



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาอัตราการดูดและคายสารดูดซับโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกเสริมระบบดูดซับ จำเป็นต้องมีพื้นฐานและความเข้าใจในหลักการการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ คู่มือสารทำงานหลักการดูดซับและประเภทการดูดซับ หลักการดูดซับของแข็ง ค่าการนำความร้อน การหาค่าการนำความร้อนด้วยวิธี Hot wire และการหาสมรรถนะการทำความเย็น (COP) นอกจากนี้ความรู้เกี่ยวกับคลื่นอุลตราโซนิกก็มีความสำคัญเช่นกัน

2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับเป็นระบบทำความเย็นที่ใช้ความร้อนต่ำจากความร้อนทิ้ง เปล่า หรือจากแหล่งธรรมชาติอาทิเช่น แสงอาทิตย์ ได้ วัฏจักรการทำความเย็นจะคล้ายกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอทั่วไป ที่ใช้สารทำงานจุดเดือดต่ำดึงความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิของระบบต่ำลง แต่แตกต่างกันที่ระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะใช้คอมเพรสเซอร์เพิ่มความดันให้กับสารทำงานในสถานะก๊าซ และมีการถ่ายเทความร้อนออกจนกระทั่งสารทำงานควบแน่นกลายเป็นของเหลว ในขณะที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับจะใช้ความร้อนเพื่อเพิ่มความดันของสารทำงานในเครื่องดูดซับ

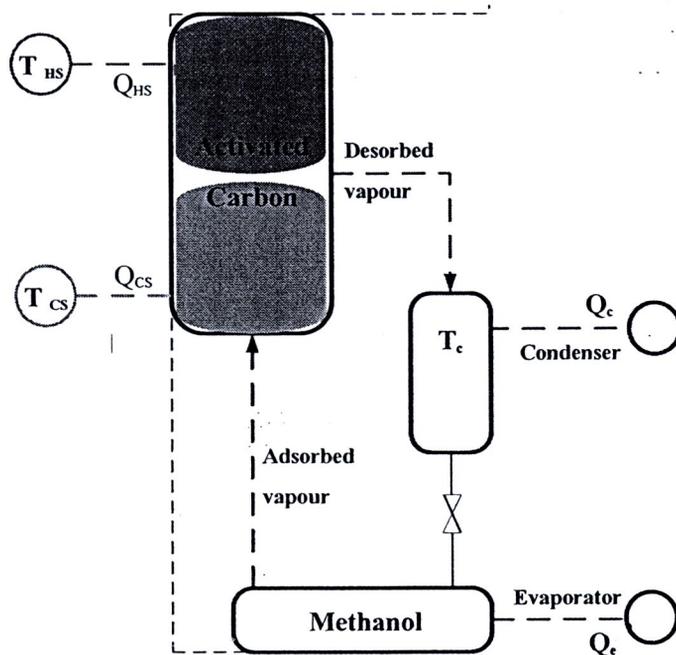
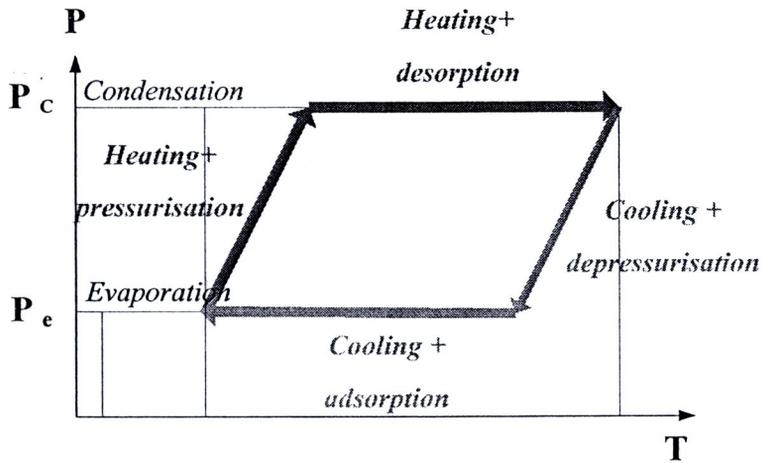
ระบบทำความเย็นที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นระบบทำความเย็นชนิดดูดซับแบบแบช (Batch type) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องดูดซับ (Adsorber) เครื่องควบแน่น (Condenser) และเครื่องทำระเหย (Evaporator) โดยสารดูดซับที่ใช้คือถ่านกัมมันต์และสารถูกดูดซับคือเมทานอล

2.1.1 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

กระบวนการทำงานเริ่มต้นด้วยการระเหยเมทานอลที่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เมทานอลจะดึงความร้อนจากภายนอกเพื่อใช้ในการระเหย อุณหภูมิของตัวทำระเหยจึงลดลง จนเกิดการทำความเย็นที่ตัวทำระเหยขึ้น จากนั้นเกิดกระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เมทานอล ในสถานะไอที่ตัวดูดซับ (Adsorber) โดย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 29 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน..... 250746
เลขเรียกหนังสือ.....

ในทางกลับกัน เพื่อให้เกิดการทำความเย็นอีกครั้ง ง่ายความร้อนแก่เครื่องดูดซับ จนกระทั่งไอของเมทานอลถูกไล่ออกไป เพื่อกลับไปควบแน่นที่เครื่องควบแน่น (Condenser) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ของเหลวเมทานอลจะพร้อมสำหรับการระเหยอีกครั้ง ในวัฏจักรอีกครั้งถัดไป โดยเรียกกระบวนการนี้ว่าการคายการดูดซับ (Desorption process)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับแบบต่อเนื่อง

ที่มา International Adsorption Society (IAS)

2.1.2 ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับประกอบด้วย

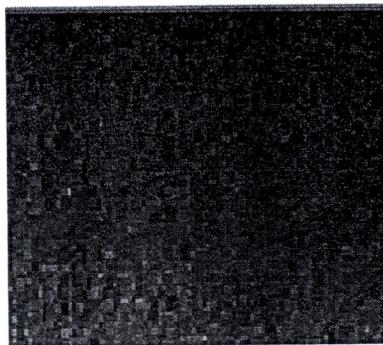
- 1) ตัวดูดซับ (Adsorber) ประกอบด้วยตัวดูดซับถ่านกัมมันต์และตัวประสานหรือสารเพิ่มคุณสมบัติ (Additive) ทำหน้าที่ดูดซับสารทำงาน
- 2) เครื่องทำระเหย (Evaporator) บรรจุสารทำงานเมทานอลไว้ภายใน เพื่อระเหยไปดูดซับที่ตัวดูดซับ
- 3) เครื่องควบแน่น (Condenser) รองรับไอสารทำงานควบแน่นกลับเป็นสถานะของเหลว เพื่อรอการดูดซับที่ตัวดูดซับต่อไป

2.1.3 ถูสารทำงาน

2.1.3.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่

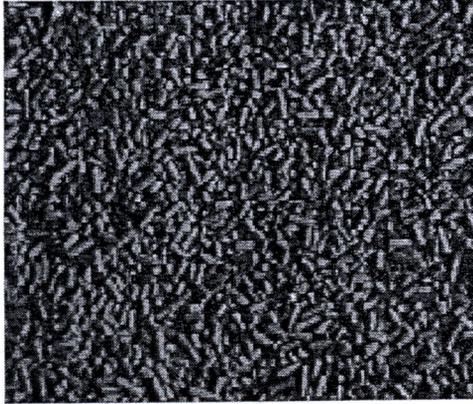
- (1) ถ่านกัมมันต์ชนิดอ่อนหรือชนิดผง (Soft types of active carbon or Powder activated carbon, PAC) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ดังรูปที่ 2.2 สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี ใช้งานในด้านการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับสารในสถานะของเหลว



รูปที่ 2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

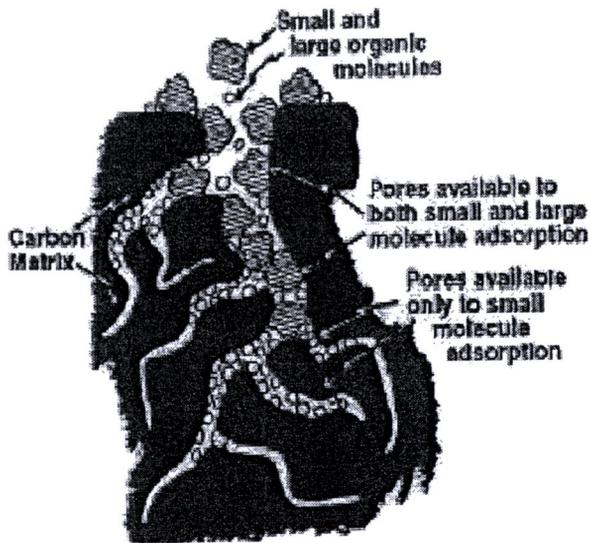
ที่มา <http://www.carbonresources.com/images/powder.gif> (online)

- (2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดหรือเม็ด (Granular activated carbon, GAC) มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเกล็ด ดังรูปที่ 2.3 ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสารในสถานะก๊าซ



รูปที่ 2.3 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

ที่มา www.atom.rmutphysics.com (online)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์

ที่มา www.atom.rmutphysics.com (online)

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

1) การกระจายขนาดของอนุภาค

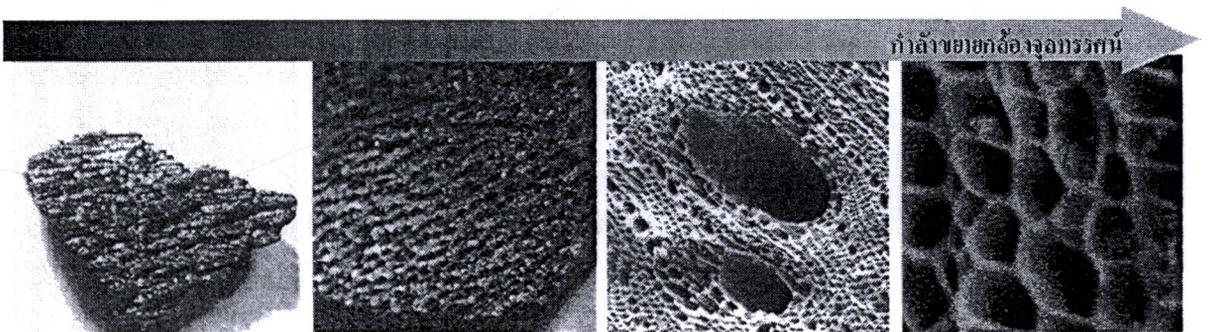
เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับและการสูญเสียความดัน โดยการใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับจะสูงและการสูญเสียจะสูงด้วย

2) ปริมาตรของโพรง (Pore Volume)

ปริมาตรรวมของโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดเล็กที่มีอยู่ในอนุภาค ถ่านกัมมันต์

3) พื้นที่ผิว (Surface Area)

เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดย ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับที่สูง



รูปที่ 2.5 แสดงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง

ที่มา http://www.cee.vt.edu/program_areas/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html#Carbon (online)

2.2 หลักการดูดซับและประเภทการดูดซับ

วัฏจักรการดูดซับของระบบทำความเย็น ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) กระบวนการดูดซับ สารทำความเย็นหรือสารทำงานเกิดการระเหยขึ้น โดยตัวกลางของการทำความเย็น (Cooling medium) อาทิ น้ำ หรืออากาศชื้นที่ถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน
- 2) กระบวนการคายการดูดซับ หรือกระบวนการเกิดใหม่ (Regeneration) โดยสารทำงานจะควบแน่นและคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ความร้อนที่ใช้ในการคายการคายสารถูกดูดซับอาจมาจากแรงเสียดทานหรือความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรมได้

การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการดูดซับทั้งหมด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การดูดซับทางเคมีและการดูดซับในทางฟิสิกส์ การดูดซับทางเคมีหรือกระบวนการย้อนกลับไม่ได้มี

ลักษณะเฉพาะคือเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารที่มีศักย์สูง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนมาก เมื่อการดูดซับเข้าใกล้ค่าทางพันธะเคมี ปฏิกิริยาเหล่านี้ได้มีการศึกษาควบคู่ไปกับวิธีอื่น เช่น สเปกโตรสโคปี อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ และการวัดสภาพอ่อนไหวทางแม่เหล็ก เพื่อเป็นข้อสนับสนุนความจริงเกี่ยวกับพันธะเคมี

การดูดซับที่เกิดขึ้น โดยพันธะทางเคมีมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ ในขณะที่อุณหภูมิของสารดูดซับมีอุณหภูมิวิกฤต พื้นผิวที่ดูดซับจำเป็นต้องมีพันธะที่แข็งแรงจึงเกิดพลังงานความร้อนสูงขึ้น ส่วนมากแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต้องมีพลังงานกระตุ้นมาช่วย

ส่วนใหญ่การศึกษาการดูดซับในทางเคมีจะถูกจำกัดอยู่แค่เพียงพื้นผิวชั้นแรกของตัวดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้ถูกจำกัดอยู่บนพื้นผิว เพราะเหตุว่ารูปแบบของพันธะจะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารที่จะถูกดูดซับกับบริเวณพื้นผิวเฉพาะที่จะสามารถดูดซับได้ โดยจะมีพื้นผิวบางส่วนที่จะไม่สามารถดูดซับได้อย่างอิสระ สามารถหาบริเวณการเกิดปฏิกิริยาได้บนพื้นที่ที่กระตุ้นแรงให้เกิดปฏิกิริยา และไม่ยุ่งยากมากนักในการวัดปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับในทางเคมี

การดูดซับในทางฟิสิกส์ หรือกระบวนการย้อนกลับได้มีลักษณะเฉพาะที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

- (1) การดูดซับในทางฟิสิกส์ ใช้พลังงานดูดซับปริมาณน้อยและไม่รุนแรง โดยไม่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปและเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของสารดูดซับ
- (2) การดูดซับในทางฟิสิกส์ อาจนำไปสู่การปกคลุมพื้นผิวด้วยสารที่ถูกดูดซับมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นภายในรูพรุนของตัวที่ดูดซับจะถูกบรรจุเต็มไปด้วยสารที่ถูกดูดซับ วัดโดยหาปริมาตรรูพรุน (Pore volume measurement)
- (3) เมื่ออุณหภูมิของตัวดูดซับสูงขึ้นจะไม่เกิดกระบวนการดูดซับในทางฟิสิกส์หรืออาจจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย
- (4) สมดุลของการดูดซับในทางฟิสิกส์ จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องมีพลังงานกระตุ้นเหมือนการดูดซับในทางเคมี ยกเว้นการดูดซับในรูพรุนเล็กๆ ซึ่งการแพร่จะสามารถจำกัดอัตราการดูดซับได้
 1. การดูดซับในทางฟิสิกส์เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ กล่าวคือมีทั้งกระบวนการดูดซับก๊าซ และกระบวนการคายก๊าซ
 2. การดูดซับโมเลกุลของก๊าซในทางฟิสิกส์นั้น ไม่เจาะจงว่าจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวใดๆ และจะปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับได้อย่างอิสระ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณหาปริมาณพื้นที่ผิวที่ดูดซับได้

2.3 หลักการดูดซับก๊าซบนของแข็ง

การศึกษารายละเอียดของพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ถึงระดับอะตอม สามารถศึกษาได้โดยวิธีการดูดซับก๊าซบนของแข็ง ซึ่งอนุภาคของของแข็งที่ใช้เป็นสารตัวอย่างจะถูกล้อมรอบไปด้วยก๊าซในลักษณะคล้ายฟิล์มเคลือบอยู่บนผิวของของแข็ง

การดูดซับก๊าซจะเกิดขึ้นบนผิวของของแข็งที่สะอาดแล้วถูกผ่านด้วยไอของก๊าซ โดยที่ไอของก๊าซมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดวิกฤติของอุณหภูมิของก๊าซนั้น และรวมปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของของแข็งจะมีค่าคงที่เสมอ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T), ความดัน (P) และศักย์ภาพการเกิดปฏิกิริยา (E) ระหว่างไอของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ฉะนั้น ณ จุดสมดุลของความดันและอุณหภูมิ ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (V) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการ ได้ดังนี้ (พิทักษ์พงศ์ อุณพวรรณ, 2532)

$$V = f(P, T, E) \quad (2.1)$$

โดยทั่วไปการวัดปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับบนของแข็ง จะทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ สมการ (2.1) สามารถลดรูปเป็น

$$V = f(P, E) \quad (2.2)$$

การเขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง V และ P โดยที่ T คงที่ จะแสดงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งกับไอของก๊าซ ณ อุณหภูมิคงที่

2.4 หลักการและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

อัลตราโซนิก คือ ศาสตร์ที่เกี่ยวกับคลื่นเสียงที่อยู่เหนือขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะ ได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15KHz เท่านั้น (คีซีโรตม์, 2550) ดังนั้นอัลตราโซนิก จึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป

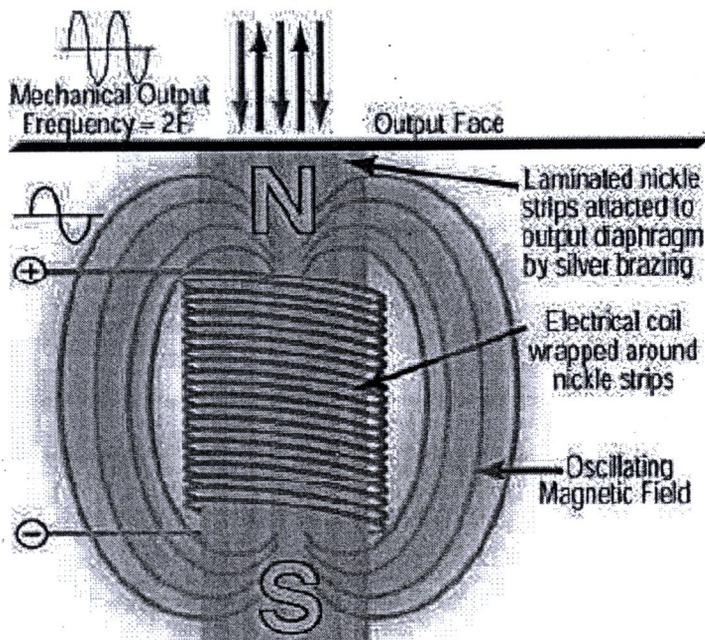
2.4.1 ประเภทของคลื่นอัลตราโซนิก

2.4.1.1 Ultrasonic Transducers

Ultrasonic transducer ซึ่งถูกใช้อยู่ทุกวันนี้มี 2 แบบ คือแบบ Magnetostrictive transducer และแบบ Piezoelectric Transducer ทั้ง 2 แบบ มีความแตกต่างกันที่วิธีการที่ใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นพลังงานกล (การสั่นสะเทือน)

(1) Magnetostrictive transducer

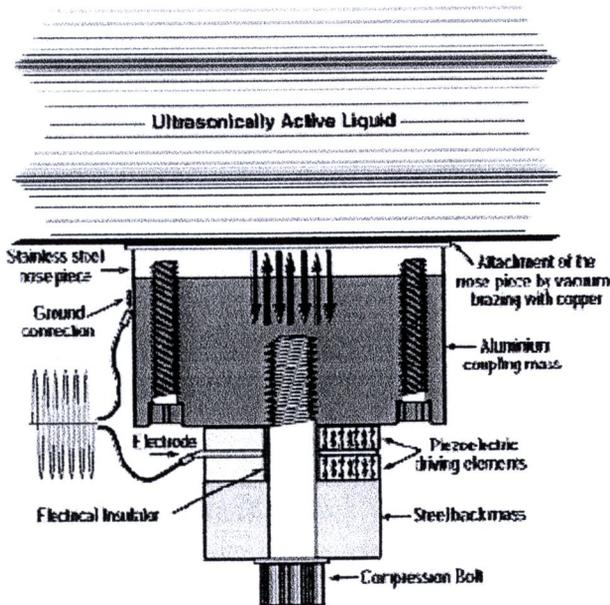
Magnetostrictive transducer ใช้วิธีการที่เรียกว่า Magnetostriction โดยการนำวัสดุบางชนิดไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุจะขยายและหดตัวทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจาก ultrasonic generator จะถูกส่งเข้าสู่ Transducer ผ่านทางขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้แท่ง Nickel หรือวัสดุประเภท Magnetostrictive อื่น ๆ ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูง ระดับอุตสาหกรรม ความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่เข้าสู่ Transducer เป็น 0.5 เท่าของความถี่ของการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.6 Magnetostrictive Transducer (คิชิโรดะ, 2550)

(2) Piezoelectric transducer

Piezoelectric transducer ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นพลังงานกลโดยตรง โดยการใช้ Piezoelectric effect ซึ่งเป็นการทำให้วัสดุบางชนิดเปลี่ยนแปลงขนาด และเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุนั้น พลังงานไฟฟ้าความถี่สูงระดับอัลตราโซนิก จะถูกส่งจาก Ultrasonic generator ไปสู่ Piezoelectric Transducer และอุปกรณ์ภายใน Transducer จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าความถี่สูงที่ได้รับไปเป็นการสั่นสะเทือนและขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยาย โดยการเคลื่อนที่อย่างเป็นจังหวะของวัสดุ 2 ชนิด คือ Steel back mass และ Aluminium coupling mass



รูปที่ 2.7 Piezoelectric Transducer (ศิริโรตม์, 2550)

2.4.2 ผลของคลื่นย่านอัลตราโซนิก (วารสารไทยโภชนาพันธ์ (ฉบับออนไลน์), 2549)

คลื่นย่านอัลตราโซนิกส่งผลกระทบต่อ 3 ประการ ดังต่อไปนี้

- (1) เกิดความร้อน (thermal effects) เมื่อตัวกลางดูดคลื่นคลื่นย่านอัลตราโซนิกไว้ อุณหภูมิของตัวกลางจะเพิ่มขึ้น
 - i. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α)
 - ii. ค่า α ของตัวกลางแปรผันตามค่าความถี่ของคลื่นย่านอัลตราโซนิก

- iii. อุณหภูมิที่สูงขึ้นของตัวกลางแปรผันตามความเข้มของคลื่นย่านอุลตรา-โซนิคและระยะเวลาที่ได้รับคลื่นย่านอุลตราโซนิค
- (2) เกิดโพรงอากาศในตัวกลาง (Cavitation) มีสาเหตุมาจากคลื่นเสียงเหนี่ยวนำให้เกิดความแปรปรวนของความดันในตัวกลาง
- i. โพรงอากาศนี้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและมีการพองตัวและหดตัวอย่างรวดเร็ว (inertial cavitation) หรือเกิดการสั่นแบบ oscillatory ของพองอากาศในบริเวณที่ให้คลื่นย่านอุลตราโซนิค (stable cavitation)
 - ii. การแฟบตัวของโพรงอากาศเหล่านี้จะปลดปล่อยคลื่น shock wave ซึ่งสามารถทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อรอบๆ เปลี่ยนไปได้
 - iii. cavitation แปรผันตามความเข้มของคลื่นย่านอุลตราโซนิค แต่แปรผกผันกับความถี่
 - iv. cavitation อาจมีความสำคัญในกรณีที่ใช้คลื่นย่านอุลตราโซนิคในช่วงความถี่ต่ำ หรือใช้คลื่นย่านอุลตราโซนิคกับของเหลวที่มีพองอากาศอยู่มาก
- (3) เกิด acoustic streaming หรือ microstreaming หรือ convective flow ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของของเหลวในตัวกลางด้วยความเร็วสูงในทิศทางหนึ่งเมื่อได้รับคลื่นย่านอุลตราโซนิค เนื่องจากมีการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงและการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นระหว่างการแพร่ของคลื่นเสียง หรืออาจเกิดจากการสั่นของพองอากาศแบบ cavitation
- i. แรงเฉือน (shear stress) ที่เกิดขึ้นจากความเร็วของ streaming อาจมีผลต่อโครงสร้างของเนื้อเยื่อรอบๆ ได้
 - ii. Acoustic streaming อาจมีความสำคัญกรณีที่ตัวกลางมีค่า Z ต่างจากสิ่งที่อยู่รอบๆ หรือถ้าตัวกลางค่อนข้างเหลวและไหลได้หรือเมื่อมีการใช้คลื่นย่านอุลตราโซนิคในลักษณะต่อเนื่อง

2.5 การส่งผ่านคลื่นอุลตราโซนิคในตัวกลางของแข็งและของเหลว

คลื่นอุลตราโซนิคเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าที่มนุษย์จะสามารถได้ยิน และการคำนวณพื้นฐานจะใช้ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับเสียง ในปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ด้านฟิสิกส์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม เทคโนโลยีทางการแพทย์ หัวกำเนิดคลื่น

อุลตราโซนิกส่วนใหญ่ทำจากสารผลึกควอตซ์ ที่เรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) หมายถึง ความต่างศักย์ทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกโค้งงอหรือยืดได้ โดยสามารถสั่นเชิงกลได้สูงถึง 10 ล้าน ครั้งต่อวินาที

กระบวนการของคลื่นพิจารณาในลักษณะความยาวคลื่น (λ) แอมพลิจูดคลื่นที่ตำแหน่ง ต่างๆ (Amplitude) และความเร็วในการส่งผ่านคลื่น (C) สามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชัน ของคาบของการสั่นของคลื่น (N) ความถี่คลื่น (f) และค่าความถี่เชิงมุม (ω) โดยปริมาณดังกล่าวมี ความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\lambda = CN \quad (2.3)$$

$$f = 1/N \quad (2.4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

2.5.1 การส่งผ่านคลื่นในตัวกลางของแข็ง

การส่งผ่านคลื่นแต่ละชนิดมีความเร็วที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ตัวกลางของแข็งซึ่งไม่มี จืดจำกัดหรือมีความยาวตามแนวขวาง ที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก สามารถเขียนสมการ คำนวณค่าความเร็วการส่งผ่านคลื่น (C_k) ได้ดังสมการ (2.6)

$$C_k = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_s}} = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.6)$$

โดย

E_p = ค่ายัง โมดูลัส (Pa)

ρ_s = ความหนาแน่นตัวกลางของแข็ง (kg/m^3)

ν = อัตราส่วนปัวซอง

ตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ของคลื่นทิศทางเดียว (One dimension) อาทิ แผ่นโลหะ หากไม่ พิจารณาแกนที่ตั้งฉากกับระนาบ ที่มีความหนา (d) และมีเงื่อนไข คือ $d \leq \lambda$ ดังนั้นความเร็วของ การส่งผ่านคลื่นตามแนวยาวของแผ่น (C_L) คำนวณจาก

$$C_L = \sqrt{\left(\frac{E_p}{\rho}\right)\left(\frac{1}{1-\mu^2}\right)} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ของคลื่นใน 2 ทิศทาง (Two dimensions) คือ ในแกน x และแกน y ดังเช่นกรณีของแท่งโลหะที่มีลักษณะ $x \leq \lambda$ และ $y \leq \lambda$ จะได้ความเร็วตามแนวยาว คือ

$$C_l \sqrt{\frac{E_p}{\rho}} \quad (2.8)$$

และความเร็วเคลื่อนที่ตามขวาง (C_T) คือ

$$C_T = \sqrt{\frac{G_s}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_p}{\rho} \left(\frac{1}{2(1+\mu)} \right)} \quad (2.9)$$

เมื่อ G_s = ค่ายังโมดูลัสตามแนวขวาง (Pa)

ความเร็วในการส่งผ่านคลื่นจะขึ้นกับความยาวคลื่นที่แตกต่างกันตามชนิดของคลื่น โดยความเร็วของคลื่นตามแนวขวางถูกประมาณค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วคลื่นตามแนวยาวของตัวกลาง และความถี่มีค่าคงที่โดยอัตราส่วนจะขึ้นอยู่กับตัวเลขปัวซอง (Poisson' Number) หรือ μ ดังสมการ (2.10)

$$\frac{C_T}{C_L} = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cong \frac{1}{2} \quad (2.10)$$

2.5.2 การส่งผ่านคลื่นในตัวกลางของเหลว

การเคลื่อนที่ของคลื่นตามแนวยาวในตัวกลางของเหลว ดังสมการ (2.11)

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}}} = \sqrt{\chi \frac{1}{\beta_{is} \rho}} \quad (2.11)$$

โดย

$\overline{\beta_{ad}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของการอัดตัว (Pa^{-1})

$\overline{\beta_{is}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนคงที่ (Isothermal) ของการอัดตัว (Pa^{-1})

χ = อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ $\frac{\overline{\beta_{is}}}{\overline{\beta_{ad}}}$

ความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตัวกลางของเหลว สามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการที่ (2.12)

$$C = C_0 + \gamma\theta \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$\theta = T - T_0 \text{ (K)}$$

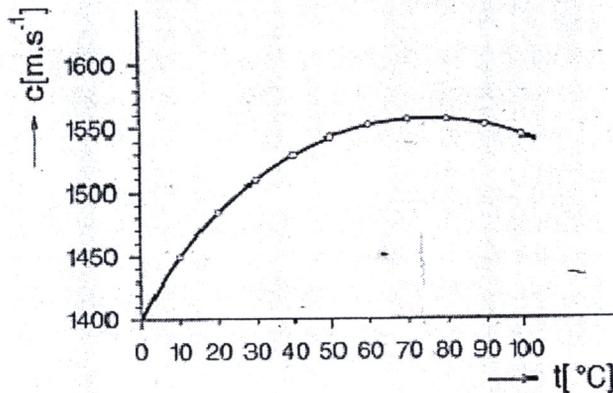
$$T = \text{อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของของเหลว (K)}$$

$$T_0 = \text{อุณหภูมิเริ่มต้นของของเหลว (K)}$$

$$C_0 = \text{ความเร็วที่อุณหภูมิเริ่มต้นของของเหลว } T_0 \text{ (m/s)}$$

$$\gamma = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิสมบูรณ์ (m/s.K)}$$

โดยทั่วไปความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกในของเหลว (ยกเว้นน้ำ) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น แต่สำหรับน้ำความเร็วของคลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 74°C หลังจากนั้นจะลดลง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การส่งผ่านคลื่นอุลตราโซนิกในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Stefan and Zdenko, 1996)

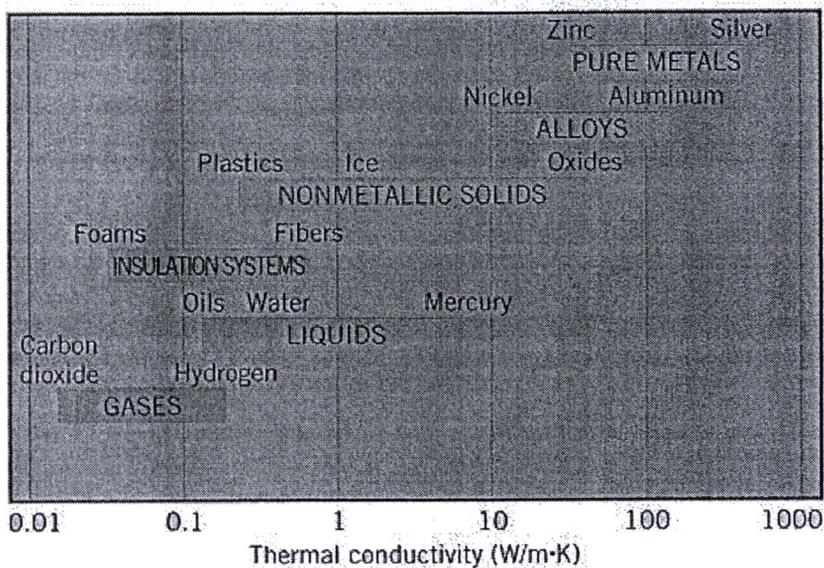
นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากแรงดันของน้ำ (Hydro static) แต่ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเพียง 0.1 % ต่อความดันในหน่วย MPa และยังคงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความหนาแน่นของแต่ละสารละลาย เช่น ในกรณีของน้ำเกลือความเร็วในการสั่นของคลื่นจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเกลือที่เพิ่มขึ้น

2.6 ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนของสารใดๆ หมายถึงปริมาณความร้อนที่สารนั้นๆ สามารถส่งผ่านจากผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง ต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยโมเลกุลของสารนั้นไม่เคลื่อนที่ด้วย โดยสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat transfer rate, q_x) ของวัตถุใดๆ ที่มีพื้นที่ผิวหน้าตัด A ซึ่งส่งผ่านความร้อนด้วยระยะทาง (Δx) จากอุณหภูมิหนึ่งยังอีกอุณหภูมิหนึ่ง แสดงได้ดังสมการของฟูเรียร์ (Fourier's law)

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.9)$$

ซึ่ง k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัตถุใดๆ มีหน่วยเป็น $W/m \cdot K$



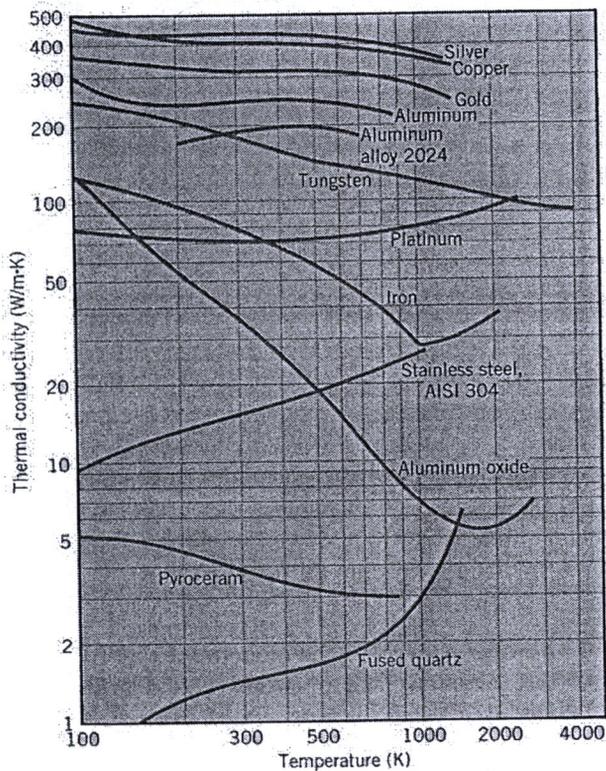
รูปที่ 2.9 ค่าการนำความร้อนของสารประเภทต่างๆ

สำหรับวัสดุที่เป็นของแข็ง การส่งผ่านความร้อนจะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนย้าย อิเล็กตรอนอิสระและพันธะที่เชื่อมกันระหว่างอะตอมในแลตทิซ (Lattice) ในลักษณะของการสั่น โดยค่าการนำความร้อนของของแข็งนั้นจะเป็นผลรวมของค่าการนำความร้อนที่เกิดจาก อิเล็กตรอน (k_e) และค่าการนำความร้อนที่เกิดจากแลตทิซ (k_l)

$$K = k_e + k_l \quad (2.10)$$

โดยที่ k_c นั้นจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า สำหรับโลหะบริสุทธิ์ ค่า k_c จะมีค่ามากกว่า k_f แต่ในโลหะผสมค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าจะมากซึ่งไม่สามารถตัด k_f ออกไปได้

สำหรับของแข็งที่ไม่ใช่โลหะค่าการนำความร้อนรวมจะเป็นผลมาจาก k_f โดยส่วนใหญ่ ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในแต่ละแลตทิซ โดยการจัดเรียงโครงสร้างของแลตทิซนั้นจะส่งผลถึงค่า k_f อย่างมีนัยสำคัญ เช่น ผลึกที่จัดตัวเรียงอย่างเป็นระเบียบ อาทิ ควอตซ์ จะมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าวัสดุอะมอร์ฟัส (Amorphous) ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ อาทิ แก้ว เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของของแข็งชนิดต่างๆ

วัสดุที่เป็นฉนวน ประกอบด้วย ตัวกลางที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งอาจเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ผง หรือลักษณะเป็นแผ่น ที่กระจายตัวในอากาศได้ ระบบเช่นนี้จะเรียกค่าการนำความร้อนว่า ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal Conductivity) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนและคุณสมบัติการแผ่รังสีของวัสดุ รวมทั้งธรรมชาติ สัดส่วนช่องว่างและอากาศ

ภายในด้วย โดยตัวแปรที่พิเศษของระบบนี้คือ ความหนาแน่นของกลุ่มก้อน (Bulk density) คือ สัดส่วนระหว่างมวลของของแข็ง/ปริมาตรรวมทั้งหมด ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการเกาะกันของของแข็งเป็นอย่างมาก (Incropera and Dewitt, (2002)) ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล สามารถหาได้จากสมการ

$$\lambda_{eff} = (1 - \epsilon)\lambda_s + \epsilon\lambda_g \quad (2.11)$$

โดยที่ ϵ คือค่าความพรุนของสารดูดซับ λ_s และ λ_g คือค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับของแข็งและค่าการนำความร้อนของก๊าซ ตามลำดับ (Wang K. et al (2006))

โดยที่ค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ (รหัส YKAC ที่ได้จากกะลามะพร้าว) กับเมทานอล มีค่าเท่ากับ 13.38 W/m.K และมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 0.45 kg/kg (Wang et al.,2007)

2.7 การหาค่าการนำความร้อนโดยวิธี Hot wire

วิธี Hot wire นี้อาศัยหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทางเพิ่มขึ้น หลังจากที่ได้มีการให้พลังงานที่คงที่ผ่านเข้าไปในวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน เราสามารถวัดและคำนวณหาค่าการนำความร้อนได้โดยสมมติให้มีลวดความต้านทานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากๆ ($d \rightarrow 0$) และมีความยาวมากๆ วางอยู่ในตัวกลางที่เราต้องการหาค่าการนำความร้อน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า (I) จำนวนคงที่เข้าไปในลวด เราสามารถอธิบาย Conductive heat transfer ด้วยสมการของ Van der held (ทรงพล อธิเวสส์, 2521)

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ θ = อุณหภูมิ

t = เวลา

$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ คือ Thermal diffusion ของ Medium

r = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางต้นกำเนิดความร้อน



โดยเมื่อ Integrate สมการ (2.12) จะได้สมการ (2.13) คือ

$$\Delta\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(-E_i \frac{r^2}{4at} \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$-E_i \frac{r^2}{4\alpha t} = \int_x^u \frac{e^{-u}}{u} du$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าการนำความร้อนโดยใช้สมการ (ISO 8894-2) คือ

$$\lambda = \frac{IV}{4\pi l} \times \frac{-E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right)}{\Delta\theta(t)} \quad (2.14)$$

เมื่อ	I	คือ	ปริมาณกระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	แอมแปร์
	V	คือ	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	โวลต์
	l	คือ	ความยาวของลวดความร้อน	มีหน่วยเป็น	เมตร
	$\Delta\theta(t)$	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิ	มีหน่วยเป็น	องศาเซลเซียส
	t	คือ	ช่วงเวลาการวัด	มีหน่วยเป็น	วินาที
	r	คือ	ระยะห่างเทอร์โมคัปเปิลและลวดความร้อน	มีหน่วยเป็น	มิลลิเมตร
	α	คือ	thermal diffusivity	มีหน่วยเป็น	ตารางเมตร/วินาที

โดย $-E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right)$ สามารถหาได้จากตารางความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$ และ

$$-E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right) \text{ โดยที่ทั้งสองเทอมดังกล่าวอ้างอิงจากความสัมพันธ์ } \frac{-E_i \left(\frac{-x}{2} \right)}{-E_i(-x)} \text{ และ } -E_i(-x)$$

ตามลำดับดังตารางตัวอย่างการคำนวณ ที่ 2.1

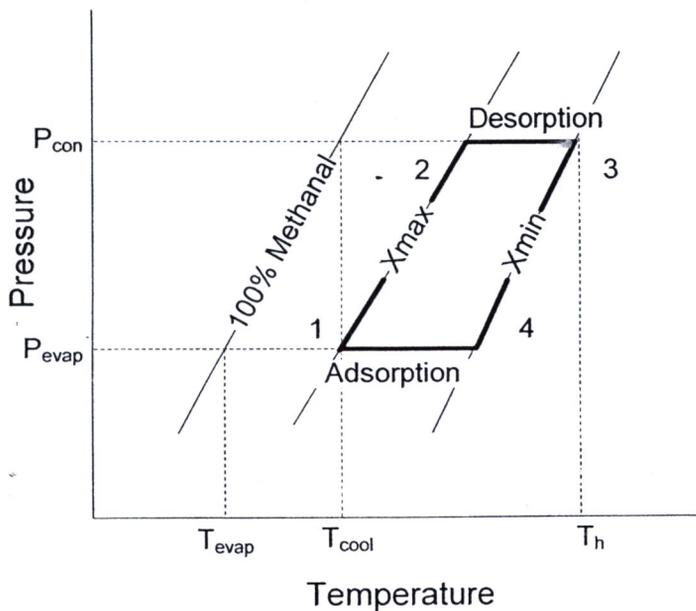
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าการนำความร้อน (ISO 8894-2)

Time, t s	$\Delta\theta(t)$		$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	$-Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$	Thermal conductivity, λ W/(m·K)	λ mean W/(m·K)
	μV	K				
6	0,55	0,054	4,46	0,049 6	13,2	15,5
12	2,47	0,241	2,46	0,243 4	14,5	
18	4,45	0,434	1,96	0,478 8	15,8	
24	6,08	0,593	1,78	0,652 1	15,7	
30	7,47	0,729	1,69	0,776 4	15,3	
36	8,72	0,851	1,61	0,919 7	15,5	
48	10,82	1,056	1,52	1,135 8	15,4	
60	12,60	1,229	1,46	1,327 4	15,5	
72	14,05	1,371				
96	16,47	1,607				
120	18,40	1,795				

จากงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปและทดสอบตัวดูดซับ ทำให้ทราบแนวทางในการคัดเลือกสารผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ โดยตัวดูดซับจะถูกพัฒนาในห้องทดลอง และนำไปวัดค่าการดูดซับเมทานอลและค่าการนำความร้อน โดยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่าการดูดซับและค่าการนำความร้อน

2.8 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

จากแผนภาพการทำงานของวัฏจักรระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟ P-T-x แสดงการทำงานของระบบใน 1 วัฏจักร (พีระพงษ์ ถ้าอุทก, 2548)

2.8.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบดูดซับ แบ่งเป็น 2 ช่วง (phase) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1 (Heating / Desorption / Condensation)

ขั้นตอน 1→2 ให้ความร้อนแก่คู่สารทำงานภายในเครื่องดูดซับ จากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ T_h ให้ความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากความดันและอุณหภูมิระเหย (P_c, T_1) เป็นความดันและอุณหภูมิกวมน้ำ (P_c, T_2) โดยสารถูกดูดซับ มีความเข้มข้นคงที่เท่ากับ x_1 และไม่เปลี่ยนแปลงสถานะ การให้ความร้อนชั้นสารดูดซับในขั้นตอนนี้ เรียกว่า isosteric heating

ขั้นตอน 2→3 ให้ความร้อนกับชั้นสารดูดซับต่อไป จนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จาก T_2 จนถึง T_3 โดยรักษาความดันให้คงที่ที่ P_c สารถูกดูดซับจะเริ่มระเหยออกจากผิวสารดูดซับ กระบวนการนี้เรียกว่า การคายสาร (Desorption process) ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะลดลงจาก x_1 เป็น x_2 การให้ความร้อนในขั้นตอนนี้เรียกว่า isobaric heating โดยไอสารถูกดูดซับจะไหลผ่านเครื่องควบแน่นและควบแน่นเป็นของเหลวไหลลงกระบอกลบสาร เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ช่วงที่ 2 (Cooling / Evaporation / Adsorption)

ขั้นตอน 3→4 ระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดซับเพื่อลดอุณหภูมิของของชั้นสารดูดซับและความดันของระบบจาก (P_c, T_3) เท่ากับ (P_c, T_4) โดยความเข้มข้นของสารถูกดูดซับคงที่เท่ากับ x_2 ขั้นตอนนี้เรียกว่า isosteric cooling

ขั้นตอน 4→1 เปิดวาล์วที่เครื่องทำระเหยให้สารถูกดูดซับจากกระบอกลบสารไหลเข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายใน เกิดการระเหยเป็นไอไหลเข้าเครื่องดูดซับและถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ กระบวนการนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption process) ในช่วงนี้จะระบายความร้อนออกจากชั้นสารดูดซับอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจาก T_4 เป็น T_1 ที่ความดันคงที่ P_c ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้เรียกว่า isobaric cooling ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก x_2 เป็น x_1 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ (ความดันภายในระบบของมีค่าเท่ากัน) จึงถือเป็นการสิ้นสุดวัฏจักรการทำงานของระบบ

2.8.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

โดย COP ของระบบทำความเย็นทั่วไปคือ

$$COP = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{input}}} \quad (15)$$

ดังนั้น COP โดยรวมของระบบทำความเย็นนี้ คือ

$$COP = \frac{Q_{Cooling}}{Q_{Heating}} \quad (16)$$

จากสมการ (5) และ (6) จะได้

$$COP = \frac{\int_0^{t_{cyc}} \Delta m_{met} L_{met}}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5} \quad (17)$$

ความร้อนที่ให้ผ่านกัมมันต์ ที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_3

$$Q_1 = m_{ac} c_{p,ac} (T_3 - T_1)$$

ความร้อนที่ทำให้เมทานอลมีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2

$$Q_2 = m_{ac} c_V X_{max} (T_2 - T_1)$$

ความร้อนที่ทำให้เมทานอลมีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_2 เป็น T_3

$$Q_3 = \frac{1}{2} m_{ac} c_V (X_{max} + X_{min}) (T_3 - T_2)$$

ความร้อนที่ใช้แยกเมทานอลจากกัมมันต์

$$Q_4 = \frac{1}{2} \left(\frac{Rm_{ac}}{MW_{met}} \right) (X_{max} - X_{min}) \left[\frac{T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} + \frac{T_3 T_4}{(T_3 - T_4)} \right] \ln \frac{P_2}{P_1}$$

พลังงานที่ป้อนให้หัวจ่ายคลื่นอุลตราโซนิก

$$P = IV$$

เมื่อ COP คือ สมรรถนะของระบบ, (-)

m_{met} คือ มวลของเมทานอล, (ml)

$Q_{cooling}$ คือ พลังงานระบายออกจากกระบวนการดูดซับสาร, (kJ)

$Q_{heating}$ คือ พลังงานจ่ายให้กระบวนการคายสาร, (kJ)

L_{met} คือ ความร้อนแฝงการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอ
ของเมทานอล, (kJ/kg)

ความรู้ที่ได้จากการค้นคว้าเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์ กระบวนการการดูดซับ ระบบอุลตราโซนิก ค่าการนำความร้อน ฯลฯ จากงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทนี้ จะนำไปสู่การออกแบบกระบวนการวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์งานวิจัยได้