

ผลของความขรุขระเชิงผิวต่อความสามารถในการเปียกน้ำ ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร

Effect of Surface Roughness on Wettability of Diamond-Like Carbon Thin Films

นฤทธิ ฝ้ายบุตร (Narit Faibut)^{1*} ดร.วิทยา อมรภิจำรุง (Dr.Vittaya Amornkitbamrung)**

บทคัดย่อ

ทำการเตรียมฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรประเภทไฮโดรจิเนทเตด อะมอร์ฟัสคาร์บอนโดยใช้ระบบตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยคลื่นวิทยุจากพลาสมาแผ่นคู่ควบความจุไฟฟ้าลงบนกระจกสไลด์ที่ได้รับการขัดจนมีความขรุขระต่าง ๆ กัน โดยใช้ก๊าซสารตั้งต้นมีเทน และก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน และนำไปวัดค่าความขรุขระด้วยเครื่อง AFM ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าตั้งแต่ 84.8-104.8 องศา และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระสูงขึ้น และเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่าความขรุขระมีค่าประมาณ 250 nm ขึ้นไป ฟิล์มที่มีค่าความขรุขระ 342 nm มีค่าพลังงานเชิงผิว 10.67 mJ/m² มีค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสน้ำสูงสุดที่ 104.8 องศา

ABSTRACT

Hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) thin films were prepared on polished glass slide substrates by capacitively coupled radio-frequency Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) system using methane with various hydrogen mixes as source gases. The roughness of thin films were then analyzed by Atomic Force Microscope (AFM). The water contact angles were 84.8 to 104.8 degrees. The water contact angle increases with increasing film roughness, and does so clearly when the roughness is approximately higher than 250 nm. The film with 342 nm roughness and 10.67 mJ/m² surface energy shows the highest average water contact angle at 104.8 degrees.

คำสำคัญ : ไฮโดรจิเนทเตด อะมอร์ฟัสคาร์บอน ค่ามุมสัมผัส ความขรุขระ

Key Words : Hydrogenated amorphous carbon, Contact angle, Roughness

¹ Corresponding author: faibut.n@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond-like carbon, DLC) ประเภทไฮโดรจิเนทเตด อะมอร์ฟัสคาร์บอน หากสามารถนำไปใช้งานได้อย่างจริงจังจะนับเป็นฟิล์ม (film) ที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายมาก เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งใกล้เคียงกับเพชร [1] ทนต่อการกัดกร่อนและการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น สิ่งที่น่าสนใจคือการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรสำหรับเคลือบผิวให้สามารถทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) ซึ่งมีประโยชน์ใช้ในงานเคลือบผิวกระจกตามอาคารเพื่อกันการขีดข่วนและเกิดการทำความสะอาดตัวเองหรือจะเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดสารเคมีจากการซักล้างตู้ล้างแวตล้อม สำหรับฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรในการทำให้เกิดสมบัติดังกล่าวทำได้โดยทำให้เป็นฟิล์มไม่ชอบน้ำ โดยจำต้องทำให้ฟิล์มคงสภาพสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ไว้ดั้งเดิม ซึ่งปัจจุบันนี้มีการนำพลาสมา (plasma) ของเตตระฟลูออโรมีเทน (tetrafluoromethane, CF_4) ซึ่งเป็นก๊าซ (gas) เรืองกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน [2] แต่เมื่อพิจารณาการเกิดสมบัติไม่ชอบน้ำของไบบิวพบว่าในไบบิวนั้นมีโครงสร้างบนผิวใบที่มีลักษณะที่ขรุขระ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นขนขนาดเล็กระดับไมโครเมตร และทำให้แรงที่อนุภาคฝุ่นกระทำต่อผิวของไบบิวน้อยเมื่อเทียบกับแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคฝุ่นกับของเหลว จึงทำให้เกิดการทำความสะอาดตัวเอง [3] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำผิวฟิล์มให้มีความขรุขระ (roughness) เพื่อให้ได้มาซึ่งความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง แต่ยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นของฟิล์มเอาไว้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของความขรุขระของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรต่อค่ามุมสัมผัสของฟิล์ม
2. เพื่อหาค่าพลังงานเชิงผิว (surface

energy) ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่มีความขรุขระหลายค่า

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวัดค่ามุมสัมผัสนั้นจะต้องหามุมที่มีความเสถียรที่สุด (θ_{ms}) ออกมา เนื่องจากเมื่อของเหลวสัมผัสกับผิวของแข็งแรงแอดฮีชันที่กระทำจะก่อให้เกิดมุมสัมผัสที่เป็นมุมกึ่งเสถียรได้หลายค่า ดังภาพที่ 1 ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่ามุมสัมผัส [5] (ภาพที่ 1)

ในการหาค่ามุมที่เสถียรที่สุดนั้นโดยทั่วไปจะใช้วิธีหามุม advancing และ receding ดังแสดงในภาพที่ 1 แล้วยนำมาหาค่าประมาณมุมที่เสถียรที่สุดโดยใช้สมการที่ 1

$$\cos\theta_{ms} = 0.5\cos\theta_{adv} + 0.5\cos\theta_{rec} \dots\dots\dots(1)$$

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

นำกระจกสไลด์ขนาด 1x3 ตารางนิ้ว ที่จะใช้เป็นวัสดุฐานรองมาขัดด้วยกระดาษทรายให้มีระดับความขรุขระต่างๆ กัน ด้วยเบอร์ 120 220 400 600 800 1000 1500 2000 จำนวน 8 แผ่น แล้วทำความสะอาดแล้วเคลือบฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ระบบตกสะสมไอเชิงเคมีบนกระจกสไลด์ดังกล่าว โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันดังตารางที่ 1 ทุกแผ่นรวมแผ่นที่ไม่ขัดอีก 1 แผ่น เป็น 9 แผ่นแล่นนำฟิล์มไปวัดความขรุขระด้วยเครื่อง AFM รวมทั้งวัดค่ามุมสัมผัส น้ำ และกลีเซอรอล แล้วยคำนวณค่าพลังงานเชิงผิวของฟิล์มทุกชิ้นงานโดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean model) และแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก (harmonic mean model) (ตารางที่ 1)

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

ขนาดความขรุขระค่าเฉลี่ยรากกำลังสอง (R_q) ของฟิล์มจากการวัดค่าความขรุขระของฟิล์มด้วยเครื่อง AFM โหมดกึ่งสัมผัส ขนาด 30x30 ตาราง

ไมครอน พบว่าฟิล์มมีค่าความขรุขระที่แตกต่างกันหลายระดับ ค่าความขรุขระที่มีค่ามากที่สุดได้จากฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุฐานรองที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบที่สุด และฟิล์มมีความขรุขระโดยประมาณ 342.2 nm ดังภาพที่ 2 (ก) และฟิล์มที่มีความขรุขระน้อยที่สุดคือฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุฐานรองที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียดที่สุด มีความขรุขระโดยประมาณ 13.4 nm ดังภาพที่ 2 (ข) ส่วนฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุฐานรองที่ไม่ได้รับการขัดผิวใดๆ จะมีความขรุขระประมาณ 0.2 nm ซึ่งเป็นความขรุขระโดยธรรมชาติของฟิล์มบางไฮโดรจินเทต อะมอร์ฟัสคาร์บอน (ภาพที่ 2) เมื่อนำฟิล์มที่มีค่าความขรุขระแตกต่างกันดังกล่าวไปวัดค่ามุมสัมผัสน้ำและกลีเซอรอล โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-65 % จะได้ค่ามุมสัมผัสดังกล่าวแตกต่างกัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 3 เป็นลักษณะมุมสัมผัสน้ำจากน้ำของฟิล์มที่ให้ค่ามุมสัมผัสมากที่สุด (ภาพที่ 3) (ตารางที่ 2) จากนั้นคำนวณค่าพลังงานเชิงผิวทั้งส่วนเชิงกระจายและส่วนเชิงขั้ว โดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิต และแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิค โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

1. คำนวณค่าพลังงานเชิงผิวโดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิต โดยใช้สมการที่ 2

$$1 + \cos \theta_{ms} = 2\sqrt{\gamma_s^d} \left[\frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_{lv}} \right] + 2\sqrt{\gamma_s^p} \left[\frac{\sqrt{\gamma_l^p}}{\gamma_{lv}} \right] \dots\dots(2)$$

2. คำนวณค่าพลังงานเชิงผิวโดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิคโดยใช้สมการที่ 3

$$(1 + \cos \theta_{ms}) \gamma_{lv} = \frac{4\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} + \frac{4\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p} \dots\dots\dots(3)$$

- เมื่อ γ_l^d แรงตึงผิวของของเหลวส่วนเชิงกระจาย
 γ_l^p แรงตึงผิวของของเหลวส่วนเชิงขั้ว
 γ_s^d พลังงานเชิงผิวของของแข็งส่วนเชิงกระจาย
 γ_s^p พลังงานเชิงผิวของของแข็งส่วนเชิงขั้ว
 θ_{ms} เป็นมุมที่เสถียรที่สุด

ซึ่งจะได้ ค่าพลังงานเชิงผิวออกมาดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 เป็นค่าพลังงานเชิงผิวจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิต และค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิคตามลำดับ (ตารางที่ 3) เมื่อนำค่าพลังงานเชิงผิวมาเขียนแผนภูมิแท่งสร้างความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระได้ดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสน้ำจะพบว่าฟิล์มที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ย 342.2 nm ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำมากที่สุดที่ประมาณ 104 องศา รองลงมาคือฟิล์มที่มีความขรุขระเฉลี่ย 242.15 nm ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่มีค่าประมาณ 94 องศา ส่วนฟิล์มที่ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำน้อยที่สุดที่ประมาณ 84 องศา คือฟิล์มที่วัสดุฐานรองไม่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยกระดาษทราย และมีความขรุขระน้อยที่สุดที่ 0.212 nm และฟิล์มที่มีความขรุขระตั้งแต่ 99.25 nm จนถึง 13.36 nm ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 88-89 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรประเภทที่มีธาตุไฮโดรเจน เช่น a-C:H หรือ ta-C:H ซึ่งมีค่าระหว่าง 71.3-91.7 องศา โดยขึ้นกับปัจจัยอื่นอีกเช่น สัดส่วนโครงสร้าง sp^3 ความหนาแน่น เป็นต้นแล้ว นับว่ามีค่าใกล้เคียงพอสมควร [5] ส่วนมุมสัมผัสน้ำกลีเซอรอลนั้นมีค่าพอๆกัน แทบจะอยู่ในช่วงฮิสเทอรีซิส (hysteresis, ค่าผลต่างระหว่างมุม θ_{adv} กับ θ_{rec}) ของค่ามุมที่วัดออกมาจากฟิล์มเงื่อนไขเดียวกัน และจะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่ามุมสัมผัสน้ำจากน้ำ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Banerjee *et al.* ที่สังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบ DC-PECVD โดยใช้ความดันสูง 100 mbar ซึ่งทำให้ฟิล์มมีค่าความขรุขระค่าเฉลี่ยรากล้างสองสูง และฟิล์มยังมีค่ามุมสัมผัสมากสุดถึง 140 องศา โดยที่ฟิล์มมีความขรุขระตั้งแต่ประมาณ 5- 435 nm และที่ค่ามุมสัมผัสน้ำค่าดังกล่าวฟิล์มมีความขรุขระถึง 435 nm โดยประมาณ [7] นอกจากนี้แล้วในการทดลองของกลุ่มวิจัยนี้ยังเห็นการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสน้ำจากกลีเซอรอลที่ขึ้นกับความขรุขระของฟิล์ม

ค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของกลุ่มดังกล่าวที่ความขรุขระ 371.6 nm มีค่ามุมสัมผัสน้ำเพียง 85 องศา เท่านั้น ส่วนมุมสัมผัส กลีเซอรอลเป็น 60 องศา ซึ่งนับว่าต่ำเมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองเมื่อสร้างความสัมพันธ์พลังงานเชิงผิวและมุมสัมผัสน้ำกับค่าความขรุขระของฟิล์ม a-C:H จะได้กราฟแสดงดังภาพที่ 6

จากตารางที่ 2 และตารางที่ 4 พบว่าค่าพลังงานเชิงผิวจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกมีค่าไม่สอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสน้ำเท่าใดนักคือค่ามุมสัมผัสน้ำมากพลังงานเชิงผิวควรจะน้อย เช่นฟิล์มที่มีความขรุขระ 0.212 nm ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีค่ามุมสัมผัสน้ำต่ำสุดที่ 84.6 องศา กลับมีค่าพลังงานเชิงผิวต่ำสุดที่ 34.23 mJ/m² อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เป็นปกติของฟิล์ม a-C:H ที่มีความหนาแน่น 1.7-1.8 g/cm³ ซึ่งพลังงานเชิงผิวจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.3-34 mJ/m² [5-6] และยังพบว่าค่าพลังงานเชิงผิวมีค่าที่ผิดปกติไปสำหรับค่าพลังงานเชิงผิวของฟิล์มที่ผิวมีความขรุขระ 342.2 nm นั่นคือค่าพลังงานเชิงผิวที่คำนวณได้มีค่าพลังงานส่วนเชิงขั้วที่ติดลบ ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้สำหรับฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร นอกจากนี้สำหรับฟิล์มที่มีความขรุขระสูงขึ้นพลังงานเชิงผิวที่ได้จากแบบจำลองนี้ก็กลับมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน เมื่อพิจารณางานวิจัยของ Banerjee *et al.* ที่สังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบ PECVD ก๊าซตั้งต้นอะเซทิลีนที่ความดันสูงพบว่าฟิล์มมีความขรุขระสูงมาก โดยประมาณ 5-435 nm แต่ในการวัดพลังงานเชิงผิวออกมา ใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตและพบว่าค่าพลังงานเชิงผิวสุทธิมีค่าสูงตั้งแต่ 47.66-61.76 nm ซึ่งนับว่าสูงผิดปกติ และที่น่าสังเกตคือมีทิศทางที่ไม่สอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสน้ำเลย เมื่อกลับมาพิจารณาค่าพลังงานเชิงผิวที่ค่าความขรุขระสูงๆ จากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตในตารางที่ 3 พบว่าเริ่มมีความไม่สอดคล้องกับแนวโน้มความขรุขระเช่นกันกับงานวิจัยของกลุ่มดังกล่าว ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นการชดเชยค่าของแบบจำลองดังกล่าวสำหรับฟิล์มที่มีค่าความ

ขรุขระสูงๆ ก็เป็นไปได้ หรืออาจจะเป็นผลมาจากการที่มีความผิดพลาดในการวัดค่ามุมที่เหมาะสมที่สุดของกลีเซอรอลก็เป็นได้เนื่องจากผลการทดลองมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามผลการคำนวณพลังงานเชิงผิวจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเทียบกับขนาดความขรุขระสำหรับกรณีความขรุขระต่ำกว่าหลักร้อยนาโนเมตรนั้นให้ผลออกมาค่อนข้างสอดคล้องกัน เมื่อหาค่าพลังงานเชิงผิวจากวิธีมุมเฉลี่ยแล้วนำค่าพลังงานเชิงผิวจากวิธีดังกล่าวมาเฉลี่ยกับพลังงานเชิงผิวที่หาจากวิธีมุม θ_{adv} และ θ_{rec} โดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตพบว่าได้แนวโน้มที่ชัดเจนขึ้นดังภาพที่ 7

จากภาพที่ 7 โดยที่แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่ม คือฟิล์มกลุ่มที่มีความขรุขระตั้งแต่ 99.25 nm ถึง 342.2 nm และกลุ่มที่มีความขรุขระตั้งแต่ 69.87 nm ลงมาจนถึง 0.212 nm จะเห็นได้ว่ากลุ่มหลังจะมีค่าพลังงานเชิงผิวที่สัมพันธ์กับค่าความขรุขระคือค่าพลังงานเชิงผิวที่มากเมื่อฟิล์มมีความขรุขระต่ำลง และนอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับแนวโน้มค่ามุมสัมผัสน้ำของน้ำด้วย คือมุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลงเมื่อความขรุขระลดลง แต่สำหรับกลุ่มแรกค่าพลังงานเชิงผิวของฟิล์มที่มีค่าเฉลี่ยความขรุขระ 99.25 nm นั้นกลับมีค่าที่สูงและต่ำเกินไปโดยไม่มีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสน้ำที่วัดได้เลยและจากผลการทดลองข้างต้นหากสามารถถือได้ว่าฟิล์มมีสมบัติและองค์ประกอบเชิงเคมีที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จะพบว่าความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับขนาดความขรุขระของผิวฟิล์มค่าพลังงานเชิงผิวของแข็งที่เกิดขึ้นนั้นได้รับผลจากแรงแอดฮีชัน (adhesion) ซึ่งเป็นแรงระหว่างอะตอมของของเหลวกับของแข็งที่สัมผัสกัน และแรงโคฮีชัน (cohesion) หรือแรงระหว่างอะตอมของของเหลวเอง ถ้าแรงแอดฮีชันมีมากกว่าแรงโคฮีชัน ค่ามุมสัมผัสน้ำที่วัดออกมาจะมีค่าน้อยและสำหรับฟิล์ม a-C:H แล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆอีก เช่น หมู่ฟังก์ชันที่ผิว ค่าสัดส่วนโครงสร้าง sp^3 และ sp^2 ที่ผิวฟิล์ม ความหนาแน่น

ของฟิล์ม เป็นต้น โดยที่พลังงานเชิงผิวส่วนเชิงขั้วนั้นเชื่อว่าได้รับผลมาจากสภาพขั้วของโมเลกุล และส่วนเชิงกระจายซึ่งเชื่อว่ามาจากแรงแวน เดอ วาลส์ (van der Waals) [8] สำหรับฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเป็นฟิล์มประเภท a-C:H ซึ่งมีทั้งธาตุคาร์บอนและ ไฮโดรเจนในฟิล์ม โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นจะอยู่ประมาณ $1.5-1.8 \text{ g/cm}^3$ สัดส่วนโครงสร้างแบบ sp^3 ที่พบจะเป็นโครงสร้างที่มีธาตุไฮโดรเจนปะปนเสมอ โดยเฉพาะระบบที่มีความหนาแน่นพลาสมาต่ำๆ เช่น ระบบ PECVD ดังนั้นความหนาแน่นธาตุคาร์บอนที่ผิวจะน้อยทำให้แรงดึงดูดไปยังอะตอมที่ผิวน้อย เป็นสาเหตุให้มีพลังงานเชิงผิวต่ำ แรงโคฮีชันน้อยเมื่อเทียบกับแรงแอตตีชัน และถ้าแรงโคฮีชันของของแข็งน้อยกว่าโคฮีชันของของเหลว ก็จะทำให้เกิดพื้นผิวใหม่เกิดขึ้น ยิ่งถ้าที่ผิวมีพันธะว่าง เช่นผิวฟิล์มประเภท ta-C ที่มีพันธะว่าง มีโอกาสที่ฟิล์มจะมีธาตุออกซิเจนที่ผิว ซึ่งธาตุดังกล่าวมีผลทำให้แรงแอตตีชันมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสมีค่าน้อยจนเกือบเป็นศูนย์ [2] และนอกจากนี้ น่าจะมีความเป็นไปได้ว่าที่ค่าความขรุขระสูงระดับ 100 nm ขึ้นมาโดยประมาณ ค่าพลังงานเชิงผิวที่คำนวณได้เริ่มมีความไม่แม่นยำ ทั้งนี้ในการใช้งานแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตนั้นมีสมมติฐานคือรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว ทดสอบนั้นจะต้องมีอากาศแทรกอยู่ [8] เมื่อความขรุขระมีมากขึ้น ของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำอาจสามารถแทรกลงไปได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปได้ ณ ที่นี้ว่าเพราะเหตุใด แต่อย่างน้อยที่สุดทำให้ทราบได้ว่าค่าความขรุขระของฟิล์มส่งผลต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์ม โดยจุดที่เริ่มส่งผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดนั้นไม่สามารถระบุได้แม่นยำ เนื่องจากข้อมูลความขรุขระนั้นไม่ต่อเนื่อง แต่สามารถระบุอย่างคร่าวๆ ว่าเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสมีค่าน้ำที่ความขรุขระตั้งแต่ประมาณ 250 nm ขึ้นไป

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองค่ามอดุลัสมีค่าน้ำของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่เคลือบบนวัสดุฐานรองที่มีความขรุขระประมาณ 350 nm มีค่าสูงที่สุดโดยมีค่ามอดุลัสมีค่าน้ำเฉลี่ยสูงถึง 104.8 องศา ซึ่งสำหรับฟิล์มที่มีความขรุขระเฉลี่ยที่ประมาณ 0.2 nm มีค่าเพียง 84.6 องศา เท่านั้น และค่าความขรุขระที่เริ่มส่งผลต่อค่ามอดุลัสมีค่าน้ำทำให้เกิดคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอยู่ที่ประมาณ 250 nm ขึ้นไป แต่ที่ความขรุขระต่ำๆ ในหลักสิบนานาเมตรแทบไม่ส่งผลต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มหรือส่งผลน้อยมาก นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่าแม้สมบัติเชิงเคมีของวัสดุจะเป็นแบบเดียวกัน แต่หากความขรุขระของพื้นผิวต่างกัน ก็ส่งผลต่อพลังงานเชิงผิวของวัสดุได้ การหาค่าพลังงานเชิงผิวโดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตและแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิคสำหรับฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรจำเป็นต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง และมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การนำค่ามอดุลัสมีค่าน้ำที่เสถียรที่สุดที่ถูกต้องไปใช้ในการคำนวณ

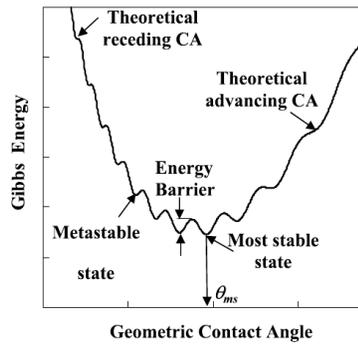
กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงได้โดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากโครงการทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (SAST) และทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ในส่วนของการติดตั้งเครื่องมือและวัสดุสำหรับการวิจัยจนสามารถติดตั้งเครื่องมือได้อย่างสมบูรณ์

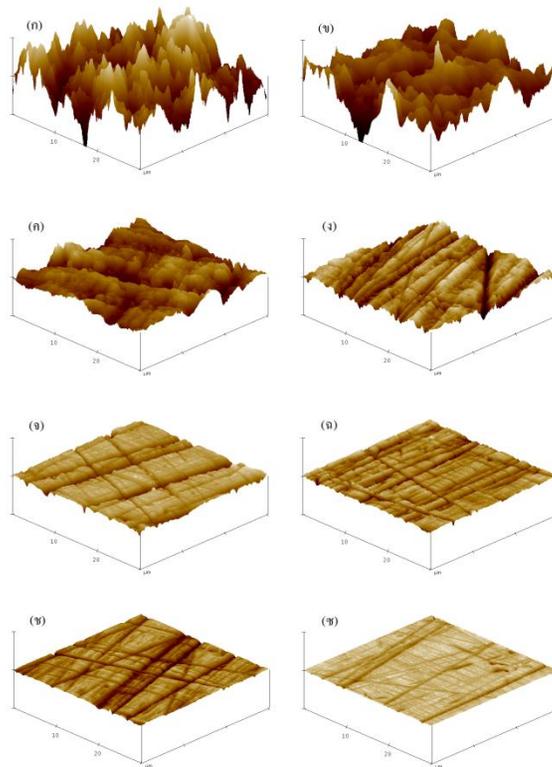
เอกสารอ้างอิง

1. Lemoine P, Quinn JP, Maguire P, McLaughlin JA. Comparing hardness and wear data for tetrahedral amorphous carbon and hydrogenated amorphous carbon thin films. *Wear*. 2004; (257): 509-522.

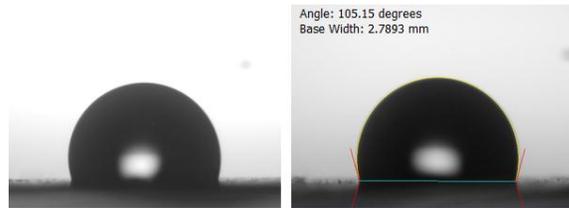
2. Zhou Y, Wang B, Zhang X, Zhao M, Li E, Yan H. The modifications of the surface wettability of amorphous carbon films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009; (335): 128-132.
3. Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*. 1997; (79): 667-677.
4. Marmur A. A guide to the equilibrium contact angles maze. In: Mittal KL. editor. *Contact angle, wettability and adhesion Vol. 6*. Nevada: Leiden Koninklijke Brill; 2009. p. 3-18.
5. Piazza F, Morell G. Wettability of hydrogenated tetrahedral amorphous carbon. *Diamond and Related Materials*. 2009; (18): 43-50.
6. Yan XB, Xu T, Yue SS, Liu HW, Xue QJ, Yang SR. Water-repellency and surface free energy of a-C:H films prepared by heat-treatment of polymer precursor. *Diamond & Related Materials*. 2005; (14): 1342-1347.
7. Banerjee D, Mukherjee S, Chattopadhyay KK. Controlling the surface topology and hence the hydrophobicity of amorphous carbon thin films. *Carbon*. 2010; (48): 1025-1031.
8. Holmberg K, Shah DO, Schwuger MJ, editors. *Handbook of applied surface and colloid chemistry Vol. 1-2*. John Wiley & Sons: New York; 2002.



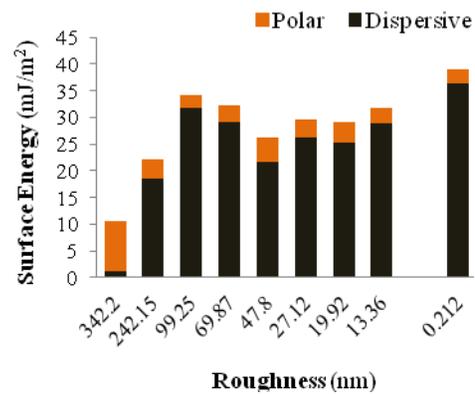
ภาพที่ 1 ตำแหน่งมุมที่เสถียรที่สุดในการวัดค่ามุมสัมผัส [5]



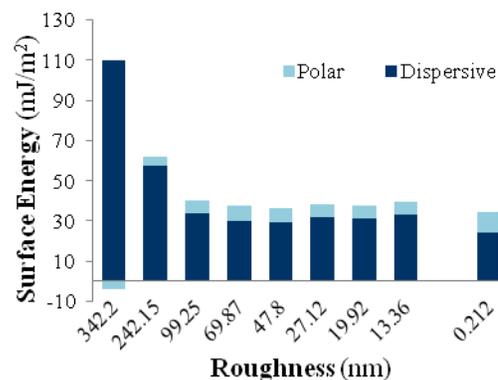
ภาพที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีค่าความขรุขระต่างกัน (ก) 332.9 nm (ข) 219.5 nm (ค) 87.0 nm (ง) 70.5 nm (จ) 50.3 nm (ฉ) 24.2 nm (ช) 23.9 nm (ซ) 12.7 nm



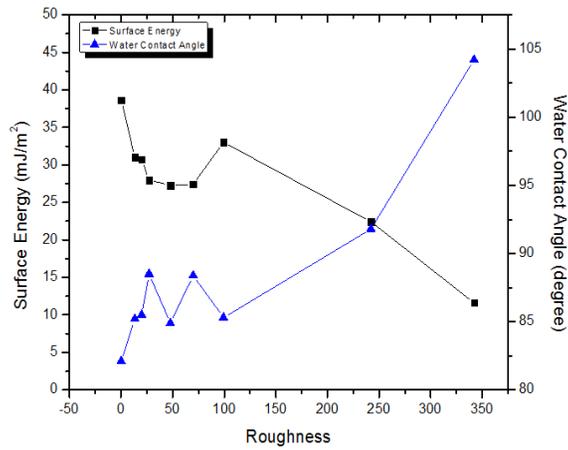
ภาพที่ 3 ลักษณะหยดน้ำกลั่นขจัดไอออนบนผิวฟิล์มที่มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุดที่ ~105 องศา



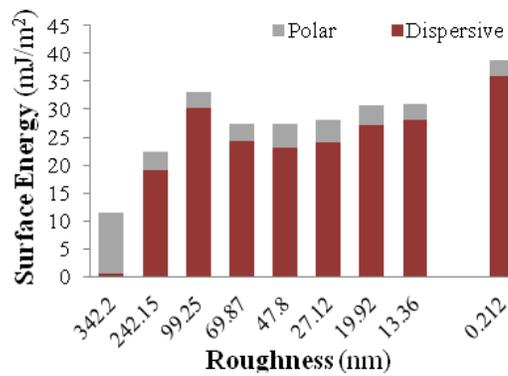
ภาพที่ 4 ค่าพลังงานเชิงผิวทั้งส่วนเชิงขั้วและเชิงกระจายของฟิล์มที่ได้จากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเทียบกับค่าความขรุขระ



ภาพที่ 5 ค่าพลังงานเชิงผิวทั้งส่วนเชิงขั้วและเชิงกระจายของฟิล์มที่ได้จากแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกเทียบกับค่าความขรุขระ



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสและพลังงานเชิงผิวจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตกับค่าความขรุขระของฟิล์ม



ภาพที่ 7 ค่าพลังงานเชิงผิวทั้งส่วนเชิงขั้วและเชิงกระจายของฟิล์มจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจากวิธีเฉลี่ยมุม

ตารางที่ 1 ตัวแปรและเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มบาง

ตัวแปรควบคุม	ระดับค่า
Base pressure	1.5×10^{-5} Torr
Electrode spacing	2.0 cm
Substrate position	power electrode
Substrate temperature	*RT
Deposition time	2 hrs and 30 minutes
Total flow rate	50 **sccm
CH ₄ (99.999% purity)	6.5%
H ₂ (99.999% purity)	93.5%
Deposition power	13 W

*RT คืออุณหภูมิห้อง และเมื่อเวลาผ่านไปมีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 20°C

** standard cubic centimeter per minute

ตารางที่ 2 ค่ามุมสัมผัสน้ำและกลีเซอรอลของฟิล์มที่มีความขรุขระต่างๆ กัน

ชื่อ	ค่าเฉลี่ยความ ขรุขระ (nm)	น้ำ		กลีเซอรอล	
		(องศา)		(องศา)	
		θ_{ms}	S.D.	θ_{ms}	S.D.
aCH-1r	0.212	84.6	0.92	69.21	2.69
aCH-2r	342.20	104.8	1.00	71.78	3.12
aCH-3r	242.15	94.2	2.08	67.66	2.91
aCH-4r	99.25	88.2	1.16	67.58	2.16
aCH-5r	69.87	87.8	1.32	68.99	2.05
aCH-6r	47.80	89.2	2.50	70.89	1.81
aCH-7r	27.12	88.8	1.70	69.27	1.59
aCH-8r	19.92	88.8	1.22	69.63	0.95
aCH-9r	13.36	88.8	1.26	68.08	2.07

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานเชิงผิวของฟิล์มจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

ชื่อ	ค่าเฉลี่ย ความขรุขระ(nm)	Surface Energy (mJ/m ²)		
		Polar	Dispersive	Total
aCH-1r	0.212	2.66	36.34	39
aCH-2r	342.20	9.48	1.19	10.67
aCH-3r	242.15	3.62	18.56	22.18
aCH-4r	99.25	2.47	31.75	34.22
aCH-5r	69.87	3.12	29.06	32.18
aCH-6r	47.80	4.53	21.59	26.12
aCH-7r	27.12	3.45	26.2	29.65
aCH-8r	19.92	3.66	25.35	29.01
aCH-9r	13.36	2.82	29	31.82

ตารางที่ 4 ค่าพลังงานเชิงผิวของฟิล์มจากแบบจำลองค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิค

ชื่อ	ค่าเฉลี่ย ความขรุขระ (nm)	Surface Energy (mJ/m ²)		
		Polar	Dispersive	Total
aCH-1r	0.212	10.14	24.09	34.23
aCH-2r	342.20	-4.25	109.68	105.42
aCH-3r	242.15	4.31	57.69	62.00
aCH-4r	99.25	6.14	33.99	40.13
aCH-5r	69.87	7.01	30.24	37.33
aCH-6r	47.80	6.74	29.29	36.03
aCH-7r	27.12	6.38	31.69	38.07
aCH-8r	19.92	6.55	30.92	37.47
aCH-9r	13.36	6.38	32.87	39.25