

## บทที่ 10

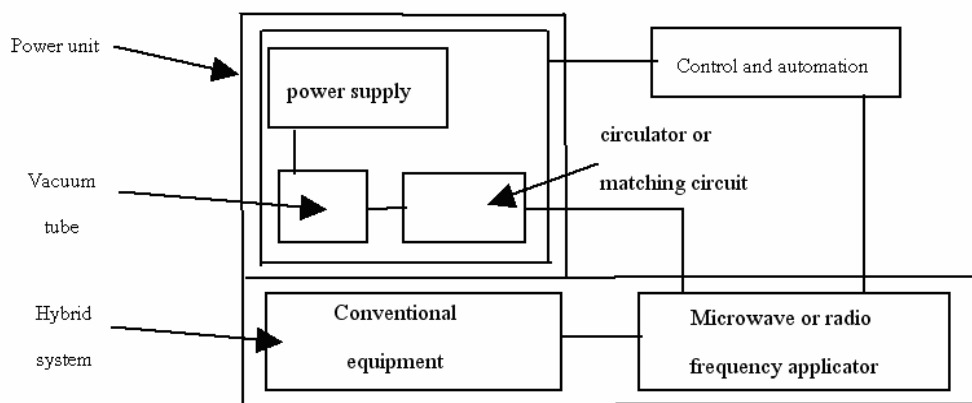
### แนวคิดการออกแบบระบบทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเชิงอุตสาหกรรม

#### 10.1 บทนำ

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงองค์ประกอบพื้นฐานพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการออกแบบระบบคลื่นไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริก เป็นแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สำคัญๆ ที่ผู้ออกแบบสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมได้ รูปแบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 10.1 โดยพื้นฐาน ภายในระบบต้องประกอบด้วยอุปกรณ์หลักสามอย่าง

ส่วนแรกคือหน่วยกำลัง (Power Unit) เป็นส่วนที่ผลิตคลื่นไมโครเวฟในช่วงความถี่ที่ต้องการ ซึ่งภายในส่วนแรกนี้ก็จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ เช่น แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) ซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟกระแสตรงและตัวแมกนีตรอน (Magnetron) ไอโซเลเตอร์ (Isolator) หรือ ไอโซ – เซอร์คิวเลเตอร์ (Iso Circulator)) และอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) ซึ่งต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น (Power Monitor) [1]

ส่วนที่สองคือคาวิตี (Cavity) หรือแอปพลิเคเตอร์ (Applicator) ที่ใช้ใส่วัสดุที่ต้องการให้รับคลื่นไมโครเวฟ ในส่วนนี้อาจมีอุปกรณ์เพิ่มอาทิเช่น ป้อน สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศ ใช้น้ำหรือการพ่นลมร้อนซึ่งตัวคู่นี้จะต่อเป็นส่วนสุดท้ายและรูปแบบดังกล่าวเป็นรูปแบบทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการไมโครเวฟเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบัน [2]



รูปที่ 10.1 แสดงรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ไมโครเวฟในอุตสาหกรรม

ส่วนประกอบหลักส่วนที่สามคือวงจรควบคุมที่จะทำการการปรับแต่งให้การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟให้มีประสิทธิภาพสูง หลอดแมกนีตรอนเป็นต้นทางที่ทำหน้าที่ในการผลิตคลื่นไมโครเวฟเป็นเรื่องปกติที่ต้องป้องกันอุปกรณ์ที่ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้ฉนวนเฟอร์ไรต์ หุ้มรอบๆ เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างแมกนีตรอนที่ผลิตคลื่นกับอุปกรณ์ประกอบอื่นๆในระบบ

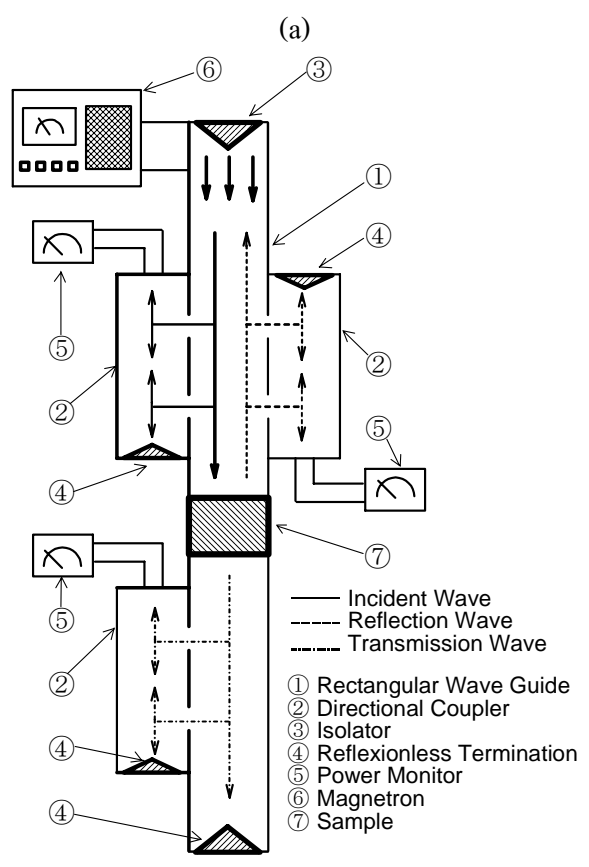
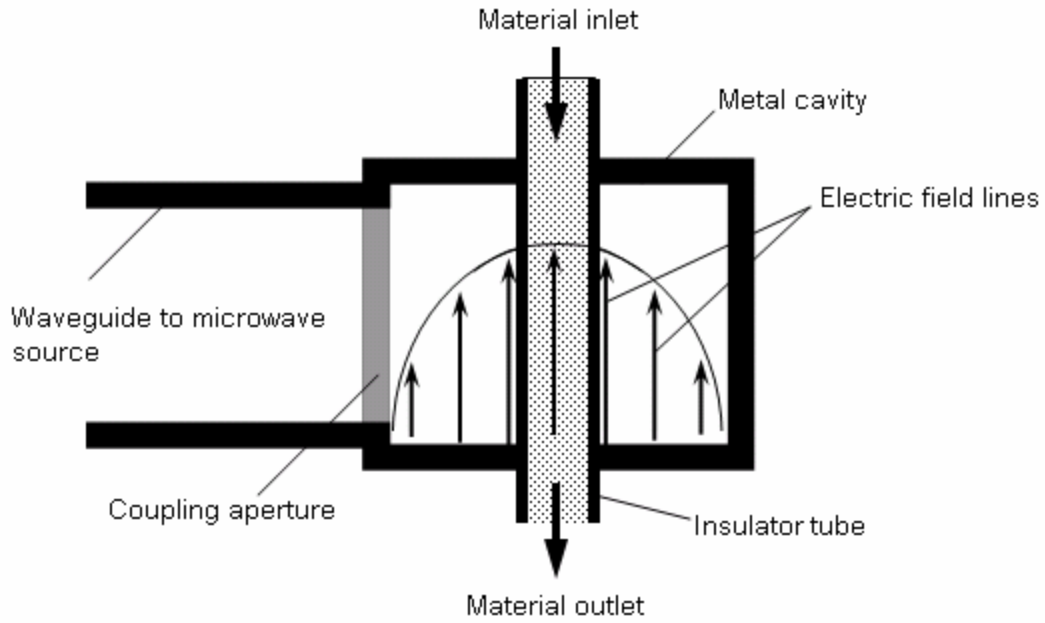
## 10.2 แอปพลิเคชันเชิงอุตสาหกรรม (Industrial Microwave Applicators)

คาวิตี (Cavity) หรือแอปพลิเคชัน (Applicator) เป็นส่วนที่มีไว้สำหรับการทำความร้อนของกระบวนการ โดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอน แอปพลิเคชัน เป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นโหมดเดียว (Single Mode) หรือคลื่นมัลติโหมด (Multimode)

### 10.2.1 แอปพลิเคชันโหมดเดียว (Single Mode Applicators)

มีการออกแบบแอปพลิเคชัน ให้เป็นลักษณะเรโซแนนซ์โหมดเดียว (Single Resonant Mode) หรือเรโซแนนซ์เดี่ยว (Single Resonance) ที่ทำงานใกล้เคียงกับความถี่ทำงาน ส่วนใหญ่แอปพลิเคชันลักษณะนี้จะเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical Applicators) เช่น แอปพลิเคชันโหมด  $TM_{010}$  และโหมด  $TE_{10}$  ดังแสดงในรูปที่ 10.2 ซึ่งมีรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเข้มสูงบริเวณตรงส่วนกลางของแอปพลิเคชัน ดังนั้นการวางหรือป้อนวัสดุทดสอบหรือ โหลดที่จึงกระทำที่ตรงส่วนกลางของแอปพลิเคชัน

มีข้อสังเกตที่พบก็คือ แอปพลิเคชัน ในลักษณะนี้จะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ ระบบไมโครเวฟชนิดคลื่นโหมดเดียว จึงเหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นน้อย (Low Lossy Materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นสูง (High Lossy Materials) อย่างไรก็ตาม ลักษณะแอปพลิเคชันแบบนี้ก็ง่ายต่อการควบคุมการกระจายตัวของคลื่นเมื่อเทียบกับแอปพลิเคชันแบบมัลติโหมด แอปพลิเคชันแบบนี้ มักใช้สำหรับกระบวนการทางอาหาร อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดอีกมาก เนื่องจากเหตุผลที่ว่าปริมาณของโหลดหรืออาหารที่ค่าไดอิเล็กตริกใดๆ จะต้องมีความเล็กเท่า่นั้น เพื่อที่ยังคงสภาพความเป็นคลื่นเรโซแนนซ์ภายในแอปพลิเคชันอยู่ได้

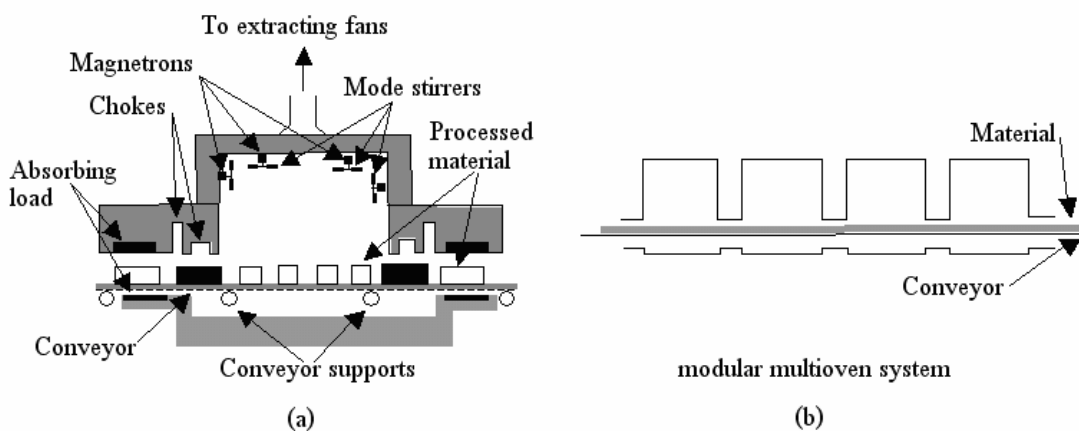


รูปที่ 10.2 แสดงระบบทำความร้อนโดยใช้แอปพลิเคชันเรโซแนนซ์โหมดเดียว  
 (a) โหมด  $TM_{010}$  (b) โหมด  $TE_{10}$  [1]

### 10.2.2 แอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด (Multimode Applicators)

การออกแบบให้ออพพลิเคเตอร์เป็นลักษณะมัลติโหมดสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนที่เกิดขึ้นในแอพพลิเคเตอร์แบบโหมดเดียวได้ โดยทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้นและขยายขอบเขตวงกว้างกินบริเวณวัสดุไดอิเล็กตริกหรือโหลดที่วางอยู่ โดยคลื่นนี้จะมาจากหลายระนาบและหลายทิศทางมาตกกระทบบนวัสดุนี้ ผลรวมของคลื่นที่ตกกระทบนี้ร่วมกับคลื่นที่สะท้อนที่โหลดและผนังของแอพพลิเคเตอร์ ก่อให้เกิดคลื่นเรโซแนนซ์ หรือ มัลติโหมด ทำให้การกระจายของสนามมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นระบบไมโครเวฟลักษณะคลื่นมัลติโหมดจึงเหมาะสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (High Lossy Materials) และเหมาะสมที่ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลายกว่า

แอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด (Multimode Applicators) ประกอบด้วยผนังหุ้มที่ทำด้วยแผ่นโลหะ ตัวอย่างระบบดังแสดงในรูปที่ 10.3 ภายในระบบซึ่งมีการป้อนไมโครเวฟผ่านหลายช่องทาง (Multi Feed Ports) และการสะท้อนกลับไปมาหลายๆด้านครั้งของคลื่นไมโครเวฟภายในแอพพลิเคเตอร์ที่มีลักษณะเป็นอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 10.3(a) ซึ่งการรวมกัน (Superposition) ของคลื่นที่สะท้อนกลับ ไปกลับมาที่บริเวณผนัง ซึ่งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ก่อให้เกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นนิ่ง (Standing Wave) หรือเกิดคลื่นมัลติโหมดขึ้น ในช่วงของคลื่นความถี่ดังกล่าวอาจต้องมีอุปกรณ์ที่สนับสนุนให้เกิดจำนวนของคลื่นมัลติโหมดเพิ่มขึ้น เช่น ใบกวน (Mode Stirrers) เป็นต้น



รูปที่ 10.3 แสดงรูปการประยุกต์ใช้ออพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด (a) การใช้แมกนีตรอน 4 ตัวภายในแอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมดอย่างง่าย (b)ระบบโมดูลาร์ [2], [3]

รายละเอียดของการประยุกต์ใช้แอฟพลิเคชันแบบมัลติโหมดสำหรับงานอุตสาหกรรมจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 10.3 ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในอุตสาหกรรม (Industrial Microwave Heating Applications)

เป็นที่ทราบกันดีว่า รูปแบบของแอฟพลิเคชันในระบบไมโครเวฟเชิงอุตสาหกรรมมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เป็นชนิดมัลติโหมด โดยในหลักการเป็นการขยายขนาดของเตาไมโครเวฟในครัวเรือนให้ใหญ่ขึ้น แต่การที่จะทำการสร้างให้มีกระบวนการผลิตขนาดใหญ่สำหรับการใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งจะนำเสนอในสาระสำคัญต่อไป

#### 10.3.1 ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (Heating Process using a Combined Microwave and Continuous Belt System )

ในปัจจุบันแม้จะมีนักวิจัยบางกลุ่มพยายามพัฒนาใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในอุตสาหกรรม แต่ก็ยังเป็นเพียงแค่ดัดแปลงไมโครเวฟบ้าน (Domestic Microwave Oven) และติดตั้งอุปกรณ์บางตัวเข้าไป ซึ่งพบว่ายังไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้จริง เพราะมีข้อจำกัดเรื่องเทคโนโลยีที่ใช้และมีปัญหาเกี่ยวกับความปลอดภัยโดยเฉพาะการรั่วของรังสี และยังไม่สามารถออกแบบตัวระบบที่มีขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ระบบไมโครเวฟสำหรับการให้ความร้อนทั่วไปยังจำกัดอยู่ในประเภทที่วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะต้องอยู่นิ่ง (Fixed Materials) และมีปริมาณที่ไม่มากนัก ข้อดีของระบบไมโครเวฟที่วัสดุผ่านกระบวนการอยู่นิ่งคือ ทำให้การกระจายตัวของคลื่นหรือความร้อนภายในวัสดุจะไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดโซนความร้อน (Hot Spot Zone) และโซนเย็น (Cold Zone) ซึ่งไม่มีอันตรกิริยากับคลื่น ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (Heating Process using a Combined Microwave and Continuous Belt System ) สามารถกำจัดข้อดีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นกล่าวคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะต้องเคลื่อนที่ (Moving Materials) ภายในอุโมงค์ที่มีการป้อนคลื่นไมโครเวฟหลายตำแหน่ง ทำให้ตัวชิ้นงานก็จะได้รับการคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึงและมีช่วงเวลารับคลื่นมากหรือรับคลื่นน้อยได้ตามต้องการโดยการปรับความเร็วของสายพาน รวมทั้งมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้กระบวนการทำความร้อนหรืออบแห้งชิ้นงาน หรือกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Acceleration) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่

ออกแบบมานี้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องของกระบวนการ ใช้ในการที่จะผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก สามารถที่จะนำตัวชิ้นงานมาผ่านกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของการไม่ต้องเสียเวลาในการที่จะปิดหรือเปิดเครื่องเมื่อทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ได้มีการเริ่มพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1952 ซึ่งเป็นระบบสายพานลำเลียงในตู้อบและมีการจดสิทธิบัตรครั้งแรก [4] เพราะในสมัยนั้นยังไม่มีอุปกรณ์ผลิตพลังงานไมโครเวฟที่มีกำลังสูงได้ หลังจากนั้นเป็นเวลา 10 ปีจึงได้นำมาใช้กับวงการอุตสาหกรรม

สำหรับระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน อาจแบ่งออกเป็นสองรูปแบบหลักโดยจะแบ่งตามลักษณะจำนวนและกำลังของแหล่งจ่ายกำลังไมโครเวฟ รูปแบบแรกจะใช้แมกนีตรอนกำลังสูงตัวเดียว (Single High Power Magnetron) และรูปแบบที่สองจะใช้แมกนีตรอนกำลังต่ำหลายๆตัว (Multiple Low Power Magnetrons)

กรณีที่ระบบต้องใช้แมกนีตรอนกำลังสูงตัวเดียว จะต้องใช้เงินลงทุนเบื้องต้นสูง เพราะราคาของแมกนีตรอนกำลังสูงมีราคาแพงกว่าแมกนีตรอนกำลังต่ำมากๆ และภายในระบบต้องมีอุปกรณ์ประกอบหลายรายการที่มีราคาแพง อาทิเช่น ไอโซ - เซอร์คูลเตเตอร์ (Iso Circulator) อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) และอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices) เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้ก็คือการควบคุมดูแลระบบและการบำรุงรักษาทำได้ค่อนข้างง่ายเพราะแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) เป็นระบบรวมศูนย์จึงไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรเพื่อดูแลหลายๆจุด และสามารถเดินระบบได้ต่อเนื่องอย่างเสถียรภาพเป็นเวลานานๆ แต่ทั้งนี้หากต้องการหยุดเดินระบบ (Shut Down) อันเนื่องมาข้อขัดข้องที่ระบบแหล่งกำเนิดคลื่นด้วยเหตุผลใดก็ตาม ก็จะต้องหยุดเดินเครื่องทั้งระบบ เพราะการมีแมกนีตรอนเพียงตัวเดียวนั้นเอง [5], [6]

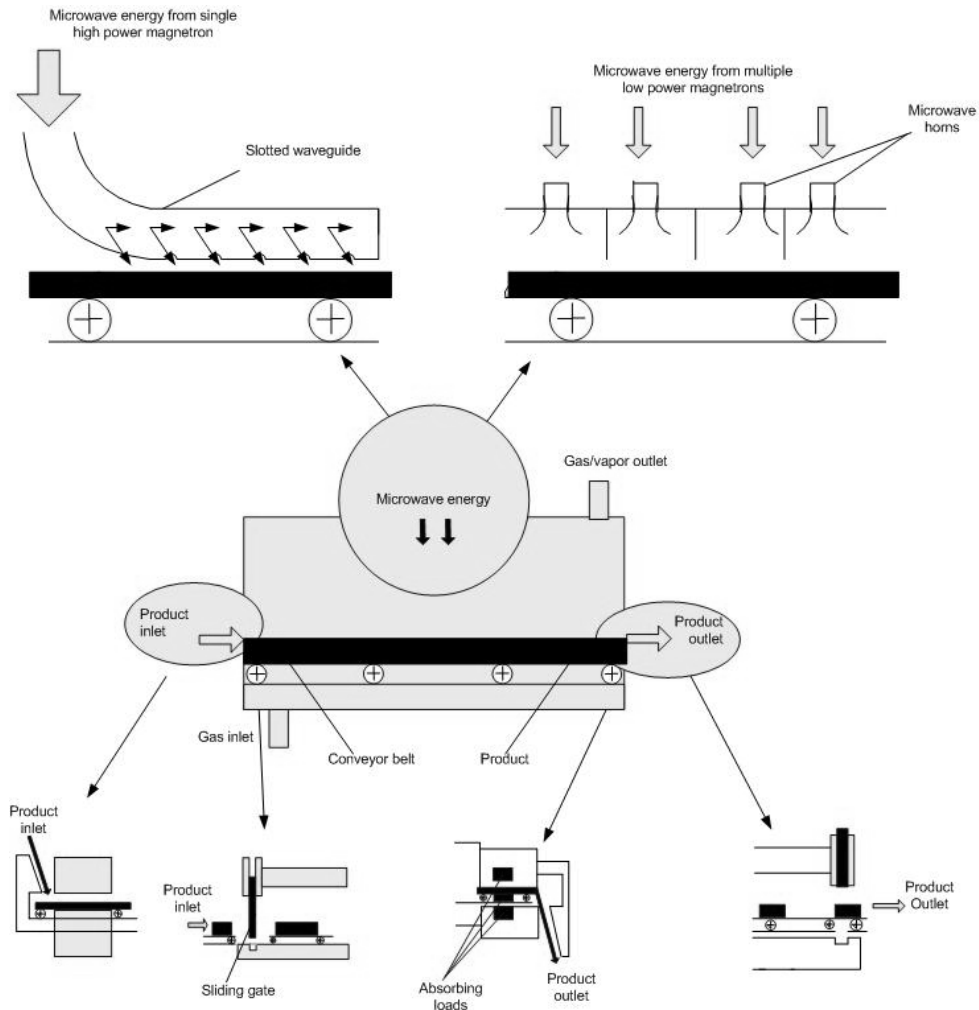
สำหรับกรณีที่ระบบต้องใช้แมกนีตรอนกำลังต่ำหลายๆตัว มีข้อได้เปรียบกว่าระบบต้องใช้แมกนีตรอนกำลังสูงตัวเดียวหลายประการ คือจะมีราคาของแมกนีตรอนที่ไม่สูงมากนักเพราะมีจำนวนการผลิตที่มากและมีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด ดังนั้นการการบำรุงรักษาหรือซ่อมแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นระบบแยกส่วนที่มีแมกนีตรอนหลายๆตัวติดตั้งรอบๆตัวแอปพลิเคชัน สามารถทำได้ง่ายและสะดวก และไม่จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องทั้งระบบ และระบบสามารถที่จะเลือกเปิดปิดตำแหน่งแมกนีตรอนใดก็ได้และสามารถปรับกำลังไมโครเวฟได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามระบบนี้จะต้องมีการออกแบบเชิงเทคนิคที่ดี โดยเฉพาะการออกแบบให้มีการป้องกันระดับพลังงานคลื่น

ไมโครเวฟในปริมาณที่เหมาะสมกับสภาพของโหลดที่สามารถดูดซับได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันคลื่นที่เหลือ (Residue Microwave Energy) ที่อาจย้อนกลับไปทำลายตัวแมกนีตรอนได้ เพราะระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น ไอโซ - เซอร์คูเลเตอร์ อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น และอุปกรณ์ป้องกัน นั่นเอง สำหรับรูปที่ 10.4 แสดงถึงแนวคิดการออกแบบกลไกระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องที่มีการป้อนโหลดที่ขนาดต่างกันและมีรูปแบบการป้อนคลื่นที่ต่างกัน [3]

นอกเหนือไปจากนี้เราพบว่าสิ่งที่เป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับการออกแบบระบบก็คือต้องออกแบบอย่างไรที่ทำให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟเป็นลักษณะมัลติโหมด (Multi Mode) และออกแบบอย่างไรที่สามารถป้องกันการรั่วไหลของคลื่นตามที่กฎหมายกำหนดและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ประการหลังนับว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุด เพราะระบบที่กล่าวมานี้เป็นระบบเปิด (วัสดุหรือโหลดสามารถเคลื่อนที่เข้าออกระบบได้แต่คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถรั่วไหลออกไปได้)

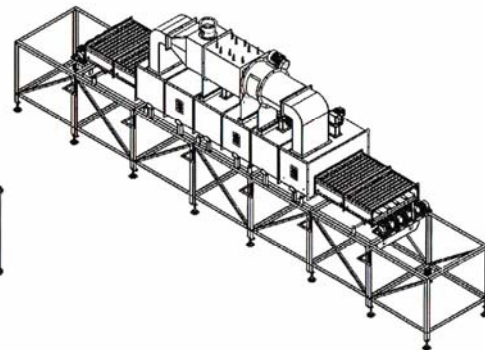
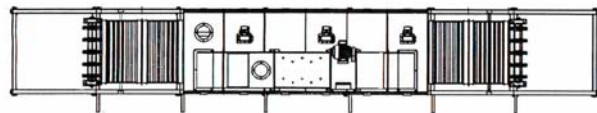
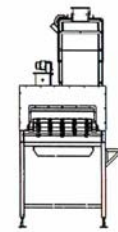
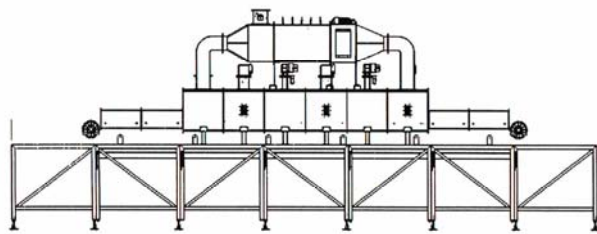
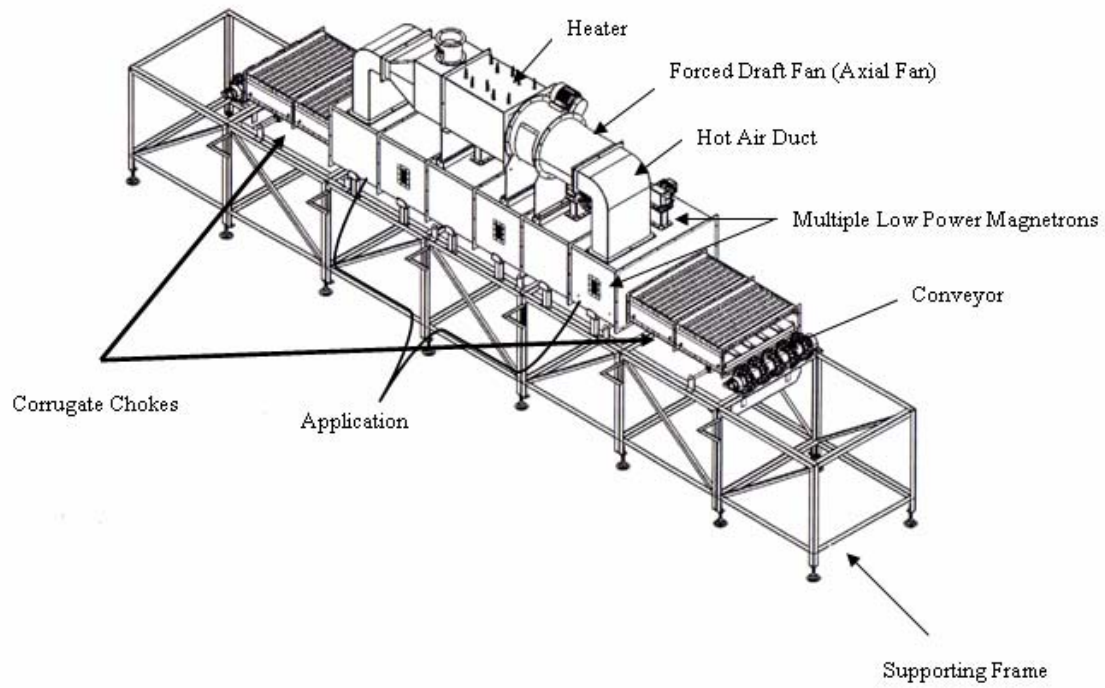
สำหรับการออกแบบระบบที่ป้อนโหลดหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (Liquid) หรือเป็นเม็ด (Granular Material) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก (มีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 1 เซนติเมตร) ได้มีข้อกำหนดของกฎหมายที่ต้องออกแบบระบบให้สามารถรองรับความปลอดภัยอันเกิดจากคลื่นที่รั่วได้ โดยในทางปฏิบัติต้องออกแบบให้มีปริมาณผลิตภัณฑ์หรือโหลดที่เหมาะสมและมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่ป้อนเข้าไปนี้ให้ใกล้เคียงกับช่องเปิดด้านหน้าของตัวระบบ เพื่อให้คลื่นในระบบสามารถดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุดและเล็ดลอดออกมาจากช่องทางเปิดนี้ให้น้อยที่สุด ในบางกรณีอาจมีการเพิ่มโหลดหลอก (Dummy Load) หรือวัสดุดูดซับ (Absorbing Load) ที่บริเวณช่องทางเปิดทั้งสองด้านของระบบ ซึ่งโหลดหลอกนี้มีขีดความสามารถในการดูดซับพลังงานที่รั่วออกมาอีกชั้นหนึ่ง (หลักการออกแบบระบบป้องกันไมโครเวฟรั่วไหลออกมาจะได้นำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อที่ 10.5)

สำหรับในกรณีที่ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นชิ้นขนาดใหญ่ จะออกแบบให้มีประตูเปิดที่เลื่อนได้ (Sliding Gate) ที่ช่องทางเข้าออกทั้งสองด้าน ทั้งนี้การที่จะทำให้ประตูเปิดได้อย่างสมบูรณ์ จะต้องสอดคล้องกับความเร็วของสายพานลำเลียงและกลไกการเปิด-ปิดของแมกนีตรอนที่สลับกันไปมาดังที่แสดงในรูปที่ 10.4 สำหรับการนำเอาแนวคิดที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้นเพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบในทางปฏิบัติสำหรับระบบทำความร้อนอเนกประสงค์ด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องดังที่แสดงในรูปที่ 10.5



รูปที่ 10.4 แสดงกลไกของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องที่มีการป้อนโหลดที่ขนาดต่างกันและมีรูปแบบการป้อนคลื่นที่ต่างกัน [4]





รูปที่ 10.5 แสดงระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง  
ในทางปฏิบัติ [5], [6]

### 10.3.2 ระบบอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาเต็ดเบด (Combined Microwave Dryer with Spouted Bed System)

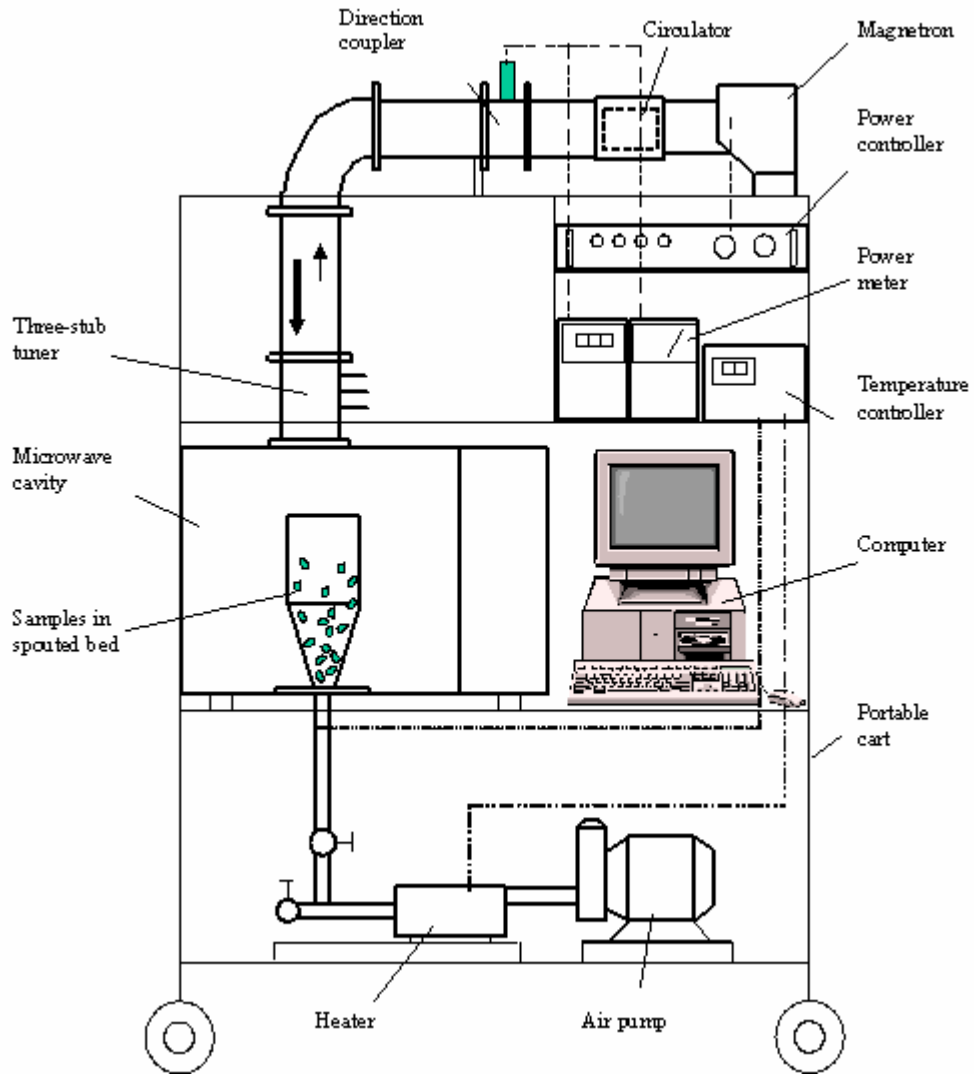
การอบแห้งวัสดุโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดหรือสเปาเต็ดเบดนั้นถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งในการอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นหั่นย่อย เช่น ผลผลิตเกษตรเชิงอนุภาค (Particulate Agricultural Products) โดยมีหลักการทำงานของระบบแบบพื้นฐาน (รูปที่ 10.6) ก็คือ คลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนถูกส่งเข้ามาในสเปาเต็ดเบดซึ่งบรรจุวัสดุอยู่ และคลื่นส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนไว้โดยวัสดุนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุอย่างทั่วถึง ในขณะที่ด้านล่างของสเปาเต็ดเบดจะทำการป้อนลมร้อนที่ความเร็วเฉพาะที่ออกแบบไว้ที่สามารถทำให้วัสดุตัวอย่างที่จะผ่านกระบวนการ (จะเน้นจำพวกเป็นเม็ด หรือรูปร่างเป็นชิ้นย่อยๆ อาทิเช่น เม็ดพลาสติก เม็ดยา ข้าว ข้าวโพด ถั่ว หรือพืชสมุนไพรที่มีการหั่นบาง เป็นต้น) สามารถลอยตัวและหมุนวนภายในสเปาเต็ดเบดได้ ผลจากการผสมผสานของความร้อนจากทั้งสองแหล่งประกอบกับการลอยตัวคลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง ส่งผลทำให้การกระจายของความร้อนเป็นไปอย่างดียิ่งและการการระเหยของความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี แห้งและมีความสม่ำเสมอในด้านสีของผลิตภัณฑ์ จากผลการวิจัยที่ผ่านมา [7] พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง 3 - 5 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบธรรมดาทั่วไป



รูปที่ 10.6 แสดงหลักการทำงานของระบบอบแห้งวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาเต็ดเบด

สำหรับการออกแบบระบบในเชิงปฏิบัตินั้น ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างระบบอบแห้งวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาเต็ดเบด (ระบบในทางปฏิบัติอาจแตกต่างจากนี้ได้) ในระบบนี้จะต้องออกแบบให้มีลักษณะการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟเป็นแบบหลายโหมด (Multimode) ด้วยเหตุผลของการกระจายตัวของความร้อนในวัสดุที่นำมาอบแห้งที่ดี ภายในภาชนะจะติดตั้งตัวสเปาเต็ดเบดซึ่งทำด้วยวัสดุที่ไม่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เช่น วัสดุจำพวกโพลีโพรพิลีนหรือหลอดแก้วขึ้นรูปเป็นต้น

ด้านล่างของสเปาเต็คเบค จะทำการป้อนลมร้อนที่ความเร็วเฉพาะที่ออกแบบไว้ที่สามารถทำให้วัสดุตัวอย่างที่จะผ่านกระบวนการ สามารถลอยตัวและหมุนวนภายในสเปาเต็คเบคได้ ด้านบนของระบบจะติดตั้งระบบป้อนวัสดุ (Material Feeder) เข้าไปใน สเปาเต็คเบค ส่วนที่ผิวด้านบนของตู้ไมโครเวฟจะเจาะเป็นช่องไว้เพื่อให้ลมที่ออกจากสเปาเต็คเบคผ่านออกไปได้โดยมีตะแกรงโลหะซึ่งออกแบบพิเศษให้สามารถตัดคลื่นที่จะทะลุผ่านได้ปิดเอาไว้ ส่วนด้านล่างจะมีระบบเก็บวัสดุ (Material Collector) ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ในบางระบบที่ออกแบบให้ทำงานแบบหลายขั้นแบบต่อเนื่อง (Multi Stage Continuous Process) วัสดุที่ผ่านการอบแห้งจากขั้นแรกจะถูกส่งเข้าไปอบแห้งในขั้นต่อไป นอกจากนี้ยังมีกรณีที่ระบบต้องใช้แมกนีตรอนกำลังสูงตัวเดียว ภายในระบบต้องมีอุปกรณ์ประกอบต่างๆ อาทิเช่น ไอโซ – เซอร์คิวเลเตอร์ (Iso Circulator) อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) และ อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices) เป็นต้น ด้วยเหตุผลเหมือนกับระบบที่เคยอธิบายไว้ในหัวข้อที่เพิ่งผ่านมา สำหรับการออกแบบระบบในทางปฏิบัติสำหรับระบบอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาเต็คเบคดังที่แสดงในรูปที่ 10.7



รูปที่ 10.7 แสดงระบบอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาต์เตดเบด [7]

### 10.3.3 กระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Processing)

กระบวนการเชิงอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ทำงานที่สภาวะความดันต่ำ เพื่อต้องการลดอุณหภูมิจุดเดือดของสารละลาย (Solvent) ที่อยู่ในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ รวมทั้งเพิ่มความแตกต่างของอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion Rate) ของสาร ในทุกกระบวนการที่อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศขณะรับพลังงานความร้อน พบว่าการถ่ายเทความร้อนไปยังตัววัสดุกลับยากขึ้น ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดของการถ่ายเทความร้อนในโหมดของการพาความร้อนซึ่งปกติจะมีความสำคัญมากสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานในสภาวะบรรยากาศปกติ แต่การพาความร้อนกลับกลายเป็นสิ่งไม่สำคัญสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานที่สภาวะความดันต่ำหรือกระบวนการสุญญากาศ

กลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญในกระบวนการสุญญากาศต่างๆ ไปจึงอยู่บนพื้นฐานของโหมดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนที่เป็นของไหล และในบางกระบวนการจะประยุกต์ใช้วิธีการฉีดไอน้ำที่ความดันต่ำเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการกลั่นตัว (Condensation) ของไอน้ำบนตัววัสดุ การนำความร้อนโดยปกติจะช้าและยากต่อการควบคุมและยังต้องการพื้นผิวในแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาก ดังนั้นในหลายกรณีเทคนิคการใช้ไอน้ำที่กลั่นตัวนี้ จึงไม่เป็นที่ยอมรับ

กระบวนการทำความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมโลหะเช่นกระบวนการหลอมละลายโลหะเพื่อทำให้มันบริสุทธิ์มากขึ้น โดยที่กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดายังมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพ ดังนั้นในอุตสาหกรรมหลอมละลายโลหะส่วนใหญ่จะอาศัยกระบวนการหลอมละลายโดยใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (Low frequency Introduction) เพราะตัววัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง (High Electrical Inductivity) เช่นกัน การใช้เทคนิคไมโครเวฟในกระบวนการหลอมละลายโลหะก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเพราะสามารถเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สภาวะสุญญากาศ เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ [3]

การออกแบบระบบที่ทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศให้มีสมรรถนะสูงก็ขึ้นอยู่กับค่าตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ของวัสดุและความดันสุญญากาศภายในระบบ ดังนั้น ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำงานได้อย่างปลอดภัยสามารถประเมินได้ หากทราบค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดนี้ เราก็สามารถคำนวณหาค่ากำลังการดูดซับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุได้ โดยใช้สมการที่ 24 ในบทที่ 4

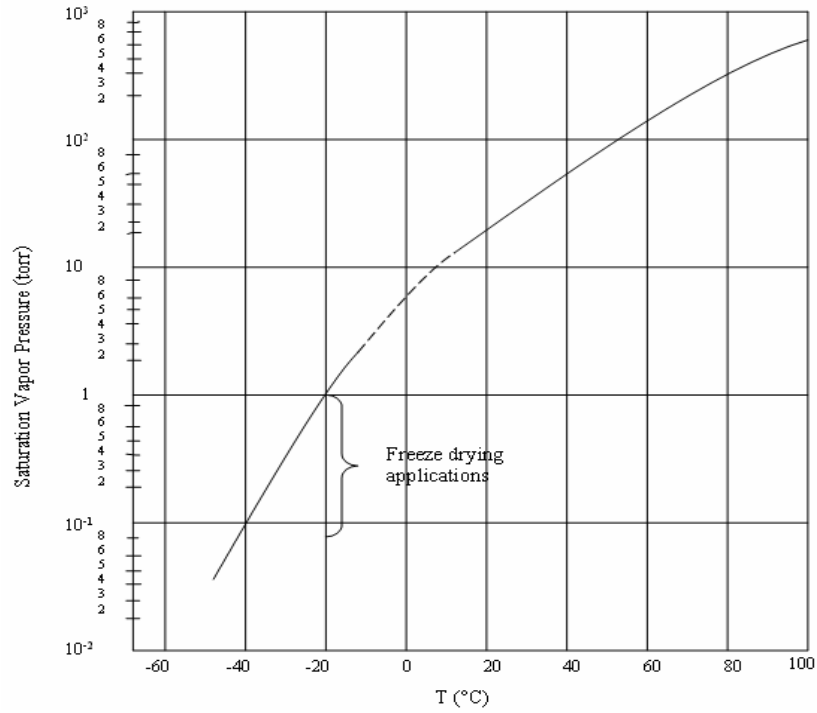
หากเราทราบอัตราการไหลเชิงมวลของวัตถุที่นำมาผ่านกระบวนการ ค่ากำลังกำลังการดูดซับทั้งหมดก็สามารถประเมินได้เช่นกัน ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะประมาณค่าปริมาตรวัสดุที่น้อยที่สุดที่

สามารถบรรจุไว้ภายในแอฟฟลิเคเตอร์ โดยปกติขนาดของแอฟฟลิเคเตอร์เพื่อทำความร้อนจะออกแบบมาเป็นรูปแบบเฉพาะสำหรับแต่ละกระบวนการ ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร อาทิเช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ อุณหภูมิสูงสุดภายในระบบและความถี่ที่ใช้ในระบบเป็นต้น อย่างไรก็ตามในแง่ความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ ระบบเชิงอุตสาหกรรมนิยมใช้ความถี่ที่ 2450 MHz มากกว่า 915 MHz

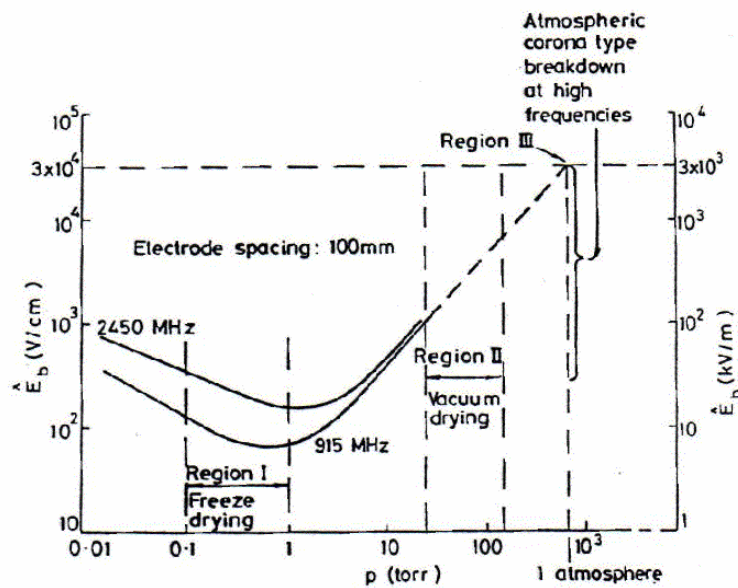
สำหรับแอฟฟลิเคเตอร์ หรือควิตีที่ใช้กับกระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) ของสนามไฟฟ้าที่สภาวะความดันนั้นๆด้วย ในการออกแบบสร้างแอฟฟลิเคเตอร์นั้น ส่วนใหญ่ทำมาจากการขึ้นรูปของแผ่นโลหะที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ โดยการออกแบบจะต้องอิงตามโค้ดมาตรฐานสากล เช่น British Standard Specification No.5500)

พื้นฐานของการดำเนินการในระบบการอบแห้งสุญญากาศก็คือ การดำเนินการในส่วนความดันเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ภายในวัสดุให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด นั่นคือควบคุมให้อุณหภูมิจุดเดือดให้ต่ำลงนั่นเอง ซึ่งข้อกำหนดของอุณหภูมินี้มักขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการและชนิดของกระบวนการด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริงจะต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับแต่ละกระบวนการ จุดสำคัญที่ต้องพิจารณาต่อไปก็คือ จุดเดือดของสารละลายที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (เช่น สารละลาย น้ำตาล-น้ำ) กรณีนี้เราอาจต้องออกแบบกระบวนการให้ทำงานที่ความดันต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ได้แสดงไว้ในกราฟคุณลักษณะของอุณหภูมิจุดเดือดและความดันซึ่งเป็นกรณีสารละลายบริสุทธิ์ รูปที่ 10.8 แสดงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำกับความดันในช่วง 1-133 kPa (หรือประมาณ 0.01 ถึง 1000 torr) จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งลาดลดลงอย่างต่อเนื่อง (จุดเยือกแข็งเปลี่ยนแปลงตามความดันสุญญากาศ) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C แสดงถึงบริเวณของการเกิดการระเหิด (Sublimation) ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งกลายเป็นไอ สำหรับกระบวนการการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze Drying) สามารถดำเนินการได้ที่ความดันในช่วง 13-133 Pa (ประมาณ 0.1 ถึง 1 torr) ดังแสดงในช่วง I ของรูปที่ 10.9

พิจารณาจากรูปที่ 10.9 ค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ควรหลีกเลี่ยง โดยอาจใช้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งกำลังไมโครเวฟที่มีคุณภาพที่ตัวแหล่งจ่าย เพื่อลดค่าของมัลลิจ โดยปกติการเกิดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าจะลดลงตามสภาวะสุญญากาศ ยกเว้นในช่วง I ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่ลดลง หากความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์มีค่าสูงเกินไป อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์การอาร์คหรือเกิดพลาสมาขึ้นมาได้



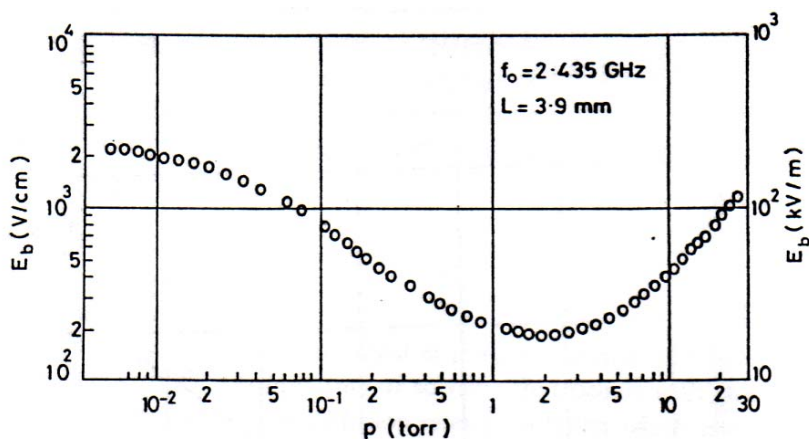
รูปที่ 10.8 แสดงความดันไออิ่มตัว (Saturation Vapor Pressure) ของน้ำแข็งและน้ำที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ( $1 \text{ torr} = 133.31 \text{ Pa}$ ) [3]



รูปที่ 10.9 แสดงการเกิดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศ (ค่าสูงสุด) ที่ขึ้นอยู่กับความดันที่ความถี่สองค่า ( $1 \text{ torr} = 133.31 \text{ Pa}$ ) [3]

### 10.3.3.1 การทำแห้งเยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟ (Microwave Freeze Drying)

หลักการการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในกระบวนการการทำแห้งเยือกแข็งของอาหาร (Freeze Drying of Food) กระบวนการนี้โดยทั่วไปเรียกว่ากระบวนการระเหิด (Sublimation Process) โดยความชื้นจะถูกเคลื่อนย้ายออกจากวัสดุแช่แข็ง (Frozen Material) ในรูปสถานะไอโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนเป็นสถานะของเหลว (Copson, 1975; Parker, 1968) อย่างไรก็ตาม กระบวนการการทำแห้งเยือกแข็งแบบธรรมดาเป็นกรรมวิธีที่ช้าและใช้เวลาหลายชั่วโมงกว่าจะจบกระบวนการ จึงมีแนวคิดที่จะใช้พลังงานแหล่งอื่น นั่นคือการใช้พลังงานไมโครเวฟสำหรับส่วนหลังของกระบวนการนี้ซึ่งสามารถเร่งกระบวนการให้เร็วขึ้นมาก เพราะไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านชั้นที่แห้งและถูกดูดซับเชิงปริมาตรโดยชั้นน้ำแข็งที่ลึกลงไปได้ อย่างมีประสิทธิภาพ



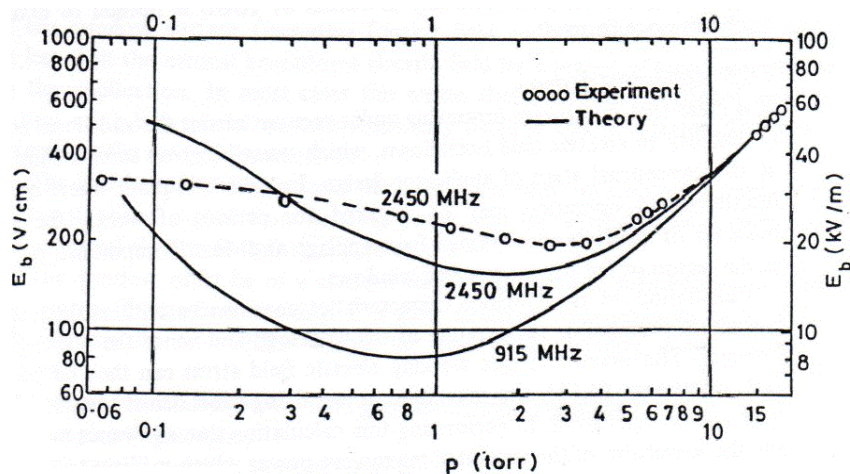
รูปที่ 10.10 แสดงการเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้า (Breakdown Electric Field (r.m.s.) ที่ขึ้นกับความดันของไอน้ำ (1 torr = 133.31 Pa) [3]

ปัญหาหลักที่สำคัญของการทำแห้งเยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟ คือการเกิดเบรกดาวน์ของคลื่น (Microwave Breakdown) ที่เกิดขึ้นในอากาศแห้งหรือไอน้ำที่หลงเหลือในบรรยากาศ ซึ่งอยู่รอบๆ วัสดุเยือกแข็ง เนื่องจากความดันที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการการเกิดระเหิดจะอยู่ระหว่าง 13-133 Pa (หรือประมาณ 0.1 และ 1 torr) ความดันในช่วงนี้ดังแสดงในรูปที่ 10.10 และ รูปที่ 10.11 จะเป็นตำแหน่งที่เข้าใกล้ค่าต่ำสุดของการเกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้า (Minimum Breakdown Electric Fields) ที่เกิดขึ้นในอากาศแห้งหรือไอน้ำนั่นเอง



คลื่นไมโครเวฟที่ทำงานที่ความถี่ 2450 MHz และความดันที่ไม่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการระเหิดได้ จะช่วยลดความเป็นไปได้ของการก่อตัวของการคายประจุ (Discharge Formation) นอกเหนือจากนี้การเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ (Gas Breakdown) ก็มีความสำคัญที่ควรนำมาพิจารณา พบว่า ค่ากำลังการดูดซับที่มากเกินไปอาจเกิดปัญหากับกระบวนการทำละลายได้ กล่าวคือหากพลังงานไมโครเวฟที่กระจายภายในวัสดุมีความเร็วกว่าอัตราการนำออกไปโดยการถ่ายเทมวลจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความดันที่บริเวณรอยต่อของสถานะน้ำแข็งเหนือจุดร่วมศูนย์ (Triple Point) การก่อตัวของโพรงหรือช่องว่างที่มีน้ำขังอยู่เป็นเหตุทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟดีขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal Runaway) ดังนั้นข้อจำกัดอันนี้จะต้องพิจารณาเป็นอย่างดีในการออกแบบระบบ ปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในอากาศแห้งหรือการเกิดเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในไอน้ำนั้นยากต่อการทำนายและขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในถึงสุญญากาศ (Evacuate Chamber) นั่นเอง

ถึงแม้ว่ามีงานวิจัยอย่างมากมายในระหว่างปี 1960 ถึง 1965 ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแห้งเยือกแข็งซึ่งส่วนใหญ่ตีพิมพ์ในรูปข้อมูลพื้นฐาน แต่ก็ยังไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีที่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่คุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ อย่างไรก็ตามพัฒนาการของกระบวนการไมโครเวฟที่ทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดันสูงๆ เช่นกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศนั้น กลับประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในหลายกระบวนการ อาทิเช่น กระบวนการทำแห้งผลิตภัณฑ์ (Meisel, 1979; Magnetronics Ltd. 1976, 1980, 1981) และกระบวนการทำละลาย (Thawing Process) ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อละลายน้ำแข็งภายในเนื้อและปลา [3]



รูปที่ 10.11 ข้อมูลจากการทดลองและทฤษฎีของการเกิดเบรกดาวน์ ( $E$  in r.m.s) ในอากาศ

$$L = 6.7 \text{ mm (1 torr = 133.31 Pa) [3]}$$

### 10.3.3.2 ระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศ

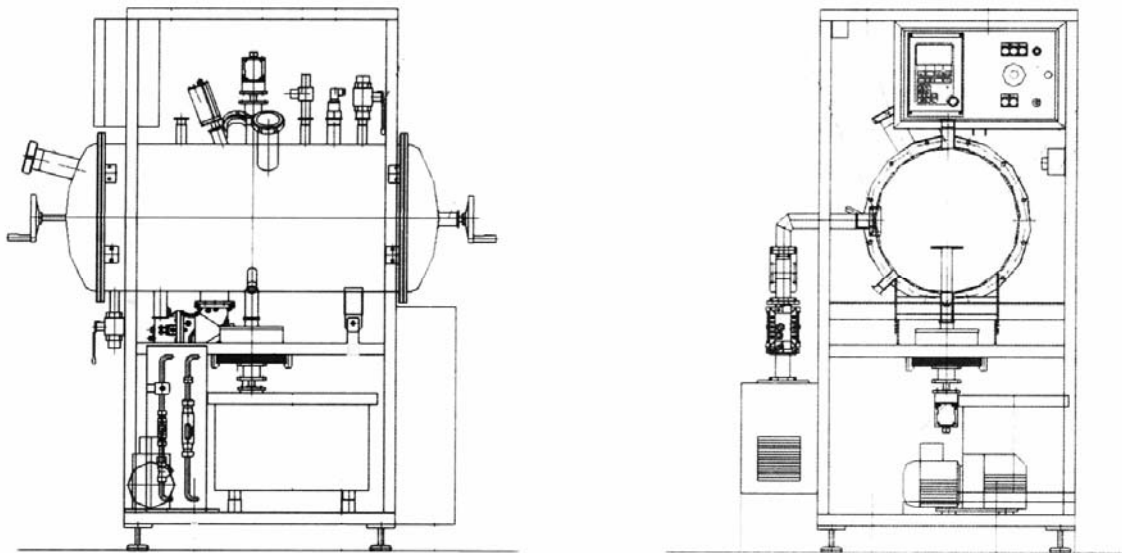
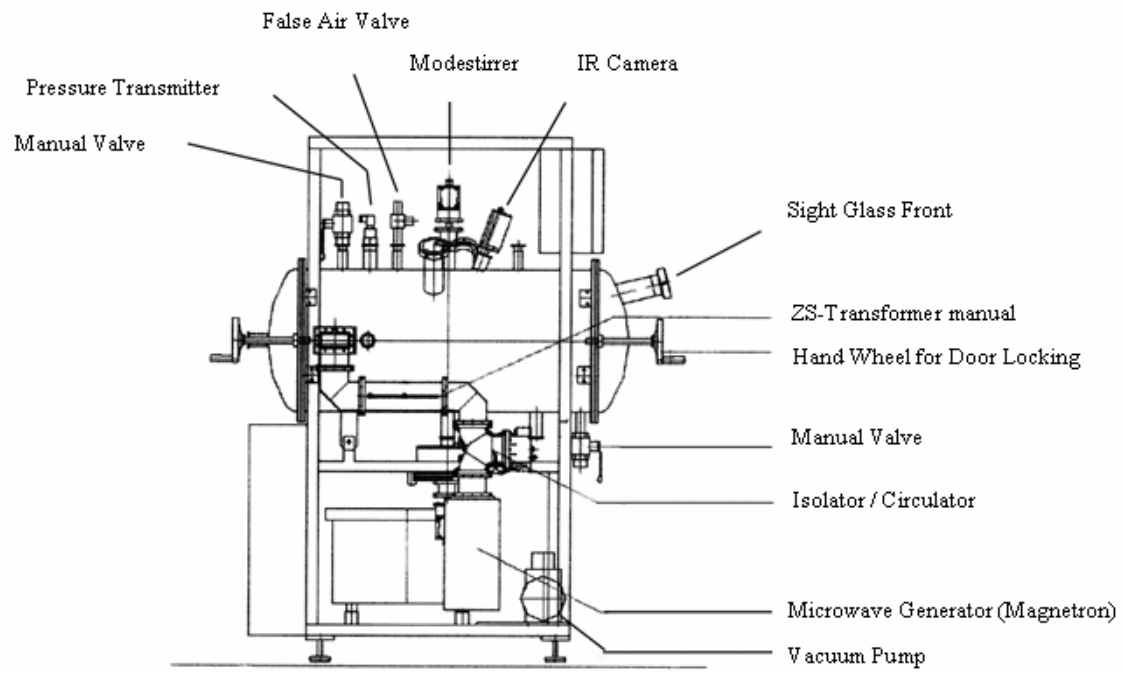
กระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศที่สภาวะความดันในช่วง 1.33-26.66 kPa (ประมาณ 10-200 torr) นำไปสู่ผลสำเร็จในการประยุกต์ใช้สำหรับการกระบวนการที่หลากหลายเช่น การอบแห้งวัสดุที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อนเช่น ผลิตภัณฑ์ยาหรือสารเคมีอื่นๆ ในกระบวนการนี้การอบแห้งจะดำเนินไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวัสดุและกระบวนการที่ดำเนินไปที่สภาวะความดันสุญญากาศก็ทำให้ลดอุณหภูมิจุดเดือดลง

พิจารณาจากกราฟในช่วง II ของรูปที่ 10.9 แสดงให้เห็นว่าในช่วงความดันระหว่าง 1.33-26.66 kPa (ประมาณ 20-200 torr) ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าหลายเท่าเมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองเบรคดาวน์ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นในการออกแบบระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศจะต้องคำนึงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติภายในแอฟฟลิเคเตอร์ เพราะส่งผลต่อกำลังการดูดซับ อุณหภูมิ และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัววัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ การเกิดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าจะปรากฏที่เฉพาะจุด และเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงอันเนื่องจากการก่อตัวของคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ดังนั้นปรากฏการณ์นี้ควรหลีกเลี่ยงเพราะเป็นกำลังที่สูญเปล่า (Waste Power) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดความร้อนสูงเฉพาะจุด (Local Overheating) ภายในโหลหรือวัสดุ อีกทั้งมีคลื่นบางส่วนรั่วไหลผ่านตรงประตูปิดเปิดของระบบไมโครเวฟได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ การทำความเข้าใจในธรรมชาติของการเกิดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้า และการออกแบบระบบให้เพื่อพิชิตความผิดพลาดที่ยอมรับได้ นับเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผู้ออกแบบระบบ โดยเป้าหมายของการออกแบบระบบที่ดีคือ ได้ระบบที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

กล่าวได้ว่า ระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศถือว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ต้องใช้เทคโนโลยีการออกแบบขั้นสูงที่ต้องคาบเกี่ยวกับศาสตร์ทาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้านวัสดุศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนและมวล และอิเล็กทรอนิกส์ - ไฟฟ้าควบคุม

สำหรับการออกแบบระบบในเชิงปฏิบัตินั้น ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศชนิดหนึ่ง (ระบบในทางปฏิบัติอาจแตกต่างจากนี้ได้) โดยระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศจะมีองค์ประกอบพื้นฐานของระบบดังแสดงในรูปที่ 10.12 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือเจนเนอเรเตอร์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Magnetron and Power Supply) ซึ่งมีหน้าที่ในกำเนิดคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปสร้างความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ จะมีอุปกรณ์ส่วนที่สองคือ ท่อนำคลื่น (Waveguide) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น เพื่อส่งไปยังควาวิสุญญากาศ (Vacuum

Cavity) ซึ่งมีฝาปิดเปิดได้ ซึ่งภายในควาวิต์สุญญากาศนี้จะเป็นที่บรรจุวัสดุที่จะนำมาผ่านกระบวนการ ส่วนล่างของ ควาวิต์สุญญากาศจะต่อเชื่อมอยู่กับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เพื่อควบคุมความดันให้ได้ในพิกัด ด้านบนของควาวิต์สุญญากาศอาจติดตั้งระบบเครื่องมือวัดหลายระบบ เช่น ช่องมอง (Sight Glass Front) กล้องอินฟราเรด (Infrared Camera) เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ วาล์วระบายอากาศ (False air Valve) ตัววัดความดันภายในถัง (Pressure Transmitter) โดยอาจจะมีส่วนอื่นๆของระบบ เช่น ระบบเครื่องมือมือป้องกันและเครื่องมือวัด เช่น ไอโซ – เซอร์คูเลเตอร์ (Iso Circulator) อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) และ เครื่องวัดกำลัง (Power Monitor) เป็นต้น โดยปกติก่อนนำคลื่น จะต่อเข้าสู่เครื่องวัดกำลังเพื่อสามารถวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการ โดย ไอโซ – เซอร์คูเลเตอร์ ทำหน้าที่ให้คลื่นผ่านไปได้ในทางเดียว ภายในระบบจะมีน้ำหมุนวน (หรือวัสดุดูดซับประเภทอื่น) เพื่อ ดูดซับคลื่นที่ย้อนกลับเพื่อป้องกันไม่ให้คลื่นสะท้อนกลับไปทำลายตัวแมกนีตรอน โดยที่อุปกรณ์ปรับค่าคลื่นใช้ในการปรับแต่งค่าอิมพีแดนซ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟปล่อยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องและควบคุมโดยใช้ อุปกรณ์ควบคุม ภายใน ควาวิต์สุญญากาศอาจจะมีถาดหมุน (PTFE Turntable) และใบกวน (Mode Stirrer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของคลื่นซึ่งส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนอย่างทั่วถึง ภายในโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ มวลความชื้นภายในวัสดุที่เปลี่ยนไปอาจประมวลผลได้ โดย การใช้เครื่องชั่งน้ำหนักที่อ่านค่าได้ตามช่วงเวลา เช่น โหลดเซลล์ (Load Cell-online Scale) นอกจากนี้ภายในระบบยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ เช่น สายไฟเบอร์ออปติก (Optical Fiber Optic) สำหรับวัดอุณหภูมิภายในวัสดุ และสายวัดความดัน (Optical Pressure Probe) ภายในวัสดุ ตลอดกระบวนการ นอกจากนี้ในระบบดังกล่าวนี้ อาจติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยต่อเชื่อมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ (Full Automated Microwave System) และสามารถเชื่อมโยงกับระบบอินเตอร์เน็ต [4]

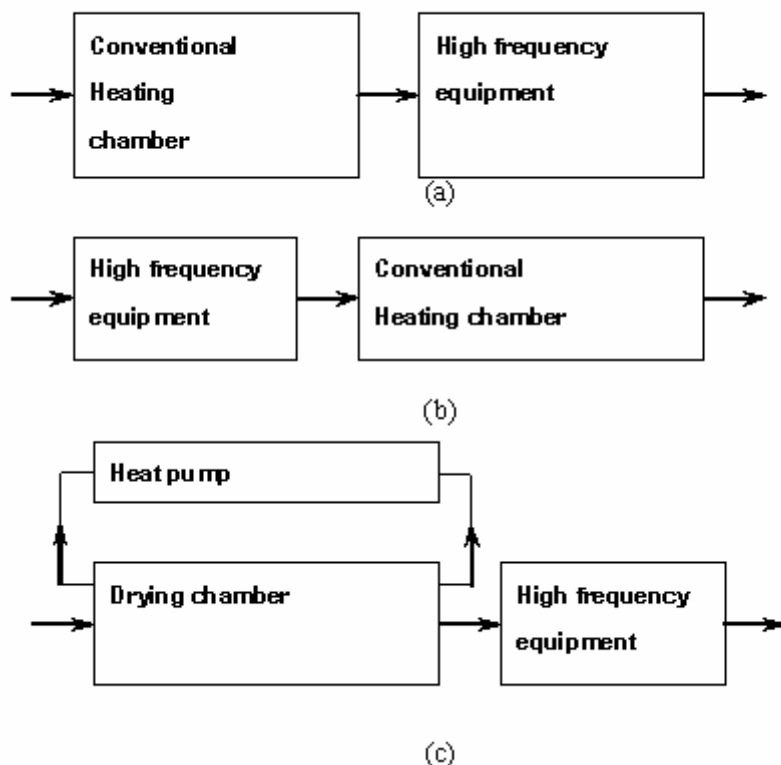


รูปที่ 10.12 ระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศ

#### 10.4 ระบบผสม (Hybrid System)

ในกระบวนการทำความร้อนเชิงอุตสาหกรรมจะมีหลายรูปแบบ กระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟดังที่ได้เคยกล่าวรายละเอียดที่ผ่านมาก็ถือเป็นรูปแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ก็ยังมีปัญหาเรื่องเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงกว่าระบบทำความร้อนแบบธรรมดาทั่วไป ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะคิดแปลงระบบที่มีอยู่ (ซึ่งระบบที่มีส่วนใหญ่เป็นระบบทำความร้อนแบบธรรมดาทั่วไป เช่น ใช้ลมร้อน หรือไอน้ำ) มาเป็นระบบผสมระหว่างระบบธรรมดาทั่วไปร่วมกับระบบไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 10.13 ในระบบอุตสาหกรรม (รูปที่ 10.13 (a)) จะประกอบด้วยระบบอบแห้งขนาดใหญ่โดยในที่นี้กระบวนการแรกเป็นการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียว จากนั้นวัสดุที่ผ่านการอบแห้งจากกระบวนการแรกจะถูกส่งมาในกระบวนการที่สองที่ใช้พลังงานจากไมโครเวฟซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายของระบบ เช่นเดียวกันในกระบวนการผสมในรูป (รูปที่ 10.13 (b)) กระบวนการแรกจะเป็นการอุ่นวัสดุโดยการใช้พลังงานไมโครเวฟ (ยกตัวอย่าง เช่น การอุ่นล่วงหน้ายางพารา (Preheating) ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization Process) โดยใช้ระบบลมร้อน เป็นต้น) สำหรับกระบวนการผสมรูปอีกรูปแบบ (รูปที่ 10.13 (c)) กระบวนการแรกเป็นการอบแห้งโดยใช้ระบบปั๊มความร้อนและตามมาด้วยการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ [3]

ที่กล่าวมาข้างต้นถือว่าเป็นหลักการพื้นฐานของการออกแบบระบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งจะต้องคำนึงถึงเรื่องการประหยัดพลังงานและคุณภาพของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการเป็นเป็นสำคัญ



รูปที่ 10.13 ระบบผสมระหว่างระบบธรรมดาทั่วไปร่วมกับระบบไมโครเวฟ

### 10.5 หลักการออกแบบเพื่อความปลอดภัย

เนื่องจากคลื่นโดยธรรมชาติของมันคือมองไม่เห็น ไม่มีเสียง ในปัจจุบันสาธารณชนได้เริ่มมีความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยเมื่อใช้งานในอุปกรณ์ที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงาน ปัจจุบันได้มีการทำมาตรฐานเกี่ยวกับความปลอดภัยดังกล่าว โดยจะพิจารณาจาก 2 ลักษณะ ลักษณะแรกพิจารณาในเรื่องของความร้อน กล่าวคือหากมนุษย์ได้รับพลังงานจากคลื่นในปริมาณที่มากพอทำให้ผิวหนังหรือสุกได้ ลักษณะที่สองคือ กรณีไม่มีความเสี่ยงต่อผลของความร้อน (Non-Thermal Risk) แต่คลื่นมีผลกระทบต่อระบบประสาทและการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม ซึ่งกรณีนี้อาจแบ่งออกเป็นผลกระทบแบบชั่วคราวและผลกระทบแบบถาวร อย่างไรก็ตามเป็นเรื่องยากที่จะแยกผลกระทบทั้งสองลักษณะออกจากกันอย่างชัดเจน สำหรับอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟที่รั่วไหลออกมาที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์นั้นขึ้นอยู่กับความถี่ กล่าวคือ ที่ความถี่ต่ำจะมีผลน้อยมากเนื่องจากคลื่นสามารถ

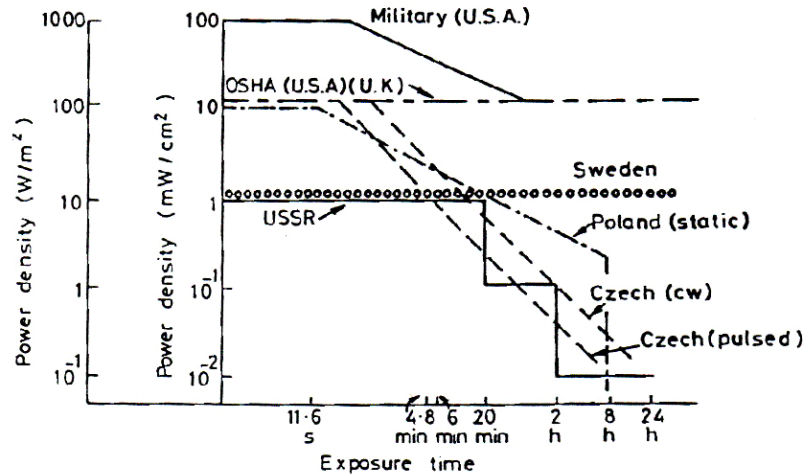
ผ่านตัวมนุษย์ไปได้ แต่คลื่นที่มีความถี่สูงจะมีผลต่อร่างกายมนุษย์เนื่องจากร่างกายดูดซับคลื่นไมโครเวฟ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งจากการศึกษาพบผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์หากมีไมโครเวฟ รั่วไหลพอสรุปได้ดังนี้

- เป็นมะเร็งผิวหนัง (โดยเฉพาะผู้ชาย)
- ทำให้เกิดการเป็นหมันชั่วคราวสำหรับผู้ชาย
- เกิดการแท้งบุตร
- ตาเป็นต้อกระจก
- การไหลเวียนของเลือดผิดปกติ
- ทำให้เกิดอาการหน้ามืดและวิงเวียน
- ทำให้มีอาการความจำเสื่อมได้

มีรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอันตรายของคลื่นที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในหลายๆ ประเทศ และได้มีการออกกฎหมายควบคุมปริมาณคลื่นรั่วไหลที่ยอมรับได้อย่างไรก็ตามยังไม่มีค่ามาตรฐานกลางเพื่อใช้ทั่วโลก แต่จะมีค่ามาตรฐานของแต่ละภูมิภาคหรือประเทศต่างๆ แตกต่างกันไป

ตัวอย่างการทบทวนรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอันตรายของไมโครเวฟต่อสุขภาพร่างกายเคยตีพิมพ์ไว้โดย Environmental Health Directorate of Canada เช่นกันมาตรฐานสิ่งแวดล้อมสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกำหนดโดย The World Health Organization (WHO) มาตรฐานนี้ได้รับการยอมรับทั่วโลก อย่างไรก็ตามข้อสรุปที่ถูกต้องยังไม่สามารถบ่งชี้ได้เนื่องจากความแตกต่างในมาตรฐานการแผ่รังสีระหว่างชาติเช่นกัน ในสหรัฐอเมริกา ค่าระดับมาตรฐานความปลอดภัยของ ANSI แสดงไว้ดังรูปที่ 10.14

นอกจากนี้หากพิจารณาตามมาตรฐาน DHHS (Department of Health and Human Services) ได้ระบุไว้ว่า ค่าสูงสุดที่ยอมให้ไมโครเวฟรั่วไหลออกมาได้คือ  $5 \text{ mw/cm}^2$  เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่งระยะห่าง 5 cm จากตัวระบบไมโครเวฟ ในขณะที่ตามกฎหมายของประเทศสวีเดนนั้นควบคุมการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟให้มีได้ไม่เกิน  $1 \text{ mw/cm}^2$  เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่งระยะห่าง 5 cm จากตัวระบบไมโครเวฟที่ยังใหม่อยู่ แต่ในส่วนของระบบไมโครเวฟที่เคยใช้งานแล้วยอมให้มีการรั่วได้ไม่เกิน  $5 \text{ mw/cm}^2$  อย่างไรก็ตามพบว่าหากเราอยห่างออกมาจากตัวตู้ไมโครเวฟ ระดับของพลังงานที่รั่วออกมาจะลดทอนลงอย่างรวดเร็ว ลดลงในแฟลตเตอร์ระดับ 100 เท่าโดยประมาณ (แปรตามระยะทางยกกำลังสอง) เปรียบเสมือนความแตกต่างระหว่างการที่เราเอามือไปวางใกล้ๆ เปลวไฟจากเทียนในระยะประมาณ 2 cm แล้วค่อยๆ ดึงมือออกห่างจากเทียนประมาณ 30 cm เราก็จะรู้สึกไม่ร้อน



รูปที่ 10.14 มาตรฐาน ANSI ของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

### 10.5.1 แนวคิดการออกแบบระบบเพื่อความปลอดภัย

ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจะต้องมีระบบประตูปิดเปิดอยู่เสมอ ซึ่งในการออกแบบตรงส่วนนี้จะต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติการในเรื่องของการรั่วไหลออกมาของคลื่นไมโครเวฟนั่นเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบเชิงอุตสาหกรรม

หลักการที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบประตูปิดเปิดสำหรับระบบเชิงอุตสาหกรรม มีดังนี้

10.5.1.1 จะต้องออกแบบระบบที่สามารถป้องกันไม่ให้ไมโครเวฟรั่วไหลออกมาได้ (หากมีการรั่วไหลออกมาบ้างก็ต้องไม่เกินระดับตามที่กฎหมายกำหนด) ในส่วนของตัวซีลที่ขอบประตูจะต้องมีความคงทนตลอดอายุการใช้งาน

10.5.1.2 จะต้องออกแบบให้ตรงส่วนของขอบประตูภายในต้องเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับตัวโครงหลักของควาตี

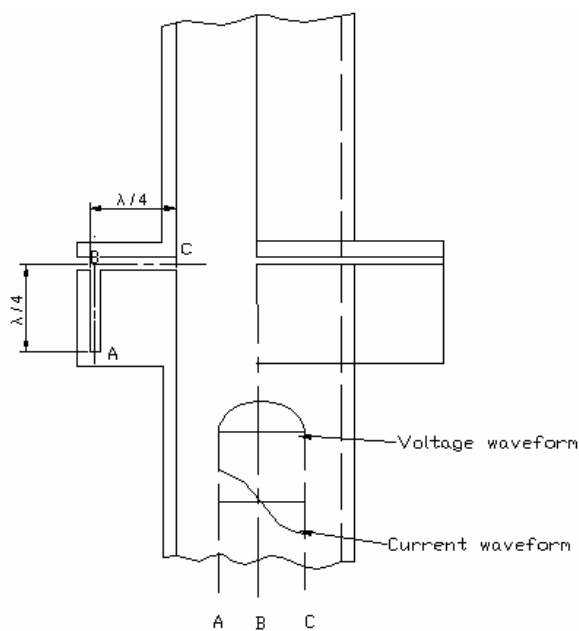
10.5.1.3 จะต้องออกแบบตัวซีลประตูที่สามารถทนความผันผวนของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาบริเวณนี้

10.5.1.4 สอดคล้องกับข้อ 3 ซีลที่ออกแบบขึ้นมาต้องคงทนต่อสภาวะที่เกิดความร้อนสูง (Overheating) หรือเกิดการอาร์ค (Arcing) และมีความคงทนเชิงกลเมื่อมีการปิดเปิดซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง โดยไม่เกิดการสึกหรองง่าย

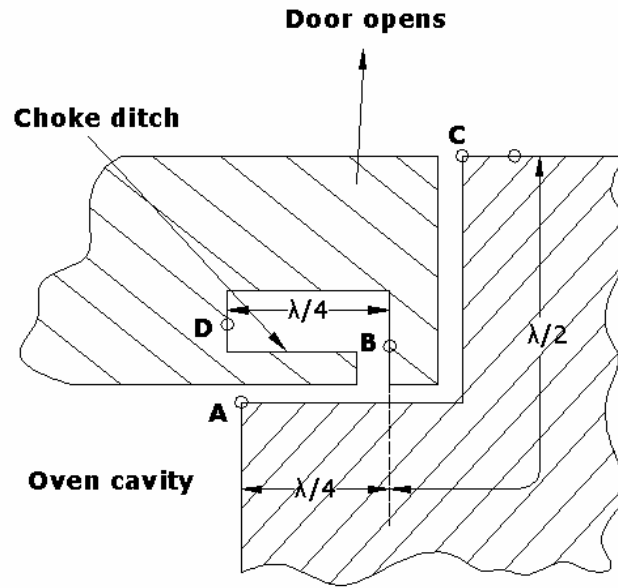
10.5.1.5 จะต้องออกแบบให้มีระบบอินเทอร์ล็อกอัตโนมัติ (Fail Safe Interlock) เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน กล่าวคือจะต้องมีระบบตัดวงจรการจ่ายคลื่นอย่างอัตโนมัติ หากประตูทุกอันยังไม่ปิดสนิทเช่นกันหากประตูปิดสนิทแล้วแต่มีคลื่นรั่วไหลออกมาในระดับที่เกินพิกัดที่กำหนดก็จะมีอุปกรณ์เซนเซอร์ส่งสัญญาณให้วงจรการจ่ายคลื่นหยุดทำงานทันที



ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยนี้ ในส่วนของตัวซีลซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญของระบบประตูด โดยมักออกแบบให้ซีลเป็นชนิด RF (RF seal) โดยซีลชนิดนี้จะมีพื้นฐานของโครงสร้างเป็นลักษณะการเรียงตัวของใช้ชนิดควอเตอร์เวฟเลง (Quarter Wavelength Choke) ซึ่งมีลักษณะเรียงกันอยู่เป็นช่องๆ ตรงตำแหน่งจุดต่อระหว่างโครงสร้างของประตูและควิวตี้ [9] สำหรับโครงสร้างของตัวใช้รูปแบบใหม่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป โดยจะได้เสนอแนวทางการออกแบบเพื่อสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้อย่างปลอดภัย ในอดีตการออกแบบระบบป้องกันคลื่นรบกวนนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบใช้แค่เพียงแต่จะใช้ระนาบผิวสัมผัสระหว่างแผ่นต่อแผ่น (Contact Surface) โดยมีสปริงที่กดไว้ตลอดเวลาเพื่อให้หน้าสัมผัสทั้งสองกดทับแน่นขึ้น แต่วิธีการนี้ยังทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพนักเพราะอาจมีการอาร์คเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสดังกล่าวได้และเกิดความเสียหายได้ถ้าหากทำการประกอบตำแหน่งผิวสัมผัสทั้งสองไม่ดี สำหรับระบบใช้ที่ตรงซีลประตูและมิดของม้วนดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 10.15



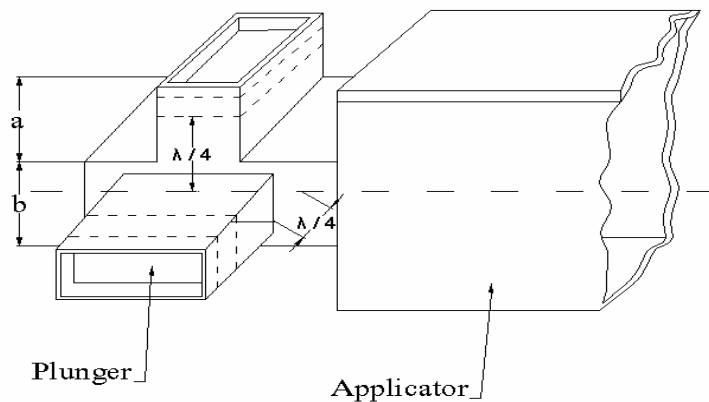
(a)



(b)

รูปที่ 10.15 โฉลคที่ตรงประตูปิดเปิดในแอปพลิเคชันชนิดมัลติโหมด

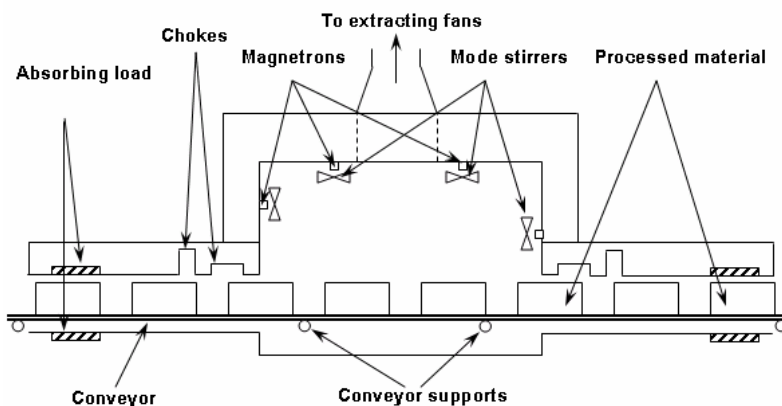
สำหรับในกระบวนการที่ทำงานแบบต่อเนื่องซึ่งจะมีช่องทางเปิดที่ส่วนปลายทั้งสองของระบบ โดยที่วัสดุที่ถูกให้ความร้อนจะอยู่บนสายพานหรือตัวหมุนเพื่อลำเลียงเข้าและออก สำหรับการป้องกันการรั่วของคลื่นที่บริเวณดังกล่าว อาจทำได้โดยการติดตั้งติดตั้งระบบ โฉลคร่วมกับวัสดุดูด ชับหรือมีพลังเยอร์ (Plunger) ไว้คอยปรับแต่งคุณสมบัติของคลื่น (ความยาวคลื่น) ที่บริเวณดังกล่าว โดยรูปร่างพื้นฐานและมิติของมันดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 10.16 สำหรับรายละเอียดการออกแบบระบบป้องกันการคลื่นรั่วสำหรับกระบวนการที่ทำงานแบบต่อเนื่องจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 10.16

### 10.5.2 การออกแบบระบบเพื่อความปลอดภัยสำหรับระบบเชิงอุตสาหกรรม

ในกรณีระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง เช่นระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 10.17



รูปที่ 10.17 ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดแอฟพลีเคเตอร์แบบมัลติโหลดกับระบบป้องกันคลื่นรั่วที่บริเวณทางออกและทางเข้า

ระบบนี้จะไม่มีการปิดเปิด แต่จะมีช่องทางเปิด (สำหรับให้วัสดุไหลเข้าออกระบบได้อย่างต่อเนื่อง) ที่ตอนปลายทั้งสองของระบบ วิธีการที่จะใช้สำหรับการป้องกันการรั่วไหลของคลื่นออกมากระทำได้โดยการติดตั้งระบบใช้ร่วมกับวัสดุดูดซับที่บริเวณดังกล่าว สำหรับรูปที่ 10.17 ที่นำเสนอนี้แสดงถึงระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดแอฟพลีเคเตอร์แบบมัลติโหลด โดยมีการป้องกันคลื่นซึ่งมาจากแมกนีตรอนหลายตัวและหลายตำแหน่งเพื่อให้วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการโดยสายพานลำเลียงได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ สำหรับรายละเอียดการออกแบบระบบป้องกันคลื่นรั่วที่บริเวณทางออกและทางเข้าดังจะแสดงต่อไปนี้

ในระดับอุตสาหกรรม ระบบทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถแบ่งออกได้ 2 จำพวกใหญ่ๆ กล่าวคือ ระบบที่ทำงานแบบเป็นกะ (Batch System) กับระบบที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow System)

#### 10.5.2.1 ระบบทำงานเป็นกะ

ระบบนี้จะมีลักษณะเป็นควาวิต์ โดยที่ตัวแมกนีตรอนติดตั้งประกอบด้วยตัวควาวิต์ ดังนั้นแหล่งที่จะทำให้เกิดการรั่วก็คือ บริเวณประตูปิดเปิดของระบบ ซึ่งบริเวณเปิดปิดนี้จะมีฉนวนป้องกัน

รองรับขอบของประตูดังกล่าว โดยทั่วไปบริเวณซีลประตูนี้จะออกแบบให้เป็นลักษณะที่เรียกว่าควอเตอร์เวฟเลงโซ้ค (Quarter Wavelength Choke) โดยมันจะทำการลดคลื่นที่รั่วออกให้ต่ำกว่าพิคกิ้งที่ยอมรับได้ ในขณะที่ระบบไมโครเวฟทำงานจะมีระบบอินเตอร์ล๊อคเพื่อที่จะทำการตัดระบบการทำงานของแหล่งจ่ายคลื่น (แมกนีตรอน) โดยอัตโนมัติหากประตูของตัวตู้ปิดไม่สนิท หรือถ้าเป็นระบบที่ทันสมัยหากเกิดกรณีมีคลื่นรั่วออกมาจากระบบเกินพิคกิ้งที่กำหนดไว้ระบบอินเตอร์ล๊อคก็จะตัดระบบทันทีเช่นกัน

### 10.5.2.2 ระบบทำงานแบบต่อเนื่อง

ระบบไมโครเวฟชนิดความถี่สูงที่ทำงานแบบต่อเนื่องจะมีอัตราเสี่ยงต่อการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟมากกว่าระบบทำงานแบบกะ ทั้งนี้เพราะระบบดังกล่าวนี้ โดยเฉพาะที่ทางเข้าและทางออกของระบบเป็นระบบเปิด เพื่อให้วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการไหลเข้าออกแอฟฟลิเคเตอร์ได้ดังที่เคยได้อธิบายไว้ตอนต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้คลื่นรั่วไหลออกมาเกินพิคกิ้งที่ยอมรับได้ที่ช่องทางเข้าออกนี้ จึงต้องมีการออกแบบแบบพิเศษที่บริเวณทางเข้าออกนี้ โดยติดตั้งระบบโซ้ค เพื่อทำการดูดซับหรือกำจัดคลื่นที่เหลือที่แผ่ออกมาจากภายในตัวแอฟฟลิเคเตอร์ โดยปกติช่องทางเข้าออกที่กล่าวมานี้จะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นช่องทางเล็กๆเพียงพอให้วัสดุไหลเข้าออกได้เท่านั้น ยกตัวอย่างเช่นในกระบวนการอบแห้งเส้นใยที่ความถี่ 2.45 GHz อาจต้องออกแบบให้ช่องทางเข้าออกมีความกว้างเป็นเมตรแต่มีความสูงเพียงแค่ 5 มิลลิเมตร เท่านั้น

การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟจากช่องทางเข้าออกนี้ สามารถควบคุมได้หลายเทคนิค ซึ่งอาจเป็นแบบง่ายๆหรือเทคนิคที่ซับซ้อนที่ออกแบบโครงสร้างแบบผสม ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป อย่างไรก็ตาม หลักการออกแบบระบบเบื้องต้นที่สามารถควบคุมการรั่วไหลของคลื่น ไม่ให้เกินพิคกิ้งเพื่อความปลอดภัยมีดังนี้

จะต้องจำกัดขนาดรูหรือช่องเจาะต่างๆให้เล็กกว่าช่วงความยาวคลื่นคัทออฟในช่วงความถี่ทำงานนั้น ในทางปฏิบัติขนาดและจำนวนของรูหรือช่องเจาะดังกล่าวต้องสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรู (รูปที่ 10.18) ซึ่งมีหลักการออกแบบเบื้องต้นดังนี้

- โดยทั่วไปแนะนำให้ขนาดรูเจาะ (D) ควรให้น้อยกว่า 4 mm ( $D \leq 4 \text{ mm}$ )
- พื้นที่ของรูที่เจาะจะต้องน้อยกว่า 30% ของพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรู ( $A \times B$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{\left(3.14 \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times N\right)}{(A \times B)} \leq 30\% \quad (10.1)$$

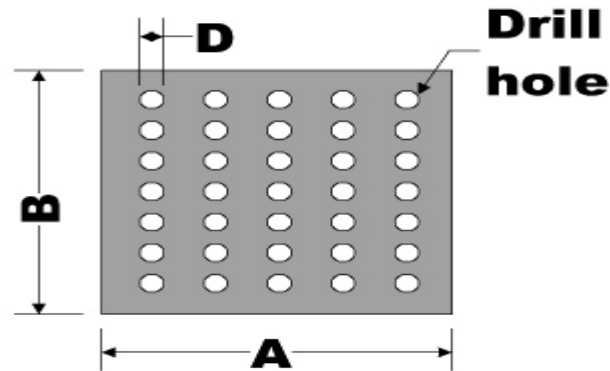
โดยที่

D คือขนาดรูหรือช่องเจาะ (Hole Diameter)

N คือจำนวนรู (ในรูปที่ 10.16 ,  $N = 5 \times 7 = 35$  รู)

A, B คือมิติพื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่ทำการเจาะรู (Face Size of Applicator)

โดยขอบรูที่เจาะนี้ควรมีลักษณะที่เรียบเพื่อป้องกันการอาร์ค และห้ามนำวัสดุใดๆมาติดแปะหรือสอดใส่ในบริเวณรูที่เจาะนี้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 10.18 มิติพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรูและจำนวนรูที่สอดคล้องกับสมการที่ (10.1)

จะต้องจำกัดขนาดรูหรือช่องเจาะที่บนท่อนำคลื่นในระนาบ 1 มิติ ให้เล็กกว่าครึ่งความยาวคลื่น (Half Wavelength) เพื่อควบคุมการรั่วไหลของคลื่น

จะต้องประกอบระบบ โช๊คที่ออกแบบให้มีสัดส่วนของโครงสร้างหรือช่องเป็นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter Wavelength) เข้ากับระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยเฉพาะในช่องทางเข้าออกของโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ

มีระบบดูดซับคลื่นเพื่อลดการรั่วไหลของคลื่นและรักษาระดับคลื่นที่รั่วไหลออกไปไม่ให้เกินพิกัด

ใช้เทคนิคคัตออฟเวปไกด์

ใช้เทคนิคคัตออฟเวปไกด์เป็นระบบที่ง่ายที่สุด เพราะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วไหลของคลื่น แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดช่องทางเข้าออกวัสดุที่ต้องออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กเท่านั้น (ตัวอย่างเช่น กระบวนการเอกซ์ทราซัน) หรือ ในกรณีออกแบบ โช๊คให้มีรูปแบบเป็นลักษณะกลุ่ม (Array) ก็เหมาะใช้งานกับกระบวนการที่ทำงานกับวัสดุที่เป็นชิ้นย่อยๆ กล่าวได้ว่าหลักการทำงานพื้นฐานของระบบ โช๊ค ก็คือ การลดทอนพลังงานคลื่นที่กระจายออกมาให้อยู่ในย่านคัตออฟเวปไกด์

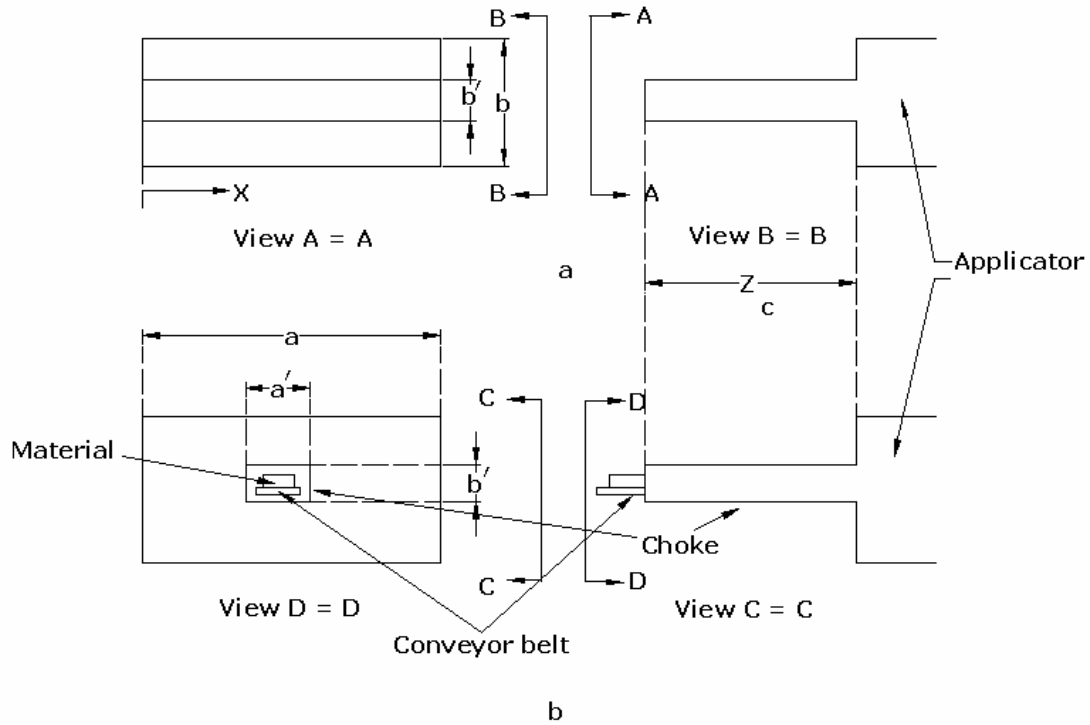
โดยกำหนดให้ขนาดของมันต่ำกว่าค่าวิกฤติ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นในฟรีสเปซหรือที่ว่าง (Free Space)

พิจารณาตรงส่วนปลายของช่องป้อนที่ต่อเชื่อมกับแอฟฟลิเคเตอร์ที่มีพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยมีคลื่นในโหมด  $TE_{10}$  เดินทางอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 10.19(a) ในที่นี้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัดขนาด  $x \times b'$  โดยมีสายพานลำเลียงเป็นตัวนำโหลดหรือวัสดุผ่านตัวแอฟฟลิเคเตอร์ ในที่นี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติของระบบที่ช่องทางที่ป้อนนี้ โดยให้ด้าน  $b'$  คงที่และด้าน  $x$  เปลี่ยนแปลงได้

เมื่อ  $x=a$  ค่าการลดทอนของคลื่นต่อ 1 เมตร เนื่องจากการสูญเสียที่ผนังสำหรับโหมด  $TE_{10}$  ในแอฟฟลิเคเตอร์ที่มีหน้าตัดขวาง ( $x=a, y=b$ ) และสำหรับช่องทางป้อน (Feed Waveguide) ( $x=a, y=b'$ ) ดังแสดงในรูปที่ 10.20 โดยมีเส้นทึบแสดงถึงค่าความถี่คัตออฟ (Cutoff frequency) ที่ค่าเดียวกัน,  $f_c$

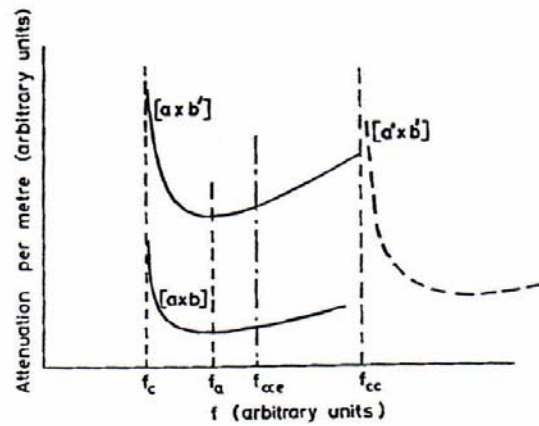
อย่างไรก็ตามหากทำให้  $x$  เล็กกว่ามากๆ กล่าวคือให้  $x = a$  ดังแสดงในรูปที่ 10.19(b) ในที่นี้ค่าความถี่คัตออฟในท่อนำคลื่นที่ช่องทางป้อน (Feed Waveguide),  $f_{CC}$  ได้ย้ายตำแหน่งไปทางฝั่งขวาของความถี่ทำงาน (Operating Frequency) ภายในแอฟฟลิเคเตอร์,  $f_a$  ดังนั้นการแพร่กระจายของคลื่นในโหมดที่สำคัญ ที่ผ่านท่อนำคลื่นที่ช่องทางป้อนจึงไม่เกิดขึ้น ภายใต้สภาวะคัตออฟนี้ด้วยคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของคลื่นที่ท่อนำคลื่นที่ช่องทางป้อน ส่งผลทำให้ไม่มีพลังงานของคลื่นที่แพร่กระจายออกไปได้ โดยที่พลังงานนี้ไม่ได้สูญเสียไปที่ผนังของท่อ แต่จะสะท้อนกลับเข้าไปในแอฟฟลิเคเตอร์ สำหรับการลดทอนต่อหน่วยความยาว เนื่องจากการสูญเสียที่ผนังสำหรับคลื่นในโหมด  $TE_{10}$  ที่ความถี่  $f > f_{CC}$  ที่ผ่านท่อนำคลื่นที่ช่องทางป้อนดังแสดงให้เห็นเส้นประในรูปที่ 10.20

ส่วนที่สำคัญก็คือเมื่อมีการออกแบบท่อนำคลื่นที่พิจารณาถึงค่าความถี่คัตออฟจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ในกรณีที่ท่อนำคลื่นที่ช่องทางป้อนมีโหลดเดิมอยู่ ค่าความถี่คัตออฟ ในกรณีนี้สามารถคำนวณได้จาก  $f_{CCE} = \frac{f_{CC}}{\sqrt{\epsilon'}}$  นั้นหมายความว่าใช้คในทางปฏิบัติจะมีโหลดบางส่วนเดิมอยู่ ดังนั้นการย้ายตำแหน่งของความถี่คัตออฟ ( $f_{CCE}$ ) ไปทางขวาจะน้อยกว่าความถี่คัตออฟ ( $f_{CC}$ ) กรณีที่ไม่มีโหลดเดิมอยู่ แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องมั่นใจว่า  $f_{CCE} > f_a$  เสมอ หากนอกเหนือไปจากนี้การทำงานของใช้จะไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10.19 หลักการของใช้ชนิดคัดออฟเวปไกด์

(a) ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัดขนาด  $a \times b'$  ที่ตอนปลายของช่องทางป้อนทำหน้าที่เป็นโช๊คที่ไม่ดีนัก (b) ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัดขนาด  $a' \times b'$  ที่ตอนปลายของช่องทางป้อนทำหน้าที่เป็นโช๊คที่ดี



รูปที่ 10.20 ค่าการลดทอนต่อหน่วยความยาวเนื่องจากสูญเสียที่ผนังที่ขึ้นอยู่กับความถี่สำหรับคลื่นในโหมด  $TE_{10}$  ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

- $f_a$  ความถี่ทำงาน (Operating Frequency) ในแอฟพลิเคชันที่ทำงานในโหมด  $TE_{10}$
- $f_c$  ความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) สำหรับโหมด  $TE_{10}$  ภายในแอฟพลิเคชัน
- $f_{cc}$  ความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) สำหรับโหมด  $TE_{10}$  ภายในโช๊ค

$f_{CCE}$  ความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) สำหรับโหมด  $TE_{10}$  ภายในโซ่ที่มีที่มาผ่านกระบวนการบางส่วนเดิมอยู่

ระดับชนิดควอเตอร์เวปแลง

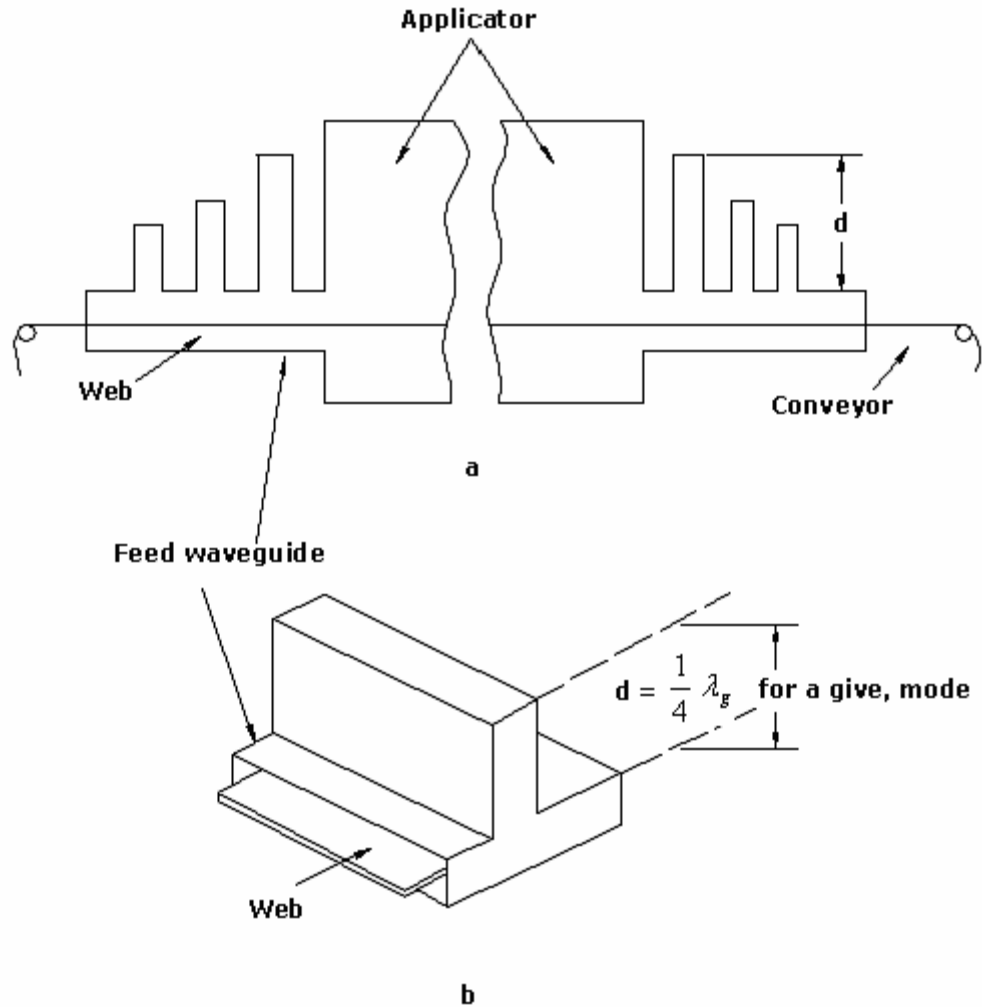
เทคนิคอันหนึ่งจากอีกหลายๆ เทคนิคของระบบโซ่แบบรีเอคทีฟนั้นก็คือ การใช้วิธีการต่ออนุกรมของซ็อตเซอร์กิตสตัป (Short Circuit Stub) ตลอดช่วงแถบความกว้างด้านหนึ่งของท่อนำคลื่นที่ช่องทางเข้าและทางออกของตัวแอฟพลีเคเตอร์ที่ทำงานในลักษณะต่อเนื่อง ดังแสดงไคอะแกรมในรูปที่ 10.21 โดยที่ช่วงความยาวของสตัปนี้ต้องปรับแต่งให้อยู่ที่  $\frac{1}{4} \lambda_g$  สำหรับโหมดที่พิจารณานั้น

ถ้า อินพุทอิมพีแดนซ์ของสตัปที่ช่วงความยาว  $d$  คือ

$$Z = j Z_{os} \tan (2 \pi d / \lambda_g)$$

เมื่อ  $Z_{os}$  คือ ค่าคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของสตัป สำหรับ  $d = \frac{1}{4} \lambda_g$  ค่าอิมพีแดนซ์นี้จะกลายมาเป็นค่าอนันต์ ดังนั้นสตัปจะทำหน้าที่เป็นลักษณะ โอเพนเซอร์กิต สำหรับโหมดนั้น ๆ ซึ่งแสดงว่า สตัปมีประสิทธิภาพในการบล็อกคลื่นในโหมด  $TE_{mn}$  แต่จะไม่ทำงานในโหมด  $T_{mn}$  การลดทอนของคลื่นจากกราวด์สามารถทำได้ที่ค่าประมาณ 20 dB อย่างไรก็ตามในกรณีที่ระบบทำงานที่แบนด์วิดท์แบบแคบๆ (ประมาณ 1 MHz) อาจจะต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้ระบบที่ค่าความถี่กลางของแหล่งจ่ายไมโครเวฟ ผู้สนใจที่จะศึกษาเพิ่มเติมสำหรับหลักการของโซ่ชนิดนี้สามารถหาอ่านได้ในงานของ Püschener(1966)





รูปที่ 10.21 สตับชนิดควอเตอร์เวฟแลงที่ทำหน้าที่เป็นโฉกที่ตำแหน่งช่องทางป้อนเข้าและออก

(a) ภาพสมบรูณ์ของแอปพลิเคชันที่ติดตั้งโฉก

(b) รายละเอียดของสตับเดี่ยวเพียงส่วนเดียว

### โฉกชนิดคูเรกต์

ข้อเสียบางอย่างของโฉกชนิดควอเตอร์เวฟแลงสตับสามารถกำจัดไปได้โดยใช้โฉกชนิดคูเรกต์ ซึ่งเป็นอีกชนิดหนึ่งของโฉกแบบรีเอคทีฟ ดังแสดงโคอะแกรมในรูปที่ 10.22(a) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสตับที่มีขนาดเท่าๆกัน ต่อวางอนุกรมกัน คุณสมบัติของค่าความถี่ของแต่ละโครงสร้างขึ้นอยู่กับขนาดของตัวโครงสร้างเป็นสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 10.22(b)

ในที่นี้ช่วงความยาวและแถบความกว้างของสตับ คือ  $d$  และ  $(l-b)$  ตามลำดับในขณะที่ระยะประชิดระหว่างสตับสองตัว คือ  $b$  ส่วนระยะห่างระหว่างปลายสตับกับสายพานลำเลียงคือ  $h$  ค่าคงที่การ

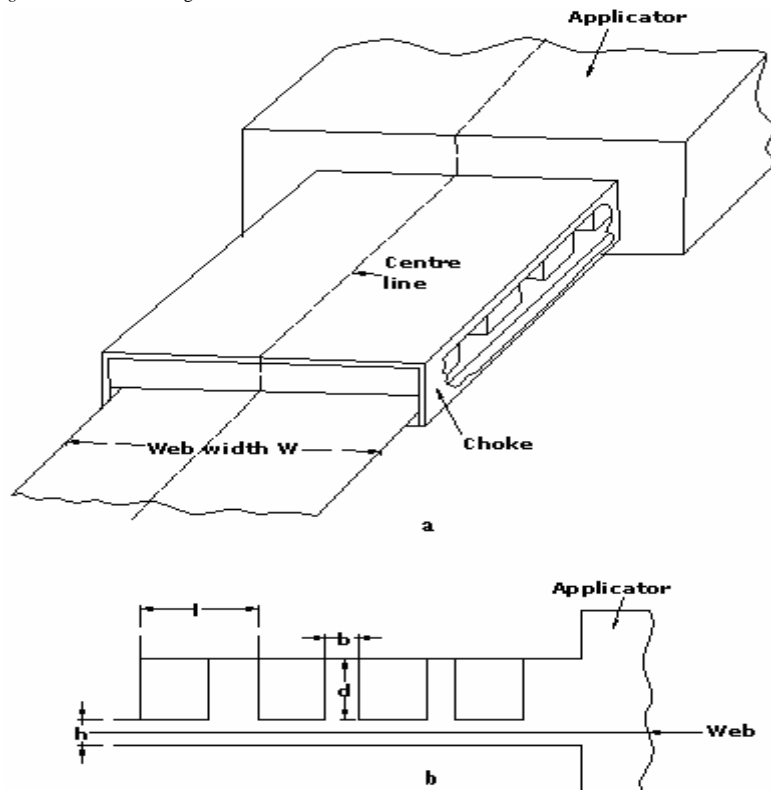
ลดทอน (Attenuation Constant)  $\alpha$  ในหน่วย Np/m สามารถพิสูจน์มาจากคุณลักษณะของการกระจายคลื่น และสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ดังนี้ [3]

$$\cosh(\alpha l') = \cos(2\pi l' / \lambda_g) - \frac{b}{2h} [\tan(2\pi d' / \lambda_g)] [\sin(2\pi l' / \lambda_g)] \quad (10.3)$$

ในที่นี้สัญลักษณ์ “ $l'$ ” หมายถึงค่าความยาวไฟฟ้าเทียบเท่า

สำหรับกรณีสลับมี  $n$  ชั้น ถ้า การสูญเสียจะกลายเป็น  $8.686\alpha l' n$  dB

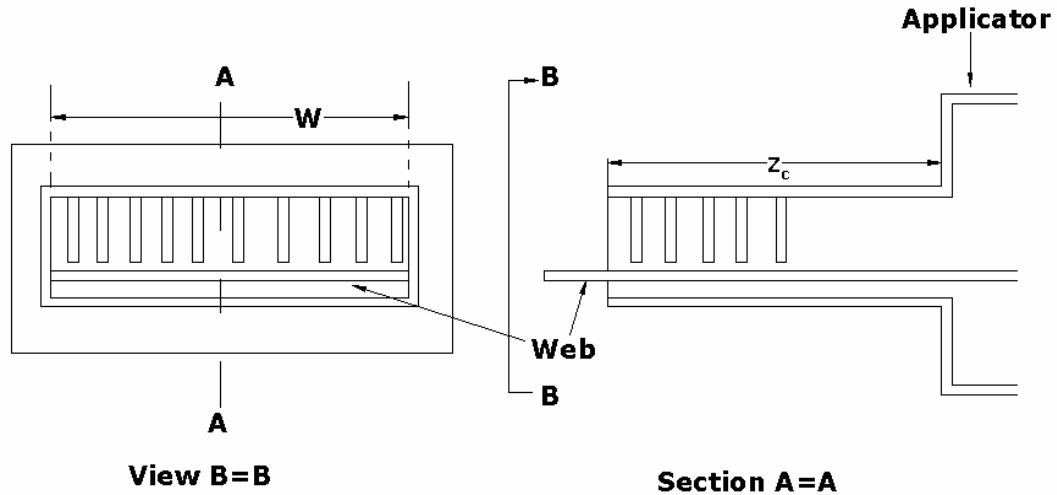
การออกแบบส่วนประกอบของโช้คตามสมการ 10.3 จะต้องเลือกพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างระมัดระวัง ในที่นี้จะกำหนดค่าพิกัดวิกฤติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเหล่านี้เป็น ดังนี้ คือ  $h < 0.2 \lambda_g$ ,  $l' = \lambda_g / 4$ ,  $d' = \lambda_g / 4$  และ  $b = l' - h$



รูปที่ 10.22 หลักการของโช้คชนิดครุเกตต์

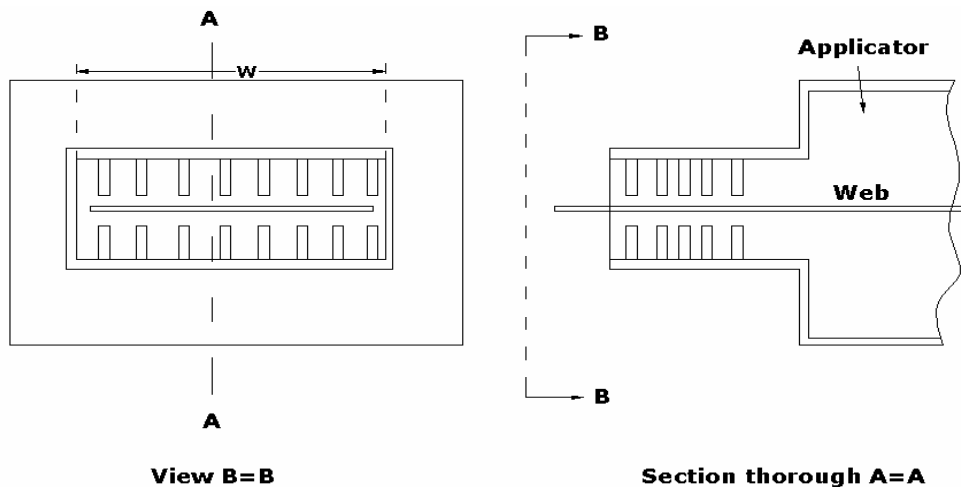
สำหรับข้อดีของโช้คชนิดครุเกตต์ ก็คือ มันออกแบบเพื่อใช้งานได้สำหรับเฉพาะคลื่นโหมดหนึ่งในท่อนำคลื่นเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการลดทอนคลื่นที่กระจายในโหมดอื่นๆ อาจจะต้องทำการ

ดัดแปลงตัวโวลต์ให้เป็นลักษณะสองชั้น (Doubly Corrugated Chokes) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 10.22 แต่จะมีการตัดเจาะเป็นช่วงๆ ในทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ทำให้เกิดการก่อดั้วเป็นบล็อกเล็กๆที่บริเวณแถบด้านกว้างของท่อนำคลื่นทางออก ดังแสดงในรูปที่ 10.23



รูปที่ 10.23 โครงสร้างโวลต์ชนิดครุเกตต์ที่เป็นสองชั้น (Doubly Corrugated Chokes)

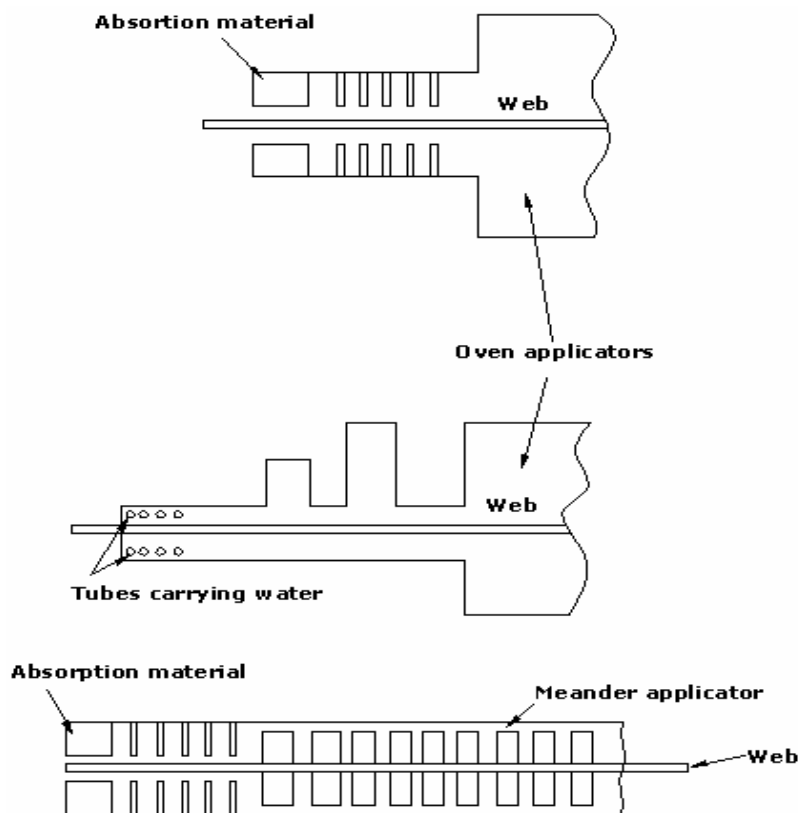
สำหรับกรณีที่ระบบต้องทำงานกับสภาวะที่ตรงช่องทางป้อนมีระยะช่องว่าง (Gap) มากกว่า  $0.2 \lambda_g$  เพื่อให้ระบบสามารถใช้ได้กับโหลดที่มีความหนาหลายๆ ได้ การใช้โวลต์ชนิดครุเกตต์ที่เป็นสองชั้นสองข้าง (Two Sided Doubly Corrugated Chokes) ดังแสดงในรูปที่ 24 จะมีประสิทธิภาพกว่า



รูปที่ 10.24 โครงสร้างโวลต์ชนิดครุเกตต์ที่เป็นสองชั้นสองข้าง (Two Sided Doubly Corrugated Chokes)

### ใช้เทคนิคไฮบริด

ระบบใช้คในหัวข้อที่แล้วเป็นชนิดรีแอกติฟ แต่ที่จะกล่าวต่อไปนี้เราเรียกว่าใช้เทคนิคไฮบริดซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่เป็นลักษณะรีแอกติฟและรีซีพทิฟประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้เทคนิคนี้ออกแบบมาเพื่อให้แน่ใจว่าคลื่นที่แผ่ออกมาสามารถสะท้อนกลับไปยังแอฟพลีเคเตอร์ โดยที่ส่วนของคลื่นนี้จะถูกดูดซับโดยวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการอีกครั้ง ในขณะที่คลื่นส่วนที่เหลือจะสลายไปในผนังของท่อนำคลื่นและแอฟพลีเคเตอร์ อย่างไรก็ตามความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาโดยไม่ได้ถูกกำจัดโดยใช้ชนิดรีแอกติฟนี้จะสามารถกำจัดหรือลดทอนโดยใช้วัสดุอื่นที่สามารถดูดซับคลื่นที่ว่ามีได้ โดยทำการติดตั้งวัสดุดังกล่าวไว้ที่ตอนปลายของใช้ชนิดรีแอกติฟ โครงสร้างไดอะแกรมของใช้ชนิดไฮบริดนี้แสดงในรูปที่ 10.25 ตัวอย่างวัสดุที่นำมาทำเป็นรีซีพทิฟใช้คเป็นจำพวกคาร์บอนเอกโคซอร์บ (Eccosorb) และน้ำเป็นต้น



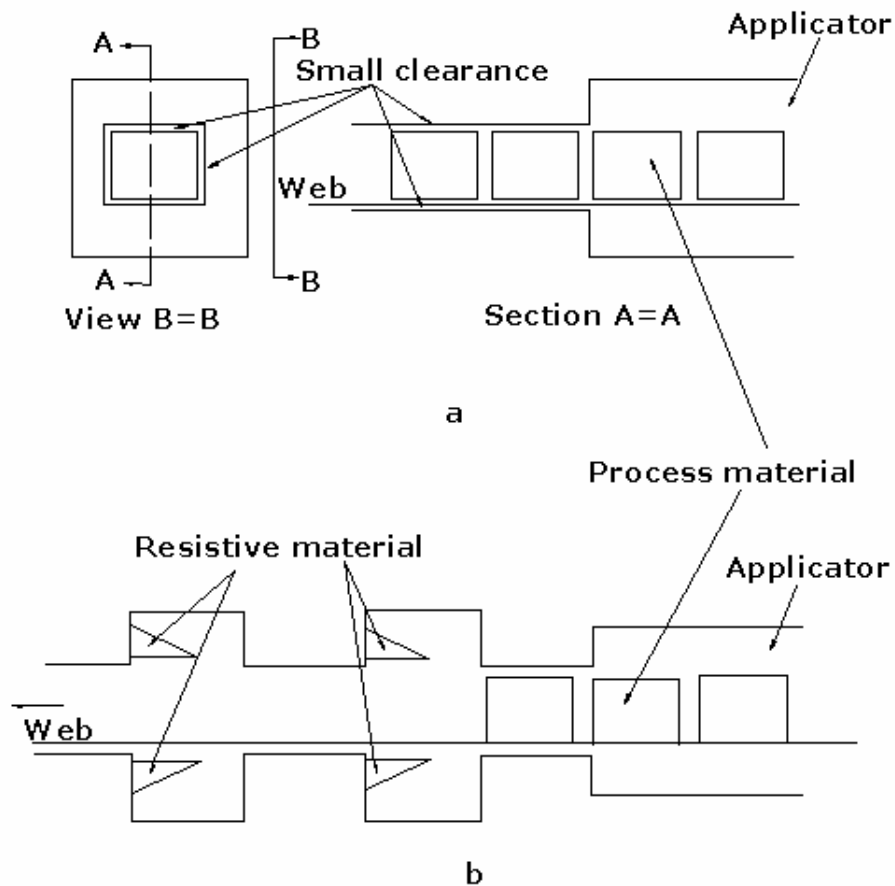
รูปที่ 19.25 โครงสร้างของใช้ชนิดไฮบริด (Hybrid Choke) ที่มีองค์ประกอบของรีแอกติฟและรีซีพทิฟ

### โใช้สำหรับระบบที่มีช่วงเปิดขนาดใหญ่ (Choking of Large Apertures)

บ่อยครั้งที่ระบบไมโครเวฟแบบต่อเนื่องที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่มีวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ซึ่งมีมิติของภาคตัดขวางของทั้งสองทิศทาง (ด้านกว้างและด้านยาว) มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบครึ่งความยาวคลื่น (Half Wavelength) ในกรณีคลื่นสามารถรั่วไหลออกมาได้ที่สภาวะการทำงานใดๆ นั้นหมายความว่าช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ว่านี้ ไม่สามารถที่จะปิดกั้นคลื่นที่จะออกมาได้ โดยอาศัยเพียงหลักการ โใช้แบบรีแอคทีฟเพียงอย่างเดียว

หลักการออกแบบการทำงานของระบบ โใช้สำหรับช่องเปิดใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ วิธีการแรกใช้หลักการของโใช้ชนิดรีซิสแตนซ์ โดยไดอะแกรมของวิธีการนี้ดังแสดงในรูปที่ 10.26(a) วิธีการนี้ต้องออกแบบให้วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการชนิดที่มีค่า  $\tan \delta_{eff}$  สูงๆ ผ่านเข้ามาภายในท่อนำคลื่น โดยที่ช่องว่างระหว่างผนังของท่อนำคลื่นกับผิววัสดุให้น้อยที่สุด นั้นหมายถึงว่าคลื่นเกือบทั้งหมดจะต้องถูกดูดซับภายในวัสดุเองที่ทุกสภาวะการทำงาน หลักการนี้จึงต้องเหมาะสมสำหรับวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่มีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานสูงเท่านั้น ( $\tan \delta_{eff}$  สูงๆ) เพราะเป็นการป้องกันคลื่นรั่วออกมา โใช้ความสามารถในการดูดซับคลื่นของตัววัสดุเองเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามหลักการนี้อาจจะเป็นปัญหาได้หากไม่มีการแก้ไขปรับปรุงเพิ่มเติม กล่าวคือขณะที่ไม่มีโหลดหรือไม่มีวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ จะมีการรั่วของคลื่นออกมาในระดับที่เป็นอันตรายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบให้มีอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมกับวิธีที่นิยมใช้กันก็คือ การติดตั้งเซ็นเซอร์ เพื่อทำการตัดการทำงานของตัวแมกนีตรอนภายในระบบ โดยเซ็นเซอร์นี้อาจจะเป็นตัววัดคลื่นที่รั่ว (Microwave Leakage Detectors) กล่าวคือ หากคลื่นที่บริเวณทางเข้าออกของวัสดุมีปริมาณความเข้มที่เกินพิกัด ตัววัดคลื่นนี้จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมเพื่อตัดการทำงานของแมกนีตรอนทันที นี้ก็คือว่า เป็นหลักการทำงานของพื้นฐานของวิธีการแรก

วิธีการที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 10.26(b) อาศัยหลักการทำงานคือ ทำการติดตั้งวัสดุที่ดูดซับคลื่น (Resistive Material) หรือระบบโหลดไฟฟ้า เข้าไปที่ช่องว่างของโใช้ในแต่ละส่วน คลื่นที่รั่วออกมาจากท่อนำคลื่นจะกระจายไปยังช่องว่างเพื่อลดทอนกำลังของคลื่น โดยการลดทอนกำลังนี้จะต่อเนื่องไปเรื่อยๆตามลำดับของช่องว่างในส่วนที่อยู่ถัดๆไป โดยประมาณการว่ากำลังคลื่นที่ลดทอนเท่ากับ 10 dB ในแต่ละส่วนระบบที่ออกแบบโดยวิธีนี้ก็ไม่สามารถป้องกันคลื่นรั่วได้ถ้ากรณีระบบทำงานขณะนั้นไม่มี ดังนั้นจึงต้องมีระบบตรวจวัดปริมาณคลื่นที่รั่วไหลออกมาเพื่อทำการตัดระบบการทำงานของแมกนีตรอนดังที่ได้อธิบายในหลักการก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ข้อเสียของหลักการนี้ก็คือ จะต้องมีการสูญเสียกำลังงานของส่วนภายในตัวดูดซับวัสดุ



รูปที่ 19.26 โครงสร้างของใช้สำหรับระบบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (Choking of Large Apertures)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Phadungsak Ratanadecho "Microwave Heating Using a Rectangular Wave Guide", Ph.D Dissertation, Nagaoka University of Technology, Japan, (2002)
- [2] A.C. Metaxas. Foundations of electroheat: A Unified Approach. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK,(1996).
- [3] A.C. Mataxas and R.J. Meredith. Industrial Microwave Heating. Number 4 in IEE Power Engineering Series. Peter Peregrinus Ltd., London, (1983).
- [4] Helmar Schubert and Marc Regier , The Microwave Processing of Food, Woodhead Publishing Limited, U.K, (2005).

- [5] Rattanadecho, P , Suwannapum, S., Watanasungsuit, A. and Duangduen, A., “Drying of Dielectric Materials Using Microwave Continuous Belt Furnace.”, *ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering*, Volume 129 (1), pp. 157-163, (2007).
- [6] Rattanadecho, P., Chatveera, B., Atong, D., Makul, N., and Suwannapum, N. “Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by Using A Continuous Microwave Belt Drier”, *Material Science and Engineering A*, Vol. 472, pp. 299-307, (2008).
- [7] Feng, H., Tang, J., Cavalieri, R.P. and Plumb, O.A. Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed, *AIChE Journal* 47 (7), pp. 1499-1512, (2001).
- [8] Microdenshi
- [9] Püschener Philips, *Heating with Microwaves*, Technical Library, Springer, (1964)
- [10] Ashim K.Datta and Ramaswamy C. Anantheswaran. *Electromagnetics: Fundamental Aspects and Numerical Modeling. Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York. Basel, pp. 1-31, (2001).
- [11] Tse V. Chow Ting Chan and Howard C. Reader, “Understanding Microwave Heating Cavities,” Artech house. Boston, London, (2000).