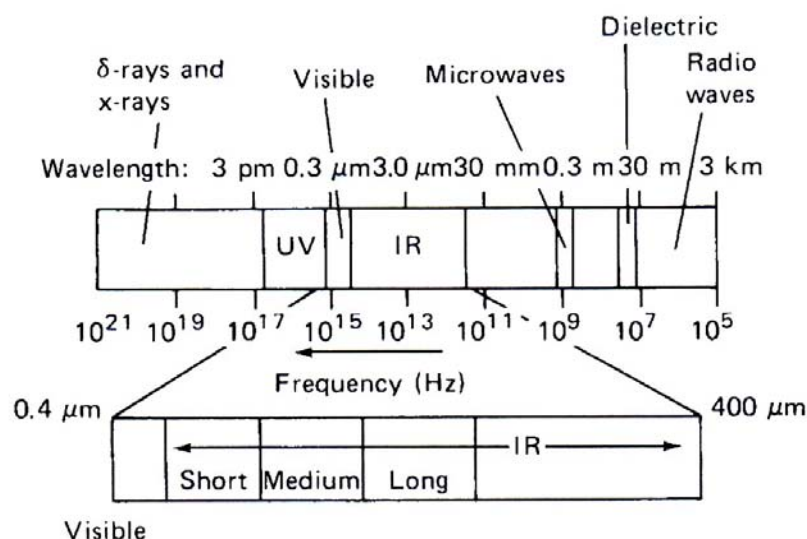


การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร (Microwave in Food Processing)

บทนำ

การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ การลวก (blanching) การทำให้สุก (cooking) การทำแห้ง (drying) การพาสเจอร์ไรส์ (pasteurizing) การสเตอริไลส์ (sterilizing) การละลายน้ำแข็ง (thawing) การอบ (baking) รวมทั้งกระบวนการอื่นๆ เช่น การควบคุมจุลินทรีย์ การยับยั้งเอนไซม์และการควบคุมแมลง เป็นต้น (Mudgett, 1986 ; Rosenberg and Boegl, 1987) และในปัจจุบันนี้เนื่องจากกระแสความต้องการของผู้บริโภคทางด้านอาหารได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยผู้บริโภคต้องการอาหารที่มีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับของสด มีคุณภาพสูง มีความสะดวกสบายในการเตรียม อีกทั้งมีอายุการเก็บรักษาอย่างเพียงพอ โดยเฉพาะอาหารที่ปรุงสุกได้อย่างรวดเร็ว (quick cooking dishes) ที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในสังคมปัจจุบัน จึงทำให้มีการศึกษาการใช้ไมโครเวฟเพื่อดัดแปลงและปรับปรุงกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยเฉพาะในการให้ความร้อนและได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปอาหารชนิดต่าง ๆ เช่น อาหารแปรรูปขั้นต้น (minimally processed foods) ทั้งนี้เนื่องจากไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นผลให้เกิดการสูญเสียคุณภาพด้านต่าง ๆ เช่น กลิ่นรส สีและเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) (ระหว่างความยาวคลื่น 100 เซนติเมตร – 1 มิลลิเมตร) (Rosenthal, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 8.1 ไมโครเวฟไม่ใช่ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุและ/หรือการหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับ



ภาพที่ 8.1 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : Fellows (2000)

คลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellows, 2000) และมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบโอไมคตรึงที่ความร้อนแบบโอไมคตรึงนั้น เกิดจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า (electrical resistance) ของอาหารและเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยตรง และข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ไมโครเวฟไม่ใช้ป้อนในการลำเลียงอาหารที่อยู่ในท่อให้ผ่านกระบวนการดังกล่าว จึงไม่เป็นการทำลายคุณลักษณะหรือโครงสร้างของอาหาร (โดยเฉพาะในการบรรจุแบบปลอดเชื้อ) (รุ่งนภา, มปป.) และแตกต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมคือเวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่กำหนดในการฆ่าเชื้อน้อยกว่า

จากการที่คลื่นไมโครเวฟถูกใช้ในเรดาร์ (radar) อุปกรณ์นำทาง (navigational equipment) และอุปกรณ์สื่อสาร (communication equipment) ดังนั้นในการใช้คลื่นดังกล่าวจึงต้องมีการควบคุมโดยองค์การระหว่างประเทศที่เรียกว่า International Telecommunication Union (ITU) เพื่อควบคุมดูแลการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปต่าง ๆ ให้เป็นไปอย่างมีระเบียบ โดยการใช้คลื่นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (Industrial, scientific and medical (ISM) frequencies) มีกำหนดการใช้ความถี่ที่ 915 ± 25 MHz $2,450 \pm 50$ MHz $5,000 \pm 75$ MHz และ $22,125 \pm 125$ MHz และกำหนดความถี่ที่ 915 ± 25 MHz และ $2,450 \pm 50$ MHz สำหรับงานให้พลังงานความร้อนในอุตสาหกรรมและการใช้ในบ้านเรือน (สายสนม, 2543 ; Singh and Heldman, 2001)

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าไมโครเวฟมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคลื่นแสง (visible light) โดยสามารถทำให้มารวมกันเป็นลำคลื่น (beams) ได้และส่งผ่าน (transmit) วัตถุ โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของวัตถุนั้น ๆ ซึ่งอาจสะท้อนกลับ (reflect) หรือดูดซับ (absorb) พลังงานไว้ และคลื่นไมโครเวฟอาจผ่านทะลุวัตถุโดยไม่เกิดการดูดซับเลยก็ได้ เช่น วัสดุที่เป็นแก้ว เซรามิกส์ (ceramics) และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic materials) ส่วนใหญ่ ซึ่งจะยอมให้ไมโครเวฟผ่านโดยมีการดูดซับคลื่นหรือพลังงานเพียงเล็กน้อยหรือไม่ดูดซับได้เลย

ประวัติการใช้ไมโครเวฟ

เทคโนโลยีไมโครเวฟได้พัฒนาขึ้นในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้เริ่มมีการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Buffler, 1993) และในกลางปี ค.ศ. 1960 ได้เริ่มใช้ไมโครเวฟในการพาสเจอร์ไรส์ผลิตภัณฑ์นมและในการสเตอริไลส์อาหาร และโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้มีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกับวัสดุต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในการเชื่อมต่อเทอร์โมพลาสติก ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันของยางพารา ใช้ในกระบวนการทำแผ่นกระเบื้องเคลือบ และอุตสาหกรรมอื่นๆ เป็นต้น

การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating)

Fellows (2000) รายงานว่าพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric energy) จากคลื่นไมโครเวฟและความถี่วิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น (wave) และแทรก (penetrate) เข้าไปในอาหารและพลังงานนี้จะถูกดูดซับ (absorb) และเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนขึ้น โดยทั่วไปเราสามารถทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้ทั้งโดยทางตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของอาหาร เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ และโดยทางอ้อม (indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกและส่งผ่านพื้นผิวหน้าของอาหารไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของอาหารและวัตถุ

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งคุณสมบัติ

ดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการสร้างสูตรอาหารเพื่อใช้กับไมโครเวฟ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและแสดงเป็นค่าตัวเลข ได้แก่

1. relative dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางในสนามไฟฟ้ากระแสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร
2. relative dielectric loss (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

ค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulating ability) ของวัตถุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Mudgett, 1986) โดยค่า dielectric loss และ dielectric constant มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$$

จากสมการ ค่า loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัตถุจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น ตารางที่ 8.1 แสดงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

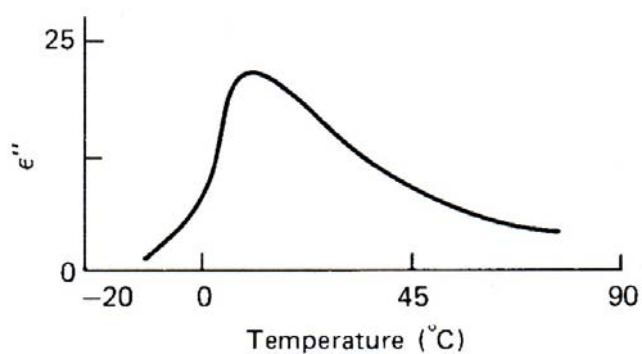
Fellows (2000) รายงานว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกอย่างมาก จากรายงานการทดลองพบว่าค่านี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง แสดงดังภาพที่ 8.2 โดยเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านน้ำแข็งจะถูกดูดซับพลังงานไว้น้อยกว่ามากเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านน้ำ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการที่โมเลกุลของน้ำนั้นเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้ากระแสลับได้น้อยลง ซึ่งสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการกระบวนการละลายน้ำแข็ง (thawing) และการละลายน้ำแข็งบางส่วน (tempering) ของอาหารแช่เยือกแข็ง โดยเมื่อทำให้อาหารแช่เยือกแข็งร้อนขึ้นด้วยไมโครเวฟ ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความร้อนในแต่ละจุด บริเวณของอาหารที่มีการละลายแล้วจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากกว่า จึงทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่บริเวณของอาหารในส่วนที่ยังเป็น

น้ำแข็งอยู่จะดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า ผลจากการให้ความร้อนทำให้อาหารบางส่วนมีอุณหภูมิที่ต้องการในขณะที่บางส่วนยังมีอุณหภูมิแช่แข็ง (รุ่งนภา, มปป.)

ตารางที่ 8.1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

อาหาร	dielectric constant (ϵ')	dielectric loss (ϵ'')	loss tangent ($\tan \delta$)
น้ำ (25 องศาเซลเซียส)	76.7	12	0.157
น้ำ (1.5 องศาเซลเซียส)	80.5	25	0.310
น้ำแข็ง (-12 องศาเซลเซียส)	3.2	0.0029	0.0009
0.1 M โซเดียมคลอไรด์ (25 องศาเซลเซียส)	75.5	18	0.24
เนยสดเค็ม (25 องศาเซลเซียส)	40.0	12	0.3
เนยดิบ (25 องศาเซลเซียส)	49.0	15	0.33
เนยสุก (25 องศาเซลเซียส)	45.0	12	0.56
เนยทำแห้ง (25 องศาเซลเซียส)			0.00096
เนยโค (25 องศาเซลเซียส 915 MHz)	55.0	22	0.4
เนยสุกร (25 องศาเซลเซียส 915 MHz)	54.0	23	0.426
มันฝรั่งบด (25 องศาเซลเซียส)	65	22	0.34

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rosenthal (1992)



ภาพที่ 8.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า dielectric loss ของน้ำและน้ำแข็ง

ที่มา : Fellows (2000)

กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

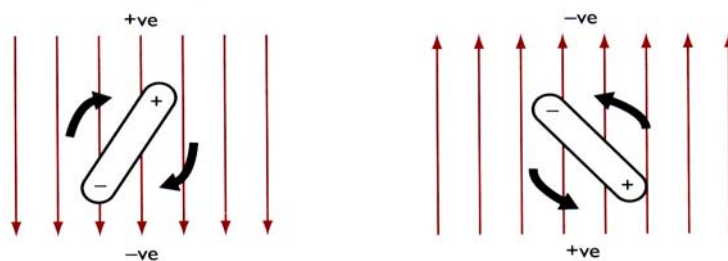
จากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุ Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าการเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการได้แก่ 1. การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) และ 2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

1. การเคลื่อนที่ของไอออน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization)

ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบน-ล่าง ข้าง-ข้าง และหน้า-หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในอาหารสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในอาหารนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในอาหารจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม - โปตัสเซียม - หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้อิออนบวก (cations) และอิออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

ในอาหารประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร แสดงดังภาพที่ 8.3 ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงเพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยอันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญที่สุดในอาหาร ยกเว้นในอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงมากเช่น แสม เป็นต้น



ภาพที่ 8.3 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

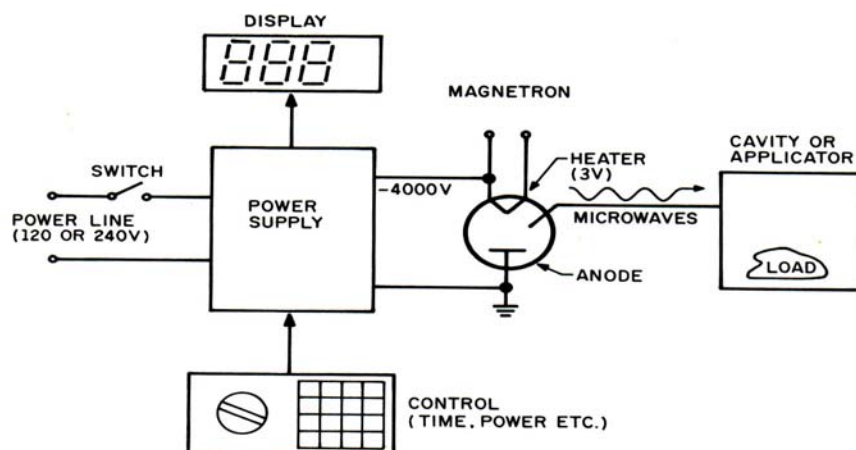
ที่มา : Singh and Heldman (2001)

การเกิดความร้อนในอาหารบริเวณจุดที่สัมผัสกับไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (สายสนม, 2543)

หลักการทำงานของเตาไมโครเวฟ

Buffler (1993) รายงานว่าเริ่มแรกที่มีการประดิษฐ์เครื่องไมโครเวฟขึ้นในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองนั้น มีการประดิษฐ์หลอดสุญญากาศ (vacuum tubes) ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetrons) ที่สามารถผลิตคลื่นได้กำลังแม่เหล็กไฟฟ้าหลายกิโลวัตต์ (ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 1 - 30 GHz) (ความยาวคลื่นระหว่าง 30 - 0.3 เซนติเมตร) และถูกเรียกว่าไมโครเวฟ แต่ในปัจจุบันคลื่นไมโครเวฟมีความถี่ระหว่าง 300 MHz - 300 GHz ในปี ค.ศ. 1945 ได้มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกในการใช้พลังงานไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดความร้อนแก่อาหาร โดยบริษัท Raytheon Corporation และมีการประดิษฐ์เตาไมโครเวฟขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1947 โดย Percy Spencer

ระบบของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปแสดงดังภาพที่ 8.4 โดยจะประกอบไปด้วยแมกนีตรอนที่ทำหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟ แมกนีตรอนที่ใช้ทั่วไปจะมีความต่างศักย์ประมาณ 4,000 โวลต์ และใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) เพื่อเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ให้ได้ตามที่ต้องการ แมกนีตรอนส่วนใหญ่ถูกผลิตเพื่อให้ใช้กับความต่างศักย์ที่คงที่ (constant voltage) ดังนั้นจึงต้องมีวงจรของไดโอด (diode) และตัวเก็บประจุ (capacitor) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนความต่างศักย์สลับมาเป็นความต่างศักย์คงที่



ภาพที่ 8.4 ระบบของเตาไมโครเวฟ

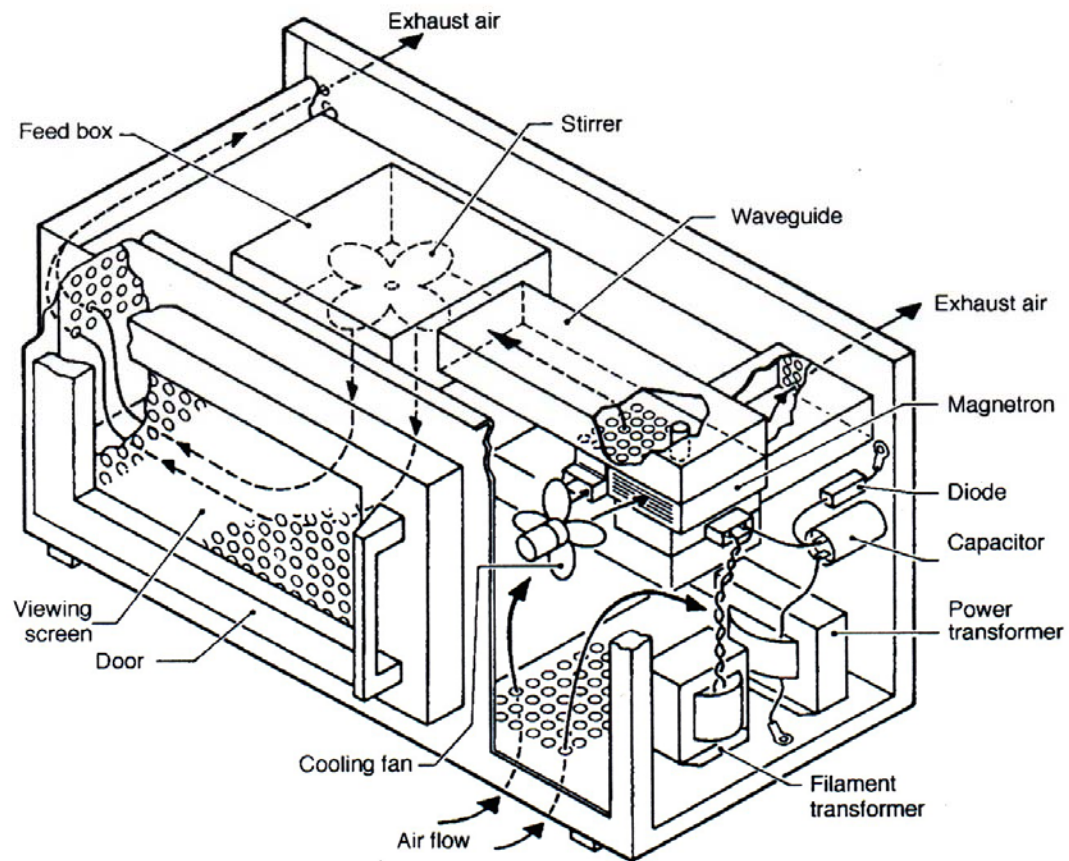
ที่มา : Buffler (1993)

ขนาดของพลังงานไมโครเวฟจะถูกควบคุมโดยการปรับกระแสไฟฟ้าภายในวงจรและมีตัวควบคุมเวลา ทำหน้าที่ปรับช่วงเวลาการใช้งานของไมโครเวฟ สำหรับเตาไมโครเวฟที่ราคาไม่แพง จะมีเฉพาะตัวควบคุมเวลาและอุปกรณ์ควบคุมพลังงาน ในขณะที่เตาไมโครเวฟที่มีราคาสูงขึ้นจะประกอบด้วยระบบที่ควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์ ในส่วนสุดท้ายของระบบคือช่องว่างในเตาหรือช่องใส่อาหาร (cavity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ไมโครเวฟได้สัมผัสกับอาหาร ภาพรวมโดยทั่วไปของเตาไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 8.5

แมกนีตรอน (magnetron)

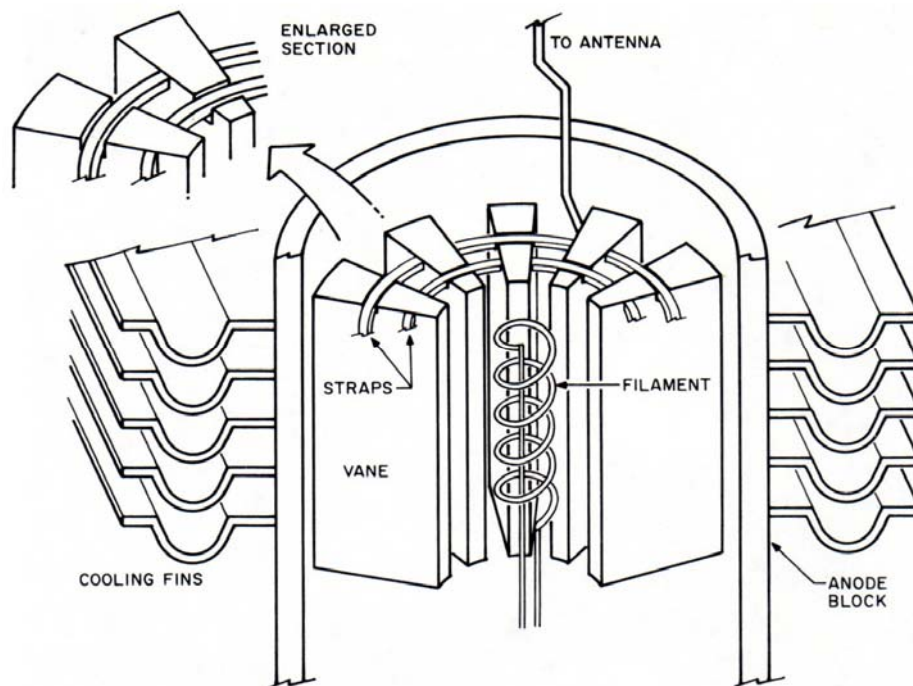
แมกนีตรอนเป็นหัวใจของเตาไมโครเวฟ ทำหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะเป็นหลอดสุญญากาศที่มีโครงภายนอกเป็นโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีแผ่นลักษณะเป็นปีกเพื่อใช้ในการระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 8.6

โครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ส่วนที่สร้างคลื่นไมโครเวฟเรียกว่าไดโอด (diode) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกทำจากทองแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 3.2 เซนติเมตร โดยหลอดจะถูกปิดหัวท้ายด้วยแผ่นทองแดง เพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศ



ภาพที่ 8.5 เตาไมโครเวฟโดยทั่วไป

ที่มา : Buffler (1993)

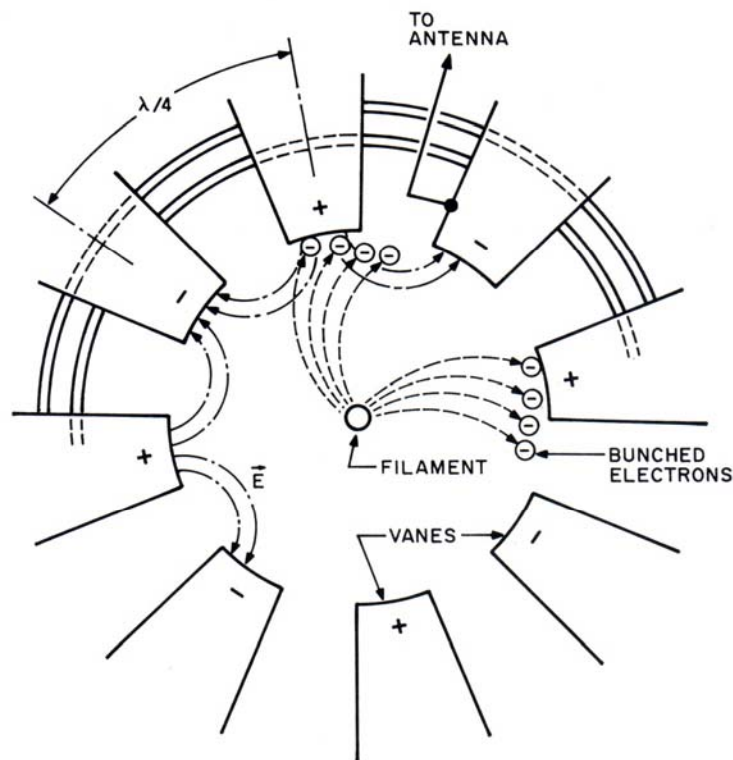


ภาพที่ 8.6 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน

ที่มา : Buffler (1993)

ภายในหลอดไดโอด จะประกอบด้วยแผ่นทองแดง (vanes) ซึ่งมีประมาณ 12 แผ่น วางในแนวตั้ง โดยหันด้านหนึ่งมาเรียงกันในแนวกกลม โดยเว้นช่องว่างตรงกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.95 เซนติเมตรไว้ ให้เป็นที่อยู่ของไส้ (filament) ที่เป็นเกลียว (ทำหน้าที่เป็นแคโทด (cathode)) และเรียกท่อทองแดงทรงกระบอกและ vanes ว่าเป็นส่วนแอโนด (anode)

การทำงานของแอโนดในแมกนีตรอนในการทำให้เกิดคลื่นไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 8.7 และเป็นไปตามลำดับดังนี้



ภาพที่ 8.7 ภาพตัดขวางของแอโนดในแมกนีตรอน

ที่มา : Buffler (1993)

1. ไส้ที่เป็นเกลียว (filament) ถูกทำให้ร้อน
2. อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเส้นแผ่นทองแดงจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดหมอกอิเล็กตรอนบริเวณตรงกลางของไดโอด
3. เมื่อผ่านความต่างศักย์ประมาณ 4,000 โวลท์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นระหว่างแอโนดและไส้ filament และเร่งอิเล็กตรอนให้ไปยังแอโนดในแนวรัศมีวงกลม

4. สนามแม่เหล็ก (ที่ถูกสร้างขึ้นจากการนำวงแหวนแม่เหล็ก (ferrite) 2 วง มาวางไว้ด้านบนและล่างของแอโนด สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับแกนของไส้ filament และมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า) จะบังคับให้อิเลคตรอนวิ่งเป็นทางโค้ง (ถ้าความแรงของสนามแม่เหล็กมีขนาดที่พอเหมาะ อิเลคตรอนจะถูกกวาดออกจากพื้นผิวบริเวณปลายสุดของเส้นแผ่นทองแดง ถ้าสนามแม่เหล็กอ่อนเกินไปจะทำให้ อิเลคตรอนวิ่งเข้าชนกับแผ่นทองแดงและถ้ามีความแรงเกินไปจะทำให้ อิเลคตรอนเคลื่อนที่ย้อนกลับและชนกับไส้ filament)
5. ทันที่ที่อิเลคตรอนวิ่งถึงแผ่นทองแดง จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นภายในแผ่นทองแดง ถ้าแผ่นทองแดงนี้ถูกเชื่อมต่อกันด้วยกระแสไฟฟ้า (เรียกว่า strapping และจุดที่มีการเชื่อมต่อเรียกว่า straps) (ในภาพที่ 6) กับแผ่นทองแดงอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ถัดออกไปจากเดิม 2 แผ่น จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกเช่นกัน แผ่นทองแดงที่อยู่ระหว่างแผ่นที่มีประจุบวก จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุลบและมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับแผ่นที่มีประจุบวก ทำให้แผ่นทองแดงมีสภาพประจุบวกและลบสลับกันไปทั้งวง
6. จากการที่มีแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างประจุที่ต่างและเหมือนกัน ทำให้อิเลคตรอนที่วิ่งวนอยู่ถูกเร่งเข้าไปหาแผ่นทองแดงที่มีประจุบวก ในขณะที่เดียวกันแผ่นทองแดงที่มีประจุลบจะผลักริเลคตรอนเหล่านี้ไว้ ทำให้กลับมารวมอยู่กับอิเลคตรอนในกลุ่มที่ถูกเร่งจนกลายเป็นกลุ่มก้อนของอิเลคตรอน
7. ทันที่ที่กลุ่มอิเลคตรอนนี้วิ่งผ่านแผ่นทองแดงที่อยู่ถัดมา จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นในแผ่นทองแดงนั้น ส่วนแผ่นทองแดงที่กลุ่มอิเลคตรอนนี้วิ่งผ่านมาก่อนหน้านี้ เปลี่ยนจากสภาพประจุบวกเป็นลบ และเมื่อกลุ่มอิเลคตรอนวิ่งต่อไปเรื่อย ๆ ตามวงโคจร จะทำให้แผ่นทองแดงแต่ละแผ่นเกิดสภาพประจุที่สลับกันไปมาจากบวกเป็นลบ และเป็นบวกอีกครั้ง โดยถ้าอิเลคตรอนมีความเร็วที่เหมาะสมกับช่องว่างระหว่างแผ่นทองแดง จะสามารถเปลี่ยนประจุสลับไปมาได้ 2.45 พันล้านครั้งต่อวินาที ประจุที่สลับกันดังกล่าวนี้จะถูกเชื่อมต่อกับเส้นลวดจากแผ่นทองแดงไปยังสายอากาศ (antenna) เพื่อจับคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น แล้วส่งต่อผ่านท่อนำคลื่น (wave guide) และผ่านไปยังใบพัด (stirrer) ทำให้เกิดการแผ่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีสัญญาณขนาด 2.45 GHz ในช่องใส่อาหาร

ถ้าคลื่นไมโครเวฟถูกสร้างขึ้นและปล่อยให้ส่งผ่านในอากาศ พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ได้ตามความต้องการ จึงมักใส่สายอากาศ (antenna) เพื่อจับคลื่นและส่งผ่านท่อทรงกระบอกที่เรียกว่า wave guide ซึ่งจะนำทางคลื่นไมโครเวฟให้ตรงไปสู่ช่องใส่อาหาร โดยอาจมีใบพัด (stirrer) เพื่อกระจายคลื่นไปสัมผัสกับอาหาร ใบพัดจะช่วยทำให้คลื่นไมโครเวฟไปทำให้จุดร้อนและจุดเย็นในอาหารร้อนขึ้นสม่ำเสมอและทั่วถึง

ปัญหาที่สำคัญในการใช้ไมโครเวฟคือการที่อาหารแต่ละจุดถูกทำให้ร้อนไม่ทั่วถึง ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากเตาไมโครเวฟและมีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเตาไมโครเวฟ นอกจากนั้นการจัดเรียงของอาหารภายในไมโครเวฟและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อไมโครเวฟถูกปล่อยให้เข้ามาในช่องใส่อาหาร (cavity) จะสะท้อนที่ผนังโลหะ การสะท้อนของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางเดียวกันกับผนังโลหะถูกทำให้ลัดวงจร (short circuit) โดยโลหะเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์

ในส่วนของใบพัด (stirrer) ทำมาจากโลหะ เป็นใบพัดที่หมุนอยู่ในช่องใส่อาหาร โดยใช้มอเตอร์ขนาดเล็กหรือใช้แรงลมที่ได้จากระบบระบายความร้อนให้แก่แมกนีตรอนและพาความร้อนออกไปด้านนอกเตาไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ ในการกระจายความร้อน เช่น การใช้จานแก้วหรือเซรามิกที่สามารถหมุนและถอดออกได้ ในระบบนี้คลื่นไมโครเวฟจะสัมผัสกับอาหารที่ทำให้หมุนบนจาน ทำให้จุดร้อนและเย็นได้รับพลังงานโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เตาไมโครเวฟอาจใช้ระบบใดระบบหนึ่งหรือใช้ควบคู่ทั้งสองระบบ เพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความร้อนแก่อาหารให้ดียิ่งขึ้น

พลังงานที่ถูกดูดซับในวัตถุ (absorbed power)

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าพลังงานไมโครเวฟเองไม่ใช่พลังงานความร้อน (thermal energy) แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟและวัตถุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นความร้อนหรือพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหาร สามารถคำนวณได้จากสมการ (Decareau and Peterson, 1986)

$$P_D = 55.61 \times 10^{-14} E^2 f \epsilon' \tan \delta$$

โดย P_D = พลังงานที่สารดูดซับ (วัตต์/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

E = ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร)

f = ความถี่ของไมโครเวฟ (Hz)

ϵ' = relative dielectric constant

$\tan \delta$ = loss tangent

จากสมการค่าความถี่ของไมโครเวฟ ได้แก่ 915 หรือ 2,450 GHz ส่วนค่า ϵ' เป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งหาได้จากหนังสืออ้างอิงทั่วไป ค่า E ซึ่งเป็นความเข้มสนามไฟฟ้า (electrical field strength ; V/cm) ภายในช่องใส่อาหาร จะขึ้นอยู่กับการออกแบบของเตาไมโครเวฟ คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารและรูปทรงของอาหาร จากสมการจะเห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อพลังงานที่ถูกดูดซับหรือความร้อนที่เกิดขึ้น

สารหรือวัตถุที่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีจะเรียกว่ามี lossy หรือ lossiness สูง ซึ่งสารประเภทนี้จะทำให้อุ่นได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนั้นรูปแบบของน้ำและเกลือแร่ที่เป็นองค์ประกอบอาหาร ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ จะมีผลต่อปริมาณพลังงานของไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ โดยน้ำที่อยู่ในรูปน้ำอิสระ (free water) จะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำที่จับอยู่กับสารประกอบอื่น ๆ (bound water) เช่น ที่จับกับโปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต ส่วนเกลือแร่ถ้าอยู่ในรูปที่แตกตัว (dissociated) จะทำให้อาหารนั้นดูดซับไมโครเวฟได้ดีกว่าเกลือแร่ที่รวมตัวกับสารอื่นๆ (associated) เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหาร

Buffler (1993) รายงานว่าพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารภายในเตาไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. แมกนีตรอน คุณสมบัติเฉพาะของแมกนีตรอนทำให้เตาไมโครเวฟมีความสามารถในการทำความร้อนแก่อาหารแตกต่างกันไป ปัญหาที่สำคัญของแมกนีตรอนคือตัวแม่เหล็กที่ใช้ ถ้าได้รับความร้อนแล้วความแรงของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจะ

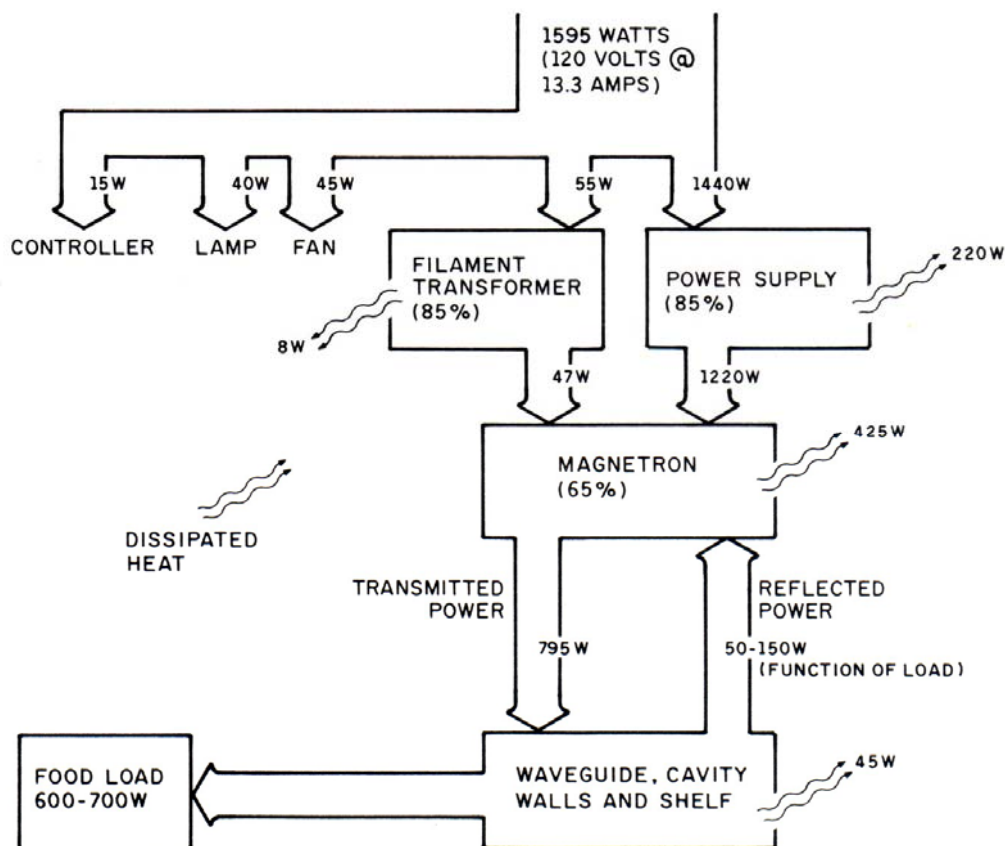
ลดลง เป็นผลให้กำลังไฟออกมาอ่อนลง ซึ่งอาจสูญเสียมากถึง 20% และมักเกิดขึ้นในช่วง 5-10 นาทีแรกหลังจากเริ่มเปิดเครื่อง

2. แหล่งพลังงาน (power supply) มีผลต่อพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นและที่ถูกดูดซับในอาหาร โดยจะมีผลประมาณ $\pm 15\%$ ของพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น
3. ขนาดอาหาร (load volume) พลังงานที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดของอาหารซึ่งจะเป็นไปตามขนาดของช่องใส่อาหาร (cavity) จากการทดสอบพบว่าปริมาณพลังงานที่ถูกดูดซับจะลดลงเมื่อขนาดของอาหารมีค่าลดลง
4. ลักษณะของอาหาร (load geometry) มีผลต่อการเกิดความร้อนในอาหารชนิดเดียวกันและมีมวลเท่ากัน อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการรายงานที่ชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของอาหารและการจัดเรียงของอาหารรวมทั้งช่องใส่อาหาร
5. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หรืออาหาร คุณสมบัติไดอิเล็กทริกและพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในลักษณะที่ซับซ้อน รวมทั้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร อัตราการเกิดความร้อนในอาหาร (ซึ่งคุณสมบัติเกี่ยวกับการดูดซับพลังงานจะลดลงตามอุณหภูมิ) จะเกิดช้าลงเมื่ออาหารถูกทำให้ร้อนขึ้น แต่ในแฮม (ham) ซึ่งคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น จะเกิดความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ จนอาจทำให้ไหม้ได้ ถ้าไม่ระมัดระวัง ทั้งนี้เป็นผลจากการหมุนของสารที่มีชีวิตดังที่ได้กล่าวมาแล้ว
6. ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของภาชนะบรรจุอาหารและอุณหภูมิ โดยคุณสมบัติด้านความร้อน (thermal properties) หรืออุณหภูมิของภาชนะบรรจุซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร จะสามารถทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ถูกดูดซับจากอาหารไปยังภาชนะบรรจุหรือสิ่งที่หุ้มห่ออาหารได้ ตัวอย่างเช่น แก้วที่บรรจุน้ำปริมาตร 1 ลิตร เมื่อนำไปไมโครเวฟอาจทำให้สูญเสียพลังงานไปยังแก้วสูงถึงประมาณ 6%
7. ตำแหน่งและขนาดของช่องใส่อาหารในเตาไมโครเวฟ จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของการทำให้อาหารร้อนถึงประมาณ $\pm 20\%$ โดยเฉพาะชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็ก
8. เตาไมโครเวฟ ลักษณะต่างๆของเตาไมโครเวฟที่ (อาจ) มีผลต่อพลังงานที่ถูกดูดซับได้แก่ ขนาด (size) ช่องใส่อาหาร โดยปกติช่องใส่อาหารที่มีขนาดใหญ่กว่าพบว่าพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารจะมีค่าน้อยกว่า ลักษณะ (geometry) ของช่องใส่อาหาร แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัด วัสดุ (materials) ที่ใช้ทำช่องใส่อาหาร ถ้าใช้วัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า (conductivity) สูงกว่า จะทำให้มีพลังงานที่อาหารดูดซับมากกว่า และระบบของเตาไมโครเวฟ แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดในเรื่องนี้

ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ

ประสิทธิภาพของไมโครเวฟ สามารถคำนวณได้จากกฎทางไฟฟ้า โดยคำนวณจากค่าตัวเลขจากด้านหลังหรือด้านข้างของเตาไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น ตัวเลขแสดง 13.3 แอมป์ (A) 120 โวลต์ (V) ดังนั้นกำลังไฟฟ้า $P = IV = 13.3 \times 120 = 1,596$ วัตต์ (Watts) ถ้าพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารมีค่า 700 W (จากการทดสอบ) ดังนั้นประสิทธิภาพของไมโครเวฟ $= (700/1,596)100 = 44\%$ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ใช้ในการแปรรูปโดยวิธีอื่นๆ

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของไมโครเวฟจะมีค่าประมาณ 50% ไม่ว่าจะเป็นเตาที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไปหรือในอุตสาหกรรม โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่สูญเสียกระจายไปเป็นความร้อนในส่วนของแมกนีตรอน ดังนั้นเตาไมโครเวฟจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนโดยใช้พัดลม ภาพที่ 8.8 แสดงประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ



ภาพที่ 8.8 ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ

ที่มา : Buffler (1993)

จากภาพที่ 8.8 จะเห็นว่าการสูญเสียความร้อนเล็กน้อยในส่วนของหม้อแปลง (transformer) หลอดไฟ (light bulb) และแผงวงจรไฟฟ้า (electronic circuit) และเมื่อเกิดคลื่นไมโครเวฟ จะเห็นว่าการส่งถ่ายพลังงานไปยังอาหารที่มีขนาดใหญ่สูงถึง 85 – 90% แต่จะมีการสูญเสียพลังงานไปยังแหล่งต่างๆ เช่นแมกนีตรอน ช่องใส่อาหารจนถึงตัวอาหาร จนมีประสิทธิภาพเหลือประมาณ 44% ตามที่ได้ยกตัวอย่างไว้

ความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) ของไมโครเวฟ

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุมีผลต่อการถ่ายเทพลังงานระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัตถุที่สัมผัสกับไมโครเวฟ ความลึกของการทะลุทะลวงของไมโครเวฟ หาได้จากสมการดังนี้

$$z = (\lambda / 2\pi) \{ 2 / (\epsilon' (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1) \}^{1/2}$$

โดย z คือความลึกของการทะลุทะลวง (ที่ต่ำจากผิวของวัตถุ)

จากสมการจะเห็นว่าพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่ 915 MHz จะสามารถทะลุทะลวงได้ลึกกว่าที่ 2,450 MHz เนื่องจากมีความยาวคลื่นมากกว่า โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในชิ้นอาหารมีความสำคัญต่อการออกแบบหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะอาหาร เช่น ถ้าชิ้นอาหารที่จะแปรรูปด้วยไมโครเวฟมีความหนามาก ก็ควรเลือกคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำกว่า (สายสนม, 2543)

ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

รุ่งนภา (มปป.) รายงานถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จะเกี่ยวข้องกับระบบไมโครเวฟและวัตถุที่ถูกทำให้ร้อนขึ้น ปัจจัยหลักของอาหารที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุที่ใช้กับไมโครเวฟ ได้แก่

1. อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ เมื่ออาหารได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ การเพิ่มของอุณหภูมิจะขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอาหารหลายอย่าง โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราและเวลาการให้ความร้อน โดยทั่วไปในกระบวนการให้ความร้อนใด ๆ อุณหภูมิเริ่มต้นยิ่งสูง อาหารจะยิ่งสุกเร็วขึ้น ส่วนปัจจัยที่สำคัญอื่นๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่จะได้ คือ

ความร้อนแฝง (เช่น น้ำแข็งในอาหารแช่เยือกแข็งที่เปลี่ยนไปเป็นน้ำ จะต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น) คุณสมบัติไดอิเล็กทริกและคุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร

2. ขนาด เมื่อทำให้ขึ้นอาหารร้อนขึ้น อาหารที่มีขนาดเหมือนกันจะร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของขึ้นอาหารที่เล็กกว่าต้องการพลังงานน้อยกว่าอาหารที่มีขนาดใหญ่กว่า

3. รูปร่าง ลักษณะพื้นฐานของอาหารมีความสำคัญ โดยอาหารที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นการให้ความร้อนมากเกินไป (over heating) ส่วนอาหารที่มีรูปร่างกลมมนมีแนวโน้มที่จะร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอมากกว่าขึ้นอาหารที่มีมุมแหลมหรือที่มีทั้งส่วนหนาและบาง อย่างไรก็ตาม ทรงกลมหรือผิวที่โค้งคล้ายกับทรงกลมอาจจะมีส่วนตรงกลางที่ร้อนกว่า แต่การให้ความร้อนมากเกินไปไม่สามารถสังเกตได้ในขึ้นอาหารที่มีขนาดรัศมีเกิน 0 – 50 มิลลิเมตร

4. ความหนาแน่นหรือความเป็นเนื้อเดียวกัน อาหารโดยส่วนใหญ่มักมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งมีผลต่ออาหารที่ทำให้ร้อนขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ อาหารที่แน่นกว่ามีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการให้ความร้อนนานกว่าอาหารที่มีองค์ประกอบที่เปื้อนและเป็นรูพรุนมากกว่า

5. ความร้อนจำเพาะ ความร้อนจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ควบคุมการให้ความร้อนอาหาร ความจุความร้อนจำเพาะนิยามให้เป็นปริมาณความร้อนที่ต้องการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของมวลหนึ่งหน่วยขึ้น 1 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการวัดความสามารถของสารที่จะจุความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับของน้ำ หน่วยของความจุความร้อนจำเพาะคือจูล/กรัม องศาเซลเซียส ($J/g^{\circ}C$)

ความจุความร้อนของน้ำเท่ากับ $1.0 J/g^{\circ}C$ ส่วนไขมันส่วนใหญ่ประมาณ $0.5 J/g^{\circ}C$ หมายความว่าสำหรับไขมันที่มีน้ำหนักเท่ากับน้ำ ไขมันต้องการความร้อนเพียงครึ่งเดียวของน้ำ ความร้อนจำเพาะจะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเฉพาะในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสเพียงเล็กน้อยนั้นความร้อนจำเพาะจะมีค่าสูงมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นรอบๆ จุดเยือกแข็งของอาหารและผลของความร้อนแฝงที่ต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนสภาวะทางกายภาพระหว่างน้ำและน้ำแข็ง ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นถ้าให้ความร้อนแก่อาหารแช่เยือกแข็งด้วยไมโครเวฟเนื่องจากผลของความร้อนแฝงเหล่านี้

6. สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ถ้าต้องการให้เกิดสภาวะการให้ความร้อนที่เหมาะสม เราจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละองค์ประกอบของอาหารที่นำมาแปรรูป จากการที่ชั้นของผิวอาหารที่ได้รับความร้อนมากเกินไป แต่ภายในชั้นของอาหารยังเย็นอยู่นั้น เกิดจากการให้ความร้อนที่มากเกินไปต่อผิวของอาหารซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ โดยอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมต้องเข้ากันได้ (matching) กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร

7. คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร คุณสมบัตินี้เป็นตัวกำหนดว่าอาหารหรือวัตถุจะสามารถดูดซับไมโครเวฟได้ดีเพียงใด ซึ่งมีความสำคัญมากต่อผู้ผลิตอาหารซึ่งใช้กับกระบวนการที่ใช้ไมโครเวฟ ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่แสดงเป็นตัวเลขดังที่กล่าวมาแล้ว มีอยู่ 3 ค่า ได้แก่ค่า dielectric constant (ϵ') ค่า dielectric loss factor (ϵ'') และค่า dielectric loss tangent ($\tan \delta$) ซึ่งถ้าค่าเหล่านี้สูงขึ้น แสดงว่าวัตถุจะร้อนได้ดีขึ้น ค่า ϵ' เป็นการวัดความสามารถของวัตถุที่จะเก็บพลังงานไมโครเวฟ ส่วน ϵ'' แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานออกไปเป็นความร้อน เมื่อเราต้องการวิเคราะห์การให้ความร้อนแก่อาหาร เรามักใช้ค่า $\tan \delta$ ซึ่งเป็นการวัดความสามารถของวัตถุที่ยอมให้พลังงานไมโครเวฟทะลุทะลวงผ่านไปได้ โดยคุณสมบัติไดอิเล็กทริกจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร เช่น คาร์ไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือ และปริมาณน้ำ เป็นต้น

ผลของไมโครเวฟต่อจุลินทรีย์

U.S.FDA. (2002) รายงานว่าพลังงานที่ถูกดูดซับจากไมโครเวฟจะทำให้อุณหภูมิของอาหารสูงขึ้น และพอเพียงที่จะทำลายจุลินทรีย์ได้ทั้งในการพาสเจอร์ไรเซชันและสเตอริไลเซชัน และมีรายงานการศึกษาจำนวนมากที่พิสูจน์แล้วว่าผลจากความร้อน (thermal effect) เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำลายจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามในการใช้กระบวนการไมโครเวฟในช่วงแรก พบว่ามีข้อถกเถียงเกี่ยวกับผลที่ไม่ได้เกิดจากความร้อน (athermal หรือ non-thermal effects) อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนในเรื่องนี้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการวัดอุณหภูมิและเวลาที่แน่นอนในกระบวนการไมโครเวฟยังไม่สามารถทำได้ ในการศึกษาผลของไมโครเวฟในการทำลายจุลินทรีย์โดยที่ยังไม่คำนึงถึงผลที่ไม่ได้เกิดจากความร้อน พบว่ากลไกในการลดลงของจุลินทรีย์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และในปัจจุบันยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับเชื้อโรคที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษที่ต้านทานไมโครเวฟ (microwave resistant foodborne pathogens)

Banik และคณะ (2003) รายงานว่าไมโครเวฟสามารถก่อให้เกิดผลทางชีวภาพ (biological effects) ได้โดยขึ้นอยู่กับความแรง (strength) ของคลื่น ความถี่ (frequencies) รูปแบบของคลื่น (wave forms) การปรับความถี่ (modulation) และระยะเวลาที่สัมผัสกับไมโครเวฟ (duration of exposure) โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล ในการใช้ไมโครเวฟเพื่อสเตอริไลส์อาหารได้มีข้อสรุปที่แตกต่างกัน 2 ประการในเรื่องของสาเหตุในการทำลายจุลินทรีย์ โดยคาดว่าเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวและเกิดจากผลร่วมกันระหว่างความร้อนที่เกิดขึ้นและผลจากสนามไฟฟ้า (electric field) และเป็นการยากที่จะหาข้อสรุปที่ชัดเจนเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในระหว่างการใช้ไมโครเวฟนั้นกระทำได้ยาก อย่างไรก็ตามได้มีการคิดวิธีใหม่ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในระหว่างการให้ไมโครเวฟ และจากการทดลองฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* โดยใช้ความร้อนแบบวิธีดั้งเดิมและการใช้ไมโครเวฟพบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสนั้น ไม่พบการตายของจุลินทรีย์ ในขณะที่การใช้ที่อุณหภูมิ 45 47 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการตายของเชื้อนี้โดยการใช้ไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าอัตราการตายของเชื้อเมื่อให้ความร้อนแบบวิธีดั้งเดิมที่อุณหภูมิเดียวกัน ถึงแม้ว่านักวิจัยจะไม่สามารถระบุกลไกที่ชัดเจนในเรื่องดังกล่าวที่เกี่ยวข้องกับผลที่ไม่ได้เกิดจากความร้อนได้ แต่สันนิษฐานไว้ว่าไมโครเวฟเป็นสาเหตุให้เกิดการเร่งการเคลื่อนที่ของอิออน (ions) ทำให้เกิดการชน (collide) กับโมเลกุลอื่นๆ หรืออาจเกิดจากสารประกอบที่มีขั้ว (dipoles) เกิดการหมุนตัว (rotate) อย่างรวดเร็วตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าสลับ (alternating electric field) (2,450 ล้านครั้งต่อวินาที) จึงเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระดับทุติยภูมิ (secondary) และตติยภูมิ (tertiary structure) ของโปรตีนที่อยู่ภายในตัวจุลินทรีย์

ผลของไมโครเวฟต่อองค์ประกอบอาหาร

สายสนม (2543) รายงานว่าไมโครเวฟมีผลต่อส่วนประกอบของอาหารแตกต่างกันออกไป ในกรณีของโปรตีนจากเนื้อสัตว์ที่มีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอยู่ในปริมาณสูง จะมีความเหนียวมากเมื่อนำมาทำให้สุกด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากการให้ความร้อนที่รวดเร็วเกินไปจนเนื้อเยื่อเกี่ยวพันไม่มีโอกาสที่จะสลายตัว จึงมีความเหนียวมากกว่าการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม อาหารประเภทไข่ที่กระเทาะเปลือกออกแล้วจะทำให้สุกด้วยไมโครเวฟได้อย่างรวดเร็ว ในส่วนของน้ำตาลในการทำน้ำเชื่อมหรือลูกกวาด การใช้ไมโครเวฟจะสามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน แต่สำหรับเกลือแกงและเกลือในรูปแบบอื่นๆ เช่นแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำ และในอาหารจะทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ต่ำ มีผลทำให้เกิดความร้อนได้ช้ากว่า Fellows (2000) รายงานว่าการใช้ไมโครเวฟเพื่อลวก (blanch) และพาสเจอไรส์อาหาร พบว่ามีอัตราการ

ถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ที่สูงในระดับที่ทำลายจุลินทรีย์และเอนไซม์ ซึ่งเป็นผลให้ลดการสูญเสียสารอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อน (heat sensitive) ลงได้ (ยกตัวอย่างเช่นในการลวกแครอทด้วยไมโครเวฟพบว่าจะไม่เกิดการสูญเสียแคโรทีน ในขณะที่การลวกด้วยไอน้ำ (steam blanching) และน้ำร้อน (water blanching) จะสูญเสียแคโรทีนปริมาณ 28 และ 45% ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามในการศึกษาในอาหารอื่นๆ บางชนิดพบว่าผลการทดลองมีความแปรปรวนสูงมาก จนไม่อาจสรุปได้ชัดเจนว่าการใช้ไมโครเวฟจะเกิดการสูญเสียสารอาหารน้อยกว่ากระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีอื่น

บรรจุภัณฑ์สำหรับไมโครเวฟ

รุ่งนภา (มปป.) รายงานว่าภาชนะบรรจุที่นิยมใช้กับไมโครเวฟเป็นชนิด passive (microwave passive materials) นอกจากนั้นยังมีชนิด active (active materials) โดย Buffler (1993) ให้คำจำกัดความของภาชนะบรรจุชนิด active (active packaging) ว่าเป็นภาชนะบรรจุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กเมื่อสัมผัสกับไมโครเวฟและทำให้รูปแบบของการเกิดความร้อน (heating pattern) ของอาหารภายในภาชนะบรรจุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น susceptors หรือ heater boards ที่ใช้ในการทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด (localized heating) เช่น ที่ใช้กับ ข้าวโพดคั่ว (pop corn) และพิซซ่า (pizza) (Mudgett, 1990) ส่วนภาชนะบรรจุชนิด passive หมายถึงภาชนะบรรจุที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

สายสนม (2543) รายงานว่าการเลือกใช้ภาชนะบรรจุกับไมโครเวฟจะต้องเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมทั้งขนาดและรูปแบบ โดยวัสดุที่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เพราะจะแบ่งการดูดซับพลังงานจากอาหารที่ถูกรับบรรจุอยู่ วัสดุที่สะท้อนคลื่นไมโครเวฟมีความไม่เหมาะสมเนื่องจากจะทำให้อาหารภายในภาชนะบรรจุไม่ได้สัมผัสกับไมโครเวฟ นอกจากนั้นคลื่นที่สะท้อนกลับยังทำให้แมกนีตรอนเสื่อมเสียและมีอายุการใช้งานสั้นลง ในส่วนของวัสดุที่เหมาะสมได้แก่ ชนิดที่ยอมให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านไปได้ดี กล่าวคือเป็นชนิดที่มีค่า loss tangent ต่ำ ได้แก่ กระดาษ แก้ว พลาสติก เครื่องเคลือบดินเผาและเซรามิกส์ เป็นต้น

ในปัจจุบันพลาสติกถูกนำมาใช้มาก เนื่องจากสามารถดัดแปลงและทำให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้โดยเฉพาะพวกพลาสติกโฟมที่ใช้ครั้งเดียวทิ้งชนิดอื่น ๆ ได้แก่ โพลีสไตรีน (polystyrene) โพลีโพรไพลีน (polypropylene) โพลีเอทิลีน (polyethylene) โพลีซัลโฟน (polysulfone) โพลี

คาร์บอนเนต (polycarbonate) และโพลีไนลอน (polynylon) ในจำนวนนี้พบว่าโพลีซัลโฟนมีความทนต่อความร้อนได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส

Buffler (1993) รายงานว่าในการดัดแปลงภาชนะบรรจุเพื่อให้เกิดเปลือกนอกสีน้ำตาล (crust) ของอาหารหรือเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลนั้น แต่เดิมใช้แผ่นจานที่เรียกว่า browning dishes ซึ่งทำจากแผ่นบอโรซิลิเกต (borosilicate plate) ที่เคลือบด้วยชั้นบางๆ ของทินออกไซด์ (tin oxide) เมื่อสัมผัสกับไมโครเวฟ ชั้นออกไซด์จะดูดซับพลังงานและเกิดความร้อนสูงมาก (ประมาณ 204-260 องศาเซลเซียส) เมื่อวางชิ้นอาหารลงบนจานที่ผ่านการให้ความร้อนมาแล้ว (preheat) จะทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น นอกจากนั้น อาจใช้ภาชนะพิเศษที่เรียกว่า susceptor heater board หรือ susceptors ซึ่งทำโดยใช้แผ่นโลหะบางมากๆ (เช่นแผ่นอะลูมิเนียมที่มีขนาด 10 - 20 อังสตรอม (Angstrom) มาเคลือบติดกับแผ่นพลาสติกโพลีเอสเตอร์ขนาดบาง โดยใช้กาวประสาน (adhesive) ซึ่งตามทฤษฎีนั้น แผ่นโลหะบางที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (มีความนำไฟฟ้าสูง) จะสะท้อนไมโครเวฟโดยไม่มีการดูดซับพลังงานไว้ภายใน ในทางตรงกันข้ามแผ่นโลหะที่มีความต้านทานสูงมาก (มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ) จะทำหน้าที่เป็นฉนวนและยอมให้ไมโครเวฟผ่านโดยไม่ดูดซับพลังงาน ดังนั้นแผ่นโลหะดังกล่าวจะไม่ดูดซับพลังงานและไม่เกิดความร้อน

ปัญหาในการนำ susceptors มาใช้กับไมโครเวฟ ได้แก่ การติดไฟ (ignition) ถ้าอุณหภูมิของ paperboard สูงถึง 233 องศาเซลเซียส จะทำให้ไหม้ ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาโดยการตัดแผ่นโลหะเป็นชิ้นเล็กแยกจากกันและเคลือบด้วยแผ่นพลาสติก ซึ่งทำให้การนำไฟฟ้าของแผ่น susceptors ลดลงและเป็นผลให้อุณหภูมิและความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง

ในส่วนของรูปร่างของภาชนะบรรจุ มีผลต่อความเร็วในการทำให้อุ่นโดยไมโครเวฟ พวกที่มีรูปร่างกลม ปากกว้าง มีมุมเอียงเข้าหาส่วนก้นที่แคบกว่าจะได้ผลดีกว่าภาชนะที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม เพราะมีมุมอับทำให้มีพื้นที่สัมผัสไมโครเวฟได้น้อย

โดยทั่วไปนั้นวัสดุที่ใช้กับไมโครเวฟ ควรมีลักษณะต่างๆ ดังนี้

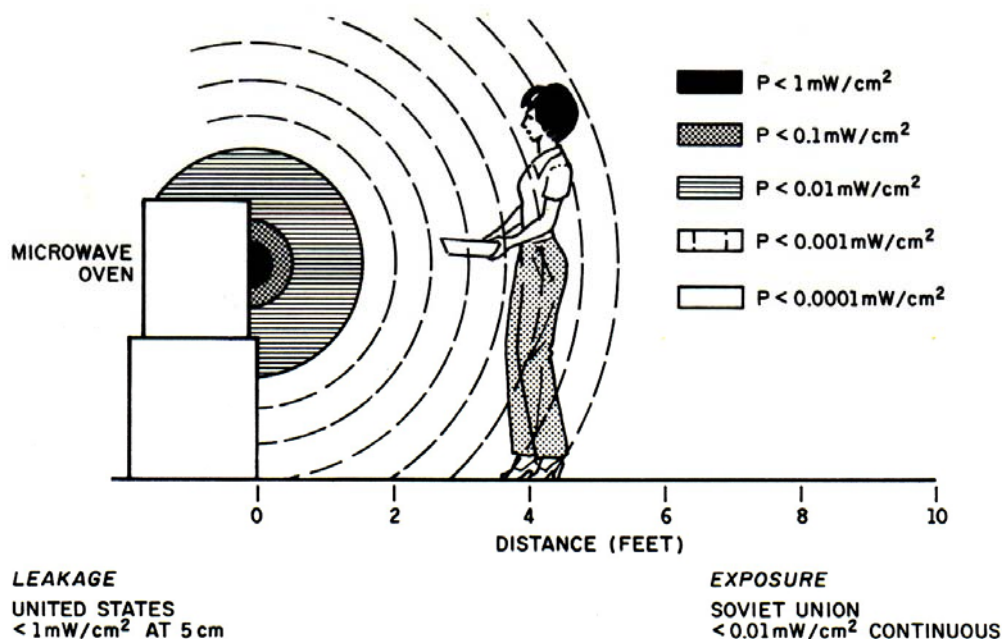
1. รักษาและควบคุมสภาวะภายในภาชนะบรรจุ รวมทั้งป้องกันไม่ให้อาหารภายในเกิดการปนเปื้อนไปจนกระทั่งถึงมือผู้บริโภค เช่น จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การสูญเสียหรือดูดความชื้นจากภายนอก การดูดซับสารพวกไขมันหรือสารอื่นๆ
2. ยอมให้อาหารได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง
3. ทนต่ออุณหภูมิทั้งที่ใช้กับระบบที่ประกอบด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว หรือระบบที่ใช้เตาอบความร้อนร่วมด้วย

4. ปลอดภัยและง่ายต่อการขนส่งและการเปิดผนึก (โดยเฉพาะขณะอาหารร้อน) นอกจากนั้นการปิดผนึกยังต้องมีความแข็งแรงและทนต่อแรงต่าง ๆ
5. ไม่ทำให้อาหารมีกลิ่น
6. ได้มาตรฐานความปลอดภัย จากสารที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุในขณะที่เกิดความร้อน

ความปลอดภัยในการใช้ไมโครเวฟ

โดยส่วนใหญ่ผลจากอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับอาหารนั้น มาจากความร้อนที่เกิดขึ้นโดยตรง แต่มีรายงานเกี่ยวกับอันตรายนอกเหนือจากนี้ เช่น จากสารเคมีในบรรจุภัณฑ์ที่ละลายสู่อาหาร ตัวอย่างอันตรายจากความร้อน เช่น การรับประทานอาหารที่ทำให้ร้อนโดยไมโครเวฟและมีความร้อนไม่สม่ำเสมอ บางส่วนในอาหารจะมีความร้อนสูงมาก ในขณะที่บางส่วนมีความร้อนไม่สูงนัก ซึ่งทำให้ลวกปากและคอได้ หรือการเกิดไอน้ำภายในภาชนะบรรจุ เช่น ในซองข้าวโพดคั่ว (pop corn) เมื่อถูกเปิดออกโดยไม่ระมัดระวัง (โดยเฉพาะเด็กๆ) จะทำให้เกิดอันตรายต่อตาและบริเวณใบหน้าเนื่องจากไอน้ำที่มีความร้อนสูงได้

อาหารที่ได้รับความร้อนสูงมาก (superheating) เช่น ในการเตรียมกาแฟ โดยการนำน้ำไปให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ ถ้าน้ำได้รับพลังงานสูงมากจะทำให้เกิดความร้อนสูง น้ำในแก้วจะเดือดและพุ่งเป็นฟองออกนอกแก้วและจะเกิดภายในเตาไมโครเวฟ หรือกรณีที่ยังไม่พุ่งทันทีแต่เมื่อนำน้ำออกจากไมโครเวฟและใส่ผงกาแฟเข้าไปขณะที่น้ำยังมีอุณหภูมิสูงมาก จะทำให้เกิดการพุ่งขึ้นมา ของฟองอากาศเนื่องมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า bubble nucleation ร่วมกับการที่แก๊สที่ละลายในน้ำหรือของเหลวเกิดความร้อนสูงขึ้นเฉพาะบางจุด ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำจนทำให้เกิดฟองพุ่งขึ้นมา ในกรณีที่อาหารนั้นมีความหนืด เช่น สตอร์ จะทำให้เกิดฟองพุ่งที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีการเดือดที่รุนแรงกว่า และในน้ำมันเมื่อให้ความร้อนโดยไมโครเวฟพบว่าสามารถดูดซับพลังงานและเกิดความร้อนได้สูงจนใกล้เคียงกับจุดวาบไฟ (flash point) เมื่อนำอาหารที่มีความชื้นไปทอดในน้ำมันดังกล่าว จะทำให้เกิดการเดือดและกระเด็นจนเป็นอันตรายได้ ในส่วนของกำลังของคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ระยะต่างๆ ที่ใช้ตามบ้านเรือนนั้นแสดงดังภาพที่ 8.9



ภาพที่ 8.9 กำลังของคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ระยะต่างๆ

ที่มา : Buffler (1993)

จากภาพที่ 8.9 Buffler (1993) รายงานว่าผลในการทำลายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (high energy electromagnetic radiation) จะทำให้เกิดการทำลายยีน (genes) เซลล์ (cells) และเนื้อเยื่อ (tissue) ของสิ่งมีชีวิต การทำลายดังกล่าวเกิดเนื่องจากผลของการทำให้แตกตัวเป็นไอออน (ionizing effect) ของคลื่นซึ่งเริ่มต้นในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความถี่ประมาณ 1.5 พิโคเฮิร์ตซ์ (PHz) ตัวอย่างเช่น การที่มนุษย์เกิดเป็นโรคมะเร็งผิวหนังเนื่องจากสัมผัสกับแสงแดด ในส่วนของไมโครเวฟนั้นพบว่าในปัจจุบันยังไม่พบอันตรายที่ทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ แต่ถ้ามีการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังความเข้มสูง จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ทำให้มีการกำหนดปริมาณการรับของคลื่นไมโครเวฟซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร

การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปโดยส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับการใช้ความร้อนวิธีดั้งเดิม ซึ่งข้อดีและข้อเสียของการใช้ไมโครเวฟมีดังนี้

ข้อดี

1. เพิ่มความสะดวกและเป็นแหล่งของความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง มีความยืดหยุ่นและควบคุมได้ง่าย เป็นการทำความร้อนที่รวดเร็วกว่าวิธีการทำความร้อนดั้งเดิม
2. อาหารมีความสะอาด
3. สามารถทำความร้อนให้แก่อาหารที่บรรจุในภาชนะบรรจุชนิดที่แยกการทำความร้อนได้
4. เป็นการทำความร้อนที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากอากาศที่อยู่รอบ ๆ และเตาไมโครเวฟไม่ถูกทำให้ร้อน อัตราส่วนของการใช้พลังงานไฟฟ้าใช้ได้มากถึง 40 - 50% ในเตาไมโครเวฟที่ใช้คลื่นความถี่ 2,450 MHz
5. ช่วยประหยัดพื้นที่เนื่องจากอัตราการทำความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์จะเทียบเท่ากับอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยวิธีดั้งเดิมแต่ไมโครเวฟมีขนาดเล็กกว่า
6. เป็นวิธีการทำความร้อนที่รวดเร็วกว่า ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการเก็บผลิตภัณฑ์
7. การทำความร้อนโดยไมโครเวฟมีลักษณะเฉพาะที่สามารถใช้ร่วมกับวิธีการทำความร้อนแบบอื่น ๆ เพื่อที่จะทำให้ได้อุณหภูมิสูงตามต้องการ เช่น การทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลที่ผิวหน้า
8. ช่วยลดขั้นตอนการผลิตและลดความเสียหาย
9. เนื่องจากไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากภายในอาหาร ทำให้การกระจายของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอและไม่ทำให้เกิดความร้อนที่สูงเกินไปที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ในทางตรงกันข้ามการดูดซับพลังงานไมโครเวฟซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้องค์ประกอบของอาหารบางอย่างร้อนขึ้นได้เร็วกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งการที่อุณหภูมิของอาหารมีความสูงต่ำไม่เท่ากัน ทำให้สามารถใช้คุณสมบัตินี้ในการทำความร้อนแก่อาหารที่มีความแตกต่างกันได้ในเวลาเดียวกันได้

ข้อเสีย

1. เนื่องจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของอาหารขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า อาหารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันมาก จะมีรูปแบบของอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากเมื่อทำความร้อนโดยไมโครเวฟ อาหารที่เกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอมีสาเหตุมาจากลักษณะเฉพาะตัวของอาหาร ขนาดและรูปร่าง ดังนั้นโอกาสในการเกิดความร้อนที่สูงเกินไปจึงมักเกิดขึ้นที่บริเวณมุมหรือขอบในขณะที่อาจจะเกิดความร้อนน้อยกว่าที่ต้องการในบริเวณใจกลางอาหารที่มีขนาดชิ้นใหญ่

2. เป็นการลงทุนที่สูง แมกนีตรอนเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงกว่าอุปกรณ์ที่ทำความร้อนวิธีดั้งเดิม
3. เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อน เป็นผลให้ยากต่อการบำรุงรักษาสำหรับบุคคลที่ขาดประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟ
4. ไมโครเวฟเพียงลำพังไม่สามารถย่างหรือทำให้อาหารเกิดสีน้ำตาลบนผิวหนังผลิตภัณฑ์ได้
5. ต้องการมาตรการรักษาความปลอดภัยที่แตกต่างไปจากการทำความร้อนโดยวิธีดั้งเดิม

การ tempering เป็นวิธีการให้ความร้อนกับอาหารแช่เยือกแข็งเพื่อคืนสภาพเดิม เพียงแต่เพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่อาหารยังคงรูปพอที่จะนำมาตัดแต่งหรือนำมาบดได้ (อุณหภูมิประมาณ -4 องศาเซลเซียส) ซึ่งยังไม่ถึงขั้นการละลายน้ำแข็ง (thawing) โดยไมโครเวฟจะช่วยลดระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิและส่วนมากใช้ที่คลื่นความถี่ 915 MHz เนื่องจากสามารถทะลุทะลวงได้ดีกว่า ข้อดีของ tempering คือทำให้ตัดชิ้นอาหารได้ง่ายขึ้น ลดต้นทุนในการแช่เย็นในกรณีที่รออาหารแช่เยือกแข็งละลาย ลดต้นทุนการแช่เย็น ลดการเสื่อมเสียของอาหารและลด drip loss กระบวนการมีความยืดหยุ่นในการใช้และการควบคุม ทำให้สามารถควบคุมสุลักษณะของอาหารได้ดีกว่า รวมทั้งลดพื้นที่ในการเก็บอาหารลงได้

ตัวอย่างการ tempering เช่นในการละลายอาหารแช่เยือกแข็งจะใช้เวลาประมาณ 5 นาที โดยไม่ต้องแยกเอาภาชนะบรรจุออกจากอาหาร อาหารจะเกิด drip loss น้อยมาก เปรียบเทียบกับอาหารที่ละลายน้ำแข็งโดยวิธีดั้งเดิม ปกติจะใช้เวลาตั้งแต่ 2 - 5 วัน และจะเกิด drip loss มากถึง 5% ของน้ำหนักอาหาร

การทำแห้งอาหาร ได้มีการประดิษฐ์เครื่องทำแห้งที่ใช้ไมโครเวฟช่วยในการทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารร้อนและระเหยออกมา เป็นวิธีที่พัฒนาการทำแห้งวิธีดั้งเดิมที่ใช้ระบบลมร้อนซึ่งมักมีผลต่อผลิตภัณฑ์ คือทำให้เกิด case hardening เนื่องจากในช่วงหลังของการทำแห้ง อัตราการระเหยน้ำจากด้านในของอาหารจะช้าลงเพราะความร้อนจะผ่านเข้าไปได้ช้าลง ตัวอย่างอาหารที่สามารถทำแห้งโดยไมโครเวฟ เช่น พาสต้า มะเขือเทศบด (tomato paste) หัวหอม ข้าวและอาหารขบเคี้ยวโดยใช้ร่วมกับเครื่องทำแห้งระบบลมร้อนเพื่อการถ่ายเทความชื้นที่บริเวณผิวหนังของอาหาร

ในการทำแห้งอาหารนั้น การใช้ไมโครเวฟจะลดต้นทุนการทำแห้งลงได้อย่างมาก ถ้าอาหารนั้นมีความชื้นเริ่มต้นก่อนการทำแห้งต่ำกว่า 20% และโดยทั่วไปค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงานจะมี

ประมาณหนึ่งในสามของวิธีการทำแห้งดั้งเดิม ตัวอย่างเช่น การทำแห้งพาสต้าพบว่าจะช่วยลดเวลาการทำแห้งลงได้ ตั้งแต่ 1.5 - 8 ชั่วโมง และลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลง 20% รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการดำเนินการประมาณ 20 - 25% และยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติของสีและเนื้อสัมผัสให้ดียิ่งขึ้น ช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และลดโอกาสที่จะเกิด case hardening ลงได้

การอบ (baking) ในการใช้ไมโครเวฟในการอบขนมปัง เค้กและพาสตรี (pastry) ได้รับความนิยมอย่างสูง โดยสามารถใช้ได้ทั้งที่ความถี่สูงและต่ำ แต่ที่ความสูงจะมีข้อดีคือสามารถทะลุทะลวงได้มากกว่า และทำให้ส่วนตรงกลางของขนมอบได้รับความร้อนอย่างเพียงพอ ข้อเสียในการอบขนมอบด้วยไมโครเวฟคือไม่สามารถทำให้เกิดเปลือกสีน้ำตาล (crust) และเกิดสีน้ำตาลขึ้นได้ ในบางกรณีทำให้องค์ประกอบของกลั่นเกิดได้ไม่ดี โดยทั่วไปการใช้ไมโครเวฟมักใช้ร่วมกับการอบแบบดั้งเดิมซึ่งใช้แก๊สหรือคลื่นอินฟราเรดหรือการทอดในน้ำมันร้อน

การใช้ไมโครเวฟในการอบขนมปัง ทำให้สามารถผลิตขนมปังจากแป้งสาลีที่มีปริมาณโปรตีนต่ำแต่มีปริมาณแอลฟาอะไมเลส (α -amylase) สูง ปริมาณอะไมเลสที่มีอยู่มากจะทำให้แป้งถูกย่อยในสภาวะการอบที่ปกติ เป็นผลให้โด (dough) น้อยลงและโดที่ได้มีคุณสมบัติยอมให้อากาศผ่านได้มากเกินไปจนปริมาณขนมปังที่ได้มีค่าน้อย รวมทั้งยังมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อย ทำให้มีความยืดหยุ่นต่ำและมีเนื้อสัมผัสที่เหนียว โดยลักษณะนี้จะสามารถอบได้โดยวิธีดั้งเดิมเมื่อใช้ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และใช้ไมโครเวฟ (ขนาด 896 MHz) ในเวลาเดียวกัน เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟในการอบ ทำให้ส่วนผสมทั้งก่อนเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะถูกทำลายก่อนที่จะกิจกรรมของเอนไซม์จะเกิดมากจนเกินไป และก่อนการสร้างแก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ) ภายในโดจะถูกเร่ง ซึ่งมีผลทำให้ขนมปังที่ได้มีปริมาณจำเพาะที่สูงกว่าแม้ว่าจะมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า

การควบคุมแมลง (insect control) การใช้คลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟสามารถทำลายแมลงที่ปนเปื้อนมากับเมล็ดธัญพืชชนิดต่าง ๆ ได้ โดยแมลงที่เป็นตัวเต็มวัยจะทนต่อไมโครเวฟมากกว่าพวกที่ยังไม่เจริญเต็มที่ ผลพลอยได้จากการใช้ไมโครเวฟกำจัดแมลง ได้แก่การที่เมล็ดธัญพืชมีความชื้นลดลง ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้รังสีแกมมา อินฟราเรด และไมโครเวฟ และการใช้หลายวิธีการร่วมกันในการทำลายแมลง *R. dominica* ในข้าวสาลีพบว่าสามารถลดปริมาณแมลงดังกล่าวได้ 54, 55 และ 42% เมื่อใช้รังสีแกมมา อินฟราเรดและไมโครเวฟตามลำดับ เมื่อใช้วิธีการร่วมระหว่างรังสีแกมมากับอินฟราเรด และรังสีแกมมากับไมโครเวฟ พบว่าจะสามารถลดจำนวนแมลงลงได้ถึง 95 และ 89% ตามลำดับ

การพาสเจอร์ไรส์และสเตอริไลส์ (ผลต่อจุลินทรีย์) ในการใช้ไมโครเวฟในการพาสเจอร์ไรส์และสเตอริไลส์อาหารจะทำให้อุณหภูมิแตกต่างกัน เช่นเดียวกับการแปรรูปโดยใช้ความร้อนวิธีดั้งเดิม โดยอุณหภูมิที่ใช้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร ปริมาณของอาหาร รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะบรรจุแล้ว และเวลาที่คงไว้เมื่ออุณหภูมิขึ้นสูงตามที่ต้องการ (holding time) การสเตอริไลส์อาหารด้วยไมโครเวฟ จะใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงต้องใช้ความดันที่สูงขึ้น แต่ยังไม่มีการใช้มากนัก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุต้องทนต่ออุณหภูมิและความดันภายในที่สูงซึ่งเกิดจากแก๊สในส่วนของ headspace โดยเฉพาะที่เกิดจากไอน้ำ

ในการศึกษาน้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธี HTST โดยใช้ไมโครเวฟที่สภาวะ 71.5 องศาเซลเซียส เวลา 59 วินาที (ใช้ไมโครเวฟขนาด 700 วัตต์) ซึ่งแม้ว่าจะให้ความร้อนจนถึง 65 วินาที และคงไว้อีก 15 วินาที พบว่าไม่สามารถทำลายเชื้อ *Salmonella typhimurium* *Escherichia coli* หรือ *Pseudomonas fluorescence* ลงได้ทั้งหมด หรือในการพาสเจอร์ไรส์นมโดยไมโครเวฟที่อุณหภูมิระหว่าง 62.8 และ 71.7 องศาเซลเซียส เวลา 4.5 – 5.0 นาที (ขึ้นกับกำลังของไมโครเวฟที่ใช้ 550 หรือ 700 วัตต์) แล้วนำไปแช่เย็นข้ามคืน ผลการทดลองพบว่าไม่สามารถลดจำนวนของเชื้อ *Streptococcus faecalis* ในน้ำนมลงได้ ซึ่งมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนน้ำนมโดยใช้อ่างน้ำร้อน (water bath) ที่อุณหภูมิ 62.8 เป็นเวลา 30 นาทีซึ่งทำลายเชื้อนี้ลงได้

ในการศึกษาการให้ความร้อนแก๊สที่เดิมเชื้อ *S. typhimurium* *S. aureus* และ *Clostridium perfringens* โดยไมโครเวฟภายใต้สภาวะมาตรฐาน (ทำให้สุกที่อุณหภูมิสุดท้าย 76.6 องศาเซลเซียส โดยความถี่ไมโครเวฟขนาด 2,450 MHz) พบว่าไม่สามารถทำลายเชื้อใดเชื้อหนึ่งให้หมดไปได้ และมีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายใน ไม่น่าจะเป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อการบริโภค เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียบริเวณพื้นผิวภายนอกในตัวอย่างไก่ที่ทำให้สุกโดยไมโครเวฟ มีมากกว่าในตัวอย่างไก่ที่ทำให้สุกโดยใช้เตาอบแบบธรรมดา โดยเหตุผลที่อธิบายว่าการที่ไมโครเวฟไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ในอาหารที่ผ่านไมโครเวฟได้นั้น เกิดเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำให้อาหารเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟนั้นสั้นมาก และสนามไมโครเวฟขาดความสม่ำเสมอในอาหาร ทำให้อุณหภูมิในแต่ละจุดในชิ้นอาหารไม่เท่ากัน และมีข้อแนะนำว่าให้ใช้วัสดุที่เป็นฉนวนห่อหุ้มอาหาร ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการภายในอาหารมีความสม่ำเสมอทั่วถึงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ให้ดียิ่งขึ้น

การศึกษการใช้ไมโครเวฟในการสเตอริไลส์อาหารหลายชนิดรวมทั้งใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเตรียมอาหาร เช่น ในการศึกษาการฆ่าเชื้อภาชนะบรรจุอาหารทารก โดยนำขวดและจุกนมไปให้

ความร้อนขึ้นในเตาไมโครเวฟขนาด 600 วัตต์ ที่ความถี่ 2,450 MHz และนำภาชนะไปตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์เพื่อหาประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อ ผลการทดลองพบว่าวิธีสเตอริไลส์ภาชนะดังกล่าวโดยใช้ไมโครเวฟ ได้ผลดีต่อเมื่อต้มในไมโครเวฟเป็นเวลา 3 นาที ซึ่งวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการสเตอริไลส์ดั้งเดิมเพียงเล็กน้อย

ในการทำให้สุกและกระบวนการอื่นๆ ไมโครเวฟนิยมใช้ในการทำให้สุกก่อน (precook) ในผลิตภัณฑ์เบคอน (bacon) ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวน้อยลงและมีความสม่ำเสมอ รวมทั้งมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลง ได้มีการศึกษาผลของไมโครเวฟต่อเกลือไนโตรที่เปรียบเทียบกับวิธีการทอดแบบดั้งเดิมพบว่าปริมาณไนโตรซามีน (nitrosamine) ที่เกิดจากการใช้ไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้มีการศึกษาการใช้ไมโครเวฟในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ รวมทั้งผลของการทำให้อาหารสุกโดยใช้ไมโครเวฟต่อคุณค่าทางโภชนาการและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสต่าง ๆ ในอาหารหลายประเภทที่มีความแตกต่างกันออกไป

เอกสารอ้างอิง

- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. มปป. การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 16 หน้า.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2543. การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. หน้า 173 – 195. ใน "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร". พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- Banik, S., S. Bandyopadhyaya and S. Ganguly. 2003. Bioeffects of microwave – a brief review. *Bioresource Technology* 87 : 155 – 159.
- Barbosa-Canovas, G. V. , U. R. Pothakamury, E. Palou and B. G. Swanson. 1998. *Nonthermal Preservation of Foods*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Buffler, C. R. 1993. *Microwave Cooking and Processing : Engineering Fundamental for the Food Scientist*. Van Nostrand Reinheld, New York.
- Canumir, J. A., J. E. Celis, J. de Bruijn and L.V. Vidal. 2002. Pasteurisation of apple juice by using microwaves. *Lebensm. – Wiss. u. Technol.* 35 : 389 – 392.
- Copson, D. A. 1975. Theory of microwave heating. pp. 1 – 34. *In* "Microwave Heating". 2nd ed. D. A. Copson (ed.). The AVI Publishing Company, Inc. Connecticut.
- Decareau R. V. and R. A. Peterson. 1986. *Microwave Processing and Engineering*. VCH Publishing, Florida.
- Fellows, P. J. 2000. Dielectric, ohmic and infrared heating. pp. 365 – 384. *In* "Food Processing Technology : Principles and Practice". 2nd ed. P.J. Fellows (ed.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Fung, D. Y. C. and F. E. Cunningham. 1980. Effect of microwave on microorganisms in foods. *J. Food Protection* 43 : 641-650.
- Jones, P. L. and A. T. Rowley. 1977. Dielectric dryers. pp. 156 – 178. *In* "Industrial Drying of Foods". S. Thorne (ed.). Blackie Academic and Professional, London.

- Hill, M. A. 1981. The effect of microwave processing on the chemical, physical and organoleptic of some foods. pp. 121 – 151. *In* "Developments in Food Preservation". S. Thorne (ed.). Applied Science Publishers, Essex.
- Mudgett, R. 1982. Electrical properties of foods in microwave processing. *Food Tech.* Feb. : 109-115.
- _____. 1986. Microwave properties and heating characteristics of foods. *Food Tech.* 40 : 84-93.
- _____. 1990. Developments in Microwave Food Processing. pp. 359-404. *In* "Biotechnology and Food Process Engineering". H. G. Schwartzberg and M. A. Rao (eds.). Marcel Dekker, Inc., New York.
- Mullin, J. 1995. Microwave Processing. pp. 112-134. *In* "New Methods of Food Preservation". G. W. Gould (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Palaniappan, S. and S. K. Sastry. 1990. Effects of electricity on microorganisms : a review. *J. Food Proc. Pres.* 14 : 393 – 414.
- Ramesh, M. N., W. Wolf, D. Tevini and A. Bogner. 2002. Microwave blanching of vegetables. *J. Food Sci.* 67(1) : 390 – 398.
- Rosenberg, U. and W. Boegl. 1987. Microwave pasteurization, sterilization, blanching and pest control in the food industry. *Food Technol.* June : 92 – 99.
- Rosenthal, I. 1992. Microwave Radiation. pp. 115 – 154. *In* "Electromagnetic Radiations in Food Science". I. Rosenthal (ed.). Springer-Verlag, Berlin.
- Singh, R. P. and D. R. Heldman. 2001. Microwave Heating. pp. 306 – 331. *In* "Introduction to Food Engineering". 3rd ed. Academic Press, London.
- U.S.FDA. 2002. Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies : Microwave and Radio Frequency Processing. สืบค้นจาก <http://www.cfsan.fda.gov/~comm/ift-micr.html> เมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม 2547.