

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดซับ (Adsorption) (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

การดูดซับ เป็นความสามารถของตัวดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 วัสดุ เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) (สราวุธ ศรีคุณ, 2550)

การดูดซับแบบนี้เป็น การดูดซับที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีที่เกิดขึ้นที่แรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ มีค่าความร้อนในการดูดซับตํ่ากว่า 25 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้า โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับแบบนี้เป็น การดูดซับที่แข็งแรง เป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดตัวใหม่ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 50 - 800 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayers) โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

2.2 สีย้อม (Dyes) (อุทัย ทิพย์โพธิ์เมือง, 2555)

สีย้อมเป็นสารสำคัญที่ทำหน้าที่ติดสีไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม โดยจะมีความคงทนต่อการซักล้าง ทนแดด รวมตัวกับน้ำได้น้อย จึงยากแก่การกำจัด โดยการดูดติดกับเนื้อผ้าของสีย้อมมีแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีเกี่ยวข้อง 4 ชนิด ที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไอออน (Ionic forces) และพันธะ

โคเวเลนต์ (Covalent bond) โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไปหรือบางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน รูปร่างและขนาดของสีย้อมมีผลต่อการยึดติด เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาว สีย้อมก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น จะทำให้การติดสีดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมาก จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

2.2.1 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภทโดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป สีย้อมสามารถจำแนกตามการนำไปใช้งานได้ดังนี้

1. สีย้อมแอซิด (Acid dye) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก สีย้อมแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ขนแกะไหมและอะคริลิกได้ดี สีย้อมแอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2. สีไดเรกต์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตากง่าย ทนแสง

3. สีเบสิก (Basic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุบวกจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4. สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอนและอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มโดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อมได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dye) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีนหรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5. สิริแอทฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สิริแอทฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^\circ\text{C}$ และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สิริแอทฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6. สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนตซึ่งจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7. สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

8. สีมอร์แดนท์หรือโครม (Mordant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9. สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

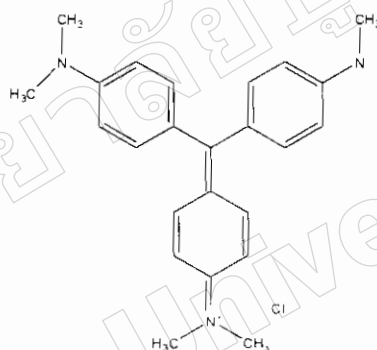
10. สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11. สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลาย

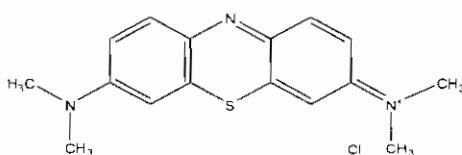
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สีย้อม 3 ชนิดคือ สีย้อมเมทิลไวโอเลตและเมทิลีนบลูซึ่งเป็นสีย้อมประเภทสีย้อมเบสิกและสีย้อมเมทิลออเรนจ์เป็นสีย้อมประเภทสีย้อมแอซิด

2.2.2 สีย้อมเบสิก (อุทัย ทิพย์โพธิ์เมือง, 2555)

สีย้อมเบสิกเป็นเกลือของเบสอินทรีย์ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกจึงเรียกว่า สีย้อมไอออนิก (Cationic dyes) สามารถย้อมติดกับเส้นใยได้ โดยประจุบวกของสีจะจับกับประจุลบของเส้นใย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สีย้อมเมทิลไวโอเลต (Methyl violet) ในช่วงพีเอชที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสีในกรดเป็นสีในเบสคือ 0.1 - 2.7 (เหลือง-ม่วง) และเมทิลีนบลู (Methylene blue) ในช่วงพีเอชที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสีในกรดเป็นสีในเบสคือ 3 - 4.5 (เหลือง-ฟ้า) ซึ่งเป็นสีย้อมเบสิกที่เป็นอินดิเคเตอร์ โครงสร้างของสีย้อมเมทิลไวโอเลตและเมทิลีนบลู แสดงดังภาพที่ 2-1 และ 2-2



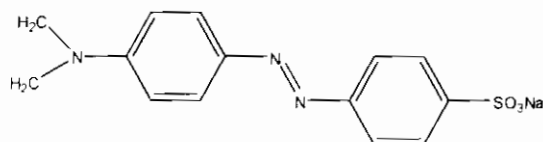
ภาพที่ 2-1 โครงสร้างสีย้อมเมทิลไวโอเลต (C₂₃H₂₆N₄Cl)



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างสีย้อมเมทิลีนบลู (C₁₆H₁₈N₃SCl)

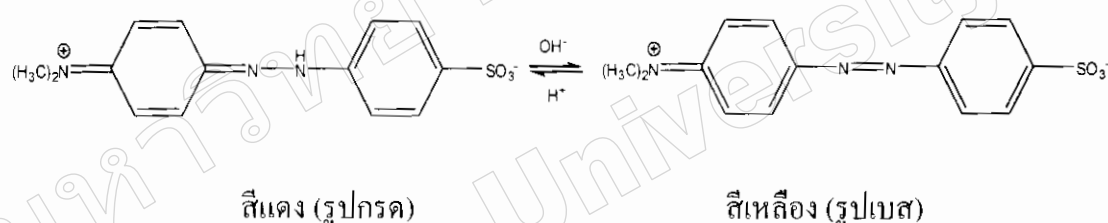
2.2.3 สีย้อมแอซิด

สีย้อมแอซิดเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ หรือกรดซัลโฟนิก สามารถละลายน้ำได้ดี และแตกตัวเป็นไอออนลบในน้ำ เมื่อใช้ในการย้อมสีจะจับกับไอออนบวกบนผิวของเส้นใย จึงใช้ย้อมสีเส้นใยจากธรรมชาติ สีย้อมเมทิลออเรนจ์ เป็นเกลือของกรดซัลโฟนิกในวงแหวนเบนซีนซึ่งเปลี่ยนสีในช่วงพีเอชที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสีในกรดเป็นสีในเบสคือ 3.1 - 4.4 (ชมพูแดง - เหลือง) โดยมีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์ ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$)

เมทิลออเรนจ์จะมีโครงสร้าง 2 แบบขึ้นกับความเป็นกรดเบสที่พีเอชต่ำกว่า 3.1 จะมีสีแดงชมพู พีเอชสูงกว่า 4.4 มีสีเหลืองส้ม เมื่ออยู่ในสารละลายกรดเมทิลออเรนจ์จะถูกเติมไฮโดรเจนอะตอมในตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างไนโตรเจน ส่วนในสารละลายเบสจะสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมในตำแหน่งดังกล่าวไป ทำให้มีสีแตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-4



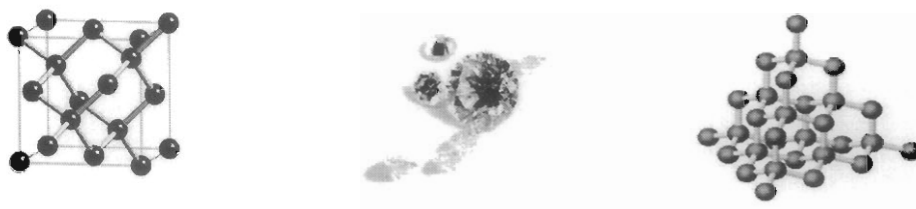
ภาพที่ 2-4 สีของสีย้อมเมทิลออเรนจ์เมื่ออยู่ในรูปกรดและเบส (Yao, He, Xu, & Chen, 2011)

2.3 โครงสร้างของคาร์บอน (เจษฎา จันทรืฬา, 2551)

คาร์บอน เป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 ซึ่งมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมแบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ สามารถพบได้ในหลายรูปแบบโครงสร้างและแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลัก ๆ โดยใช้มิติเข้ามาอธิบาย ดังนี้

2.3.1 โครงสร้างแบบสามมิติ

โครงสร้างแบบสามมิติ อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) อิเล็กตรอนจัดเรียงแบบ sp^3 จึงทำให้โครงสร้างที่แข็งแรงที่สุดโดยทั่วไปพบในรูปของเพชร ซึ่งเป็นอัญมณีราคาแพง นอกจากนี้เครื่องประดับนิยมนำไปทำเป็นหัวคัตและเจาะ แสดงดังภาพที่ 2-5

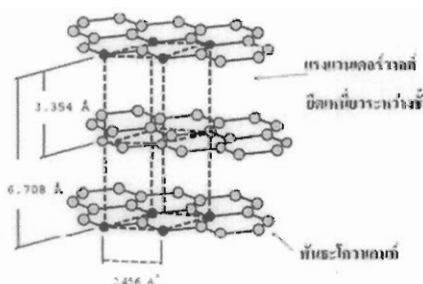
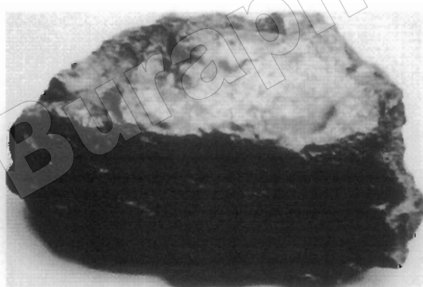


ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของเพชร

(<http://fixedreference.org/2006-Wikipedia-CD-Selection/wp/d/Diamond.htm>)

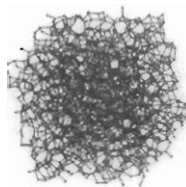
2.3.2 โครงสร้างแบบสองมิติ

โครงสร้างแบบสองมิติ มีลักษณะเป็นระนาบวางซ้อนกัน ในระนาบเดียวกันคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนอีกสามตัวด้วยพันธะโคเวเลนต์ ส่วนอีกหนึ่งพันธะที่เหลือของคาร์บอนจะยึดกับระนาบระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่าพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งก็คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นระหว่างชั้นจะมีการยึดเกาะกันอย่างหลวม ๆ ส่งผลให้แต่ละชั้นสามารถเลื่อนไหลไปมาได้ โครงสร้างแบบนี้จะพบในโครงสร้างของแกรไฟต์ (Graphite) แสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของแกรไฟต์ (<http://www.ponglearning.com/?p=1473>)

ซี่ถ้าหรือถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์ แต่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) แสดงดังภาพที่ 2-7

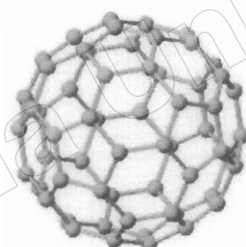


ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของแกรไฟต์ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ

(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amorphous_Carbon.png)

2.3.3 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

มีโครงสร้างเป็นก้อนเล็กซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) โดยแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ได้เป็นรูปทรงกลมคล้าย ๆ ลูกบอสนาคีวจนอาจถือได้ว่าเป็นจุดศูนย์มิติ เรียกว่า ฟูลเลอร์ีนแสดงดังภาพที่ 2-8

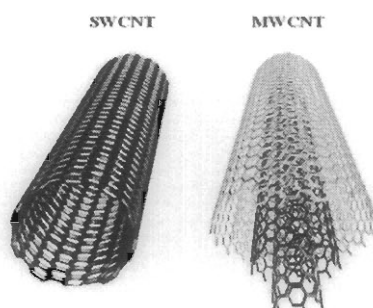


ภาพที่ 2-8 โครงสร้างจำลองของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})

(<http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>)

2.3.4 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากจนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ ซึ่งเรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) แสดงดังภาพที่ 2-9

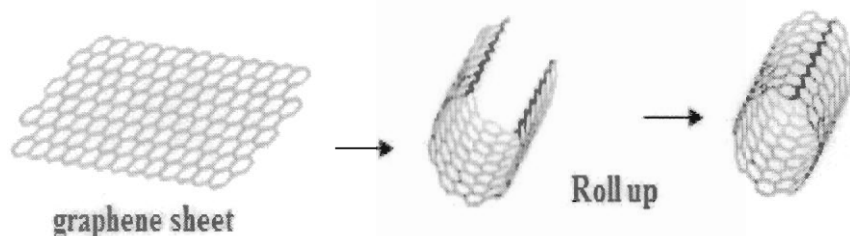


ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

(<http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites>)

2.4 ท่อนาโนคาร์บอน (เจษฎา จันทรธา, 2551)

ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนต่อกันเป็นท่อกว้างยาวและมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ในแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยวงแหวนรูปหกเหลี่ยมที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ในปี ค.ศ.1991 นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นชื่อ ดร.ซูมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ได้เผยแพร่งานตีพิมพ์เกี่ยวกับการค้นพบท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นและได้ค้นพบและศึกษาสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ซึ่งพบว่ามีสมบัติที่ดีหลายประการและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อ แสดงดังภาพที่ 2-10 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาเมตร โดยที่อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมต่อกันแบบ sp^2 และมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (Cylindrical shape) ลักษณะต่างกับฟูลเลอรีน ที่มีโครงสร้างเป็นทรงกลม (Spherical shape) ต่อมาได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว



ภาพที่ 2-10 ลักษณะการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์เป็นของท่อนาโนคาร์บอน

(<http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>)

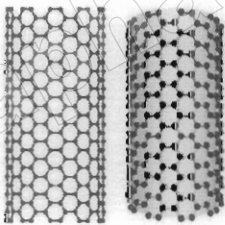
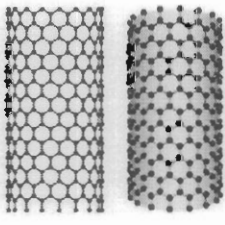
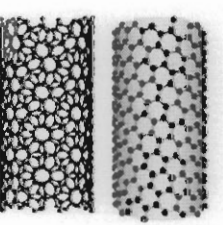
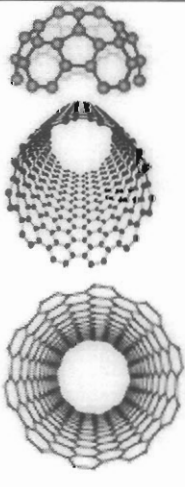
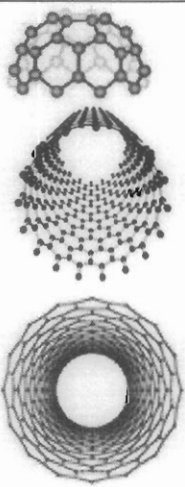
2.4.1 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน

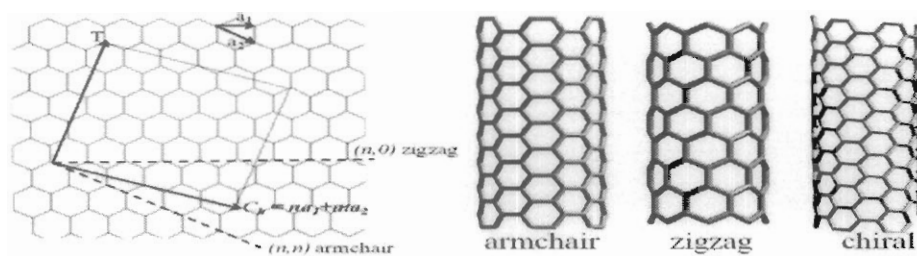
ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสามารถสังเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWCNTs)

โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว มีลักษณะเป็นท่อกว้าง ซึ่งเหมือนกับการม้วนแผ่นแกรไฟต์ ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นมีขนาด 0.4-2 นาโนเมตร และมีความเป็นผลึกสูง หรือมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ โดยโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวนั้นยังสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ชนิดหลัก ๆ แสดงดังตารางที่ 2-1 โดยแต่ละรูปแบบของโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากลักษณะการม้วนด้วยมุมที่ต่างกันและการระบุ Chiral indices ที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 2-11

ตาราง 2-1 รูปแบบโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว

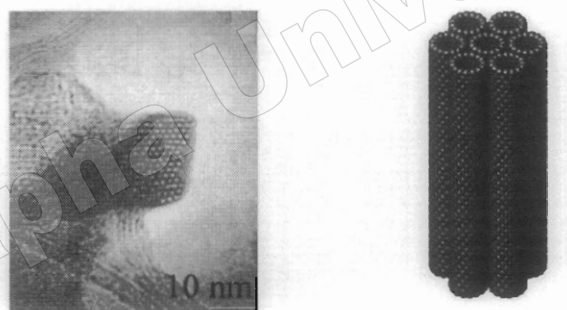
TYPE	Armchair	Zig-zag	Chiral
Chiral indices, (n, m)	(n, n)	(n, 0)	(n, m)
Side view perspective all atoms visible			
View down tube perspective			



ภาพที่ 2-11 ลักษณะการม้วนด้วยมุมที่ต่างกันก็จะได้ผลตามผนังท่อที่ต่างกัน

(<http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites>)

ส่วนใหญ่การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว เตรียมจากวิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) จะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวแบบเป็นมัดของท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 2-12



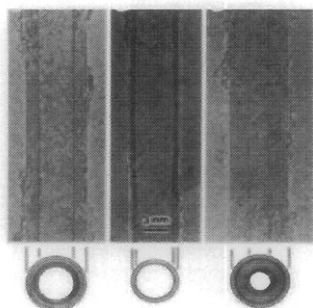
ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างภาพตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอนที่รวมกันเป็นมัดของท่อนาโนคาร์บอน

(Bundle of carbon nanotubes)

(<http://pubs.acs.org/subscribe/archive/ci/30/i10/html/10fischF2.html>)

2. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes: MWCNTs)

คือท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันอยู่หลายชั้น ซึ่งผนังท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 ถึง 0.36 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีขนาดประมาณ 1.5 ถึง 15 นาโนเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดประมาณ 2.5 ถึง 30 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ภาพตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

(http://idol.union.edu/malekis/ESC24/KoskywebModules/sa_nano.htm)

2.5 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน (เจษฎา จันทร์ผา, 2551)

สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างรังแหด้ายขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ อยู่ในระดับนาโนเมตร ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตรและมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีสมบัติที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบาและมีค่าความหนาแน่น 1.33 - 1.40 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ถึงสองเท่าซึ่งเป็นสมบัติที่พิเศษของท่อนาโนคาร์บอน

2.6 จลนศาสตร์การดูดซับ (อุทัย ทิพย์โพธิ์เมือง, 2555)

การศึกษากลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม อาศัยแบบจำลองจลนศาสตร์ 3 แบบ ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ แบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order-kinetic-model) และแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order-kinetic-model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวและแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion model) ซึ่งมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับและใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับสีย้อม

2.6.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่บนผิวของตัวดูดซับ (q_t) กับ ระยะเวลา (t) ของการดูดซับใด ๆ ดังนี้

$$q_t = q_c (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2-1)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ต่อนาที)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_c คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อจัดสมการที่ (2-1) ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นตรงในรูปลอการิทึม จะได้

$$\ln(q_c - q_t) = \ln q_c - k_1 t \quad (2-2)$$

หรือเขียนในรูปของ log ได้ดังนี้

$$\log(q_c - q_t) = \log q_c - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2-3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_c - q_t)$ กับ t จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ $-\frac{k_1}{2.303}$ และค่าตัดแกน y เท่ากับ $\log q_c$

2.6.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่บนผิวของตัวดูดซับ (q_t) กับระยะเวลาของการดูดซับ (t) ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{1}{q_c} t \quad (2-4)$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (กรัม นาทีต่อ มิลลิกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่มีความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{q_c}$ และค่าตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{k_2 q_c^2}$

2.6.3 การแพร่ภายในอนุภาค (สราวุธ ศรีคุณ 2550)

จลนศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่ผิวแล้ว อาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในอนุภาคด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในอนุภาคจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม สมการการแพร่ภายในอนุภาคของเวเบอร์และมอริส (Weber and Morris) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_t t^{1/2} + C \quad (2-5)$$

โดยที่ k_t คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับเนื่องมาจากการแพร่ภายในอนุภาค (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที^{1/2}) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k_t และค่าตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของผิวรอยต่อ (Boundary thickness) ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของผิวรอยต่อยิ่งมาก

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสำคัญมากในการอธิบายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายและจะอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นรูปแบบในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเทมกิน

2.7.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) (Chen et al., 2010)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ การดูดซับของโมเลกุลบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยพื้นผิวของตัวดูดซับจะประกอบไปด้วยแต่ละตำแหน่งที่ว่างที่สามารถดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุล ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2-6)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ หรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_{\max}$ คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดที่เกิดขึ้นเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) ของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือ ในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถจัดสมการ (2-6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2-7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_{\max}}$ และมีค่าตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{K_L q_{\max}}$

นอกจากนี้ลักษณะสำคัญของการดูดซับของไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถแสดงได้ในรูปของ R_L หาก $R_L > 1$ หมายถึง unfavorable adsorption, $0 < R_L < 1$ หมายถึง favorable adsorption, $R_L = 0$ หมายถึง irreversible adsorption, $R_L = 1$ หมายถึง linear adsorption ค่า R_L แสดงได้ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (2-8)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_L เป็นค่าคงที่ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.7.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช อยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับเกิดบนพื้นผิวแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous surfaces) ความสามารถในการดูดซับเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวถูกดูดซับ สมการแสดงดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2-9)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

ซึ่งสามารถแสดงสมการเชิงเส้นตรงในรูปล็อกการิทึมได้ดังนี้

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2-10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และค่าตัดแกน y เท่ากับ $\ln K_F$

2.7.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเทมคิน (Temkin adsorption isotherm)

ซึ่งถูกพัฒนาจากกระบวนการที่การเปลี่ยนแปลงของความร้อนในการดูดซับที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง สมการแสดงดังนี้ (Chen et al. (2010))

$$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e \quad (2-11)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ หรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

B_T คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ

K_T คือ ค่าคงที่ของเทมคิน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

R คือค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q_e กับ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ B_T และค่าตัดแกน y เท่ากับ $B_T \ln K_T$

ข้อดีและข้อเสียของแต่ละไอโซเทอร์มทั้ง 3 รูปแบบแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มชนิดต่าง ๆ (จุฑพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

ชนิดไอโซเทอร์ม	ข้อดี	ข้อเสีย
ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	เป็นไอโซเทอร์มที่ดีที่สุดเหมาะกับตัวแปรเดียว	ไม่สนใจแรงกระทำระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับข้าง ๆ
ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช	เหมาะกับ low coverage	ไม่สนใจสภาวะกายภาพที่พื้นผิว
ไอโซเทอร์มแบบเทมกิน	มีการพิจารณาแรงกระทำระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ	ไม่พิจารณาว่าชั้นของตัวถูกดูดซับจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไร

2.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (อุทัย ทิพย์โพธิ์เมือง, 2555)

เมื่อพิจารณาตามหลักอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) กระบวนการการดูดซับเป็นการศึกษาที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุด โดยทั่วไปจุดสิ้นสุดคือ จุดที่เกิดสมดุล และพบว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ทั้งการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปเกาะติดผิวของตัวดูดซับและการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับ โดยทั้งสองกระบวนการมีอัตราในการเคลื่อนที่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการดูดซับเท่ากับศูนย์ที่สถานะสมดุล สมดุลของการดูดซับเป็นสมดุลเคมีประเภทหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการรวมกันระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง โดยตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปเกาะติดกับผิวของตัวดูดซับจนมีความเข้มข้นสมดุลกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ ดังนั้นโดยทั่วไปพลังงานอิสระของระบบที่เกิดการดูดซับแล้วจึงต่ำกว่าผลรวมพลังงานอิสระของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับก่อนเกิดการดูดซับหรือการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกระบวนการดูดซับมีค่า $\Delta G < 0$

โดยทั่วไปก่อนเกิดการดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระและอาจเกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับด้วยตนเอง นั้นหมายความว่าระบบจะเป็นระบบที่เข้าสู่ความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นทำให้มีค่าเอนโทรปี (S) ของระบบก่อนการดูดซับมากขึ้น แต่เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับก็จะเกิดการตรึงอยู่กับที่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ

นั่นหมายความว่าระบบจะเป็นระบบที่เข้าสู่ความเป็นระเบียบมากขึ้น ดังนั้นแนวโน้มของค่าเอนโทรปี (S) ของระบบหลังการดูดซับมีค่าลดลง เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของกระบวนการดูดซับ มีค่า $\Delta S < 0$ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระบวนการดูดซับ นำไปสู่ค่า $\Delta H < 0$ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2-12)$$

โดย ΔG และ ΔG° มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q \quad (2-13)$$

เมื่อ R ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน)

T อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

ΔG° การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน

Q สัดส่วนของปฏิกิริยา (Reaction quotient) ได้จากอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสปีชีส์ต่าง ๆ แสดงดังสมการ



$$Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad \text{และ} \quad K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล Q จะมีค่าคงที่เรียกว่าค่าคงที่สมดุล (K) หรือ $Q = K$ และ $\Delta G = 0$ เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$0 = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (2-14)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2-15)$$

ดังนั้น

$$RT \ln K = T\Delta S^\circ - \Delta H^\circ \quad (2-16)$$

$$\ln K = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (2-17)$$

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการการดูดซับคำนวณโดยอาศัยพื้นฐานของค่าคงที่สมดุลที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอร์ม เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$ (K^{-1}) ได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\Delta H^\circ/R$ และค่าตัดแกน y เท่ากับ $\Delta S^\circ/R$ (Yao, He, Xu & Cheng, 2011) ดังนั้นสามารถหาค่า ΔG° ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ΔS° และ ΔH° นอกจากนี้ค่า ΔH° นำมาใช้ทำนายชนิดของปฏิกิริยาหรือการดูดซับและ ΔG° ทำนายการเกิดปฏิกิริยาหรือการดูดซับ ได้ดังนี้

ΔH° เป็นบวก เป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อนที่สภาวะมาตรฐาน

ΔH° เป็นลบ เป็นกระบวนการดูดซับแบบคายความร้อนที่สภาวะมาตรฐาน

ΔG° เป็นลบ เป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้เองที่สภาวะมาตรฐาน

ΔG° เป็นบวก เป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเองไม่ได้ที่สภาวะมาตรฐาน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yao et al. (2011) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ในสารละลายบนฟองนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นที่เตรียมได้จากวิธีการตกตะกอนไอเคมีโดยใช้คาร์บอนจากแก๊สอะเซทิลีนที่เกิดการแตกออกและอนุภาคนาโนของเหล็กถูกฝังเข้าไปใน mesoporous silica ซึ่งเตรียมได้จากการผสมระหว่างสารละลายไฮดรอกไซด์ในเตรดและเตตระเอทอกซีไซเลนในระบบ sol-gel ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิ พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมศึกษาในรายละเอียด การศึกษาสมดุลของการดูดซับสีย้อมโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองของไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับ 3 รูปแบบ ได้แก่ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ฟรุนดลิชและเทมคิน ปรากฏว่าสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือนและปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน เพื่อศึกษาอันดับของจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมและเปรียบเทียบกับแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคเพื่ออธิบายกลไกของการดูดซับสีย้อมพบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมโดยคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) เป็นลบที่ทุกอุณหภูมิ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี

(ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) เท่ากับ 19.39 กิโลจูลต่อโมล และ 0.1005 กิโลจูลต่อโมลต่อเคลวิน ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์เป็นกระบวนการแบบดูดพลังงานที่สามารถเกิดขึ้นเองได้

Yao et al. (2010) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมมูลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่เตรียมได้จากวิธีการตกตะกอนไอเคมีโดยใช้คาร์บอนจากแก๊สอะเซทิลีนที่เกิดการแตกออกและอนุภาคนาโนของเหล็กถูกฝังเข้าไปใน mesoporous silica ซึ่งเตรียมได้จากการผสมระหว่างสารละลายไอร์ออนในเตรตและเตตระเอทอกซีไฮดรอกซีในระบบ sol-gel ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สมมูลการดูดซับวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมศึกษาโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน ปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนและแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค ผลการศึกษาพบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน พลังงานกระตุ้นของการดูดซับ (E_a) ที่คำนวณได้เท่ากับ 18.54 กิโลจูลต่อโมล ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) ที่สภาวะมาตรฐาน คำนวณโดยใช้ค่าคงที่สมมูลการดูดซับที่ได้จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เป็นลบที่ทุกอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีและการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 7.29 กิโลจูลต่อโมลและ 64.6 จูลต่อโมลต่อเคลวิน ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นกระบวนการแบบดูดพลังงานที่สามารถเกิดขึ้นเองได้

Yao et al. (2010) ศึกษาความเป็นไปได้ของการกำจัดสีย้อมสองชนิด ได้แก่ เมทิลไวโอเลตและเมทิลีนบลูในสารละลายโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวดูดซับ ในการทดลองศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน พีเอช และระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับของสีย้อมบนท่อนาโนคาร์บอน พบว่า ปริมาณสีย้อมที่ดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณหรือความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลง เมื่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับสีย้อมแคโทไอออนิก (ละลายน้ำแล้วมีประจุเป็น

บวก) ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบของพื้นผิวตัวดูดซับท่อนาโนคาร์บอนและประจุบวกของสีย้อมแคโทไอออนิก จลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลไวโอเลตและเมทิลีนบลูบนท่อนาโนคาร์บอน สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.99 นอกจากนี้สมมูลการดูดซับจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอรั่มของแลงเมียร์ เป็นอย่างดี อาจเนื่องจากการกระจายที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีลักษณะเหมือนกัน (Homogeneous) ของทุกตำแหน่งที่ว่องไวบนพื้นผิวของตัวดูดซับท่อนาโนคาร์บอน

Zhao et al. (2013) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ในสารละลายบนท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นโดยใช้การกวนแบบแบทช์ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วในการกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและมวลของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น วิเคราะห์ในรายละเอียด ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นและการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้การกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์จากสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเพิ่มขึ้น จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์บนท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเป็นอย่างดี

Wang et al. (2012) ศึกษาการกำจัดสีย้อมแคโทไอออนิก (เมทิลีนบลู, MB) และสีย้อมแอซิด (acid red 183, AR183) ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายในระบบที่มีสีย้อมเดี่ยว ๆ และระบบที่มีการผสมกันของสีย้อมทั้งสองชนิด โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเป็นตัวดูดซับ การพิสูจน์ทราบของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นและระบบท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นกับสีย้อมวิเคราะห์ใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น FTIR, TG-DTA, zeta potential และ elemental analysis จากการทดลองพบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นสามารถดูดซับสีย้อม MB ได้มากกว่า AR183 ทั้งในระบบสีย้อมเดี่ยวและระบบการผสมของสีย้อมทั้งสองซึ่งแสดงให้เห็นอันตรกิริยาประเภท π - π stacking เป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญสำหรับอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ในระบบการศึกษาสีย้อมเดี่ยว ๆ พบว่าปริมาณการดูดซับสูงสุดของ MB และ AR183 มีค่า 59.7 และ 45.2 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ในระบบการศึกษาการ

ผสมกันของสีย้อม อิทธิพลการเสริมกันอันเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electronic attraction) ระหว่างสีย้อม MB และ AR183 เกิดขึ้นที่ความเข้มข้น AR183 ต่ำ ๆ (10 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะช่วยเสริมการดูดซับของสีย้อมทั้งสองบนท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับสีย้อม MB ลดลงที่ความเข้มข้น AR183 สูง ๆ (มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นกับ AR183 แข็งแรงขึ้น จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนทั้งในระบบสีย้อมเดี่ยว ๆ และระบบการผสมกันของสีย้อมทั้งสอง สมดุลของการดูดซับสีย้อมวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สำหรับระบบสีย้อมเดี่ยว ๆ ทั้งสองชนิด

Wang, Huang and Zhang (2013) ศึกษาการเตรียม viscose-activated carbon fibers (ACFs) โดยวิธีการตกเคลือบสะสมไอสารเคมี (CVD) และการพิสูจน์ทราบของ ACFs ใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ, SEM , การกระจายของขนาดของโพรงและ FTIR การศึกษาพฤติกรรมของ ACFs ในการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจิ้น สารละลายทำการทดลองแบบแบทช์ จากผลการศึกษาพบว่าสมดุลการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน กระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับแบบจำลอง การแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) แต่แบบจำลองดังกล่าวไม่ได้เป็นขั้นกำหนดหรือควบคุมอัตราของจลนศาสตร์ของการดูดซับเพียงอย่างเดียว พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) ที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับของสีย้อมเมทิลออเรนจิ้นบน ACFs เป็นแบบคายพลังงานที่สามารถเกิดขึ้นเองได้และเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากผลของ FTIR แสดงให้เห็นกลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจิ้นบน ACFs ที่สำคัญคือพันธะไฮโดรเจน

Ai et al. (2011) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมแคโทไดอนิกเมทิลีนบลูจากสารละลายโดย magnetite-loaded multi-walled carbon nanotubes (M-MWCNTs) ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธีการ one-pot solvothermal การพิสูจน์ทราบโครงสร้างของ M-MWCNTs ที่สังเคราะห์ใช้เทคนิคหลายอย่างเช่น XRD, SEM, FTIR ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและพีเอชศึกษาในรายละเอียด พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง เสมือนและสมดุลการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอรัมของแลงเมียร์โดยมีปริมาณ การดูดซับขั้นเดียวสูงสุดเท่ากับ 48.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ข้อมูลของ FTIR แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับอาจเป็นไปได้ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic attraction) และอันตรกิริยาประเภท π - π stacking interactions ที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลูกับ M-MWCNTs

Li et al. (2013) ศึกษาการเปรียบเทียบวัสดุคาร์บอนสามชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ แกรฟีนออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยวัสดุทั้งสามชนิดถูกออกซิไดส์ภายใต้สภาวะเดียวกันโดยสารละลายกรดไนตริกเพื่อเติมหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และเพิ่มสมบัติที่ชอบน้ำของพื้นผิวของคาร์บอนและใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู การพิสูจน์ทราบของตัวดูดซับใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ ไอโซเทอรัมของการดูดซับและการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจน, IR spectroscopy, ขนาดอนุภาคและการวัดค่า zeta potential การทดลองการดูดซับแบบแบทช์กระทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของพีเอชของสารละลายและระยะเวลาสัมผัสในการศึกษาสมบัติการดูดซับสีย้อม การศึกษาพบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนและการวิเคราะห์สมดุลการดูดซับสีย้อมพบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอรัมของแลงเมียร์โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์, แกรฟีนออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเท่ากับ 270.27, 243.90 และ 188.68 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับของสีย้อมที่แข็งแรงซึ่งวิเคราะห์โดยการหา BET-surface area ของแกรฟีนออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอน อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากอันตรกิริยา π - π electron donor acceptor และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างระหว่างประจุบวกของสีย้อมและประจุลบของตัวดูดซับ