



ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว:
ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้เพื่อสร้างพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเองได้

The Lotus Effect: Theory and Application
to Artificial Self-Cleaning Surfaces

เพ็ญวิสาข์ พิสิษฐศักดิ์¹

บทคัดย่อ

นักวิทยาศาสตร์นำเอาองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect) มาพัฒนาพื้นผิวให้มีคุณสมบัติพิเศษโดยอาศัยการเลียนแบบพื้นผิวของใบบัว ทำให้ได้เป็นพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเองได้ (self-cleaning surface) พื้นผิวดังกล่าวจะสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและคงความสะอาดไว้ได้ยาวนานกว่าพื้นผิวทั่วไป หลักการพัฒนาพื้นผิวเลียนแบบใบบัวทำได้โดยทำให้พื้นผิวที่สนใจขรุขระและมีโครงสร้างไม่ชอบน้ำ ซึ่งสิ่งสกปรกจะมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวน้อยทำให้ไม่สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวนั้นได้และจะหลุดติดไปกับหยดน้ำที่กลิ้งผ่าน พื้นผิวเลียนแบบใบบัวจะมีคุณสมบัติสะท้อนน้ำยิ่งยวด นั่นคือมีค่ามุมสัมผัสเชิงสถิตมากกว่า 150° และหยดน้ำต้องสามารถกลิ้งบนพื้นผิวดำด้วยมุมเอียงพื้นผิวน้อยกว่า 10° แบบจำลองเบื้องต้นที่ใช้อธิบายการเปียกผิวและมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระได้แก่แบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie-Baxter's model) ใช้สำหรับพื้นผิวที่มีช่องอากาศแทรกอยู่ในร่องความขรุขระภายใต้หยดของเหลว ส่วนแบบจำลองของเวนเซล (Wenzel's model) ใช้สำหรับพื้นผิวขรุขระที่ไม่มีช่องอากาศ เมื่อเทียบระหว่างแบบจำลองทั้งสอง หยดน้ำที่อยู่ในสภาวะแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์จะสามารถกลิ้งไปบนพื้นผิวได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามมีการรายงานว่าหยดน้ำในสภาวะแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์สามารถเปลี่ยนไปสู่สภาวะเวนเซลได้ ปัจจุบันงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ทำความสะอาดตัวเองได้โดยการเลียนแบบผิวใบบัวถูกผลักดันสู่เชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวาง และยังมีผู้ให้ความสนใจศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง

ABSTRACT

Scientists have learned to apply the concept of the “lotus effect” to develop surfaces with special properties, i.e. those capable of cleaning themselves. The self-cleaning surfaces can be cleaned more easily, and will remain unsoiled longer than simple surfaces. To mimic a surface of a lotus leaf, the surface of interest must be rough and hydrophobic. Dirt particles with an extremely reduced contact area are picked up by water droplets and are thus easily washed away, leaving the surface clean. All lotus-like surfaces are superhydrophobic having a static contact angle greater than 150° and a water roll-off angle less than 10° . Two fundamental models that describe the contact angle of liquid with a rough surface are: first, the Cassie-Baxter’s model for a rough surface with air pockets present between the solid and the liquid; and the Wenzel’s model for a rough surface without air pockets. Comparing between these two models, the water droplet in a Cassie-Baxter state can roll-off more easily. However, the transitions from a Wenzel state to a Cassie-Baxter state have been reported. Currently, the research on self-cleaning surfaces based on the lotus effect becomes more significant to both academic fields and industrial applications.

คำสำคัญ: การเปื้อกผิว ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว พื้นผิวเลียนแบบใบบัว พื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้ พื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวด

Keywords: Lotus-like surface, Lotus effect, Self-cleaning surface, Superhydrophobicity, Wetting phenomenon

บทนำ

พื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้ (self-cleaning surface) คือพื้นผิวที่ทำความสะอาดได้ง่าย คงความสะอาดไว้ได้ยาวนาน จึงไม่ต้องการการล้างทำความสะอาดบ่อย ๆ ซึ่งจะช่วยลดการใช้น้ำ พลังงาน และสารเคมีในการทำความสะอาด ทำให้ผู้บริโภค ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังเป็นการรักษาสสิ่งแวดล้อม หลักการหนึ่งที่ใช้ประดิษฐ์พื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้ คือการทำให้พื้นผิวมีความสามารถสะท้อนน้ำยิ่งยวด (superhydrophobicity) และมีค่าฮิสเตอรีซิสของมุมสัมผัส (contact angle hysteresis) ต่ำ ซึ่งหลักการนี้ได้มาจากการเลียนแบบ

พื้นผิวของพืชบางชนิดในธรรมชาติ เช่นใบบัว (*Nelumbo Nucifera*) ที่แม้จะนำขึ้นมาจากน้ำโคลนก็ยังคงความสะอาดไว้ได้ ด้วยเหตุนี้บัวจึงกลายมาเป็นสัญลักษณ์ของความบริสุทธิ์สำหรับพุทธศาสนิกชน แม้มนุษย์จะสังเกตเห็นปรากฏการณ์ลักษณะนี้มานานกว่าสองพันปีแล้ว แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดังกล่าวเพิ่งเริ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงคริสต์ศักราช 1970 ที่มีการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (high-resolution scanning electron microscope) ซึ่งต่อมา ดร.วิลเฮล์ม บาร์ทโลทท์ (Wilhelm Barthlott) และคณะวิจัย (Barthlott and Ehler, 1977; Barthlott and Neinhuis, 1997) ได้

นำมาใช้ในการศึกษาพื้นผิวของใบบัว รวมทั้งพืชชนิดอื่น ๆ พวกเขาได้พบลักษณะร่วมที่ช่วยให้พืชเหล่านี้ทำความสะอาดตัวเองได้ และเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า “ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect)” Barthlott และคณะ จดสิทธิบัตรการค้นพบพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้แบบใบบัวในปี 1998 โดยอธิบายว่าเพราะผิวของใบบัวไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) และมีความขรุขระในระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตร ทำให้หยดน้ำฝนที่ตกลงมาไม่เปียกผิวใบ แต่จะเป็นหยดกลมกลิ้งพาเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ หลุดออกจากผิวใบไปอย่างง่ายดาย (รูปที่ 1a-1d) ซึ่ง

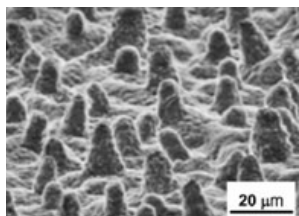
นักวิทยาศาสตร์ได้นำเอาแรงบันดาลใจจากปรากฏการณ์แบบใบบัวมาใช้ในการประดิษฐ์หรือดัดแปรผิว (surface modification) ให้ได้พื้นผิวที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจเกี่ยวกับพื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวดอย่างกว้างขวาง โดยมีการพัฒนาสารเคลือบผิว สีทาบ้าน แผ่นมุงหลังคา สิ่งทอ และพื้นผิวอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่จะใช้สารเคมีที่มีส่วนผสมของฟลูออรีน หรือใช้สารพวกซิลิโคนเคลือบบนพื้นผิวขรุขระ หรือผสมอนุภาคเล็ก ๆ ลงไปด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางการค้า ได้แก่ สีทาภายนอกอาคาร สเปรย์เคลือบผิว และผ้ากันน้ำ เป็นต้น



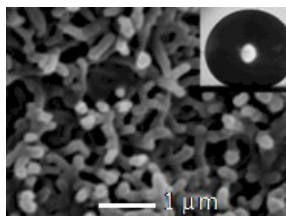
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 1 (a) ตัวอย่างใบบัว (ที่มา: Cannavale et al., 2010); (b) ลักษณะของหยดน้ำบนใบบัว (Guo and Liu, 2007); (c) ภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวใบบัว (Nosonovsky and Bhushan, 2007); (d) ภาพขยายของไขที่อยู่บนพาพิลลา (Guo and Liu, 2007)

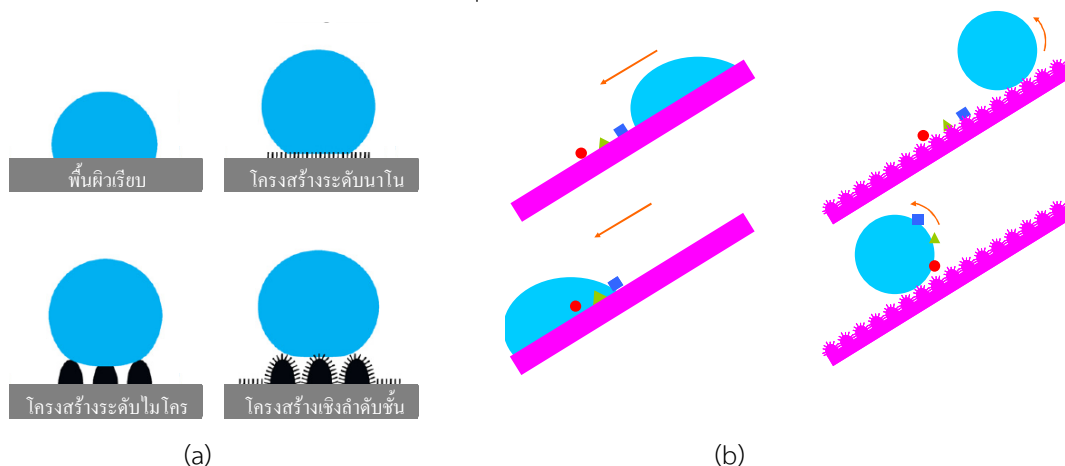
ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว

ใบบัวมีพื้นผิวที่ขรุขระประกอบด้วยปุ่มเล็ก ๆ เรียกว่าพาพิลลา (papilla) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร แต่ละปุ่มอยู่ห่างกัน 20-40 ไมโครเมตร บนปุ่มแต่ละปุ่มจะมีขนเล็ก ๆ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ขนเหล่านี้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทไข (epicuticular

wax crystals) ซึ่งโดยธรรมชาติสารประเภทนี้จะไม่ชอบน้ำ (รูปที่ 1d) การมีโครงสร้างความขรุขระระดับนาโนเมตร (ไข) อยู่บนโครงสร้างระดับไมโครเมตร (พาพิลลา) เรียกว่ามีโครงสร้างเชิงลำดับชั้น (hierarchical structure) พื้นผิวที่มีโครงสร้างลำดับชั้นจะมีพื้นที่สัมผัสยังผล (effective contact area) กับหยดน้ำและสิ่งสกปรกน้อยกว่าพื้นผิวเรียบและ

พื้นผิวขรุขระระดับเดียว (รูปที่ 2a) หยดน้ำจะวางตัวเป็นหยดกลมอยู่บนยอดของความขรุขระ คล้ายกับโยคีที่นั่งอยู่บนเตียงตะปู ทำให้มีช่องว่างอากาศเป็นปริมาณมากภายใต้หยดน้ำ ด้วยเหตุนี้ใบบัวจึงไม่เปียกน้ำ การที่ผิวใบบัวแห้งอยู่เสมอทำให้เชื้อโรค (pathogen) เช่น แบคทีเรีย สปอร์ของเชื้อรา ที่ต้องพึ่งพาน้ำไม่สามารถยึดเกาะกับผิวใบได้ (Bhushan and Jung, 2011) นอกจากนี้ความขรุขระยังทำให้อนุภาคสิ่งสกปรกต่าง ๆ ไม่สามารถเกาะติดอยู่บนใบบัว เนื่องจากอนุภาคสิ่งสกปรกจะมีแรงยึดติด (adhesion) กับผิวใบที่ขรุขระ

ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพที่ค่อนข้างอ่อน (Chow, 2007) ขณะที่อนุภาคสิ่งสกปรกสามารถยึดติดกับน้ำด้วยแรงคะปิลลารี (capillary forces) ซึ่งแข็งแรงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Pitois and Chateau, 2002; Reyssat et al., 2008) ดังนั้นเมื่อหยดน้ำกลิ้งผ่าน จะพาเอาอนุภาคสิ่งสกปรกหลุดออกไปด้วย ซึ่งต่างจากพื้นผิวเรียบที่อนุภาคสิ่งสกปรกจะยึดเกาะกับพื้นได้ดีจึงไม่หลุดไปกับหยดของเหลว ดังรูปที่ 2b



รูปที่ 2 (a) หยดของเหลวบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ (Bhushan and Jung, 2011); (b) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวบนพื้นเอียงที่มีอนุภาคสิ่งสกปรกอยู่ ระหว่างพื้นผิวเรียบ กับพื้นผิวที่ขรุขระด้วยโครงสร้างแบบลำดับชั้น (ดัดแปลงจาก: Genzer and Efimenko, 2006)

จากงานวิจัยของ Cheng และคณะพบว่าเมื่อใช้ความร้อนกำจัดเส้นขนระดับนาโนเหล่านั้นออกไป จะทำให้สมบัติการทำความสะอาดตัวเองของใบบัวลดลงอย่างมาก โครงสร้างลำดับชั้นจึงมีความสำคัญต่อคุณลักษณะการทำความสะอาดตัวเองได้ของใบบัว (Cheng et al., 2006) โดยมีผลการทดลองอื่น ๆ ที่สนับสนุนให้เชื่อว่าโครงสร้างขรุขระแบบลำดับชั้นจะช่วยให้สมบัติสะท้อนน้ำยิ่งยวดดีขึ้น (Gao and McCarthy, 2006a, 2006b) จากการสำรวจพืชและ

สัตว์ในธรรมชาติอื่น ๆ กว่า 200 ชนิด เช่น ปีกผีเสื้อ ขนเป็ด และขาของจิ้งจอกน้ำ ก็พบปรากฏการณ์แบบใบบัวในโครงสร้างลำดับชั้นเช่นเดียวกัน (Neinhuis and Barthlott, 1997; Bhushan, 2009) นอกจากนี้ Su et al. (2006) ได้ทำการทดลองและพบว่า ในพื้นผิวไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน พื้นผิวที่ขรุขระเท่านั้นจึงจะแสดงสมบัติแบบใบบัวได้

จากรายงานของ Koch และคณะ พบว่า มุมสัมผัสเชิงสถิต (static contact angle) ของหยดน้ำบนใบบัวมีค่าเท่ากับ 164 องศา และค่าฮิสเตอร์รีซิสของมุมสัมผัสเท่ากับ 3 องศา (Koch et al., 2009) ซึ่งจะได้อธิบายถึงในภายหลัง

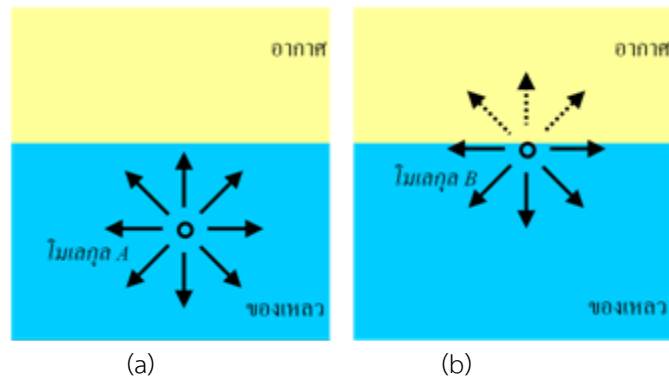
แรงตึงผิวและพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Woodruff, 1973)

แรงตึงผิว (surface tension) เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลกันของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เมื่อพิจารณาในระบบที่มีวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคอากาศ (รูปที่ 3) โมเลกุลที่อยู่ผิวหน้าของของเหลว (โมเลกุล B) มีโมเลกุลของเหลวด้วยกันล้อมรอบอยู่น้อยกว่าโมเลกุลที่อยู่ถัดเข้าไปภายในของเหลว (โมเลกุล A) หากพิจารณาในแง่ของแรงลัพธ์ โมเลกุล A จะถูกแรงยึดเหนี่ยวจากโมเลกุลของเหลวโดยรอบ (ตามลูกศรเส้นทึบ) เท่ากันในทุกทิศทาง ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อโมเลกุล A เป็นศูนย์ แต่สำหรับโมเลกุล B ที่อยู่ผิวหน้าของเหลวนั้น เนื่องจากเหนือผิวหน้าขึ้นไปจะไม่มีโมเลกุลของเหลวอยู่ แต่ยังมีโมเลกุลของเหลวที่อยู่ภายในของเหลวซึ่งยังส่งแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุล B ทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่จะดึงโมเลกุล B เข้าสู่ด้านในของเหลว (ตามลูกศรเส้นทึบ) ดังนั้นผิวหน้าของเหลวจึงพยายามหดตัวลง เกิดความตึงที่วัดค่าได้ เรียกว่า แรงตึงผิว แรงตึงผิวจึงเป็นแรงที่ของเหลวพยายามลดพื้นที่ผิว (surface area) ลง ดังนั้นถ้าไม่มีแรงกระทำจากภายนอก หยดของเหลวจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ซึ่งเป็นรูปร่างที่ให้พื้นที่ผิวน้อยที่สุด ณ ปริมาตรหนึ่ง ๆ (แม้ว่า

เหนือผิวหน้าของเหลว โมเลกุล B จะได้รับแรงยึดเหนี่ยวจากโมเลกุลของอากาศดังแสดงโดยลูกศรเส้นประในรูป 3b แต่แรงนี้จะมีค่าต่ำกว่าแรงยึดเหนี่ยวจากโมเลกุลของเหลว ทำให้แรงลัพธ์ที่โมเลกุล B ยังคงเป็นแรงดึงเข้าสู่ภายในเนื้อของเหลว)

เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าวัฏภาคของเหลว จะต้องมีการใช้พลังงานเพื่อแยกโมเลกุลของเหลว A ที่อยู่ติดกันออกจากกัน ให้กลายเป็นโมเลกุลที่ผิวหน้า (โมเลกุล B) พลังงานที่ใช้เรียกว่า พลังงานอิสระที่พื้นผิว ด้วยเหตุนี้โมเลกุล B ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ผิวหน้าวัฏภาคของเหลวจะมีพลังงานส่วนเกินเมื่อเทียบกับโมเลกุล A ที่อยู่ภายในของเหลว ของเหลวจึงมีแนวโน้มที่จะพยายามให้มีจำนวนโมเลกุลแบบ B ให้น้อยที่สุดเพื่อให้พลังงานของระบบต่ำที่สุด ซึ่งทำได้โดยการลดพื้นที่ผิวของเหลวนั้นให้ต่ำที่สุด

โดยสรุป พลังงานอิสระที่พื้นผิว คือพลังงานที่ใช้ในการสร้างพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยที่อุณหภูมิและความดันคงที่ สามารถแสดงได้ในรูปพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของพื้นผิว (energy per unit surface area) มีหน่วยเป็น mJ/m^2 หรือ erg/cm^2 และยังสามารถแสดงได้ในรูปแรงตึงผิว ซึ่งเป็นแรงตึงต่อหน่วยความยาวของเส้นรอยต่อระหว่างวัฏภาค ใช้หน่วย dynes/cm หรือ mN/m แรงตึงผิวจะใช้เมื่อกล่าวถึงการวัดพลังงานส่วนเกินที่พื้นผิวระหว่างของเหลวกับอากาศ แต่ถ้าระบบที่ศึกษาเป็นพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลวที่ไม่เข้ากัน จะใช้คำว่า interfacial tension ส่วนคำว่า surface free energy เป็นคำที่ไม่เจาะจง ใช้ได้กับทั้งพื้นผิวของเหลวและพื้นผิวของแข็ง



รูปที่ 3 อธิบายการเกิดแรงตึงผิว (a) โมเลกุลภายในของเหลว (โมเลกุล A) มีแรงยึดเหนี่ยวโดยรอบกับโมเลกุลของเหลวด้วยกันทุกทิศทาง; (b) โมเลกุลที่ผิวหน้าของเหลว (โมเลกุล B) มีบางส่วนที่สัมผัสกับอากาศ ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของเหลวด้วยกันเองน้อยลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โมเลกุลที่ผิวหน้าของเหลว B มีพลังงานสูงกว่าโมเลกุลภายในของเหลว A (ดัดแปลงจาก: Bruus, 2008)

การเปียกผิว (Sawhney, 2011)

ความสามารถในการเปียก (wettability) เป็นสมบัติพื้นฐานอย่างหนึ่งของวัสดุ ซึ่งจะบอกถึงโครงสร้างทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว เช่น ความเรียบหรือขรุขระ ซึ่งตัวแปรทั้งสองต่างก็มีผลต่อการเปียกผิว (wetting)

การเปียกผิวคือความสามารถของของเหลวที่จะรักษาสภาพสัมผัสกับของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากการแข่งขันระหว่างแรงสองประเภทที่เกิดขึ้นเมื่อของเหลวมาสัมผัสกับของแข็ง ได้แก่

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวด้วยกัน เรียกว่า แรงเชื่อมแน่น (cohesive force) จะทำให้ของเหลวพยายามหดตัวลงเป็นหยดกลม เพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง เรียกว่า แรงยึดติด (adhesive force) ซึ่งจะทำให้ของเหลวพยายามแผ่ตัวออก เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง

หากแรงเชื่อมแน่นมากกว่าแรงยึดติดของเหลวมีแนวโน้มจะไม่เปียกของแข็ง แต่หากแรง

เชื่อมแน่นน้อยกว่าแรงยึดติด ของเหลวมีแนวโน้มจะเปียกของแข็ง ซึ่งระดับการเปียกผิว (degree of wetting) สามารถวัดได้โดยดูจากค่ามุมสัมผัสของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง โดยมุมสัมผัสยิ่งน้อยแสดงว่าของเหลวเปียกผิวของแข็งได้ดี แต่หากของเหลวไม่เปียกผิวหรือเปียกผิวไม่ดีจะได้ค่ามุมสัมผัสที่สูง โดยรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อมุมสัมผัส

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปียกผิวกับพลังงานของพื้นผิว (de Gennes et al., 2004; Jiang and Feng, 2010)

พื้นผิวที่เป็นของแข็งนั้นแบ่งได้เป็นพื้นผิวที่มีพลังงานอิสระสูง กับพื้นผิวที่มีพลังงานอิสระต่ำ

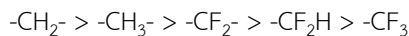
1. พื้นผิวที่มีพลังงานอิสระสูง คือพื้นผิวของของแข็งที่มีพันธะเคมีที่มีความแข็งแรง เช่น พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) พันธะไอออนิก (ionic bond) พันธะโลหะ (metallic bond) เมื่อพันธะเคมีที่ยึดเหนี่ยวอยู่ภายในมีความแข็งแรงสูง ก็จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการแยกส่วนของแข็งนั้นออกจากกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ค่าแรงตึงผิวของพื้นผิวประเภทนี้อยู่ที่

ประมาณ 500 – 5000 mN/m ได้แก่ โลหะ (metals) ออกไซด์ของโลหะ (metal oxides) ซัลไฟด์ของโลหะ (metal sulfides) เกลืออนินทรีย์ (inorganic salts) แก้ว (glasses) และเซรามิกส์ (ceramics) เป็นต้นของเหลวทั่วไปมักจะเปียกผิวพื้นผิวแบบนี้ได้ดี

2. พื้นผิวที่มีพลังงานอิสระต่ำ คือพื้นผิวของแข็งที่แรงยึดเหนี่ยวภายในเป็นแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) แรงเหล่านี้เป็นแรงอ่อนๆ ที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยการให้พลังงานเพียงเล็กน้อย ค่าแรงตึงผิวอยู่ในช่วง 10-50 mN/m พื้นผิวแบบนี้อาจเกิดการการเปียกผิวได้หลายระดับ ขึ้นกับชนิดของของเหลวที่ใช้ ตัวอย่างพื้นผิวพลังงานต่ำ ได้แก่ พื้นผิวของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ (organic solids) และพื้นผิวพอลิเมอร์ (polymers)

การสร้างพื้นผิวที่ไม่เปียก (non-wettable surface) สามารถทำได้โดยใช้โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบด้วยหมู่เมทิล หรือหมู่คาร์บอนที่ติดกับอะตอม

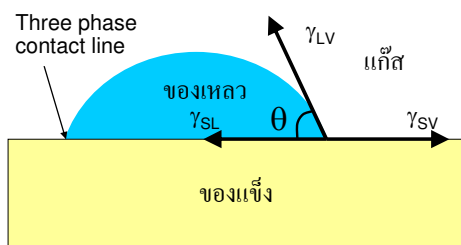
ฟลูออรีน ซึ่งพบว่าค่าพลังงานอิสระที่พื้นผิวเรียงตามลำดับจากสูงไปต่ำได้ดังนี้



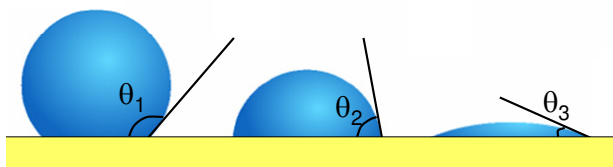
หมู่ $-\text{CF}_3$ เป็นหมู่ที่มีพลังงานอิสระที่พื้นผิวต่ำที่สุดเป็น 6.7 mN/m (Nishino et al., 1999)

มุมสัมผัส (Kumar, 2010; Yan et al., 2011)

มุมสัมผัส (contact angle) คือ มุมในหยดของเหลวที่ผิวสัมผัสของของเหลว-แก๊ส ทำกับ ผิวสัมผัสของของเหลว-ของแข็ง มักแทนด้วยสัญลักษณ์ θ ดังแสดงในรูปที่ 4 มุมสัมผัสใช้ชี้วัดความสามารถในการเปียกผิวได้ ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อย แสดงว่าหยดของเหลวมีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวมาก นั่นคือเปียกผิวได้ดี เนื่องจากมุมสัมผัสสัมพันธ์กับการเปียกผิว ดังนั้นปัจจัยที่กำหนดการเปียกผิวย่อมกำหนดขนาดมุมสัมผัส ซึ่งได้แก่ พลังงานอิสระที่พื้นผิว และลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว



(a)



(b)

รูปที่ 4 (a) หยดของเหลวบนพื้นผิวเรียบ แสดงมุมสัมผัส (θ) และแรงตึงผิวของเหลว-แก๊ส (γ_{LV}), แรงตึงผิวของเหลว-ของแข็ง (γ_{SL}), และแรงตึงผิวของแข็ง-แก๊ส (γ_{SV}); (b) จากซ้ายไปขวา แสดงการเปียกผิวจากซ้ายไปขวาเรียงจากต่ำไปสูง ($\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$)

ถ้า $\theta < 90^\circ$ หยดของเหลวจะแผ่ตัวกว้างบนผิวของแข็ง (มีพื้นที่สัมผัสกับของแข็งมาก) ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นน้ำ เรียกว่าพื้นผิวนั้นมีคุณสมบัติชอบน้ำ

(hydrophilic) มักเป็นพื้นผิวพลังงานสูงและประกอบขึ้นจากโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecules)

ถ้า $\theta > 90^\circ$ จะถือว่าการเปียกผิวต่ำ

ของเหลวจะมีรูปร่างเป็นหยดอยู่บนผิวของแข็ง (มีพื้นที่สัมผัสกับของแข็งน้อย) ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นน้ำ เรียกว่า พื้นผิวนั้นมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) พื้นผิวไม่ชอบน้ำมักเป็นพื้นผิวพลังงานต่ำซึ่งประกอบขึ้นจากโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecules)

กรณีที่ $\theta > 150^\circ$ แสดงว่าพื้นผิวนั้นมีสมบัติสะท้อนน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic surface) ซึ่งหยดน้ำจะเป็นหยดกลมบนพื้นผิว พื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวกับหยดน้ำมีน้อยมาก มักเกิดจากพื้นผิวขรุขระที่ปกคลุมด้วยสารไม่ชอบน้ำ

Genzer and Efimenko (2000) รายงานว่า ค่ามุมสัมผัสสูงสุดของหยดน้ำบนพื้นผิวเรียบของสารประเภทออร์แกโนซิลอนที่มีฟลูออรีน (fluorinated organosilane) มีค่าประมาณ 130° ซึ่งถือเป็นขีดจำกัดสูงสุดของค่ามุมสัมผัสสำหรับพื้นผิวเรียบ หากต้องการให้มุมสัมผัสสูงกว่านี้ การปรับโครงสร้างทางเคมีอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ต้องปรับสภาพให้พื้นผิวขรุขระร่วมด้วย ซึ่งจะสามารถทำให้ได้มุมสัมผัสกับน้ำสูงถึง 170°

มุมสัมผัสบนพื้นผิวเรียบ

เมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของแข็งเรียบ (smooth solid surface) ของเหลวและของแข็งจะเข้าสู่สมดุลด้วยมุมสัมผัสค่าหนึ่งที่เรียกว่ามุมสัมผัสเชิงสถิต (static contact angle, θ_0) หรือมุมสัมผัสของยัง (Young contact angle) (Young, 1805) เนื่องจากพลังงานอิสระที่พื้นผิวสามารถแสดงได้ในรูปของแรงต่อความยาวดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงกล่าวได้ว่าที่เส้นแนวรอยต่อระหว่างวัฏภาคของแข็ง ของเหลว และอากาศ (three phase contact line) จะมีแรงดึงผิวอยู่สามประเภท คือ แรงดึงผิวของเหลว-แก๊ส (γ_{LV}), แรงดึงผิวของเหลว-ของแข็ง (γ_{SL}), และแรงดึงผิว

ของแข็ง-แก๊ส (γ_{SV}) (รูปที่ 4a) เมื่อระบบอยู่ในสมดุล (equilibrium state) การทำสมดุลแรงจะได้ผลดังสมการที่ 1 ซึ่งเรียกว่าสมการของยัง (Young equation)

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta_0 \quad (1)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2)$$

นอกจากการทำสมดุลแรงแล้ว สมการของยังสามารถหาได้จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่พื้นผิว (dE) เทียบกับการกระจัดด้วยระยะ dx ของเส้นแนวรอยต่อระหว่างของแข็ง ของเหลว และอากาศ

$$dE = (\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) dx + \gamma_{LV} dx \cos \theta'$$

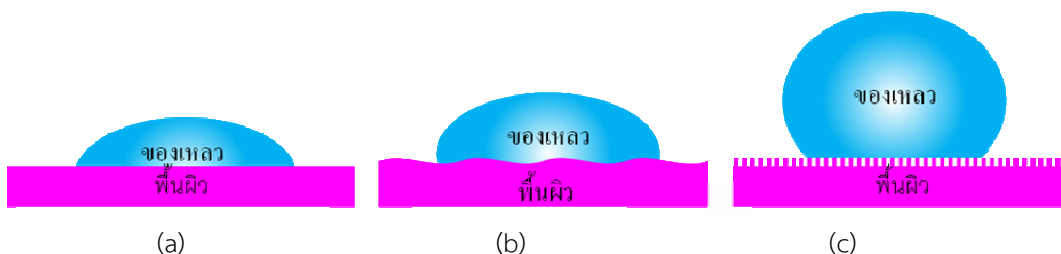
ที่สภาวะสมดุล $dE = 0$, แทนค่ามุมสัมผัส θ' ด้วยมุมสัมผัสที่สมดุล คือ θ_0 ก็จะได้สมการที่ (1) และ (2) เช่นกัน

สมการของยังใช้ได้กับพื้นผิวในอุดมคติ (ideal surface) คือพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเฉื่อย (inert) ผิวราบ (flat) ผิวเรียบ (smooth) แข็งเกร็ง (rigid) และมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวตลอด (chemically homogenous) ซึ่งพื้นผิวแบบนี้จะให้ค่ามุมสัมผัสที่เสถียรเพียงค่าเดียว กล่าวได้ว่ามุมสัมผัสของยังเป็นผลมาจากสมบัติทางเคมีของพื้นผิว แต่พื้นผิวในความเป็นจริงนั้นไม่ใช่พื้นผิวในอุดมคติ เช่น พื้นผิวมีความขรุขระ หรือองค์ประกอบทางเคมีมีความไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้พลังงานพื้นผิวไม่สม่ำเสมอไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมการของยังให้อธิบายพื้นผิวในความเป็นจริงได้มากขึ้น

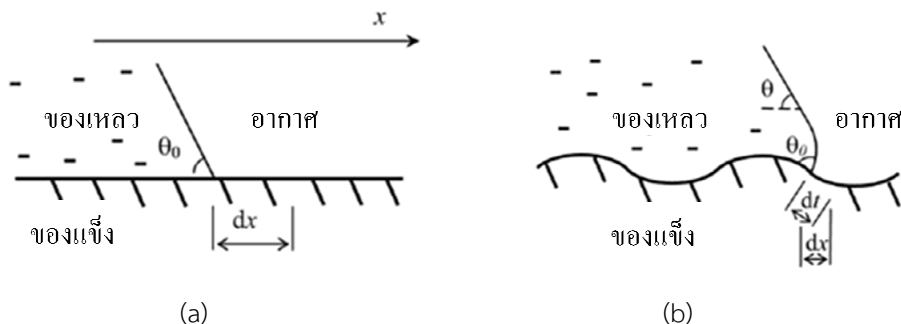
มุมสัมผัสบนพื้นผิวขรุขระ

เมื่อพิจารณากรณีที่พื้นผิวขรุขระ มุมสัมผัส นอกจากจะเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวแล้ว ยังเป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวด้วย สมการที่ใช้อธิบายมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนพื้นผิวเหล่านี้มีสองแบบจำลองหลัก ๆ คือ แบบจำลองของเวนเซล (Wenzel, 1936) และแบบจำลองของแคเซีย-

แบ็กซ์เทอร์ (Cassie and Baxter, 1944) ทั้งนี้จะเป็นไปตามแบบจำลองใดนั้นขึ้นกับลักษณะความขรุขระของพื้นผิวเป็นปัจจัยหลัก (รูปที่ 5) โดยแบบจำลองของเวนเซลจะเหมาะกับพื้นผิวความขรุขระต่ำ ส่วนแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ เหมาะกับพื้นผิวที่มีความขรุขระสูง



รูปที่ 5 (a) หยดของเหลวบนพื้นผิวเรียบ; (b) หยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ ตามสมการของเวนเซล มักเกิดบนพื้นผิวขรุขระน้อย มีปุ่มที่มีลักษณะอ้วนเตี้ย; (c) หยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระตามสมการของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ มักเกิดบนพื้นผิวขรุขระมาก มีปุ่มเป็นแท่งผอมสูงและมีช่องอากาศระหว่างปุ่ม (Genzer and Efimenko, 2006)



รูปที่ 6 แสดงมุมสัมผัสเชิงสถิติ (θ_0) ซึ่งวัดได้จาก (a) พื้นผิวเรียบ และ (b) และมุมสัมผัสปรากฏ (θ) ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากพื้นผิวขรุขระ (Nosonovsky, 2007)

แบบจำลองเวนเซล (Wenzel's model)

สมการของเวนเซลใช้กับพื้นผิวขรุขระที่มีองค์ประกอบเคมีเพียงอย่างเดียว และไม่มีอากาศในร่องของพื้นผิว หยดของเหลวจะเติมเต็มร่องของพื้นผิว (รูปที่ 5b)

ค่ามุมสัมผัสเชิงสถิติ (θ_0) ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ เป็นค่าที่วัดได้บนพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 6a) แต่กรณีที่พื้นผิวมีความขรุขระ ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ย่อมไม่ใช่ค่า θ_0 ที่แท้จริง แต่จะเรียกว่าค่ามุมสัมผัสปรากฏ (apparent contact angle, θ) ซึ่งหมายถึงค่ามุม

สัมผัสที่วัดได้จากหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ (รูปที่ 6b)

Nosonovsky (2007) แสดงว่าเมื่อด้านหน้าของหยดของเหลวเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวขรุขระใน 2 มิติ (รูปที่ 6a-6b) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่พื้นผิวเทียบกับระยะทางที่ของเหลวเดินทางไปบนพื้นผิว dt จะได้ว่าแรงดึงผิวมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{dW}{dt} = \gamma_{SL} - \gamma_{SV}$$

dt สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ dx ซึ่งเป็นระยะทางตามแนวแกน x ของพื้นผิว

$$\frac{dW}{dx} = \frac{dW}{dt} \left(\frac{dt}{dx} \right) = (\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) \frac{dt}{dx} \quad (3)$$

ถ้าพื้นผิวมีความขรุขระสม่ำเสมอ dt/dx จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (roughness factor, R_f) ซึ่งเป็นค่าคงตัวตลอดพื้นผิว ดังนั้น จากสมการที่ (3)

$$\text{แทนค่า } \frac{dt}{dx} = R_f \text{ จะได้ว่า}$$

$$\gamma_{LV} \cos \theta = R_f (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) \quad (4)$$

เมื่อนำสมการที่ (4) ไปเทียบกับสมการที่ (2) จะได้สมการของเวเนเซล

$$\cos \theta = R_f \cos \theta_0 \quad (5)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัสบนผิวขรุขระ

θ_0 คือ สัมผัสบนผิวเรียบ หรือมุมสัมผัสของยัง

R_f เป็นอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของแข็ง (A_{SL}) ต่อพื้นที่ภาพฉายหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง (geometric projected contact area, A_F)

ดังนั้น $R_f \geq 1$ ดังนั้นตามแบบจำลองเวเนเซลพื้นผิวที่ขรุขระจะทำให้ของเหลวกับของแข็งมีพื้นผิวสัมผัสกันมากขึ้น

สำหรับพื้นผิวชอบน้ำ ($\theta_0 < 90^\circ$) เมื่อความขรุขระ R_f เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า θ ลดลง พื้นผิวยิ่งชอบน้ำมากขึ้น

สำหรับพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ($\theta_0 > 90^\circ$) ความขรุขระเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า θ เพิ่มขึ้น พื้นผิวยิ่งชอบน้ำน้อยลง

จากการศึกษาโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม ได้ข้อสรุปว่า สภาวะเวเนเซลจะเกิดได้บนพื้นผิวขรุขระที่มีส่วนนูนในลักษณะอ้วนเตี้ยกระจายตัวอยู่บนพื้นผิว (Yoshimitsu et al., 2002; He and Patankar, 2003; Patankar 2003; Marmur, 2004) ดังรูปที่ 5b

แบบจำลองแคสเซีย (Cassie's model)

แบบจำลองเวเนเซลใช้กับพื้นผิวที่องค์ประกอบทางเคมีเป็นเหมือนกัน แต่ในกรณีที่พื้นผิวมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมากกว่าหนึ่งชนิดกระจายตัวเป็นหน่วยเล็ก ๆ โดยพื้นที่ของแต่ละหน่วยเล็กกว่าขนาดของหยดของเหลวมาก แคสเซียและแบ็กซ์เทอร์ (Cassie and Baxter, 1944) ถือว่าหยดของเหลวจะต้องสัมผัสกับองค์ประกอบต่างๆบนพื้นผิวนั้น ค่ามุมสัมผัสปรากฏของพื้นผิวในกรณีที่พื้นผิวประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีสององค์ประกอบ (องค์ประกอบที่ 1 และ 2) อาจอธิบายได้โดยสมการของแคสเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie-Baxter's equation) ดังต่อไปนี้

$$\cos(\theta) = f_1 \cos(\theta_1) + f_2 \cos(\theta_2) \quad (6)$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 แทนมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ตามลำดับ

ϕ_1 และ ϕ_2 แทนสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลว-องค์ประกอบที่ 1 และ ของเหลว-องค์ประกอบที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น $\phi_1 + \phi_2 = 1$

หากพื้นผิวเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระสูงและเป็นพื้นผิวไม่ชอบน้ำ เป็นไปได้ว่าหยดน้ำจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปตามร่องเล็กระหว่างปุ่มบนพื้นผิวขรุขระ ดังนั้นในร่องเล็กภายใต้หยดน้ำจะเป็นช่องอากาศ (air pocket) ดังรูปที่ 5c จึงถือได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวนี้นี้จะประกอบด้วยของแข็ง (องค์ประกอบที่ 1) และอากาศ (องค์ประกอบที่ 2)

θ_1 จะกลายเป็นมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็ง กำหนดตัวแปรใหม่เป็น θ_0

θ_2 จะกลายเป็นมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับอากาศ กำหนดตัวแปรใหม่เป็น θ_{LV}

ϕ_1 และ ϕ_2 กลายเป็นสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งและระหว่างหยดของเหลวกับอากาศ กำหนดตัวแปรใหม่เป็น ϕ_{SL} และ ϕ_{LV} ตามลำดับ แทนค่าตัวแปรใหม่ลงในสมการที่ (6) จะได้ว่า

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{LV} \cos(\theta_{LV})$$

เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ (θ_{LV}) = 180° ดังนั้นจะได้ $\cos(\theta_{LV}) = -1$

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) - \phi_{LV}$$

แทนค่า $\phi_{LV} = 1 - \phi_{SL}$ จะได้ว่า

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{SL} - 1$$

เมื่อนำสมประสิทธิ์ความขรุขระ (R_f) มาพิจารณาด้วย จะได้สมการของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์ที่ปรับปรุงแล้ว (Marmur, 2003; Patankar, 2004) ดังนี้

$$\cos(\theta) = R_f \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{SL} - 1 \quad (7)$$

จะเห็นว่า เมื่อ $\phi_{SL} = 1$ (ไม่มีฟองอากาศในช่องว่าง หยอดของเหลวสัมผัสกับพื้นผิวที่เป็นของแข็งเท่านั้น) สมการที่ (7) จะกลายเป็นสมการของเวนเซล ในสมการที่ (5) นั่นเอง สมการที่ (7) นั้นนำมาใช้ในกรณีที่ยอดของเหลวแตะอยู่บนส่วนที่เป็นปุ่ม (protrusion) ของพื้นผิวขรุขระ โดยไม่ลงไปในร่องระหว่างปุ่ม ภายในร่องเหล่านี้นี้จึงกักเก็บอากาศไว้ ดังนั้นผิวสัมผัสของหยดของเหลวกับพื้นผิวเป็นผิวสัมผัสเชิงประกอบ (composite interface) ที่มีทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและอากาศ

จากแบบจำลองแคเซีย-แบ็กส์เทอร์ โดยทางทฤษฎีเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับอากาศให้มากขึ้น หรือมีค่า ϕ_{LV} สูงขึ้น จะได้ว่า สำหรับพื้นผิวชอบน้ำ ($\theta_0 < 90^\circ$) สามารถเปลี่ยนไปสู่สภาพไม่ชอบน้ำได้ ที่ค่า ϕ_{LV} ดังนี้ (Jung and Bhushan, 2006)

$$\phi_{LV} \geq \frac{R_f \cos \theta_0}{R_f \cos \theta_0 + 1} \quad \text{สำหรับ } \theta_0 < 90^\circ$$

แต่ในทางปฏิบัติอาจไม่ได้ค่า ϕ_{LV} สูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนมาสู่สภาพไม่ชอบน้ำได้ หรืออาจพบว่าที่ ϕ_{LV} สูงมาก ช่องอากาศที่ได้จะไม่มีเสถียรภาพ

สำหรับพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ($\theta_0 > 90^\circ$) ค่า ϕ_{LV} ที่สูงขึ้นจะทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นไม่ว่าพื้นผิวนั้นจะเรียบหรือขรุขระก็ตาม

เมื่อไม่นานมานี้ มีผู้ศึกษาว่าสมการของเวนเซลและสมการของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์จะใช้ได้ต่อเมื่อยอดของเหลวมีขนาดใหญ่พอเมื่อเทียบกับขนาดของความขรุขระ (Marmur, 2003; Wolansky and Marmur, 1999, Brandon et al., 2003) นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าระบบในสถานะแคเซีย จะเกิดจากพื้นผิวขรุขระที่มีส่วนนูนในลักษณะเป็นแท่งผอมสูง

กระจายตัวอยู่ห่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูป 5c (Yoshimitsu et al., 2002; He and Patankar, 2003; Patankar, 2003; Marmur, 2004)

การเปลี่ยนสภาวะการเปียก

เนื่องจากพื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวดจำเป็นต้องมีผิวสัมผัสเชิงประกอบที่มีความเสถียร ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเสถียรภาพของสภาวะแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ จะขอเรียกโดยย่อว่า “สภาวะแคเซีย” และ “สภาวะเวนเซล” ซึ่ง Nosonovsky and Bhushan (2008b) ทำการทดลองและสรุปว่าสภาวะแคเซียสามารถเปลี่ยนไปสู่สภาวะเวนเซลโดยเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้ สภาวะเวนเซลนอกจากขึ้นกับความขรุขระของพื้นผิวแล้ว ยังถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้โดยการให้แรงกดกับหยดของเหลว (Jung and Bhushan, 2008) ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Krupenkin et al., 2004) หรือทำให้เกิดการสั่น (Bormashenko et al., 2007) เป็นต้น แต่ยังไม่พบรายงานการเปลี่ยนจากสภาวะเวนเซลไปเป็นสภาวะแคเซีย นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าการเปลี่ยนสภาวะจากสภาวะเวนเซลไปสู่สภาวะแคเซียจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานพื้นผิวสุทธิระหว่างสภาวะทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่า เมื่อมุมสัมผัสซึ่งทำนายจากสมการของสภาวะทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นที่มาของมุมสัมผัสวิกฤต (critical contact angle)

มุมสัมผัสวิกฤต

Bico et al. (2006) เสนอว่าสภาวะแบบเวนเซล จะเปลี่ยนเป็นสภาวะแบบแคเซีย (Cassie state) เมื่อมุมสัมผัสของยังมีความมากกว่ามุมสัมผัสวิกฤต (θ_c) จากการตั้งสมการที่ (5) เทากับสมการที่ (7) จะได้สมการแสดงค่า θ_c ดังต่อไปนี้

$$\cos \theta_c = \frac{\phi_{SL} - 1}{R_f - \phi_{SL}} \quad (8)$$

โดย θ_c คือค่ามุมสัมผัสวิกฤตที่เป็นผลจากสัมประสิทธิ์ความขรุขระ R_f

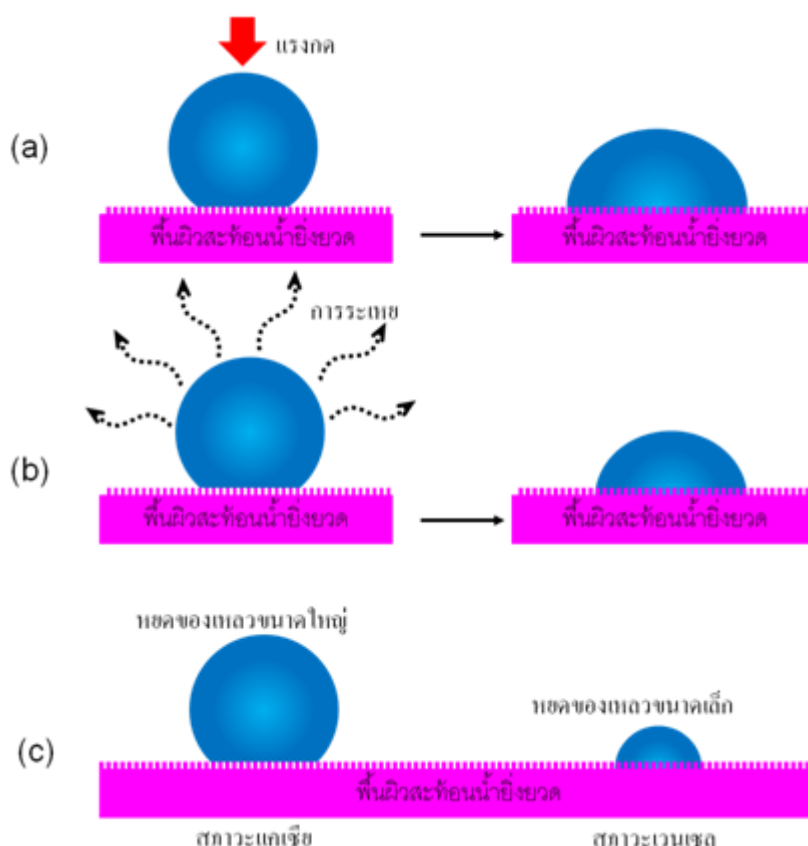
Bico et al. แสดงให้เห็นว่า ที่ $\theta > \theta_c$ หยดของเหลวจะอยู่ในสภาวะแคเซีย และที่ $\theta < \theta_c$ หยดของเหลวจะอยู่ในสภาวะเวนเซล

อย่างไรก็ตาม พบว่ามีบางมุมสัมผัสซึ่งเข้าเงื่อนไข $\theta < \theta_c$ แต่หยดของเหลวยังสามารถอยู่ในสภาวะแคเซียได้ แสดงว่าขณะนั้นระบบอยู่ในสภาวะอุปเสถียร (metastable state) Callies and Quéré (2005) สรุปว่า ปัจจัยที่กำหนดว่าหยดของเหลวจะอยู่ในสภาวะใด นอกจากขึ้นกับลักษณะของพื้นผิวแล้ว ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นร่วมด้วย พวกเขาพบว่าหยดของเหลวที่อยู่ในสภาวะแคเซียสามารถเปลี่ยนไปสู่สภาวะเวนเซลได้เมื่อได้รับแรงกด (รูปที่ 7a), เมื่อหยดของเหลวเกิดการระเหยไปบางส่วน (รูปที่ 7b), และยังขึ้นกับวิธีที่ใช้ถ่ายหยดของเหลวบนพื้นผิวด้วย พวกเขาพบว่า บนพื้นผิวเดียวกัน ปริมาตรหยดของเหลวสามารถกำหนดสภาวะของระบบได้ จากรูป 7c หยดของเหลวขนาดใหญ่จะอยู่ในสภาวะแคเซีย ขณะที่หยดของเหลวขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการฉีดพ่นของเหลวเป็นละอองฝอยจะอยู่ในสภาวะเวนเซล ดังนั้นบนพื้นผิวเดียวกันหยดของเหลวอาจอยู่ในสภาวะแคเซียหรือสภาวะเวนเซลก็ได้

Nosonovsky and Bhushan (2008a) เชื่อว่ามีกลไกต่างๆที่ทำให้ลายเสถียรภาพ (destabilization) ของหยดของเหลวในสภาวะแคเซีย ได้แก่ คลื่นเคปิลลารี (capillary wave) การควบแน่น (condensation) และ การสะสมตัว (accumulation) ของหยดของเหลวระดับนาโน ตลอดจนความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิว (surface inhomogeneity) ซึ่ง

กลไกเหล่านี้ล้วนขึ้นกับระดับความขรุขระและการมีความขรุขระในหลายระดับจะสามารถช่วยป้องกันไม่ให้เสถียรภาพของหยดของเหลวในสภาวะแคเซียถูกทำลายได้ นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงปัจจัยที่กำหนดการเปลี่ยนสภาวะอื่น ๆ เช่น ความโค้งของหยดของเหลว (droplet curvature) (Quéré, 2005) โครงสร้างความขรุขระของพื้นผิวและขนาดของหยดของเหลว (Extrand, 2002) เมื่อพิจารณาในแง่ของ

พลังงานที่เกี่ยวข้อง Patankar (2004) เสนอว่าการเปลี่ยนสภาวะจากสภาวะแคเซียซึ่งมีพลังงานสูงไปยังสภาวะเวนเซลที่มีพลังงานต่ำกว่าเกิดขึ้นได้ด้วยการลดลงของพลังงานศักย์โน้มถ่วง (gravitational potential energy) จากการที่หยดของเหลวค่อยๆเติมร่องความขรุขระบนพื้นผิว แม้สมมติฐานเหล่านี้จะมีหลายผลงานวิจัยที่สนับสนุน แต่ก็ยังไม่แน่ชัดว่าการเปลี่ยนสภาวะเกิดผ่านกลไกใดเป็นหลัก



รูปที่ 7 แสดงหยดของเหลวในสภาวะแคเซีย (หยดทางซ้าย) และสภาวะเวนเซล (หยดทางขวา) บนพื้นผิวเดียวกัน การเปลี่ยนจากสภาวะแคเซียไปสู่สภาวะเวนเซลเกิดขึ้นได้จาก (a) การให้แรงกด, (b) การระเหยของเหลวออกไปบางส่วน และ (c) ขนาดของหยดของเหลว (ดัดแปลงจาก Callies and Quéré, 2005)

ฮิสเตอร์ิซิสของมุมสัมผัส

แรงเชื่อมแน่นระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของแข็งจะมีค่าสูงในสภาวะเวนเซล แต่จะมีค่าต่ำใน

สภาวะแคเซีย ดังนั้นในสภาวะแคเซีย หยดของเหลวจะหลุดออกจากพื้นผิวได้ง่ายกว่าในสภาวะเวนเซล (Bico, 1999) ตัวแปรหนึ่งที่ใช้บอกพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว

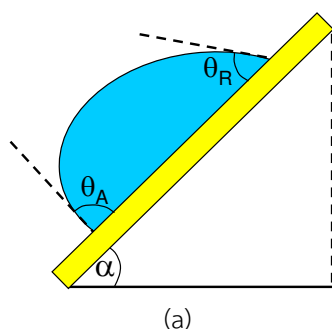
ของหยดของเหลวบนพื้นผิวก็คือ ฮิสเตอร์ิซิสของมุมสัมผัส (contact angle hysteresis, CAH)

CAH สัมพันธ์กับความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวนั้นๆ เช่น ความขรุขระ หรือองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่สม่ำเสมอ โดย CAH จะบอกถึงพลังงานที่หยดของเหลวสูญเสียไประหว่างการไหลผ่านพื้นผิว

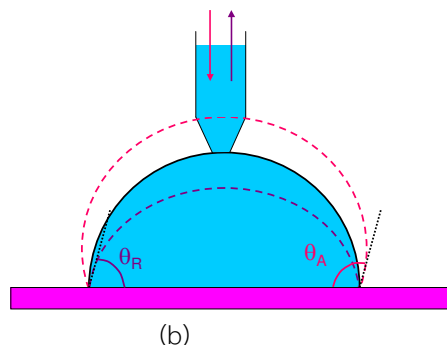
ค่า CAH อาจหาได้จากการวัดมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนพื้นเอียง (tilt method) (Oner and McCarthy, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 8a เมื่อยกพื้นผิวให้เอียงพอที่หยดของเหลวกำลังจะเกิดการไหล ด้วยมุมเอียงพื้นผิว α (roll-off angle หรือ tilt angle) หยด

ของเหลวมีแนวโน้มจะไหลจากบนลงล่าง มุมสัมผัสของหยดของเหลวทางด้านล่างจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า มุมสัมผัสล้าหน้า (Advancing contact angle, θ_A) แต่ทางด้านบนมุมสัมผัสของหยดของเหลวจะเล็กลง เรียกว่ามุมสัมผัสถอยกลับ (Receding contact angle, θ_R) ซึ่ง ค่า CAH คำนวณได้จากผลต่างระหว่างขนาดของมุมสัมผัสล้าหน้ากับมุมสัมผัสถอยกลับ ดังนี้

$$CAH = \theta_A - \theta_R \quad (9)$$



(a)



(b)

รูปที่ 8 แสดงการหาค่า CAH โดย (a) การวัดมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนพื้นเอียง; และ (b) วิธีเพิ่ม/ลดปริมาตรของเหลว

อีกวิธีการหนึ่งที่ใช้วัด CAH ได้คือวิธีเพิ่มและลดปริมาตรหยดของเหลวบนพื้นผิว (add/remove method) ดังรูป 8b (Gao and McCarthy, 2006c) ซึ่งอาศัยหลักการว่าการดูดของเหลวออกจากหยดของเหลวจะทำให้มุมสัมผัสที่อ่านได้มีค่าน้อยลง ส่วนการเพิ่มปริมาตรของเหลวในหยดของเหลวจะทำให้มุมสัมผัสใหญ่ขึ้น มุม θ_R เป็นมุมสัมผัสที่วัดได้เมื่อดูดของเหลวปริมาณมากที่สุดออกจากหยดของเหลวแล้ว ยังไม่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของแข็งลดลง ส่วนมุม θ_A คือมุมสัมผัสที่วัดได้

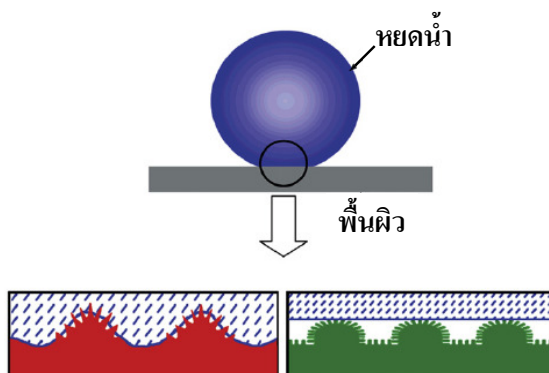
เมื่อเติมของเหลวปริมาณมากที่สุดเข้าไปในหยดของเหลวแล้วยังไม่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของแข็งเพิ่มขึ้น ค่า CAH คือผลต่างระหว่าง θ_A และ θ_R เช่นเดียวกับวิธีใช้พื้นเอียง เนื่องจากวิธีการเพิ่มหรือลดปริมาตรของหยดของเหลวปลายเข็มที่ใช้ดูดหรือเพิ่มปริมาตรของเหลวจะต้องจุ่มอยู่ในหยดของเหลวตลอดเวลาในระหว่างทำการวัด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ โดยมากนักวิจัยจึงนิยมใช้วิธีพื้นเอียงมากกว่า

หยดของเหลวบนพื้นผิวทั่ว ๆ ไป ยิ่งให้ค่า CAH ต่ำเท่าไร แสดงว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวดำทำให้หยดของเหลวเคลื่อนที่ลงไปตามพื้นเอียงได้ง่าย ที่ค่า CAH ต่ำ นี้หยดของเหลวอาจไหลโดยการกลิ้ง ซึ่งการกลิ้งจะช่วยพาสิ่งสกปรกหลุดออกไปจากพื้นผิวได้ดีและเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการทำความสะอาดตนเอง

เงื่อนไขของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองได้โดยเลียนแบบปรากฏการณ์ใบบัว

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด พื้นผิวที่จะทำความสะอาดตัวเองได้นั้นนอกจากหยดน้ำจะต้องทำมุมสัมผัสเชิงสถิตกับพื้นผิวไม่ต่ำกว่า 150° แล้ว ยังต้องมีค่า CAH ต่ำ (สภาวะแคเซีย) นั่นคือหยดน้ำจะต้องมีลักษณะค่อนข้างกลมและกลิ้งออกไปได้ด้วยการเอียงพื้นผิวนั้นๆ เพียงเล็กน้อย ปกติมุมเอียงพื้นผิวจะต้องมีค่าน้อยกว่า 10° (มุม α ในรูปที่ 8a) ในการพัฒนาพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยหลักการแบบใบบัว จึงควรรายงานทั้งค่ามุมสัมผัสเชิงสถิต และค่า CAH เพราะการที่มุมสัมผัสเชิงสถิตสูง มิได้แปลว่าหยดของเหลวจะกลิ้งตัวได้ดีเสมอไป ตัวอย่างเช่น การ

เปรียบเทียบพื้นผิวของใบบัวกับพื้นผิวของกลีบกุหลาบ ซึ่งต่างก็ให้มุมสัมผัสเชิงสถิตกับหยดน้ำเกิน 150° (มีสมบัติสะท้อนน้ำยิ่งยวด) แต่หยดน้ำจะกลิ้งบนใบบัวได้ดีแม้เอียงใบเพียงเล็กน้อย (ค่า CAH ต่ำ) ในทางตรงข้าม หยดน้ำจะติดแน่นอยู่บนกลีบกุหลาบแม้ว่าจะจับให้ด้านที่มีหยดน้ำคว่ำลงก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของกลีบกุหลาบมีค่าสูง (ค่า CAH สูง) ซึ่งอธิบายได้ว่าทั้งกลีบกุหลาบและใบบัวต่างก็มีโครงสร้างขรุขระในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร แต่โครงสร้างความขรุขระเหล่านี้ของกลีบกุหลาบจะหยากกว่าโครงสร้างความขรุขระของใบบัว บนพื้นผิวใบบัว หยดน้ำจะไม่สามารถแทรกเข้าไปในร่องความขรุขระได้ จึงมีแรงยึดเหนี่ยวกับผิวใบบัวต่ำ แต่สำหรับกลีบกุหลาบ แม้หยดน้ำจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าร่องที่มีขนาดเล็กมากได้ แต่ยังสามารถซึมเข้าไปเปียกร่องซึ่งมีขนาดใหญ่ (ระดับไมโครเมตร) ได้ (รูปที่ 9) ทำให้หยดน้ำที่มีขนาดเล็ก ๆ สามารถมีแรงยึดเหนี่ยวกับกลีบกุหลาบได้สูงจึงไม่กลิ้งหลุดไปง่าย ๆ เว้นแต่หยดน้ำที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากซึ่งอาจจะกลิ้งหลุดไปตามแรงโน้มถ่วงได้ ปรากฏการณ์ที่หยดน้ำกลมยัดเกาะบนผิวของกลีบกุหลาบนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์แบบกลีบดอกไม้ (petal effect) (Feng et al., 2008)



รูปที่ 9 (a) หยดน้ำบนผิวกลีบกุหลาบ หยดน้ำสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างพาดิลาได้ (petal effect)
(b) หยดน้ำบนผิวใบบัว หยดน้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างได้ (lotus effect) (Feng et al., 2008)

การพัฒนาพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้โดยเลียนแบบปรากฏการณ์ใบบัว

การเตรียมพื้นผิวทำให้สะท้อนน้ำยิ่งยวดแบบใบบัว จะต้องทำให้พื้นผิวมีทั้งความขรุขระและความไม่ชอบน้ำ ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธี คือ ทำพื้นผิวของวัสดุไม่ชอบน้ำให้ขรุขระ หรือ สร้างพื้นผิวขรุขระแล้วดัดแปรพื้นผิวด้วยสารไม่ชอบน้ำ

1) การปรับพื้นผิวของวัสดุไม่ชอบน้ำให้ขรุขระ เป็นการนำวัสดุไม่ชอบน้ำมาทำการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความขรุขระ

วัสดุไม่ชอบน้ำที่มีการศึกษาวิจัย ได้แก่

1.1 พอลิเมอร์ประเภทฟลูออโรคาร์บอน (fluorinated polymers) คือพอลิเมอร์ที่มีอะตอมของฟลูออรีนและคาร์บอนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล พื้นผิวของสารประกอบประเภทนี้มีพลังงานอิสระที่พื้นผิวดำต่ำที่สุด พอลิเมอร์ที่ศึกษากันมากคือ พอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) (Zhang et al., 2004; Shiu et al., 2005; Singh et al., 2005) เนื่องจาก พอลิเมอร์ประเภทฟลูออโรคาร์บอนละลายในตัวทำละลายได้ยาก จึงมักมีการนำไปผสม (Xu et al., 2005) หรือนำไปเชื่อมโยง (Yabu and Shimomura, 2005) กับสารเคมีอื่น ๆ ที่สามารถเตรียมให้เป็นพื้นผิวขรุขระได้ง่าย

1.2 ซิลิโคน (silicones) เป็นวัสดุที่จัดว่ามีพลังงานอิสระที่พื้นผิวดำต่ำ ซิลิโคนพอลิเมอร์ชนิดพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxane, PDMS) เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ดีและไม่ชอบน้ำอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาเตรียมพื้นผิวสะท้อนยิ่งยวดได้โดยตรง นอกจากนี้ยังมีการใช้ในรูปพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) กับพอลิสไตรีน (polystyrene) ด้วย (Khorasani et al., 2005; Jin et al., 2005; Sun et al., 2005)

1.3 สารอินทรีย์ (organic materials) สารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และอาจพบธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ร่วมด้วย ซึ่งพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักเป็นสารอินทรีย์อยู่แล้ว ตัวอย่างพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymers) ที่มีการนำมาพัฒนาพื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวดได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) (Lu et al., 2004) พอลิสไตรีน (polystyrene) (Jiang et al., 2004; Lee et al., 2004) พอลิเอไมด์ (polyamide) (Zhang et al., 2005) และ พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) (Zhao et al., 2005) เป็นต้น

1.4 สารอนินทรีย์ (inorganic materials) สารอนินทรีย์บางชนิด เช่นแผ่นฟิล์มจากอนุภาคนาโนแบบท่อน (nanorod films) ของ ZnO (Feng et al., 2004) หรือ TiO₂ (Feng et al., 2005) สามารถนำมาใช้สร้างพื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวด โดยพบว่า สมบัติสะท้อนน้ำยิ่งยวดของ ZnO เกิดจากลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพราะอนุภาคนาโนแบบท่อนร่วมกับการหักเหของแสงที่ไม่น่าชอบน้ำออกสู่ผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม มีรายงานว่าสมบัติสะท้อนน้ำทั้งของ ZnO และ TiO₂ จะกลายเป็นสมบัติชอบน้ำยิ่งยวดได้ (superhydrophilicity) เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV irradiation) แต่เมื่อนำกลับมาเก็บในที่มืด แผ่นฟิล์มก็จะสามารถกลับมาแสดงสมบัติสะท้อนน้ำยิ่งยวดได้อีก

2) การสร้างพื้นผิวที่ขรุขระและเคลือบทับพื้นผิวด้วยสารไม่ชอบน้ำ

แม้ว่าการทำพื้นผิววัสดุไม่ชอบน้ำให้ขรุขระจะทำให้ได้พื้นผิวสะท้อนน้ำยิ่งยวดภายในขั้นตอนเดียว แต่มีวัสดุเพียงไม่กี่ประเภทที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและสามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นเพื่อให้สร้างพื้นผิวสะท้อนน้ำ

ยิ่งยวดได้จากวัสดุที่มีความหลากหลายขึ้น สามารถนำวัสดุที่สนใจมาปรับพื้นผิวให้ขรุขระ (surface roughening) จากนั้นจึงดัดแปรพื้นผิววัสดุที่ขรุขระอยู่แล้วให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobization) ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคมีที่ไม่ชอบน้ำโดยอาจให้สารไม่ชอบน้ำเกิดการเชื่อมต่อกับพื้นผิวด้วยพันธะเคมี (chemical bonds) ด้วยการดูดซับ (adsorption) หรือด้วยการยึดเกาะทางกายภาพ (physical binding) ตัวอย่างการเชื่อมต่อกับพันธะเคมี เช่น ทองคำ (gold) สามารถยึดเหนี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันไทออล (thiol group) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ได้

วิธีการสร้างความขรุขระให้กับพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แรงดึง (mechanical stretching) (Zhang et al., 2004) การกัดผิวด้วยเลเซอร์/พลาสมา/สารเคมี (laser/plasma/chemical etching) (Jin et al., 2005; Shiu et al., 2005; Qian and Shen, 2005) เทคนิคลิโทกราฟี (lithography) (Notsu et al., 2005) กระบวนการโซล-เจล (sol-gel processing) (Hikita et al., 2005) การหล่อแบบสารละลาย (solution casting) (Yabu and Shimomura, 2005) การสร้างฟิล์มเป็นชั้น ๆ และเคลือบทับด้วยคอลลอยด์ (layer-by-layer and colloidal assembly) (Zhai et al., 2004) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) (Han and Steckl, 2009) และ การใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical deposition) (Darmanin et al., 2010) เป็นต้น

ข้อสังเกตในการใช้งานพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้แบบใบบัว

วัสดุที่มีพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้แบบใบบัวนั้นต้องอาศัยการไหลผ่านของน้ำเพื่อชะล้างสิ่ง

สกปรก จึงน่าจะเหมาะกับพื้นผิวที่โดนฝนเป็นพิเศษ นอกจากนี้พื้นผิวจะไม่สามารถแสดงสมบัติการทำความสะอาดตัวเองหากสัมผัสกับสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารดังกล่าวจะไปทำให้น้ำเปียกพื้นผิวได้ซึ่งขัดแย้งกับปรากฏการณ์แบบใบบัว ข้อพึงระวังอีกข้อหนึ่งคือสารเคลือบผิวอาจหลุดลอกออกได้เมื่อถูกขัดถู ดังนั้นอาจพิจารณาการใช้งานที่ไม่ต้องการความคงทนของพื้นผิวมากนัก Blosssey (2003) จึงเสนอแนวคิดที่จะดัดแปลงปรากฏการณ์แบบใบบัวมาใช้ในรูปสเปรย์ฉีดพ่นหรือใช้กับวัสดุที่การใช้งานต้องการประสิทธิภาพแค่ชั่วคราว ซึ่งการเคลือบพื้นผิวใหม่แต่ละครั้งควรมีต้นทุนต่ำ นักวิจัยจาก BASF ทำการผลิตสเปรย์สะท้อนน้ำต้นแบบ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาและอะลูมินา ผสมกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ และสารขับเคลื่อน (propellant) เมื่อฉีดพ่นบนพื้นผิววัตถุกลางแจ้ง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบด้วยสเปรย์จะยังคงสะอาดมากกว่าพื้นผิวที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ

เนื่องจากโครงสร้างความขรุขระแบบลำดับชั้นของพื้นผิวแบบใบบัวอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้ เมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลานาน และจากการถูกกัดเซาะโดยน้ำฝน ลูกเห็บ และฝุ่นผง ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะให้พื้นผิวประดิษฐ์ (artificial surface) สามารถฟื้นฟูตัวเอง (self-healing) เช่นเดียวกับพื้นผิวใบไม้ในธรรมชาติ (Solga et al., 2007) ซึ่งจะกลายเป็นโจทย์ที่ท้าทายสำหรับนักวิทยาศาสตร์ต่อไป

บทสรุป

พื้นผิวที่มีคุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองได้ ด้วยหลักการแบบใบบัวนั้น จะต้องเป็นพื้นผิวที่สะท้อนน้ำยิ่งยวด นั่นคือมีค่ามุมสัมผัสเชิงสถิตมากกว่า 150° และหยดน้ำต้องสามารถกลิ้งบนพื้นผิวด้วยมุมเอียงพื้นผิวน้อยกว่า 10° (มีค่า CAH ต่ำ) นักวิทยาศาสตร์

พบว่า พื้นผิวลักษณะเช่นนี้ในธรรมชาติมักจะเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระเชิงลำดับชั้น และมีโครงสร้างทางเคมีที่ไม่ชอบน้ำ หยดน้ำกับพื้นผิวจะมีพื้นที่สัมผัสกันโดยตรงน้อยมาก เมื่อหยดน้ำกลิ้งไปบนพื้นผิวก็จะสามารถพาเอาสิ่งสกปรกหลุดไปจากพื้นผิวได้ด้วย ซึ่งนักวิทยาศาสตร์พัฒนาพื้นผิวเลียนแบบใบบัวโดยนำพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอยู่แล้วมาทำให้ขรุขระ หรือนำพื้นผิวมาทำให้ขรุขระและดัดแปรด้วยสารไม่ชอบน้ำ ซึ่งจนถึงปัจจุบันได้มีการนำวัสดุและเทคนิคที่หลากหลายมาใช้

สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเปียกผิวและปรากฏการณ์แบบใบบัวนั้น มีสมการพื้นฐานในการเปียกผิวคือสมการของยัง ซึ่งใช้ในการทำความเข้าใจการเปียกผิวบนพื้นผิวของแข็งในอุดมคติ (ผิวเรียบ) สมการของเวเนเซลใช้อธิบายการเปียกพื้นผิวขรุขระที่หยดของเหลวสามารถเติมเต็มร่องความขรุขระของพื้นผิว และสมการของแคเซียใช้ศึกษาหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระที่มีอากาศแทรกอยู่ในร่องความขรุขระภายใต้หยดของเหลว สมการเหล่านี้เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การเปียกผิวรูปแบบต่างๆ รวมทั้งใช้ประกอบแนวคิดในการพัฒนาพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้ แม้ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์จะพัฒนาทฤษฎีต่างๆ ไว้บ้างแล้ว แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเปียกพื้นผิวที่ขรุขระยังไม่สมบูรณ์ ยังคงมีคำถามต่าง ๆ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ยังสามารถทำการวิจัยต่อยอดเพื่อค้นหาคำตอบต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- Barthlott, W. and Ehler, N. (1977). Rasterelektronenmikroskopie der epidermisoberflächen von spermatophyten. *Tropische und Subtropische Pflanzenwelt* 19: 367–467.
- Barthlott, W. and Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202: 1–8.
- Bhushan, B. (2009). Biomimetics: lessons from nature – an overview. *Phil Trans R Soc A*. 367: 1445–1486.
- Bhushan, B., Jung, Y.C. (2011). Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science* 56: 1–108.
- Bhushan, B., Jung, Y.C. and Koch, K. (2009). Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 367: 1631–1672.
- Bico, J., Marzolin, C., and Quéré, D. (1999). Pearl drops. *Europhysics Letters* 47: 220–226
- Blossey, R. (2003). Self-cleaning surfaces-virtual realities. *Natural Materials* 2: 301–306.
- Bormashenko, E., Pogreb, R., Whyman, G. and Erlich, M. (2007). Cassie–Wenzel wetting transition in vibrated drops deposited on the rough surfaces: is dynamic Cassie–Wenzel transition 2D or 1D affair?. *Langmuir* 23: 6501–6503.
- Brandon, S., Haimovich, N., Yeger, E. and Marmur, A. (2003). Partial wetting of chemically patterned surfaces: the effect of drop size. *Journal of Colloid and Interface Science* 263: 237–243.
- Bruus, H. (2008). *Theoretical Microfluidics*. New York: Oxford University Press. p.124.
- Callies M, Quéré D. (2005). On water repellency. *Soft Matter*. 1: 55 – 61.

- Cannavale, A., Fiorito, F., Manca, M., Tortorici, G., Cingolani, R. and Gigli, G. (2010). Multifunctional bioinspired sol-gel coatings for architectural glasses. *Building and Environment* 45: 1233-1243.
- Cassie, A. and Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* 40: 546-551.
- Cheng, Y.T., Rodak, D.E., Wong, C.A. and Hayden, C.A. (2006). Effects of micro- and nano-structures on the self-cleaning behavior of lotus leaves. *Nanotechnology* 17: 1359-1362.
- Chow, T. S. (2007). Nanoscale surface roughness and particle adhesion on structures substrates. *Nanotechnology*. 18: 1-4.
- Darmanin, T., Taffin de Givenchy, E., Amigoni, S. and Guittard, F. (2010). *Langmuir* 26: 17596-17602.
- De Gennes, P.G., Brochard-Wyart, F. and Quere, D. (2004). *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. New York: Springer. p.18.
- Extrand, C.W. (2002). Model for contact angle and hysteresis on rough and ultra-phobic surfaces. *Langmuir* 18: 7991-7999.
- Feng, L., Zhang, Y.A., Xi, J.M., Zhu, Y., Wang, N., Xia, F. and Jiang, L. (2008). Petal effect: a superhydrophobic state with high adhesive force. *Langmuir* 24: 4114-4119.
- Feng, X.J., Feng, L., Jin, M.H., Zhai, J., Jiang, L. and Zhu, D.B. (2004). Reversible superhydrophobicity to super-hydrophilicity transition of aligned ZnO nanorod films. *Journal of the American Chemical Society* 126: 62-63.
- Feng, X.J., Zhai, J. and Jiang, L. (2005). The fabrication and switchable superhydrophobicity of TiO₂ nanorod films. *Angewandte Chemie International Edition* 44: 5115-5118.
- Gao, L.C. and McCarthy, T.J. (2006a). "Artificial Lotus leaf" prepared using a 1945 patent and a commercial textile. *Langmuir* 22: 5998-6000.
- Gao, L.C. and McCarthy, T.J. (2006b). The "Lotus Effect" explained: two reasons why two length scales of topography are important. *Langmuir* 22: 2966-2967.
- Gao, L.C. and McCarthy, T.J. (2006c). Contact angle hysteresis explained. *Langmuir* 22: 6234-6237.
- Genzer, J. and Efimenko, K. (2000). On designing and creating long-lived superhydrophobic surfaces through mechanically assembled monolayers (MAMs). *Science* 290: 2130-2133.
- Genzer, J. and Efimenko, K. (2006). Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review. *Biofouling* 22: 339-360.
- Guo, Z. and Liu, W. (2007). Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: binary structure and unitary structure. *Plant Science* 172: 1103-1112.
- Han, D. and Steckl, A. (2009) Superhydrophobic and oleophobic fibers by coaxial electrospinning. *Langmuir* 25: 9454-9462.
- He, B., Patankar, N.A. and Lee, J. (2003). Multiple equilibrium droplet shapes and design criterion for rough hydrophobic surfaces. *Langmuir* 19: 4999-5003.
- Hikita, M. Tanaka, K., Nakamura, T., Kajiyama, T., Takahara, A. (2005). Superliquid-repellent surfaces prepared by colloidal silica nanoparticles covered with fluoroalkyl groups. *Langmuir* 21: 7299-7302.
- Jiang, L., Zhao, Y. and Zhai, J. (2004). A lotus-leaf-like superhydrophobic surface: a porous microsphere/nanofiber composite film

- prepared by electrohydrodynamics. *Angewandte Chemie International Edition* 43: 4338–4341.
- Jiang, L. and Feng, L. (2010). *Bioinspired Intelligent Nanostructured Interfacial Materials*. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. and China: Chemical Industry Press. p. 110.
- Jin, M.H., Feng, X.J., Xi, J.M., Zhai, J., Cho, K.W., Feng L. and Jiang, L. (2005). Superhydrophobic PDMS surface with ultra-low adhesive force. *Macromolecular Rapid Communications* 26: 1805–1809.
- Jung, Y.C. and Bhushan, B. (2006) Contact angle, adhesion, and friction properties of micro- and nanopatterned polymers for superhydrophobicity. *Nanotechnology* 17: 4970–4980.
- Jung, Y.C. and Bhushan, B. (2008). Dynamic effects of bouncing water droplets on superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 24: 6262–6269.
- Khorasani, M.T., Mirzadeh, H., Kermani, Z. (2005) Wettability of porous polydimethylsiloxane surface: morphology study. *Applied Surface Science*. 242: 339–345.
- Koch, K., Bhushan, B., Jung, Y.C. and Barthlott, W. (2009). Fabrication of artificial lotus leaves and significance of hierarchical structure for superhydrophobicity and low adhesion. *Soft Matter* 5: 1386–1393.
- Krupenkin, T.N., Taylor, J.A., Schneider, T.M. and Yang, S. (2004). From rolling ball to complete wetting: the dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces. *Langmuir* 20: 3824–3827.
- Kumar, C.S.S.R. (Ed.) (2010). *Biomimetic Nanostructured Thin Films and Surfaces*. Wiley-VCH, Weinheim, p. 333.
- Lee, W. Jin, M.K., Yoo, W.C. and Lee, J.K. (2004). Nanostructuring of a polymeric substrate with well-defined nano-meter-scale topography and tailored surface wettability. *Langmuir* 20: 7665–7669.
- Lu, X.Y., Zhang, C.C. and Han, Y.C. (2004). Low-density polyethylene superhydrophobic surface by control of its crystallization behavior. *Macromolecular Rapid Communications* 25: 1606–1610.
- Marmur, A. (2003). Wetting on hydrophobic rough surfaces: to be heterogeneous or not to be? *Langmuir* 19: 8343–8348.
- Marmur, A. (2004). The Lotus effect: superhydrophobicity and metastability. *Langmuir* 20: 3517–3519.
- Neinhuis, C. and Barthlott, W. (1997). Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79: 667–677.
- Nishino, T., Meguro, M., Nakamae, K., Matsushita, M. and Ueda, Y. (1999). The lowest surface free energy based on $-CF_3$ alignment. *Langmuir* 15: 4321–4323.
- Nosonovsky, M. (2007). On the range of applicability of the Wenzel and Cassie equations. *Langmuir* 23: 9919–9920.
- Nosonovsky, M., and Bhushan, B. (2007). Hierarchical roughness makes superhydrophobic states stable. *Microelectronic Engineering*. 84: 382–386.
- Nosonovsky, M. and Bhushan, B. (2008a). Capillary effects and instabilities in nanocontacts. *Ultramicroscopy* 108: 1181–1185.
- Nosonovsky, M. and Bhushan, B. (2008b) Patterned non-adhesive surfaces: superhydrophobicity and wetting regime transitions. *Langmuir* 24: 1525–1533.

- Notsu, H., Kubo, W., Shitanda, I. and Tatsuma, T. (2005). Super-hydrophobic/superhydrophilic patterning of gold surfaces by photocatalytic lithography. *Journal of Materials Chemistry* 15: 1523–1527.
- Oner, D. and McCarthy, T.J. (2000). Ultrahydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability. *Langmuir* 16: 7777–7782.
- Patankar, N.A. (2003). On the modeling of hydrophobic contact angles on rough surfaces. *Langmuir* 19: 1249–1253.
- Patankar, N.A. (2004). Transition between superhydrophobic states on rough surfaces. *Langmuir* 20: 7097–7102.
- Pitois, O. and Chateau, X. (2002). Small particle at a fluid interface: effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment. *Langmuir* 18: 9751–9756.
- Qian, B.T. and Shen, Z.Q. (2005). Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on aluminum, copper, and zinc substrates. *Langmuir* 21: 9007–9009.
- Quére D. (2005). Non-sticking drops. *Reports on Progress in Physics* 68: 2495–2535.
- Reyssat, M., Yeomans, J. M. and Quére D. (2008). Impalement of fakir drops. *Europhysics Letters* 81: 26006.
- Sawhney, G.S. (2011). *Fundamentals of Fluid Mechanics*, I.K. New Delhi: International Publishing House Pvt. Ltd. p. 44.
- Shiu, J.Y., Kuo, C.W. and Chen, P. (2005). Fabrication of tunable superhydrophobic surfaces. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* 5648: 325–332.
- Singh, A., Steely, L. and Allcock, H.R. (2005). Poly[bis(2,2,2-trifluoroethoxy)phosphazene] superhydrophobic nanofibers. *Langmuir* 21: 11604–11607.
- Su, C., Li, J., Geng, H., Wang, Q. and Chen, Q. (2006). Fabrication of an optically transparent super-hydrophobic surface via embedding nano-silica. *Applied Surface Science* 253: 2633–2636.
- Solga, A., Cerman, Z., Striffler, B.F., Spaeth, M. and Barthlott, W. (2007). The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces. *Bioinspiration & Biomimetics* 2: S126–S134.
- Sun, M.H., Luo, C.X., Xu, L.P., Ji, H., Qi, O.Y., Yu, D.P., and Chen, Y. (2005). Artificial lotus leaf by nanocasting. *Langmuir* 21: 8978–8981.
- Wenzel, R.N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 28: 988–994.
- Wolansky, G. and Marmur, A. (1999). Apparent contact angles on rough surfaces: the Wenzel equation revisited. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 156: 381–388.
- Woodruff, D.P. (1973). *The Solid-Liquid Interface*. New York: Cambridge University Press. pp.1-4.
- Yabu, H. and Shimomura, M. (2005). Single-step fabrication of transparent superhydrophobic porous polymer films. *Chemistry of Materials* 17: 5231–5234.
- Yan, Y.Y., Gao, N., Barthlott, W. (2011). Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: a review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science* 169: 80–105.
- Yoshimitsu, Z., Nakajima, A., Watanabe, T. and Hashimoto, K. (2002). Effects of surface structure on the hydro-phobicity and sliding

- behavior of water droplets. *Langmuir* 18: 5818–5822.
- Xu, L., Chen, W., Mulchandani, A. and Yan, Y. (2005). Reversible conversion of conducting polymer films from superhydrophobic to superhydrophilic. *Angewandte Chemie International Edition* 44: 6009–6012.
- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95: 65-87.
- Zhai, L., Cebeci, F.C., Cohen, R.E. and Rubner, M.F. (2004). Stable superhydrophobic coatings from polyelectrolyte multilayers. *Nano Letters* 4: 1349–1353.
- Zhang, J., Lu, X., Huang, W. and Han, Y. (2005). Reversible superhydrophobicity to superhydrophilicity transition by extending and unloading an elastic polyamide film. *Macromolecular Rapid Communications* 26: 477–480.
- Zhang, J.L., Li, J.A. and Han, Y.C. (2004). Superhydrophobic PTFE surfaces by extension. *Macromolecular Rapid Communications* 25: 1105–1108.
- Zhao, N., Xu, J., Xie, Q.D., Weng, L.H., Guo, X.L., Zhang, X.L. and Shi, L.H. (2005). Fabrication of biomimetic superhydrophobic coating with a micro-nano-binary structure. *Macromolecular Rapid Communications* 26: 1075–1080.

