

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ [8, 10, 13, 14, 15]

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass transfer) มาสะสม (Accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของตัวที่ทำหน้าที่ดูดซับซึ่งเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่เคลื่อนย้ายมาเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์ดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิว เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง

2.1.1 ประเภทของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับโดยมากเป็นวัสดุที่มีรูพรุน การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวภายในช่องว่างของรูพรุน ซึ่งเราอาจจำแนกประเภทของตัวดูดซับได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ แอคติเวตเต็ดซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทนี้มีข้อจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้ความพรุนมากและพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ 450 – 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10 – 10,000 อังสตรอม
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ แต่เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่าคือ สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก

สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยทั่วไปการที่ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า หมายถึง การมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวนั้นต้องมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมด้วย โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ จึงจะทำให้เกิดการดูดซับที่ดีได้

2.1.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

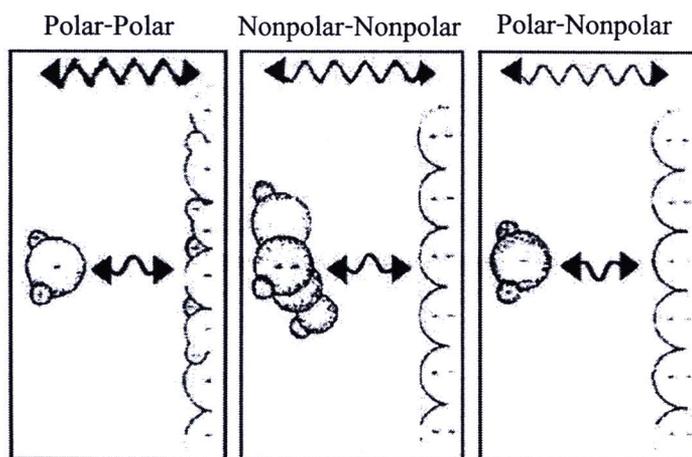
1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ และไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ เป็นกระบวนการคายความร้อน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำและดูดติดกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สำหรับแรงที่ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

แรงแวนเดอวาล์ (Van der Waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้

แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้ เกิดจากผล 3 อย่าง ดังนี้

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar - polar molecule) เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ตัวอย่างของการดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว คือการดูดซับไอน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วออกจากกระแสน้ำอากาศโดยใช้ซิลิกาเจลซึ่งเป็นของแข็งดูดซับที่มีขั้ว
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar - nonpolar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรียสารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรียสารส่วนใหญ่ จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Polar - nonpolar molecule) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วสามารถเหนี่ยวนำหรือทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดมีขั้วขึ้นเมื่ออยู่ใกล้กัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

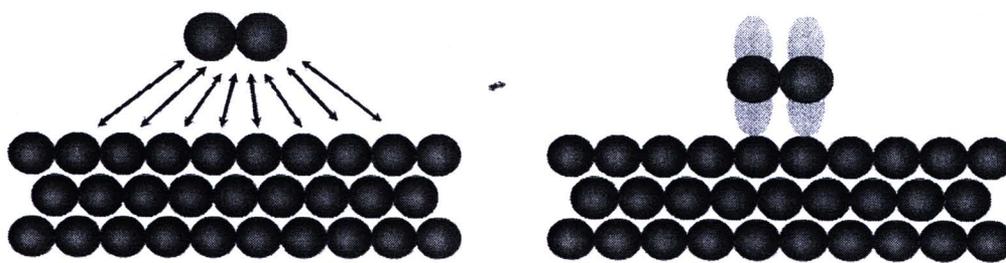
อย่างไรก็ตามแรงเหนี่ยวนำนี้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของแรงจากการจัดเรียงตัวและจากการแพร่กระจาย



ผลของการจัดเรียง ผลของการแพร่กระจายผลของการเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.1 การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขั้วไม่มีขั้วของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [8]

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้นต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ และแรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมีจะจะมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงดูดซับทางกายภาพ



ก. การดูดซับทางกายภาพ

ข. การดูดซับทางเคมี

รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [8]

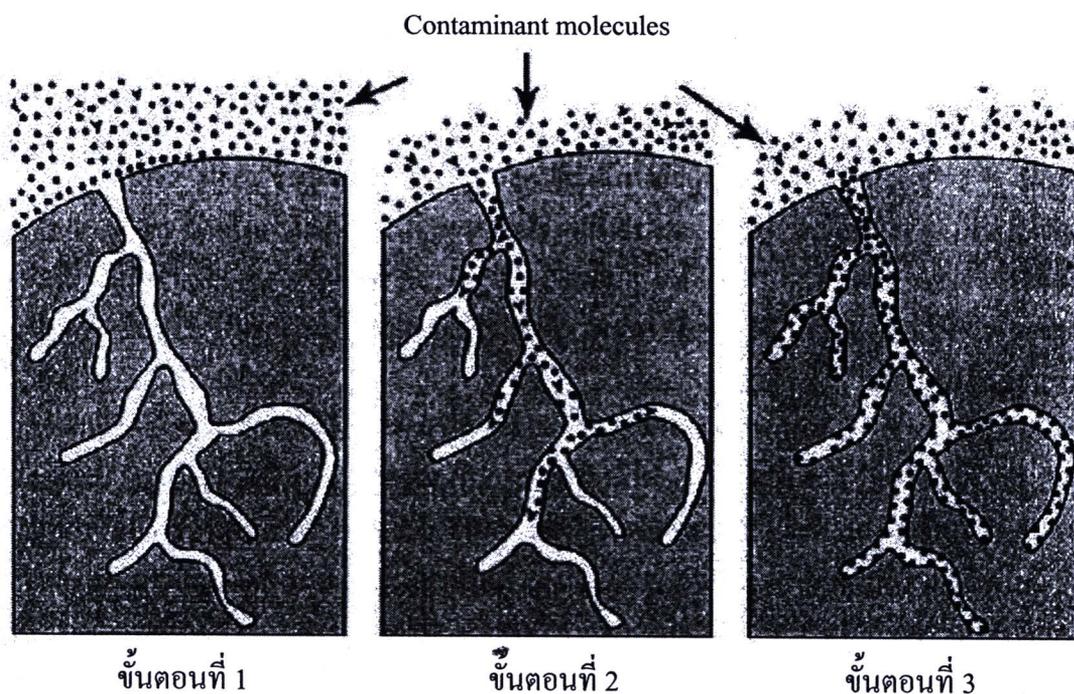
ตารางที่ 2.1 สรุปความต่างระหว่างการการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption)	ไม่เกิน 40 kJ mol^{-1}	ไม่เกิน 40 kJ mol^{-1}
โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับ	ไม่ทำให้โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง	โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง
ชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ	มีการดูดซับได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ	เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียวของโมเลกุล
สภาวะอุณหภูมิ	เกิดขึ้นได้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ	เกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ
พลังงานในการเข้าสู่สมดุล	สมดุลจะเกิดอย่างรวดเร็วและไม่ต้องการพลังงานใดๆมาช่วยยกเว้นการดูดซับภายในรูเล็กๆ (Micropore)	พลังงานอาจมีส่วนช่วยปฏิกิริยา
ปริมาณการถูกดูดซับ	ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวถูกดูดซับมากกว่าตัวดูดซับ	ขึ้นอยู่กับสมบัติของผิวของตัวดูดซับเป็นหลัก
ความดันต่ออัตราการดูดซับ	อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น	อัตราการดูดซับจะลดลงในขณะที่ความดันเพิ่ม
การผันกลับได้ของปฏิกิริยา	ผันกลับได้อย่างสมบูรณ์	ไม่สามารถผันกลับได้
ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ	ไม่จำกัดเฉพาะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแต่คลุมไปบนผิวของตัวดูดซับทั้งหมด	จำกัดเฉพาะตำแหน่งใดตำแหน่ง หนึ่งบนผิวของตัวดูดซับ

2.1.3 การดูดซับแก๊สด้วยของแข็ง

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับแก๊สด้วยของแข็ง ซึ่งมีกลไกการดูดซับ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของความชื้นไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับความชื้น เมื่อโมเลกุลของความชื้นแพร่ถึงผิวของตัวดูดซับก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน การแพร่นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน ในช่วงแรกขณะที่รูพรุนมีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่โดยการแพร่แบบเป็นกลุ่มก้อน (Bulk diffusion) การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของความชื้น เมื่อขนาดของรูพรุนเล็กลงการเคลื่อนที่ก็จะเปลี่ยนเป็นการแพร่แบบผิว (Surface diffusion) การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนระหว่างโมเลกุลของความชื้นกับผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของความชื้นเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับความชื้น ซึ่งการดูดซับความชื้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนส่วนนี้
3. การดูดซับ (Adsorption) โมเลกุลของความชื้นจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับความชื้น โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ การดูดซับในขั้นตอนที่ 3 อาจจะถูกด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับความชื้นด้วยของแข็ง[8]

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ตัวถูกดูดซับจะสามารถเกาะติดหรือกระจายที่ผิวของตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และสภาวะในการดูดซับ ดังนี้

1. สมบัติของตัวดูดซับ

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับ ได้การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น
- ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับการลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่
- หมู่ฟังก์ชันเคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของ โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอเนตความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2. สมบัติของตัวถูกดูดซับ

- ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน
- น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

3. สภาวะในการดูดซับ

- อุณหภูมิของระบบ ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจากความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน และอุณหภูมิมิมีผลต่อค่าการ

ละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิดมีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

- ระยะเวลาที่ตัวถูกดูดซับสัมผัสกับตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น
- ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ หากพีเอชลดลงจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่พื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้นขึ้น

2.2 ความชื้น (Humidity) [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]

ความชื้นในอากาศเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการดำรงชีพของพืชและสัตว์รวมทั้งมนุษย์ เป็นอันมาก ปริมาณความชื้นในอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตามสภาพที่แวดล้อมและอุณหภูมิ สำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นมีสถิติเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในช่วงฤดูกาลต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของฤดูกาลต่างๆ ในประเทศไทย

ภาค	ฤดู			
	หนาว	ร้อน	ฝน	เฉลี่ยตลอดปี
เหนือ	73	62	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	65	80	72
กลาง	71	69	79	73
ตะวันออก	71	74	81	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	81	77	78	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	77	76	84	80



2.2.1 ปัญหาจากความชื้น

ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่มากเกินไปอาจมีผลเสียต่องานด้านอุตสาหกรรมและเกิดปัญหาต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์หลายด้าน เช่น

- อุตสาหกรรมยาและอาหารเสริม เมื่อยาอยู่ในอากาศที่มีความชื้นสูงจะทำให้ยาหมดอายุเร็ว และหากยานั้นบรรจุด้วยแคปซูลด้วยแล้วต้องระวังให้มาก เพราะว่าแคปซูลเมื่อสัมผัสกับความชื้นสูง ๆ ผิวภายนอกจะเริ่มละลายเป็นยางเหนียว
- อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์หนัง เนื่องจากหนังเมื่อได้รับความชื้นจะทำให้เสียรูปทรง และเกิดเชื้อราได้ง่ายทำให้หนังเป็นรอยจุดสีดำ
- อุตสาหกรรมอาหาร อาหารบางอย่างต้องการรักษาสภาพความกรอบหากได้รับความชื้นสัมพัทธ์สูงก็จะสูญเสียไป อาหารหรือขนมบางชนิดเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นจะเกิดเชื้อราทำให้อายุของอาหารสั้นลงและเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค
- อุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับโลหะ เนื่องจากโลหะหลายชนิดเมื่อโดนความชื้นจะทำให้เกิดสนิม ทั้งสนิมแดงหรือสนิมเขียวก็เกิดจากความชื้นทั้งสิ้น
- อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการขนส่งและบรรจุภัณฑ์ การขนส่งในแต่ละครั้งต้องรักษาสภาพของสินค้าให้อยู่ในสภาพเดิม หากสินค้าได้รับความเสียหายจากความชื้น ผู้ขนส่งอาจจะต้องชดเชยค่าเสียหายแก่ผู้ผลิตสินค้าซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่ควรเกิดขึ้น
- ปัญหาความชื้นภายในครัวเรือน ทำให้เกิดเชื้อรา เช่น อุปกรณ์ถ่ายภาพ เลนส์ กระจกเอกสารที่สำคัญ ของสะสม สร้อย แหวน นาฬิกา ค้ำไม้กอล์ฟ หรือของมีค่า อื่น ๆ เช่น เสื้อหนัง รองเท้าหนัง อุปกรณ์ว่ายน้ำ คำน้ำ ๆ ทำให้เกิดกลิ่นอับ เช่น ในห้องนอน ตู้เสื้อผ้า ตู้รองเท้า ในรถยนต์ ตู้เก็บของ ตู้เซฟ ๆ ทำให้เกิดสนิม ความชื้นจะทำให้เกิดสนิมในเครื่องมือเครื่องใช้ในอุปกรณ์ที่เป็นโลหะ เช่น ปืน เครื่องประดับ เครื่องครัว

2.2.2 ความชื้นในบรรยากาศ (Atmospheric humidity)

ความชื้นในอากาศจะอยู่ในรูปของไอน้ำ โดยเป็นไอน้ำที่ผสมกับอากาศแห้งในอากาศปกติ ไอน้ำนี้เป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheat steam) ซึ่งมีความดันต่ำมาก อากาศจะสามารถอมความชื้นได้ในปริมาณมากเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง และความสามารถอมความชื้นของอากาศจะลดลงเมื่ออากาศมีอุณหภูมิต่ำ ปริมาณความชื้นในอากาศสามารถวัดได้หลายทาง ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ที่จะนำไปใช้ การวัดปริมาณความชื้นในอากาศสามารถแยกออกได้เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity : %RH) คือค่าความชื้นในบรรยากาศ โดยคิดเป็นสัดส่วนเทียบระหว่างมวลจริงของไอน้ำของอากาศขณะนั้น กับมวลของไอน้ำในอากาศขณะที่เกิดการอิ่มตัว

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่ 8 ส.ย. 2555	
เลขทะเบียน.....	246955
เลขเรียกหนังสือ.....	

(ปริมาณความชื้นสูงสุด) ณ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความดันบรรยากาศเดียวกัน หรืออัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไออิ่มตัวภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์จะไม่แปรผันไปตามค่าความชื้นจำเพาะ ถึงแม้ว่าอัตราส่วนความชื้นในอากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ยังคงรักษาค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้สามารถคงที่อยู่ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ค่าความชื้นสัมพัทธ์สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\%RH = \left(\frac{m_v}{m_s} \right) \times 100 = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \times 100$$

เมื่อ %RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์, %
 m_v คือ มวลของไอน้ำในอากาศขณะนั้น, kg
 m_s คือ มวลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว, kg
 P_v คือ ความดันไอ, kPa
 P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัว, kPa

2. ความชื้นจำเพาะหรืออัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio or Specific humidity, ω) เป็นสัดส่วนของมวลของไอน้ำที่มีในอากาศขึ้นต่อมวลของส่วนเฉพาอากาศแห้ง ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศขึ้นนั้น โดยความชื้นจำเพาะในอากาศจะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากไม่มีการเพิ่มปริมาณความชื้นจำนวนใหม่ให้แก่อากาศ หรือไม่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศ

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{0.62197 P_v}{101.325 - P_v}$$

เมื่อ ω คือ ความชื้นจำเพาะหรืออัตราส่วนความชื้น, kg_{water}/kg_{dry air}
 m_v คือ น้ำหนักไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศขึ้น, kg_{water}
 m_a คือ น้ำหนักของอากาศแห้ง, kg_{dry air}

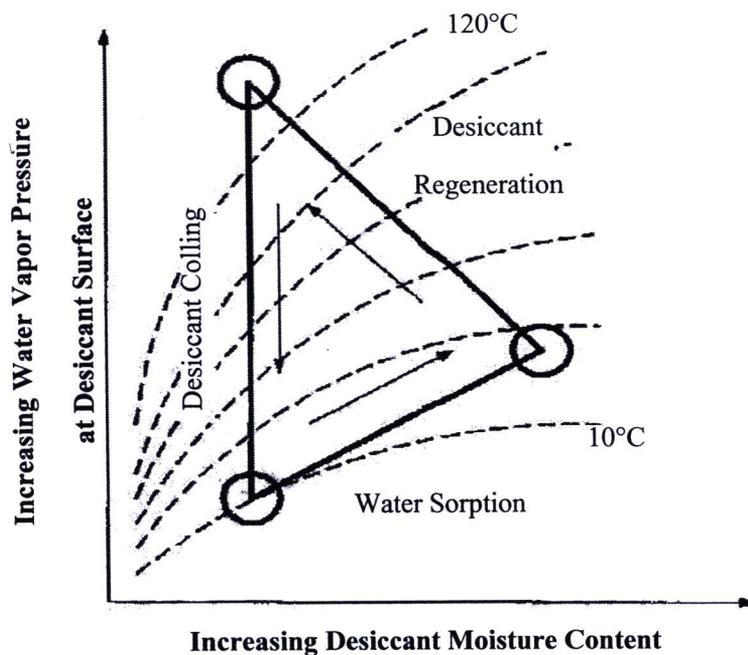
2.2.3 การลดความชื้นในอากาศ (Dehumidification)

การลดความชื้นในอากาศ สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. วิธีอุ่นอากาศให้ร้อน (Heating) การทำให้อากาศร้อนขึ้น สามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลง แต่ปริมาณน้ำในอากาศยังเท่าเดิม โดยวิธีการอุ่นอากาศให้ร้อนขึ้นนั้น สามารถลดค่าความชื้นได้ตามต้องการ แต่มีขีดจำกัดในการใช้งานคือ ความร้อนที่สูงขึ้นมากอาจไม่เหมาะกับวัสดุหรือสถานที่ และเนื่องจากปริมาณน้ำในอากาศไม่ได้ลดลง หากอุณหภูมิลดลงความชื้นสัมพัทธ์ก็เพิ่มมากขึ้นอีก

2. วิธีทำความเย็นเพื่อควบแน่น (Condensing) โดยทำให้อากาศเย็นลงถึงจุดอิ่มตัว ความชื้นในอากาศควบแน่นกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 100 %) แยกออกจากอากาศ ดังนั้นปริมาณน้ำในอากาศจึงลดลง จากนั้นจึงอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่ต้องการ ซึ่งวิธีนี้สามารถลดความชื้นได้ตามที่ต้องการเช่นกัน
3. วิธีดูดคายความชื้น (Sorption dehumidifying) ทำได้โดยการดูดความชื้นออกจากอากาศโดยตรง ดังนั้น ปริมาณน้ำในอากาศจึงลดลง และความชื้นสัมพัทธ์ลดลงด้วย

2.2.4 กลไกการดูดซับความชื้น



รูปที่ 2.4 วัฏจักรการดูด - คาย ความชื้นในตัวดูดซับ [12]

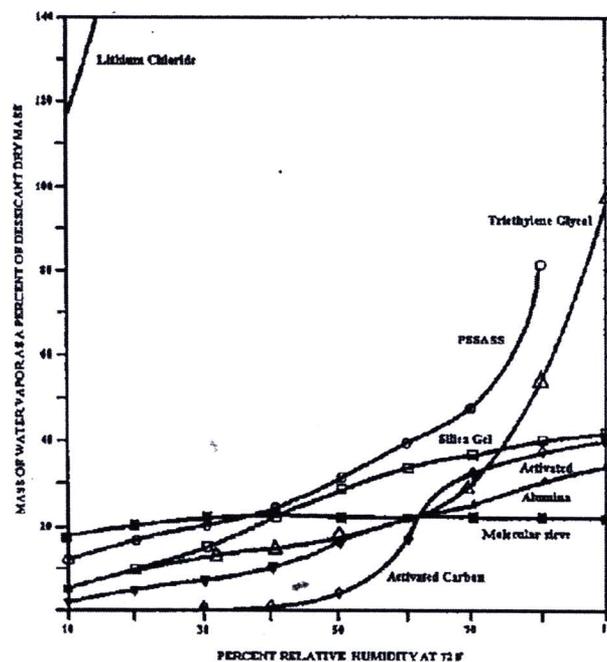
รูปที่ 2.4 แสดงวัฏจักรของตัวดูดซับความชื้น ซึ่งตัวดูดซับความชื้นแต่ละชนิดมีกลไกในการทำงานเหมือนกัน คือจะดูดความชื้นเมื่อความดันไอที่ผิวของตัวดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอในอากาศ และจะคายความชื้นเมื่อความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นสูงกว่าความดันไอในอากาศ ความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นของตัวดูดซับความชื้น โดยที่ความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับบนตัวดูดความชื้น และยังมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิอีกด้วย ในบางบริเวณจะพบว่าความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นมีค่าเท่ากับความดันไอในกระแสดอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มอุณหภูมิของตัวดูดซับความชื้นจะพบว่า ความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นมีค่าสูงขึ้นจนเกินค่าความดันไอในกระแสดอากาศรอบๆ ตัวดูดซับความชื้น ความชื้นจะถ่ายเทออกจากตัวดูดซับความชื้นไปสู่กระแสดอากาศ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) หลังจากการถ่ายเท

ความชื้นออกจากตัวดูดซับความชื้นแล้ว ต้องทำการลดอุณหภูมิตัวดูดซับความชื้นเพื่อทำให้ความดันไอที่ผิวของตัวดูดซับความชื้นลดลงจึงจะสามารถนำตัวดูดซับความชื้นกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง

2.2.4 วัสดุที่ใช้ดูดซับความชื้น

ตัวดูดซับความชื้นอาจจะเป็นวัสดุที่ทำจากของแข็งหรือของเหลวก็ได้ สำหรับตัวดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) ประกอบขึ้นจากวัสดุต่างชนิดกัน ความสามารถในการดูดซับความชื้นจึงต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง ในที่นี้จึงขอกกล่าวเฉพาะตัวดูดซับความชื้นชนิดของแข็งเท่านั้น

ตัวดูดซับความชื้นมีสมบัติดูดความชื้นจากอากาศได้โดยตรง บางชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวมันเอง เมื่อตัวดูดซับความชื้นดูดซับไอน้ำจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างน้ำและไอน้ำในกระแสอากาศโดยการคายความร้อนแฝง และยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ทำตัวดูดซับความชื้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 54.4 – 148.9 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ตัวดูดซับความชื้นสูญเสียความสามารถในการดูดซับความชื้นไป



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวลของไอน้ำกับความชื้นสัมพัทธ์ของตัวดูดซับแต่ละชนิด [12]

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของไอน้ำที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดกับความชื้นสัมพัทธ์ จะเห็นได้ว่า ซิลิกาเจล มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า อลูมินา และ

โมเลกุลาร์ซีฟ เนื่องจากที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ จะสามารถเกิดการกลั่นตัวของของเหลวภายในช่องว่างของรูพรุน โดยการกลั่นตัวแบบคาปิลลารี (Capillary condensation) ทำให้มีของเหลวอยู่ในช่องว่างของรูพรุน ปริมาณความชื้นที่ดูดซับได้จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของช่องว่างของรูพรุนไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของตัวดูดซับ แม้ว่าโมเลกุลาร์ซีฟจะสามารถดึงควบกับน้ำได้ดีกว่าซิลิกาเจล แต่ปริมาตรของรูพรุนมีค่าน้อยกว่าซิลิกาเจล

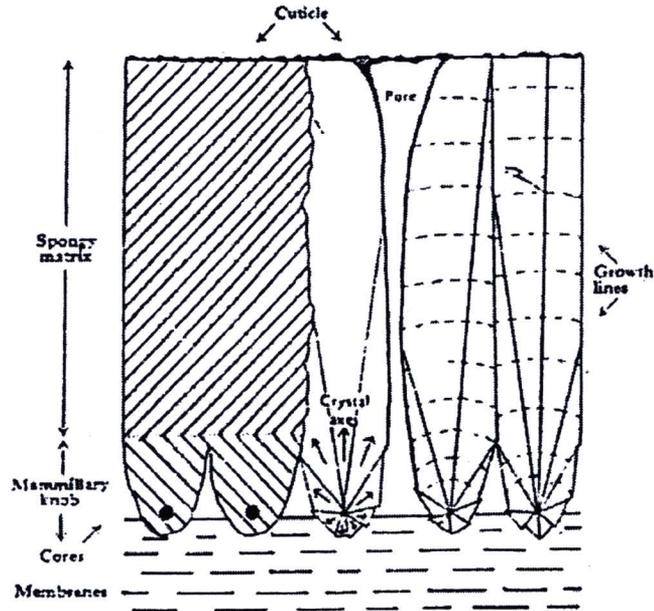
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุจากธรรมชาติที่เหลือทิ้งเป็นตั้ดูดซับความชื้น ซึ่งได้แก่ เปลือก ไข่ไก่ ไข่เป็ด หอยแครง และหอยแมลงภู่ เป็นตัวดูดซับความชื้น โดยวัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : CaCO_3) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับความชื้น

1. เปลือกไข่ไก่และไข่เป็ด ตามธรรมชาติเปลือกไข่มีหน้าที่รองรับน้ำหนักของแม่ไก่ขณะกกฟักไข่ เป็นทางให้อากาศผ่านเข้าออก ป้องกันการกระทบกระเทือนและไม่ให้เชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าทำลายเชื้อลูกไก่ แต่ต้องโปร่งบางพอให้ลูกไก่เจาะออกไปได้ โดยไข่ทั้งฟองของสัตว์ปีกต่างๆ รวมทั้งเป็ด ไก่ มีองค์ประกอบและโครงสร้างเหมือนกัน แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ แต่สัดส่วนและปริมาณต่างกันตามขนาดและชนิดของสัตว์ปีก โดยไข่ไก่ฟองหนึ่งน้ำหนักเฉลี่ย 58 กรัม แบ่งเป็นไข่ขาว ไข่แดงและเปลือก เท่ากับ 32.9, 18.7 และ 6.4 กรัมต่อฟอง ตามลำดับ ไข่ขาวและไข่แดงนำไปใช้ประโยชน์ คิดเป็นร้อยละ 89 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง ส่วนเหลือทิ้งอีกร้อยละ 11 เป็นเปลือกไข่ ที่ประกอบด้วยธาตุปูน คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ร้อยละ 94 แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ร้อยละ 1 แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ร้อยละ 1 และอินทรีย์สาร ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเปลือกแห้ง ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์เปลือกไข่ต่อฟองโดยประมาณมีดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบของเปลือกไข่

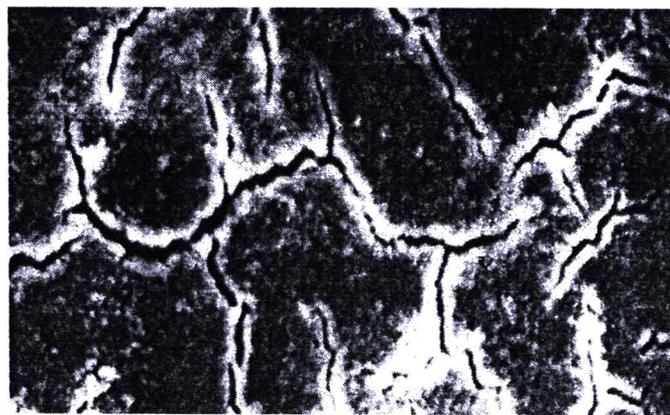
องค์ประกอบ	กรัม	ร้อยละ
น้ำ	0.1	1.6
วัตถุแห้ง	6.0	98.4
• อินทรีย์วัตถุ	0.2	3.3
- โปรตีน	0.2	3.3
- ไขมัน	น้อยมาก	0.03
• อนินทรีย์วัตถุ	5.8	95.1
รวม	6.1	100

เมื่อขยายภาพเปลือกไข่ ทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างไข่ ได้เป็นส่วนๆ จากด้านบนลงล่างคือ เคลือบผิวไข่ (Cuticle) เปลือกไข่ชั้นนอก (Spongy หรือ Palisade layer) เปลือกไข่ชั้นใน (Mammillary layer) และเยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภาคตัดขวางของเปลือกไข่ [10]

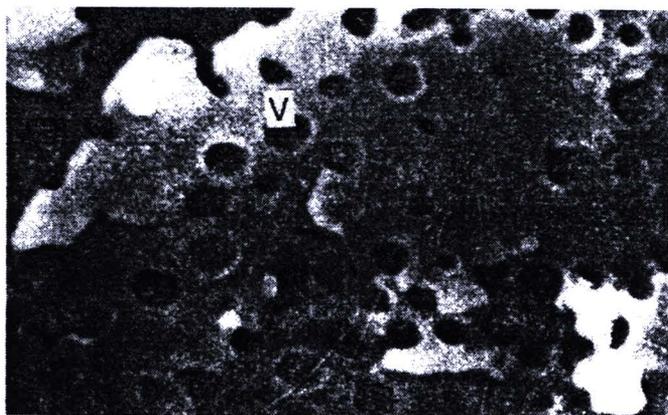
- ส่วนเคลือบผิวไข่ (cuticle) เป็นชั้นที่อยู่บนผิวนอกของเปลือกไข่ หนาประมาณ 0.5 - 12.8 ไมโครเมตร เมื่อขยายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน จะปรากฏรอยแยกจำนวนมากบนพื้นผิว (รูปที่ 2.18) เพราะเคลือบผิวไข่มีหน้าที่อุดรูพรุนที่ผิวด้านนอกป้องกันการสูญเสียน้ำและการบุกรุกของจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 85 - 87 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.5 - 4.4 ไขมันร้อยละ 2.5 - 3.5 และเถ้าร้อยละ 3.5 ทั้งหมดประกอบกันเป็นอินทรียสารทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.7 ภาพอิเล็กตรอนแบบสแกนของพื้นผิวด้านนอกของชั้นเคลือบผิวไข่ [10]

นอกจากนี้บนชั้นเคลือบผิวไขยังพบเม็ดสี (Pigment) ที่เกิดจากวัตถุสีของเม็ดเลือดแดง (Porphyrin) กระจายอยู่จำนวนมาก ซึ่งเม็ดสีเหล่านี้จะปะปนกับเกลือแคลเซียมและเยื่อเปลือกไขด้วย แต่ปริมาณการกระจายจะลดลงจากชั้นเคลือบผิวไขลงมาทำให้เปลือกไขชั้นนอกมีเม็ดสีมากกว่าเปลือกไขชั้นในและเยื่อเปลือกไข

- เปลือกไขชั้นนอก (Spongy layer) เป็นชั้นที่แคลเซียมคาร์บอเนตเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในรูปของผลึกแคลไซต์ (Calcite)



รูปที่ 2.8 ลักษณะรูพรุนแบบฟองน้ำของเปลือกไขชั้นนอก [10]

เปลือกไขชั้นนอกมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (รูปที่ 2.8) เพราะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ตั้งแต่ 7,000 - 17,000 รู ที่เชื่อมโยงจากผิวนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศโดยที่แต่ละบริเวณของเปลือกไขจะมีจำนวนรูต่อตารางเซนติเมตรไม่เท่ากัน คือ ด้านป้าน ด้านกลาง และด้านแหลม มีจำนวนรูเท่ากับ 125.6 , 106.1-113.4 และ 73.7 รูต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และขนาดของรูขนาดใหญ่ เท่ากับ 0.022-0.029 มิลลิเมตร รูขนาดเล็ก เท่ากับ 0.0038-0.0054 มิลลิเมตร

- เปลือกไขชั้นใน (Mammillary knob layer) เป็นปุ่มครึ่งทรงกลมของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต รูป 6 เหลี่ยม (Hexagonal plates) สูง 1/3 ของความหนาเปลือกไข
- เยื่อเปลือกไข (Shell membrane) เป็นชั้นบาง 2 ชั้นแนบติดกันโดยตลอด ยกเว้นด้านป้านของไขที่ถูกแยกกันด้วยช่องอากาศ (Air sac) หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร ประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันร้อยละ 95, 2 และ 3 ตามลำดับ (ไม่คิดปริมาณเก่า) หรือคิดรวมปริมาณเก่า ซึ่งประกอบด้วย ฟอสฟอรัส แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ทองแดง โบรอน และอลูมิเนียม อีกประมาณร้อยละ 2 โดยเยื่อเปลือกไขแต่ละชั้นประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนเคราติน อีลาสติน และคอลลาเจน เชื่อมต่อกัน แล้วถูกห่อหุ้มด้วยชั้น mucopolysaccharide หนาประมาณ 0.5 ไมโครเมตร แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชั้นคือ

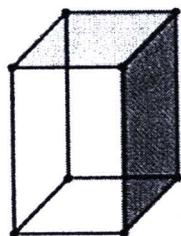
- เยื่อเปลือกไขชั้นนอก (Outer shell membranes) อยู่ติดกับส่วน true shell จึงมีเส้นใยบางส่วนยื่นเข้าไปในส่วนฐานของเปลือกไขชั้นใน แล้วรวมตัวเป็น mammillary core เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 3 ไมโครเมตร เฉลี่ย 1.3 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร
- เยื่อเปลือกไขชั้นใน (Inner shell membranes) มีผิวเรียบ บาง หนาประมาณ 2.7 ไมโครเมตร เส้นใยยาวมากกว่า 23 ไมโครเมตร เพราะปลายเส้นใยที่เรียวยาวแหลมสามารถซ้อนเกย (Overlap) รวมกับเส้นใยใกล้เคียงภายใต้ชั้นห่อหุ้มเดียวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 1.5 ไมโครเมตร เฉลี่ย 0.9 ไมโครเมตร เป็นชั้นที่แยกไขขาวออกจากส่วนของเปลือก เรียกว่า limiting membrane ทั้ง 2 ชั้นมีรูพรุนที่ผิวจำนวนมาก เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศ โดยเยื่อชั้นในมีรูพรุนมากกว่าเยื่อชั้นนอก

2. เปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่ หอยเป็นสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกา (Mollusca) สิ่งมีชีวิตไฟลัมนี้รวมเรียกว่า มอลลัส (Mollus) เป็นพวกที่มีลำตัวอ่อนนุ่ม มีเปลือกแข็งหุ้มภายนอก มีจำนวนมากอันดับสองรองจากแมลง พบทั่วไปทั้งบนบก ในน้ำเค็ม น้ำจืด และน้ำกร่อย ส่วนใหญ่ดำรงชีวิตเป็นอิสระ เคลื่อนที่และว่ายน้ำไปมาได้ บางชนิดยึดติดกับหิน ฟังตัวในดินและทราย ทั้งนี้การเติบโตของเปลือกหอยจะโตตามตัวซึ่งเปลือกก็ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของหอย

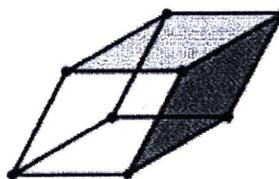
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกหอยคือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สารประกอบชนิดนี้เป็นของแข็งสีขาว มีค่าผลคูณของความสามารถในการละลาย (K_{sp}) ในน้ำ ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}C$ เท่ากับ 8.7×10^{-9} ซึ่งต่ำมากทำให้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเป็นปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่ากระบวนการตกตะกอน (precipitation) เกิดจากการรวมตัวของประจุแคลเซียม (Ca^{2+} , calcium ion) ที่ปลดปล่อยออกมาจากหอย และประจุคาร์บอเนต (CO_3^{2-} , carbonate ion) ที่อยู่ในน้ำทะเล แล้วตกตะกอนของแข็งสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตออกมาก่อตัวเป็นเปลือกห่อหุ้มภายนอก โดยแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยมีอยู่ 2 รูปแบบ ด้วยกัน คือ แคลไซต์ (Calcite) ซึ่งพบบริเวณเปลือกนอกมีพื้นผิวขรุขระ และอราโกไนต์ (Aragonite) ซึ่งพบบริเวณเปลือกด้านใน มีคุณลักษณะมันวาวคล้ายไข่มุกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Nacre ซึ่งจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตลอดช่วงชีวิตของหอยและเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำหนักของเปลือกหอย

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย

รูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนต	สมบัติทางฟิสิกส์	สมบัติทางเคมี
แคลไซต์ (Calcite) - มาจากภาษาละติน “Calx” หมายถึง ปูนเผา (Burnt lime)	รูปผลึกแบบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) ก่อนข้าง ชับซ้อน มีความถ่วงจำเพาะ 2.72 ปกติมีสีขาวหรือไม่มีสี บางครั้งพบว่ามีสีอื่นๆ ได้เช่น เทาแดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ถ้ามีมลทินอื่นปะปนอยู่ด้วย เช่น ทองแดง เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น เนื้อแร่โปร่งใส จนกระทั่งโปร่งแสง มีความแข็งแรงเท่ากับ 3 คือสามารถใช้ สดางค์แดงชุคให้เป็นรอยลึกได้	สูตรเคมี $CaCO_3$ มี CaO 56 % และ CO_2 44 % และอาจมี แมงกานีส สังกะสี เหล็ก แมกนีเซียม เข้าแทนที่ธาตุ แคลเซียมทำปฏิกิริยาเกิดฟองฟู กับกรดเกลือ
อราโกไนต์ (Aragonite) - มาจากชื่อเมือง อรากอน (Aragon) ใน ประเทศสเปนซึ่ง พบ อราโกไนต์ครั้งแรก	รูปผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) มีความวาว คล้ายแก้วไม่มีสี อาจพบเป็นสี เหลืองอ่อนด้วย โปร่งใส ความแข็งแรงประมาณ 3.5 มีความ ถ่วงจำเพาะ 2.95	สูตรเคมี $CaCO_3$ มี CaO 56 % และ CO_2 44 % และอาจมี สตรอนเตียม ตะกั่ว และสังกะสี เข้าแทนที่ธาตุแคลเซียมได้ เเผา ในอากาศจะเปลี่ยนเป็น แคลไซต์ที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ละลายน้ำได้ดีในกรดเกลือและมี ฟองฟู



ก. รูปผลึกแบบออร์โธโรมบิก



ข. รูปผลึกแบบบรอมโบฮีดรัล

รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย

- หอยแครง เป็นหอย 2 ฝา ยึดติดกันด้วยบานพับ มีขนาดและลักษณะเหมือนกันทั้ง 2 ฝา ห้าเห็นไม่ชัด ไม่มีแผงฟัน (Radula) ในช่องปาก เหงือกมีขนาดใหญ่ไว้สำหรับหายใจและกรองอาหารเป็นแบบ lamellibranch มีแมนติลคลุมตัว ขอบของแมนติลซ้ายและขวาไม่เชื่อมติดกันหรืออาจเชื่อมเฉพาะจุด เปลือกมี 2 ฝา มีเพศผู้และเพศเมียการผสมพันธุ์เป็นแบบภายนอกตัวและระยะที่เป็นตัวอ่อนเป็นแพลงก์ตอน จัดอยู่ในอนุกรมวิธานดังนี้

Phylum Mollusca

Class Bivalvia หรือ Pelecypoda

Subclass Pteriomorphia

Order Arcoida

Family Arcidae

เปลือกหอยแครงมีลักษณะเฉพาะคือมีฟันซี่เล็กๆ เรียงเป็นแถวอยู่บนแนวบานพับ (Hinge plate) ที่เป็นแนวตรง เปลือกก่อนข้างหนา มีสัน และร่องในแนวตั้ง (Radial rib และ Radial groove) เห็นชัดทำให้ตามขอบเปลือกเป็นรอยหยักไปด้วยเอ็นอยู่ด้านนอกของเปลือก

- หอยแมลงภู่ เป็นหอยที่นิยมเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ หอยแมลงภู่ที่เลี้ยงในประเทศไทยมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Perna viridis* Linnaeus มีชื่อเรียกสามัญทั่วไปว่า Green mussel ซึ่งได้จัดลักษณะทางอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Phylum Mollusca

Class Bivalvia

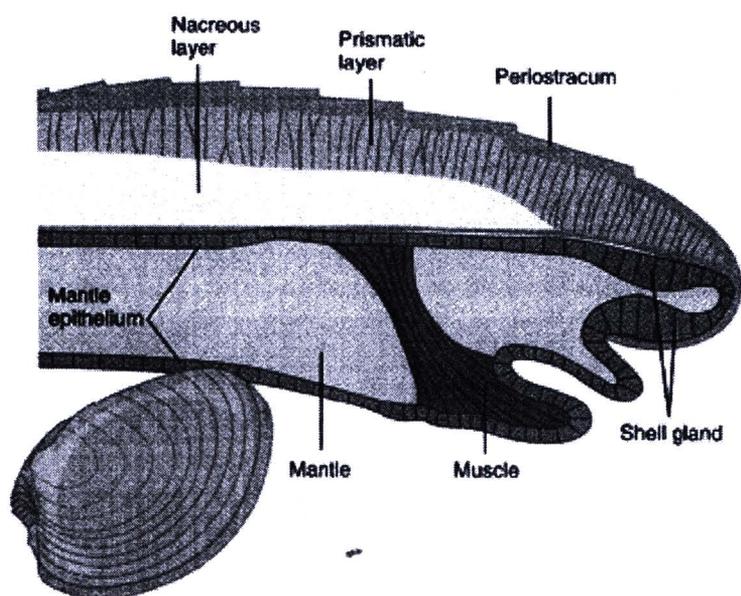
Order Mytilida

Family Mytilidae

หอยแมลงภู่มักประกอบด้วยเปลือกแข็งที่ห่อหุ้มลำตัวอยู่ภายนอกเปลือกหรือฝาหอย มีลักษณะรียาวคล้ายรูปไข่เหมือนกันและมีขนาดเท่ากันทั้งสองฝา ด้านนอกของฝามีสีเขียวย้ำเข้มคล้ายปีกแมลงทับและบ้างก็เป็นสีน้ำตาล ส่วนด้านในมีสีขาวคล้ายมุก

โดยโครงสร้างของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มักแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ

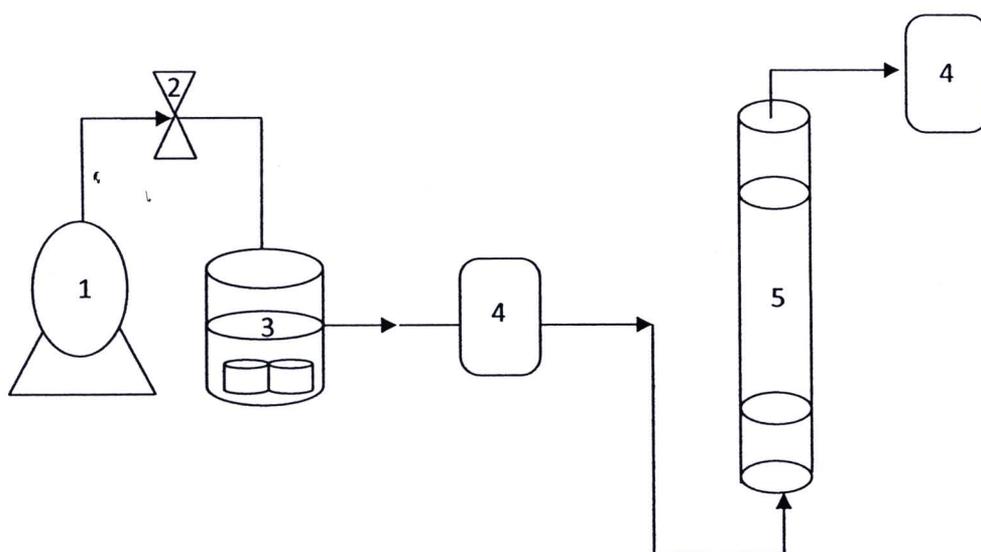
1. ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิวนอก (Periostracum layer) ประกอบด้วยสารส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน เป็นชั้นที่บางและหลุดง่าย ซึ่งจะสังเกตได้จากหอยที่ตายแล้วและเปลือกที่ถูกทิ้งอยู่ตามชายหาด หรือหอยที่ยังมีชีวิตแต่เปลือกถูกคลื่นซัดหรือทรายซัดตีเปลือกชั้นนี้อาจหลุดหายไปจนไม่เหลือให้เห็น
2. ชั้นกลาง เรียกว่า ชั้นผลึกแคลเซียม (Prismatic layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) เป็นชั้นที่หนาและแข็งแรงที่สุด
3. ชั้นในสุด เรียกว่า ชั้นมุก (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอราโกไนต์ (Aragonite) เป็นชั้นที่เรียบมีความหนาบางแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของหอย ทำให้เปลือกมีสีแวววาวและเป็นมันแวววาวแตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเปลือกหอย [22]

2.3 การดูดซับความชื้นในหอดูดซับ

หอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) เป็นหอดูดซับที่นิยมใช้มากที่สุด สามารถใช้ได้กับสารที่ต้องการแยกทั้งแก๊สและของเหลว เป็นระบบการดูดซับที่ให้ตัวถูกดูดซับไหลลงผ่านชั้นตัวถูกดูดซับที่อยู่กับที่ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงในลักษณะเดียวกับการกรอง โดยในงานวิจัยนี้ตัวดูดซับ (เปลือกของ ไข่ไก่ ไข่เป็ด หอยแครง หอยแมลงภู่) จะถูกอัดเป็นเม็ด (Pellet) บรรจุอยู่ในหอดูดซับด้วยแบบจำลองดังรูป



รูปที่ 2.11 แบบจำลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

ส่วนประกอบของหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

หมายเลข 1 คือ เครื่องปั๊มอากาศ

หมายเลข 2 คือ โฟลว์มิเตอร์

หมายเลข 3 คือ เครื่องทำหมอก

หมายเลข 4 คือ หัววัดความชื้น รุ่น SHT11

หมายเลข 5 คือ ท่ออกลิลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร บรรจุตัวดูดซับ

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ [25, 26]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction : XRD) เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน (Brunauer, Emmett and Teller method : BET) และกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดความเร็วสูง (Infrared thermographic camera) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive analysis) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้น ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยข้อมูลของชุดค่า d - spacing และความเข้มของรังสีที่ตรวจจับได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ (Lattice parameters) โครงสร้างผลึก (Crystal structure) อย่างคร่าวๆ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ ขนาดของเกรน (Grain size) และในบางกรณียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงของส่วนประกอบของโครงสร้าง (Texture analysis) ได้อีกด้วย

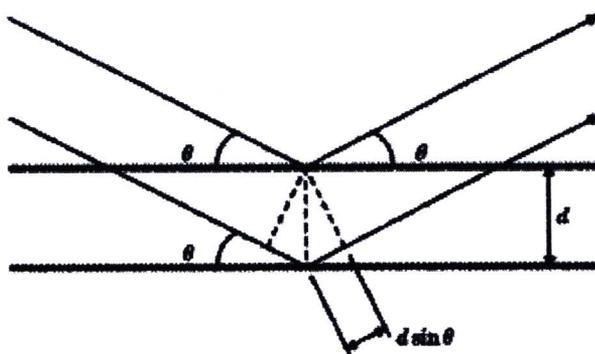
รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืน การกระเจิงหรือการเลี้ยวเบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิด เนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบ เมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรมของการเลี้ยวเบน ซึ่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder X - ray Diffraction) และสำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single - crystal X - ray Diffraction)

1. ตัวอย่างที่เป็นผง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิถุภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรือเป็นอสัณฐาน เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิถุภาคของวัสดุได้
2. ตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว สามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะ มุมระหว่างอะตอมในโมเลกุล เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผลึกแล้วเกิดการกระเจิง โดยชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก รังสีเอกซ์ที่กระเจิงนี้ยังคงมีความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า การกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering) หรือการกระเจิงแบบแบรกก์ (Bragg scattering) การเลี้ยวเบนนี้อธิบายได้ 2 แบบ คือ ตามสมการของเลาเอ (Laue equation) และตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) แต่ในที่นี้จะอธิบายตามกฎของแบรกก์ ซึ่งเหมาะกับผลึกผิง เมื่อรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ ตกกระทบผลึกจะเกิดการกระเจิงจากซุระนาบของอะตอม ถ้ามุมตกกระทบ θ ทำมุมที่พอเหมาะกับความยาวคลื่นและ d คือระยะระหว่างระนาบในชุดเดียวกัน สำหรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจะทำมุม 2θ กับแนวรังสีตกกระทบ ซึ่งรังสีทั้งสองจะมีค่าความแตกต่างของทางเดิน (Path difference) และมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ นั่นคือรังสีเอกซ์ทั้งสองอยู่ในเฟสเดียวกัน จะได้

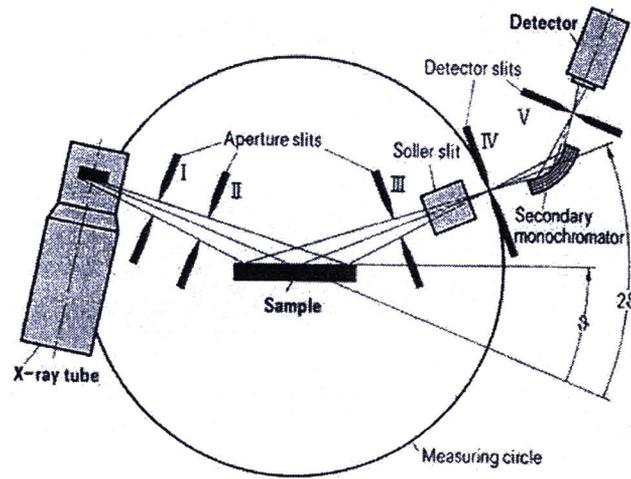
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

โดยที่ n คือ เลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ $0, \pm 1, \pm 2, \dots$
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



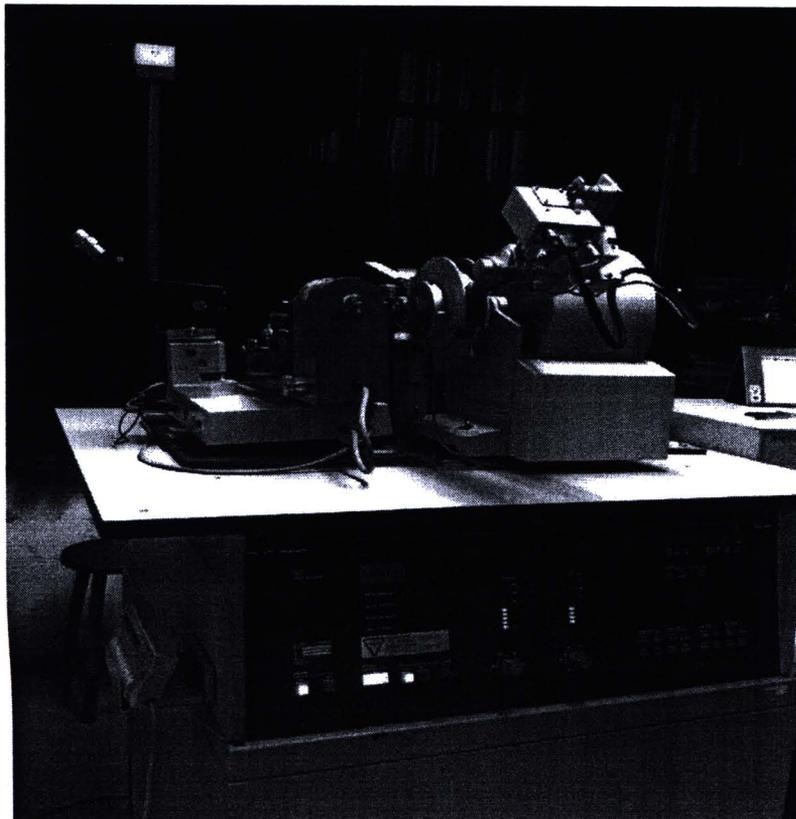
รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึก [16]

เครื่องมือที่วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือ เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว และใช้กับตัวอย่างแร่ที่บดเป็นผงละเอียดอัดลงในที่ใส่ตัวอย่างหรือฉาบบนแผ่นสไลด์ เครื่องนี้จะปล่อยรังสีให้ตกกระทบบนตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะหมุนไป โดยทำมุม θ กับแนวยิง หลอดสำหรับนับความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกจากผงผลึกจะหมุนไปเช่นกันเป็นมุมเท่ากับ 2θ เครื่องนับความเข้มของรังสีจะส่งข้อมูลที่ไปยังเครื่องขยาย (Amplified) และแปลงค่าเป็นตัวเลขหรือบันทึกบนกระดาษตารางบันทึก ซึ่งเคลื่อนที่ในอัตราเร็วที่ปรับได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.13 การทำงานของเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ [16]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

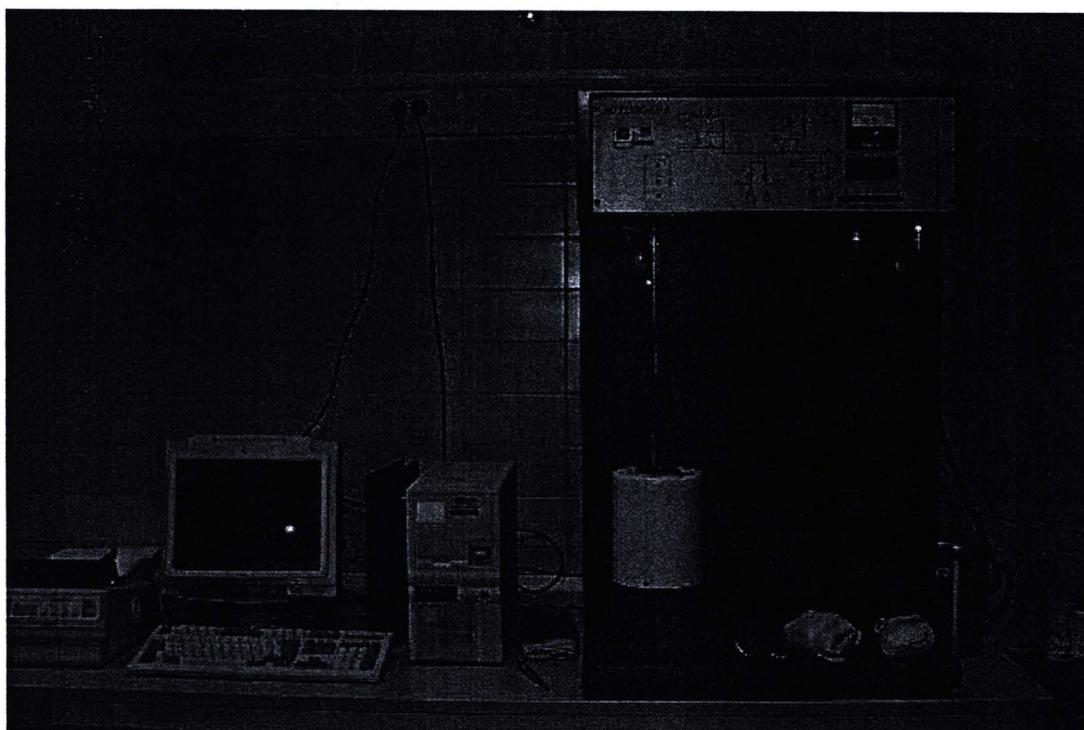


รูปที่ 2.14 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Philips diffractometer)

2.4.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารสามารถวัดโดยวิธีวัดจุดเดียว (Single point method) หรือวิธีวัดหลายจุด (Multipoint method) แต่โดยทั่วไปจะใช้วิธีวัดหลายจุดเพราะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำกว่าวิธีวัดจุดเดียว สำหรับวิธีวัดหลายจุดจะใช้ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วนตามต้องการ (ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นข้อมูลที่ได้จะเป็นปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับหรือคาย (Desorb) ออกจากผิวของสารที่ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนต่างๆ กัน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละจุดหรือความเข้มข้นของไนโตรเจนไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

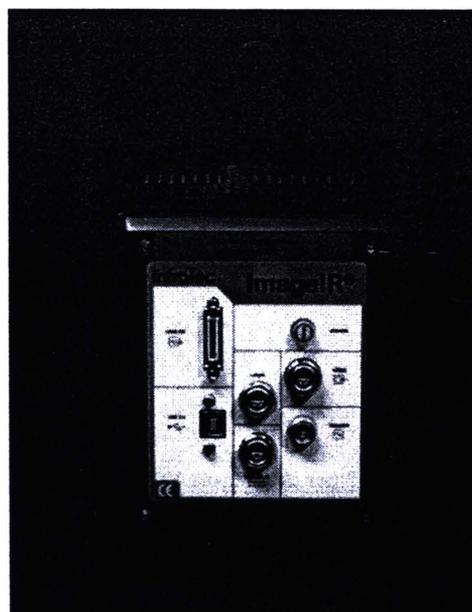
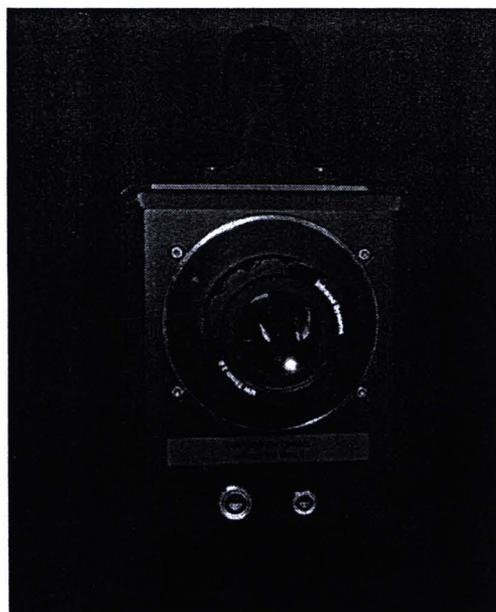


รูปที่ 2.15 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน (Quantachrome Autosorb – 1)

การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารจะอาศัยหลักการการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊สในขณะที่แก๊สมีการเคลื่อนที่ (Dynamic analysis) โดยแก๊สที่เป็นตัวดูดซับ (แก๊สไนโตรเจน) จะถูกผสมกับแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และในการวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารจะอาศัยความแตกต่างของสมบัติด้านการนำความร้อนของแก๊สแต่ละชนิด ทั้งนี้เพราะปริมาณการนำความร้อนของแก๊สแปรผัน โดยตรงกับปริมาตรของแก๊สที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน (Thermal conductivity cell : TCD) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

2.4.3 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดความเร็วสูง

กล้องที่อินฟราเรดความเร็วสูงความละเอียด 320x240 พิกเซล สามารถบันทึกภาพได้ที่อัตรา 166 เฟรมต่อวินาที ใช้เซนเซอร์รับแสงชนิด InSb ซึ่งตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดในช่วง 3-5 μm ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -10°C ถึง 1800°C ใช้ในการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่พื้นผิวของ TBC หลังจากกระตุ้นด้วยเลเซอร์



รูปที่ 2.16 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดความเร็วสูง ImageIR 3300U