

**นวัตกรรมใหม่ของการคั่วและทำเย็นเมล็ดกาแฟ
ในระบบปิดโดยอาศัยกาลักความร้อน
NEW INNOVATION OF COFFEE BEAN ROASTING AND COOLING
IN A CLOSED SYSTEM USING THERMOSYPHON**

นิติ คำเมืองลือ

อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

บทคัดย่อ

บทความทางวิชาการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเมล็ดกาแฟ การแปรรูปกาแฟโดยการคั่วและการทำเย็น ระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ และส่วนหนึ่งของปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่มีใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ได้นำองค์ความรู้ที่รวบรวมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟมาผนวกกับความรู้ทางด้านวิศวกรรมในเรื่องการถ่ายเทความร้อนเพื่อนำเสนอนวัตกรรมใหม่ของการคั่วและทำเย็นเมล็ดกาแฟในระบบปิดโดยใช้กาลักความร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากเมล็ดกาแฟในช่วงขั้นตอนการคั่วและทำเย็น ตามลำดับ เมล็ดกาแฟคั่วที่ผ่านการคั่วและทำเย็นในระบบปิดโดยอาศัยกาลักความร้อนมีคุณภาพที่น่าพอใจ คือ มีกลิ่นหอม ไม่มีกลิ่นเหม็นของแก๊สร้อนมาเจือปน มีรสชาติขม ไม่เปรี้ยว และมีสีที่สม่ำเสมอทั่วถึงกันทุกเมล็ด ดังนั้นการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ของเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟนี้มีค่าลดลงจากเครื่องต้นแบบก่อนหน้านี้เล็กน้อย

คำสำคัญ: เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ, กาลักความร้อน, ระบบปิด, เมล็ดกาแฟ, กาแฟ

ABSTRACT

The objective of this academic article is to educate the basic knowledge on a coffee bean, coffee processing by roasting and cooling, roasting level and a part of problems occurring in present coffee bean roasters. Moreover, knowledge on the design and making of coffee bean roasters has been collected from related researches and combined with the engineering knowledge on heat transfer to present the new innovation of coffee bean roasting and cooling in a closed system by using thermosyphon as a medium to transfer heat in to and out from coffee beans during roasting and cooling procedure, respectively. The obtained roasted coffee beans have satisfactory quality with rich aroma, no bad odor

according to contamination of hot gas, bitter favor, no sour, and constant color entire all coffee beans. Specific energy consumption of this roaster is slightly lower than that of previous prototype roaster.

KEYWORDS: coffee bean roaster, thermosyphon, closed system, coffee bean, coffee

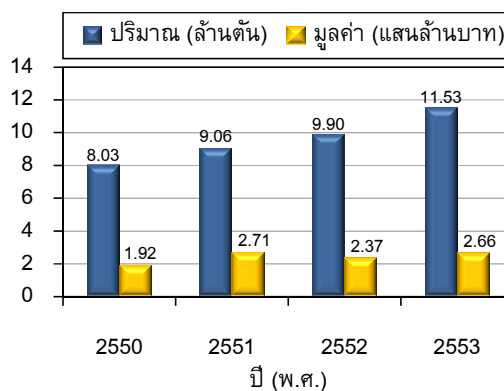
1. บทนำ

ตลอดระยะเวลาในช่วง 3 – 4 ปีที่ผ่านมา หากลองสังเกตให้ดีจะพบว่าตามสถานที่ต่างๆ รอบตัวเรา ไม่ว่าจะเป็นข้างถนน หลังป้ายรถเมล์ บนสถานีรถไฟ ห้างสรรพสินค้า ป้ายน้ำมัน หรือแม้กระทั่งในที่ทำงานของเราเอง ต่างมีบรรดาร้านกาแฟสดเปิดใหม่เพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ บางแห่งที่มีผู้คนสัญจรผ่านไปมาเป็นจำนวนมากอาจเห็นร้านกาแฟสดเปิดอยู่ติดกันมากกว่าสองร้านขึ้นไป ภาพเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าคนไทยมีความนิยมในการดื่มกาแฟสดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อกาแฟสดเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของผู้คนในยุคนี้มากขึ้น ความต้องการวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นกาแฟสดย่อมเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้องการวัตถุดิบหลักในการผลิตซึ่งก็คือ เมล็ดกาแฟ (Coffee bean) แม้ว่าประเทศไทยจะเป็นหนึ่งในประเทศที่เพาะปลูกกาแฟเป็นจำนวนมาก แต่จากความต้องการเมล็ดกาแฟที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณเมล็ดกาแฟที่ผลิตได้ภายในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศในปริมาณและมูลค่าที่เพิ่มสูงขึ้นทุกปี ดังแสดงในรูปที่ 1

กาแฟสดที่ผลิตจากเมล็ดกาแฟชั้นดีที่ผลิตจากทั้งในประเทศและต่างประเทศไม่จำเป็นต้องมีรสชาติ กลิ่น และสีที่ดีเสมอไป แม้ว่าจะเป็นเมล็ดกาแฟจากแหล่งเพาะปลูกเดียวกันก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากรสชาติ กลิ่น และสีของกาแฟสดขึ้นอยู่กับคุณภาพของเมล็ดกาแฟคั่ว (Roasted coffee bean) ซึ่งเป็นผลจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟให้พร้อมสำหรับการนำไปบดและชงเป็นกาแฟต่อไป การคั่วเมล็ดกาแฟสามารถทำได้ง่ายๆ โดยการนำไปคั่วบนกระทะที่ตั้งบนเตาไฟ แต่ด้วยวิธีการที่ง่ายเกินไปนี้จะทำให้เมล็ดกาแฟคั่วที่ได้มีรสชาติที่ไม่กลมกล่อม กลิ่นไม่หอม และมีสีที่ไม่สม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้ร้านกาแฟสด นักดื่มกาแฟ ผู้บริโภครายย่อยในครัวเรือน โรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป ตลอดจนเกษตรกรผู้เพาะปลูกและแปรรูปกาแฟ จึงให้ความสำคัญแก่การคั่วเมล็ดกาแฟเป็นอย่างมาก การคั่วเมล็ดกาแฟที่ถูกวิธีนอกจากจะเป็นการรักษาคุณภาพของรสชาติ กลิ่น และสีของเมล็ดกาแฟคั่วให้ตรงตามมาตรฐานแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเมล็ดกาแฟได้อีกทางหนึ่ง

จากความต้องการในการบริโภคกาแฟสดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังที่กล่าวมาข้างต้น ผนวกกับการให้ความสำคัญกับคุณภาพของเมล็ดกาแฟคั่ว ที่ผ่านมามีการคิดค้น ออกแบบ และสร้างเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่สามารถคั่วเมล็ดกาแฟได้คราวละมากๆ ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพที่ดีของเมล็ดกาแฟไว้ให้ได้มากที่สุด แต่จากการรวบรวมข้อมูลวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ

ต้นแบบพบว่า บางเครื่องประสบผลสำเร็จ บางเครื่องยังต้องการการแก้ไขในอีกหลายจุด ด้วยเหตุนี้ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการคั่วเมล็ดกาแฟ และแนวความคิดที่ทำให้เกิด “นวัตกรรมใหม่ของการคั่ว และทำเย็นเมล็ดกาแฟในระบบปิดโดยอาศัยกัลความร้อน” จึงสำเร็จขึ้นมาได้อย่างเป็นรูปธรรม และนำเสนอในบทความทางวิชาการฉบับนี้ เพื่อเป็นการแนะนำให้ผู้อ่านรู้จักเมล็ดกาแฟคั่ว ความสำคัญของการคั่วเมล็ดกาแฟ ตลอดจนเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ของการออกแบบและสร้าง เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่ได้มีผู้คิดค้นวิจัยกันมา โดยสิ่งที่สำคัญที่สุดคือเป็นการนำเอาความรู้ทางด้าน วิศวกรรมในเรื่องการถ่ายเทความร้อนมาใช้ในการลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่ยัง ไม่สมบูรณ์ต่อไป

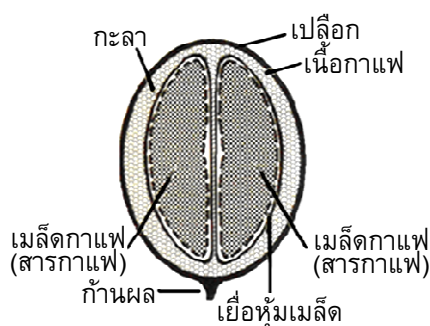


รูปที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าเมล็ดกาแฟ [1]

2. ทำความรู้จักกับเมล็ดกาแฟ การคั่วและการทำเย็นเมล็ดกาแฟ

ผลกาแฟ (Coffee fruit) คือ ลูกของต้นกาแฟ โดยทั่วไปจะมีความยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร ผลที่แก่เต็มที่แล้วมีรูปร่างค่อนข้างรี (Oval-elliptic shape) มีก้านผลสั้น ผลดิบมีสีเขียว เมื่อสุกแล้ว จะมีสีเหลือง ส้ม หรือแดงถึงแดงเข้ม ขึ้นกับพันธุ์ของต้นกาแฟ แต่ไม่ว่าผลสุกจะเป็นสีอะไรก็ตาม เมื่อตากแห้งแล้วก็จะเปลี่ยนเป็นสีดำเหมือนกันหมด ส่วนประกอบและลักษณะภายในของผลกาแฟ สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการผ่าผลกาแฟตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ซึ่งประกอบด้วย (1) ก้านผล (Stalk pedicel) ส่วนปลายสุดของเปลือก (2) เปลือก (Skin of cherry) เป็นผิวนอกของผลกาแฟ (3) เนื้อกาแฟ (Pulp) เนื้อบางๆ สีเหลือง อาจมีรสหวานเล็กน้อยเมื่อผลสุก (4) กะลา (Parchment) เป็นส่วนที่บางแต่แข็ง ทำหน้าที่หุ้มเมล็ดในเอาไว้ ปรกติจะมีสองเมล็ดต่อหนึ่งผล เมื่อปลอกเปลือกผลกาแฟออกแล้วนำมาหมักและตากแห้งจะเรียกว่า “กาแฟกะลา” (Coffee parchment) (5) เยื่อหุ้มเมล็ด (Silver skin) เยื่อบางๆ ที่หุ้มเมล็ดกาแฟไว้ และมีคัพพะ (Embryo) เล็กๆ ติดอยู่ใกล้ฐานของเมล็ด เมื่อมีการสีกะลาหรือการเอาเยื่อหุ้มเมล็ดออก จะพบเมล็ดส่วนที่อยู่ในสุดของผลกาแฟ ซึ่งก็คือส่วนของ (6) เมล็ดกาแฟ (Coffee bean) หรือเรียกอีกอย่างว่า

สารกาแฟ โดยทั่วไปเมล็ดกาแฟจะมีสีเขียวอมฟ้า รูปร่างค่อนข้างกลมรี ความยาวของเมล็ดประมาณ 8.5 – 12.5 มิลลิเมตร ผลหนึ่งมีสองเมล็ดประกบอยู่เหมือนไขผ่าซีก และที่ด้านในหรือด้านแบนของเมล็ดจะมีร่องอยู่ตรงกลาง เมล็ดละหนึ่งร่อง ส่วนด้านนอกนั้นก็มีลักษณะโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) เมล็ดกาแฟเป็นส่วนที่นำไปคั่ว บด และนำมาชงดื่ม หรือนำมาแปรรูปเป็นกาแฟผงสำเร็จรูปได้ โดยทั่วไปผลกาแฟสดประมาณ 5 – 6 กิโลกรัม จะให้เมล็ดกาแฟ 1 กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของกาแฟแต่ละสายพันธุ์ [2]



(ก) ส่วนประกอบของผลกาแฟ [2]



(ข) เมล็ดกาแฟ [3]

รูปที่ 2 ผลและเมล็ดกาแฟ

เนื่องจากเมล็ดกาแฟหลังจากผ่านกระบวนการสีเอากะลาและเยื่อหุ้มเมล็ดออกแล้วจะมีกลิ่นเหม็นเขียว แต่เมื่อผ่านกระบวนการคั่วแล้วจะให้กลิ่นและรสที่เป็นลักษณะเฉพาะของกาแฟ ดังนั้นก่อนบริโภคเมล็ดกาแฟ จำเป็นต้องนำเมล็ดกาแฟมาคั่วเพื่อให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีสีน้ำตาล มีกลิ่นหอม และมีรสชาติกลมกล่อมตามต้องการ พฤติการคั่วเมล็ดกาแฟจะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 – 250 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาคั่วประมาณ 15 – 20 นาที ขึ้นอยู่กับระดับการคั่วเมล็ดกาแฟที่ต้องการ โดยที่สีและร้อยละของน้ำหนักแห้งที่ลดลงของเมล็ดกาแฟคั่วที่ระดับต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1 ระหว่างขั้นตอนการคั่วเมล็ดกาแฟ นอกจากกลิ่น สี และรสชาติจะเปลี่ยนไปจนมีลักษณะเฉพาะตัวแล้ว ยังเกิดสารหอมระเหยและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 87 ของก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด [4] ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้เกิดขึ้นในระหว่างการคั่วทั้ง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกของการคั่วซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการสูญเสียน้ำหนักจากเมล็ดกาแฟในประมาณร้อยละ 12 ขั้นตอนนี้ใช้เวลามากถึงร้อยละ 80 ของช่วงเวลาทั้งหมดในการคั่วเมล็ดกาแฟ ระหว่างขั้นตอนนี้สีของเมล็ดกาแฟจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลอ่อน และช่วงที่สองซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis reaction) สังเกตได้โดยเมล็ดจะขยายตัวร้อยละ 40–60 [5] สีของเมล็ดกาแฟจะเข้มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีน้ำมันระเหย (Oily smoke) ออกมา มีเสียงแตก (Crack) ของเมล็ดเกิดขึ้น

มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีอย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดสารประกอบระเหยจำนวนมาก เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นระหว่างการคั่วเมล็ดกาแฟ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาหลายแบบ เช่น ปฏิกิริยาการสลายขยายตัวแบบสเตอร์เกอร์ (Strecker degradation) ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของน้ำตาล (Pyrolysis of sugar) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ดังนั้น สารให้กลิ่นและรสของกาแฟที่ถูกกักเก็บไว้ในเมล็ดกาแฟจะแพร่ออกมาอย่างช้าๆ พร้อมกับการระเหยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หากปล่อยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการแลกเปลี่ยนกับอากาศภายนอกห้องคั่ว จะทำให้กาแฟสูญเสียกลิ่นและรสชาติที่ดี และอาจมีกลิ่นเหม็นหืนเกิดขึ้น

เมื่อคั่วเมล็ดกาแฟได้สีตามต้องการแล้ว ต้องทำให้กาแฟเย็นลงโดยเร็วที่สุด เนื่องจากธรรมชาติของเมล็ดกาแฟก็เหมือนกับไม้ที่เอาไปเผาไฟ ซึ่งถ้าไม่ทำให้เย็นลงโดยเร็วที่สุด การไหม้จะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไหม้ดำกลายเป็นถ่าน ดังนั้นหลังจากการคั่วเมล็ดกาแฟเสร็จแล้ว ต้องมีกระบวนการลดความร้อนให้แก่เมล็ดกาแฟคั่ว ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การทำเย็นเมล็ดกาแฟ (Cooling or tempering) นอกจากนี้เมล็ดกาแฟคั่วสามารถสูญเสียคุณภาพได้ถึงร้อยละ 10 ต่อการเก็บรักษาโดยการวางไว้ในที่โล่งแจ้งทุกๆ 24 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง [4] ดังนั้นเมื่อเมล็ดกาแฟมีอุณหภูมิลดลงจึงควรนำมาบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ปิดสนิททันทีที่เป็นอันแล้วเสร็จกระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟ

การคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อใช้ในครัวเรือนอาจทำได้ง่าย ๆ โดยการคั่วในกระทะ หรือในภาชนะปิดตั้งบนเตาไฟ แต่หากเป็นการคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อการจำหน่ายหรือเป็นการแปรรูปในเชิงอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งต้องการการคั่วเมล็ดกาแฟคราวละมากๆ การคั่วเมล็ดกาแฟในลักษณะนี้จึงต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า “เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ” ทำหน้าที่คั่วเมล็ดกาแฟดิบเพื่อให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีสีกลิ่น และรสชาติตามต้องการ และสามารถคั่วเมล็ดกาแฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวกสบาย ใช้งานง่าย ควบคุมคุณภาพของเมล็ดกาแฟคั่วได้ตามต้องการ ประหยัดเวลา ประหยัดแรงงานควบคุม และประหยัดพลังงานที่ใช้ในการคั่วเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ 1 สีและร้อยละของน้ำหนักแห้งที่ลดลงของเมล็ดกาแฟคั่ว [4,6]

ระดับการคั่ว	สีของเมล็ดกาแฟ	ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่ลดลง
อ่อน (Light)		1 – 5
ปานกลาง (Medium)		5 – 8
เข้ม (Dark)		8 – 12
เข้มมาก (Very dark)		มากกว่า 12

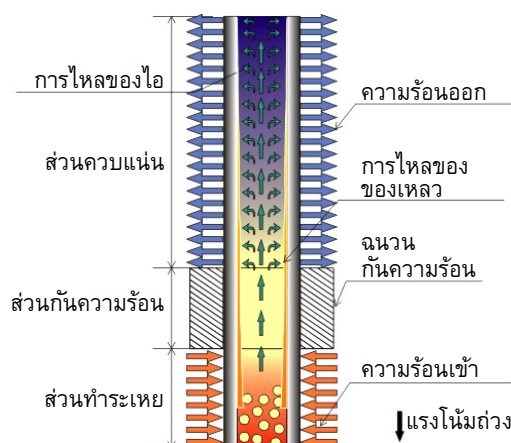
3. ปัญหาของเครื่องคว่ำเมล็ดกาแฟในปัจจุบัน และแนวคิดใหม่กับการคว่ำและทำเย็นเมล็ดกาแฟในระบบปิด

เครื่องคว่ำเมล็ดกาแฟที่มีขายในปัจจุบันมีทั้งข้อดี ข้อเสีย และปัญหาในการใช้งานที่ต่างกัน สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องคว่ำเมล็ดกาแฟได้ว่า การคว่ำเมล็ดกาแฟโดยการสัมผัสกับผิวโลหะโดยตรงจะเกิดปัญหา คือ เมล็ดกาแฟได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอทั่วถึงกันทุกเมล็ด เพราะพื้นผิวของเมล็ดกาแฟไม่สามารถสัมผัสกับผิวของภาชนะที่ใช้ในการคว่ำได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของความร้อนให้คงที่ได้ ส่วนวิธีการคว่ำเมล็ดกาแฟโดยการนำอากาศร้อนมาสัมผัสกับเมล็ดกาแฟโดยตรง แม้ว่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด [7] เนื่องจากเมล็ดกาแฟจะได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึงกันทุกเมล็ด แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ การนำอากาศร้อนมาสัมผัสกับเมล็ดกาแฟโดยตรงจะทำให้เมล็ดกาแฟคว่ำที่ออกมานั้นมีกลิ่นของแก๊สเจือปนอยู่ด้วย ส่งผลให้เมล็ดกาแฟคว่ำมีกลิ่นและรสชาติที่ด้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น [7-15] เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว การคว่ำและทำเย็นเมล็ดกาแฟต้องทำในระบบปิด กล่าวคือห้องคว่ำเมล็ดกาแฟต้องเป็นภาชนะปิดสนิท แก๊สร้อนและอากาศภายนอกไม่สามารถเข้าไปในห้องคว่ำได้ และที่สำคัญห้องคว่ำต้องทำหน้าที่เป็นห้องทำเย็นได้ทันทีเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการคว่ำเมล็ดกาแฟ เพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนในการเปิดห้องคว่ำเพื่อถ่ายเมล็ดกาแฟคว่ำออกมาทำเย็นภายนอก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เมล็ดกาแฟจะสัมผัสกับอากาศภายนอกและทำให้เมล็ดกาแฟคว่ำสูญเสียกลิ่นหอมไป การที่จะทำให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ห้องคว่ำในขั้นตอนการคว่ำและให้ความร้อนในเมล็ดกาแฟที่คว่ำเสร็จแล้วถ่ายเทออกมานอกห้องคว่ำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพนั้น ต้องอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เรียกว่า “กาลักความร้อน” (Thermosyphon)

4. กาลักความร้อนและการออกแบบ

กาลักความร้อน (Thermosyphon) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนออกจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยสารทำงาน (Working fluid) เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โครงสร้างภายในของกาลักความร้อนจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนทำระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน โดยความร้อนจะถ่ายเทเข้ามาในกาลักความร้อนที่ส่วนนี้ ทำให้สารทำงานภายในเกิดการระเหยกลายเป็นไอ (2) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) เป็นส่วนที่สารทำงานเคลื่อนที่ผ่านไป โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกระหว่างกาลักความร้อนและสิ่งแวดล้อม และ (3) ส่วนควบแน่น (Condenser section) เป็นส่วนที่สัมผัสกับแหล่งรับความร้อน โดยที่สารทำงานเกิดการควบแน่นจากไอกลายเป็นของเหลว ขณะเดียวกันความร้อนจะถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมที่ส่วนนี้ด้วย การทำงานของกาลักความร้อนจะอาศัยสารทำงานซึ่งเป็นของเหลวจำนวนหนึ่งที่บรรจุอยู่ใน

กัลกความร้อนที่ได้มีการทำให้เป็นสญญากาศและปิดผนึกไว้เป็นอย่างดี เมื่อให้ความร้อนที่ปลายด้านล่างของกัลกความร้อนซึ่งเป็นส่วนทำระเหย จะทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปที่ปลายส่วนบนของกัลกความร้อนซึ่งเป็นส่วนควบแน่นของกัลกความร้อน เมื่อไอลเกิดการควบแน่น ความร้อนจะถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อม จากนั้นของเหลวควบแน่น (Condensate) จะไหลกลับสู่ปลายด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและการควบแน่นที่มีค่าสูงมาก ทำให้กัลกความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนปริมาณมากจากปลายหนึ่งไปสู่อีกปลายหนึ่งได้ โดยมีความแตกต่างอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย จากหลักการทํางานของท่อความร้อนเห็นได้ว่าข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญของกัลกความร้อน คือ เนื่องจากของเหลวควบแน่นจะไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยได้ด้วยแรงโน้มถ่วง ดังนั้นส่วนทำระเหยจะต้องอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเท่านั้น [16] โครงสร้างและการทำงานของกัลกความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3



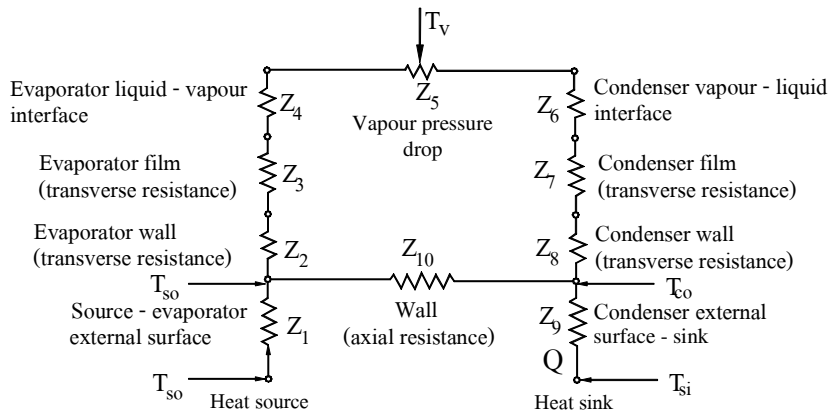
รูปที่ 3 โครงสร้างและการทำงานของกัลกความร้อน [17]

กัลกความร้อนมีลักษณะพิเศษต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ คือ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ เมื่อแหล่งรับความร้อนและระบายความร้อนอยู่ห่างกันมากๆ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมากจึงสามารถถ่ายเทปริมาณความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งโดยมีอุณหภูมิแตกต่างเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้สามารถควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อนของกัลกความร้อนให้มีความคงที่ได้ตลอดเวลา และมีช่วงอุณหภูมิทำงานที่สามารถใช้ในการทำความเย็นได้เหมาะสม คือช่วงอุณหภูมิทำงานระหว่าง 60 – 300 องศาเซลเซียส หากใช้น้ำเป็นสารทำงาน

ก่อนสร้างและนำกัลกความร้อนไปใช้งานจริง จำเป็นต้องมีการออกแบบกัลกความร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อน ($\dot{Q}$) ที่กัลกความร้อนขนาดหนึ่งๆ สามารถถ่ายเท

ได้ เริ่มต้นจากการกำหนดอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นที่ต้องการลงในความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน ($T_e - T_c$) และค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z_{total}) ดังสมการ

$$Z_{total} = (T_e - T_c) / \dot{Q} \quad (1)$$



รูปที่ 4 ความต้านทานความร้อนย่อยในกาลักความร้อน [18]

จากนั้นหาความต้านทานความร้อนรวมในกาลักความร้อนซึ่งเกิดจากความต้านทานความร้อนย่อยที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของกาลักความร้อน [18] ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานความร้อนรวม จำเป็นต้องมีการสมมติค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ($\dot{Q}$) ที่ยังไม่ทราบค่าก่อน หลังจากหาคำนวนหาความต้านทานความร้อนรวมได้แล้ว ให้นำมาแทนลงในสมการข้างต้นเพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนใหม่ ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อแทนความต้านทานความร้อนรวมแล้วค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนใหม่ที่ได้มีค่าเท่ากับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเก่าที่ได้จากรอบก่อนหน้านี้ ซึ่งเทคนิคการหาคำตอบในลักษณะนี้เรียกว่า การลองผิดลองถูก (Trial and error) ความต้านทานความร้อนย่อยแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จากสมการในตารางที่ 2 ท้ายที่สุดในกรณีที่ $Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8) > 20$ ความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2)$$

$$\text{แต่ถ้าไม่เป็นไปสมการข้างต้น } Z_{total} = \left[(Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8)^{-1} + Z_{10}^{-1} \right]^{-1} + Z_1 + Z_9 \quad (3)$$

ตารางที่ 2 ความต้านทานความร้อนย่อยในกาลักความร้อน [18]

ความต้านทานความร้อนย่อย	สมการ
ความต้านทานที่เกิดจากการพาความร้อน โดยรอบผนังภายนอกท่อ (Z_1 และ Z_9)	$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} A_{eo}} \quad (4)$ $Z_9 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \quad (5)$
ความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำ ความร้อนผ่านผนังกาลักความร้อน (Z_2 และ Z_8)	$Z_2 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi L_e k_e} \quad (6)$ $Z_8 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi L_c k_c} \quad (7)$
ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจาก แอ่งของเหลว (Z_{3p})	$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (8)$ $\Phi_3 = 0.325 \frac{\rho_l^{0.5} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L \mu^{0.1}} \left[\frac{p_v}{p_a} \right]^{0.23} \quad (9)$
ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจาก ฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลว ในส่วนทำระเหย (Z_{3f})	$Z_{3f} = \frac{c \dot{Q}^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (10)$ $\Phi_2 = \left(\frac{L k_l \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (11)$
เงื่อนไขในการพิจารณาเลือกค่า Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3	ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ แล้ว $Z_3 = Z_{3p}$ (12) ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ แล้ว $Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F) \quad (13)$
ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจาก ฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนควบแน่น (Z_7)	$Z_7 = \frac{c \dot{Q}^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_c \Phi_2^{4/3}} \quad (14)$
ความต้านทานของกาลักความร้อน ตามแนวความยาวท่อ (Z_{10})	$Z_{10} = \frac{0.5 L_e + L_a + 0.5 L_c}{A_x k_{tube}} \quad (15)$
ความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของ สารทำงานในส่วนทำระเหยและในส่วนควบแน่น (Z_4 และ Z_6) และความต้านทานจากความดัน ที่ลดลงในส่วนควบแน่น (Z_5)	มีค่าน้อยมากจนไม่นำมาคิดในการคำนวณ

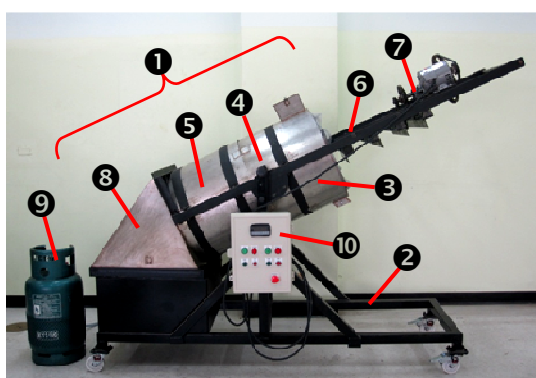
นำค่าความต้านทานความร้อนรวมที่คำนวณได้ไปแทนในสมการที่ (1) จะได้ค่าความร้อน ($\dot{Q}$) ค่าใหม่ ให้ทำการลองผิดลองถูกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าความร้อนที่ถูกต้อง

5. เครื่องคว้เมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกัลกความร้อน

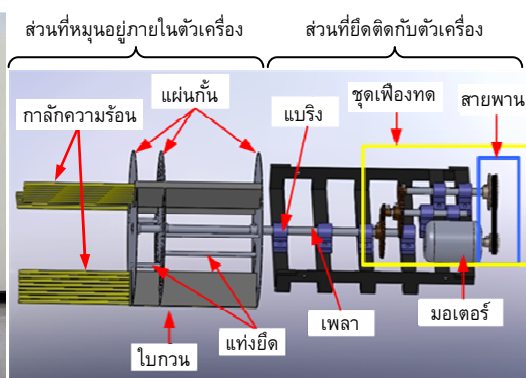
การออกแบบเครื่องคว้เมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกัลกความร้อนจะอยู่ภายใต้แนวความคิดที่ต้องการให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟอย่างทั่วถึง สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่สามารถเปลี่ยนขั้นตอนทำงานจากการคว้เป็นการทำเย็นได้โดยไม่ต้องถ่ายเมล็ดกาแฟออกจากห้องคว้ และสิ่งสำคัญที่สุดคือต้องเป็นระบบปิดเพื่อรักษากลิ่นและรสชาติของเมล็ดกาแฟ ตลอดจนเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการคว้เมล็ดกาแฟอีกด้วย การออกแบบเครื่องคว้เมล็ดกาแฟเริ่มต้นจากการกำหนดให้สามารถคว้เมล็ดกาแฟได้ครั้งละ 5 – 8 กก. เลือกใช้สแตนเลสสตีล (Stainless steel) เบอร์ 440 เป็นวัสดุที่ใช้สร้างเครื่อง เนื่องจากไม่เกิดสนิมเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความร้อน และสามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์สำหรับปรุงอาหารได้อย่างปลอดภัย จากนั้นออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องคว้เมล็ดกาแฟดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้ (1) ตัวเครื่อง ออกแบบเป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ยาว 90 ซม. ติดตั้งอยู่บน (2) แท่นเครื่องที่สามารถปรับมุมเอียงการทำงานของเครื่องคว้เมล็ดกาแฟได้ ภายในตัวเครื่องแบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่ (3) ห้องคว้ มีความยาว 35 ซม. ใช้เป็นส่วนที่บรรจุเมล็ดกาแฟลงไปเพื่อคว้และทำเย็น ที่ส่วนนี้มีช่องกระจกทนความร้อนเพื่อใช้สังเกตสีของเมล็ดกาแฟขณะคว้ และมีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ (4) ห้องกระฟี่ มีความยาว 10 ซม. ใช้เป็นส่วนรองรับกระฟี่ที่หลุดออกจากเมล็ดกาแฟขณะคว้ สามารถถ่ายกระฟี่ออกจากส่วนนี้ได้ทางช่องที่อยู่ด้านใต้ของส่วนนี้ และ (5) ห้องถ่ายเทความร้อน มีความยาว 45 ซม. ใช้เป็นส่วนที่กัลกความร้อนจะรับความร้อนจากแก๊สร้อนในขณะคว้หรือเป็นส่วนที่กัลกความร้อนคายความร้อนสู่อากาศในขณะทำเย็น กันทั้งสามห้องดังกล่าวให้แยกจากกันด้วยแผ่นกันที่มีขนาดพอดีกับตัวเครื่องภายใน โดยที่แผ่นกันทั้งหมดติดตั้งอยู่บน (6) เพลาเหล็กขนาด 1 นิ้ว ซึ่งต่อกับ (7) ชุดเกียร์ทดความเร็วรอบและมอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า (8) ห้องเผาไหม้ ใช้เป็นส่วนสร้างแก๊สร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่กัลกความร้อน โดยใช้ (9) แก๊สหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas, LPG) เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมีราคาต่อหน่วยความร้อนที่ถูกที่สุด และ (10) เครื่องควบคุมการทำงานของเครื่องคว้เมล็ดกาแฟ ตลอดจนหน้าจอแสดงอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟภายในห้องคว้

กัลกความร้อนซึ่งถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องคว้เมล็ดกาแฟ ทำจากท่อทองแดงเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงที่สุดและไม่ทำปฏิกิริยากับสารทำงานที่เป็นน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ยาว 85 ซม. เชื่อมปิดหัวและท้าย ดูดอากาศภายในออกแล้วบรรจุน้ำกลั่น 35 ลบ.ซม. เป็นสารทำงาน จากการคำนวณพบว่าต้องใช้กัลกความร้อนทั้งหมด

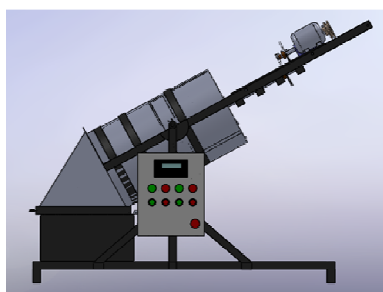
24 ท่อ ดังนั้นจึงออกแบบให้กัลกความร้อนทำหน้าที่เป็นใบกวนเมล็ดกาแฟ ซึ่งมีทั้งหมด 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยกัลกความร้อน 8 ท่อ หุ้มกัลกความร้อนเฉพาะส่วนที่อยู่ในห้องคั่วด้วย สแตนเลสสตีล เบอร์ 440 เพื่อไม่ให้เมล็ดกาแฟสัมผัสกับทองแดงโดยตรง นำใบกวนสอดทะลุและ ยึดติดกับแผ่นกัน โดยที่แต่ละชุดติดตั้งห่างกัน 120 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) จากการติดตั้งใน ลักษณะนี้ เมื่อเริ่มเดินเครื่อง ใบกวนซึ่งสร้างจากกัลกความร้อนจะหมุนไปพร้อมกับแผ่นกันและ เฟลาด้วยความเร็ว 17 รอบต่อนาที ซึ่งอยู่ในช่วงความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการคั่วเมล็ดกาแฟ [9]



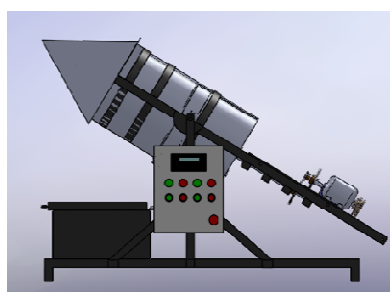
(ก) ส่วนประกอบ



(ข) อุปกรณ์



(ค) ขณะคั่วเมล็ดกาแฟ



(ง) ขณะทำเย็นเมล็ดกาแฟ

รูปที่ 5 เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกัลกความร้อน

จากการออกแบบเห็นได้ว่า ตัวเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟสามารถปรับให้เอียงขึ้นและลงได้ ดังนั้น ในขณะคั่วเมล็ดกาแฟ ต้องปรับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟให้ห้องคั่วอยู่สูงกว่าห้องถ่ายเทความร้อนโดยมี ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) เนื่องจากกัลกความร้อนทำงานได้เมื่อแหล่งให้ความร้อนอยู่ต่ำกว่า แหล่งรับความร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้แหล่งให้ความร้อนคือแก๊สร้อน และแหล่งรับความร้อนคือเมล็ด กาแฟ ในทางกลับกันขณะทำเย็นเมล็ดกาแฟ ต้องปรับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟให้ห้องคั่วอยู่ต่ำกว่าห้อง ถ่ายเทความร้อน โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) เนื่องจากในขั้นตอนการทำเย็น ความร้อนที่

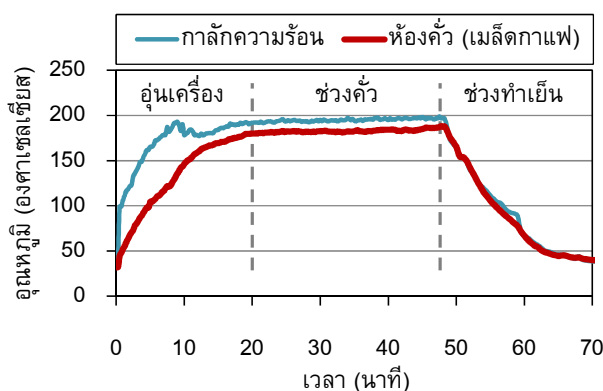
สะสมอยู่ในเมล็ดกาแฟจะกลายเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่กากความร้อน ดังนั้นกากความร้อนจึงถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดกาแฟแล้วระบายสู่อากาศที่อยู่ในห้องถ่ายเทความร้อนต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เมล็ดกาแฟสามารถอยู่ภายในภาชนะปิดได้ตลอดเวลาทั้งช่วงคั่วและทำเย็นโดยไม่ต้องมีการถ่ายเมล็ดกาแฟคั่วออกมาภายนอกเครื่อง ผลส่งผลให้เมล็ดกาแฟคั่วที่ได้จากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟในระบบปิดปราศจากกลิ่นแก๊สร้อนเจือปนและไม่สูญเสียรสชาติที่ดีไป ซึ่งถือเป็นจุดเด่นที่สำคัญของการนำกากความร้อนมาใช้ในเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดเครื่องนี้

ขั้นตอนการใช้งานเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกากความร้อนไม่แตกต่างจากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟทั่วไปมากนัก เริ่มจากปรับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟให้ห้องคั่วอยู่สูงกว่าห้องถ่ายเทความร้อนแล้วจึงใส่เมล็ดกาแฟลงในห้องคั่ว ปิดฝาให้สนิท จากนั้นเปิดแก๊สและจุดหัวเผาในห้องเผาไหม้ให้ลุกเป็นไฟ เดินมอเตอร์ไฟฟ้าให้เพลาลูกและใบกววนหมุน ตรวจดูสีและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งเมล็ดกาแฟมีสีตามต้องการ จากนั้นปิดแก๊สและปรับเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟให้ห้องคั่วอยู่ต่ำกว่าห้องถ่ายเทความร้อนเพื่อให้กากความร้อนนำความร้อนจากเมล็ดกาแฟทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมจนกระทั่งอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟลดลงตามต้องการ แล้วจึงเปิดฝาเพื่อถ่ายเมล็ดกาแฟที่คั่วและทำเย็นแล้วออกมาเพื่อรอการบรรจุหรือนำไปบริโภคต่อไป

6. การทดสอบเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ

การทดสอบเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟแบ่งเป็นสองส่วน คือ การทดสอบเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยการเปรียบเทียบรสชาติและกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่ว และการทดสอบเชิงปริมาณของตัวเครื่องโดยการเปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องคั่วเทียบกับเวลา การทดสอบทั้งหมดกระทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกากความร้อนและเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟต้นแบบที่สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ซึ่งเป็นระบบเปิด โดยใช้เมล็ดกาแฟจากแหล่งปลูกเดียวกัน จากการเปรียบเทียบรสชาติโดยการนำเมล็ดกาแฟคั่วที่ได้ทำการคั่วตรงตามมาตรฐานแล้วนั้น มาทำการบดแล้วนำไปชงให้เป็นกาแฟดำชิมรสชาติของกาแฟดำที่ได้จากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิด ผลปรากฏว่ารสชาติของกาแฟดำจะออกขม มัน และไม่มีรสเปรี้ยวมาเจือปน ในขณะที่กาแฟดำที่ได้จากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบเปิดมีรสชาติขมน้อยกว่าเล็กน้อย และเปรี้ยวอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าระบบปิดที่ใช้ในการคั่วเมล็ดกาแฟช่วยลดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลจากอากาศมาสัมผัสกับเมล็ดกาแฟในขณะที่คั่วได้เป็นอย่างดี [4] ส่วนการเปรียบเทียบกลิ่น พบว่าเมล็ดกาแฟคั่วที่ได้จากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดมีกลิ่นหอมกว่าเมล็ดกาแฟคั่วที่ได้จากเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบเปิด แสดงให้เห็นว่าระบบปิดที่นำมาใช้มีประโยชน์ในการรักษากลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วให้อยู่ภายในห้องคั่ว และยังป้องกันไม่ให้กลิ่นของแก๊สมาปะปนกับกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วได้เป็นอย่างดี ส่วนการเปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนใช้วิธีการเดียวกับการเปรียบเทียบที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม คือ การพิจารณาเปรียบเทียบจาก

ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการผลิตสินค้าชนิดเดียวกัน โดยที่ไม่พิจารณาขั้นตอน และกระบวนการผลิต [19] โดยที่ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ที่ใช้คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแก๊สหุงต้มที่ใช้และน้ำหนักเมล็ดกาแฟคั่วที่เหลือหลังเสร็จกระบวนการทั้งหมด จากการทดสอบพบว่า ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ของเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบปิดโดยอาศัยกัลกความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.42 ในขณะที่ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ของเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟระบบเปิดมีค่าเท่ากับ 0.44 แสดงให้เห็นว่าการคั่วเมล็ดกาแฟในระบบปิดสามารถลดการใช้พลังงานลงได้จริง และในส่วนของ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องคั่วพบว่าอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการคั่ว ในช่วงทำเย็นกัลกความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดกาแฟด้วยอัตราการทำเย็นเท่ากับ 7.3 องศาเซลเซียสต่อนาที การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องคั่วแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องคั่วเทียบกับเวลา

7. สรุปผลและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

แม้ว่าแนวความคิดเกี่ยวกับการคั่วและทำเย็นในระบบปิดโดยอาศัยกัลกความร้อนด้วยเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่นำเสนอในบทความนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ เมล็ดกาแฟคั่วที่มีกลิ่นหอม ไม่มีกลิ่นเหม็นของแก๊สร้อนมาเจือปน มีรสชาติขม มัน และไม่เปรี้ยว มีสีที่สม่ำเสมอทั่วถึงกันทุกเมล็ด ตลอดจนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ที่ลดลง และอุณหภูมิของห้องคั่วคงที่ แต่อย่างไรก็ตามตัวเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟที่ถือเป็นนวัตกรรมใหม่นี้ยังคงต้องการการพัฒนาให้มีขนาดที่กะทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายไปใช้งานได้ทุกที่โดยสะดวก มีการติดตั้งระบบควบคุมปริมาณแก๊สหุงต้มแบบอัตโนมัติโดยอาศัยอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟในห้องคั่วเป็นสัญญาณควบคุม เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตั้งอุณหภูมิการคั่วได้สะดวกรวดเร็วขึ้น และติดตั้งระบบตัดการจ่ายแก๊สเมื่อทำการคั่วครบ

ตามเวลาที่ตั้งไว้ เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของเมล็ดกาแฟคั่วให้เท่ากันระหว่างการคั่วในแต่ละครั้งและช่วยป้องกันไม่ให้เมล็ดกาแฟมีสีเข้มเกินความต้องการ

สัญลักษณ์และตัวกำกับ

สัญลักษณ์ - ความหมาย, หน่วย	ตัวกำกับล่าง - ความหมาย
C_p ความจุความร้อนจำเพาะ, จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน	a บรรยากาศ
D เส้นผ่านศูนย์กลาง, เมตร	a ส่วนกันความร้อน
F อัตราส่วนการเติม	c ส่วนควบแน่น
h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน	e ส่วนทำระเหย
k สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน	f ฟิล์มของเหลว
L ความร้อนแฝง, จูลต่อกิโลกรัม	i ภายใน
V ปริมาตร, ลูกบาศก์เมตร	l ของเหลว
Z ความต้านทานความร้อน, เคลวินต่อวัตต์	o ภายนอก
μ ความหนืดจลน์, กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที	p แอ่งของเหลว
ρ ความหนาแน่น, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	v ไอน้ำ
	x หน้าตัดขวางของผนังท่อ

กิตติกรรมประกาศ

บทความทางวิชาการฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์) ผู้แต่งจึงขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันอาหารไทย. (2554). สถิตินำเข้า-ส่งออก อาหารไทย. กรุงเทพฯ.
- [2] กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ, ณรงค์ชัย ปัญญานนทชัย, และ ธนรัฐ สวัสดิชัย. (2547). คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ดอกหญ้ากรุ๊ป.
- [3] All About Good Coffee. (2011). **Coffee Bean** [Online]. Available from <http://allaboutgoodcoffee.com>.

- [4] Anderson, B.A., Shimoni, E., Liardon, R., and Labuza, T.P. (2003). "The Diffusion Kinetics of Carbon Dioxide in Fresh Roasted and Ground Coffee". **Journal of Food Engineering**. 59(1) : 71-78.
- [5] Clarke, R.J. and Macrae, R. (1987). **Coffee Vol. 2: Technology**. London : Elsevier Applied Science.
- [6] อินทนนท์ กาแฟ. (2554). การคั่วกาแฟ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.chiangmaicoffee.com>.
- [7] อมร ทวีชั้นสกุล และ วันวิสาข์ ศรีขำ. (2545). การพัฒนาเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] จารุวัฒน์ มงคลพรรค และ สายัณห์ ขาวสะอาด. (2541). "เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ". **ข่าวสารกองเกษตรวิศวกรรม**. 3-5.
- [9] จุฑาทิพย์ จิตญาติ และ ชลธิชา สมชิต. (2544). การศึกษาและออกแบบเครื่องคั่วกาแฟ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [10] ภูริพงศ์ ศรีจันทร์, ธวัชชัย แซ่ตั้ง, และ สาคร แก้วกล้า. (2544). **เครื่องคั่วกาแฟ**. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [11] ภาคภูมิ สมบุญ, สุชาติ สุวรรณละมัย, สุเมธ คูหะมณี, และ อมร สวัสดิ์สัน. (2546) **เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ**. อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล (ออกแบบเครื่องกล). ภาควิชาเครื่องกล. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [12] พรเทพ ปัญญาพินิจนุกร, นายรัตพล ศรีโสภณ, และ นายอัศวิน วณิชยาพิบูล. (2548). **เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟ**. อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง (เครื่องต้นกำลังอุตสาหกรรม). ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [13] นุชกานต์ พุ่มแก้ว, พร้อมพร ชุมทรัพย์, ศิวพร แสงกระจ่าง, และ พัทธโรบล โพธิบุญมา. (2551). **เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟต้นแบบ**. อุตสาหกรรมเกษตรบัณฑิต. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] เสนอ ศรีคง. (2552). **เครื่องคั่วเมล็ดกาแฟต้นแบบ**. ชุมพร : กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรหนองแซะสามัคคี.

- [15] Nagaraju, V.D., Murthy, C.T., Ramalakshmi, K., and Srinivasa, P.N. (1997). "Studies on Roasting of Coffee Beans in a Spouted Bed". **Journal of Food Engineering**. 31(2) : 263-270.
- [16] ประดิษฐ์ เทอดทูล. (2538). **กัลป์ความร้อน**. เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [17] Laboratory of Energy Conversion Engineering and Energy Technology. (2011). **Thermosyphon** [Online]. Available from <http://www.lepten.ufsc.br>.
- [18] Engineering Science Data Unit. (1981). **Item Number 81038**. London.
- [19] โครงการพัฒนาบุคลากรการอนุรักษ์พลังงานจากกรณีตัวอย่างในอุตสาหกรรมที่ประสบความสำเร็จ. (2552). **คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพมหานคร : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.



ประวัติผู้เขียน ดร. นิติ คำเมืองลือ ตำแหน่ง อาจารย์ สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200 โทรศัพท์: 0-5394-4144 ต่อ 980 โทรสาร: 0-5322-6014 E-mail: pom171@hotmail.com งานวิจัยที่สนใจ: เทคโนโลยีทำความร้อน การประยุกต์ใช้ทำความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ทำความร้อน ท่อความร้อนแบบสั่นวรอบ สภาวะวิกฤตของการเดือดและการไหลสองสถานะ การอนุรักษ์พลังงานและเทคโนโลยียานยนต์