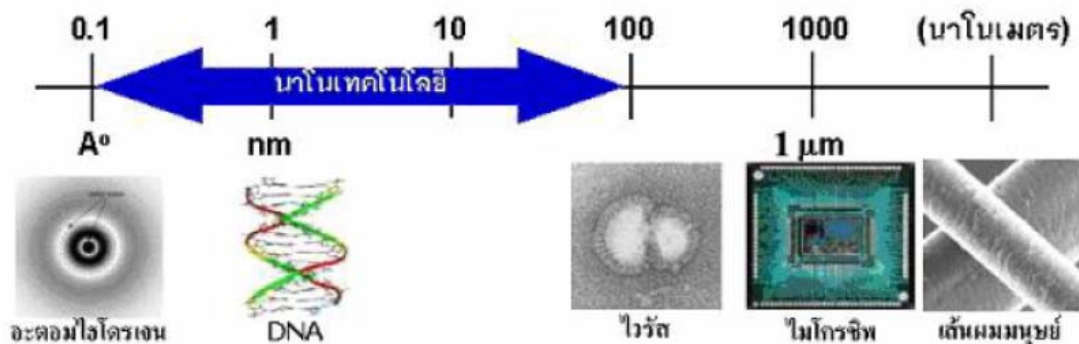


# นาโนเทคโนโลยี (NANOTECHNOLOGY)

เสรีย์ ตูประกาย<sup>1</sup> สิริวัลภ์ เรืองช่วย<sup>2</sup>

นาโนเทคโนโลยี คือเทคโนโลยีในการประกอบ และผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอม หรือ โมเลกุล เข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำ และถูกต้องในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) [4] ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยแบ่งตามการพัฒนาขึ้นเป็น 2 แบบ คือ



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบขนาดของวัสดุนาโน [1]

- **เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง** [4] (Top-Down Technology) เป็นเทคโนโลยีที่ผลิตสิ่งต่าง ๆ โดยอาศัยวิธีการทางกล เช่น กิ่ง บีบ อัด ต่อ งอ และอื่นๆ หรืออาจใช้วิธีการเคมีโดยการผสมให้ทำปฏิกิริยา โดยพยายามควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม แล้วปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากันเอง หรืออาจเรียกว่าเทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk Technology) การผลิตอยู่ในระดับ 0.2-0.3 ไมครอน ซึ่งมีจำนวนอะตอมอยู่ถึงระดับล้านล้านอะตอม เช่น ไมโครชิพ เป็นต้น
- **เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน** [4] (Bottom-Up Technology) เป็นเทคโนโลยีที่ผลิตสิ่งต่าง ๆ โดยอาศัยวิธีการจัดการ กับสิ่งต่างๆ หรือผลิตสิ่งต่างๆ โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียง ณ ตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ สิ่งที่เกิดขึ้นมาอาจเป็นสิ่งเล็กๆ หรือ เป็นสิ่งใหญ่ก็ได้ หรืออาจเรียกว่าเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular Technology) โดยนำเอาเทคโนโลยีนี้ไปสร้างสิ่งที่ใหญ่ขึ้นมา เช่น พืชสร้างผนังเซลล์จากการนำเอาโมเลกุลน้ำตาลมาต่อกัน เป็นต้น เทคโนโลยีระดับโมเลกุลนี้เองที่เป็นนาโนเทคโนโลยี

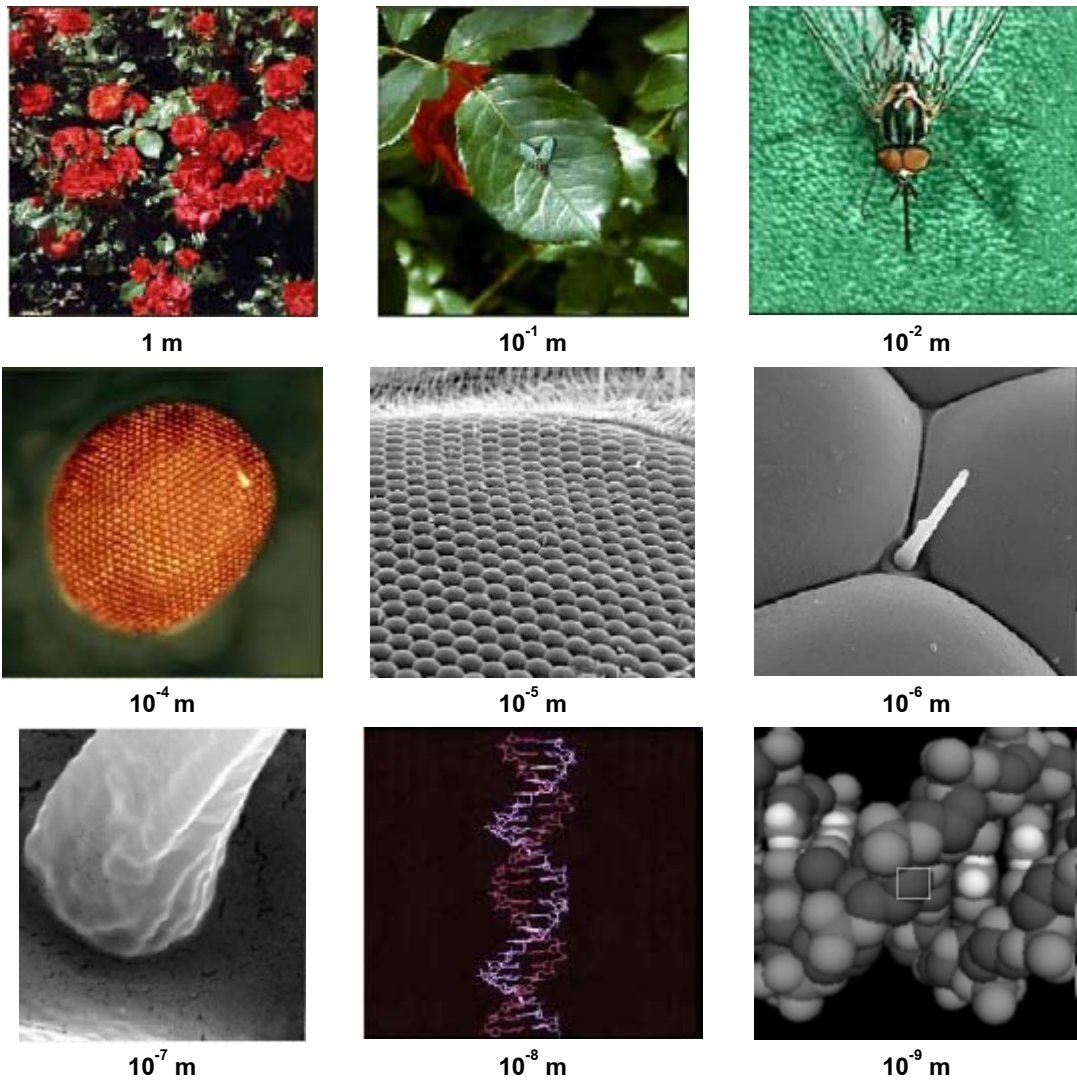
## นาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติ [3]

ทางไปสู่จุดที่นาโนเทคโนโลยีจะสามารถพัฒนาจนเป็นอุตสาหกรรม น่าจะยึดตามแนวทางของธรรมชาติ หรือเลียนแบบนาโนเทคโนโลยีของธรรมชาตินั่นเอง เช่น เราต้องพยายามเข้าใจจักรกลนาโนของธรรมชาติว่ามันทำงานอย่างไร แล้วนำมาพัฒนาหุ่นยนต์โมเลกุล (Molecular Robotics) ที่มีอิมมูนุสซี่ในภายหลัง ดัง

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

<sup>2</sup> โปรแกรมวิทยาศาตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการทำงานของกลไกต่าง ๆ ตามหลักวิศวกรรมเครื่องกล กับ จักรกลนาโนที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ นั้นทำให้ยิ่งมั่นใจว่านาโนเทคโนโลยีฝีมือมนุษย์มีความเป็นไปได้สูง หากเรามีความรู้ความเข้าใจในจักรกลนาโนที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมากขึ้น จักรกลนาโน (Nanomachines) เหล่านี้ มีอยู่แล้วในธรรมชาติ มีความสามารถในการสร้างสิ่งต่างๆ ด้วยความแม่นยำในระดับอะตอม



ภาพที่ 2 ลำดับของขนาดจากเมตรลงสู่นาโนเมตร (Top-Down) [1]

ตัวอย่างนาโนเทคโนโลยีที่มีอยู่ในธรรมชาติ ดังตัวอย่างเช่น

### การเกาะยึดของตุ๊กแก [3]

สัตว์เลื้อยคลานอย่างตุ๊กแก และจิ้งจกสามารถปีนกำแพง หรือเกาะติดผนังที่ราบเรียบ และลื่นได้อย่างมั่นคง และในบางครั้งก็สามารถห้อยตัวติดเพดานได้ เนื่องจากบริเวณใต้อุ้งตีนของตุ๊กแก (ดังภาพที่ 3) จะมีขนขนาดเล็กที่เรียกว่าซีเต (setae) (ภาพที่ 4 a-d) จำนวนนับล้านเส้นเรียงตัวอัดแน่นอยู่ โดยที่ส่วนปลายของขนซีเตแต่ละเส้นนี้ก็มีเส้นขนที่มีขนาดเล็กกว่าที่เรียกว่าสปาทูเล่ (spatulae) (ภาพที่ 4 e-f) ประกอบอยู่อีกหลายร้อยเส้น โดยที่สปาทูเล่แต่ละเส้นจะมีขนาดเล็กประมาณ 200 นาโนเมตร และที่ปลายของสปาทูเล่แต่ละเส้นจะสามารถสร้างแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ดังภาพที่ 6

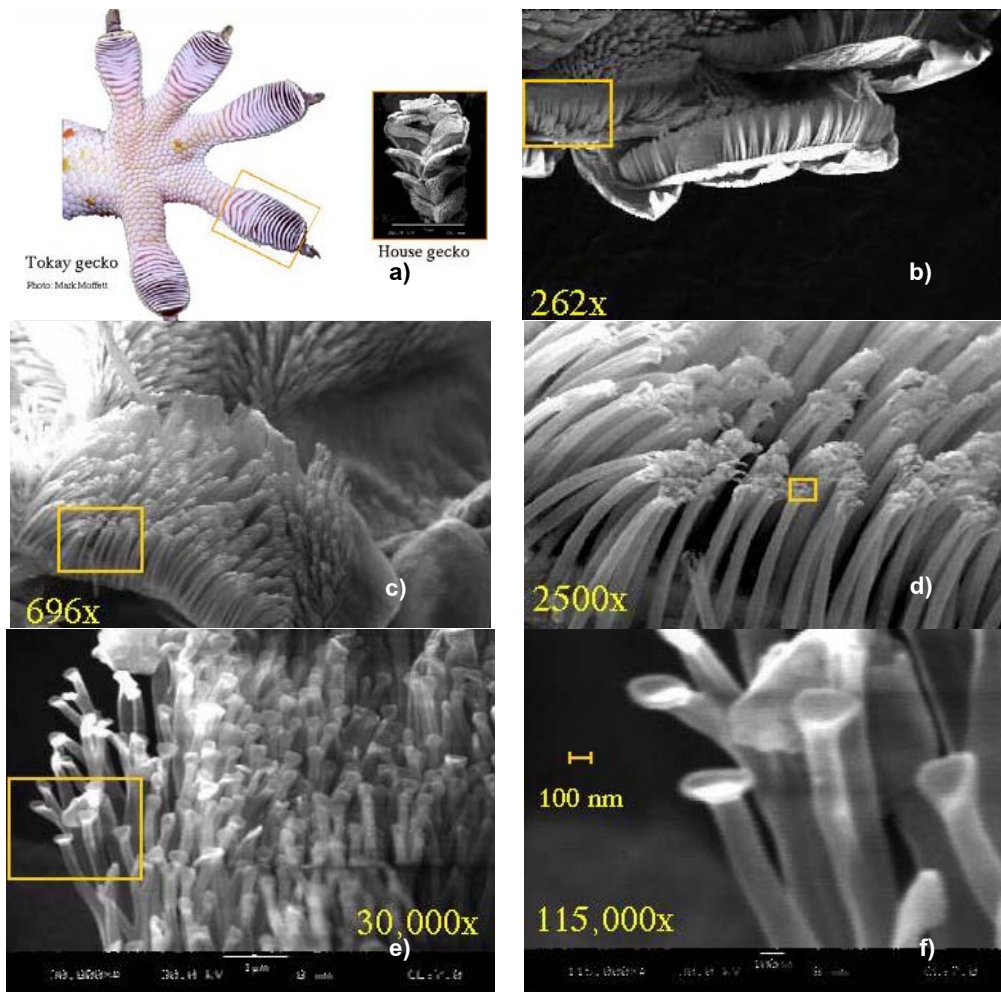
เป็นการอธิบายวิธีการวัดแรงดังกล่าว เพื่อให้ในการยึดติดกับโมเลกุลของสสารที่เป็นส่วนประกอบของผนังหรือเพดานใต้ ถึงแม้ว่าแรงวานเดอวาลส์จะเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนแอมาก แต่การที่ตีนตุ๊กแกมีเส้นขนสปาดูเลื่อยหลายล้านเส้นจึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าขึ้นอย่างมหาศาลจนสามารถทำให้ตีนตุ๊กแกยึดติดกับผนังได้อย่างเหนียวแน่น ด้วยหลักการนี้เองจึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นเทคโนโลยีแถบยึดตุ๊กแก (Gecko Tape) ขึ้นมาจากวัสดุสังเคราะห์ชนิดใหม่ที่มีลักษณะเป็นขนขนาดนาโน (nanoscopic hairs) เลียนแบบขนสปาดูเลื่อยบนตีนตุ๊กแกในธรรมชาติ เพื่อนำไปผลิตแถบยึดที่ปราศจากการใช้กาว และผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ อย่าง ถุงมือ ผ้าพันแผล ตลอดจนสามารถพัฒนาไปเป็นล้อของหุ่นยนต์ที่สามารถไต่ผนังหรือเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งได้อีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทำงานของกลไกต่าง ๆ ตามหลักวิศวกรรมเครื่องกล กับจักรกลนาโนที่มีอยู่ในธรรมชาติ [4]

เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเครื่องกล	หน้าที่ของเทคโนโลยี	จักรกลนาโนในธรรมชาติ
เหล็กหนุ่ย เหล็กค้ำ แผ่นหุ้ม (case)	รับน้ำหนัก ถ่ายเทแรง รักษาตำแหน่ง	Microtubules เซลลูโลส
เดบีล	ดึง ถ่ายเทแรงดึง	Collagen
เครื่องตรึง	ติดส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน	แรงระหว่างโมเลกุล
ซีลินอยด์	เคลื่อนส่วนต่าง ๆ	actin และ myosin
มอเตอร์	ขับเคลื่อนเพลลา	Flagellar motor
เพลลา	ถ่ายเททอร์ค	Bacterial motor
คอนเทนเนอร์	กักเก็บของเหลว	Vesicles
ท่อ	ขนส่งของเหลว	Tubules
ปั๊ม	ขับเคลื่อนของเหลว	Flagella และ Membrane proteins
สายพาน	ลำเลียงสิ่งของ	RNA (ribonucleic acid)
ปากกาหนีบ (clamp)	จับยึดชิ้นงาน	ช่องยึดของเอนไซม์
ส่วนควบคุมงาน	ควบคุมกระบวนการผลิต	ระบบพันธุกรรม



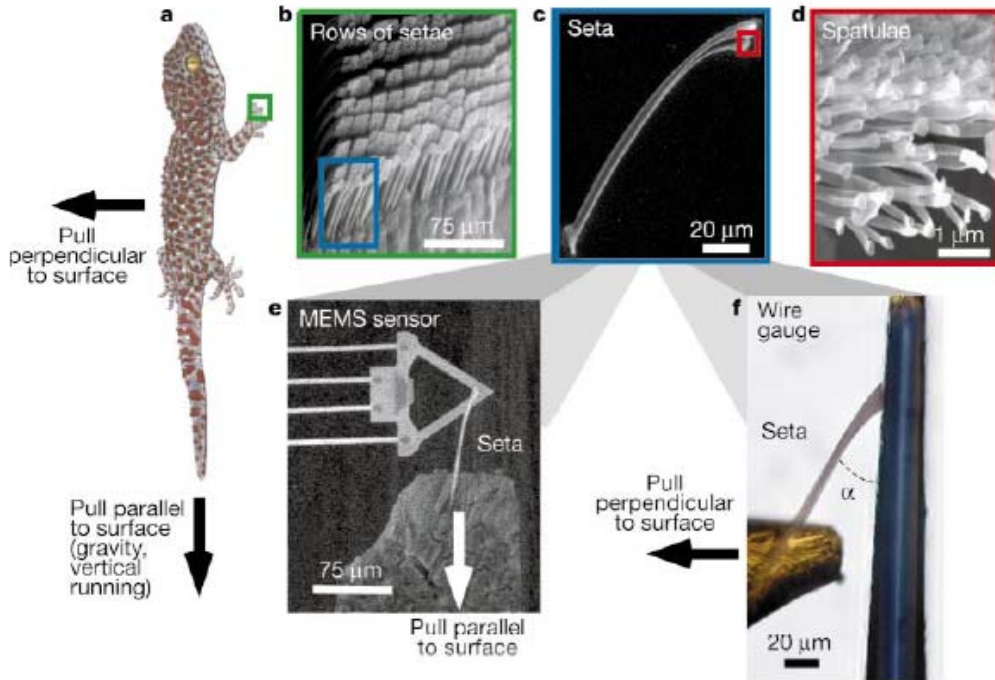
ภาพที่ 3 นิ้วเท้าของตุ๊กแกที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละชนิดซึ่งมีมากกว่า 850 ชนิด [7]



ภาพที่ 4 SEMs ซีต (setae) (a-d) และ สปาตุเล่ (spatulae) (e-f) [7]



ภาพที่ 5 การพัฒนาของหุ่นยนต์ที่สามารถไต่ผนังหรือเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งได้ [6]

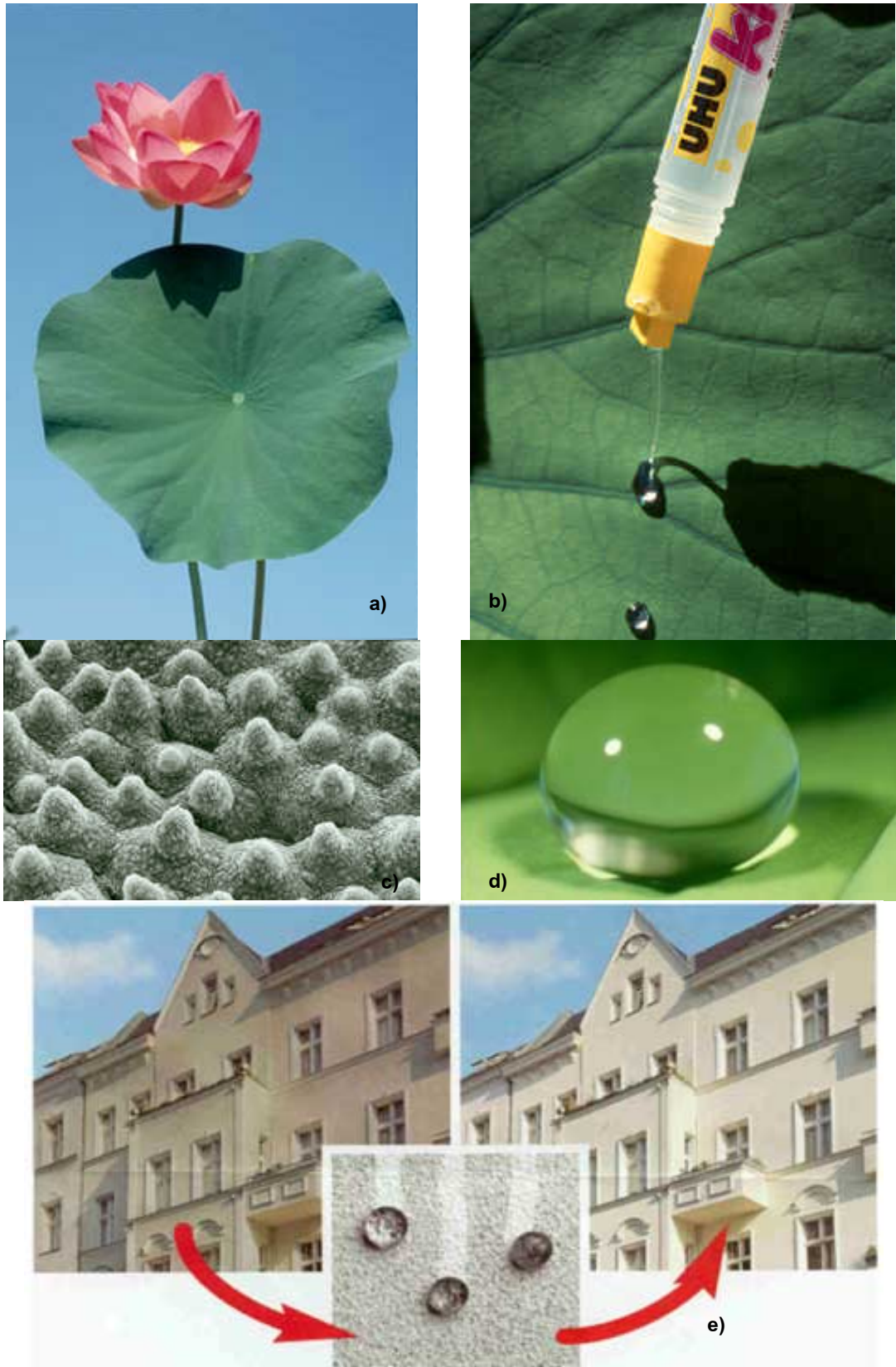


ภาพที่ 6 ซีต (setae) ของตุ๊กแก (gecko) และ เครื่องมือสำหรับการวัดแรง a) รายละเอียดของนิ้วเท้าตุ๊กแก โตเกียว (Gekko gekko) (b-d) เส้นขนซีตที่นิ้วของตุ๊กแกถ่ายภาพด้วย SEMs b) ซีตเดี่ยว (c-d) ปลายสุดของขนซีต เรียกว่า spatulae e) ซีตเดี่ยวที่สัมผัสกับ micro-electromechanical system (MEMS) ซึ่งสามารถวัดแรงในแนวนอนและตั้งฉากกับพื้นผิวของเซ็นเซอร์ได้ f) ซีตเดี่ยว ที่เกาะยึดกับเส้นลวดอลูมิเนียมที่สามารถวัดแรงที่เกิดจากการดึงออกในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิว และสามารถคำนวณมุมที่เกิดขึ้นระหว่างซีตกับลวดวัดแรง [5]

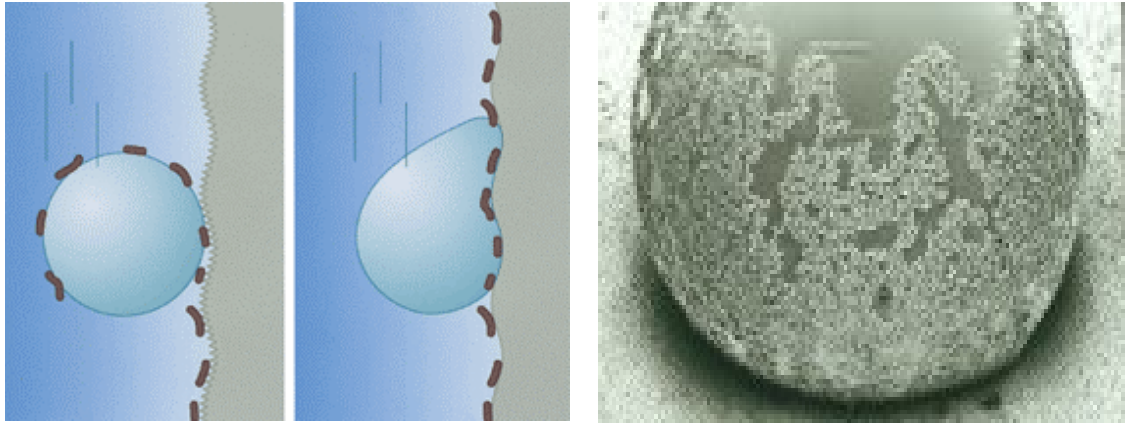
**ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) [3]**

น้ำที่ตกลงบนใบบัวแล้วกลิ้งไปมารวมตัวกันอยู่ที่บริเวณที่ต่ำที่สุดบนใบบัว ทำให้สิ่งสกปรก ทั้งฝุ่น เชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา ไม่สามารถเกาะติดแน่นอยู่กับใบบัว รวมไปถึงของเหลวที่มีความหนืดข้น จำพวก กาวน้ำ หรือน้ำมัน ก็ยังไม่สามารถเกาะติดอยู่บนใบบัวได้ ดังภาพที่ 7 b) เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของใบบัวมี ลักษณะคล้ายกับหนามขนาดเล็ก ๆ จำนวนมหาศาลเรียงตัวกระจายอย่างเป็นระเบียบที่มีขนาดนาโนเมตร ดัง ภาพที่ 7 c) และมีสารที่มีสมบัติคล้ายขี้ผึ้ง (water-repellent waxy crystals) เคลือบอยู่ภายนอกอีกด้วย ทำใ้ น้ำที่ตกลงบนใบบัวมีพื้นที่สัมผัสน้อยมาก และไม่สามารถซึมผ่าน หรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้าง บนใบบัวได้ น้ำจึงต้องม้วนตัวเป็นหยดน้ำ (ดังแสดงในภาพ 7 d) บริเวณปลายยอดหนามขนาดนาโนเมตร เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) อาจพบบนใบพืชอื่น ๆ เช่น กล่ำปลี หญ้าที่ขึ้นใน น้ำ ทิวลิป เป็นต้น [8] ความขรุขระของหนามขนาดระดับนาโนเมตรบนพื้นที่ผิวของใบบัวทำให้ลดพื้นที่ผิว สัมผัสระหว่างหยดน้ำกับใบบัว ทำใ้ น้ำกลิ้งไปมาได้ไม่มีแรงเสียดทาน

ปรากฏการณ์นี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่เลียนแบบคุณลักษณะของใบบัว หรือ การนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาบ้านที่สามารถไม่เปียกน้ำและสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ดังแสดงในภาพ 7 e) และ ภาพที่ 8 รวมไปถึงการพัฒนาเป็นเสื้อผ้ากันน้ำไร้รอยคราบสกปรก ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 7 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) **b)** ของเหลวหนืดจำพวกกาวกลิ้งบนใบบัว **c)** โครงสร้างของใบบัวถ่ายด้วย SEM **d)** หยดน้ำบนใบบัวที่มีลักษณะเกือบทรงกลม **e)** สีทาบ้านที่สามารถไม่เปียกน้ำและสามารถทำความสะอาดตัวเอง [8]



ภาพที่ 8 การทำความสะอาดตัวเองของปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว [9]



DOCKERS® Pleated Go Khaki™  
with Stain Defender™

DOCKERS® Short Sleeve  
Basketweave Cole Shirt with  
Stain Defender™



Eddie Bauer Khakis / Lee Jeans (NanoCare™)

ภาพที่ 9 เสื้อผ้ากันน้ำที่อ้างว่าใช้นาโนเทคโนโลยี [1]

### เปลือกหอยเป่าอื้อ (นาโนเซรามิกส์) [3]

สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยเป่าอื้อคือ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับชอล์กเขียนกระดาน ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเปลือกหอย

และซอลด์มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยที่ซอลด์จะเปราะ หักง่าย เป็นผงฝุ่นสีขาว แต่เปลือกหอยจะมีลักษณะเป็นมันวาวและมีความแข็งแรงสูงมาก ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะการจัดเรียงตัวในระดับโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในซอลด์ และเปลือกหอยมีความแตกต่างกันมาก โดยเมื่อใช้กล้องขยายกำลังสูงส่องดูโครงสร้างระดับโมเลกุลของเปลือกหอยเป่าอื้อพบว่าการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะคล้ายเป็นกำแพงอิฐก่อที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยที่ก้อนอิฐขนาดนาโนแต่ละก้อนนี้จะเชื่อมติดกันด้วยกาวที่เป็นโปรตีน และพอลิแซคคาไรด์ จากโครงสร้างที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบนี้จึงทำให้เปลือกหอยเป่าอื้อทนทานต่อแรงกระแทกมาก ยกตัวอย่างเช่น ให้ก้อนหุบไม่แตก เป็นต้น เปลือกหอยเป่าอื้อเป็นตัวอย่างที่ดีในการอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบเป็นสารเคมีชนิดเดียวกันทุกประการแต่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในช่วงนาโน เช่น อะตอมและโมเลกุล ดังนั้นนักนาโนเทคโนโลยีจึงสามารถใช้ความรู้นี้ในการสร้างวัสดุใหม่ๆ ให้มีคุณสมบัติต่างไปจากเดิมได้

### ปีกผีเสื้อ [3]

ผีเสื้อบางชนิด (*Polyommatus sp.*) สามารถดึงดูดเพศตรงข้ามหรือหลบหนีศัตรูได้โดยการเปลี่ยนสีปีก เช่นจากสีน้ำเงินไปเป็นสีน้ำตาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีปีกนี้ไม่ได้อาศัยสารมีสีชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในปีกผีเสื้อ แต่กลับอาศัยหลักการหักเห และการสะท้อนของแสงแดดที่มากตกกระทบลงบนปีก โดยถ้ามุมที่แสงตกกระทบมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สีที่ปรากฏบนปีกผีเสื้อก็จะแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแสงแดดมาตกกระทบกับโครงสร้างที่อยู่ในปีกผีเสื้อในมุมใดมุมหนึ่งจะสะท้อนแสงสีน้ำเงินออกมา แต่ในขณะที่เดียวกันก็ดูดซับแสงสีอื่น ๆ ไว้ทั้งหมด ทำให้เราเห็นผีเสื้อมีปีกสีน้ำเงิน เมื่อนักวิทยาศาสตร์ใช้กล้องขยายกำลังสูงส่องดูปีกผีเสื้อชนิดที่สามารถเปลี่ยนสีก็พบรูพรุนที่มีขนาดในช่วงนาโนจำนวนมหาศาลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบซึ่งทำหน้าที่เป็นเสมือนผลึกโฟโตนิกสีในธรรมชาติ นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์ยังได้ตั้งสมมุติฐานว่าการเปลี่ยนสีของปีกผีเสื้อชนิดนี้ยังเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิได้อีกด้วย ซึ่งจากการค้นพบนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างผลึกโฟโตนิกสังเคราะห์ที่ยืดหยุ่นได้ดี และเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเสื้อผ้าป้องกันความร้อนที่ใช้ในทะเลทรายหรือห้วงอวกาศ

### ใยแมงมุม (เส้นใยนาโน) [3]

แมงมุมเป็นสัตว์เพียงชนิดเดียวที่สามารถสร้างและปั่นทอเส้นใยได้ โดยที่ใยแมงมุมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงและเหนียวมาก ใยแมงมุมสามารถหยุดแมลงที่บินด้วยความเร็วสูงสุดได้โดยที่ใยแมงมุมไม่ขาด นักวิทยาศาสตร์พบว่าแมงมุมมีต่อมพิเศษที่สามารถหลั่งโปรตีนที่ละลายในน้ำได้ชนิดหนึ่งชื่อว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยเมื่อแมงมุมหลั่งโปรตีนชนิดนี้ออกมาจากต่อมดังกล่าวโปรตีนดังกล่าวจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง หลังจากนั้นแมงมุมก็จะใช้ขาในการถักทอโปรตีนเหล่านี้เป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งก็คือใยแมงมุมนั่นเอง บริษัทในต่างประเทศแห่งหนึ่งสามารถสร้างใยแมงมุมเลียนแบบแมงมุมได้โดยการตัดต่อยีนที่ควบคุมการสร้างโปรตีนไฟโบรอินจากแมงมุมแล้วนำไปใส่ไว้ในโครโมโซมของแพะ เพื่อให้แพะมีโปรตีนใยแมงมุม ก่อนที่จะแยกโปรตีนออกมาแล้วปั่นทอเป็นเส้นใยเพื่อใช้ในการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนที่แข็งแรงแต่น้ำหนักเบา โดยเส้นใยที่สร้างขึ้นนี้มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึงห้าเท่า เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน นอกจากนี้ยังสามารถนำใยแมงมุมไปใช้เป็นเส้นใยผ้ารักษาแผลสดได้อีกด้วย



ภาพที่ 10 เส้นใยแมงมุมมาจากโปรตีนไฟโบรอิน [3]

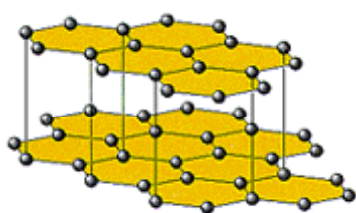
### วัสดุนาโนดักจับสารปนเปื้อน

วัสดุนาโนประเภทนี้ มีรูพรุนขนาดนาโนเมตร โดยอาจเรียกว่าฟองน้ำนาโน (nanosponge technology) ถูกใช้ในการทำน้ำประปาให้บริสุทธิ์ และกำลังจะเข้ามามีบทบาทกับอุตสาหกรรมผลิตน้ำเพื่อใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น

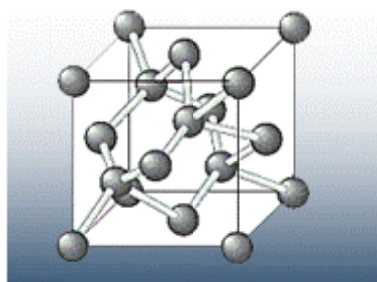
เทคโนโลยีนี้ใช้วัสดุโพลิเมอร์ที่มีรูพรุนขนาดประมาณ 1 ในพันล้านส่วนของเมตร เป็นลักษณะถุงโพลิเมอร์ขนาดเฉลี่ย 20 นาโนเมตร สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างเนื้อดินได้โดยไม่เกาะติดไปกับดิน เป็นโพลิเมอร์ประเภทที่มีโมเลกุลสายโซ่ยาว แต่ละโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ เรียกว่า hydrophilic ซึ่งจะดึงดูดโมเลกุลของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เรียกว่า hydrophobic ซึ่งจะผลักโมเลกุลของน้ำ โพลิเมอร์นี้สามารถละลายน้ำอยู่ในน้ำ สายโซ่ที่ไม่ชอบน้ำจะดึงสารปนเปื้อนซึ่งเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนชนิดที่มีวงเบนซินหลายวง (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) เช่น สารฟีแนนทริน (phenanthrene) ที่ปนเปื้อนในช่องว่างของอนุภาคเม็ดทรายออกจากเม็ดทรายเข้าไปเก็บไว้ด้านในอนุภาคโพลิเมอร์นี้ได้ นักวิทยาศาสตร์ มีความคิดที่จะใช้อนุภาคจิ๋วนี้ไปปรับปรุงกระบวนการบำบัดแบบสูบ (pump and treat remediation) จากหลักการเบื้องต้นวิธีการนี้จะสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาที่ผิว ทำจัดสารปนเปื้อนออก แล้วฉีดน้ำสะอาดที่ได้กลับลงไปใต้ดินตามเดิม การคิดค้นและวิจัยต่อไป เป็นเรื่องของการที่จะทำอย่างไร เพื่อให้เกิดความแน่ใจได้ว่า อนุภาคจิ๋วนี้จะกลับขึ้นมาที่ผิวดิน เนื่องจากอนุภาคจิ๋วมีการเคลื่อนที่แบบทุกทิศทาง นอกจากนั้น นักวิจัยบางกลุ่มพยายามที่จะทำให้อนุภาคจิ๋วสามารถเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้เป็นสารเคมีที่เป็นพิษน้อยลง ซึ่งหากเป็นเช่นนั้นได้ ก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องดึงอนุภาคจิ๋วกลับขึ้นมาที่ผิวดิน ฟองน้ำนาโนยังสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดทรงกลม ผง ฟิล์มบางที่มีสมบัติทางแสง ทำให้ผู้ใช้สามารถดัดแปลงไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบที่สามารถดูดซับและดักจับสารปนเปื้อนประเภทอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ช่วยลดระดับความเข้มข้นลงถึง 1 ในล้านล้านส่วน

## คาร์บอน (Carbon) [10]

คาร์บอนเป็นส่วนประกอบอยู่ในสสารรอบตัวเรามากมาย ได้แก่ อาหารที่เรากิน เสื้อผ้าที่เราสวมใส่ เครื่องสำอางที่เราใช้ และน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีความพิเศษ เพราะมีบทบาทอย่างมากกับสารเคมีในร่างกายของเรา คาร์บอนสามารถอยู่ในรูปแกรไฟต์ ดังแสดงในภาพที่ 11 และผลึกเพชร ดังแสดงในภาพที่ 12 แกรไฟต์มีลักษณะอ่อนนุ่มและลื่น ส่วนเพชรจัดว่ามีความแข็งมากที่สุดเท่าที่เรารู้จักกัน การที่โครงสร้างทั้ง 2 แบบมีเพียงอะตอมของคาร์บอนเพียงอย่างเดียวเหมือนกัน แต่มีสมบัติแตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากอะตอมมีพันธะต่างกัน แกรไฟต์มีพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonds) ที่แข็งแรงระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้น แต่มีแรงดึงดูดอ่อน ๆ เกิดขึ้นระหว่างชั้น ซึ่งทำให้แต่ละชั้นสามารถเลื่อนไถลไปมาได้ ตรงกันข้ามกับผลึกเพชรที่อะตอมของคาร์บอนอยู่ห่างเท่า ๆ กัน โครงสร้างเป็นรูปตาข่ายที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ผลึกเพชรมีความแข็ง และมีจุดหลอมเหลวสูง



ภาพที่ 11 โครงสร้างแกรไฟต์ [10]

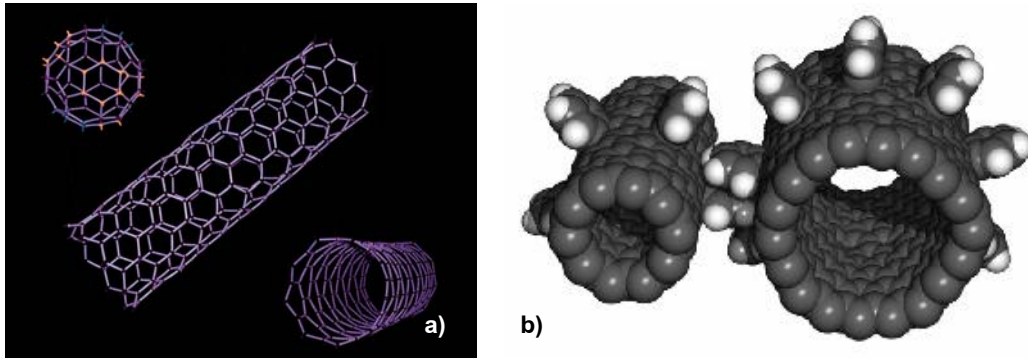


ภาพที่ 12 โครงสร้างผลึกเพชร [10]

คาร์บอนรูปใหม่ที่พบเรียกว่า "nanofoam" มองด้วยตาเปล่า คาร์บอนรูปนี้มีลักษณะเหมือนแผ่นบาง ๆ หากมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (optical microscope) ดูเหมือนฟองน้ำ คาร์บอน nanofoam มีความเป็นแม่เหล็ก ในช่วงไม่กี่ชั่วโมงแรกที่มันก่อรูปขึ้นมา หลังจากนั้นจะลดลง และหายไป มีประโยชน์ทางการแพทย์ เมื่อละลายลงไปของเหลวและฉีดเข้าสู่กระแสเลือด nanofoam สามารถสร้างภาพให้เห็นในเครื่อง MRI (magnetic resonance imaging machine) นอกจากนี้ nanofoam ยังสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นวิทยุด้วย Giapintzakis คาดว่าหากนำ nanofoam ฉีดเข้าไปในเนื้องอก คลื่นวิทยุจะสามารถให้ความร้อนกับ nanofoam เพื่อทำลายเซลล์เนื้องอก ในขณะที่เนื้อเยื่อบริเวณรอบ ๆ จะไม่ถูกทำลายไปด้วย

ในปี ค.ศ. 1985 มีการค้นพบ Fullerene หรือ คาร์บอน-60 ต่อมาในปี ค.ศ. 1991 ก็สามารถสังเคราะห์สิ่งที่เรียกว่า ท่อนาโน (Nanotube) ดังแสดงในภาพที่ 13 a) คือโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนก่อรูปกันขึ้นเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายท่อ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น สามารถนำมาทำเป็นสายนำไฟฟ้าหรือสวิตช์ในอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ หรือ นำมาทำเป็นหัวจับ (Tip) ของเครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope) เป็นต้น งานประยุกต์ในอนาคตของท่อนาโนนั้นอาจนำมาทำเป็น ส่วนที่

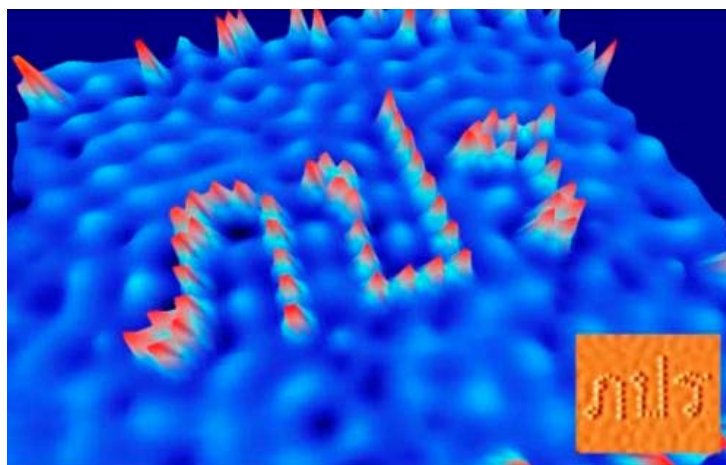
ใช้ยึดโครงสร้างระดับนาโนเข้าด้วยกัน (คล้ายกับเสาและคานสำหรับตึก) เกียร์และมอเตอร์สำหรับเครื่องยนต์ระดับนาโน ดังแสดงในภาพที่ 13 b) ผลิตภัณฑ์ที่ทำได้ในปัจจุบัน คือ แร็กเก็ตเทนนิส ของบริษัท Babolat ประเทศฝรั่งเศสที่ผลิตจากกราฟไฟต์ ผสมกับท่อนาโนของคาร์บอน (carbon nanotubes) ทำให้แร็กเก็ตมีความทนทานสูงมากในขณะที่มีน้ำหนักเบา สามารถลดอาการกล้ามเนื้อเกร็งของนักกีฬาเทนนิสได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 13 Carbon nanotubes a) โครงสร้างคล้ายลูกฟุตบอล หรืออาจเป็นท่อทรงกระบอก b) ท่อนาโน (Nanotube) อาจจะตัดแปลงนำมาใช้เป็นเกียร์และแบริ่ง สำหรับส่งกำลังในทางวิศวกรรม เครื่องกลระดับโมเลกุล [4]

#### การเรียงอะตอมเป็นพระปรมาภิไธยย่อเพื่อเกิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ฯ [2]

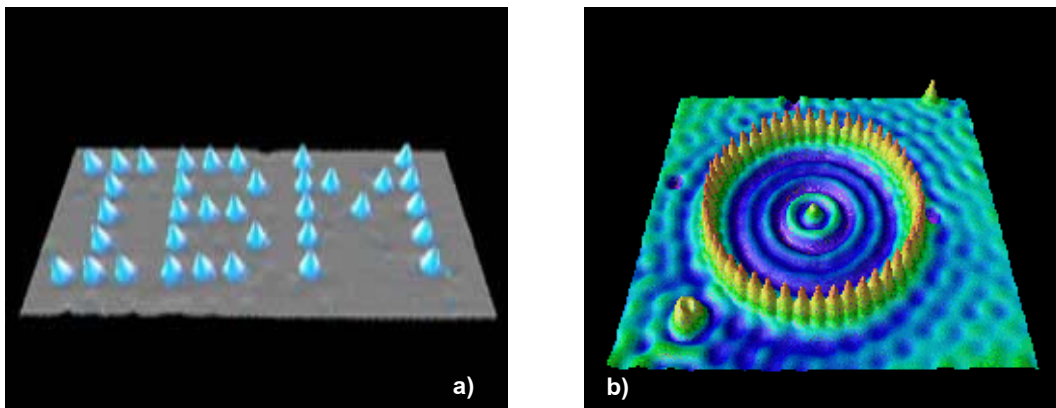
ทีมนักวิจัยของ ดร. ดอน ไอเกลอร์ที่ IBM Almaden Research Center ได้ร่วมมือกับนักวิจัยไทย จากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค) ใช้นาโนเทคโนโลยีในการจัดเรียงตัวคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จำนวน 50 โมเลกุล เขียนลงบนผิวของโลหะทองแดง (Cu) เป็นพระปรมาภิไธยย่อ ภ.ป.ร. ดังแสดงในภาพที่ 14 เพื่อเกิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ฯ ในฐานะที่เป็นพระบิดาแห่งเทคโนโลยีไทย ซึ่งนับเป็นครั้งแรกของประวัติศาสตร์โลกที่อักษรไทยได้ถูกจารึกไว้ในระดับอะตอม พระปรมาภิไธยย่อ ภ.ป.ร. นี้มีขนาดความยาว 14 นาโนเมตร และความสูง 7 นาโนเมตร ตัวอักษร “ภ” เขียนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 17 โมเลกุล ตัวอักษร “ป” เขียนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 18 โมเลกุล และ ตัวอักษร “ร” เขียนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 15 โมเลกุล



ภาพที่ 14 การจัดเรียงอะตอมเป็นอักษรย่อ ภ.ป.ร. เพื่อเกิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ฯ [2]

การเขียนพระปรมาภิไธยย่อ ภ.ป.ร. เขียนโดยการจัดเรียงอะตอมด้วยเครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope) ที่สามารถนำอะตอมโมเลกุลหรือโมเลกุลมาจัดเรียงในตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำและถูกต้อง ส่งผลต่อการควบคุมโครงสร้างของวัสดุ หรือสสารให้มีคุณสมบัติพิเศษทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ ก่อให้เกิดเป็นนวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ได้มาก มายมหาศาล ความสามารถในการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวของโลหะทองแดงนี้ได้นำมาสร้างเป็นวงจรขนาดจิ๋วที่ใช้ในการคำนวณได้จริง และในอนาคตอาจจะนำไปใช้สร้างเป็นคอมพิวเตอร์จิ๋วจากอะตอมที่มีประสิทธิภาพยิ่งยวด

เครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดพิเศษประดิษฐ์โดย ดร. เกิร์ด บินนิก (Gerd Binnig) และ ดร. ไฮริช รอโรร์ (Heinrich Rohrer) ปี ค.ศ.1981 (พ.ศ. 2524) สามารถมองเห็นอะตอม สามารถนำมาใช้เคลื่อนย้าย และจัดเรียงอะตอมให้อยู่บนพื้นผิวตามตำแหน่งที่ต้องการ ในปี ค.ศ. 1989 (พ.ศ. 2532) ดร. ดอน ไอเกลอร์ (Don Eigler) นักฟิสิกส์จากบริษัท ไอบีเอ็ม จำกัด เป็นผู้แรกที่สาธิตการนำอะตอม 35 อะตอมของก๊าซซีนอน (xenon) มาเรียงบนผิวของโลหะนิกเกิล (nickel) เป็นตัวอักษร IBM ที่เล็กที่สุดในโลก ดังแสดงในภาพที่ 15 a) อีกทั้ง ดร.ไอเกลอร์ และทีมงานยังสามารถสร้างกับดักอิเล็กตรอนที่เรียกว่า “ปะการังควอนตัม” (Quantum Corral) ทำให้เห็นภาพปฏิกิริยาตอบสนองของคลื่นอิเล็กตรอนและคุณสมบัติทางควอนตัมได้เป็นครั้งแรกโดยการวางอะตอมของธาตุเหล็ก 48 อะตอมเป็นรูปร่างกลมบนแผ่นผิวโลหะของธาตุทองแดง ดังแสดงในภาพที่ 15 b)



ภาพที่ 15 a) ตัวอักษร IBM ที่เล็กที่สุดในโลก b) อะตอมของธาตุเหล็ก 48 อะตอมเป็นรูปร่างกลมบนแผ่นผิวโลหะของธาตุทองแดง [2]

### ผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยี

เมื่อปลายปีที่แล้ว นิตยสารธุรกิจชั้นนำของโลก Forbes ได้ประกาศ สุดยอดผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีประจำปี ค.ศ. 2003 ซึ่งมีส่วนช่วยผลักดันให้เกิดความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์เป็นอย่างมาก สินค้านาโนเทคโนโลยีประกอบไปด้วย



**ผลิตภัณฑ์ สกิวแว็กซ์ (Ski Wax)** ชื่อ Cerax Nanowax ของบริษัท Nanogate ประเทศเยอรมันนี้ ที่ใช้ก้าวหน้าของนาโนเทคโนโลยีด้านเคมีเพื่อสังเคราะห์แว็กซ์ที่ใช้เคลือบพื้นผิวของอุปกรณ์สกีให้มีความลื่นไหล และแข็งแรง ทำให้นักกีฬาสกีสามารถเร่งความเร็วได้สูงสุดบนพื้นหิมะหลังออกตัวได้ไม่ก็ร่อยพุด

ครีมบำรุงผิว **Plenitude Revitalift** ของบริษัทลอรีอัล ปารีส ประเทศฝรั่งเศส ที่บรรจุไวตามินชนิดต่างๆ ไว้ภายในแคปซูลเล็กจิ๋วขนาด 200 นาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่ปลอดภัยและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เนื้อครีมสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ดีกว่าครีมชนิดอื่น และเมื่อแคปซูลละลายก็จะค่อยๆ ปล่อยไวตามินออกมา ทำให้ผิวหนังกระชับขึ้นและสามารถลดริ้วรอยของผิวหนังได้เป็นอย่างดี



ครีมกันแดด **Nucelle SunSense SPF 30** ของบริษัท Nucelle Inc. ที่ตั้งอยู่ในวอชิงตัน สหรัฐฯ ที่มีส่วนประกอบเป็นผลึกขนาดนาโนของสารประกอบออกไซด์ของสังกะสี ( $ZnO_2$ ) ที่เรียกว่า Z-COTE ซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้งรังสี UVA และ UVB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่เกิดการแพ้

กล้องดิจิทัลของโกดัก รุ่น **EasyShare LS633** ที่มีจอภาพเป็นสารอินทรีย์เปล่งแสงหรือ OLED (organic light-emitting diodes) ที่มีภาพสีคมชัด มีมุมมองที่กว้างขึ้น และมีขนาดจอภาพที่ใหญ่กว่ากล้องดิจิทัลทั่วไปในขณะนี้



แว่นตากันแดด ของบริษัท Nanofilm ของสหรัฐฯ ที่ได้นำพอลิเมอร์ชนิดบางมากที่สังเคราะห์ขึ้นโดยนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการเคลือบผิวหน้าของเลนส์ของแว่นตากันแดด ซึ่งสามารถป้องกันการสะท้อนแสง ลดรอยขีดข่วนและคราบสกปรกของแว่นตาและเลนส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ลูกเทนนิส **Air D-Fense** ของบริษัท Inmat ในนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐฯ ที่มีการเคลือบแกนในของลูกเทนนิสด้วยพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่มีความบางเพียง 1 นาโนเมตร สามารถป้องกันการรั่วซึมของอากาศภายในลูกเทนนิสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ไม่มีผลต่อน้ำหนักลูก และสามารถเก็บได้นานกว่าลูกเทนนิสธรรมดาหลายเท่าตัว ปัจจุบันถูกนำมาใช้ในการแข่งขันเทนนิส เดวิส คัพ อันโต้งตั้ง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] หน่วยสร้างเสริมศักยภาพทางนาโนศาสตร์, 2547, “นาโนเทคโนโลยี วิทยาการที่เส้นขอบฟ้า,” <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/> สืบค้นวันที่ 25 ตุลาคม 2547
- [2] ชีระชัย พรสินศิริรักษ์, 2547, “การเรียงอะตอมเป็นพระปรมาภิไธยย่อเพื่อเกิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ,” ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, <http://www.nanotech.or.th> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2547
- [3] ญัฐพันธ์์ ศุภกา, 2547, “นาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติ,” ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, <http://www.nanotech.or.th> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2547
- [4] ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ, 2542, “นาโนเทคโนโลยี ความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต,” วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ตุลาคม-ธันวาคม 2542, <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/index.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2547

- [5] Kellar Autumn, Yiching A. Liang, S. Tonia Hsieh, Wolfgang Zesch, Wai Pang Chan, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing and Robert J. Full, 2000, "Adhesive force of a single gecko foot-hair," Nature 405, June 8, 681-684.
- [6] Bonnie Azab Powell, 2004, "Meet the Robots: Ariel, Rhex, Sprawl, and Mecho-Gecko"  
<http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2002/09/rfull/robots.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2547
- [7] <http://polypedal.berkeley.edu/ib32/Lectures/climb1folder/index.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2547
- [8] [http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/en/prinzip\\_html.html](http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/en/prinzip_html.html) สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2547
- [9] Janine Benyus, "Biomimicry," <http://www.bfi.org/Trimtab/index.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2547
- [10] "ค้นพบคาร์บอนรูปใหม่ที่มีน้ำหนักเบาและมีความเป็นแม่เหล็ก," [http://www.mtec.or.th/new\\_st2.html](http://www.mtec.or.th/new_st2.html) สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2547