

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

หน่อไม้ฝรั่ง

หน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* var. *altis* L.) เดิมทีเป็นพืชพื้นเมืองแถบยุโรปและแอฟริกา เป็นผักที่ชื่นชอบของผู้รักสุขภาพ เพราะมีคุณค่าทางอาหารค่อนข้างสูง โดยเฉพาะฟอสฟอรัส วิตามินเอ และกลูตาไธโอน (สารต่อต้านการเกิดมะเร็ง) หน่อไม้ฝรั่งเป็นพืชผักสำคัญที่มีแนวโน้มประมาณการทำการรายได้ให้แก่เกษตรกรและประเทศไทยอย่างมาก ผลผลิตส่วนใหญ่จะส่งออกในรูปของหน่อสดและแช่แข็ง ในปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณการส่งออกหน่อไม้ฝรั่งประมาณ 17,295 ตัน มูลค่าประมาณ 465.15 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) จึงกล่าวได้ว่าหน่อไม้ฝรั่งเป็นผักที่มีมูลค่าสูงเหมาะแก่การนำมาแปรรูปเป็นผักตัดแต่งพร้อมปรุงสุกได้ และเป็น การสร้างตลาดใหม่แก่อุตสาหกรรมอาหารได้

ผักสดตัดแต่ง

ผักสดตัดแต่ง หมายถึง การนำผักที่ผ่านการคัดเลือกคุณภาพมีความอ่อน-แก่ ที่เหมาะสมในการบริโภค มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก เจาะแกน ตัดแต่งดำหนิ ล้างทำความสะอาด หั่นให้เป็นชิ้นและบรรจุ ซึ่งผักตัดแต่งนั้นถือเป็นการแปรรูปขั้นต่ำ (minimal process) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผักตัดแต่ง จึงเป็นผลิตภัณฑ์ผักสดบรรจุพร้อมบริโภค แต่อย่างไรก็ตามผักตัดแต่งยังเป็นเนื้อเยื่อที่มีชีวิต ซึ่งยังคงกิจกรรมการมีชีวิตหรือมีปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในเซลล์เหมือนกับผักและผลไม้สด เช่น มีการหายใจอยู่ตลอดเวลา จึงยังคงมีกระบวนการแก่-สุกตามธรรมชาติ (Greve and Labavitch, 1991) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในทางเสื่อมคุณภาพ เช่น สีของผักที่ซีดลง และมีการเปลี่ยนแปลงของรสชาติ เป็นต้น โดยขั้นตอนในกระบวนการตัดแต่ง เช่น การปอกเปลือก การเจาะแกนตัดแต่งและการหั่นเป็นชิ้น มีผลทำให้เนื้อเยื่อพืชเกิดความเสียหาย ซึ่งจะไปเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ของเซลล์ส่งผลให้เนื้อผลไม้ตัดแต่งเน่าเสียเร็วขึ้น นอกจากนี้อัตราการหายใจที่สูงขึ้นของเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายจะไปเร่งการสูญเสียน้ำของเนื้อเยื่อซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียความกรอบอันเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญอันหนึ่งของผักสด โดยปกติผักตัดแต่งเกิดการเน่าเสียได้ง่ายกว่าผักที่มีเปลือก เนื่องจากเปลือกเป็นโครงสร้างของพืชที่สามารถช่วยป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และความเสียหายของเนื้อเยื่อที่เกิดจากแรงกระทบบริเวณรอยตัดที่เกิดจากการปอก

เปลี่ยนการตัดแต่งและการหันให้เป็นขึ้น โดยจะเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในการแปรรูปผักตัดแต่งจึงต้องมีการจัดการแนวทางในการผลิตที่ดี (good manufacturing practice) และมีการควบคุมอุณหภูมิในการผลิตเพื่อลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ดังที่กล่าวมาข้างต้นควรเป็นกรรมวิธีที่ทำให้เนื้อเยื่อผลไม้เกิดการเสียหายน้อยที่สุด ดังนั้นอุปกรณ์และเทคนิคในการตัดแต่งจึงจำเป็นต้องใช้ใบมีดที่มีความคมมากเพื่อลดความเสียหาย เนื่องจากการฉีกขาดของเนื้อเยื่อและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะผิวหน้าของขึ้นผักตัดแต่งที่สามารถทำให้ดึงดูดผู้บริโภคสนใจในตัวผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นคุณลักษณะลำดับต้น ๆ ที่ผู้บริโภคส่วนใหญ่ใช้ตัดสินในการยอมรับหรือซื้อผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้หากผักตัดแต่งมีความสะดวกในการปรุงสุกพร้อมรับประทานก็น่าจะทำให้ผู้บริโภคนิยมหันมาบริโภคผักสดตัดแต่งมากยิ่งขึ้น การปรุงสุกด้วยไมโครเวฟก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภครับประทานผักตัดแต่งได้สะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงคลื่นไมโครเวฟในหัวข้อถัดไป

คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) (ระหว่างความยาวคลื่น 100 เซนติเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร) (Rosenthal, 1992) ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่ของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ความถี่ถัดขึ้นไปคือ แสงที่ตามองเห็น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet ray) สูงขึ้นไปถึงรังสีเอ็กซ์ (X-Rays) ที่ยที่สุดคือ รังสีแกมมา (Gamma rays)

ไมโครเวฟไม่ใช่ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือการหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้วทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellows, 2000) ถ้าหากนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งอาหาร เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านอาหารซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพและสามารถให้ความร้อนถึงด้านในของอาหารที่ต้องการอบแห้ง

กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟเกิดจากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุ Singh และ Heldman (2001) กล่าวว่า การเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการได้แก่ การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) และ การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

1. การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization)

ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในอาหารสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ซึ่งเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในอาหารนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในอาหารจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม โปตัสเซียม หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้ ไอออนบวก (cations) และไอออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

ในอาหารประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบใน โมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 หรือ 2,450 เมกกะเฮิร์ตซ์ (พันล้านครั้งต่อวินาที) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร ในส่วนของ โมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้น โมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับ โครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับ โมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียง เพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกัน อันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญที่สุดในอาหารยกเว้นในอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงมาก เช่น แสม เป็นต้น การเกิดความร้อนในอาหารบริเวณจุดที่สัมผัสกับไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการร้อนขึ้นของน้ำ โดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (สายสนม, 2543)

จากกลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จะช่วยโมเลกุลของน้ำในอาหารได้รับความร้อนเร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยในการลดเวลาในกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนให้น้อยลง แต่ทั้งนี้การใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นมีข้อจำกัดอีกหลายประการ อาทิเช่น ความไม่สม่ำเสมอ

ของความร้อนภายในชิ้นวัสดุที่ปรุงสุกด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการแปรรูปด้วยไมโครเวฟให้ดีขึ้นจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ สมบัติทางไดอิเล็กทริกก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการดูดซับความร้อนภายในวัสดุ ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกันจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้วัสดุที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิอย่างทั่วถึง

สมบัติทางไดอิเล็กทริก

สมบัติทางไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) เป็นสมบัติที่บอกว่าสารชนิดหนึ่งดูดซับไมโครเวฟได้ดีเพียงใด สมบัตินี้สำคัญมากสำหรับผู้ผลิตอาหารที่ต้องการสร้างสูตรอาหาร (Singh and Heldman, 2001) ที่ใช้สำหรับการแปรรูปด้วยไมโครเวฟได้ เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของอาหาร (คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือและปริมาณน้ำ เป็นต้น) โดยสมบัติทางไดอิเล็กทริกแบ่งได้ออกเป็นสองประเภท ได้แก่

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร
2. ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า "Loss" หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของวัตถุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Mudgett, 1986) โดยค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad (1)$$

หรือ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

จากสมการ ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัสดุจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น ดังแสดงค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ ดังตาราง 1

ตาราง 1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

อาหาร	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	915 MHz			2450 MHz			
		ϵ'	ϵ''	d_p (mm)	ϵ'	ϵ''	d_p (mm)	
อากาศ		1.0	0		1.0	0		
น้ำที่ไม่มีประจุ	20	79.5	3.8	122.4	78.2	10.3	106.8	
น้ำที่มีเกลือ 0.5%	23	77.2	20.8	22.2	75.8	15.6	10.9	
น้ำแข็ง	-12	-	-	-	3.2	0.003	11.615	
น้ำมันรำข้าว	25	2.6	0.18	467	2.5	0.14	220	
แอปเปิล	22	60	9.5	42.6	57	12	12.3	
มันฝรั่ง	25	65	20	21.3	54	16	9.0	
หน่อไม้ฝรั่ง	21	74	21	21.5	71	16	10.3	
ผลไม้แห้งที่ความชื้น	87.5%	22	56.0	8.0	48.9	54.5	11.2	12.9
	30.3%	22	14.4	6.0	33.7	10.7	5.5	11.9
	9.2%	22	2.2	0.2	38.7	2.2	0.1	28.9
	68.7%	60	32.8	9.1	33.1	30.8	7.5	14.5
	34.6%	60	22.5	6.8	36.8	19.7	6.6	13.2
	11.0%	60	5.3	1.7	71.5	4.5	1.4	29.9
เนย	22	51	17	22.2	40	13	9.6	
แฮม	25	61	96	5.1	60	42	3.8	
แฮม	50	50	140	3.7	53	55	2.8	
เนื้อวัว	25	76	36	13.0	72	23	9.9	
เนื้อวัว	50	72	49	9.5	68	25	8.9	
โพลีเอทิลีน	-	-	-	-	2.3	0.003	7000	
โพลีโพรพิลีน	-	-	-	-	2.3	0.003	-	

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rosenthal (1992), วิไล (2543)

เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟแก่วัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้นหนึ่งสามอย่างดังต่อไปนี้คือ

2.1 ความร้อนถูกดูดซับในระดับต่าง ๆ กัน

2.2 พลังงานจะผ่านวัตถุไปโดยไม่มีการดูดซับ

2.3 พลังงานถูกสะท้อนกลับ

วัตถุอาจสะท้อนหรือดูดซับไมโครเวฟขึ้นกับสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัตถุ ไมโครเวฟอาจส่งผ่านวัตถุ ไมโครเวฟอาจส่งผ่านวัตถุโดยไม่มีการดูดซับ เช่น วัสดุที่เป็นภาชนะบรรจุพวกแก้ว เซรามิกส์ และพอลิเมอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ ไมโครเวฟอาจมีการเปลี่ยนทิศทางเมื่อเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปอีกร่างหนึ่งเช่นเดียวกับการหักเหของแสงเมื่อผ่านจากอากาศไปยังน้ำ

เมื่ออาหารอยู่ในทางเดินของไมโครเวฟพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนจะถูกดูดซับและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน การถ่ายเทความร้อนในอาหารก็เกิดขึ้นโดยการนำความร้อนด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีการกระจายพลังงานไม่สม่ำเสมอ แก้ว กระจก พลาสติกโพลีเมอร์ที่ใช้บรรจุหีบห่อยอมให้ไมโครเวฟผ่านและไม่ร้อนขึ้น ส่วนโลหะต่าง ๆ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะทำให้แมกนีตรอนเสื่อมสภาพได้

นอกจากสมบัติไดอิเล็กทริกจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือและปริมาณน้ำแล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยพบว่าเมื่อไมโครเวฟผ่านน้ำแข็งจะมีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าเมื่อผ่านน้ำ เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งและน้ำที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีผลอย่างมากต่อการทำให้อาหารแช่แข็งร้อนขึ้น น้ำดูดซับพลังงานได้สูง สูงและร้อนได้ง่ายขณะที่น้ำแข็งยอมให้ไมโครเวฟผ่านไปจึงร้อนได้ช้ามาก เมื่ออาหารแช่แข็งถูกทำให้ร้อนขึ้นจึงเกิดสถานะของการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ อาหารที่ละลายแล้วบางส่วนจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากกว่า ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนที่ละลายนี้ ขณะที่อาหารที่ยังแข็งตัวอยู่บางส่วนจะดูดซับพลังงานได้น้อยกว่ามาก ผลคือบางส่วนของอาหารมีอุณหภูมิที่ต้องการขณะส่วนอื่นยังแข็งตัวอยู่

อันตรกิริยา (interaction) กับวัตถุ ไมโครเวฟอยู่ในรูปของพลังงานไม่ได้อยู่ในรูปของความร้อน แต่การให้ความร้อนเป็นผลของของอันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับวัตถุที่เป็นไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนแปลงพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถประมาณได้จากความเข้มของสนามไฟฟ้า ความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้งานในกระบวนการให้ความร้อน วัตถุที่ถูกทำให้ร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระบบไมโครเวฟที่ให้พลังงาน ค่าไดอิเล็กทริกยังบ่งบอกถึงความลึกของการทะลุทะลวงของไมโครเวฟ วิธีที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไดอิเล็กทริกกับความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนจะใช้ความลึกของการทะลุทะลวง (depth of penetration) ของไมโครเวฟซึ่งเป็นระยะทางจากผิวของผลิตภัณฑ์ ความลึกของการทะลุทะลวงขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่ทำให้ร้อน และการสูญเสียหรือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของอาหาร ความยาวคลื่น และความถี่ไมโครเวฟ โดยทั่วไปแล้ว ความถี่ของ

ไมโครเวฟที่ใช้ยิ่งต่ำ ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งมาก เช่นพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่คลื่น 915 เฮิร์ต (MHz) จะทะลุทะลวงได้ดีกว่าพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เฮิร์ต (MHz) เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่มากกว่า นอกจากนี้แล้วยังอุณหภูมิมีค่าต่ำ ๆ ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งสูงขึ้นเมื่อใช้ความถี่เดียวกัน โดยทั้งนี้พฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอธิบายได้ด้วยสมการแมกซ์เวลล์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

ผดุงศักดิ์ (2551) กล่าวว่าระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ จะมีความซับซ้อนในการทำงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากการอธิบายที่สมบูรณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมทางกายภาพอย่างต้องแท้ โดยปกติการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะกระทำโดยผ่านสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ซึ่งสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามเวลา เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ลงไปก็จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟได้อย่างสมบูรณ์

สมการแรกของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา กับสนามแม่เหล็ก H หรือกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่หมุนวนรอบ ๆ คอนทัวร์ เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะโทมฮาโมนิคดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

สมการที่สองของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของแอมแปร์ ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) H กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม (total current density) J (ซึ่งรวมผลของกระแสดีสเพลสเมนต์และกระแสเหนี่ยวนำ) หรือกล่าวได้ว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กที่หมุนวนรอบ ๆ คอนทัวร์ผิวปิด (closed contour) เท่ากับกระแสสุทธิที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ยกตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าที่ล้อมรอบ (surrounded) โดยสนามแม่เหล็กเป็นต้น ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะโทมฮาโมนิค (time harmonic) ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

เพื่อความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า กฎของเกาส์ (Gauss's Law) ถูกนำมาใช้ กล่าวคือฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ออกจากขอบเขตเท่ากับศูนย์และฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ออกจากขอบเขตจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุ (charge) ภายในวัสดุนั้น จะได้

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

โดยที่

q คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (charge density)

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ J คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (flux density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J, D และ B กับ E และ H คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (9)$$

โดยที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (electric conductivity)

μ คือค่าเปอร์มีลิตี (permeability)

ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ประจุ และกระแส มีส่วนเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ (สมการแมกซ์เวลล์) รูปแบบสมการอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ เป็นที่นิยมใช้

กันอย่างกว้างขวาง ในการแก้ปัญหาเพื่อจะหาคำตอบที่เงื่อนไขค่าของขอบเขตต่างๆ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า สนามไฟฟ้า E และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก H โดยการแทนสมการที่ (7) ถึง (9) ลงในสมการที่ (3) ถึง (6) จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (13)$$

สมการที่ (10) และ (11) อ้างอิงมาจาก กฎของกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (3) และกฎของแอมแปร์ ดังสมการที่ (4) ส่วนสมการที่ (12) และ (13) นั้นขึ้นอยู่กับกฎของเกาส์ ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

จากชุดสมการแมกซ์เวลล์ สมการที่ (10) ถึงสมการที่ (13) ทำการคูณเชิงสเกลาร์ในสมการที่ (11) ด้วย E และสมการที่ (12) ด้วย H สามารถเขียนสมการแมกซ์เวลล์ ใหม่ในรูปของพลังงาน จะได้

$$\vec{E}(\nabla \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (14)$$

$$\vec{H}(\nabla \times \vec{E}) = -\vec{H} \cdot \left(\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (15)$$

ทำการหักกลับสมการที่ (15) ด้วยสมการที่ (14) และใช้คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างสองเวกเตอร์ ในที่นี้คือ เวกเตอร์ F_1 และ F_2 และเขียนในรูปความสัมพันธ์จะได้

$$\nabla \cdot (\vec{F}_1 \times \vec{F}_2) = \vec{F}_2 \cdot (\nabla \times \vec{F}_1) - \vec{F}_1 \cdot (\nabla \times \vec{F}_2) \quad (16)$$

จากคุณสมบัติของสมการที่ (16) เราสามารถจัดรูปความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (17)$$

เมื่อทำการอินทิกรัลตลอดปริมาตรของโดเมนและประยุกต์ใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (Divergence theorem) ซึ่งโยงความสัมพันธ์กันระหว่างการหาอินทิกรัลเชิงพื้นผิว (surface integral) กับอินทิกรัลเชิงปริมาตร (volume integral) จะได้ (ผดุงศักดิ์, 2551)

$$\iint (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} + \iiint \left[\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right] dv = 0 \quad (18)$$

ในที่นี้เทอมผลคูณ (cross product) คือ $\vec{E} \times \vec{H}$ แสดงถึงความหนาแน่นกำลังเชิงพื้นผิว (surface power density) ซึ่งมีหน่วยเป็น W/m^2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกำลัง ซึ่งเรามักจะอ้างถึงพอยน์ติงเวกเตอร์ (pointing vector) นั่นเอง หากทำการอินทิกรัลในเทอมที่สองซึ่งเป็นกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก (magnetic power density) ก็จะได้

$$\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{2} \mu \frac{\partial \vec{H}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \mu \vec{H}^2 \right) \quad (19)$$

เช่นเดียวกับขั้นตอนการหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก จากสมการที่ (18) เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของไฟฟ้า (electric power density) ก็จะได้

$$\vec{E} \cdot \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{\partial \vec{E}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 \right) \quad (20)$$

จากสมการข้างบนนี้ เราสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟ (microwave power absorbed) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (local volumetric heat generation) คือ

$$Q = \vec{E} \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma |\vec{E}|^2 \quad (21)$$

จากสมการที่ (21) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้น ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (root mean square value) ของความเข้มของสนามไฟฟ้าจะถูกใช้ ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟหรือ ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร อาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการต่อไปนี้ก็ได้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' (\tan \delta) E^2 \quad (22)$$

จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย (dielectric loss factor) และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า หากค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียมีน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริก โดยเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย อย่างไรก็ตามปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกและขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริก เป็นต้น

สมการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุมี 3 ลักษณะด้วยกันคือ การนำความร้อน (conduction heat transfer) การพาความร้อน (convection heat transfer) และการแผ่ความร้อน (radiation) โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยการนำความร้อนและการพาความร้อนมาพิจารณาอุณหภูมิในหม้อไม่ฝรัง โดยแหล่งกำเนิดเป็นกำลังงานสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งกำลังงานสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายต่อ 1 หน่วยปริมาตร หาได้จากค่ากำลังงานเฉลี่ยคือ (โชคชัย, 2548)

$$P = \frac{P_v}{V} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (23)$$

โดย

P เป็นกำลังงานสนามไฟฟ้า

P_v เป็นกำลังงานเฉลี่ย

- V เป็นปริมาตรหนึ่งหน่วย
 ω เป็นความถี่เชิงมุม (radian)
 ϵ_0 เป็นสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศอิสระ
 ϵ_r'' เป็นค่าตัวประกอบการสูญเสีย (dielectric loss factor) ของหน่อไม้ฝรั่ง
 \vec{E} เป็นสนามไฟฟ้ารวม (V/m)

เมื่อหน่อไม้ฝรั่งไม่เป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียและได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้า จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตราที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของหน่อไม้ฝรั่งเทียบกับเวลา ดังนั้นหากหน่อไม้ฝรั่งได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้าจะทำให้มีอุณหภูมิในมวลเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิเริ่มต้นตามเวลาที่ได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับกำลังงานสนามไฟฟ้าที่ได้รับสามารถเขียนได้ว่า

$$P_{av} = M_u c_m \left(\frac{T - T_0}{t} \right) \quad (24)$$

โดย

- M_u เป็นมวลของหน่อไม้ฝรั่ง (kg)
 T_0 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
 c_m เป็นความจุความร้อนจำเพาะของหน่อไม้ฝรั่ง ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
 t เป็นเวลา (s)

สมการที่ 24 มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กทริกก็ส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นด้วย และจากความสัมพันธ์ของสมการ (23) และ (24) ทำให้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลาได้คือ

$$\left(\frac{T - T_0}{t} \right) = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |\vec{E}|^2}{2 \rho_m c_m} \quad (25)$$

โดย

ρ_m เป็นความหนาแน่นของหน่อไม้ฝรั่ง (kg/m^3)

เพราะฉะนั้นสมการการส่งผ่านความร้อนในหน่อไม้ฝรั่งที่สัมพันธ์กับกำลังงานสนามไฟฟ้าจะเป็น

$$\frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial t} = \frac{k_t}{\rho_m c_m} \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial z^2} \right\} - \frac{v_s}{\rho_m c_m} (T(\rho, \varphi, z; t) - T_a) + \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r |\vec{E}|^2}{2\rho_m c_m} \quad (26)$$

โดย

$T(\rho, \varphi, z; t)$ เป็นอุณหภูมิในหน่อไม้ฝรั่งตำแหน่งใด ๆ ($^{\circ}\text{C}$) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

T_a เป็นอุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก ($^{\circ}\text{C}$)

k_t เป็นความนำความร้อนของหน่อไม้ฝรั่ง ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

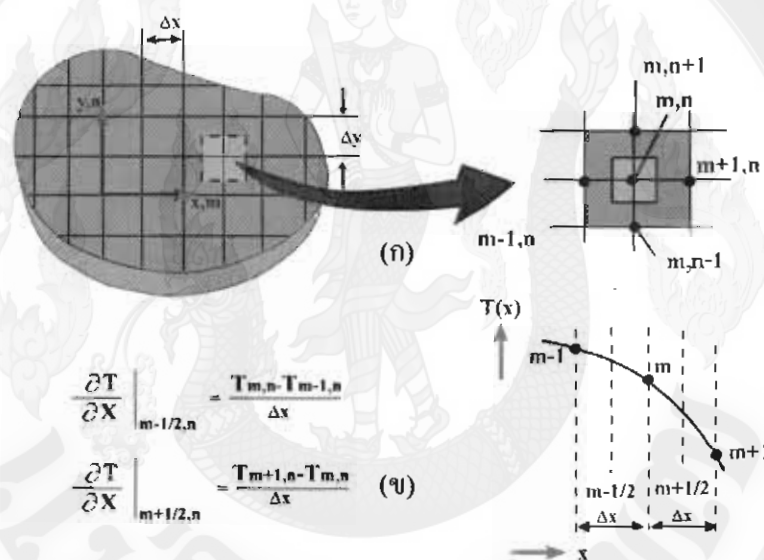
v_s เป็นอัตราการส่งผ่านความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ($\text{W/m}^3\text{C}$)

สมการที่ 26 เป็นสมการถ่ายเทความร้อน โดยการนำและการพาความร้อนเทียบกับเวลาและไม่มีภาระของน้ำ ซึ่งจะทำให้มวลของตัวกลางจะคงที่ การเกิดความร้อนในหน่อไม้ฝรั่งจากกำลังงานสนามไฟฟ้า (พจน์สุดท้ายของสมการที่ 26) กับคุณสมบัติของหน่อไม้ฝรั่งและสภาพแวดล้อมขณะนั้น สามารถหาได้ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference)

การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนโดยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง ที่ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ ที่ไม่สามารถหาคำตอบที่แม่นยำได้ เงื่อนไขและรูปแบบของปัญหามีความซับซ้อน หากต้องการทราบค่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ จำเป็นต้องใช้หลักการประมาณค่า โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบสองมิติ ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (numerical analytical) ซึ่งได้แก่ Finite Difference, Finite Element หรือ

Boundary element แต่ในการทำวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วิธี Finite Difference แบบวิธี Nodal network โดยขั้นแรกของการใช้วิธีการเชิงตัวเลข คือ การเลือกกำหนดจุดที่ต้องการดังกล่าว ดังภาพ 1 แสดงการแบ่งตัวกลางออกเป็นย่านเล็ก ๆ จำนวนหนึ่ง และกำหนดจุดอ้างอิงที่กึ่งกลางของตัวเลขดังกล่าว จุดดังกล่าวเรียกว่า “Nodal point” หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “Node” และ Node หลาย ๆ จุดรวมกันเรียกว่า “Nodal network”, “Grid” หรือ “Mesh” จำนวน Nodal point สำหรับระบบสองมิติที่ใช้กำหนดตัวเลขดังแสดงในภาพ 1 ก ตำแหน่ง x และ y กำหนดโดยสัญลักษณ์ m และ n ตามลำดับ (มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552)



ภาพ 1 การนำความร้อนสองมิติ

Node แต่ละ Node จะเป็นตัวแทนของย่านนั้น ๆ และอุณหภูมิของ Node แต่ละ Node นั้น หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของย่านนั้น ๆ เช่น พิจารณาภาพ 1 อุณหภูมิของ Node m, n อาจจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของย่านที่แรงเงา การเลือก Node – point ถ้ามีจำนวนมาก (Mesh ละเอียด) ก็จะได้ค่าความถูกต้องมากตามไปด้วย แต่การคำนวณก็จะช้ากว่าตามไปด้วย

การหาค่าการกระจายอุณหภูมิโดยวิธีเชิงตัวเลขนั้น คือการเขียนสมการการอนุรักษ์สำหรับ Node แต่ละ Node อย่างเหมาะสม และนำสมการนั้นไปใช้กับระบบทั้งระบบ ผลลัพธ์ได้มาจากแก้สมการอุณหภูมิพร้อมกันแต่ละ Node สำหรับ Node ที่อยู่ภายในของระบบสองมิติที่ไม่มีการกำเนิดพลังงานความร้อนในระบบ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากันตลอด สมการการอนุรักษ์พลังงานของระบบเป็นไปตามดังแสดงในสมการที่ 27 ซึ่งเรียกว่า Exact form อย่างไรก็ตามถ้าระบบดังกล่าวอยู่ในรูปของ node network

สมการผลต่างสี่เหลี่ยมที่เหมารวมสำหรับ Node ที่อยู่ภายในของระบบสองมิติ สามารถหาได้โดยตรงจากสมการที่ 27 พิจารณาอนุพันธ์ลำดับที่สอง d^2T จากภาพ 1 ซึ่งค่าอนุพันธ์ Node m, n อาจประมาณได้จากสมการ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+\frac{1}{2},n} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta x} \quad (28)$$

และ อนุพันธ์ที่เขียนอยู่ในรูป Node อนุพันธ์ได้คือ

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (30)$$

แทนค่าสมการที่ 29 และ 30 ลงในสมการที่ 28 จะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (31)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n+\frac{1}{2}} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta x} \quad (32)$$

$$\approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2}$$

ในการใช้โครงข่ายถ้าให้ $\Delta x = \Delta y$ และแทนค่าสมการที่ 31 และ 22 ลงไปในสมการที่ 27 จะได้

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (33)$$

พิจารณา Node (m, n) สมการความร้อนและสมการผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็น Exact Differential equation ได้ลดรูปกลายเป็นสมการ Approximate algebraic equation ซึ่งเป็นเพียงค่าประมาณ สมการความร้อนแบบผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถประยุกต์ใช้กับ Node ภายในทุก ๆ Node ได้ดังสมการที่ 33 แสดงว่าผลรวมของอุณหภูมิของ Node ทั้งสี่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับสี่เท่าของอุณหภูมิที่ Node นั้น ๆ หรืออุณหภูมิของ Node m, n เป็นค่าเฉลี่ยของ Node สี่ Node ที่อยู่ติดกับตัวมันเอง

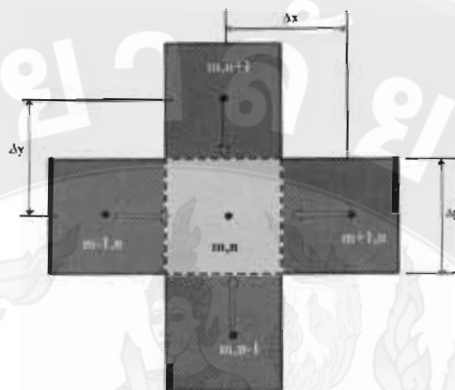
วิธีการสมดุลพลังงาน

การใช้สมการผลต่างสี่เหลี่ยมสำหรับ Node ใด ๆ อาจจะประยุกต์ใช้กับกฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม Node นั้น ๆ โดยทั่วไปแล้วเราไม่ทราบทิศทางการไหลของความร้อน จึงสมมติให้ความร้อนทั้งหมดไหลเข้าสู่ Node และใช้กฎการสมดุลพลังงานกับปริมาณความร้อนทั้งหมด ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้อง

$$E_m + E_g = 0 \quad (34)$$

พิจารณาสมการที่ 34 สำหรับปริมาตรควบคุม Node ดังภาพ 1 สำหรับระบบสองมิติ การเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยการนำระหว่าง m, n และ Node ข้างเคียงทั้งสี่ สมการที่ 34 จะลดรูปเหลือ

$$\sum q(1) \rightarrow (m, n) + q'(\Delta x, \Delta y, 1) = 0$$



ภาพ 2 สมดุลพลังงานของระบบ

จากภาพ 2 พิจารณาอัตราการนำความร้อนจาก Node $(m-1, n)$ ไปยัง Node (m, n) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (35)$$

เทอม $(\Delta y, 1)$ คือ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน และเทอมของ $[T_{m-1,n} - T_{m,n} / \Delta x]$ คือการประมาณค่าของลาดอุณหภูมิขอบเขตระหว่าง Node ทั้งสอง และอัตราการนำความร้อนทั้งสามด้านที่เหลืออาจเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (36)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (37)$$

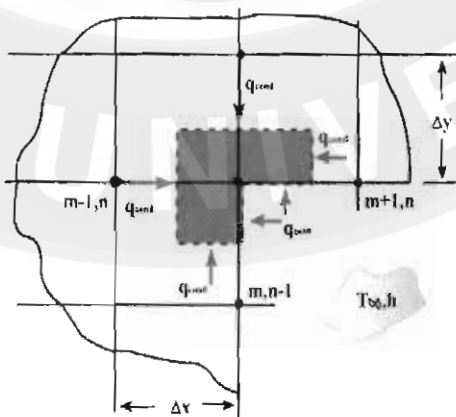
$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (38)$$

จะเห็นได้ว่าอัตราการนำความร้อนแต่ละด้าน เราจะนำอุณหภูมิของ Node แต่ละ Node (m, n) ไปหักล้างออกจากอุณหภูมิของ Node ที่อยู่ติดกัน ตามสมมติฐานอัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่ Node (m, n) ตามทิศทางของลูกศรในภาพ 2 แล้วแทนค่าสมการ 35 ถึง 38 ลงในกฎการอนุรักษ์พลังงานในกรณี $\Delta x = \Delta y$ สำหรับ Node ภายในที่มีการกำเนิดของพลังงานความร้อนภายในตัวกลางสมการผลต่างสี่เหลี่ยมนี้จะได้ว่า

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + q \left(\frac{\Delta x \Delta y}{k} \right) - 4T_{m,n} = 0 \quad (39)$$

ถ้าไม่คิดการกำเนิดพลังงานภายในตัวกลาง เทอม ($q = 0$) สมการนี้ก็จะลดรูปเหลือดังสมการ 33 และสมการผลต่างสี่เหลี่ยมจึงจำเป็นต้องเขียนทุก ๆ Node ที่ไม่ทราบค่าอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามบางกรณีไม่สามารถใช้สมการที่ 39 ได้ สำหรับ Node ภายในทุก ๆ Node ได้ เช่น บาง Node เราจะไม่ทราบอุณหภูมิเนื่องจากผิวเป็นฉนวน หรืออาจมีการพาความร้อนที่ผิว ซึ่ง Node ต่าง ๆ เหล่านี้ต้องหาสมการผลต่างสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีการสมดุลพลังงาน

วิธีการสมดุลพลังงานนี้สามารถพิจารณา Node ซึ่งเป็นมุมในภาพ 2 โดย Node นี้มีพื้นที่สามในสี่ส่วนของ Node ปกติคือ พื้นที่แรเงา และมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน โดยการถ่ายเทความร้อน โดยการพาไปกับของไหลอุณหภูมิ T_c การนำความร้อนของ Node ข้างเคียงทั้งสี่ Node เข้าสู่ Node (m, n) ซึ่งอัตราการนำความร้อน q_{cond} สำหรับ Node ข้างเคียงแต่ละ Node สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้



ภาพ 3 สมการผลต่างสี่เหลี่ยมสำหรับ Node ที่อยู่ด้านบนและมีการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา

$$q = k\Delta \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \quad (40)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (41)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (42)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (43)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x.1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (44)$$

พื้นที่การนำความร้อนจาก Node (m-1,n) และ (m, n+1) คือ (1 . Δy) และ (1 . Δx) ตามลำดับ สำหรับ Node (m+1, n) และ node (m, n-1) คือ (1 .dy/2) และ (1.dx/2) ตามลำดับ พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของ Node ซึ่งอัตราการพาความร้อนทั้งหมด q_{cond} คือ

$$q_{(\infty) \rightarrow (m,n)} = h \left(\frac{\Delta X}{2} .1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + h \left(\frac{\Delta y}{2} .1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) \quad (45)$$

โดยสมมติให้อุณหภูมิที่ผิวมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้ง Node (m, n) คือ $T_{m,n}$ ดังนั้นในกรณีการนำความร้อนในระบบสองมิติ พิจารณาผลของการกำเนิดพลังงานในตัวกลาง การอนุรักษ์พลังงานสมการ 34 และ 40 ถึง 44 รวมกันจะต้องเท่ากับศูนย์โดยให้ (dx = dy) จะได้

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + \frac{1}{2}(T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \left(h \frac{\Delta x}{k} \right) T_{\infty} - \left(3 + \left(h \frac{\Delta x}{k} \right) \right) T_{m,n} = 0 \quad (46)$$

การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นจะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์หลัก ๆ ดังนี้

1. กระบวนการ Pre-Processing: เป็นส่วนของการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองเชิงตัวเลข สำหรับทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้

วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นจะเริ่มจากการจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของชิ้นงาน โดยยึดหลักการที่ว่า เราสามารถหาคำตอบของชิ้นงานที่เป็นลักษณะของรูปที่แน่นอนได้ จึงได้นำมาใช้ในการแบ่งชิ้นงานที่มีความซับซ้อนยากในการหาคำตอบ ให้อยู่ในรูปโครงร่างตาข่ายเล็ก ๆ (grid cells) ที่มีรูปร่างแน่นอน ความละเอียดของโครงร่างตาข่ายจะมีผลต่อการคำนวณผลเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าโครงร่างตาข่ายมีขนาดเล็กเกินไปก็ทำให้การคำนวณใช้เวลานานมาก ส่วนถ้าโครงร่างตาข่ายใหญ่เกินไปก็ทำให้ได้ค่าการคำนวณที่ไม่แน่นอน เมื่อกำหนดโครงร่างตาข่ายเป็นที่เรียบร้อยก็ให้กำหนดจุดที่กำหนดให้คลื่นเริ่มให้เคลื่อน (port)

2. กระบวนการ Solver: เป็นส่วนของการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โดยโปรแกรมสำเร็จรูปจะทำการวิเคราะห์ค่าของคลื่นโดยการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3. กระบวนการ Post-Processing: เป็นส่วนของการแสดงผลการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลนี้จะวิเคราะห์ตามค่าบ่งชี้ต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

ในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในคอมพิวเตอร์นั้นจำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวัง ดังนั้นผู้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขอย่างพอเพียง

การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ผลจะวิเคราะห์ตามค่าบ่งชี้ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. E-field คือ ค่าลักษณะการกระจายตัวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ
2. S parameter คือ ค่าการสะท้อนกลับของคลื่น
3. Power loss density (W/m^3) คือ ความหนาแน่นของการสูญเสียกำลังงานโดยเทียบหน่วยปริมาตร

พารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจะถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง คือ การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการสุดท้ายคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อย ๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นหากต้องการใช้แบบจำลองออกมาอย่างมีประสิทธิภาพก็ต้องใส่ใจกับตัวแปรสามค่านี้เป็นอย่างมาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องพลังงานไมโครเวฟกับการแปรรูปผักและผลไม้บางชนิด

จิรวัดน์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาการผลิตพริกแห้งจากพริกแดงสด ที่มีความยาวเฉลี่ย 6.5 ± 0.5 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบตั้งหมุน พบว่าพริกไม่จำเป็นต้องผ่านการลวก โดยมีน้ำหนัก 700 กรัม ใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 เมกกะเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 1.18 กิโลวัตต์ ความดันสุญญากาศ 60 มิลลิเมตรปรอท และเวลาในการทำแห้ง 44 นาที เป็นปัจจัยที่เหมาะสม ทำให้ได้พริกแห้งที่มีลักษณะเฉพาะ ที่ไม่เหมือนกับพริกแห้งในท้องตลาด คือ มีสีแดงสดใส เม็ดป่อง ผลทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าพริกแห้งที่ผลิตจากเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบตั้งหมุนจะมีสีแดง กลิ่นหอม ความป่อง ความกรอบและรสเผ็ดมากกว่าพริกแห้งท้องตลาด

Hemphill and Martin (1992) ทดสอบใช้เตาอบไมโครเวฟเพื่อหามวลแห้งรวมของสตรอเบอร์รี่ และเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้กับการอบแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) และลมร้อน ซึ่งคุณภาพของมวลแห้งรวมในกระบวนการนี้มีความสำคัญมาก พบว่าที่ระดับพลังงานไมโครเวฟค่ามวลแห้งที่ได้มีคุณภาพดีใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบแช่แข็งหรือลมร้อน

Tulasidas *et al.* (1993) ใช้การอบแห้งโดยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟสำหรับทำอุณหภูมิแห้งแบบไร้เมล็ดโดยอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เตรียมตัวอย่างโดยแช่สารละลายอัลคาไรด์ (alkaline) ของเอทิลออลิเอท (ethyl oleate) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี จากการทดลองพบว่า การอบโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดเวลาการอบได้และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีเทียบได้กับการอบด้วยลมร้อน โดยอุณหภูมิลมร้อนที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ 50 องศาเซลเซียส

Bouraoui *et al.* (1994) ทดสอบการอบแห้งมันฝรั่งแบบแผ่นด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ ค่าการแพร่ของความชื้นถูกคำนวณโดยใช้สมการการแพร่ของ Fick ในแบบหนึ่งทิศทาง จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าการแพร่ของความชื้นเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิภายในของการอบ แต่กลับลดลง (ขณะอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ) เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ด้วยการพิจารณาช่วงเวลาที่ลดลง พบว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีคุณภาพที่ดีกว่าการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวและผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถดูคน้ำกลับได้ดีกว่าอีกด้วย

Drouzas and Schubert (1996) แบ่งการศึกษา 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ-สุญญากาศอบแห้งแครนเบอร์รี่ (cranberry) โดยศึกษาการให้พลังงานไมโครเวฟอบ

แบบต่อเนื่องและให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วง ๆ พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วง ๆ มีประสิทธิภาพดีกว่าการให้พลังงานไมโครเวฟต่อเนื่อง โดยการเปิดให้พลังงานไมโครเวฟในเวลาสั้น ๆ และพักเป็นช่วงที่นานกว่า ขั้นตอนที่สองประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้ในด้านสี เนื้อสัมผัส และค่าน้ำอิสระ (water activity) โดยเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศกับการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดงและนุ่มกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศสามารถใช้อบแห้งแครนเบอร์รี่ได้คุณภาพดีเช่นเดียวกับการอบแห้งแบบลมร้อน

Garcia *et al.* (1988) ทดสอบการอบกล้วยสุก กล้วยดิบที่หั่นเป็นชิ้น ๆ และกล้วยบดผงโดยใช้เตาอบไมโครเวฟดัดแปลงจากเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนเปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบลมร้อน พบว่าเวลาการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการใช้เตาอบลมร้อน 17 เท่า ขณะที่ประสิทธิภาพของเตาอบไมโครเวฟมีค่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

Feng and Tang (1998) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟอบแห้งชิ้นแอปเปิ้ลรูปลูกเต๋าด้วยเทคนิคสเปาเดตเบด (spouted bed) เพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนสม่ำเสมอจึงทำชิ้นแอปเปิ้ลรูป ลูกเต๋าด้านขนาด 12.7x9.5x6.4 มิลลิเมตร อบลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 24 มาตรฐานเปียก จนเหลือความชื้นประมาณ ร้อยละ 5 มาตรฐานเปียกที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงานไมโครเวฟที่ความเข้ม 4 ระดับ คือ 0 3.7 4.9 และ 6.1 วัตต์ต่อกรัม ผลการทดลองพบว่าการกระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอว่าการอบลมร้อนเพียงอย่างเดียว สีของผลิตภัณฑ์มีความเข้มน้อยกว่า แต่การคืนน้ำกลับคืนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบด้วยลมร้อน นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า ร้อยละ 80

Maskan (2000) ศึกษาการอบกล้วยชิ้นสุดท้ายด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้กล้วยตัวอย่างที่มีความหนา 4.3 7.4 และ 14.0 มิลลิเมตร ทำการอบโดย 1) อบกล้วยด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมร้อน 1.45 เมตรต่อวินาที และให้พลังงานไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 350 490 และ 700 วัตต์โดยชั่งน้ำหนักกล้วยที่เปลี่ยนไปทุก 10 นาที จนกระทั่งน้ำหนักกล้วยไม่เปลี่ยนแปลง 2) เลือกกล้วยตัวอย่างความหนา 4.3 มิลลิเมตร ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 1.45 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งความชื้นกล้วยลดลงเป็น 1.25 กิโลกรัม น้ำกิโลกรัมมวลแห้งกล้วย จึงใช้พลังงานไมโครเวฟระดับ 350 วัตต์ เข้าร่วมในการอบกล้วยชิ้นสุดท้ายจนได้ความชื้นกล้วยที่ต้องการ การทดลองพบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบลดความชื้นขั้นสุดท้าย สามารถลดเวลาอบได้ประมาณ ร้อยละ 64.3 ของการอบกล้วยด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเข้มน้อยกว่าการอบด้วยลมร้อน โดยมีค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE เป็น 62.08 5.97 18.00 และ 9.89 ตามลำดับ และการคืนน้ำกลับ (rehydration) มีค่าสูง

รัชดา (2548) ได้ทำการทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้วิธีแบบธรรมดา (conventional heating) กับวิธีการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave heating) เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานและเวลาในการให้ความร้อนรวม สำหรับการใส่กระบวนการให้ความร้อนในแต่ละแบบ ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำความร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วอันเนื่องมาจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางได้ดีและจะส่งผลต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตด้วย

Funebo *et al.* (2000) ได้ทำการlovakแอปเปิ้ลขนาด $15 \times 15 \times 15$ มิลลิเมตร โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 20 วัตต์/กรัม ด้วยเวลา 0 และ 5 นาที ก่อนนำไปอบแห้งแบบลมร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส และเวลา 0 0.75 และ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส และเวลา 0 2.5 และ 5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีผลต่อความหนาแน่นรวม (bulk density) ความสามารถในการคืนรูป (rehydration capacity) และความแน่นเนื้อหลังคืนรูป (stress at maximum force) ของแอปเปิ้ลอบแห้ง โดยถ้า นำมาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ให้ความหนาแน่นรวมสูงสุด 796 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ความสามารถในการคืนรูปสูงสุด 6.70 (น้ำหนักแอปเปิ้ลคืนรูป/น้ำหนักแอปเปิ้ลแห้ง) และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ 5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแน่นเนื้อต่ำที่สุด 0.19 MPa ส่วนแอปเปิ้ลที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ อบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ความหนาแน่นรวมและความสามารถในการคืนรูปต่ำที่สุดเท่ากับ 391 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 3.78 น้ำหนัก/น้ำหนัก ตามลำดับ และอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุด 1.0 MPa ทั้งนี้เพราะคลื่นไมโครเวฟในการlovakไปทำลายโครงสร้างเซลล์ของแอปเปิ้ล ทำให้ความหนาแน่นรวมและความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น และความแน่นเนื้อลดลง

Krokida *et al.* (2000) ได้ทำการlovakแครอทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ด้วยน้ำร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ไอน้ำ เป็นเวลา 2 นาที ซัลไฟด์ โดยจุ่มในสารละลายโซเดียมไบซัลไฟด์ร้อยละ 2 เป็นเวลา 5 นาที และไมโครเวฟที่กำลังไฟ 810 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำ ตัวอย่างlovakมาอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการlovakด้วยไมโครเวฟให้ค่า L^* ต่ำกว่า ค่า a^* สูงกว่า ทำให้สีแครอทอบแห้งสีเข้มคล้ำกว่าการlovakด้วยน้ำร้อน ไอน้ำ และซัลไฟด์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการlovakด้วยไมโครเวฟอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

ที่ไม่ใช่เอนไซม์คือปฏิกิริยาไมลาร์ด ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น ทำให้แครอทอบแห้งมีสีส้มคล้ำกว่าตัวอย่างอื่น

งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

Lin *et al.* (1995) ได้ทำ การศึกษาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับตัวอย่าง Sodium alginate gel โดยใช้โปรแกรม TWODEPEP (two-dimensional commercial finite element software) วิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้น โดยตัวอย่าง Sodium alginate gel ที่ใช้มีรูปทรงเป็นแผ่นบาง และทรงกระบอกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์แตกต่างกัน จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแหล่งของความร้อนประกอบด้วย ความร้อนจากการนำ ความร้อน การพาความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน และความร้อนที่สูญเสียไปขณะเกิดการระเหย จากสมมติฐานว่า กำลังไมโครเวฟจะกระจายรอบ ๆ ตัวอย่าง และถูกดูดซับไว้ ความเข้มข้นของกำลัง ไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในตัวอย่างที่ทำ การทดสอบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และรูปทรงของตัวอย่าง นอกจากนี้ Lin *et al.* (1995) ยังได้วิเคราะห์ผลจากความแปรปรวนของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนและพลังงานไมโครเวฟที่ตกกระทบพื้นผิว ต่อการทำนายค่าอุณหภูมิด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่สร้างขึ้นมาแทนวัสดุอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือที่แตกต่างกัน แต่ในความเป็นจริงวัสดุอาหารชิ้นหนึ่งย่อมมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นการจะสร้างแบบจำลองให้เหมือนจริงควรใช้อาหารตัวอย่างจริง นอกจากนั้นการทำไฟไนต์เอลิเมนต์เพียง 2 มิติจะได้แบบจำลองที่ไม่สมบูรณ์มากนัก จึงควรทำเป็น 3 มิติเพื่อให้เหมือนจริงที่สุด งานวิจัยที่กล่าวมาข้างเป็นการศึกษาเพียงการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น แต่ในการให้ความร้อนจริง ๆ ยังมีการถ่ายเทมวลมาเกี่ยวข้องด้วย จึงควรที่จะศึกษาผลจากการถ่ายเทมวลร่วมด้วย

Zhou *et al.* (1995) สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความชื้นระหว่างการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ ตัวอย่างที่ใช้คือมันฝรั่งทรงกระบอก และแผ่นบาง ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นด้วย Fluorotropic temperature measurement system และ Near infrared technique ตามลำดับ แก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ พบว่ามันฝรั่งทั้งทรงกระบอกและแผ่นบางอุณหภูมิจากการทำนายแตกต่างจากค่าจริงร้อยละ 15.5 และร้อยละ 11.4 ตามลำดับ ส่วนปริมาณความชื้นของมันฝรั่งทรงกระบอกและแผ่นบางที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริงร้อยละ 2.4 และร้อยละ 2.1 มาตรฐานเบี่ยงตามลำดับ

Kim and Bhowmik (1995) ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective moisture diffusivity) ของโยเกิร์ตภายใต้การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นหาได้จากกราฟการทำแห้งที่อุณหภูมิคงที่มี 2 วิธีคือ Method of slope of the drying curve และ Regular regime technique พบว่าวิธี Method of slope of the drying curve เป็นวิธีที่เหมาะสมและดีกว่าวิธี regular regime technique ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นที่หาได้สามารถนำมาใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุอาหารได้ เช่น liquid diffusion, vapor diffusion, surface diffusion, knudsen diffusion, capillary flow และ hydrodynamic flow นำไปสู่การสร้างและพัฒนาแบบจำลองกระบวนการถ่ายเทมวลเมื่อทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟได้

Lian *et al.* (1997) ได้ศึกษาการถ่ายเทมวลและความร้อนขณะทำแห้งตัวอย่างอาหารเหลวเข้มข้น (concentrated water soluble food paste) ด้วยการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ สมการการถ่ายเทมวลใช้แบบจำลองการแพร่ของของเหลว (liquid diffusion model) ประกอบด้วยการถ่ายเทน้ำและไอน้ำ สมการการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ ความร้อนแฝงในการระเหย ความร้อนสัมผัสในการนำ ความร้อน และการพาความร้อน แก้ปัญหาสมการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับ CFD (computational fluid dynamics) package FIDAP (fluid dynamics international) พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าค่าคุณสมบัติบางตัว เช่น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะไม่ใช้ค่าจริงของตัวอย่าง แต่เป็นเพียงค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ จากการที่การทำนายค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทำได้ยาก พจน์ของพลังงานไมโครเวฟในสมการการถ่ายเทความร้อน จึงใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) โดยสมมติให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผลิตภัณฑ์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนั้นตัวอย่างอาหารที่ใช้ก็ไม่ใช่อาหารจริง เป็นตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมาองค์ประกอบและโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างจึงไม่ซับซ้อนเท่าตัวอย่างอาหารจริงจากการดำเนินการวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากนัก และยังไม่สามารถนำไปใช้ในการดำเนินการได้จริง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองของการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้ตัวอย่างอาหารจริงคือพริกไทยมาใช้ทดลอง เพื่อให้เหมือนกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงสามารถนำไปใช้ได้กับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงต่อไปได้โดยเฉพาะในเชิงวิศวกรรม เช่น การขยายขนาด เป็นต้น

งานวิจัยที่ทำการศึกษากลับเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อินทิกรัล

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการนำระเบียบวิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อินทิกรัลมาใช้ในการสร้างแบบจำลองภาระของโพรงที่เป็นตัวสันสะท้อนแบบฉนวน โดยใช้ในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการแมกซ์เวลล์แบบอินทิกรัล (Centeno and Excell, 1983) นอกจากนี้แล้ว Rao *et al.* (1998) ยังได้ทำการวิเคราะห์การกระจัดของภาวะแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโพรงกลับ แบบช่องสองมิติในแนวระนาบ โดยคลื่นที่ให้เป็นคลื่นแนวระนาบแบบ TE หรือ TM อย่างใดอย่างหนึ่ง และในการวิเคราะห์ได้อาศัยการใช้เมตริกซ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยโพรงจะถูกจำลองให้มีรูปทรงกระบอกสามเหลี่ยม อุปกรณ์ที่แยกออกมาจะถูกกำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งโพรงถูกวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์อินทิกรัลเทคนิคในการแก้ปัญหาผลลัพธ์ไม่แท้ในตอนท้าย นอกจากนี้การใช้ไฟไนต์อินทิกรัลในการแก้ปัญหาแล้ว Calalo *et al.* (1988) ได้ใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (FDTD: finite difference time domain) มาใช้ในการประมวลผลทางตัวเลขต่อเวลาในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำต่อ โครงสร้างที่เป็นฉนวนหรือตัวนำของ hypercube เนื่องจาก hypercube มีจำนวนยูนิตที่ต้องคำนวณมากถึง 2,048,000 นอกจากนี้ Sugeng *et al.* (2006) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (CFEM: compact-finite element method) ในการจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนที่การหาค่าการกระจายของสนามแม่เหล็กจะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจาก CFEM ถูกใช้ในการจำลองโมเดลเชิงซ้อน 3 มิติ

Davey and Pham (2000) ได้ศึกษาวิธีการทำนายภาระความร้อนและน้ำหนักที่สูญเสียไปของเนื้อวัวที่เกิดจากการแช่แข็ง โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ ในการวิจัยนี้ได้แบ่งรูปร่างของเนื้อวัวออกเป็นหน้าตัดที่แตกต่างกัน แล้วทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติเพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเนื้อวัว โดยค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเนื้อวัวที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าปริมาณความร้อนที่วัดได้จริง โดยผลจากการทดลองของบริษัทแช่แข็ง 55 บริษัท พบว่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองร้อยละ 5.6 และค่าความผิดพลาดจากการทำนายน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 2.3 นอกจากนี้ ยังสามารถหาการกระจายของอุณหภูมิ ตามจุดต่าง ๆ ของเนื้อวัวได้ จากนั้นมีการพัฒนาใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับงานวิจัยด้านอุตสาหกรรมทางด้านอาหารในสถานะชั่วคราวโดย Nabor *et al.* (2001) ได้ศึกษาหาความจุความร้อนเชิงปริมาตรและค่าการนำความร้อน โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ ซึ่งได้จำลองแบบอาหารอยู่ในภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอก แล้วกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่ภาชนะในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นค่าคงที่ กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นจังหวะหรือ

กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นแบบเชิงเส้น แล้ววัดค่าอัตราการตอบสนองของอุณหภูมิและการกระจายของอุณหภูมิในภาชนะที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าทำนายที่คำนวณจากระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันและพบว่ากำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นจังหวะ ให้อัตราค่าตอบสนองที่ดี และให้ข้อมูลครบถ้วนในการนำไปคำนวณสมบัติทางความร้อนมากกว่าแบบอื่น

กรอบแนวความคิด

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ายังไม่มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ อันเนื่องมาจากการใช้บรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับการทดลองจริง หากค่าการกระจายตัวของคลื่นภายในบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งในการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงก็จะสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมสำเร็จรูปมีความน่าเชื่อถือในการนำมาจำลองหาค่าต่างๆ ทางด้านไมโครเวฟ และสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์บรรจุผักสดเพื่อปรุงสุกด้วยไมโครเวฟได้ต่อไป โดยเมื่อนำไปทำการจำลองเพื่อปรับแต่งค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์ คาดหวังไว้ว่าหากปรับแต่งค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์แล้วจะทำให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในหน่อไม้ฝรั่งมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น