

**วัสดุมหัศจรรย์แกรฟีน : กลยุทธ์การสังเคราะห์ สมบัติ การพัฒนา
การพิสูจน์เอกลักษณ์ และการประยุกต์ใช้
Graphene (The miracle material) : Strategies for Synthesis, Properties,
Development, Characterizations and Applications**

แมนมนัส ศรีแก้ว และสายันต์ แสงสุวรรณ*
Manmanut Srikaew and Sayant Saengsuwan*

ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์และยางขั้นสูง (APRM) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Laboratory of Advanced Polymer and Rubber Materials (APRM), Department of Chemistry, Faculty of
Science, Ubon Ratchathani University, Warinchamrab, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

*Email: sayant.s@ubu.ac.th

Received: 03 Nov 19

Revised: 29 Jul 20

Accepted: 13 Aug 20

บทคัดย่อ

แกรฟีนเป็นหนึ่งอัญรูปของคาร์บอนที่มีการค้นพบโดยศาสตราจารย์ ดร.อังเดร ไกม์ และ ศาสตราจารย์ ดร. คอนสแตนติน โนโวเชลอฟ จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ ประเทศสหราชอาณาจักร ซึ่งได้รับโนเบลในปี ค.ศ. 2010 สาขาฟิสิกส์ จุดนี้เองทำให้ทั่วโลกต่างหันมาสนใจวัสดุชนิดนี้เป็นจำนวนมากจากสมบัติพิเศษของแกรฟีนที่มีความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียว (0.345 นาโนเมตร) ทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไปจากคาร์บอนอัญรูปอื่น ๆ ในประเทศไทยยังเป็นเรื่องใหม่และมีการนำแกรฟีนไปใช้งานไม่มากนัก บทความนี้จะกล่าวถึงสมบัติและการพัฒนาสมบัติของแกรฟีน วิธีการสังเคราะห์แบบต่าง ๆ รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในวิเคราะห์และด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของแกรฟีนส่งผลให้นำมาพัฒนาเป็นวัสดุชนิดใหม่และนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ ทรานซิสเตอร์ ใช้เป็นวัสดุในการขนส่งยา เซ็นเซอร์ และใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย

คำสำคัญ: แกรฟีน อัญรูปของคาร์บอน สมบัติ การสังเคราะห์ การประยุกต์ใช้แกรฟีน

Abstract

Graphene (The miracle material) : Strategies for Synthesis, Properties, Development, Characterizations and Applications. Graphene is a crystalline allotrope of carbon with 2-dimensional properties discovered by Prof. Dr. Andre Geim and Prof. Dr. Kostya Novoselov of the University of Manchester, United Kingdom, who were awarded the 2010 Nobel prize in physics. At this point, graphene has received worldwide attention due to its extraordinary properties of a single layer of carbon atoms thickness (0.345 nm). This makes graphene have intrinsic properties which differ from other allotropes of carbon. In Thailand, there are few pieces of research that have been conducted in this field. In this review, properties of graphene, improvements of graphene properties, various synthetic methods, characterization of graphene have been presented and discussed. From the excellent properties of graphene, it is potentially suitable for applications in many aspects such as flexible electronics, transistor, drug delivery, sensor, and graphene-based composites for adsorption of pollutants in wastewater.

Keywords: Graphene, Allotropes of carbon, Properties, Synthesis, Application of graphene

1. บทนำ

แกรฟีน คือ วัสดุในสองมิติที่มีโครงสร้างเป็นอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) มีไฮบริดไดเซชัน (hybridization) แบบ sp^2 ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง ลักษณะโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง แสดงใน Figure 1 แกรฟีนมีอยู่ในธรรมชาติมานานแล้ว แต่ถูกสังเคราะห์ได้ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2547 โดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียสองท่านคือ ศาสตราจารย์ ดร.อังเดร ไกม์ และ ศาสตราจารย์ ดร. คอนสแตนติน โนโวเชลอฟ จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ จึงเป็นจุดเริ่มต้นของนักวิจัยทั่วโลกที่ต่างให้ความสนใจกับวัสดุชนิดนี้ ด้วยความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียว จึงทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไปจากคาร์บอนอีกรูปอื่น ๆ นอกจากนี้แกรฟีนมีข้อได้เปรียบมากกว่าท่อคาร์บอนระดับนาโน คือ แกรฟีนจะไม่มีโลหะเจือปนและสามารถเตรียมได้จากแกรไฟต์ ดังนั้นกระบวนการเตรียมแกรฟีนจะมีต้นทุนถูกกว่าค่อนข้างมาก [1] และจากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้แกรฟีนมีความแข็งแรงสูงกว่าเพชร และแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าถึง 200 เท่า นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบา ความยืดหยุ่นสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องมีมากถึง $200,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ [2]

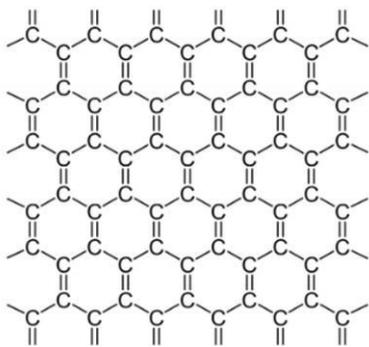


Figure 1 The structure of graphene [3]

หากนำวัสดุสองมิติอย่างแกรฟีนเรียงมาต่อกันเป็นชั้น ๆ จะได้วัสดุสามมิติคือ แกรไฟต์ แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอกจะได้วัสดุหนึ่งมิติ คือ ท่อคาร์บอนระดับนาโน (carbon nanotube) และถ้าถูกห่อให้เป็นทรงกลมจะได้ฟูลเลอร์หรือที่คุ้นหูกันในชื่อ buckyball แสดงใน Figure 2 ซึ่งแต่ละประเภทจะให้คุณสมบัติที่ต่างกันไป [3]

ในแกรฟีนอิเล็กตรอนใน 2s ออร์บิทัล กับอิเล็กตรอนใน 2p ออร์บิทัล สามารถรวมตัวกันเพื่อสร้างออร์บิทัลลูกผสม (hybrid orbital) ได้เป็น sp^2 ออร์บิทัลขึ้น ซึ่งการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแสดงใน Figure 3

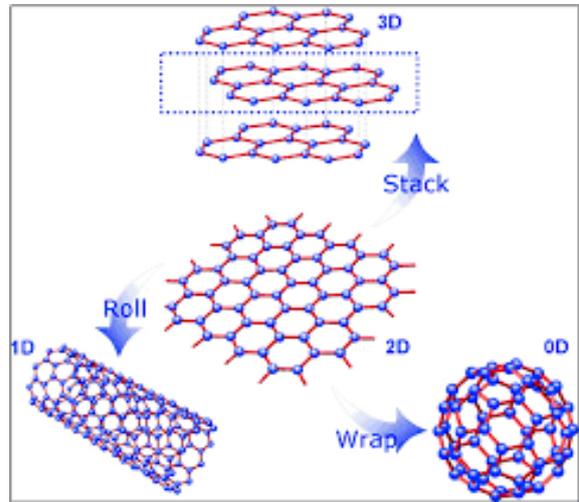


Figure 2 Graphene as the basis of other carbon structure [3]

ผลจากการจับตัวกันของอิเล็กตรอนแบบ sp^2 ทำให้เกิดเป็นพันธะซิกมา σ 3 พันธะ ส่วนอิเล็กตรอนในชั้น $2p_x$ ที่จับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ หรือเรียกว่าพันธะพาย (π -bonds) ซึ่งพันธะ π ของแต่ละอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดการไฮบริดเซชันกันได้ ทำให้เกิดเป็นแถบพลังงานของ π และ π^* และในโครงสร้างแกรฟีนแบบหกเหลี่ยมที่มี π -bonds 3 พันธะเชื่อมกับ อะตอมของคาร์บอนทำให้อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนย้าย (delocalized) ไปได้ทั้งหมดในโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้แกรฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ [4]

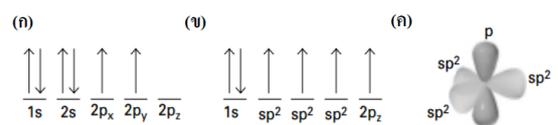


Figure 3 Electron arrangement of graphene [4]

จะเห็นได้ว่าความมหัศจรรย์ของแกรฟีนข้างต้นเป็นเพียงจุดเริ่มต้นเท่านั้น ความมหัศจรรย์ของแกรฟีนยังมีอีกมากเนื่องจากแกรฟีนมีสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง การนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม และความยืดหยุ่นสูงสามารถถูกบิดงอได้ จึงได้มีการนำวัสดุแกรฟีนมาใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การนำแกรฟีนคอมโพสิตไปประดิษฐ์ไม้แบดมินตันและไม้เทนนิส ทำให้ได้อุปกรณ์กีฬาที่มีความแข็งแรงทนทานแต่น้ำหนักเบากว่าเดิม ใช้เป็นเส้นเกราะกันกระสุนแทนเคฟลาร์ (Kevlar) ทำหน้าจอบนสมัผัสที่โค้งงอ นำมาเป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ และวัสดุนำส่งยาระดับนาโนในทางการแพทย์ เป็นต้น [5,6,7] และในอนาคต ชิ้นส่วนของคอมพิวเตอร์ เช่น ซีพียูประมวลผล ซึ่งนับวันจะยิ่งถูกพัฒนาให้หน่วยทรานซิสเตอร์บนซีพียูมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนใกล้ถึง

ขีดจำกัดทางควอนตัมของสารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิกอนแล้ว ซึ่งจากคุณสมบัติของแกรฟีนที่กล่าวมาแล้วจะสามารถใช้แทนซิลิกอน เนื่องจากมีข้อดีที่เหนือกว่าทั้งในด้านความเร็ว เกิดความร้อนต่ำ ระบายความร้อนดีกว่า และยิ่งกินไฟน้อยกว่า ทำให้ยังคงสามารถสร้าง CPU ที่เร็วยิ่งขึ้นสูงไปได้อีก

1.1 สมบัติของแกรฟีนออกไซด์

แกรฟีนเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีหลายประการ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอะตอมของคาร์บอนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวและเป็นวัสดุที่บาง แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้ มีความแข็งแรงกว่าเหล็ก (ค่ามอดูลัสของยังประมาณ 1 TPa) นอกจากนี้แกรฟีนมีค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องมีค่ามากกว่า 5,000 W m⁻¹ K⁻¹ [8] ซึ่งเทียบเท่ากับค่าการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนที่รวมตัวกันเป็นมัด และยิ่งกว่านั้นยังมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับค่าการนำความร้อนของเพชร ซึ่งความสามารถนำความร้อนที่สูงนี้จึงถูกเลือกมาใช้เป็นตัวช่วยระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีเยี่ยมด้วยความหนาของคาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ (2,630 m² g⁻¹) [9] มีสมบัติเกือบโปร่งแสง มีค่าการดูดกลืนแสง 2.3 % ของแสงสีขาว จากสมบัติทางแสงที่พิเศษของแกรฟีนนี้จึงทำให้แกรฟีนถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductive electrode) ในจอแสดงผลเซลล์แสงอาทิตย์ หรืออุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ [10,11]

2. วิธีการสังเคราะห์

การสังเคราะห์แกรฟีน [12,13] สามารถทำได้หลายวิธี ดังสรุปใน Figure 4 โดยการสังเคราะห์แกรฟีนนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top down) และการสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (bottom up) กระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนนั้น มีวิธีค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง ราคาแพง แต่ข้อดีคือให้ปริมาณของแกรฟีนจำนวนมาก และมุ่งเน้นใช้ในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังสามารถทำในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัยได้

2.1 กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top down)

2.1.1 การลอกด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical Exfoliation)

ในการแยกแกรฟีนออกจากชั้นของแกรไฟต์จะต้องใช้แรงภายนอกมากถึง 300 nN/μm² [14] การแยกชั้นแกรฟีนจากแกรไฟต์ในเบื้องต้น นั้นสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยเทคนิค mechanical cleavage หรือการเอาสก๊อตเทปทาบบนแกรไฟต์ แล้วดึงออก [4] จากนั้นก็นำไปทาบบนสก๊อตเทปอีกอันหนึ่งแล้วดึงออก แสดงให้เห็นใน Figure 5(a) ในแต่ละครั้งแผ่นแกรไฟต์ที่ติดอยู่บนสก๊อตเทปก็จะบางลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้แผ่นที่บางที่สุดแค่อะตอมเดียวเท่านั้น

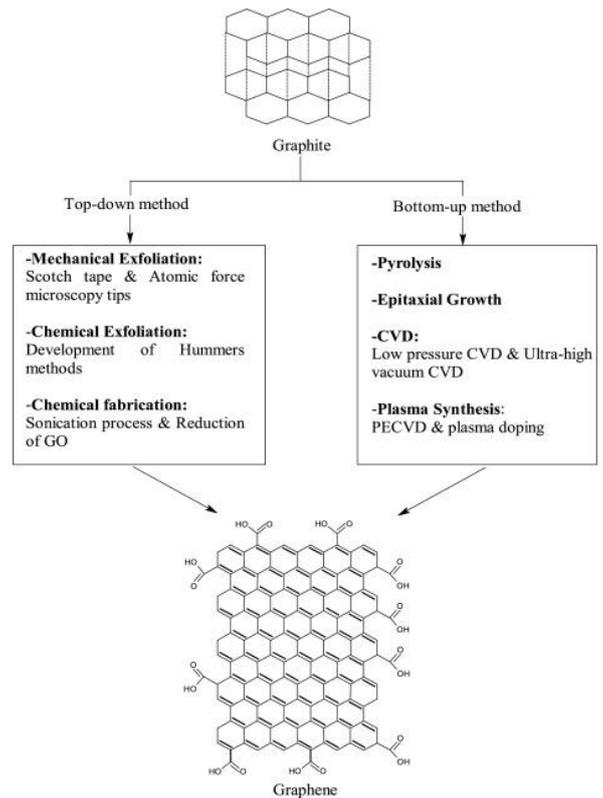


Figure 4 Schematic illustration of the synthesis of graphene [14]

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้วิธีการนี้จะได้แกรฟีนคุณภาพสูง แต่ยังมีข้อเสียคือ ความสามารถในการควบคุมขนาดและจำนวนชั้นของแกรฟีนยังทำได้ยาก รวมทั้งกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนค่อนข้างช้าและต้องการความละเอียดสูง

2.1.2 การหลุดลอกออกด้วยวิธีการทางเคมี (chemical exfoliation)

การสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ได้ผลิตภัณฑ์ของแกรฟีนในรูปของสารละลายโดยมีหลักการ คือ จะใช้โลหะอัลคาไลน์เข้าไปแทรกในระหว่างชั้นของแกรไฟต์เพื่อให้แกรฟีนแต่ละชั้นหลุดเป็นแผ่นออกมา [15,16] เหตุผลของการใช้โลหะอัลคาไลน์ในการแยกด้วยวิธีการนี้มี 2 ประการ คือ รัศมีของโลหะอัลคาไลน์มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างชั้นในแกรไฟต์จึงเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างได้ดี และโลหะอัลคาไลน์สามารถรวมตัวกับแกรไฟต์ได้ง่ายเกิดเป็นโครงสร้างแกรไฟต์ที่มีโลหะอัลคาไลน์แทรกชั้นอยู่ โดยปริมาณของแกรไฟต์ต่อโลหะอัลคาไลน์เกิดขึ้นในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

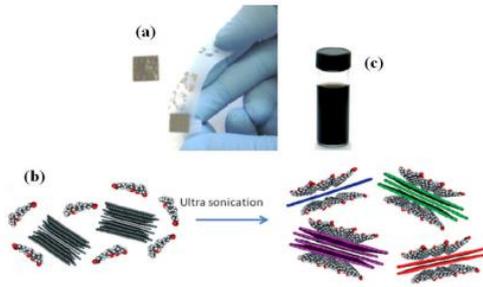


Figure 5 chemical exfoliation of graphene by Scotch tape from highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) [15]

2.1.3 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชันจากแกรไฟต์ออกไซด์ (Chemical Reduction of Graphite Oxide)

วิธีการนี้ถูกนำเสนอในครั้งแรกในปี 1962 โดย Boehm และคณะ [17] และได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมีกระบวนการที่ค่อนข้างง่ายและไม่ซับซ้อน เริ่มจากการออกซิไดซ์แกรไฟต์โดยใช้กรดแก่และสารออกซิไดซ์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์ หรือแกรฟีนออกไซด์ จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้ hydrazine hydrate (N_2H_4) ที่เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลง และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าให้มากขึ้น ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตแกรฟีนได้ในจำนวนมาก และต้นทุนต่ำกว่าวิธีก่อนหน้านี้ แม้ว่าแกรฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณภาพที่ด้อยกว่าก็ตาม แต่ก็ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ นอกจากนี้การทำปฏิกิริยารีดักชันยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้อุณหภูมิสูง [18] การใช้คลื่นไมโครเวฟหรือการใช้แสง [19] เพื่อกำจัดออกซิเจนที่สร้างพันธะกับอะโรมาติก คาร์บอน (aromatic carbon) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide, rGO)

2.2 กระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนแบบล่างสู่บน (Bottom up)

2.2.1 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)

วิธีไพโรไลซิส เป็นการสังเคราะห์แกรฟีนโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง [20] ในขั้นเริ่มต้นจะทำการสังเคราะห์โซเดียมเอทอกไซด์ โดยใช้โซเดียมและเอทานอลในอัตราส่วนโมล 1:1 โดยจะทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบปิดภายใต้อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งโซเดียมเอทอกไซด์ จากนั้นตามด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและกรองภายใต้สุญญากาศจะได้เป็นแผ่นแกรฟีนออกมา โดยแผ่นแกรฟีนที่ได้จะมีขนาดประมาณ 10 μm ข้อดีของวิธีการนี้ คือ ต้นทุนต่ำและให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก

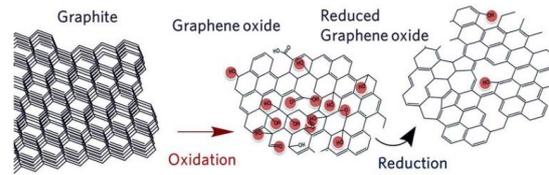


Figure 6 Synthesis of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO) from graphene [18]

2.2.2 การสังเคราะห์แกรฟีนโดยการฉีดพ่นไอสารเคมี (Chemical Vapour Deposition, CVD)

แกรฟีนที่ได้จากวิธีการลอกด้วยสก็อตเทปนั้นมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตแกรฟีนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีสมบัติที่ควบคุมได้ การควบคุมโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธี CVD [21] วิธีการนี้จะเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนแผ่นโลหะ โดยเริ่มต้นจากการปล่อยก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผาที่มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่ด้วยเล็กน้อย เมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะ เช่น ทองแดงหรือนิกเกิล ที่อุณหภูมิสูงระดับ 1000 °C จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนเกาะอยู่บนแผ่นโลหะ โดยคาร์บอนอะตอมของแกรฟีนจะจัดเรียงโครงสร้างอย่างเหมาะสม จากนั้นแกรฟีนที่อยู่บนโลหะจะถูกเคลือบผิวด้านบนด้วยโพลิเมอร์ PMMA (Poly(methyl methacrylate)) แล้วกำจัดเอาแผ่นโลหะออกโดยกระบวนการกัดด้วยกรด (etching) และทำการเคลื่อนย้าย แผ่นแกรฟีนที่เคลือบด้วย PMMA ไปวางบนวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการ ตามด้วยการละลาย PMMA ออกไปในที่สุด แสดงใน Figure 7 แกรฟีนที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิค CVD นี้ จะได้เป็นแกรฟีนที่มีคุณภาพสูง สามารถควบคุมจำนวนชั้นของแกรฟีนได้ และมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะต่อการนำไปใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์

2.2.3 การสังเคราะห์ทำได้โดยการปลูกแกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์ (Epitaxial growth on silicon carbide)

วิธีการนี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากแกรฟีนที่ผลิตได้มีคุณภาพสูงและให้ปริมาณมากได้ ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ทำได้โดยการปลูกแกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C ภายใต้เงื่อนไขสุญญากาศสูงมาก (UHV 10^{-7} Pa) โดยการให้ความร้อนแก่ซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้อะตอมของซิลิกอนบางส่วนเกิดการระเหิดออกมาจากผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ หลังจากนั้นจะเกิดการกัดกร่อนแบบแกรไฟต์ (graphitisation) ของอะตอมคาร์บอนที่ไว้เบื้องหลัง ทำให้เกิดขึ้นของแกรฟีนขึ้นดังแสดงใน Figure 8 ข้อดีของการสร้างชั้นเอพิแทกซ์ คือ ให้ผลผลิตแกรฟีนสูง มีคุณภาพดีและสามารถถ่ายโอนฟิล์มที่ได้ไปยังตัวรองรับอื่นๆ ได้ แต่ยังมีข้อเสีย คือ ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงและตัวรองรับที่มีราคาแพง [22]

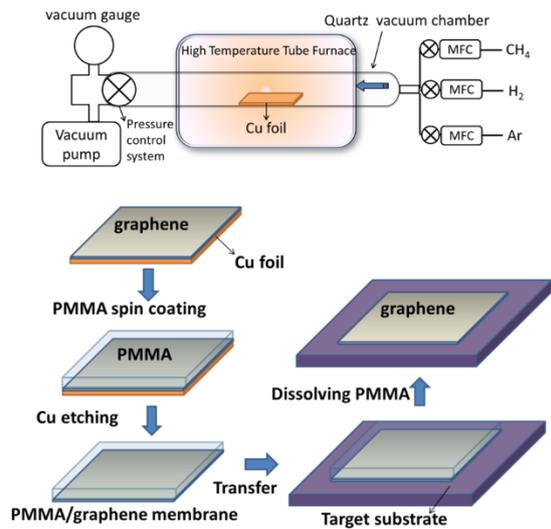


Figure 7 Synthesis of graphene by CVD method and the transfer process of graphene grown on Cu foil onto a target substrate. [21]

3. การพัฒนาสมบัติของแกรฟีนออกไซด์

การปรับปรุงแกรฟีนให้มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีก่อนนำไปประยุกต์ใช้ จึงได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์มากมายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยกระบวนการสังเคราะห์ที่ดีควรเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความสามารถในการออกซิไดซ์แกรไฟต์เป็นแกรฟีน และกระบวนการสังเคราะห์ควรทำได้ง่ายและรวดเร็ว

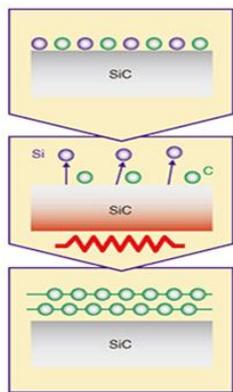


Figure 8 Epitaxial graphene growth on silicon carbide (SiC) by thermal decomposition [22]

ในปี 1859 Brodie [23] เป็นคนแรกที่ได้ทำการสังเคราะห์ แกรฟีนที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในโครงสร้าง เช่น epoxy, hydroxyl และ carboxyl ซึ่งการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิวของแกรฟีนจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และยังช่วยลดการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า [24] โดยวิธีการนี้ทำได้โดยเติมกรดไนตริกลงใน cooling jacket และทำให้เย็นลงที่ 0 °C โดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นทำการเติมแกรไฟต์และโพแทสเซียมคลอเรตซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ลง

ไป โดยกวนปฏิกิริยาเป็นเวลา 21 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0 °C แล้วทำการกรองผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยวิธีการนี้จะทำให้ได้แผ่นแกรฟีนที่มีขนาดเล็ก และมีพื้นที่ผิวสูง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียคือ มีความเป็นพิษ การกระจายตัวได้น้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย ความหนาของแผ่นไม่สม่ำเสมอ และโครงสร้างที่ได้มีความบกพร่องสูง

ต่อมาในปี 1898 Staudenmaier [25] ได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์แกรฟีน ด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในปฏิกิริยาซึ่งทำได้โดยผสมกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก ในอัตราส่วน 1:3 ลงในขวด จากนั้นนำไปแช่ในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 30 นาที แล้วเติมแกรไฟต์ลงไปพร้อมกับกวนปฏิกิริยาให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมโพแทสเซียมคลอเรตลงไปอย่างช้าๆ แล้วทำการกวน 96 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จะได้แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งวิธีการนี้ไม่ซับซ้อนเหมือนวิธีของ Brodie และสามารถทำให้เสร็จสมบูรณ์ได้ใน vessel แต่ข้อเสียคือ ยังมีความเป็นพิษ และใช้เวลาในการสังเคราะห์นานและเป็นอันตราย

เพื่อลดเวลาในการสังเคราะห์ วิธี Hummer [26] จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจและใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีการนี้จะเปลี่ยนตัวออกซิไดซ์จากโพแทสเซียมคลอเรตเป็นโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ โดยมีอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์เป็น 1:3 แล้วทำการกวน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง วิธีการนี้มีข้อดีคือ ตัวออกซิไดส์ที่ใช้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธี Staudenmaier หรือ Brodie แต่อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ ในขั้นตอนการออกซิเดชันเปลี่ยนแกรไฟต์เป็นแกรฟีนออกไซด์ยังทำได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น แกรฟีนที่ได้จึงยังมีความบกพร่องทางโครงสร้างอยู่ ต่อมาในปี 2008 มีการปรับปรุงวิธี Hummer เป็น Modified Hummers [27] ซึ่งได้เพิ่มอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์เป็น 1:6 โดยข้อดีของวิธีนี้คือ มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยนแกรไฟต์เป็นแกรฟีนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Hummer แต่ในขั้นตอนการออกซิเดชันจะมีการปลดปล่อยแก๊สพิษ เช่น NO₂ และ N₂O₄ และยังเหลือ Na⁺ และ NO₃⁻ ในปฏิกิริยาทำให้ยากต่อการกำจัดออก และผลิตภัณฑ์แกรฟีนออกไซด์ที่ได้ยังไม่มีบริสุทธิ์มากนัก หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์ด้วยวิธี Improved Hummers [28] วิธีการนี้จะไม่มีการใช้ NaNO₃ เหมือนกับวิธี Modified Hummers และได้เพิ่มปริมาณของแกรไฟต์ต่อ KMnO₄ เป็นอัตราส่วน 1:9 และทำในสารละลายผสมของ H₂SO₄/H₃PO₄ จากการปรับปรุงดังกล่าวทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น ใช้เวลาในการสังเคราะห์น้อย ความบกพร่องทางโครงสร้างของ GO ลดลง และไม่มีการเกิดแก๊สพิษในปฏิกิริยา

4. การพิสูจน์เอกลักษณ์

แกรฟีนเป็นเพียงชั้นเดียวของคาร์บอนอะตอมและมีความโปร่งใส วิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแกรฟีนที่ได้จึงมีความสำคัญมาก โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ทำการสังเคราะห์วัสดุแกรฟีน จะศึกษาผลทางสัญญาณวิทยา ความหนาของแผ่น เคมีพื้นผิว และเคมีกายภาพอื่น ๆ

4.1 Atomic force microscopy (AFM)

เทคนิคนี้สามารถใช้วัดความหนา ระดับความสูงต่ำ และคุณสมบัติทางสัญญาณวิทยาอื่น ๆ ได้ แต่เทคนิคนี้จะมีปัญหาในการสแกน bulk graphene เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และภาพถ่ายที่ได้ยังไม่ละเอียด ทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของจำนวนชั้นเลเยอร์สำหรับแกรฟีนออกไซด์ได้ แต่สามารถบอกความหนาที่ต่างกันระหว่าง pristine graphene และ GO ได้ ความหนาของแผ่นแกรฟีนเพียงชั้นเดียวมีค่าประมาณ 0.34-12 nm [29,30] เช่น กลุ่มวิจัยของ Paredes และคณะ [31] ได้ทำการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีนออกไซด์ที่ไม่ได้รีดิวซ์ พบว่าความหนาของรีดิวซ์แกรฟีนเท่ากับ 0.6 nm ในขณะที่ความหนาของแผ่นแกรฟีนที่ไม่ได้รีดิวซ์เท่ากับ 1.0 nm ซึ่งผลของความแตกต่างอธิบายได้ด้วยหมู่ออกซิเจนบน GO ที่ไม่ได้รีดิวซ์ แสดงใน Figure 9 นอกจากความหนาของแผ่นแกรฟีนที่ได้ ความแตกต่างของโหมด AFM ที่ใช้ สามารถศึกษาถึงสมบัติเชิงกล แรงเสียดทาน คุณสมบัติทางไฟฟ้า แม่เหล็กและความยืดหยุ่นของแผ่นแกรฟีนในระดับนาโนได้ [32]

4.2 Transmission electron microscope (TEM)

เทคนิคนี้สามารถใช้อธิบายถึงข้อบกพร่องในโครงสร้างพื้นที่ว่าง และระยะห่างระหว่างชั้นแกรฟีน เทคนิค TEM ไม่เพียงแต่ศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยา แต่สามารถนับจำนวนของชั้น แกรฟีนได้อย่างแม่นยำ พิจารณาได้โดยความสว่างในการส่องผ่านแผ่นของแกรฟีน โดยแกรฟีนแบบชั้นเดียว และ สองชั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากเส้นสีดำในภาพถ่ายที่มีหนึ่งและสองเส้นตามลำดับ แสดงใน Figure 10. แสดงภาพถ่าย HRTEM ของ แกรฟีนแบบชั้นเดียวและสองชั้น จะสัมพันธ์กับการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน เช่นงานวิจัยของ Hernandez และคณะ [31] ได้ อธิบายข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างแกรฟีนชั้นเดียวและสองชั้น โดยแกรฟีนชั้นเดียวจะมีการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่จุด {2110} ซึ่งจะสว่างกว่าแกรฟีนสองชั้นที่จุด {1100} ในรูป 10(e)

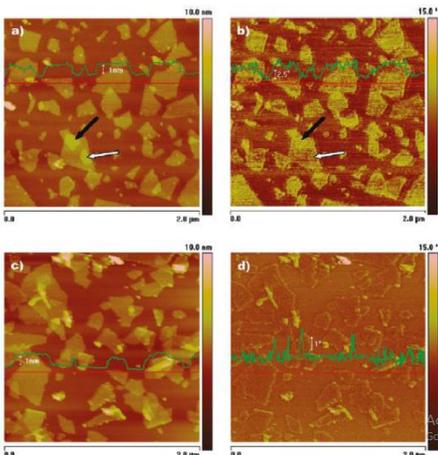


Figure 9 Height (a,c) and corresponding phase (b,d) tapping-mode AFM images of unreduced (a,b) and chemically reduced (c,d) graphene oxide nanosheets deposited from aqueous dispersions onto freshly cleaved HOPG. [31].

4.3 X-ray diffraction (XRD)

XRD เป็นเทคนิคที่บ่งบอกคุณสมบัติของความเป็นผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอม และขนาดของผลึก แต่ไม่สามารถบอกจำนวนชั้นของแกรฟีนได้ ในแกรไฟต์บริสุทธิ์จะแสดงการสะท้อนที่ระนาบ (002) ที่มีมุม $2\theta = 26.6^\circ$ หลังจากแกรไฟต์ถูกออกซิไดส์ไปเป็นแกรฟีนออกไซด์ ตำแหน่งพีคที่ระนาบ (002) จะเลื่อนไปที่มุม 2θ ที่ต่ำลง คือ 13.9° เนื่องมาจากการที่มีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนและโมเลกุลของน้ำในระหว่างชั้นของแกรไฟต์ และเมื่อแกรฟีนออกไซด์ถูกทำให้หลุดลอกด้วยวิธีการทางเคมี จะทำให้ได้เป็นแผ่นแกรฟีน โดยแกรฟีนที่ได้จะไม่พบสัญญาณพีคในสเปกตรัมเนื่องจากแกรฟีนออกไซด์ได้ถูกกำจัดออกไป แสดงใน Figure 11 [30]

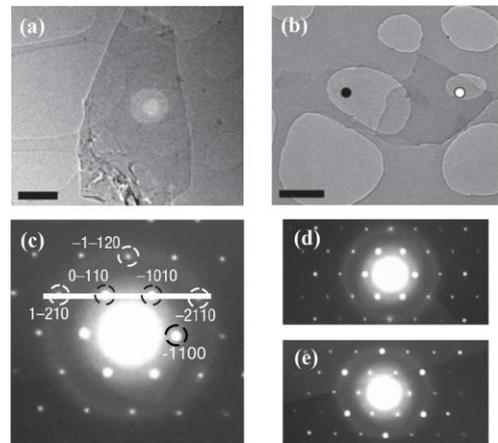


Figure 10 High-resolution TEM images of solution-cast monolayer (a) and bilayer (b) graphene (scale bar 500 nm). c, Electron diffraction pattern of the sheet in a, with the peaks labelled by Miller-Bravais indices. d,e, Electron diffraction patterns taken from the positions of the black (d) and white spots (e), respectively [33]

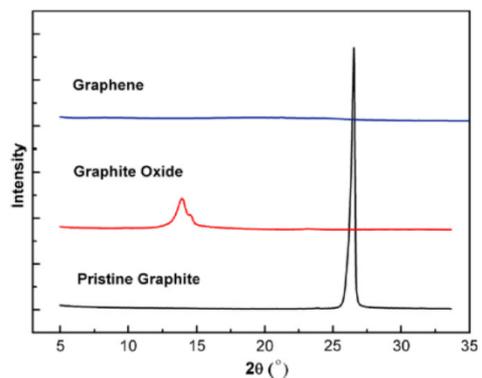


Figure 11 XRD patterns of pristine graphite, GO and graphene. [30]

4.4 Raman spectroscopy

Raman เป็นเทคนิคที่มีความจำเป็นมากในการวิเคราะห์โครงสร้างของแกรฟีน แสดงใน Figure 12 โดยอัญรูปของคาร์บอนจะพบ D peak, G peak และ 2D peak พบการสั่นที่ความยาวคลื่นประมาณ 1350 cm^{-1} , 1580 cm^{-1} และ 2700 cm^{-1} ซึ่ง D peak จะแสดงความผิดปกติใน sp^2 hybridized ของคาร์บอนอะตอม ส่วน G peak จะเกี่ยวข้องกับ tangential stretching (E_{2g}) ของแกรไฟต์ ค่าอัตราส่วน I_D/I_G สามารถบ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้าง sp^3 ของแกรฟีนได้ กล่าวคือ ถ้าค่า I_D/I_G มีค่าน้อยแสดงว่าสัดส่วนโครงสร้าง sp^3 จะมีค่ามาก ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Wang และคณะ [9] ศึกษาความแตกต่างของแกรฟีนแบบ 1-4 ชั้น บนควอตซ์และ SiO_2/Si สำหรับกรณีของแกรฟีนจะไม่มีแถบ D ปรากฏในรามานสเปกตรัม ซึ่งยืนยันได้ว่าไม่พบข้อบกพร่องของโครงสร้าง ส่วนแถบ 2D ของแกรฟีนจะพบยอดพีคที่แหลมเพียงพีคเดียว แต่แกรไฟต์จะพบสองพีค นอกจากนี้ยังพบว่าใน G band ของแกรฟีน 1 ชั้น จะมีความเข้มของพีคที่ต่ำกว่าแกรฟีนแบบ 2, 3 และ 4 ชั้น ดังนั้นจำนวนชั้นของแกรฟีนจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มของพีคใน G band ที่เพิ่มขึ้น หลายกลุ่มงานวิจัยจึงใช้ Raman spectroscopy เป็นเครื่องมือเพื่อตรวจสอบคุณภาพและจำนวนชั้น grapheme

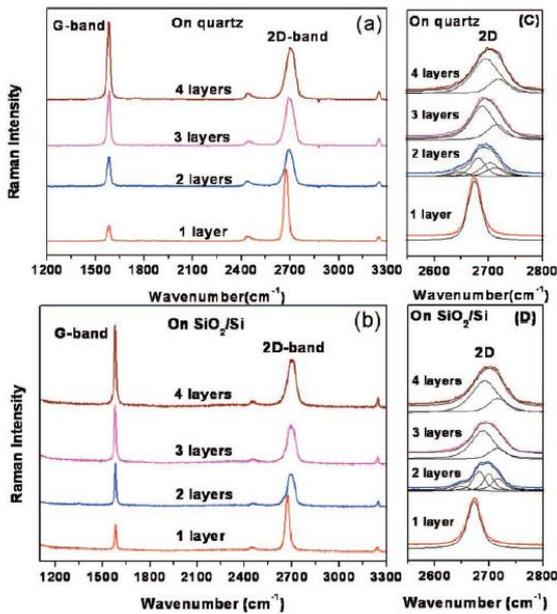


Figure 12 The Raman spectra of monolayer, bilayer, three layers, and four layers graphene on quartz (a) and SiO_2 (300 nm)/Si substrate (b). The enlarged 2D-band regions with curve fit are also shown in panels c and d. [34]

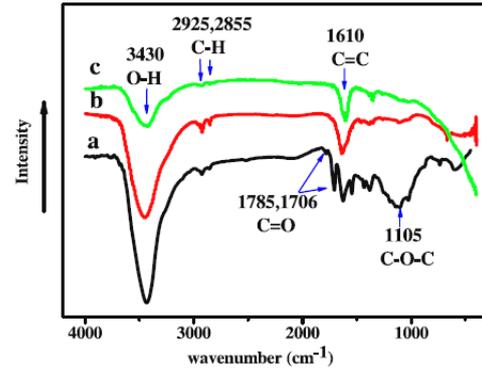


Figure 13 FTIR spectra of graphite, GO and RGO: a-GO; b-RGO (95 °C for 3 h) and c-graphite. [35]

4.5 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เทคนิคบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโครงสร้างของแกรฟีนและอนุพันธ์ แสดงใน Figure 13 หลายกลุ่มงานวิจัยจะใช้เทคนิคนี้ระบุโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น กลุ่มงานวิจัยของ Ren P-G และ คณะ [35] ได้ทำการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ พบว่า แกรไฟต์จะมีหมู่ -OH ที่เลขคลื่น $3,400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการดูดซับโมเลกุลของน้ำ และที่เลขคลื่น $1,610\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C=C ของวงอะโรมาติก ส่วนแกรฟีนออกไซด์จะพบพีคใหม่ที่เลขคลื่น $1,785\text{ cm}^{-1}$ และ $1,707\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของ C=O ของคาร์บอนิล และคาร์บอกซิลิก จึงยืนยันได้ว่าประสบความสำเร็จในออกซิไดซ์แกรไฟต์ นอกจากนี้สัญญาณพีคที่เลขคลื่น $1,610\text{ cm}^{-1}$ ในแกรไฟต์ ได้เลื่อนไปที่เลขคลื่น $1,625\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยนไปเป็นแกรฟีนออกไซด์ ส่วนรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ จะมีความเข้มของพีคที่เลขคลื่น $3,430$ ต่ำลง และสัญญาณพีคที่เลขคลื่น $1,785$, $1,707$ และ $1,105\text{ cm}^{-1}$ หายไปเนื่องจากการกำจัดออกซิเจนออกจากโครงสร้าง

4.6 Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis

เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ เนื่องจากจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ เช่น การนำแกรฟีนไปดูดซับสีย้อมหรือโลหะหนัก ควรจะมีค่าพื้นที่ผิวที่สูง โดยพื้นที่ผิวของแกรฟีนที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางและรายงานอยู่ในช่วง $300\text{--}1000\text{ m}^2/\text{g}$ ค่าแตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากจำนวนชั้นของแกรฟีนและวิธีการสังเคราะห์ที่ต่างกัน เช่น แกรฟีนที่เตรียมผ่าน thermal exfoliation ที่อุณหภูมิสูงพบว่ามีค่าพื้นที่ผิวประมาณ $940\text{ m}^2/\text{g}$ [36] ส่วนแกรฟีนที่เตรียมด้วยการดัดแปลงทางเคมี (chemical modification) จะมีค่าพื้นที่ผิวลดลงเหลือประมาณ $705\text{ m}^2/\text{g}$ [37]

5. การนำไปประยุกต์ใช้

5.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้

การหาวัสดุชนิดใหม่มาทดแทนซิลิคอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นการค้นคว้าวิจัยที่สำคัญมากในโลกยุคปัจจุบัน และแกรฟีนก็เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดเนื่องจากแกรฟีนชั้นเดียวจะมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ หรือให้ค่าความโปร่งแสงสูงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาหลอดไฟ LED โดยใช้แกรฟีนเคลือบด้านนอกของหลอด พบว่าจะลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยยะสำคัญ มหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ [38] ประเทศอังกฤษ ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาหลอดไฟแกรฟีนชนิดใหม่นี้ หลอดไฟชนิดใหม่นี้สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน เนื่องจากแกรฟีนมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงจึงทำให้อายุการใช้งานและลดการใช้พลังงานลง 10% นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและราคาต่ำกว่าหลอดไฟ LED งานวิจัยของ Lai และคณะ [39] ประสบผลสำเร็จในการสร้างหลอดไฟแกรฟีนโดยใช้วิธีการในการเคลือบด้วยหมึกร้อนบนแผงวงจร (PCB) ผลการวิจัยพบว่า หลอดไฟชนิดนี้มีข้อได้เปรียบอย่างมากในด้านการใช้พลังงาน

5.2 ทรานซิสเตอร์

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์มีความพยายามในการนำแกรฟีนมาใช้เป็นทรานซิสเตอร์ที่บรรจุในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องซักผ้า เพื่อเพิ่มความถี่ให้กับทรานซิสเตอร์ เนื่องจากความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในแกรฟีนมีสูงมากดังที่กล่าวไปแล้ว และอิเล็กตรอนในแกรฟีนจะมีการเคลื่อนที่แบบบอลลิสติก (ballistic movement) ผลจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความร้อนและความต้านทานในวงจรมีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ที่เป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มกระจาย (diffusive) ในเร็ว ๆ นี้ นักวิทยาศาสตร์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้สร้างทรานซิสเตอร์จากแกรฟีนที่มีความถี่สูงมากถึง 300 กิกะเฮิรตซ์ได้เป็นผลสำเร็จ [40] นอกจากนี้มีงานวิจัยที่รายงานถึงการผลิตทรานซิสเตอร์จากแกรฟีนบนแผ่นพลาสติกที่โค้งงอได้เป็นผลสำเร็จ โดยทรานซิสเตอร์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง 25 กิกะเฮิรตซ์ดังแสดงใน Figure 14 [41] ดังนั้นในอนาคตอันใกล้เราอาจจะมีคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่สามารถทำงานด้วยความเร็วที่สูงมากสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวัน

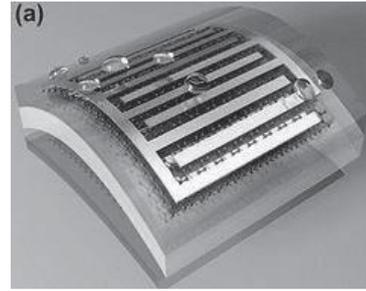


Figure 14 3-D illustration of a water-resistant flexible multifigure embedded gate GFET [41]

5.3 ใช้เป็นวัสดุในการขนส่งยา

เนื่องจากแกรฟีนเป็นโครงสร้างสองมิติที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจึงสามารถตกแต่งหมู่ฟังก์ชันได้ (functionalized graphene) และมีอิเล็กตรอนไม่ได้อยู่ประจำที่ แต่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่ว นอกจากนี้ยังมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ นั่นคือไม่มีความเป็นพิษ ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นระบบนำส่งยาในผู้ป่วยได้ [42] แกรฟีนยังจัดเป็นสารชอบไขมันจึงทำให้เป็นตัวส่งผ่านยาเข้าสู่ภายในเซลล์ได้โดยตรงผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ดังแสดงใน Figure 15 ตัวอย่างงานวิจัยของ Xu และคณะ [43] ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์แบบง่ายๆ ด้วยวิธี co-deposition ซึ่งวัสดุคอมพอสิตที่ได้นั้นจะถูกสังเคราะห์มาจากแกรฟีนร่วมกับ Fe_3O_4 จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากากราฟต์ลงบน poly[2-(dimethylamino) ethyl methacrylate] ผลการวิจัยพบว่าคอมพอสิตที่ได้นี้ มีโครงสร้างและสัณฐานวิทยาที่ชัดเจนและมีความเสถียรในการกระจายตัวในน้ำได้ดี นอกจากนี้การโหลดและปลดปล่อยยาที่มีความสามารถในการโหลดและปลดปล่อยได้สูง นอกจากนี้ควบคุมการปลดปล่อยที่ pH แตกต่างกันได้ดี

5.4 เซ็นเซอร์

นักวิจัยด้านเซ็นเซอร์หลายกลุ่มทั่วโลกได้นำแกรฟีนไปใช้ในเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในหลากหลายรูปแบบตัวอย่าง เช่น การนำแกรฟีนไปสร้างเป็นขั้วเล็กโทรดในเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจหาปริมาณกลูโคส คอเลสเทอรอล ฮีโมโกลบินและดีเอ็นเอ [44] ปัจจุบันการใช้แกรฟีนเซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและดีกว่าการใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโน (carbon nanotube) เนื่องจากแกรฟีนมีพื้นที่ผิวที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารตรวจวัดได้มากกว่าท่อคาร์บอนนาโนถึงสองเท่า สำหรับการนำแกรฟีนมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [43] ในปัจจุบันโนเกียได้ทำการจดสิทธิบัตรสำหรับการใช้แกรฟีนเป็นเซ็นเซอร์ในการจับโฟตอนซึ่งสามารถจับโฟตอนของแสงในช่วงสเปกตรัมที่ตามองเห็นได้ไปจนถึงช่วงรังสีอินฟราเรดและรังสี

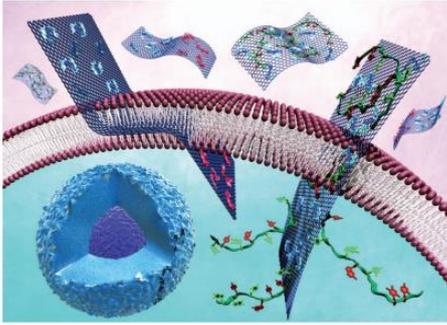


Figure 15 Manipulating the hydrophilic–lipophilic properties of graphene (blue hexagonal planes) through chemical modification would allow interactions with biological membranes (purple-white double layer), such as drug delivery into the interior of a cell (blue region) [42]

อัลตราไวโอเลต จากการค้นพบนี้จะส่งผลให้เซ็นเซอร์สำหรับการถ่ายภาพมีขนาดเล็กและบางลงมากกว่าการใช้เซ็นเซอร์แบบ CMOS และจากคุณสมบัติค่าความโปร่งแสงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้เซ็นเซอร์จากแกรฟีนสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้ในสภาพที่มีแสงน้อย อีกทั้งการสังเคราะห์ยังมีต้นทุนต่ำ จึงทำให้สามารถผลิตเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ราคาถูกได้ นอกจากนี้การกำหนดรูปร่างสามารถทำได้ด้วยการฉายแสง (photolithography) เพื่อกำหนดโครงสร้างแกรฟีนระดับนาโน ดังนั้นแกรฟีนจึงสามารถนำมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางกลได้ เช่น เซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดความแข็งแรง ความเครียด ความเค้นในวัสดุ เป็นต้น

5.5 ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสีย

ปัญหามลพิษทางน้ำเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาน้ำเสียจากสีย้อม หรือโลหะหนัก ที่ปล่อยมาจากภาคอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ต้องการได้รับการแก้ไข เนื่องจากสีย้อมและโลหะหนักเหล่านี้มีความเป็นพิษสูงและก่อให้เกิดมะเร็งได้ ในอดีตจะใช้เทคนิคการกำจัดสีย้อมแบบแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange), การกรอง (filtration), การบำบัดด้วยเคมีไฟฟ้า (electro-chemical treatment) หรือกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes) [46] เทคนิคดังกล่าวทำได้ยุ่งยาก และเครื่องมือราคาแพง นักวิทยาศาสตร์จึงมุ่งเน้นพัฒนาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง นั่นคือแกรฟีน เนื่องจากแกรฟีนมีพื้นที่ผิวที่สูงมาก และมีฟังก์ชันที่มีความชอบน้ำ ประกอบไปด้วย ไฮดรอกซิล, คาร์บอนิล, คาร์บอกซิลิก และหมู่เอพอกไซด์ [47] จึงมีคุณสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Aniruddha และคณะ [48] ได้สังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ เพื่อนำมาดูดซับสีย้อม methylene blue และ rhodamine B พบว่า แกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงถึง 97% และ 88% ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็วในเวลา 15 นาที นอกจากนี้ได้มีการนำแกรฟีนมาใช้เป็นวัสดุ

เติมแต่งในวัสดุพอลิเมอร์ เพื่อความแข็งแรงของวัสดุและเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เช่น Hongjie และคณะ [49] ได้นำแกรฟีนออกไซด์มาเป็นวัสดุเติมแต่งในวัสดุไฮโดรเจลของ polyvinyl alcohol /carboxymethyl cellulose เพื่อใช้วัสดุในการดูดซับ methylene blue พบว่า ไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมแกรฟีน ออกไซด์จะดูดซับได้ 83.33 mg/g และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ลงไป พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 172.14 mg/g ดังนั้นแกรฟีนออกไซด์จึงเป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นมากในเรื่องของการดูดซับ นอกจากจะช่วยให้ในเรื่องของประสิทธิภาพในการดูดซับ ยังสามารถช่วยเสริมแรงในวัสดุ และไม่มีความเป็นพิษอีกด้วย

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าแกรฟีนเป็นวัสดุมหัศจรรย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสง เนื่องด้วยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องมากถึง $200,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ มีค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีค่ามากกว่า $5,000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเกือบโปร่งแสง มีค่าการดูดกลืนแสง 2.3 % ของแสงสีขาว รวมทั้งมีความหนาของคาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ถึง $2,630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ จากสมบัติที่พิเศษดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ เช่น หลอดไฟ LED โดยใช้แกรฟีนเคลือบด้านนอกของหลอดเพื่อลดพลังงานใช้เป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ที่มีสมบัติความถี่สูงมากถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ใช้เป็นเซ็นเซอร์เพื่อใช้ตรวจหาปริมาณกลูโคส คอเลสเทอรอล ฮีโมโกลบินและดีเอ็นเอ รวมไปถึงการนำไปใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับวัสดุชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน และนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมหรือโลหะหนักจากน้ำเสียรวมทั้งใช้เป็นวัสดุในการขนส่งยาเนื่องจากมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ เป็นต้น ส่วนการสังเคราะห์เพื่อที่จะได้แกรฟีนที่มีคุณภาพนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งการสังเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธีและมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน โดยการสังเคราะห์ที่ง่าย ต้นทุนต่ำ แต่ให้ปริมาณแกรฟีนที่มาก ไม่มีความเป็นพิษและมีความบริสุทธิ์สูงคือสิ่งที่นักวิจัยต้องการ ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือวิธี Improved Hummers เนื่องจากไม่มีการใช้ NaNO_3 ซึ่งไม่ก่อให้เกิดแก๊สพิษในปฏิกิริยา ช่วยลดเวลาในการสังเคราะห์ และความบกพร่องทางโครงสร้างของแกรฟีน ลดลงความบริสุทธิ์ของแกรฟีนที่ได้สามารถวิเคราะห์ เอกลักษณะทางโครงสร้างด้วยเทคนิคที่หลากหลาย เช่น AFM TEM XRD Raman spectroscopy FTIR และ BET เป็นต้น ในปัจจุบันแกรฟีนยังถูกวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้ในทางชีวภาพ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า แกรฟีนนับเป็นวัสดุชนิดใหม่ของโลกแห่งนวัตกรรมที่น่าจับตามองเป็นอย่างยิ่งและเราคงจะได้ยินได้ฟังเรื่องราวของ “แกรฟีน” กันบ่อยมากขึ้นในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Novoselov, K. S. and et al. 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. **Science**. 306(5696): 666-669.
- [2] Bolotin, K. I. and et al. 2008. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. **Solid State Communications**. 146(9-10): 351-355.
- [3] Garg, B., Bisht, T. and Ling, Y.-C. 2004. Graphene-based nanomaterials as heterogeneous acid catalysts: a comprehensive perspective. **Molecules**. 19(9): 14582-14614.
- [4] Wong, H.-S. P. and Akinwande, D. 2012. Carbon nanotube and graphene device physics **Contemporary Physics**. 53(4):1-1.
- [5] Zhang, T. and et al. 2012. Theoretical approaches to graphene and graphene-based materials. **Nano Today**. 7(3): 180-200.
- [6] Papageorgiou, D. and et al. 2017. Mechanical Properties of Graphene and Graphene-Based Nanocomposites. **Progress in Materials Science**. 90(8): 75-127.
- [7] Agromayor, R. and et al. 2016. Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids. **Materials**. 9(6): 455.
- [8] Santosh K. T. and et al. 2020. Graphene research and their outputs: Status and prospect. **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**. 5(1): 10-29.
- [9] Zhang, S., Li, Z. and Xing, F. 2020. Review of polarization optical devices based on graphene materials. **International Journal of Molecular Sciences**. 21(5): 1608.
- [10] Edwards, R. S. and Coleman, K. S. 2013. Graphene synthesis: relationship to applications. **Nanoscale**. 5(1): 38-51.
- [11] Nair, R. R. and et al. 2008. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. **Science**. 320(5881): 1308-1308.
- [12] Choi, W. and et al. 2010. Synthesis of graphene and its applications: a review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**. 35(1): 52-71.
- [13] Bhuyan, M. S. A. and et al. 2016. Synthesis of graphene. **International Nano Letters**. 6(2): 65-83.
- [14] Zhang, Y. and et al. 2005. Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices. **Applied Physics Letters**. 86(7): 073104.
- [15] Viculis, L. M., Mack, J. J. and Kaner, R. B. 2003. A chemical route to carbon nanoscrolls. **Science**. 299(5611): 1361-1361.
- [16] Viculis, L. M. and et al. 2015. Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets. **Journal of Materials Chemistry**. 15(9): 974-978.
- [17] Boehm, H.-P. and et al. 1962. Das adsorptionsverhalten sehr dünner kohlenstoff-folien. **Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie**. 316(3-4): 119-127.
- [18] Khairir, N. and et al. 2015. Study of Reduced Graphene Oxide for Trench Schottky Diode. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. 99(8): 012031.
- [19] Li, B. and et al. 2010. All-Carbon Electronic Devices Fabricated by Directly Grown Single-Walled Carbon Nanotubes on Reduced Graphene Oxide Electrodes. **Advanced Materials**. 22(28): 3058-3061.
- [20] Cano-Marquez, A. G. and et al. 2009. Ex-MWNTs: graphene sheets and ribbons produced by lithium intercalation and exfoliation of carbon nanotubes. **Nano Letters**. 9(4): 1527-1533.
- [21] Li, X. and et al. 2009. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. **Science**. 324(5932): 1312-1314.
- [22] Hibino, H., Kageshima, H. and Nagase, M. 2010. Graphene growth on silicon carbide. **Special Feature**, 8(8): 1-6.
- [23] Lerf, A. and et al. 2006. Hydration behavior and dynamics of water molecules in graphite oxide. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**. 67(5-6): 1106-1110.
- [24] Kim, H., Abdala, A. A. and Macosko, C. W. 2010. Graphene/polymer nanocomposites. **Macromolecules**. 43(16): 6515-6530.
- [25] Staudenmaier, L. 1898. Verfahren zur darstellung der graphitsäure. **Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft**. 31(2): 1481-1487.
- [26] Hummers, W., Offeman, S. and Richard E. 1958. Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemical Society**. 80(6): 1339-1339.

- [27] Park, S. and et al. 2008. Aqueous suspension and characterization of chemically modified graphene sheets. **Chemistry of Materials**. 20(21): 6592-6594.
- [28] Marcano, D. C. and et al. 2010. Improved synthesis of graphene oxide. **ACS Nano**. 4(8): 4806-4814.
- [29] Li, D. and et al. 2008. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets. **Nature Nanotechnology**. 3(2): 101.
- [30] Zhang, H.-B. and et al. 2010. Electrically conductive polyethylene terephthalate/ graphene nanocomposites prepared by melt compounding. **Polymer**. 51(5): 1191-1196.
- [31] Paredes, J. I. and et al. 2009. Atomic force and scanning tunneling microscopy imaging of graphene nanosheets derived from graphite oxide. **Langmuir**. 25(10): 5957-5968.
- [32] Lee, C. and et al. 2008. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. **Science**. 321(5887): 385-388.
- [33] Hernandez, Y. and et al. 2008. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. **Nature Nanotechnology**. 3(9): 563-568.
- [34] Wang, Y. Y. and et al. 2008. Raman studies of monolayer graphene: the substrate effect. **The Journal of Physical Chemistry**. 112(29): 10637-10640.
- [35] Ren, P.-G. and et al. 2010. Temperature dependence of graphene oxide reduced by hydrazine hydrate. **Nanotechnology**. 22(5): 055705.
- [36] Dai, J.-F. and et al. 2015. Surface properties of graphene: relationship to graphene-polymer composites. **Reviews on Advanced Materials Science**. 40(1): 60-71.
- [37] Evanoff, K. and et al. 2011. Nanosilicon-coated graphene granules as anodes for Li-ion batteries. **Advanced Energy Materials**. 1(4): 495-498.
- [38] Ford, J. 2015. Light-bulb moment for unique material. **Engineering Journal**. 296: 137758-137763.
- [39] Jiang, G. and et al. 2019. An efficient flexible graphene-based light-emitting device. **Nanoscale Advances**. 1(12): 4745-4754.
- [40] Liao, L. and et al. 2010. High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate. **Nature**. 467(7313): 305.
- [41] Lee, J. and et al. 2013. 25 GHz embedded-gate graphene transistors with high-K dielectrics on extremely flexible plastic sheets. **ACS Nano**. 7(9): 7744-7750.
- [42] Novoselov, K. S. and et al. 2012. A roadmap for graphene. **Nature**. 490(7419): 192-200.
- [43] Xu, G. and et al. 2014. Modification of graphene oxide by a facile coprecipitation method and click chemistry for use as a drug carrier. **RSC Advances**. 4(54): 28807-28813.
- [44] Kula, T. and et al. 2011. Recent advances in graphene-based biosensors. **Biosensors and Bioelectronics**. 26(12): 4637-4648.
- [45] Chris, D. 2012. **Nokia photo sensor patent looks to take the hump out of Pureview Cameras**. <http://www.Wpcentral.com/nokiaphoto-sensor-patent-looks-take-hump-outpureview-cameras> Accessed 20 July 2020.
- [46] Forgacs, E., Cserhati, T. and Oros, G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. **Environment International**. 30(7): 953-971.
- [47] Perreault, F., De Faria, A. F. and Elimelech, M. 2015. Environmental applications of graphene-based nanomaterials. **Chemical Society Reviews**. 44(16): 5861-5896.
- [48] Molla, A. and et al. 2019. Selective adsorption of organic dyes on graphene oxide: Theoretical and experimental analysis. **Applied Surface Science**. 464(12): 170-177.
- [49] Dai, H., Huang, Y. and Huang, H. 2018. Eco-friendly polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose hydrogels reinforced with graphene oxide and bentonite for enhanced adsorption of methylene blue. **Carbohydrate polymers**. 185(12): 1-11.