนกผลการตรวจสอบความทนการเปราะเปื้อนโดยอธิบายการ ทดสอบตามระดับ(Class) ได้ดังนี้

ระดับ 5 คือ ผ่านการล้างแผ่นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ด้วยน้ำร้อนด้วย อุณหภูมิ $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แบบไหลผ่าน จากนั้นเช็ดผิวด้วยผ้าชื้น

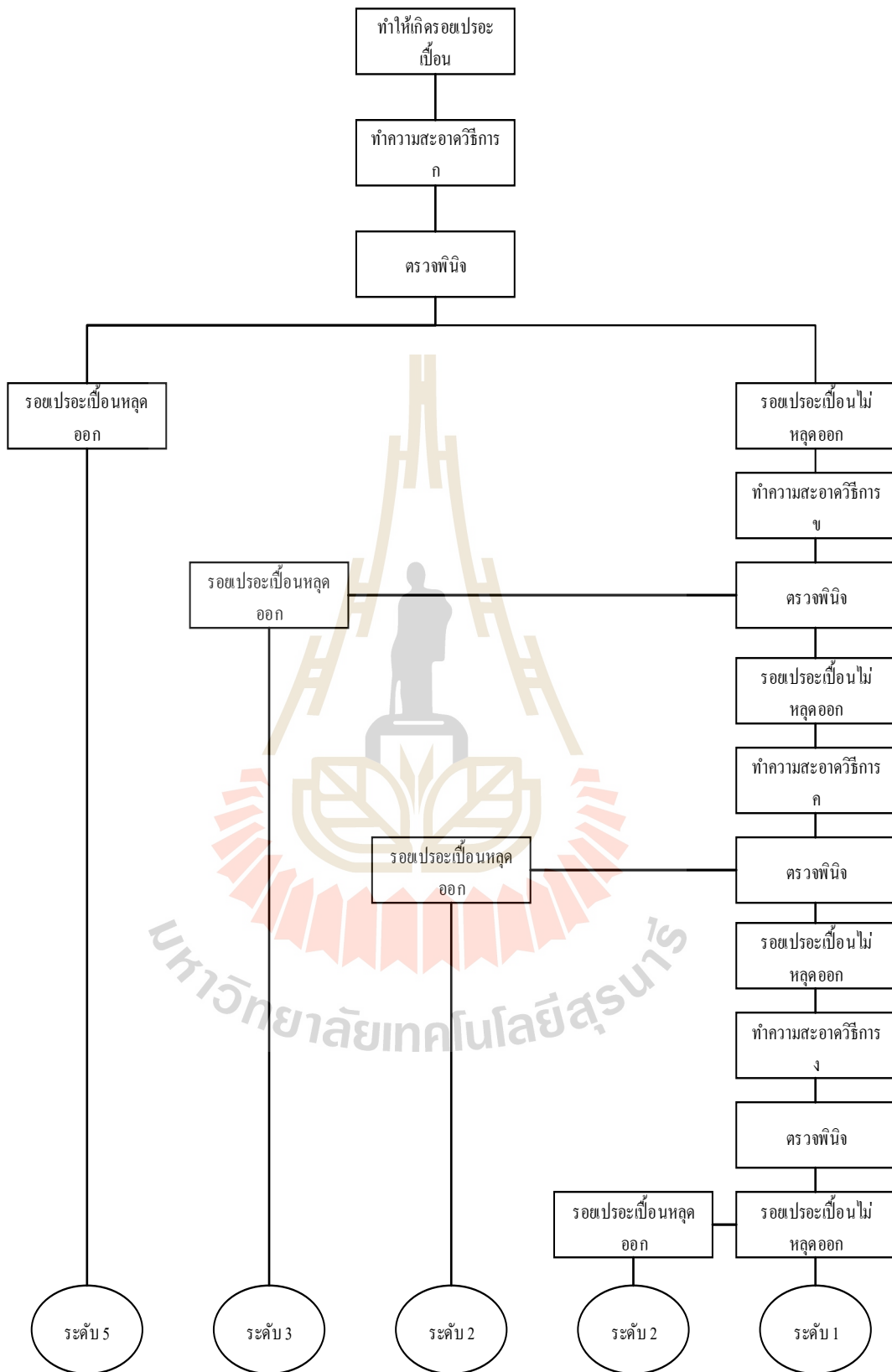
ระดับ 4 คือ ไม่ผ่าน ระดับ 5 และต้องล้างฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ด้วยน้ำยา ทำความสะอาดจากท้องตลาด (ยี่ห้อ ซันไลต์) ที่มีค่า pH 6.5-7.5 ถูด้วยฟองน้ำ ล้างด้วยน้ำเปล่า และเช็ดด้วยผ้า

ระดับ 3 คือ ไม่ผ่าน ระดับ 5 และ 4 แล้วต้องขัดฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกแบบเชิงกล ด้วยการขัดบนแท่นหมุน พร้อมทั้งใช้น้ำยาทำความสะอาดที่มีความเข้มข้น pH 9-10 (น้ำยาขัดห้องน้ำ) จากนั้นล้างด้วยน้ำเปล่าและเช็ดด้วยผ้า

ระดับ 2 คือ ไม่ผ่าน ระดับ 5, 4 และ 3 แล้วต้องแช่ฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกลงในกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำแบบไหลผ่านแล้วเช็ด

ระดับ 1 คือ ไม่ผ่าน ระดับ 5, 4, 3 และ 2 จัดให้อยู่ ระดับ 1





รูปที่ 3.9 การจำแนกผลการทดสอบความทนการประแ่ตอน

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเซรามิก มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Analysis)

4.1.1 ผลของซิลิกานาโน และMTES ต่อความหนืดของน้ำยาเคลือบTEOS:SiO₂:PDMS:MTES

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณซิลิกานาโน และ MTES ที่ใช้ในการเตรียมของน้ำยาเคลือบ Standard No.1 ถึง 24 และเทคนิคที่ใช้ในการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ส่วนเทคนิคการอบแห้ง ได้กล่าวในตารางที่ 3.3 บทที่ 3 โดยน้ำยาเคลือบ Standard No.1 ถึง 12 จะมีส่วนผสมซ้ำกันกับน้ำยาเคลือบ Standard No.13 ถึง 24 ซึ่งจะแตกต่างกันด้วยเทคนิคการเคลือบ อิทธิพลของซิลิกานาโน และMTES ต่อค่าความหนืดดังนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของซิลิกานาโน, MTES (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และเทคนิคการเคลือบสำหรับ Standard No.ต่าง ๆ ของน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES (อ้างอิงจากตารางที่ 3.3.)

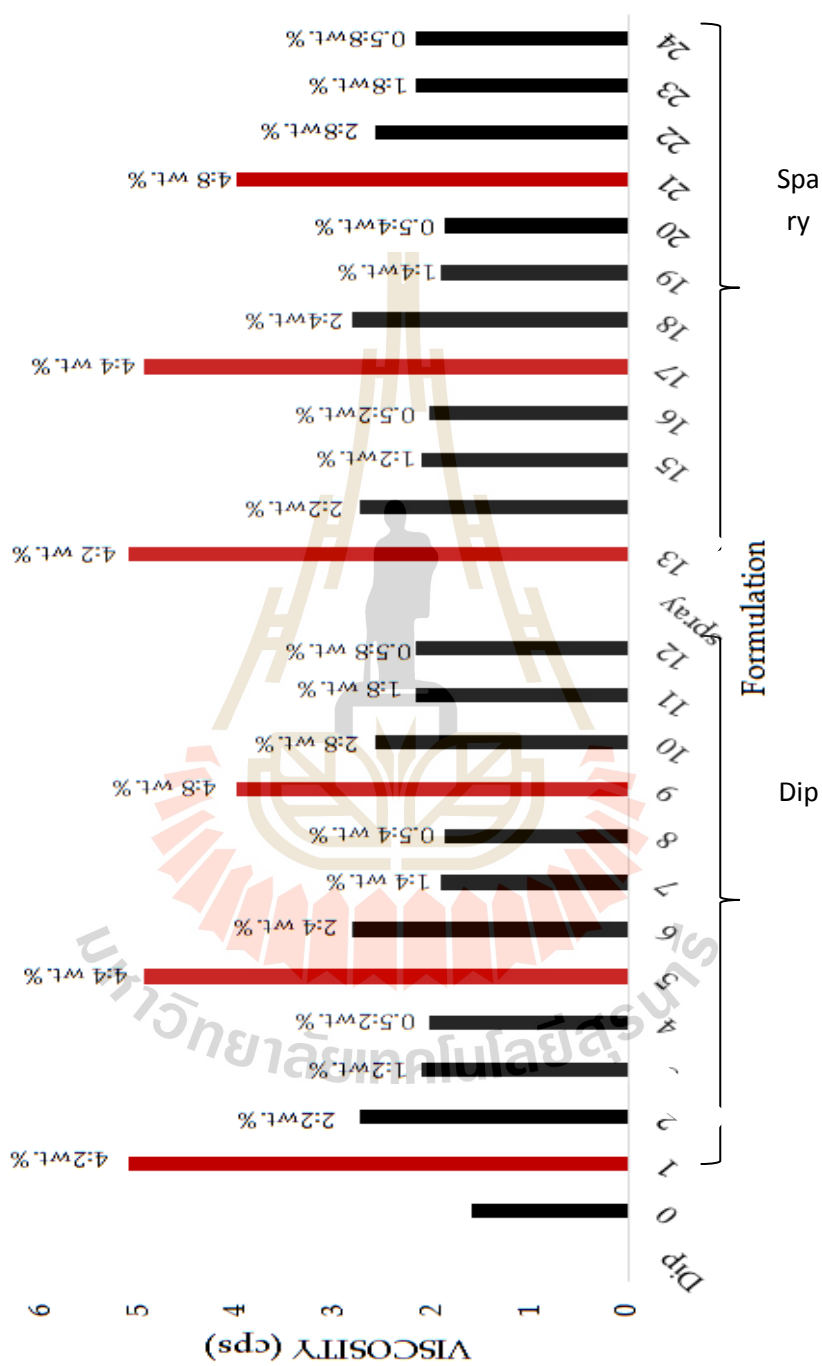
Standard No.	nano-silica (wt.%)	MTES (wt.%)	Coating method	Standard No.	nano-silica (wt.%)	MTES (wt.%)	Coating method
1	4.0	2.0	จุ่ม	13	4.0	2.0	สเปรย์
2	2.0	2.0	จุ่ม	14	2.0	2.0	สเปรย์
3	1.0	2.0	จุ่ม	15	1.0	2.0	สเปรย์
4	0.5	2.0	จุ่ม	16	0.5	2.0	สเปรย์
5	4.0	4.0	จุ่ม	17	4.0	4.0	สเปรย์
6	2.0	4.0	จุ่ม	18	2.0	4.0	สเปรย์
7	1.0	4.0	จุ่ม	19	1.0	4.0	สเปรย์
8	0.5	4.0	จุ่ม	20	0.5	4.0	สเปรย์
9	4.0	8.0	จุ่ม	21	4.0	8.0	สเปรย์
10	2.0	8.0	จุ่ม	22	2.0	8.0	สเปรย์
11	1.0	8.0	จุ่ม	23	1.0	8.0	สเปรย์
12	0.5	8.0	จุ่ม	24	0.5	8.0	สเปรย์

เมื่อปริมาณของซิลิกานาโนลดลงความหนืดของน้ำยาเคลือบลดลงอย่างเห็นได้ชัด จาก Standard No.พบว่าที่ Standard No. 1 5 13 และ 17 ให้ค่าความหนืดสูง ซึ่งทั้งหมดมีปริมาณซิลิกานาโนที่ 4.0 wt.% โดยที่มีค่าความหนืดประมาณ 5 เซนติสโตก(cSt) สาเหตุที่ความหนืดเพิ่มขึ้นเพราะว่าซิลิกานาโนทำหน้าที่เชื่อมขวาง (cross-linker) โดยสร้างพันธะกับ MTES ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไม่ชอบน้ำอยู่ (Chae et al. 2012) จากการเกิดปฏิกิริยา gelation ระหว่างซิลิกานาโน และ MTES หลังจากนั้นจึงเกิดโครงสร้างของซิลิกานาโนที่พื้นผิวมีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือ hydrophobic material (Samiey et al. 2014) แต่เมื่อพิจารณาจาก Standard No.9 และ 21 ที่ปริมาณซิลิกานาโนที่ 4.0 wt.% และ MTES ที่ 8.0 wt.% พบว่าค่าความหนืดของน้ำยาเคลือบลดลง และน้อยกว่าความหนืดของ Standard No. 1 5 13 และ 17

เมื่อพิจารณาผลของ MTES ต่อความหนืดแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ที่ปริมาณ MTES เท่ากับ 2.0 และ 4.0 wt.% และปริมาณของซิลิกานาโน 4.0 wt.% ในส่วนผสมของน้ำยาเคลือบ พบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมีความหนืดมีค่าใกล้เคียง 5 เซนติสโตก(cSt) อย่างไรก็ตาม

ก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ MTES เป็น 8.0 wt.% พบว่าความหนืดของน้ำยาเคลือบของ Standard No.9 และ 21 ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความหนืดของ Standard No. 5 และ 17 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณ MTES เป็น 8.0 wt.% แล้วความหนืดลดลงเป็นผลเนื่องจาก MTES มีปริมาณมากเกินไป ทำให้การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาสร้างพันธะระหว่างซิลิกานาโนกับ MTES ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงปริมาตรของ MTES ที่มีผลต่อการลดของปฏิกิริยา gelation ลดลง ซึ่งในช่วงระหว่าง 4.0 – 8.0 wt.% ทำโดยการคาดเดาเชิงสถิติด้วยโปรแกรม design-expert® software โดยจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.2

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าซิลิกานาโน และ MTES มีผลต่อความหนืดของน้ำยาเคลือบอย่างชัดเจนถึงแนวโน้มการลดลงของค่าความหนืดที่ส่งผลมาจากปริมาณนาโนซิลิกาที่ลดลงตามลำดับดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือก Standard No. ของน้ำยาเคลือบที่ Standard No. 1 2 3 และ 4 ซึ่งเป็น Standard No. ที่มีความแตกต่างของปริมาณซิลิกานาโน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าร้อยละของแสงส่งผ่านด้วยเครื่อง UV-visible spectroscopy ดังแสดงผลและวิเคราะห์ผลในหัวข้อ 4.1.2

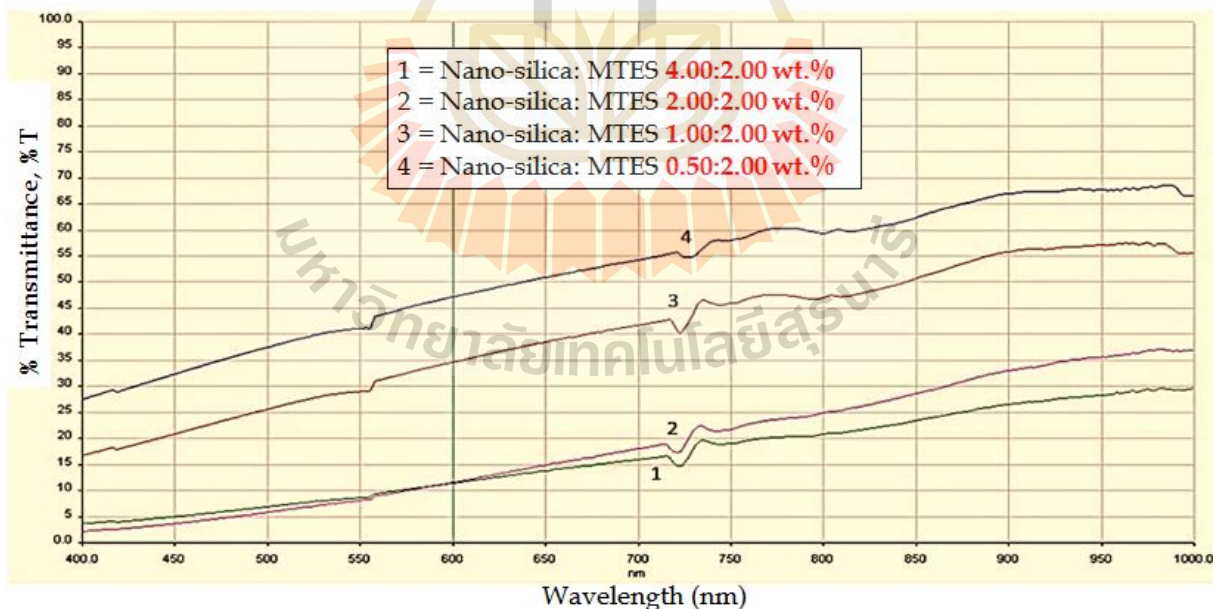


รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างความหนืดของน้ำยาเคลือบที่ Standard No. ต่างๆ 1 ถึง 24 (0 = blank คือ TEOS + ethanoI + HCl)

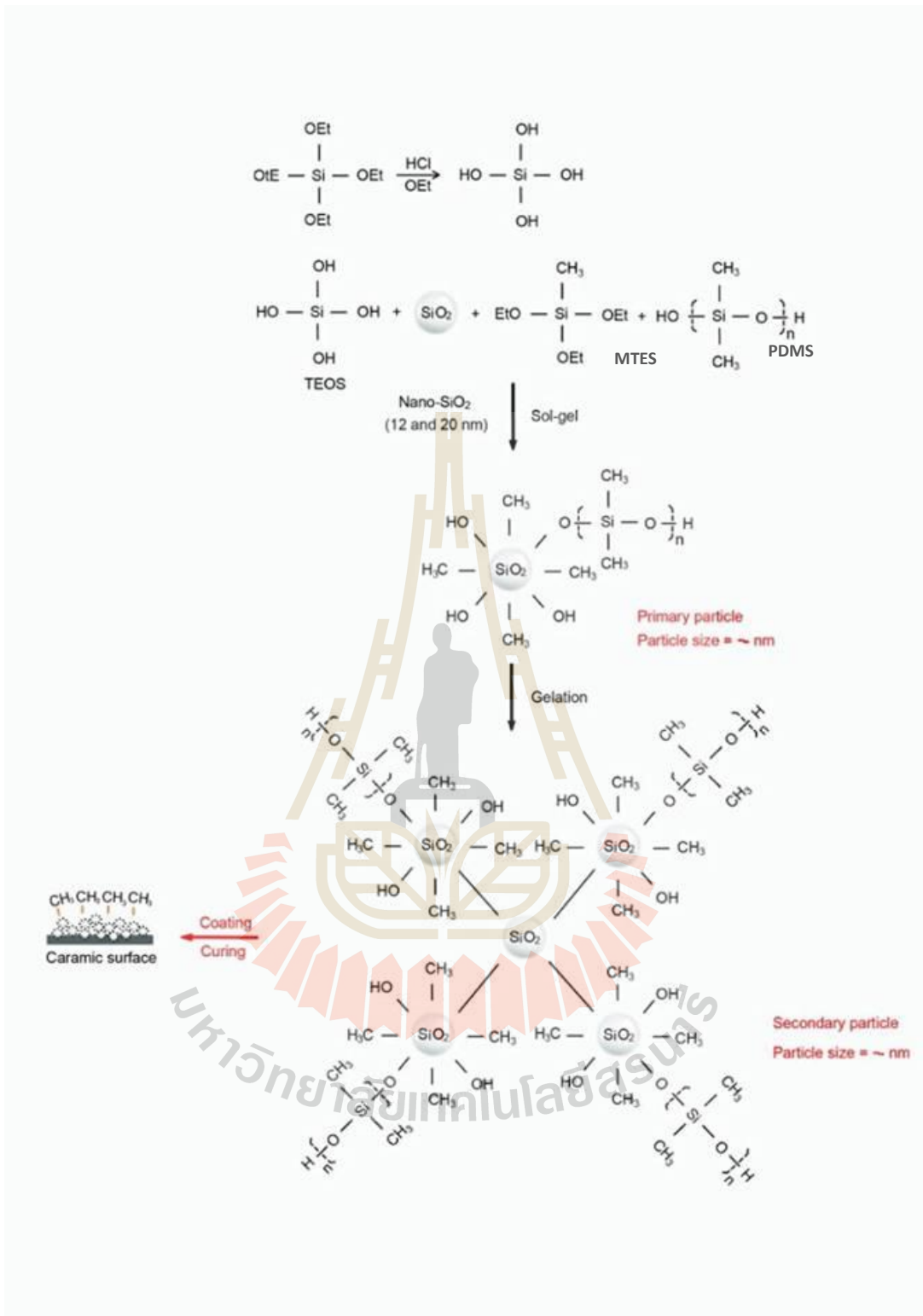
4.1.2 ผลของปริมาณซิลิกานาโนต่อร้อยละของปริมาณแสงส่องผ่าน (Transmittance, %T) ของน้ำยาเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

จากรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงของ Standard No. 1 2 3 และ 4 พบว่า Standard No. ที่มีปริมาณซิลิกานาโนสูงสุดเท่ากับ 4.0 wt.% ให้ร้อยละการส่องผ่านของแสงต่ำที่สุดในทุกช่วงคลื่น เมื่อปริมาณของซิลิกานาโนลดลงจาก 4.0 เป็น 2.0 1.0 และ 0.5 wt.% ตามลำดับ ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงผ่านเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ น้ำยาเคลือบที่ได้ในแต่ละ Standard No. มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงไม่เท่ากัน กล่าวคือน้ำยาเคลือบที่มีความหนืดสูงจะมีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงต่ำ หรือน้ำยาเคลือบที่มีความข้นหนืดสูงกว่าน้ำยาเคลือบที่มีความหนืดต่ำ โดยเป็นผลจากปฏิกิริยา gelation ระหว่างซิลิกานาโน และ MTES ที่มีโครงสร้างเป็นโครงข่ายจากการเชื่อมโยงของอนุภาคซิลิกานาโนและ MTES ที่มีพื้นผิวไม่ชอบน้ำจำนวนมากกว่า Standard No. ที่มีค่าความหนืดต่ำแสดงในรูปที่ 4.3 ส่วน Standard No. อื่น ๆ ไม่ได้รายงานเนื่องจากลักษณะของกราฟ UV-Vis spectrum แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนต่อไปจะกล่าวถึงค่ามุมสัมพัทธ์ของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ผลของปริมาณซิลิกานาโน และ MTES, ผลของเทคนิคการเคลือบ และผลเทคนิคการอบแห้ง ซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.3



รูปที่ 4.2 UV-Vis Spectrum ของน้ำยาเคลือบ Standard No. 1 2 3 และ 4



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพการเกิดโซลเจลและเจลเลชัน(Gelation)ระหว่างซิลิกานาโน และMTES

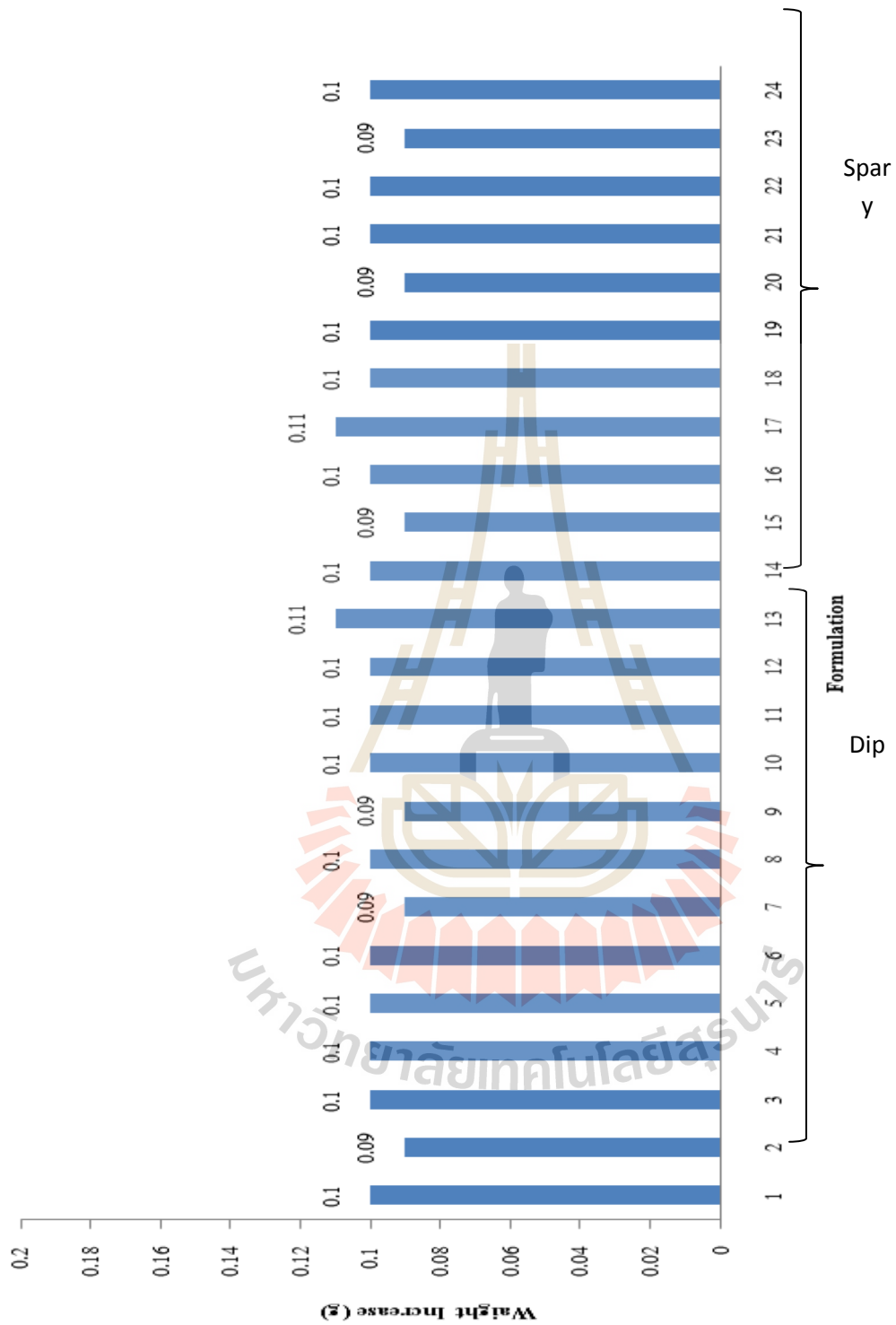
4.1.3 ผลของปริมาณซิลิกานาโนต่อค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

ในการเคลือบด้วยเทคนิคการจุ่มและการสเปรย์ทำให้พื้นผิวตัวอย่างเซรามิกมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มเคลือบอยู่ในช่วงร้อยละคิดเป็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.09 – 0.11 ดังแสดงในรูปที่ 4.4

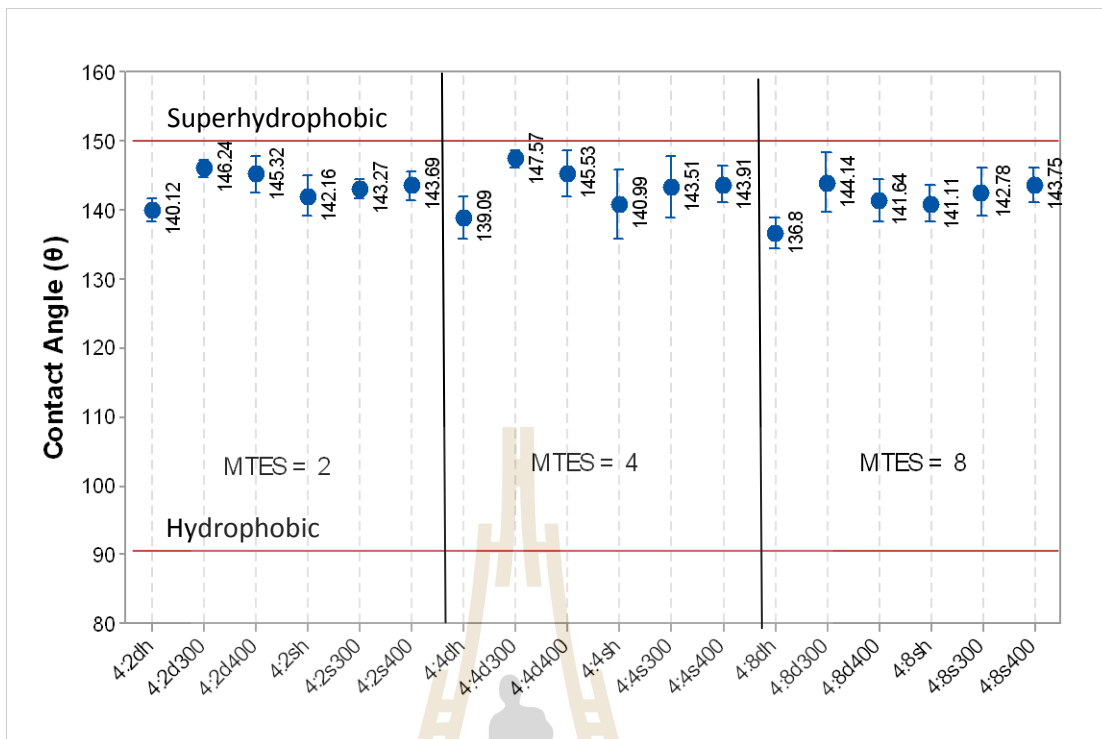
จากรูปที่ 4.5 โดยรูปที่ 4.5 (ก) แสดงให้เห็นว่าค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณของซิลิกานาโนสูงสุด 4.0 wt.% และปริมาณของ MTES เท่ากับ 2.0 4.0 และ 8.0 wt.% การเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบที่สัมผัสกับเทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้งนั้นพบว่าค่ามอดุลัสมีแนวโน้มอยู่ในทิศทางเดียวกัน สำหรับฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 2.0 4.0 และ 8.0 wt.% อย่างไรก็ตามฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% จะมีความมอดุลัสต่ำกว่าเล็กน้อยฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มี MTES เท่ากับ 2.0 และ 4.0 wt.% เนื่องจากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% มีความหนืดต่ำกว่าน้ำยาเคลือบที่มี MTES เท่ากับ 2.0 และ 4.0 wt.% เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของการเกิด gelation

เมื่อทำการพิจารณามอดุลัสของฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีรูปที่ 4.5 (ข) ปริมาณของซิลิกานาโนเท่ากับ 2.0 wt.% ค่ามอดุลัสมีแนวโน้มการลดลงเมื่อปริมาณ MTES เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณซิลิกานาโนต่อค่ามอดุลัสของตัวอย่างฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ซึ่งรูปที่ 4.6(ก) แสดงรูปทรงของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกก่อนเคลือบ และรูปที่ 4.6(ข) แสดงรูปทรงของหยดน้ำหลังเคลือบด้วยน้ำยาเคลือบ Standard No. 1 2 3 และ 4 ที่ปริมาณของซิลิกานาโนลดลงจาก 4.0 เป็น 2.0 1.0 และ 0.5 wt.% ตามลำดับ ด้วยการเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในปริมาณของ MTES เท่ากับ 2.0 wt.% จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่ามอดุลัสลดลงตามความหนืดแปรผันตามปริมาณของซิลิกานาโนที่ลดลง และดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.1.1 เมื่อปริมาณของซิลิกานาโนลดลงค่าความหนืดของน้ำยาเคลือบลดลง กรณีที่พื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่ไม่มีฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ค่ามอดุลัสเท่ากับ 42.5 องศา เมื่อมีฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ที่มีปริมาณของซิลิกานาโนสูงสุด 4.0 wt.% พบว่าค่ามอดุลัสเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเป็น 146.2±1 องศา (รูปที่ 4.6 (ข)) และค่ามอดุลัสเฉลี่ยลดลงเป็น 143.0±3 องศา (รูปที่ 4.6 (ค)) เมื่อปริมาณของซิลิกานาโนเท่ากับ 2.0 wt.% และค่ามอดุลัสเฉลี่ยลดลงต่อเนื่องเป็น 137.7±3.7 องศา (รูปที่ 4.6 (ง)) และ 131.0±5.2 องศา (รูปที่ 4.6 (จ)) เมื่อปริมาณของซิลิกานาโนเท่ากับ 1.0 wt.% และ 0.5 wt.% ตามลำดับ

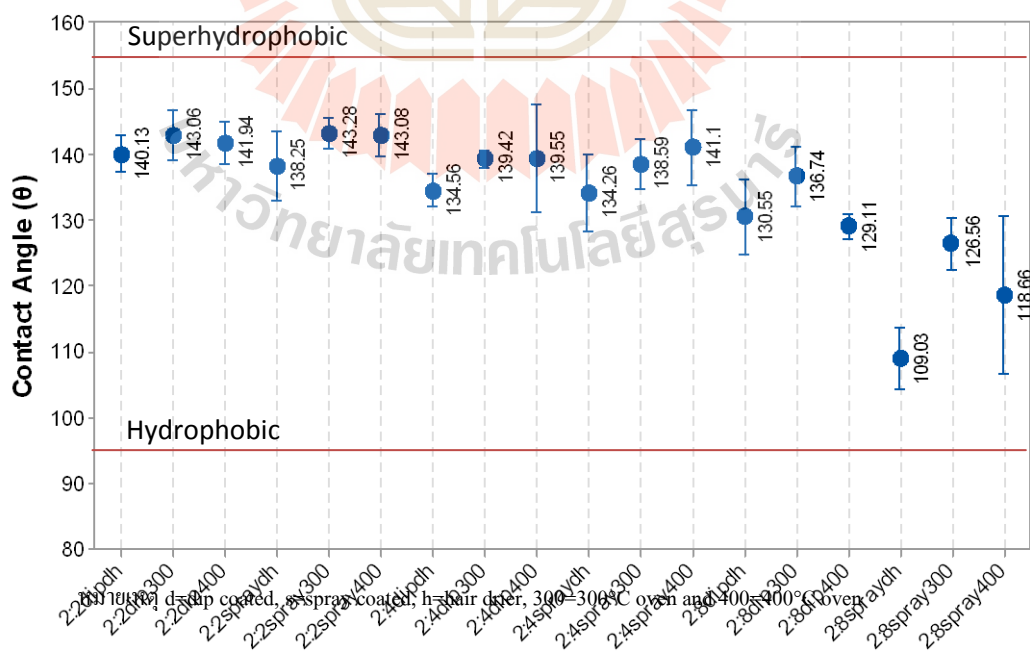


รูปที่ 4.4
กราฟ
ระหว่าง
น้ำหนักที่
เพิ่มขึ้นหลัง
การเคลือบ
ฟิล์มเคลือบ
บนพื้นผิว
ตัวอย่างเซรามิกที่
Standard
No.ต่างๆ 1
ถึง 24

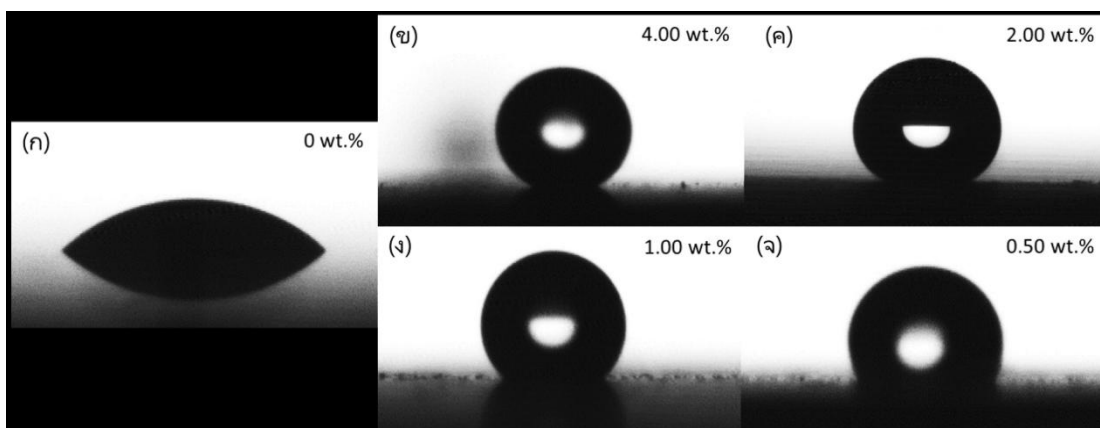


หมายเหตุ d=dip coated, s=spray coated, h=hair drier, 300=300°C oven and 400=400°C oven

รูปที่ 4.5 (ก)กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบต่างๆที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณ 4.0 wt.%



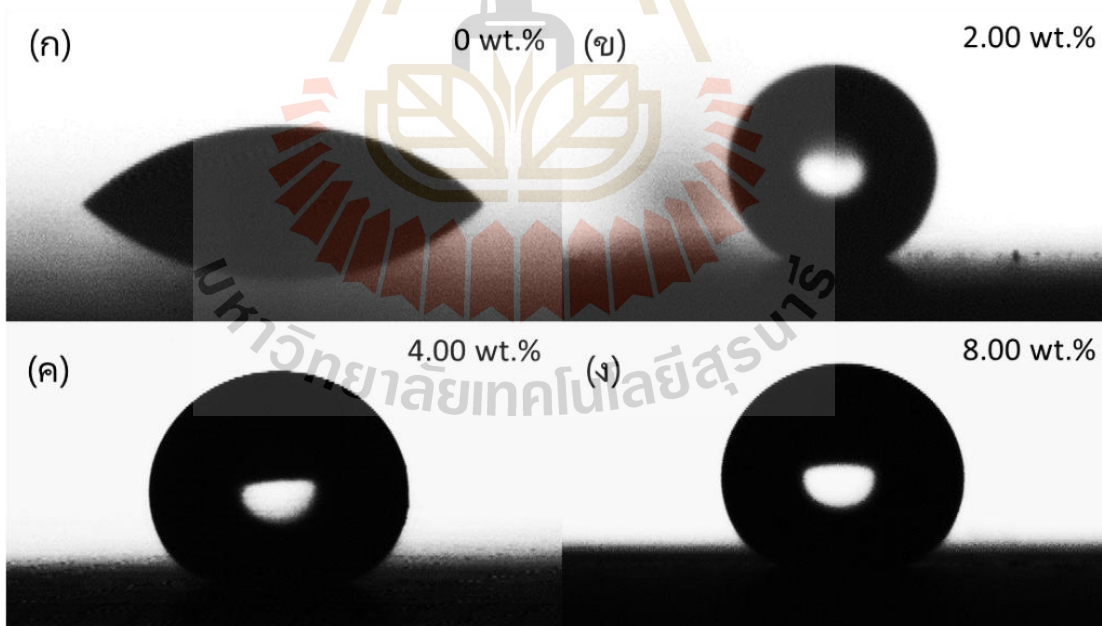
รูปที่ 4.5 (ข)กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบต่างๆที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณ 2.0 wt.%



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากเครื่อง water contact angle meter แสดงภาพถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่าง เซรามิกก่อนเคลือบ (ก) และหลังเคลือบด้วยฟิล์มของ Standard No.1 (ข), 2 (ค), 3 (ง) และ 4 (จ) โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซิลิกานาโนต่อปริมาณของ MTES ที่ 2.0 wt.% ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

4.1.4 ผลของ MTES ต่อค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของปริมาณของ MTES ต่อค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เป็นรูปแสดงรูปทรงของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกหลังเคลือบ น้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 2.0 4.0 และ 8.0 wt.% ด้วยการเคลือบแบบจุ่มที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเป็นฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของซิลิกานาโน เท่ากับ 4.0 wt.% รูปที่ 4.7(ก) เป็นภาพสำหรับกรณีที่พื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่ไม่มีฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 42.5 องศา รูปที่ 4.7(ข) แสดงฟิล์มเคลือบที่มีปริมาณ ของ MTES เท่ากับ 2.0 wt.% รูปที่ 4.7(ค) แสดงฟิล์มเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% และรูปที่ 4.7(ง) แสดงฟิล์มเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย เท่ากับ 146.2±1 147.5±1 และ 144.1±3.5 องศาตามลำดับ พบว่าในกรณีที่มีปริมาณ 8.0 wt.% ของ MTES มีปริมาณที่มากเกินไปจึงทำให้เกิดปฏิกิริยา gelation ย้อนกลับ ดังอธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ส่งผลให้น้ำยาเคลือบมีการยึดติดกับพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกได้ไม่ดีพอมีผลต่อค่ามุมสัมผัสทำให้ค่า มุมสัมผัสลดลง



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากเครื่อง water contact angle meter แสดงหยดน้ำบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ก่อนเคลือบฟิล์ม (ก) และหลังเคลือบฟิล์มโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ MTES 2.0 wt.% (ข), 4.0 wt.% (ค), 8.0 wt.% (ง) ต่อปริมาณของ ซิลิกานาโนที่ 4.0 wt.% ด้วย เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

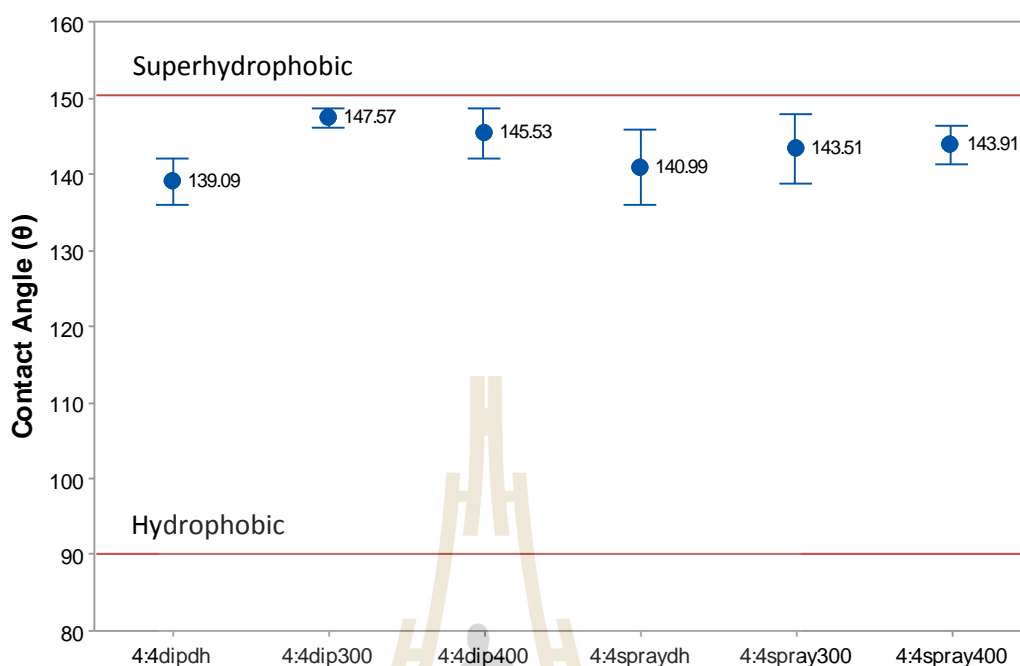
4.1.5 ผลของเทคนิคการเคลือบและเทคนิคการอบแห้งที่มีต่อค่ามอดุลัสของฟิล์มเคลือบ

TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟค่ามอดุลัสของตัวอย่างเซรามิกที่ทำการเคลือบด้วยฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และมีปริมาณของ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% พบว่าเทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 147.5±1 องศา และเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 145.5±2.7 องศา และการเป่าแห้งค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 139.1±2.4 องศา จึงกล่าวได้ว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบให้ค่ามอดุลัสสูงสุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบพบว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบฟิล์มเคลือบจะให้ความขรุขระของอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร แต่มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.3

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเคลือบที่ได้จากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และมีปริมาณของ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% และผ่านการเคลือบด้วยการ สเปรย์ให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 143.9±2 องศา เมื่ออบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และเมื่ออบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 143.5±3.6 องศา และเมื่อเป่าแห้งให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 140.9±4 องศา เมื่อทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบพบว่าเทคนิคการสเปรย์จะให้ฟิล์มเคลือบที่มีการกระจายตัวของอนุภาคบนฟิล์มเคลือบที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกดีกว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบ ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.3

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของเทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้งที่มีผลต่อค่ามอดุลัสเฉลี่ยของฟิล์มเคลือบ ประกอบกับการพิจารณาช่วงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) พบว่าถ้าใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ จะได้ค่ามอดุลัสสูงที่สุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้เทคนิคการสเปรย์เคลือบ จะได้ค่ามอดุลัสสูงที่สุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสที่ได้มีความใกล้เคียงกับการอบแห้งที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคการจุ่มเคลือบและอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสค่ามอดุลัสสูงกว่าเทคนิคการสเปรย์เคลือบเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.8



หมายเหตุ d=dip coated, s=spray coated, h=hair drier, 300=300°C oven and 400=400°C oven

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของฟิล์มเคลือบจากน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และปริมาณ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่มและเทคนิคการสเปรย์เคลือบ และใช้เทคนิคการอบแห้งโดยการเป่าลมร้อน การอบแห้งที่ 300 องศาเซลเซียส และการอบแห้ง 400 องศาเซลเซียส

4.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Analysis)

ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มเคลือบจาก Standard No.1 - 24 แสดงตามรูปที่ 4.9 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์เบื้องต้นได้ดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณของซิลิกานาโน ทำให้ค่าความหนืดของน้ำยาเคลือบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% จะส่งผลให้ความหนืดของน้ำยาเคลือบลดลง โดยค่าร้อยละของแสงส่องผ่านจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของซิลิกานาโน
2. ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของซิลิกานาโน
3. สำหรับเทคนิคการเคลือบฟิล์มพบว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบจะทำให้ได้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่สูงสุดที่ปริมาณซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และปริมาณ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เทคนิคการเคลือบด้วยการสเปรย์จะทำให้ได้ค่ามุมสัมผัส

เฉลี่ยที่ปริมาณซิลิกานาโนเท่ากับ 4.0 wt.% และปริมาณ MTES เท่ากับ 4.0 wt.% เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

4. น้ำยาเคลือบที่ให้ค่ามุมสัมผัส สูงที่สุดคือ น้ำยาเคลือบ Standard No.ที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนของ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เท่ากับ 7.00:4.00:2.75:4.00 wt.% เมื่อทำการเคลือบด้วยเทคนิคการจุ่ม ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ 147.5±1.1 องศา โดยสามารถดูรายละเอียดของค่ามุมสัมผัสทุก Standard No.ได้ในรูปที่ 4.9 และรายละเอียดของข้อมูลทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก

จากข้อสรุปดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) เพื่อลดขั้นตอนการทำตัวอย่างการทดลอง และใช้แบบข้อมูลป้อนกลับสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical data analysis) ผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำให้คาดเดาผลของตัวแปรในช่วงต่างๆ ที่ไม่ได้ทำการทดลองให้เกิดความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ และเป็นการยืนยันว่าการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical data analysis) ผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.2

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่ามัมส์ผสมเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software

การทำงานวิจัยนี้ต้องการผลการทดลองที่น่าเชื่อถือซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือการเก็บข้อมูลที่ตีรวมถึงการวิเคราะห์ทางสถิติและการแปลผลที่ถูกต้อง ขบวนการทางสถิติช่วยในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวิจัย ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และบอกระดับความมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มาสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้มากน้อยเพียงใด (ชัชวาลย์, 2012) เพื่อลดขั้นตอนการทำตัวอย่างการทดลองหรือช่วยในการวิเคราะห์สาเหตุของตัวแปรในช่วงต่างๆที่ไม่ได้ทำการทดลองให้เกิดความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือสูง เพราะฉะนั้นการเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือดังกล่าวจึงสามารถวิเคราะห์ผลได้ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical data analysis) ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Design-Expert® Software สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ

4.2.1 การวิเคราะห์ค่ามัมส์ผสมเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) ของปริมาณซิลิกานาโน และ MTES เทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้งต่อฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software version 8.0 ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามัมส์ผสมผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณ ซิลิกานาโน (A), ปริมาณ MTES (B), เทคนิคการเคลือบ (C) และเทคนิคการอบแห้ง (D) พบว่าปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่ามัมส์ผสม ที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญคือ A, B, C, AB, AC, AD, BC, BD, CD, A², B² ปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่า F-value จะมีค่ามาก โดยโปรแกรมจะคำนวณค่า p-value หรือ Prob>F ถ้าค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นหรือ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่หนึ่ง ๆ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามด้วยความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับ 95% แต่ถ้า p-value มีค่ามากกว่า 0.1 ของปัจจัยนั้นหรือ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่หนึ่ง ๆ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ A (ปริมาณ ซิลิกานาโน) รองลงมาคือ B (ปริมาณ MTES), C (เทคนิคการเคลือบ)ตามลำดับ ส่วนปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่ามัมส์ผสมคือ D (เทคนิคการอบแห้ง) แสดงว่าการทำให้ฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES แห้งโดยการใส่เป่าแห้ง, อบที่อุณหภูมิ 300 หรือ 400 องศาเซลเซียส จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมัมส์ผสมของน้ำบนฟิล์มเคลือบ

ตารางที่ 4.2 ANOVA for response surface quadratic model analysis of variance

Source	sum of squares	Df	mean square	F-value	p-value prob > F
Model	1.611E+005	16	10017.24	58.93	<0.0001 (signific)
A-ซิลิกา นาโน	70418.27	1	70418.27	412.02	< 0.0001
B-MTES	37043.54	1	37043.54	216.75	< 0.0001
C-coating tech	12646.44	1	12646.44	74.00	< 0.0001
D-drying tech	787.50	2	393.75	2.30	0.1014
AB	14719.53	1	14719.53	86.13	< 0.0001
AC	5219.54	1	5219.54	30.54	< 0.0001
AD	1250.18	2	625.09	3.66	0.0268
BC	2250.95	1	2250.95	13.17	0.0003
BD	6220.71	2	3110.35	18.20	< 0.0001
CD	5034.81	2	2517.40	14.73	< 0.0001
A ²	4720.31	1	4720.31	27.62	< 0.0001
B ²	828.05	1	828.05	4.85	0.0284
Residual	58621.54	343	170.91	12.39	<0.0001 (signific)
lack of fit	41209.37	55	749.26		
pure error	17412.18	288	60.46		
cor total	2.198E+005	359			

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software version 8.0 ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) สามารถ สร้างสมการเพื่อทำนายค่าคุณสมบัติ ของฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ซึ่งแสดงในสมการที่ (4-1) ถึง (4-6) จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวมีประโยชน์สำหรับทำนายค่าคุณสมบัติของฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ในช่วงที่ไม่ศึกษาหรือไม่ได้สังเคราะห์ฟิล์มเคลือบ เช่นถ้าใช้ปริมาณซิลิกา นาโนที่ 3.0 wt.% และปริมาณ MTES ที่ 5.0 wt.% จะได้ฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ที่มีค่าคุณสมบัติเท่าไร โดยหลักการคำนวณคือ แทนค่าปริมาณซิลิกา นาโนที่ = 3.0 wt.% และปริมาณ MTES ที่ = 5.0 wt.% ในสมการทำนายจะได้ค่าคุณสมบัติของฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เป็นต้น

1) สมการทำนายค่าคุณสมบัติ ของฟิล์มที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้งคือ

$$\begin{aligned} \text{มูมสัมพัทธ์} &= 111.43 + 16.90 \square Si_2O_2(\%) - 2.15 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-1)$$

2) สมการทำนายค่ามูมสัมพัทธ์ ของฟิล์มที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} \text{คีมูมสัมพัทธ์} &= 118.26 + 17.07 \square Si_2O_2(\%) - 5.12 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-2)$$

3) สมการทำนายค่ามูมสัมพัทธ์ ของฟิล์มที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} \text{คีมูมสัมพัทธ์} &= 113.38 + 19.93 \square Si_2O_2(\%) - 6.06 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-3)$$

4) สมการทำนายค่ามูมสัมพัทธ์ ของฟิล์มที่เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้งคือ

$$\begin{aligned} \text{มูมสัมพัทธ์} &= 114.01 + 11.22 \square Si_2O_2(\%) - 0.14 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-4)$$

5) สมการทำนายค่ามูมสัมพัทธ์ ของฟิล์มที่เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสคือ

$$\begin{aligned} \text{มูมสัมพัทธ์} &= 136.31 + 11.39 \square Si_2O_2(\%) - 3.11 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-5)$$

6) สมการทำนายค่ามูมสัมพัทธ์ ของฟิล์มที่เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสคือ

$$\begin{aligned} \text{มูมสัมพัทธ์} &= 132.20 + 14.25 \square Si_2O_2(\%) - 4.05 \square MTES(\%) + 1.91 \square Si_2O_2(\%) \square MTES(\%) \\ &- 2.94 \square Si_2O_2(\%)^2 - 0.41 \square MTES(\%)^2 \end{aligned} \quad (4-6)$$

4.2.2 การประเมินความน่าเชื่อถือสมมุติฐานการวิเคราะห์ด้วย ANOVA

เนื่องจากการ วิเคราะห์ความแปรปรวนตั้งอยู่บนสมมุติฐานสำคัญ 2 ข้อคือ ข้อที่ 1) ส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด (Residual ; e_{ij}) ที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และข้อที่ 2) ความแปรปรวนทุกระดับของตัวแปรต้นมีค่าคงตัว ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจในผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ที่ได้ข้างต้นถูกต้องจึงทำการตรวจสอบสมมุติฐานดังกล่าว (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

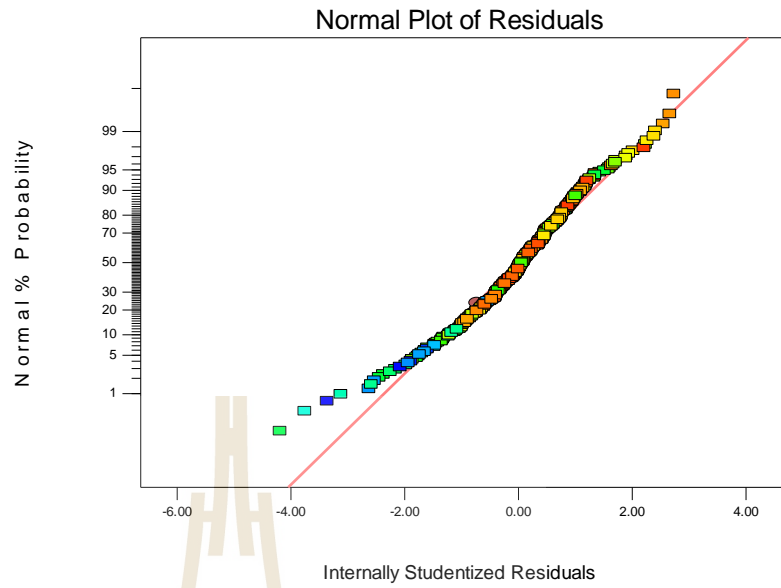
การวิเคราะห์ทางสถิติเป็นการกล่าวถึงโอกาสหรือความน่าจะเป็นของสมมุติฐาน ภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด โดยทั่วไปจะกำหนดระดับความน่าเชื่อถือไว้ที่ 95% หรืออาจมีการกล่าวถึงค่า p มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 แสดงว่ามีโอกาสที่จะสรุปผิดพลาดที่ 5% บอกถึงความน่าจะเป็นตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ และเป็นระดับของความผิดพลาดที่ยอมรับเป็นมาตรฐาน (ชัชวาลย์,2012) การวิเคราะห์ด้วย ANOVA เป็นการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (Variance) เราเรียกว่า “Analysis of Variance” หรือเรียกง่าย ๆ ว่า ANOVA การประเมินความน่าเชื่อถือของสมมุติฐาน ANOVA ทำได้โดยการตรวจสอบสมมุติฐาน 2 ข้อ ได้แก่สมมุติฐานข้อ 1 ทำได้โดยการสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability plot) และวิธีตรวจสอบสมมุติฐานข้อ 2 ทำได้โดยการตรวจสอบโดยการสร้างกราฟส่วนตกค้างกับส่วนที่ถูกฟิต (ปารเมศ ชูติมา,2545)

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟ normal probability plot ของค่ามุมสัมพันธ์ จากการพลอตจะเห็นได้ว่าค่าข้อมูลที่ได้เป็นการแจกแจงแบบปกติ สังเกตได้จากจุดข้อมูลทั้งหมดถูกปกคลุมโดยเส้นตรง จึงแสดงสมมุติฐานการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ข้อที่ 1 ถูกต้องกล่าวไว้คือ ส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด (Residual ; e_{ij}) ที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 เป็นผลยอมรับได้

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟส่วนตกค้างของมุมสัมพันธ์กับมุมสัมพันธ์ส่วนที่ถูกฟิต จากกราฟจะเห็นได้ว่า กราฟไม่มีรูปทรงใดๆ (pattern) แสดงได้ว่าการสมมุติฐาน ANOVA ข้อที่ 2 ถูกต้อง

Design-Expert® Software
contact angle

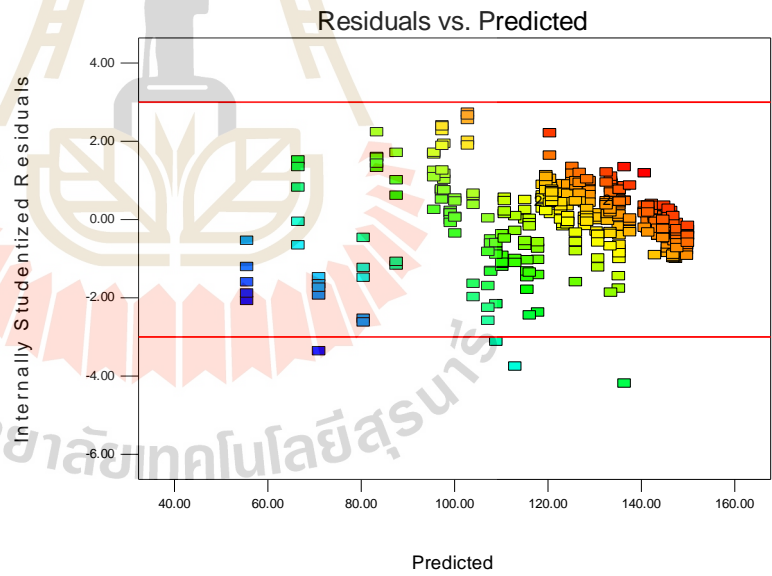
Color points by value of
contact angle:



รูปที่ 4.10 กราฟระหว่าง % normal probability และ internally studentized residuals

Design-Expert® Software
contact angle

Color points by value of
contact angle:

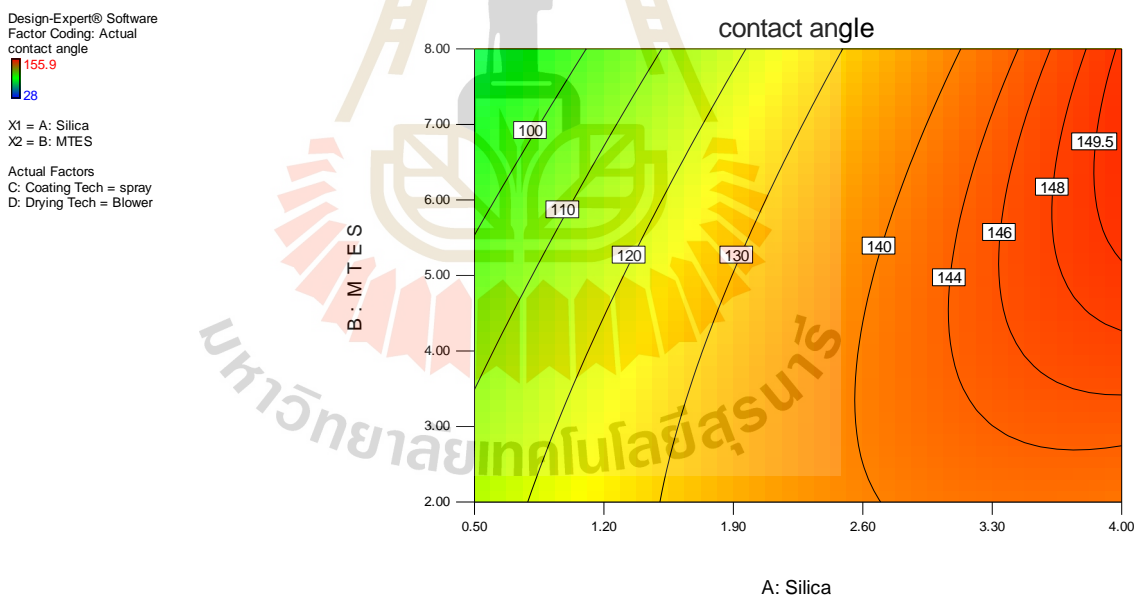


รูปที่ 4.11 กราฟระหว่าง internally studentized residuals และ predicted

4.2.3 การวิเคราะห์ contour plot จากสมการทำนายค่ามุมสัมผัส ที่ (4-1) ถึง (4-6)

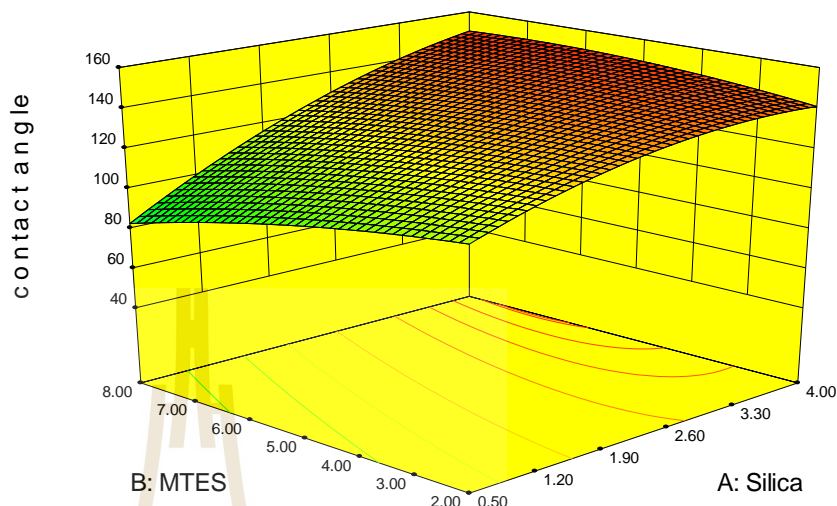
การวิเคราะห์กราฟ contour plot จากค่ามุมสัมผัส ของฟิล์ม TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ที่ปัจจัยศึกษาคือ ปริมาณของซิลิกานาโน , MTES, เทคนิคเคลือบ และเทคนิคการอบแห้ง สามารถอธิบายผลได้ดังต่อไปนี้

1. กราฟ contour plot แสดงค่ามุมสัมผัส จากสมการทำนายที่ (4-1) ของปริมาณซิลิกานาโน และ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบสเปรย์ และเทคนิคการอบแห้งด้วยเครื่องเป่า แสดงดังรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่าปริมาณของซิลิกานาโน และ MTES ส่งผลกระทบต่อค่ามุมสัมผัสอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อปริมาณของซิลิกานาโน และ MTES เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยผลของซิลิกานาโนสอดคล้องกับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.3 จากรูปที่ 4.12 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.13 ภาพกราฟ contour (3มิติ) แสดงค่ามุมสัมผัสให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดจากการทำนายของสมการที่ (4-1) คือ 149.5 องศา ซึ่งค่ามุมสัมผัสดังกล่าวอยู่ในช่วงประมาณปริมาณซิลิกานาโน 3.3 – 4.0 wt.% และปริมาณ MTES 5.0 – 8.0 wt.%



รูปที่ 4.12 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-1) ที่เคลือบด้วยการเคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง

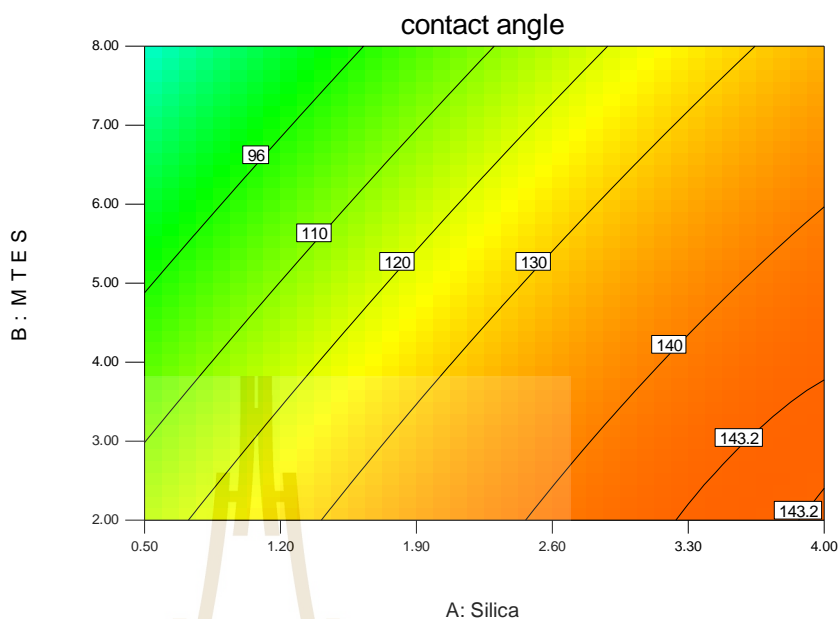
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = spray
 D: Drying Tech = Blower



รูปที่ 4.13 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-1) ที่เคลือบด้วยการเคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง

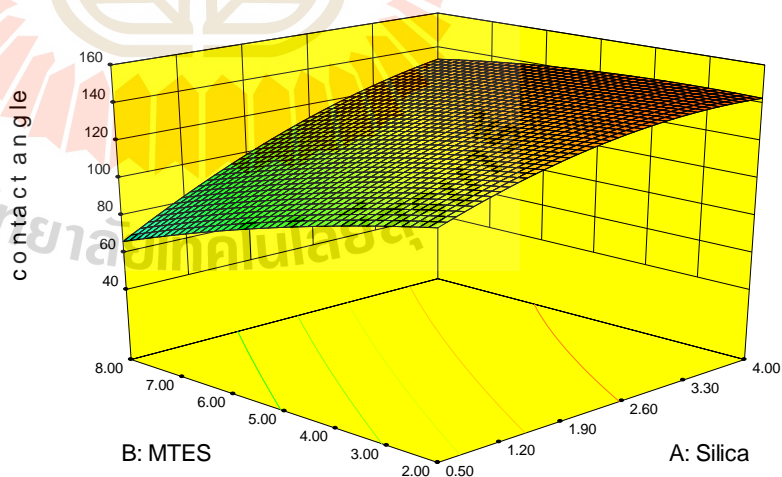
2. กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัสจากสมการทำนายที่ (4-2) ของปริมาณซิลิกาโนและปริมาณ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบสเปรย์ และเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.14 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.15 ภาพกราฟ contour (3 มิติ) แสดงค่ามุมสัมผัส อธิบายได้ว่าปริมาณของซิลิกาโนเพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นในทางตรงข้ามปริมาณของ MTES เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสกลับลดลง โดยซิลิกาโนและ MTES สอดคล้องกับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.1.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากการทำนายจะเห็นว่าปริมาณ MTES มากกว่า 4.0 wt.% ส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสมีค่าที่ลดลง

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = spray
 D: Drying Tech = Oven 300C



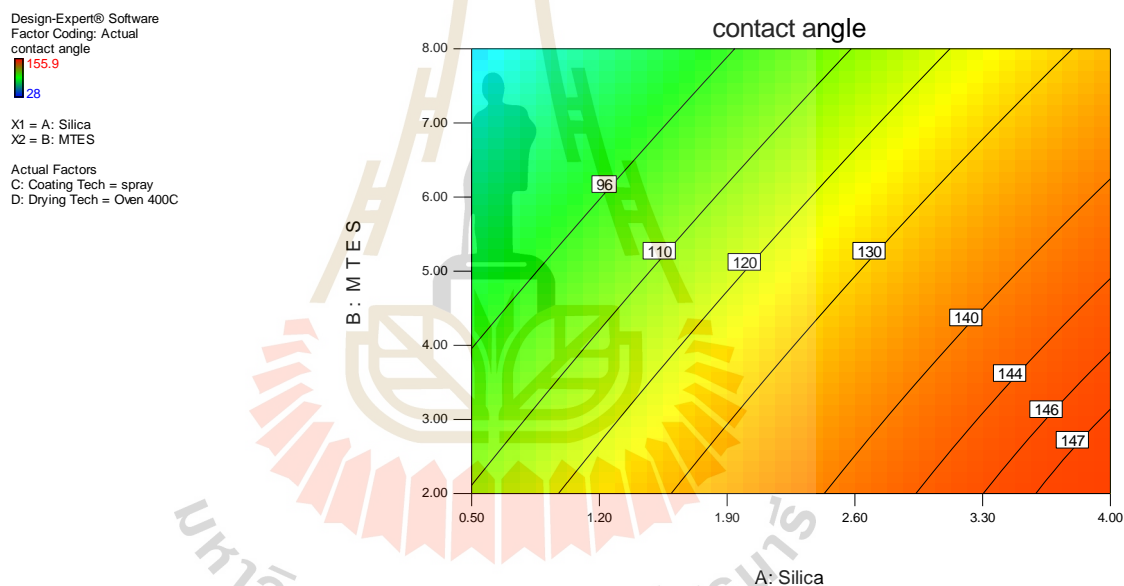
รูปที่ 4.14 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-2) ที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = spray
 D: Drying Tech = Oven 300C



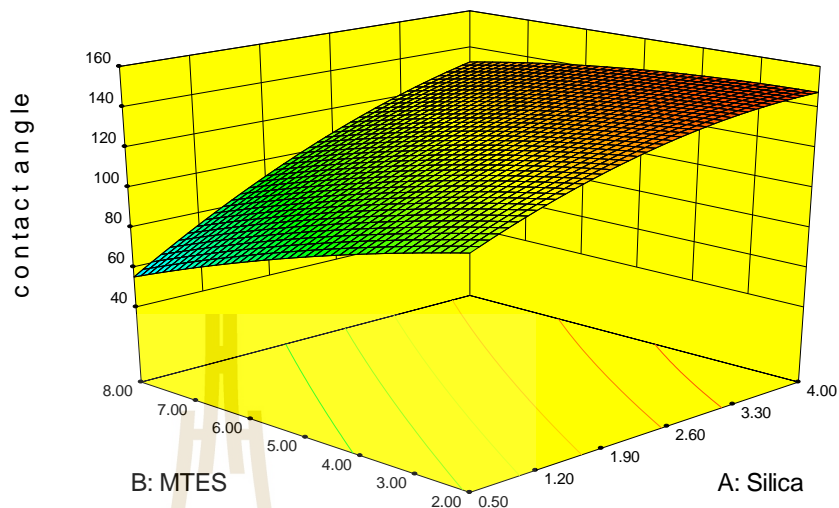
รูปที่ 4.15 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-2) ที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

3. กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-3) ของปริมาณซิลิกา นาโน และปริมาณ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบสเปรย์ และเทคนิคการอบแห้งที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.16 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.17 ภาพกราฟ contour(3มิติ) แสดงค่ามุมสัมผัส พบว่าปริมาณของซิลิกา นาโนเพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ในทาง ตรงข้ามปริมาณของ MTES เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัส กลับลดลง ซึ่งการอธิบายได้เหมือนกับข้อที่ 2 ข้างต้น ค่ามุมสัมผัสสูงสุดจากการทำนายของสมการที่ (4-3) คือ ประมาณ 147.0 องศา โดยค่ามุม สัมผัสดังกล่าวอยู่ในช่วงประมาณของปริมาณซิลิกา นาโนเท่ากับ 3.3 – 4.0 wt.% และปริมาณ MTES เท่ากับ 2.0 – 3.0 wt.%




รูปที่ 4.16 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-3) ที่เคลือบแบบสเปรย์ อบแห้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

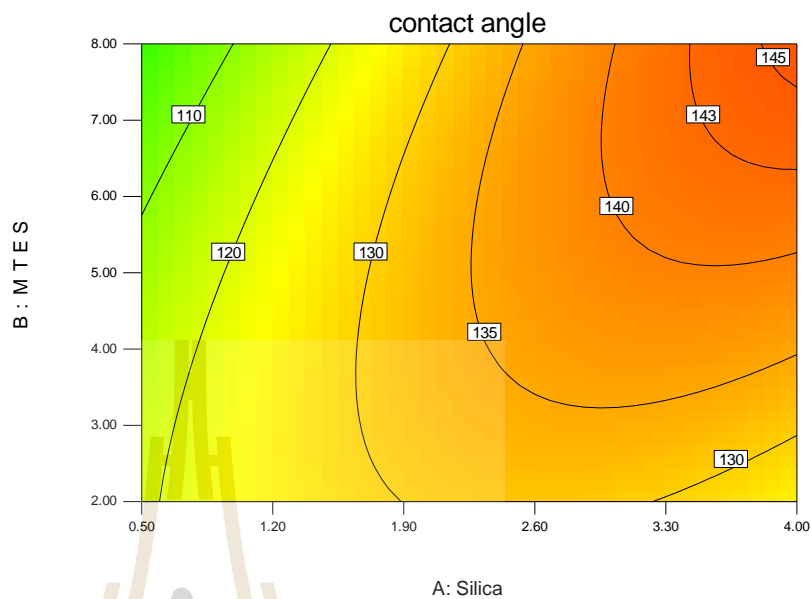
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = spray
 D: Drying Tech = Oven 400C




รูปที่ 4.17 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-3) ที่เคลือบแบบสเปรย์
 อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

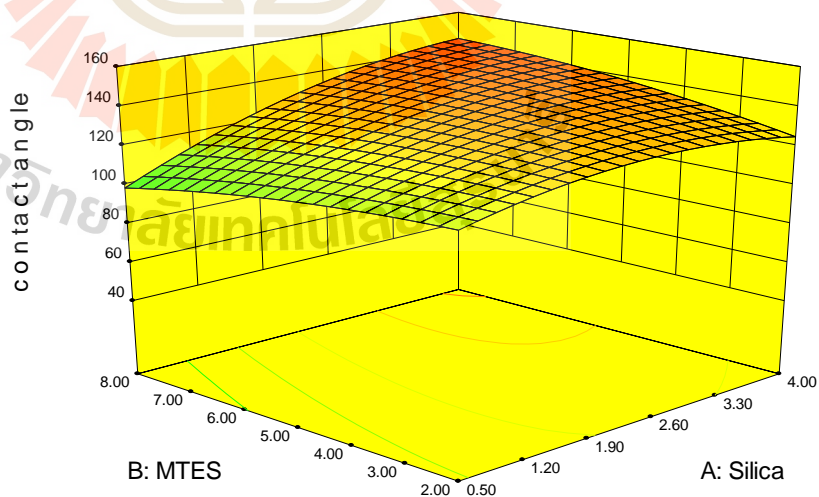
4. กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-4) ของปริมาณซิลิกานา-
 โน และปริมาณ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคการอบแห้งด้วย
 เครื่องเป่า แสดงดังรูปที่ 4.18 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.19 ภาพกราฟ contour (3มิติ)
 แสดงค่ามุมสัมผัสพบว่าเมื่อปริมาณของซิลิกานาโน และปริมาณ MTES เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสจะ
 เพิ่มขึ้น โดยปริมาณซิลิกานาโนสอดคล้องกับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.3 และปริมาณ MTES
 สอดคล้องกับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.4 ให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดจากการทำนายของสมการที่ (4-4)
 คือ ประมาณ 145.0 องศา โดยค่ามุมสัมผัสดังกล่าวอยู่ในช่วงประมาณของปริมาณซิลิกานาโน
 เท่ากับ 3.3 – 4.0 wt.% และปริมาณ MTES 7.0 – 8.0 wt.%

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle

 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = dip
 D: Drying Tech = Blower



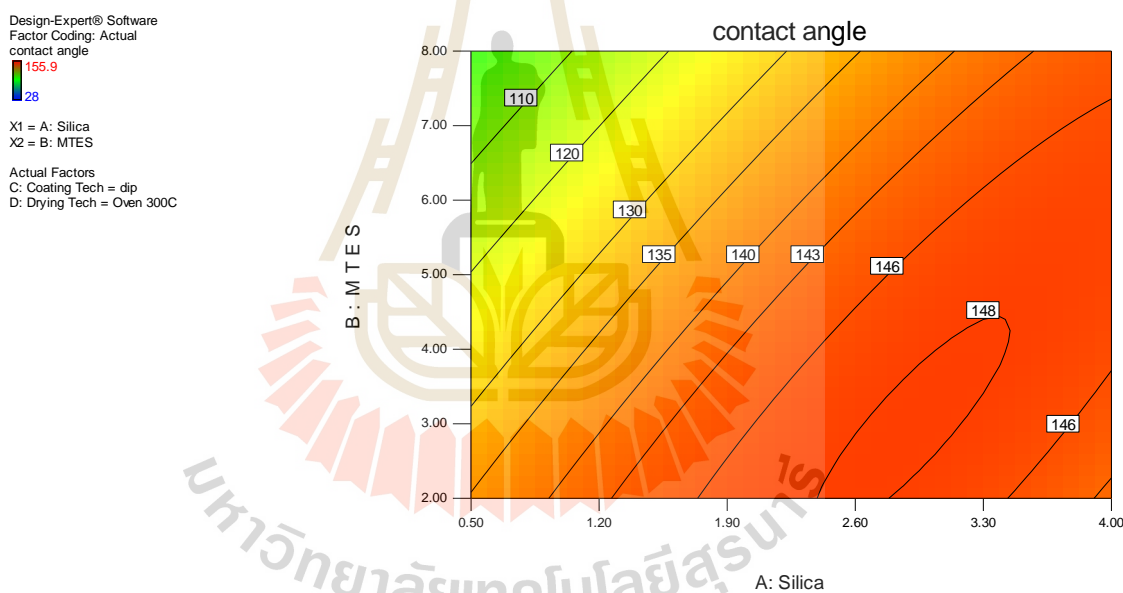
รูปที่ 4.18 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-4) ที่เคลือบแบบจุ่ม อบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle

 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = dip
 D: Drying Tech = Blower



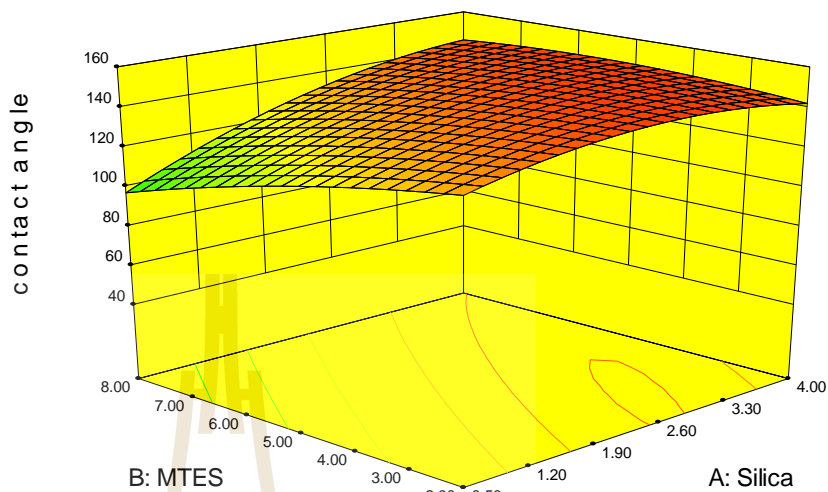
รูปที่ 4.19 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-4) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง

5. กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัสทำนายจากสมการที่ (4-5) ของปริมาณซิลิกาnano และปริมาณ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.20 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.21 ภาพกราฟ contour (3มิติ) แสดงค่ามุมสัมผัส พบว่าปริมาณของซิลิกา nano เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ปริมาณของ MTES เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสลดลง แต่การลดลงนั้นส่งผลไม่มากเพราะเส้นของค่ามุมสัมผัสที่ได้ครอบคลุมถึงปริมาณของ MTES ในทุกช่วงซึ่งครอบคลุมสูงสุดบนเส้น 146.0 องศาตรงกับปริมาณของ MTES เท่ากับ 7.0 กรัม โดยภาพรวมค่ามุมสัมผัสสูงสุดจากการทำนายของสมการที่ (4-5) คือ ประมาณ 148.0 องศา โดยค่ามุมสัมผัสดังกล่าวอยู่ในช่วงประมาณของปริมาณซิลิกา nano เท่ากับ 2.0 –3.3 wt.%



รูปที่ 4.20 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-5) ที่เคลือบแบบจุ่มอบแห้งที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

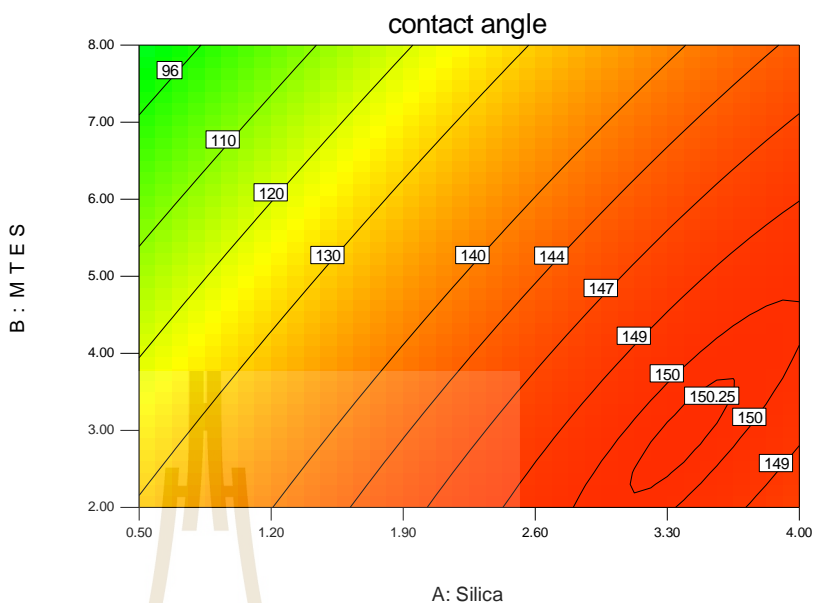
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = dip
 D: Drying Tech = Oven 300C



รูปที่ 4.21 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-5) ที่เคลือบแบบจุ่ม
 อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

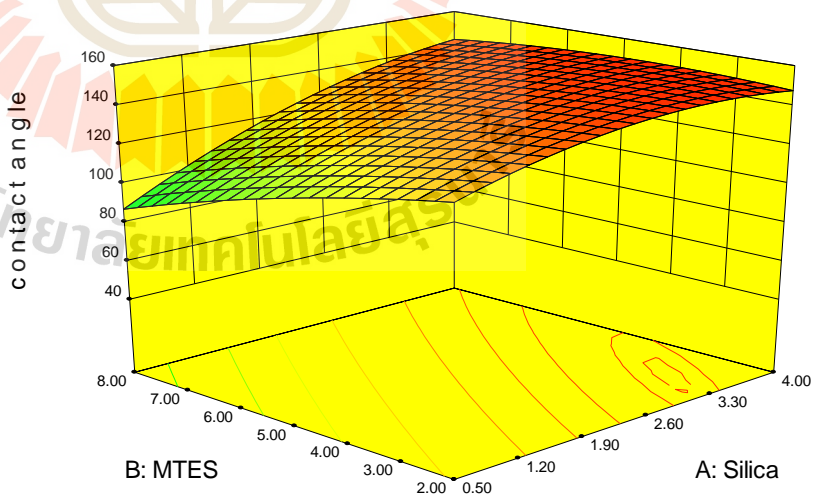
6. กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัสทำนายจากสมการที่ (4-6) ของปริมาณซิลิกานาโน และปริมาณ MTES ที่ปริมาณต่างกัน เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม และเทคนิคอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.22 ภาพกราฟ contour (2มิติ) และรูปที่ 4.23 ภาพกราฟ contour (3มิติ) แสดงค่ามุมสัมผัสพบว่าปริมาณของซิลิกานาโนเพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ปริมาณของ MTES เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสกลับลดลง แต่การลดลงนั้นส่งผลไม่มากเพราะเส้นของค่า มุมสัมผัส ที่ได้ครอบคลุมถึงปริมาณของ MTES ในทุกช่วงซึ่งครอบคลุมสูงสุดที่เส้น 144.0 และ 147.0 องศา ค่ามุมสัมผัสสูงสุดจากการทำนายของสมการที่ (4-6) คือประมาณ 150.3 องศา โดยค่า มุมสัมผัสดังกล่าวสูงกว่าค่ามุมสัมผัสจากการทำนายของสมการอื่นๆทั้งหมด ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ ของซิลิกานาโนและMTES เท่ากับ 3.0 – 3.6 wt.% และ 2.0 – 3.0 wt.% ตามลำดับ

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = dip
 D: Drying Tech = Oven 400C



รูปที่ 4.22 กราฟ contour แสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-6) ที่เคลือบแบบจุ่ม
 อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 contact angle
 155.9
 28
 X1 = A: Silica
 X2 = B: MTES
 Actual Factors
 C: Coating Tech = dip
 D: Drying Tech = Oven 400C



รูปที่ 4.23 กราฟ contour 3 มิติแสดงค่ามุมสัมผัส ทำนายจากสมการที่ (4-6) ที่เคลือบแบบจุ่ม
 อบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

4.2.4 สรุปผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสเชิงสถิตด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) ของปริมาณซิลิกานาโน และ MTES เทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้งต่อฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES นำข้อมูลไปวิเคราะห์เชิงสถิตด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software version 8.0 ซึ่งถูกใช้ ออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองร่วมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) พบว่าการวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical data analysis) ให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดเท่ากับ 150.3 องศา ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนของ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เท่ากับ 7.0:3.4:2.7:3.0 wt.% ที่การเคลือบฟิล์มเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบฟิล์มบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก และเทคนิคการอบแห้งที่ 400 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าค่ามุมสัมผัส จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software สูงกว่าผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่ได้เรียกว่า super hydrophobic film (มากกว่า 150 องศา) และมีการใช้อัตราส่วนของปริมาณซิลิกานาโน และปริมาณ MTES น้อยกว่าการทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) ช่วยในการ คาดเดาผลของตัวแปรในช่วงต่างๆที่ไม่ได้ทำการทดลอง ช่วยลดขั้นตอนการทำตัวอย่างการทดลอง และใช้แบบข้อมูลป้อนกลับสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical data analysis) ผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำให้แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

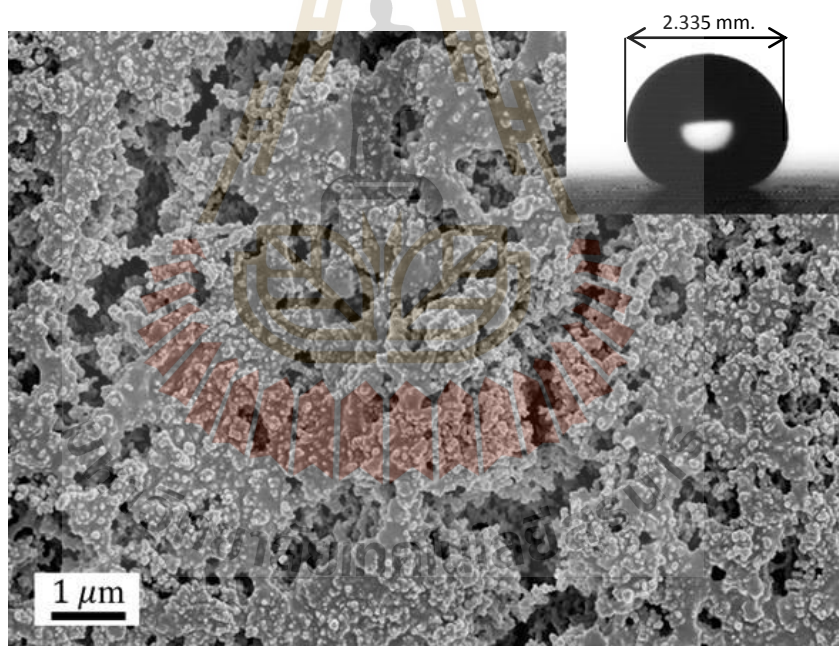
4.3 ผลการพิสูจน์หลักฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES

4.3.1 ผลการพิสูจน์หลักฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบที่ได้จากเทคนิคเคลือบแบบสเปรย์

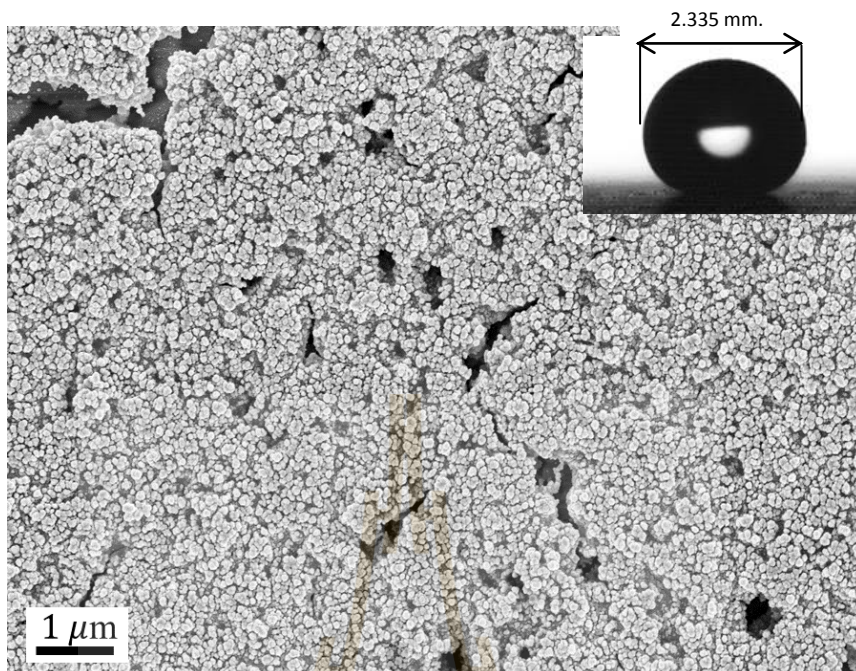
จากรูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่าย SEM micrograph ของตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ ซึ่งรูปที่ 4.24 (ก) ที่ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ 143.5±3.6 องศา โดยเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.24 (ข) ที่ให้ค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 143.9±2.0 องศา โดยเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าเทคนิคการอบแห้งทั้งสองเทคนิค ฟิล์มเคลือบมีความขรุขระคล้ายหามขนาดเล็กในระดับนาโนเกิดขึ้นทั่วบริเวณ โดยลักษณะเป็นอนุภาคกระจายในขนาดนาโนเมตรเมื่อเทียบกับมาตราส่วนรูปภาพ และผลดังกล่าวได้สอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1 กล่าวคือเมื่อฟิล์มเคลือบมีความขรุขระคล้ายหามในระดับนาโนหรือไมโครเมตร และมีสารละลายหรือซีเมนต์อยู่บนดุ่มขรุขระ ทำให้หยดน้ำซึ่งมีความตึงผิววิ่งไปมาบนใบบัวได้ เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับใบบัวน้อย (หยดน้ำมีขนาดใหญ่กว่า) ในงานวิจัยนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำเท่ากับ 2.335 mm. อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahadik et al. (2013) ซึ่งงานวิจัย

ดังกล่าวได้ศึกษา superhydrophobic silica film พบว่าได้ฟิล์มเคลือบที่มีอนุภาคของซิลิกากระจายตัวในระดับนาโนเมตร โดยให้ค่ามุมสัมผัสสูงถึง 168.00 องศา

จากรูป 4.24 (ก) และ (ข) เห็นได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อนุภาคมีการกระจายตัวในระดับนาโนเมตร มีรอยแตกร้าวมากกว่าฟิล์มอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคและรอยแตกร้าวอยู่ในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรที่มีขนาดของช่องระหว่างอนุภาคและรอยแตกร้าวขนาดเล็กกว่าหยดน้ำทำให้หยดน้ำที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำเท่ากับ 2.335 mm. ไม่สามารถแทรกซึมได้จึงทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มเคลือบที่ได้จากทั้งสองเทคนิคการอบแห้ง กล่าวได้ว่าเทคนิคการเคลือบแบบสเปรย์มีข้อดีคือ การกระจายตัวของอนุภาคบนฟิล์มเคลือบที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก การเคลือบแบบสเปรย์จะมีข้อเสียคือ เกิดรอยแตกร้าวของฟิล์มเคลือบ



รูปที่ 4.24 (ก) ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



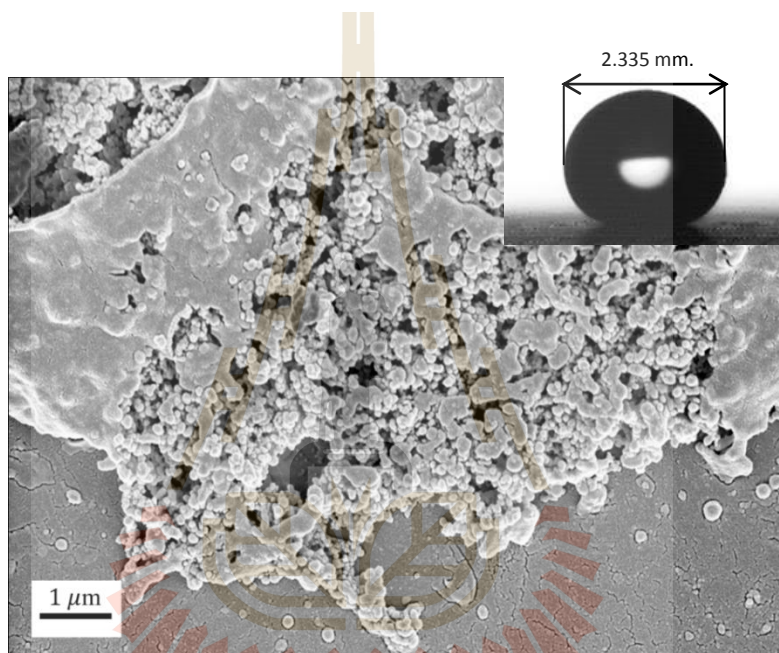
รูปที่ 4.24 (ข) ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

4.3.2 ผลการพิสูจน์ฐานันฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบที่ได้จากเทคนิคเคลือบแบบจุ่ม

จากรูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่าย SEM micrograph ของตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม รูปที่ 4.25 (ก) ที่ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย 147.5 ± 1.1 องศา โดยเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.25 (ข) ที่ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย 145.5 ± 2.7 องศา ของฟิล์มเคลือบโดยเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากรูป 4.25 (ก) และ (ข) เห็นได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ฟิล์มเคลือบมีความขรุขระของอนุภาคขนาดเล็ก พบว่าฟิล์มเคลือบมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหนาแน่นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ขนาดของช่องระหว่างอนุภาคของทั้งสองอุณหภูมิขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำเท่ากับ 2.335 mm. ทำให้หยดน้ำไม่สามารถแทรกซึมได้จึงทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำ

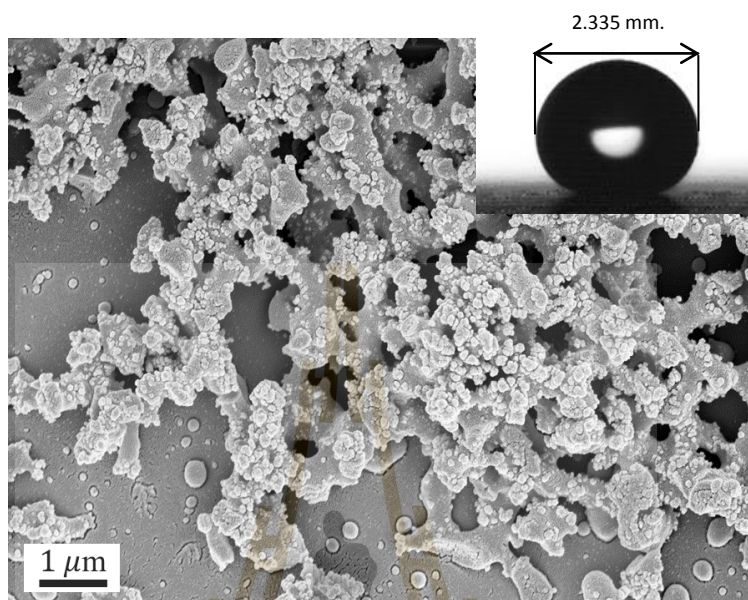
พบว่าฟิล์มเคลือบมีความขรุขระของอนุภาคขนาดเล็ก แต่มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ไม่สามารถปกปิดพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกได้ทั้งหมด สาเหตุมาจากเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม จะทำให้ความหนาของฟิล์มเคลือบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการไม่สามารถควบคุมการไหลของ

น้ำยาเคลือบในระหว่างการเคลือบได้ ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของเทคนิคนี้ อาจกล่าวได้ว่าความหนาที่ไม่สม่ำเสมอและฟิล์มเคลือบเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากความหนืดเป็นปัจจัยสำคัญต่อเทคนิคการจุ่ม โดยถ้าความหนืดมากการเกาะกลุ่มจะเกิดได้มาก ในทางกลับกันความหนืดน้อยการเกาะกลุ่มจะเกิดได้น้อย อย่างไรก็ตามกลับพบว่าถ้า น้ำยาเคลือบมีความหนืดมากจะให้ค่ามุมสัมผัสที่สูง เพราะว่าอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันไม่ชอบน้ำที่เติมไปได้ครอบคลุมทั่วบริเวณของฟิล์มเคลือบหรือรวมตัวกันเป็นแหล่งๆ คล้ายไขหรือขี้ผึ้งคลุมอยู่บนตุ่มขรุขระของอนุภาค ทำให้น้ำซึ่งมีความตึงผิววิ่งไปมาบนฟิล์มเคลือบ เมื่อตรวจวัดค่ามุมสัมผัสจึงให้ค่ามุมสัมผัสที่สูง



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.25 (ก) ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 (ข) ภาพถ่าย SEM micrograph ของฟิล์มเคลือบ ที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

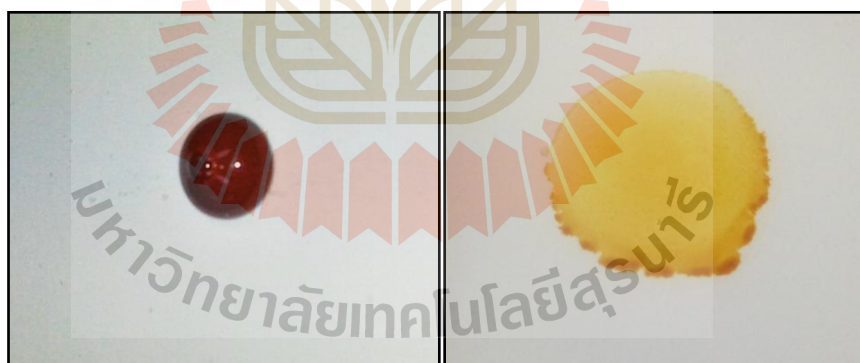
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเปื้อนของฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของกระเบื้องเซรามิกเลขที่ มอก . 2398 เล่ม 14-2553 สารละลายที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ สารละลายไอโอดีน และ กลีเซอรอล

จาก Standard No.ของฟิล์มเคลือบที่ใช้ทดสอบ คือ Standard No.1 ถึง 24 ของทุกเทคนิคการอบแห้ง จากรูปที่ 4.26 แสดงการกระจายของสารละลายที่ใช้ทดสอบความสามารถทำความสะอาดตัวเอง บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสรูปที่ 4.26 (ก) แสดงตัวอย่างการกระจายของหยดเฟอริกออกไซด์บนฟิล์มเคลือบ และจากรูปที่ 4.26(ข) แสดงตัวอย่างการกระจายของหยดสารไอโอดีนบนฟิล์มเคลือบ

จากผลการตรวจสอบพบว่า การทดสอบด้วยเฟอริกออกไซด์และสารละลายไอโอดีนจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนเป็นหมายเลข 5 4 3 2 และ 1 โดยหมายเลข 5 บ่งบอกผล

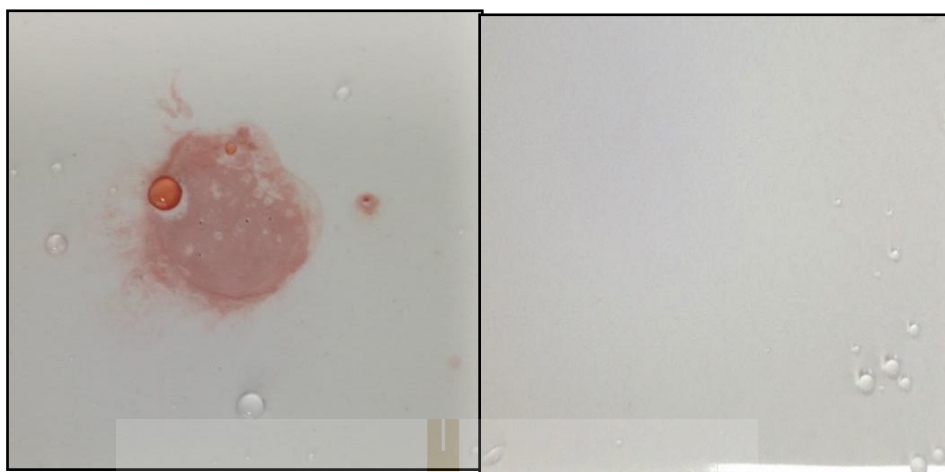
ความทนการเปราะเปื้อนที่ดีที่สุดดังกล่าวในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3.2.3 จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 สรุปได้ว่าตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทุกชิ้นไม่มีการจำแนกผลการทดสอบความทนการเปราะเปื้อนที่หมายเลข 1 2 และ 3 โดยจำแนกได้เฉพาะ หมายเลข 4 และ 5 ซึ่งจากการสังเกตของผู้วิจัยพบว่าสารทดสอบความเปราะเปื้อนไอโอดีนสามารถชะล้างได้ง่าย ส่วนเฟอร์ริกออกไซด์ยังคงมีคราบติดบนฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก จากที่กล่าวข้างต้นพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% ในทุกเทคนิคการเคลือบและเทคนิคการอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส มีความทนการเปราะเปื้อนอยู่ในระดับ 5 เนื่องจากชะล้างด้วยน้ำร้อนเพียงหนึ่งนาที่ทราบสกรปรกของทั้งเฟอร์ริกออกไซด์และสารละลายไอโอดีนสามารถหลุดออกได้ดีแสดงดังภาพที่แสดงในรูปที่ 4.27 (ก) นอกจากนี้ยังพบว่าสารทดสอบความเปราะเปื้อนทั้งเฟอร์ริกออกไซด์และสารละลายไอโอดีนดังกล่าวไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ กับพื้นผิวของฟิล์มเคลือบที่ผ่านตรวจสอบในระดับ 5 ซึ่งสังเกตได้ชัดจากพื้นผิวของตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบหลังการชะล้างแสดงดังภาพที่ 4.27 (ข) และรูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างพื้นผิวของฟิล์มเคลือบที่มีปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 0.5 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่มและอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส. ที่ต้องใช้ฟองน้ำขัดเพื่อกำจัดคราบจึงจะได้พื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่ผ่านการตรวจสอบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงการกระจายของสารละลายที่ใช้ทดสอบความสามารถทำความสะอาดตัวเอง บนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (ก)สารละลายเฟอร์ริกออกไซด์ (ข)สารละลายไอโอดีน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.27 ตัวอย่างผิวหน้าเซรามิกหลังการชะล้างของบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 4.0 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบสเปรย์ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เคลือบแบบสเปรย์(ก) ขณะชะล้าง (ข) หลังชะล้าง



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.28 ตัวอย่างผิวหน้าเซรามิกหลังการชะล้างของบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มเคลือบที่ปริมาณซิลิกานาโนต่อปริมาณ MTES ที่ 0.5 : 4.0 wt.% เทคนิคเคลือบแบบจุ่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เคลือบแบบจุ่ม(ก) ขณะชะล้าง (ข) หลังชะล้าง

ตารางที่ 4.3 การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยเฟอริกออกไซด์

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
1	4	2	dip	electric hair drier	4
	4	2	dip	300 °C Oven	4
	4	2	dip	400 °C Oven	5
2	2	2	dip	electric hair drier	4
	2	2	dip	300 °C Oven	4
	2	2	dip	400 °C Oven	4
3	1	2	dip	electric hair drier	4
	1	2	dip	300 °C Oven	4
	1	2	dip	400 °C Oven	4
4	0.5	2	dip	electric hair drier	4
	0.5	2	dip	300 °C Oven	4
	0.5	2	dip	400 °C Oven	4
5	4	4	dip	electric hair drier	4
	4	4	dip	300 °C Oven	5
	4	4	dip	400 °C Oven	5
6	2	4	dip	electric hair drier	4
	2	4	dip	300 °C Oven	4
	2	4	dip	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยเฟอร์ริกออกไซด์

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
7	1	4	dip	electric hair drier	4
	1	4	dip	300 °C Oven	4
	1	4	dip	400 °C Oven	4
8	0.5	4	dip	electric hair drier	4
	0.5	4	dip	300 °C Oven	4
	0.5	4	dip	400 °C Oven	5
9	4	8	dip	electric hair drier	4
	4	8	dip	300 °C Oven	5
	4	8	dip	400 °C Oven	5
10	2	8	dip	electric hair drier	4
	2	8	dip	300 °C Oven	4
	2	8	dip	400 °C Oven	4
11	1	8	dip	electric hair drier	4
	1	8	dip	300 °C Oven	4
	1	8	dip	400 °C Oven	4
12	0.5	8	dip	electric hair drier	4
	0.5	8	dip	300 °C Oven	4
	0.5	8	dip	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยเฟอร์ริกออกไซด์

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
13	4	2	spary	electric hair drier	4
	4	2	spary	300 °C Oven	4
	4	2	spary	400 °C Oven	4
14	2	2	spary	electric hair drier	4
	2	2	spary	300 °C Oven	4
	2	2	spary	400 °C Oven	4
15	1	2	spary	electric hair drier	4
	1	2	spary	300 °C Oven	4
	1	2	spary	400 °C Oven	4
16	0.5	2	spary	electric hair drier	4
	0.5	2	spary	300 °C Oven	4
	0.5	2	spary	400 °C Oven	4
17	4	4	spary	electric hair drier	5
	4	4	spary	300 °C Oven	5
	4	4	spary	400 °C Oven	5
18	2	4	spary	electric hair drier	4
	2	4	spary	300 °C Oven	4
	2	4	spary	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยเฟอร์ริกออกไซด์

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
19	1	4	spary	electric hair drier	4
	1	4	spary	300 °C Oven	4
	1	4	spary	400 °C Oven	4
20	0.5	4	spary	electric hair drier	4
	0.5	4	spary	300 °C Oven	4
	0.5	4	spary	400 °C Oven	4
21	4	8	spary	electric hair drier	5
	4	8	spary	300 °C Oven	4
	4	8	spary	400 °C Oven	5
22	2	8	spary	electric hair drier	4
	2	8	spary	300 °C Oven	4
	2	8	spary	400 °C Oven	4
23	1	8	spary	electric hair drier	4
	1	8	spary	300 °C Oven	4
	1	8	spary	400 °C Oven	4
24	0.5	8	spary	electric hair drier	4
	0.5	8	spary	300 °C Oven	4
	0.5	8	spary	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.4 การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยสารละลายไอโอดีน

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
1	4	2	dip	electric hair drier	4
	4	2	dip	300 °C Oven	4
	4	2	dip	400 °C Oven	4
2	2	2	dip	electric hair drier	4
	2	2	dip	300 °C Oven	4
	2	2	dip	400 °C Oven	4
3	1	2	dip	electric hair drier	4
	1	2	dip	300 °C Oven	4
	1	2	dip	400 °C Oven	4
4	0.5	2	dip	electric hair drier	4
	0.5	2	dip	300 °C Oven	4
	0.5	2	dip	400 °C Oven	4
5	4	4	dip	electric hair drier	4
	4	4	dip	300 °C Oven	5
	4	4	dip	400 °C Oven	5
6	2	4	dip	electric hair drier	4
	2	4	dip	300 °C Oven	4
	2	4	dip	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยสารละลายไอโอดีน

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
7	1	4	dip	electric hair drier	4
	1	4	dip	300 °C Oven	4
	1	4	dip	400 °C Oven	4
8	0.5	4	dip	electric hair drier	4
	0.5	4	dip	300 °C Oven	4
	0.5	4	dip	400 °C Oven	4
9	4	8	dip	electric hair drier	4
	4	8	dip	300 °C Oven	5
	4	8	dip	400 °C Oven	5
10	2	8	dip	electric hair drier	4
	2	8	dip	300 °C Oven	4
	2	8	dip	400 °C Oven	4
11	1	8	dip	electric hair drier	4
	1	8	dip	300 °C Oven	4
	1	8	dip	400 °C Oven	4
12	0.5	8	dip	electric hair drier	4
	0.5	8	dip	300 °C Oven	4
	0.5	8	dip	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยสารละลายไอโอดีน

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
13	4	2	spary	electric hair drier	4
	4	2	spary	300 °C Oven	4
	4	2	spary	400 °C Oven	4
14	2	2	spary	electric hair drier	4
	2	2	spary	300 °C Oven	4
	2	2	spary	400 °C Oven	4
15	1	2	spary	electric hair drier	4
	1	2	spary	300 °C Oven	4
	1	2	spary	400 °C Oven	4
16	0.5	2	spary	electric hair drier	4
	0.5	2	spary	300 °C Oven	4
	0.5	2	spary	400 °C Oven	4
17	4	4	spary	electric hair drier	5
	4	4	spary	300 °C Oven	5
	4	4	spary	400 °C Oven	5
18	2	4	spary	electric hair drier	4
	2	4	spary	300 °C Oven	4
	2	4	spary	400 °C Oven	4

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)การจำแนกผลการทดสอบความทนการเปื้อนด้วยสารละลายไอโอดีน

Standard No.	A: nano-silica (wt.%)	B: MTES (wt.%)	C: coating method	D: oven method	Class
19	1	4	spary	electric hair drier	4
	1	4	spary	300 °C Oven	4
	1	4	spary	400 °C Oven	4
20	0.5	4	spary	electric hair drier	4
	0.5	4	spary	300 °C Oven	4
	0.5	4	spary	400 °C Oven	4
21	4	8	spary	electric hair drier	5
	4	8	spary	300 °C Oven	4
	4	8	spary	400 °C Oven	5
22	2	8	spary	electric hair drier	4
	2	8	spary	300 °C Oven	4
	2	8	spary	400 °C Oven	4
23	1	8	spary	electric hair drier	4
	1	8	spary	300 °C Oven	4
	1	8	spary	400 °C Oven	4
24	0.5	8	spary	electric hair drier	4
	0.5	8	spary	300 °C Oven	4
	0.5	8	spary	400 °C Oven	4

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES ที่ไม่ชอบน้ำและเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างเซรามิก โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณของซิลิกานาโน และปริมาณ MTES เทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้ง จากนั้นนำ ผลทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากข้อมูลการวิเคราะห์ทดลองเบื้องต้น (preliminary analysis) พบว่าการเพิ่มปริมาณของซิลิกานาโน ทำให้ค่าความหนืดของน้ำยาเคลือบเพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละของแสงส่องผ่านลดลง จะตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ ซิลิกานาโน และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของซิลิกานาโน สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณ ของซิลิกานาโนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดุลัสและพบ ว่าทุกสมการการทำนายค่ามอดุลัสที่สูงสุดของแต่ละสมการปริมาณซิลิกานาโนจะมีค่าประมาณ 3.0 wt.% ยกเว้นเทคนิคเคลือบแบบจุ่ม อบแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่แสดงปริมาณซิลิกาประมาณ 2.0 wt.%

2. จากข้อมูลผลการทดลองเบื้องต้นของงานวิจัยนี้แสดงในน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณของ MTES เท่ากับ 8.0 wt.% ต่อปริมาณซิลิกานาโนที่เท่ากับหรือน้อยกว่า 4.0 wt.% ส่งผลให้ค่าความหนืดของน้ำยาเคลือบลดลง เป็นปริมาณที่ไม่เหมาะสำหรับการเตรียมน้ำยาเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย โปรแกรม Design-Expert[®] Software พบว่าปริมาณ ของ MTES มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดุลัส

3. จากข้อมูลผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Analysis) เกี่ยวกับเทคนิคการเคลือบ และเทคนิคการอบแห้ง พบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยการจุ่มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างให้ค่ามอดุลัสที่สูงสุดที่ให้ค่ามอดุลัสเฉลี่ยที่ 147.5±1.1 องศา ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนของ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เท่ากับ 7.00:4.00:2.75:4.00 wt.% 4.0 wt.% ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 300 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert[®] Software พบว่าที่การเคลือบฟิล์มเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวตัวอย่างให้ค่ามอดุลัสสูงที่สุดเท่ากับ 150.3 องศา ซึ่ง ประกอบด้วยอัตราส่วนของ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES เท่ากับ 7.00:

3.374:2.75:3.00 wt.% ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 400 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามแม้ช่วงอุณหภูมิในการอบแห้งแตกต่างจากข้อมูลผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Analysis) แต่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert® Software ที่ทำนายว่าการอบแห้งจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อฟิล์มเคลือบ

4. จากผลการพิสูจน์หลักฐานวิทยาของฟิล์มเคลือบที่ได้จากเทคนิคเคลือบ พบว่าเทคนิคการเคลือบแบบสเปรย์ให้พื้นผิวฟิล์มเคลือบที่สม่ำเสมอมากกว่าเทคนิคการเคลือบฟิล์มเคลือบแบบจุ่ม อย่างไรก็ตามการเคลือบแบบจุ่มถึงแม้จะไม่สม่ำเสมอและมีการเกาะตัวเป็นกลุ่มๆ แต่มีการครอบคลุมของฟิล์มที่ไม่ชอบน้ำบนอนุภาคที่ขรุขระในระดับนาโนเมตรได้ดีจึงทำให้ค่ามุมสัมผัสที่สูง

5. จากผลการทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง พบว่าเมื่อทำการทดสอบฟิล์มเคลือบ TEOS:SiO₂:PDMS:MTES จัดอยู่ในระดับ 5 และระดับ 4 ถือว่าดีเยี่ยมและดีตามลำดับ กล่าวคือการทำความสะอาดระดับ 5 สามารถทำความสะอาดเพียงการล้างด้วยน้ำที่น้ำร้อนด้วยอุณหภูมิ 55±5° C แบบไหลผ่าน จากนั้นเช็ดผิวด้วยผ้าขึ้น และระดับ 4 ที่ล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดจากท้องตลาด (ยี่ห้อ ซันไลต์) ถูด้วยฟองน้ำ ล้างด้วยน้ำเปล่าและเช็ดด้วยผ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยนี้ในอนาคตคือ

1. จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่เทคนิคการเป่าแห้งค่ามุมสัมผัสที่ได้ มีค่ามุมสัมผัสที่สูงและมีสมบัติไม่ชอบน้ำ สามารถนำไปศึกษาปรับปรุงเพื่อให้ได้ฟิล์มเคลือบที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แต่ให้มีความทนทานต่อการใช้งาน
2. ควรทดสอบความสามารถในการยึดติดระหว่างฟิล์มเคลือบกับพื้นผิวเซรามิกให้สามารถทนต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันของมนุษย์ได้
3. ควรทดสอบความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองโดยการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ฟิล์มเคลือบไม่ชอบน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงและตรงต่อความต้องการ
4. ควรทำการวัดความหนาเฉลี่ยของฟิล์มเคลือบ โดยจุดวัดกำหนดให้กระจายครอบคลุมพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง

รายการอ้างอิง

- จุฑารัตน์ อชวรัตน์ถาวร . (2009). [ออนไลน์]. กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel Technology). [สืบค้นวันที่ 8 สิงหาคม 2014]. จาก <http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3251>
- ปารเมศ ชูติมา . (2002). “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 1
- ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ . (2004). [ออนไลน์]. ปราบกฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (LOTUS EFFECT). [สืบค้นวันที่ 8 สิงหาคม 2014]. จาก <http://www.nectec.or.th/info/posters/archives/pdf/Eco/RDE3e.pdf>
- สิทธิสุนทร สุโพธิณะ และคณะ (2010) รายงานการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์ “การพัฒนาฟิล์มไม่เปียกน้ำและน้ำมันที่มีความเสถียรและทนทาน ” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1), 1-8.
- Belle Dumé. 2005 [Online]. Turning the lotus effect on its head. [Cited 1 July 2014]. Available from: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2005/apr/06/turning-the-lotus-effect-on-its-head>
- Bhushan, B. (2012). Lotus Effect Surfaces in Nature. In *Biomimetics* (pp. 49-65). Springer Berlin Heidelberg.
- Chae, S. S., et al. (2012). Homogeneous liquid crystal alignment on inorganic–organic hybrid silica thin films derived by the sol–gel method. *Soft Matter*, 8(5), 1437-1442.
- Chemistry Tutorial. 2003 [Online]. The Chemistry of Water. [Cited 1 June 2014]. Available from: <http://www.biology.arizona.edu/biochemistry/tutorials/chemistry/page3.html>
- Chow, T. S. (1998). Wetting of rough surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(27), L445.
- Defay, R. et al. (1966). *Surface tension and adsorption* (p. 94). London: Longmans.
- Fowkes, F. M., & Zisman, W. A. (1964). *Contact angle, wettability, and adhesion*.

- Hallmann, S., Fink, M. J., & Mitchell, B. S. (2010). Wetting properties of silicon films from alkyl-passivated particles produced by mechanochemical synthesis. *Journal of colloid and interface science*, 348(2), 634-641.
- Hanaor, Dorian AH, et al. (2012). Single and mixed phase TiO₂ powders prepared by excess hydrolysis of titanium alkoxide. *Advances in Applied Ceramics*, 111(3), 149-158.
- Hozumi, A., Cheng, D. F., & Yagihashi, M. (2011). Hydrophobic/superhydrophobic oxidized metal surfaces showing negligible contact angle hysteresis. *Journal of colloid and interface science*, 353(2), 582-587.
- Katie Sullivan. 2008 [Online]. Surface Energy And Pressure Sensitive Adhesives. [Cited 7 August 2014]. Available from: <http://blog.marianinc.com/blog/surface-energy-and-pressure-sensitive-adhesives>
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1960). *Introduction to ceramics*.
- Lafuma, A., & Quéré, D. (2003). Superhydrophobic states. *Nature materials*, 2(7), 457-460.
- Lotus leaf. 2015 [Online]. Do you know lotus effect?. [Cited 15 July 2014]. Available from: <http://atriainnovation.com/en/conoceis-el-efecto-loto/>
- Ma, M., & Hill, R. M. (2006). Superhydrophobic surfaces. *Current opinion in colloid & interface science*, 11(4), 193-202.
- Mahadik, S. A., et al. (2013). Superhydrophobic silica coating by dip coating method. *Applied Surface Science*, 277, 67-72.
- Nadargi, D. Y., et al. (2010). Synthesis and characterization of transparent hydrophobic silica thin films by single step sol-gel process and dip coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 496(1), 436-441.
- Nakajima, Akira, et al. (2000). Transparent superhydrophobic thin films with self-cleaning properties. *Langmuir*, 16(17), 7044-7047.
- Piispanen, et al. (2011). Effect of mechanical and chemical wear on soil attachment and cleanability of sanitary ware with additional coatings. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(3), 951-958.

- Plank Johann. 2015 [Online]. Colloid chemistry. [Cited 28 August 2014]. Available from: <http://www.bauchemie-tum.de/master-framework/?p=Koll&i=14&m=1&lang=en>
- Purcar, V., et al. (2012). Fabrication of hydrophobic and antireflective coatings based on hybrid silica films by sol–gel process. *Surface and coatings technology*, 206(21), 4449-4454.
- Ryan, W., & Radford, C. (1987). *Whitewares production, testing, and quality control: including materials, body formulations, and manufacturing processes*. Pergamon.
- Ryan, W., & Radford, C. (1987). *Whitewares production, testing, and quality control: including materials, body formulations, and manufacturing processes*. Pergamon.
- Shelby, J. E. (2005). *Introduction to glass science and technology*. Royal Society of Chemistry.
- Tolman, R. C. (1949). The effect of droplet size on surface tension. *The journal of chemical physics*, 17(3), 333-337.
- Weber, M. J. (1990). Science and technology of laser glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 123(1), 208-222.
- Wen, X. F., et al. (2011). Organic–inorganic hybrid superhydrophobic surfaces using methyltriethoxysilane and tetraethoxysilane sol–gel derived materials in emulsion. *Applied Surface Science*, 258(3), 991-998.
- Wikipedia. (2016). [Online]. Sol-gel. [Cited 28 August 2014]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Sol-gel#Stages_in_the_process
- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 65-87.
- Zhang, X., et al. (2008). Analysis of roughness parameters to specify superhydrophobic antireflective boehmite films made by the sol–gel process. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(11), 2177-2181.



แบบประเมินการสอบวิทยานิพนธ์

ของ (นาย/ นาง/ นางสาว) ...ประภัสสร.ประเทืองไทย.....เลขประจำตัว.....D5340200
 สาขาวิชา ..วิศวกรรมเซรามิก..... สำนักวิชา ..วิศวกรรมศาสตร์.....
 ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเซรามิก...
 (ภาษาอังกฤษ) EFFECT.OF.PROCESSING.PARAMETERS.ON.NON-WETTING.PROPERTY....
 OF.FILM.ON.CERAMIC.SURFACE.....
 สอบในวันที่.....2..... เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ.2559..

ผลการพิจารณาการสอบวิทยานิพนธ์

ดีมาก
 ผ่าน
 ไม่ผ่าน

ความเห็นของคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ในกรณีที่ผลการพิจารณาดีมาก หรือไม่ผ่าน

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เห็นควรให้ปรับปรุงแล้วเสร็จภายใน

.....

.....

.....

แบบประเมินการสอบวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

ลงชื่อประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุทิน คุณาเรืองรอง)

ลงชื่อกรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเกษม วัชรมัยสกุล)

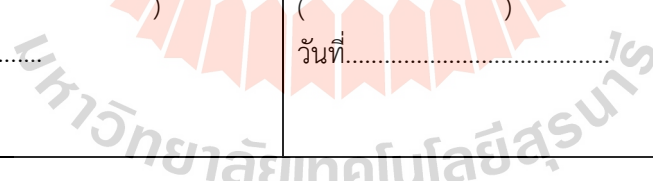
ลงชื่อกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

ลงชื่อกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร)

ลงชื่อกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราณี ชุมสำโรง)

ลงชื่อกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดเขตต์ พจน์ประไพ)

<p>ผลการตรวจสอบของศูนย์บริการการศึกษา</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>ลงชื่อ..... ()</p> <p>วันที่.....</p>	<p>ผลการพิจารณาของคณะกรรมการประจำสำนักวิชา</p> <p><input type="checkbox"/> อนุมัติ</p> <p><input type="checkbox"/> ไม่อนุมัติ</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>ลงชื่อ.....(ประธานคณะกรรมการ) ()</p> <p>วันที่.....</p>
--	---



ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาโท

คณะกรรมการ

มการสอบวิทยานิพนธ์

(

รศ.ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง)

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุขเกษม วัชรมัชสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ.ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(รศ.ดร.จรัสศรี ลอประยูร)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ปราณีชุมสำโรง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุคนธ์พงศ์ประไพ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประวัติผู้เขียน

นางสาวประภัสสร ประเทืองไทย เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ.2525 เริ่มต้นศึกษาชั้นประถมที่ โรงเรียนเกษะประชาสามัคคี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 3 ที่โรงเรียนสุระธรรมพิทักษ์ ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเครื่องปั้นดินเผา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา เมื่อปีพ.ศ. 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเครื่องปั้นดินเผา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา เมื่อปีพ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีศิลปอุตสาหกรรมเซรามิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีพ.ศ. 2546 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ศิลปะมหาบัณฑิต สาขาเครื่องเคลือบดินเผา มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีพ.ศ. 2550 จากทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากร (สกอ.) และบรรจุเข้าทำงานตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาออกแบบเซรามิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ.2550 ปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากร (สกอ.) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยได้ทำโครงการวิจัยเรื่อง ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตฟิล์มต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบนผิวเคลือบเซรามิกส์

ผลงานวิจัย : ได้เข้าร่วมแสดงผลงานวิชาการ (Poster) ในหัวข้อเรื่อง Effect of composition conting method and heat treatment temperature on properties of TEOS-SiO₂-PDMS/MTES films on ceramic tiles. ที่งาน Materialstoday ASIA 2014.