

## บทที่ 2

### ทรวอเอกสาร

#### 2.1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกสามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับ การปลดปล่อย และการสะท้อนพลังงานจากผลของคลื่นความถี่วิทยุทำให้เกิดเป็นความร้อนในวัตถุต่างๆ แสดงเป็นตัวเลขที่มีความหมายเกี่ยวข้องกับค่าต่างๆ อยู่ 3 ค่า คือ

**2.1.1 Dielectric Constant ( $\epsilon'$ )** คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของสารประกอบที่กักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้เมื่อนำสารประกอบนั้นเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ วัตถุใดที่มีค่านี้สูงแสดงว่ามีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้สูง ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นของวัตถุนั้นๆ และความถี่ในสนามไฟฟ้า ในกระบวนการลดความชื้นเมล็ดโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นความถี่วิทยุ ระดับพลังงานที่เกิดจากการให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแก่เมล็ดจะมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับปริมาณความชื้นในเมล็ด โดยที่ระดับความชื้นในเมล็ดที่สูงส่ง ผลให้เมล็ดมีการดูดซับพลังงานและเอื้อต่อการเกิดประสิทธิภาพในการถ่ายเทและนำพาความร้อนในเมล็ดเกิดได้สูง (Orsat, 1999; Christoph *et al.*, 2000; Oberndorfer *et al.*, 2000 และ Wang *et al.*, 2003)

**2.1.2 Loss Factor ( $\epsilon''$ )** คือ ค่าของพลังงานที่สูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนหรือที่แพร่กระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนในวัตถุ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้า dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ) สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนขึ้นสูง และเกิดได้รวดเร็ว ดังนั้นวัตถุที่มีความหนาและขนาดใหญ่มากๆ การดูดซับคลื่นจะเกิดขึ้นได้เฉพาะผิวหน้า ความร้อนจะเข้าสู่วัตถุได้ทั่วถึงก็จะเป็นไปด้วยการนำหรือการพาซึ่งจะต้องใช้เวลานานกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็กและบางกว่า

**2.1.3 Loss tangent ( $\tan \delta$ )** หมายถึง ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสารนั้นซึ่งคิดออกมาใน รูปของมุมที่ต่างไปจาก 90 องศา ในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า ค่านี้จะมีส่วนสัมพันธ์กับค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  คือ

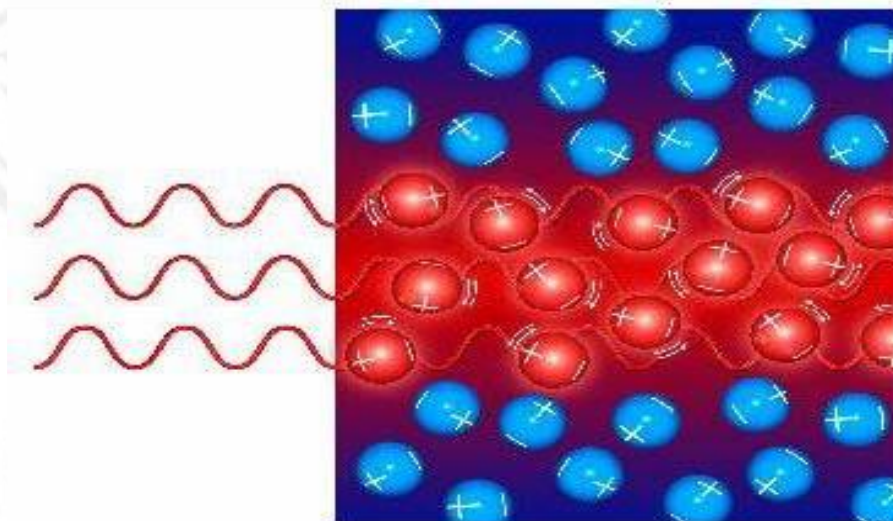
$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$$

จากสมการ loss tangent แสดงถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่านำความร้อนได้ดีขึ้น dielectric constant และ loss tangent สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัตถุได้ ความ

ขาคล้นภายในวัตถุจะลดลงหาควตุมิ dielectric loss factor และความถี่เพิ่มขึ้น หาก dielectric constant และ loss tangent ของวัตถุมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุและปริมาณความร้อนเกิดมากขึ้น (Singh and Heldman, 2001) ในการให้ความร้อนแก่วัตถุจะทำให้คลื่นสูญเสียพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไป มักใช้คำว่า loss factor หรือ loss tangent เป็นตัวบ่งบอกการสูญเสียพลังงานคลื่นในการเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุหรือหมายถึงคลื่นถูกดูดซับไว้ทั้งหมด dielectric constant เป็นค่าที่วัดความสามารถในการสะสมพลังงานสนามไฟฟ้า และ dielectric loss factor เป็นค่าที่วัดความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่สะสมไว้ให้เป็นความร้อน (Liao *et al.*, 2001)

## 2.2 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating)

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านความถี่คลื่นวิทยุ (Radio frequency, RF: 13.56 MHz, 27.12 MHz และ 40.68 MHz) หรือไมโครเวฟ (Microwave, MW: 433 MHz, 915 MHz, 2,450 MHz, 5,800 MHz และ 24,125 MHz) (Piyasena *et al.*, 2003) กำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (dipolar molecules) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามา ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุ หรือการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุ (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

วัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกได้จะต้องเป็นวัสดุ ที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ จะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือประกอบไปด้วยน้ำซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้วเช่นกันเป็นองค์ประกอบ วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอน หรือแก้ว จะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนเวียนสลับระหว่างของทั้งสองขั้ว electrodes ซึ่งมีผลทำให้วัตถุเกิดความร้อนขึ้น มีหลักการในการสร้างความร้อนโดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับความถี่คลื่นวิทยุ ถูกปล่อยผ่านไปยังวัตถุที่มีคุณสมบัติ dielectric โดยเครื่องสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 27.12 MHz หรือเกิดการเปลี่ยนแปลง 27.12 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้วัตถุที่มีพันธะโมเลกุล 2 ขั้ว เช่น โมเลกุลของน้ำ เมื่อโมเลกุลขวางทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสั่นสะเทือนโดยขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการสะสมพลังงานเป็นความร้อนจากการเสียดทานของโมเลกุล (Ryynänen, 1995; Nijhuis *et al.*, 1998) โดยทำให้ความร้อนเกิดขึ้นภายในวัสดุ (inside out) และมีการกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงภายในเนื้อวัสดุพร้อม ๆ กัน โดยมีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานมีประสิทธิภาพสูงและลดระยะเวลาการให้ความร้อน (Birla *et al.*, 2004) ส่งผลให้ช่วยลดการใช้พลังงาน (Wang *et al.*, 2003) ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยใช้อากาศซึ่งจะเกิดความร้อนจากบริเวณผิววัสดุก่อนแล้วจึงนำความร้อนสู่ภายใน (outside in)

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ประเภท คือ การใช้คลื่นไมโครเวฟและการใช้คลื่นความถี่วิทยุ เป็นวิธีการใหม่ที่ทำให้เกิดความร้อนสำหรับการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผลเกษตร (Wang *et al.*, 2003) โดยสร้างความร้อนอย่างรวดเร็วภายในของผลิตผลเกษตร โดยสามารถทำให้เกิดอุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้นกว่าวิธีการดั้งเดิม และสามารถออกแบบร่วมกับกระบวนการที่ไหลต่อเนื่องในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (Tang *et al.*, 2000; Nijhuis *et al.*, 1998) เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิมเกี่ยวกับ airspaces หรือ bulkiness ของผลิตผล ในการปฏิบัติโดยใช้อากาศทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของผลิตผล ซึ่งคุณสมบัติ dielectric ทำให้คลื่นความถี่สามารถทำให้เกิดความร้อนรวดเร็วกว่าการใช้อากาศ ส่งผลให้ลดระยะเวลาในกระบวนการให้ความร้อนและช่วยประหยัดพลังงาน (Wang *et al.*, 2003; Birla *et al.*, 2004)

## 2.3 ปัจจัยที่ผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties)

Nelson (1991) ได้อธิบายปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของวัสดุของอาหารไว้ดังนี้

### 2.3.1 ความถี่ (frequency)

ปริมาณความถี่ที่ปล่อยมาสู่สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่อการดูดซับพลังงานของวัตถุ การเพิ่มขึ้นของความถี่ของคลื่นในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีผลต่อมีผลทำให้ค่า dielectric constant ลดลง และค่า dielectric loss factor นั้นอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Piyasena *et al.*, 2003) ในการใช้คุณสมบัติ dielectric ในทางเกษตร มีการศึกษาและใช้ประโยชน์อีกมากมาย เช่น Nelson (1991) พบว่า dielectric loss factor ในแมลงมีค่ามากกว่า walnut สอดคล้องกับ Ikediala *et al.* (2000) พบว่า codling moth larva อาจจะดูดซับพลังงานได้มากกว่า ทำให้เกิดความร้อนในแมลงได้มากกว่า walnut สอดคล้องกับรายงานของ Wang and Tang (2001) ที่พบความเป็นไปได้เกี่ยวกับการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมแมลง โดยแมลงอาจจะมียอัตราการเกิดความร้อนได้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์ที่ปนเปื้อน แมลงจะเกิดความร้อนวิกฤต ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดแค่ความร้อนในระดับต่ำเท่านั้น

### 2.3.2 ความชื้น (Moisture)

น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โครงสร้างของน้ำภายในวัตถุจะมีพันธะ ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และการให้ความร้อนในแบบอื่นๆด้วย (Harris and Taras, 1984) น้ำยังมีผลต่อความหนาแน่นของวัตถุและอุณหภูมิ เมื่อความหนาแน่นของวัตถุเปลี่ยนก็จะทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย (Trabelsi and Nelson, 2003) ปริมาณน้ำและองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร เช่น เกลือ เป็นโมเลกุลที่มีขั้วจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Houben *et al.*, 1991) นอกจากปริมาณน้ำจะมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่า dielectric constant ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า dielectric loss factor นั้น พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า dielectric loss factor เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งความสัมพันธ์ของทั้งสองเป็นแบบเส้นตรง (linearly) โดยจะส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของวัตถุนั้น (Bengtsson and Risman, 1971) ระดับความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกมีประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องวัดความชื้น (Nelson *et al.*, 1992)

ในกระบวนการลดความชื้นเมล็ดโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นความถี่วิทยุ ระดับพลังงานที่เกิดจากการให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแก่เมล็ดจะมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับปริมาณความชื้นในเมล็ด โดยที่ระดับความชื้นในเมล็ดที่สูงส่ง ผลให้เมล็ดมีการดูดซับพลังงานและเอื้อต่อการเกิดประสิทธิภาพในการถ่ายเทและนำพาความร้อนในเมล็ดเกิดได้สูง (Orsat, 1999; Christoph *et al.*, 2000; Oberndorfer *et al.*, 2000 และ Wang *et al.*, 2003) จากการศึกษาของกาญจนา สิริกุลรัตน์ และคณะ (2552) ได้ทำการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของข้าวเปลือกเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่เก็บเกี่ยวในช่วงอายุต่างกัน ตั้งแต่ 1 สัปดาห์ หลังจากต้นข้าวตั้งท้องจนกระทั่งข้าวแก่จัด ถูกนำไปวัดสมบัติไดอิเล็กทริก ในช่วง

คลื่น 100Hz - 1MHz พบว่า dielectric constant ของรวงข้าวที่เก็บเกี่ยวทุกช่วงอายุและเมล็ดข้าวเปลือก มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในรวงข้าวและเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อตัวอย่างรวงข้าวมีความชื้นลดลง dielectric constant ของรวงข้าวมีค่าลดลงในทุกช่วงอายุ

### 2.3.3 อุณหภูมิ (temperature)

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่า dielectric loss factor โดยพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่า dielectric loss factor สูงขึ้นตาม แสดงว่ามีการทะลุผ่านพลังงานในวัตถุนั้น ซึ่งค่า dielectric loss factor ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงความร้อนในวัสดุได้แต่ในบางกรณีค่า dielectric properties ไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย (Nelson and Kraszewski, 1990) และในทางเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่า dielectric constant เพิ่มขึ้นตาม (Nelson and Kraszewski, 1990) โดย Sharma and Prasad (2002) ทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของกระเทียม ที่ความถี่ 2450 MHz พบว่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor มีค่าสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความชื้น และอุณหภูมิที่ใช้ สอดคล้องกับ Lawrence *et al.* (1992) ทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของถั่วพีแคน ที่มีความชื้นตั้งแต่ 3.2-8.9 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดที่ช่วงความถี่ 0.100-100 MHz พบว่า ค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและความชื้นของ pecans และมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มความถี่ Guo *et al.* (2008) ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของแป้ง chickpea ที่มีความชื้นอยู่ระหว่าง 7.9-20.9 เปอร์เซ็นต์ และมีอุณหภูมิ 20-90 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ช่วง 10-1800 MHz ในการวัด พบว่า ค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor ลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ในทุกๆระดับอุณหภูมิและความชื้น และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของ dielectric constant และค่า dielectric loss factor เมื่อแบ่งตามระดับความหนาแน่นของแป้ง chickpea

### 2.3.4 องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition)

องค์ประกอบทางเคมี มีอิทธิพลต่อค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor โดยพบว่าเมื่อทำการเคี้ยวเกลือลงใน gravy มีผลทำให้ค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าความเข้มข้นของการนำไฟฟ้าส่งผลต่อค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor อาจจะมีค่าลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเกลือทำให้เกิดความอึดตัวใน ions ที่อยู่ร่วมกันของ dielectric (Piyasena and Dussault, 1999) สอดคล้องกับ วุฒิไกร จำรัสแนว และคณะ (2551) ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการวัดระดับความเข้มข้นของน้ำยางพาราโดยทำการทดลองวัดค่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20MHz-1.5GHz พบว่า dielectric loss factor เป็นค่าที่มีประโยชน์ในการวัดระดับความเข้มข้นของเนื้อยางในน้ำยางพารา เนื่องจาก มีค่าความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นแบบลอกกาโลทิมที่ช่วงความถี่ 40-140 MHz

### 2.3.5 ปริมาตร และความหนาแน่น (Volume and density)

ปริมาตร และความหนาแน่น เป็นปัจจัยสำคัญในการถ่ายเทพลังงาน โดยในการให้คลื่นความถี่วิทยุเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างเมล็ดกับ electrode plate ทั้งสอง และการสัมผัสระหว่างเมล็ดแต่ละเมล็ด ซึ่งหากเมล็ดมีการสัมผัสกันมาก การถ่ายเทของพลังงานดี การเกิดความร้อนก็จะเป็นไปได้ดีเช่นกัน ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทุกเมล็ด แต่ถ้าเมล็ดมีการสัมผัสกันน้อย การไหลของพลังงานเป็นไปได้อย่างไม่สะดวก พลังงานจะมีทางไหลผ่านน้อยด้วยเช่นกัน หากให้คลื่นความถี่วิทยุไปในเมล็ด พลังงานจะไหลรวมไปยังจุดสัมผัสที่น้อยอาจทำให้เกิดการไหม้ตามจุดสัมผัสได้ หรือพลังงานไม่สามารถไหลผ่านจนไม่เกิดความร้อนขึ้นมาได้ Trabelsi and Nelson (2003) รายงานว่า ทั้งค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor ของเมล็ดข้าวสาลี ข้าวโพด และถั่วเหลือง ต่างก็มีค่าสูงขึ้นตามอนุภาคเมล็ดที่มีความหนาแน่นของกองเพิ่มขึ้น โดยกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง (linearly) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของน้ำกับสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ค่า dielectric constant และค่า dielectric loss factor ยังขึ้นกับลักษณะผิวเมล็ด และปริมาณความชื้นที่จำเพาะของเมล็ดแต่ละชนิดอีกด้วย เมล็ดที่แห้งจะมีอิทธิพลต่อ dielectric properties เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 2.3.6 ปริมาณช่องว่างระหว่างเมล็ด (Porosity)

เกิดจากอิทธิพลของความชื้นและลักษณะการบรรจุที่มีสำคัญต่อการให้คลื่นความถี่วิทยุ โดยเฉพาะหลังจากการให้คลื่นความถี่วิทยุ ช่องว่างระหว่างเมล็ดจะเป็นที่อยู่ของไอน้ำที่ออกมาจากเมล็ด ซึ่งเมื่อเมล็ดมีการคายพลังงานจนหมดจะมีการกลับเข้าสู่จุดสมดุลความชื้น หากช่องว่างในเมล็ดเล็กเกินไป ความชื้นที่ออกมาจากเมล็ดจะไม่มีที่พอกที่จะอยู่รอบๆ เมล็ดได้ เมื่อเมล็ดเริ่มเย็นตัวลง จะมีการควบแน่นเข้าด้วยกันจนกลายเป็นหยดน้ำรอบๆ เมล็ด ทำให้เมล็ดมีความชื้นสูงบริเวณผิวจากการดูดเอาหยดน้ำเข้าไปได้ แต่ถ้าหากช่องว่างในเมล็ดใหญ่เกินไป เมื่อความชื้นในเมล็ดออกมาแล้วจะแทรกเข้าไปในอากาศที่มีอยู่มากพอรอบๆ เมล็ด เมื่อเมล็ดเย็นลง จะไม่สามารถดูดกลับความชื้นได้ ทำให้เมล็ดสูญเสียความชื้นไป

### 2.4 การอบแห้งเมล็ด

เมล็ดข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจากแปลงปลูกมักประสบปัญหาในระดับความชื้นสูง คือประมาณ 15-20% หรือมากกว่านั้น โดยความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ด เนื่องจากมีอัตราการหายใจที่สูงและมีการใช้อาหารอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้เชื้อราและแมลงต่างๆ เจริญได้ดีอีกด้วย จึงจำเป็นต้องลดความชื้นของเมล็ดให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย น้ำหรือความชื้นในเมล็ดมีผลต่อกิจกรรมเมตาโบลิซึมของเมล็ด เมล็ดที่มีความชื้นต่ำจะมีอัตราการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นช้ากว่าเมล็ดที่มีความสูง โดยธรรมชาติของเมล็ดมีคุณสมบัติที่เรียกว่า

Hygroscopic คือสามารถแลกเปลี่ยนความชื้นกับบรรยากาศรอบๆเมล็ดจนกระทั่งสมดุลกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์รอบๆบรรยากาศทำให้เกิดภาวะสมดุลของความชื้น (Equilibrium moisture content) การเก็บรักษามะลัดที่มีความชื้นสูงหรือในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศสูงจะมีผลทำให้เมล็ดมีการเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว (Christensen and Kaufman, 1969; วัลลภ สันติประภา, 2531) การลดความชื้น คือ การระเหยน้ำที่ผิวเมล็ดกับการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากบริเวณใจกลางเมล็ดเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่ (diffusion) ในการให้ความร้อนแก่เมล็ดเป็นการเร่งให้มีอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวเมล็ดให้เร็วขึ้น โดยมีการถ่ายความร้อนจากอากาศไปสู่พื้นที่กำลังระเหยเป็นไอ แต่การระเหยน้ำจากเมล็ดซึ่งมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลภายในเมล็ด การระเหยต้องใช้พลังงานความร้อนที่มากขึ้น

การอบแห้ง เป็นการแยกน้ำออกจากวัตถุชื้น (moist material) โดยการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำโดยอาศัยความร้อน สำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรมักเป็นการอบแห้งแบบการพาความร้อน (convective drying) โดยจะเป่าอากาศร้อนผ่านผลิตผลที่เป็นวัตถุชื้น ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัตถุทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำในวัตถุจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยออกมา การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัตถุขึ้นออกมาที่ผิว เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและขึ้นกับโครงสร้างของวัตถุนั้น ตัวอย่างกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ การแพร่ (diffusion) การไหลภายในท่อเล็กในโครงสร้างของวัตถุ (capillary flow) การไหลจากความดันออสโมติก (osmotic pressure) และการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายกระบวนการเหล่านี้มีความซับซ้อนมากในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร การลดลงของความชื้นจะมีลักษณะแสดงในรูปของอัตราการแห้ง (drying rate)

โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตรจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง และช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) ซึ่งต่อจากช่วงแรก ในช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของผลิตผล ลักษณะการระเหยจะคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ เราสามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_{sur})$$

เมื่อ  $dM/dt$  = อัตราการแห้ง (kg/s)

$h_c$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลิตผล

(thermal conductance of air film) (W/m<sup>2</sup>-K)

|           |                                            |
|-----------|--------------------------------------------|
| $A$       | = พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ (m <sup>2</sup> ) |
| $L$       | = ความร้อนแฝงของน้ำในผลิตภัณฑ์ (J/kg)      |
| $T_a$     | = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)    |
| $T_{sur}$ | = อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ (K)           |

สำหรับช่วงที่อัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอัตราการแห้งในรูปสมการได้ดังนี้

$$dM/dt = -k(M-M_e)$$

|       |       |                                                                    |
|-------|-------|--------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $M_e$ | = ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของผลิตภัณฑ์ (% db) |
|       | $M$   | = ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (% db)                                      |
|       | $k$   | = ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant) (s <sup>-1</sup> )           |

#### อัตราการอบแห้ง

เมื่อวัสดุเปียกได้สัมผัสกับอากาศร้อน อุณหภูมิของวัสดุเปียกนั้นจะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) โดยที่อุณหภูมิของอนุภาค และอัตราการอบแห้งอาจจะเพิ่มหรือลดลงก็ได้ที่สภาวะคงตัว อุณหภูมิที่ผิวของอนุภาคของแข็ง คือ wet bulb temperature ของการอบแห้ง ส่วนอุณหภูมิภายในของการอบแห้งของอนุภาคของแข็งจะมีค่าเท่ากับ wet bulb temperature แต่ว่าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวล และความร้อนช้ากว่าจึงมีผลทำให้การเบี่ยงเบนในบางครั้ง นั่นคือ ในสภาวะสมดุลนั้นอัตราการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิจะเข้าสู่ wet bulb temp ซึ่งช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดสมดุลหนึ่งเรียกว่า critical moisture content หลังจากช่วงนี้ไป อุณหภูมิที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วงลดลงนี้จะใช้เวลานานกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ถึงแม้ว่าความชื้นจะถูกดึงออกไปช้า กว่าก็ตาม อัตราการอบแห้งจะเข้าใกล้ศูนย์ ที่สภาวะสมดุลหนึ่งมีความชื้นในของแข็งค่าหนึ่งนั้น คือ ค่า moisture content ที่ต่ำสุด ( $X_E$ ) ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น เมื่ออุณหภูมิภายในอ้อมตัวของอนุภาค ซึ่งถูกทำให้แห้ง มีอุณหภูมิถึง wet bulb temp แล้วอัตราการอบแห้งยังคงดำเนินต่อไปอย่างคงที่ จนกระทั่งถึง critical moisture content แล้วจากนั้นก็เปลี่ยนจากผิวเปียก ไปเป็นผิวแห้ง (solid) หลังจากจุดที่มีการนำเอาความชื้นออกจากผิวของอนุภาคบริเวณผิวน้ำก่อนแล้ว อัตราการอบแห้งทั้งหมด (overall drying rate) จะถูกลดลงเนื่องจากความร้อน และมวลจะต้องแพร่ผ่านที่บริเวณชั้นนอกของอนุภาค และนอกจากนั้น การอบแห้งยังขึ้นอยู่กับความง่ายของการนำเอาความชื้นออก

จากภายในอนุภาคที่ทับกัน ดังนั้น การอบแห้ง นี้จึงถูกควบคุมโดยขึ้นกับผลของค่า hydrostatic head และ surface tension ภายในช่องว่างของอนุภาคแต่ละประเภท

การอบแห้งผลิตผลเกษตรได้มีรายงานน้อยมากทั้งนี้อาจเนื่องมาจากก่อนหน้านี้พลังงานยังมีราคาไม่แพง เกษตรกรที่มีผลผลิตไม่มากใช้วิธีตากด้วยแสงแดดและไม่มี ความจำเป็นต้องใช้หาหรือพัฒนาวิธีใหม่ ขณะนี้การแข่งขันเพื่อให้ได้ผลิตผลคุณภาพดี สะอาด ใช้เทคโนโลยีที่ไม่มีสารพิษตกค้าง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้มีบทบาทที่ทำให้ผู้บริโภคและผู้ประกอบการต้องสนใจในการแข่งขันที่จะเกิดขึ้นในอนาคต คำถามที่มักจะเกิดขึ้นคือ คุณภาพหลังผ่านกรรมวิธีทำแห้งแบบใหม่จะดีกว่าเก่าหรือไม่ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการอบด้วยลมร้อนเพื่อถึงความชื้นออกจากวัตถุดิบ ในระยะที่ทำให้แห้งยาก คือ ตอนท้ายของการอบแห้งและใช้เวลานาน อาจเป็นทางเลือกใหม่โดยมีเป้าหมายของการใช้เวลาน้อยลง ค่าใช้จ่ายต่ำและยังคงคุณภาพของวัตถุดิบไว้ตามวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ จึงเป็นอนาคตของการประหยัดพลังงานและเป็นความน่าสนใจของผู้ผลิตและผู้ประกอบการธุรกิจหลังการเก็บเกี่ยว

#### 2.4.1 การลดความชื้นแบบธรรมชาติ (Natural drying)

การลดความชื้นแบบธรรมชาติ คือ การลดความชื้นเมล็ดโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และลมธรรมชาติ ซึ่งมีข้อเสียหลายประการ เช่น อุณหภูมิอาจสูงเกินไป จะทำให้เปลือกเมล็ดร้าวหรือแตกได้ อัตราการแห้งของเมล็ดไม่คงที่และไม่สามารถควบคุมได้ นอกจากนี้ ยังต้องใช้แรงงานในการตากและเก็บเมล็ดในแต่ละวันจำนวนมาก ถึงแม้ว่าการลดความชื้นแบบนี้จะมีการออกแบบเครื่องอบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้งานได้ดีกว่าการตากแดดธรรมชาติ แต่ในทางการค้าเมล็ดก็ยังไม่เป็นที่นิยม

#### 2.4.2 การลดความชื้นด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air drying)

การลดความชื้นโดยอาศัยเครื่องกำเนิดความร้อน (Burner หรือ Heater) เพื่อทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำลง จากนั้นเป่าลมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเข้าไปในกองเมล็ดเพื่อให้ความชื้นภายในเมล็ดระเหยออกไปกับลมที่ออกจากกองเมล็ด สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2540) กล่าวว่า การอบแห้งวัสดุต่างๆ ไปนั้น มักใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ ในขณะเดียวกัน ไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ด้วย เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป การอบแห้งด้วยเครื่องอบนั้น เป็นวิธีการช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกสู่เมล็ดโดยการระเหยไปในอากาศ อัตราการแพร่ของน้ำขึ้นอยู่กับขนาดและองค์ประกอบของเมล็ด ผิวของเมล็ด อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาที่ได้รับความร้อน อัตราการระเหยขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิของการไหลของอากาศในแต่ละรอบ

ข้อได้เปรียบ คือ สามารถควบคุมอัตราการแห้งได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติและลดความชื้นเมล็ดได้

ครั้งละจำนวนมาก สามารถใช้ได้ทุกสภาพอากาศ อีกทั้งยังประหยัดแรงงาน ทำให้ในการผลิตเมล็ดพันธุ์เป็นการคำนึงนิยมนิธีการลดความชื้นด้วยเครื่องอบ (วันชัย จันทรประเสริฐ, 2542) และช่วยให้สามารถเก็บเกี่ยวได้เร็วขึ้นโดยไม่ต้องรอให้เมล็ดแห้งก่อน เพื่อป้องกันการสูญเสียเมล็ดภายในแปลง เนื่องจากการร่วงหล่นและสามารถเตรียมพื้นที่เพื่อเพาะปลูกพืชชนิดต่อไปได้เร็วขึ้น ช่วยรักษาคุณภาพเบื้องต้นโดยการเก็บเกี่ยวเมล็ดหลังการสุกแก่ทางสรีรวิทยาจะทำให้ได้เมล็ดที่มีคุณภาพดี เพราะไม่ต้องปล่อยเมล็ดให้มีการเสื่อมคุณภาพในแปลงและสามารถลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ทันที และช่วยเก็บรักษาเมล็ด เพราะสามารถชะลอการขายได้หากราคาไม่ดี รวมทั้งเป็นการขายเมล็ดที่มีคุณภาพดีอีกด้วย

แต่การอบลดความชื้นเมล็ดข้าวด้วยเครื่องอบนั้นยังมีข้อจำกัด เช่น ระหว่างการลดความชื้นในการอบนั้น เมล็ดอาจได้รับความเสียหายจากความร้อนหรือความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเกินไป สาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเมล็ดแต่ละเมล็ดอาจเกิดเนื่องจากการคายความชื้นไม่สัมพันธ์กันระหว่างการระเหยน้ำที่ผิวเมล็ดกับการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณใจกลางเมล็ดออกมาที่ผิวเมล็ด หากการระเหยของน้ำที่ผิวเมล็ดเกิดขึ้นเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเมล็ดมากยิ่งขึ้นเท่าไร ก็จะทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นเท่านั้น ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า rapid drying ผลที่ตามมา คือ เมล็ดข้าวเมล็ดแตก เอนโดสเปิร์มข้าว เยื่อหุ้มเมล็ดแตกปริ เมล็ดเหล่านี้อาจสูญเสียความมีชีวิต หรือออกเป็นต้นกล้าที่ผิดปกติได้การอบแห้งเร็วเกินไป (over drying) (วันชัย จันทรประเสริฐ, 2542; สุชาติ เจริญศิลป์, 2551) มีค่าใช้จ่ายสูง และต้องมีความรู้ในขั้นตอนการอบ โดยเฉพาะในเรื่องอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ต้องเหมาะสม ซึ่งหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้ความมีชีวิตของเมล็ดลดลงอย่างรวดเร็ว (Robert, 1973; Copeland, 1976) จึงใช้อุณหภูมิต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อคุณภาพเมล็ด แต่ต้องใช้เวลานาน ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย มาก หากในระยะเวลาอันยาวนานเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อคุณภาพเมล็ดได้

#### 2.4.2.1 กระบวนการกำเนิดความร้อนด้วยลมร้อน

การให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลัก โดยความร้อนที่เกิดขึ้นถ่ายเทไปที่ผิวของวัสดุก่อนจากนั้นจึงจะเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าสู่ภายใน หลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวนอก และผิวภายในวัสดุ ด้วยการให้ความร้อนจากผิวด้านนอกถ่ายเทเข้าสู่เนื้อชิ้นใน ความชื้นจะถูกไล่ออกมาที่ผิวทำให้ที่ผิววัสดุมีอุณหภูมิสูงและแห้ง ในขณะที่ภายในยังคงมีความชื้นเหลืออยู่และมีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งผิวนอกที่แห้งจะเกิดการหดตัวทำให้ความชื้นถ่ายเทออกมาที่ผิววัสดุลดลงตามลำดับ และอาจส่งผลให้วัสดุเกิดรอยร้าว เนื่องมาจากอิทธิพลความดันก๊าซภายในวัสดุหรือการหดตัวของโครงสร้างวัสดุ นอกจากนั้นแล้วสีของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงง่ายและอาจเกิดรอยไหม้ได้

#### 2.4.2.2 การประยุกต์ใช้เครื่องอบลมร้อน

โดยทั่วไปแล้วจะใช้เครื่องอบลมร้อนในการอบแห้งวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรมเพื่อให้วัตถุดิบแห้ง ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการต่อไปมีข้อดี คือ สามารถทำการอบแห้งได้ในอัตราการผลิตที่คงที่ ประสิทธิภาพในการทำงานสูง ควบคุมการทำงานได้ดี แต่มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานมาก เพราะจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิง ในการสร้างความร้อน และหมุนพัดลม การทดลองของ นพวรรณ บุญช่วย (2534) การตอบแทนทางสังคมในการลดความชื้นข้าวเปลือกนาปรัง พบว่า การลดความชื้นข้าวเปลือกโดยวิธีอบในเครื่องอบแห้งพีชมีต้นทุนต่ำกว่าวิธีการตากบนลานและการใช้โรงอบพลังงานแสงอาทิตย์ เช่นเดียวกับสุกศักดิ์ ลิ้มปิติ และวิบูลย์ ช่างเรือ (2536) ศึกษาการลดความชื้นข้าวญี่ปุ่นที่ปลูกฤดูนาปีด้วยเครื่องลดความชื้นแบบใช้ลมร้อน อุณหภูมิ 40-42 องศาเซลเซียส ความดันลม 205 นิ้วของน้ำ จนความชื้นข้าวเปลือกลดเหลือประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ จากความชื้นเริ่มต้น 25 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับไมตรี แนวพนิช และคณะ (2539) รายงานว่า การลดความชื้นข้าวเปลือกโดยให้เครื่องทำงานแบบเมล็ดไหลหมุนเวียนผ่านลมร้อนจนกว่าจะเหลือความชื้นที่ต้องการ ลมร้อนที่ใช้ลดความชื้นควบคุมไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส  $\pm$  5 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าเครื่องลดความชื้นที่ออกแบบไว้นี้ สามารถลดความชื้น ให้เหลือ 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความชื้นเริ่มต้น 22 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) อิศเรศ รุชกัลยา (2543) ศึกษาสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 43-25 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานแห้ง) ลดจนกระทั่งข้าวเปลือกเหลือความชื้นสุดท้าย 28-16 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานแห้ง) สอดคล้องกับ Soponronnarit (1996) ศึกษาการลดความชื้นข้าวโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไชน์เบด พบว่า เทคนิคฟลูอิดไชน์เบด อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นข้าวจากความชื้นเริ่มต้น 33 เปอร์เซ็นต์ ลดเหลือ 16.5 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 53 นาที ยุทธนา ทบด้าน (2548) ศึกษาการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องลดความชื้นเมล็ดพีช ความดันก๊าซ 0.80 บาร์ ค่าความชื้นเริ่มต้น 20 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ลดความชื้นโดยใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกเท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นเท่ากับ 5 ชั่วโมง ชรินทร์ เตชะพันธุ์ (2542) รายงานว่า อบมอลท์ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ข้าวพันธุ์มะเขือจั่นก ข้าวพันธุ์ กข6 ข้าวพันธุ์หอมมะลิ 105 ข้าวบาร์เลย์พันธุ์ บ.ร.บ.2 และพันธุ์ชัยนาท อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้น 49.54, 42.45, 42.54, 50.85 และ 42.43 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าความชื้นลดเหลือ 6.8, 12.76, 10.82, 5.61 และ 12.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ วชรินทร์ มากดีและ อำนาจ หัวใจ (2548) ออกแบบทำเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวให้ความร้อน เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถลดความชื้นได้ตั้งแต่ 18-22 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ความชื้นที่ได้ออกมาจะอยู่ในช่วง 14.5-15.3 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ใจทิพย์ วานิชชัง และคณะ (2546) ศึกษาเครื่องอบแห้งเมล็ดพีชแบบไหลต่อเนื่อง

ประเมินความสามารถในการทำงานของเครื่องอบและประเมินคุณภาพของข้าวที่ได้จากการอบแห้ง พบว่า วิธีการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด คือการอบแห้งข้าวเปลือกในห้องอบ โดยมีข้าวเปลือกในห้องลดอุณหภูมิ และพัดลมดูดอากาศจากภายนอกเป่าผ่านตัวให้ความร้อนเข้าไปในห้องอบซึ่งจะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือก จากความชื้น 23 เปอร์เซ็นต์ ให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ และคณะ (2545) ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น ขนาดกำลังผลิต 2.5-5.0 ตัน/ชั่วโมง พบว่า เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ 4,821 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 28 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 23 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานแห้ง) โดยสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล 9,646 วัตต์ และ 17.6 ลิตรต่อชั่วโมง

#### 2.4.3 การลดความชื้นโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF)

คลื่นความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง การเกิดความร้อนโดยตัวกำเนิดคลื่นซึ่งทำด้วยวงจรหลอดแก้วสุญญากาศหรือสารกึ่งตัวนำสร้างคลื่นวิทยุกำลังสูงส่งผ่านมายัง electrode plates โดยจะเป็นตัวปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนขนาดของตัวกำเนิดกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 500 วัตต์ไปจนถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz เป็นความถี่ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมหลักการในการเกิดความร้อนเกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับความถี่คลื่นวิทยุ ถูกปล่อยผ่านไปยังวัตถุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกเช่น ที่ความถี่ 27.12MHz เกิดการสั่นสะเทือน 27.12 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้วัตถุที่มีพันธะโมเลกุล 2 ขั้ว เช่น โมเลกุลของน้ำ เมื่อโมเลกุลขวางทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสั่นสะเทือนและเหนี่ยวนำตามขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดพลังงานสะสมเป็นความร้อนจากการเสียดทานของโมเลกุล (Nijhuis *et al.*, 1998)

โดยทำให้ความร้อนเกิดขึ้นภายในวัสดุ (inside out) และการกระจายความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอทั่วถึงภายในเนื้อวัสดุพร้อมๆ กัน โดยสามารถถ่ายเทพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง และสามารถเกิดความร้อนในเวลาสั้นมาก (Birla *et al.*, 2004) ส่งผลให้ช่วยลดการใช้พลังงาน (Wang *et al.*, 2002) ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยวิธีอื่น เช่น ลมร้อน ซึ่งจะเกิดความร้อนจากบริเวณผิววัสดุก่อนแล้วจึงนำความร้อนสู่ภายใน (outside in) ย่านความถี่วิทยุที่แตกต่างกัน เช่น 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz สามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่คลื่น โดยคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่าเหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ส่วนคลื่นความถี่สูงจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ตื้นกว่าเหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดเล็กการตอบสนองต่อการดูดซับและการปลดปล่อยพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุของวัตถุทดลองสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแมลงศัตรูพืชและเชื้อรา

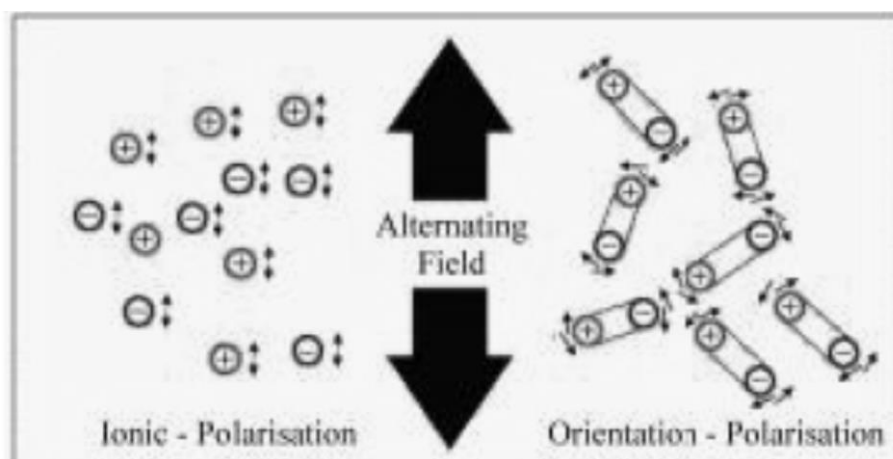
สาเหตุของการสูญเสียผลผลิตทางเกษตร และการใช้ลดความชื้นในวัสดุเกษตร โดยมีแนวโน้มสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ทำให้ผลิตผลเสียรสชาติและคงลักษณะโครงสร้างทางอาหารได้ (Nelson, 1996; Wang and Tang, 2001; Vearaslip *et al.*, 2005; Mekkapath *et al.*, 2010 และ Vearaslip *et al.*, 2011)

#### 2.4.3.1 กระบวนการเกิดความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ

คลื่นความถี่วิทยุ มีหลักการในการสร้างความร้อนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับความถี่คลื่นวิทยุ ถูกปล่อยผ่านไปยังวัตถุ ที่ประกอบด้วยสารที่มีพันธะโมเลกุล 2 ขั้ว เช่น น้ำที่มีพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะ เมื่อโมเลกุลวางทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดการสั่นสะเทือน ความถี่ในการสั่นจะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้ การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการสะสมพลังงานเมื่อวัตถุมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก่อให้เกิดความร้อนได้ 2 แบบร่วมกันได้แก่

**2.4.3.1.1 Ionic polarisation** เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้าโดยแต่ละไอออนที่มีประจุไฟฟ้าประจำตัวถูกกระตุ้นและเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างไอออน ในขณะเดียวกันเกิดการเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนขึ้น แล้วเกิดการกระจายความร้อนไปยังส่วนอื่นๆ ซึ่งการเกิดความร้อนลักษณะนี้เกิดขึ้นในส่วนหนึ่งของของเหลวภายในเซลล์ที่อยู่ในรูปของสารละลายต่างๆ

**2.4.3.1.2 Orientation polarisation** เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบที่มีขั้ว (polar) ซึ่งได้แก่ น้ำในสภาพปกติการเรียงตัวของประจุบวกและประจุลบของสารประกอบที่มีขั้วนี้เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบของสารเกิดการเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนทิศทางของการเรียงตัวที่เป็นระเบียบขึ้น การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปมาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งในคลื่นความถี่วิทยุ การเคลื่อนที่ของประจุ 3-300 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-3 วินาทีหรือประมาณ 1 นาที หลังจากได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดการกระจายตัวไปยังส่วนอื่นๆ (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 กระบวนการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำจนเกิดความร้อน  
(Wolfgang and Dieter, 2007)

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้โดยในคลื่นความถี่วิทยุนั้น การเคลื่อนที่ของประจุ 3-300 ล้านครั้งต่อ 1 วินาทีซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัว และการเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-3 วินาที หรือประมาณ 1 นาทีหลังจากได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดการกระจายตัวไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลจากการเดือดของน้ำโดยกระบวนการนำความร้อน และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคโนโลยีนี้จะใช้ระยะเวลาในการเกิดความร้อนที่สั้น และสามารถทำลายสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่ติดมากับวัตถุได้ (Nelson, 1996) ความร้อนของคลื่นความถี่วิทยุขึ้นอยู่กับความเป็นฉนวน และความสามารถในการเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าของคุณสมบัติของผลผลิตทางการเกษตรและสิ่งมีชีวิต โดยมีอิทธิพลมาจากความถี่ อุณหภูมิ ปริมาณเกลือ และปริมาณความชื้น (Ryynänen, 1995) โดยผลผลิตที่มีขนาดเล็กจะมีการกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอกว่าผลผลิตที่มีขนาดใหญ่ และผลผลิตที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะทนต่อความร้อนได้ดีกว่าผลผลิตที่มีความชื้นสูง ทำให้คลื่นความถี่วิทยุมีศักยภาพในการกำจัดแมลงในเมล็ดพืชได้ดีกว่าผลผลิตสด โดยสามารถคงคุณภาพของผลผลิตไว้ได้ (Wang *et al.*, 2007)

#### 2.4.3.2 การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency applications)

##### 2.4.3.2.1 การให้ความร้อนที่มีผลต่อการลดความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ Wang *et al.* (2003) กล่าวว่าวัสดุที่มีความชื้นสูงจะมีค่า dielectric loss factor สูง ทำให้มีความสามารถดูดซับพลังงานเพื่อทำให้เกิดความร้อน เมื่อมีค่าสูงขึ้นทำให้ความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการศึกษาของ Orsat (1999) กล่าวว่า

ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวบาร์เลย์ Akaranuchat (2009) พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 นาที สามารถลดความชื้นข้าวบาร์เลย์ได้ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ในทำนองเดียวกับ ชูพงศ์ เมฆพัฒน์ และคณะ (2553) ทำการอบแห้งมอลต์ด้วยความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับเครื่องอบลมร้อนในวิธีทั่วไป พบว่า การใช้เครื่องอบลมร้อนอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 44 เปอร์เซ็นต์ ให้ความชื้นลดลงเหลือ 4.72 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

เครื่องอบลมร้อนร่วมกับคลื่นความถี่วิทยุ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่าใช้เวลานาน 11 ชั่วโมง 36 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบลมร้อนสามารถลดระยะเวลาการลดความชื้นได้ถึง 12 ชั่วโมง 24 นาที นับว่าเป็นวิธีการลดความชื้นมอลต์โดยการประยุกต์ร่วมของคลื่นความถี่วิทยุและเครื่องอบลมร้อนจะช่วยลดระยะเวลาและพลังงานได้อีกทางหนึ่ง นอกจากการลดความชื้นข้าวด้วยการใช้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแล้ว คลื่นความถี่วิทยุยังถูกนำมาใช้กับพืชชนิดอื่นอีก โดย ปรัชญา วาสนาเจริญ (2548) รายงานว่า การให้คลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดพันธุ์งาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์งาได้ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นเมล็ดพันธุ์ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์งาได้ 0.8 เปอร์เซ็นต์

#### 2.4.3.2.2 การให้ความร้อนที่มีผลต่อการแตกข้าว

การลดความชื้นยังมีผลต่อกายภาพเมล็ด ในลักษณะความเสียหายได้แก่ การแตกข้าวของเมล็ด ซึ่งสามารถมองเห็นได้ภายใต้แสงสว่าง รอยร้าวในเอนโดสเปิร์มนี้เกิดได้แม้ว่าเปลือกเมล็ดจะไม่ได้ได้รับความเสียหายใดๆ สาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเมล็ดแต่ละเมล็ดอาจเกิดเนื่องจากการคายความชื้นที่ไม่สัมพันธ์กันระหว่างการระเหยน้ำที่ผิวเมล็ดกับการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณใจกลางเมล็ดออกมาที่ผิวเมล็ด เนื่องจากบริเวณผิวหน้าวัสดุมีช่องว่างเล็กๆ เพื่อให้ของเหลวผ่านไปมา เมื่อโดนความร้อนช่องว่างจึงถูกปิดลงจนน้ำภายในไม่สามารถไหลผ่านออกมาได้ เมื่อให้ความร้อนไปนานๆ จะทำให้บริเวณผิวหน้าวัสดุแตกแยกออกจากกัน (Prakash and Zhongli, 2011) สารเคลือบผิวเป็นรอยขรุขระ เกิดการร้าวไหลของสารละลายภายในสู่ภายนอก และมีขนาดเมล็ดลดลง เป็นต้น หากการระเหยน้ำที่ผิวเมล็ดเกิดขึ้นเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเมล็ดยิ่งมากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ผลที่เกิดขึ้นคือเมล็ดร้าว เมล็ดแตก เอนโดสเปิร์มร้าว เชื้อหุ้มเมล็ดแตกปริ อาจส่งผลต่อการสูญเสียความมีชีวิต หรือต้นกล้าที่ผิดปกติได้ (Nagato *et al.*, 1964, Kobayashi *et al.*, 1972, USDA, 1994) และอิทธิพลของระดับอุณหภูมิในการอบแห้งเมล็ดข้าวด้วยลมร้อนที่มากกว่า 43 องศาเซลเซียส อาจส่งผลต่อการแตกข้าวอย่างรุนแรงของเมล็ดข้าว (Arora *et al.*, 1973) มีการศึกษาการแตกข้าวที่เป็นผลมาจากการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุในเมล็ดข้าว โดย Dong and Mao (2003) ศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของเมล็ดข้าวหลังการตากแดด พบว่า ส่วนของเอนโดสเปิร์มเมล็ดข้าวได้รับความเสียหายเกิดรอยร้าวขึ้น โดยเกิดขึ้นบริเวณเนื้อเยื่อเอนโดสเปิร์มก่อนแล้วแพร่กระจายไปตามขอบของเม็ดแป้งและผ่านผนังเซลล์เนื้อเยื่อเอนโดสเปิร์ม นอกจากนี้กุลธิดา ไชยสถิตวานิช (2553) ยังเกิดการศึกษาการแตกข้าวในการศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการกำจัดเชื้อรา *Aspergillus flavus* และผลต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยใช้อุณหภูมิ 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 และ 3 นาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 3 นาทีสามารถกำจัดเชื้อรา *A. flavus* ได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีผลต่อการแตกข้าวของข้าวโพด โดยเพิ่มจากเดิม 25.1 เป็น 38.9 เปอร์เซ็นต์

## 2.5 คุณภาพข้าว

คุณภาพข้าวขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ หรือการบริโภค ข้าวส่วนใหญ่มีค่าขาย และบริโภคกันในรูปของเมล็ดข้าวที่หุงต้มทั้งเมล็ด ดังนั้น คุณภาพทางกายภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญ นอกจากนี้ความนิยมในการบริโภคข้าวก็เป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกข้าว ในการค้ามักพิจารณาจากคุณลักษณะทางกายภาพเป็นหลัก เนื่องจากเป็นสิ่งที่ปรากฏเด่นชัด ดังนั้น คุณภาพข้าวแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ คุณสมบัติการหุงต้มของข้าว คุณภาพการสีและคุณภาพในการซื้อขาย (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2552)

### 2.5.1 คุณภาพทางกายภาพของข้าว

**2.5.1.1 คุณภาพเมล็ดทางกายภาพ** หมายถึง คุณสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดที่สามารถมองเห็นหรือ ชั่ง ตวง วัดได้ เช่น น้ำหนักเมล็ด สีข้าวเปลือก ขนาดรูปร่างเมล็ด ลักษณะท้องไข่ ความขุ่นใสของข้าวสาร ความแกร่งของเมล็ด ความขาวของข้าวสาร และคุณภาพการสี

**2.5.1.2 น้ำหนักเมล็ด (grain weight)** น้ำหนักเมล็ดเป็นลักษณะที่ถูกควบคุมโดยพันธุกรรม และจะแปรปรวนไปตามสภาพแวดล้อม น้ำหนักเมล็ดสามารถประเมินได้ 2 รูปแบบ คือ

- น้ำหนักต่อปริมาตร ประเมินเป็น กรัมต่อลิตร หรือ กิโลกรัมต่อถัง
- น้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด ประเมินเป็น น้ำหนัก 100 เมล็ด หรือน้ำหนัก 1,000 เมล็ด

**2.5.1.3 สีข้าวเปลือก (hull color)** สีข้าวเปลือกเป็นลักษณะประจำพันธุ์เช่นเดียวกับสีของเปลือกข้าวที่ถูกควบคุมโดยยีน (gene) หลายคู่สร้างสารสีประเภทแอนโทไซยานิน (anthocyanin) อยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มผล (pericarp) เปลือกเมล็ดข้าวจะมีผลต่อสีของข้าวสารหนึ่ง กล่าวคือ เมล็ดข้าวเปลือกที่มีสีเข้มข้าวสารหนึ่งจะมีสีเข้มด้วย สีข้าวเปลือกที่พบจะมีสีขาว (white) ฟาง (straw) น้ำตาลอ่อนถึงเข้ม (light to dark brown) ร่องน้ำตาล (brown furrow) กระน้ำตาล (brown spot) น้ำตาลแดง (reddish brown) ม่วง (purple) และดำ (black)

**2.5.1.4 สีข้าวกล้อง (pericarp color)** สีข้าวกล้องจะแสดงออกที่เยื่อหุ้มเมล็ด (pericarp) สำหรับส่วนที่เป็นแป้ง (endosperm) ของข้าวทุกชนิดจะมีสีขาวเสมอ ข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ กัน เช่น ขาว แดงน้ำตาลเข้ม และม่วงถึงเกือบดำ สีข้าวกล้องมีผลต่อข้าวสารหนึ่งเช่นเดียวกับสีของข้าวเปลือก นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณภาพการสี กล่าวคือ ข้าวกล้องที่มีสีเข้มต้องใช้เวลาในการขัดรำนานหรือใช้แรงกดมาก เพื่อให้ส่วนของรำที่เป็นสีเข้มหลุดออกทำให้เกิดข้าวหักมาก มีปริมาณข้าวเต็มเมล็ด ตันข้าวน้อย ไม่เป็นที่ต้องการของพ่อค้าโรงสี ดังนั้นสีของข้าวกล้องที่ดีอง การคือข้าวกล้องที่มีสีอ่อน

**2.5.1.5 ขนาดรูปร่างเมล็ด** เป็นลักษณะแรกทางด้านคุณภาพเมล็ด ที่นักปรับปรุงพันธุ์ใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าว ขนาดรูปร่างเมล็ด หมายถึง ความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ด

- ความยาวของเมล็ด หมายถึง ระยะทางจากปลายยอดสุดเมล็ดถึงโคนเมล็ด
- ความกว้างของเมล็ด หมายถึง ระยะทางส่วนที่กว้างที่สุดของเมล็ดระหว่างเปลือกใหญ่ (lemma) ถึงเปลือกเล็ก (palea)
- ความหนาของเมล็ด หมายถึง ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างเปลือกด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวกล้อง ข้าวสาร และข้าวเปลือก รูปร่างของเมล็ดข้าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ เรียว ปานกลาง ป้อม ซึ่งผลที่ได้จะบอกถึงคุณภาพประสิทธิภาพของการขัดสีข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้อง และข้าวสาร แต่ละชนิด (กระทรวงเกษตร และสหกรณ์, 2550) มาตรฐานข้าวไทยไม่มีการกำหนดรูปร่างเมล็ด เนื่องจากข้าวส่วนใหญ่มีเมล็ดยาวเรียวและ ชีดยอดข้าวที่มีความยาวเกิน 7.0 มิลลิเมตร เป็นข้าวคุณภาพดี และข้าวไทยเป็นข้าวประเภทอินดิกา จึงทำให้เข้าใจกันโดยทั่วไปว่าข้าวชนิดอินดิกามีเมล็ดยาวเรียว แต่โดยความเป็นจริงมีข้าวไทยพันธุ์พื้นเมืองบางพันธุ์มีเมล็ดป้อมเช่นกัน

**ตาราง 2.1** รูปร่างของเมล็ด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวกล้อง ข้าวสาร และข้าวเปลือก (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550)

| รูปร่าง | ข้าวเปลือก | ข้าวกล้อง | ข้าวสาร   |
|---------|------------|-----------|-----------|
| เรียว   | >3.4       | >3.1      | >3.0      |
| ปานกลาง | 2.3 – 3.3  | 2.1 – 3.0 | 2.0 – 2.9 |
| ป้อม    | <2.2       | <2.0      | <1.9      |

**2.5.1.6 ความขาวของข้าวสาร (milled rice whiteness)** ข้าวที่ผ่านการขัดสีจนเป็นข้าวสารแล้วจะมีสีขาวเสมอ เพราะเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นแป้งของเมล็ด ความขาวของข้าวสารจะแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว เปลือก เป็นต้น ความขาวของข้าวสารซึ่งจำแนกโดยระดับการสีจะเป็นตัวกำหนดชั้นของข้าว เช่น ข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ จะต้องมีการสีเป็นสี่ดีพิเศษ ซึ่งหมายถึง การสีเอาสิ่งต่าง ๆ ออกหมดไม่มีรำอยู่เลย จนข้าวมีลักษณะใสวามเป็นพิเศษ หรือข้าว 45 เปอร์เซ็นต์ มีชั้นของการสีเป็นสี่ธรรมดา หมายถึง การสีที่ไม่เต็มที สีขาวปานกลาง ส่วนสีข้าวหนึ่ง ซึ่งมีตั้งแต่ น้ำตาลอ่อนถึงเข้มนั้น เกิดจากกรรมวิธีและวัตถุดิบที่ใช้

## 2.5.2 คุณสมบัติการหุงต้มของข้าว (Cooking properties)

### 2.5.2.1 อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation ratio)

ในระหว่างการหุงต้ม เมล็ดข้าวมีการขยายตัวทุกด้าน โดยเฉพาะด้านยาว คุณลักษณะนี้เป็นคุณสมบัติพิเศษของข้าวช่วยเสริมให้ข้าวสุกขยายปริมาตร การที่เมล็ดข้าวขยายตัวได้มากทำให้เนื้อภายในโปร่งขึ้น ไม่อัดแน่นและมีความแข็งกระด้างน้อยลง หากข้าวสุกเป็นข้าวที่ไม่เหนียวติดกัน การขยายตัวของเมล็ดช่วยให้ข้าวขึ้นหม้อมากขึ้น เช่น ข้าวพันธุ์ Basmati 370 ซึ่งเป็นที่นิยมในตลาดตะวันออกกลาง ส่วนข้าวหอมมะลิมีการยืดตัวดีทำให้ข้าวสุกน่ารับประทาน แต่เนื่องจากเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ข้าวสุกจะเหนียวติดกัน จึงทำให้ไม่ขึ้นหม้อ (ละม้ายมาศ ยังสุข, 2540)

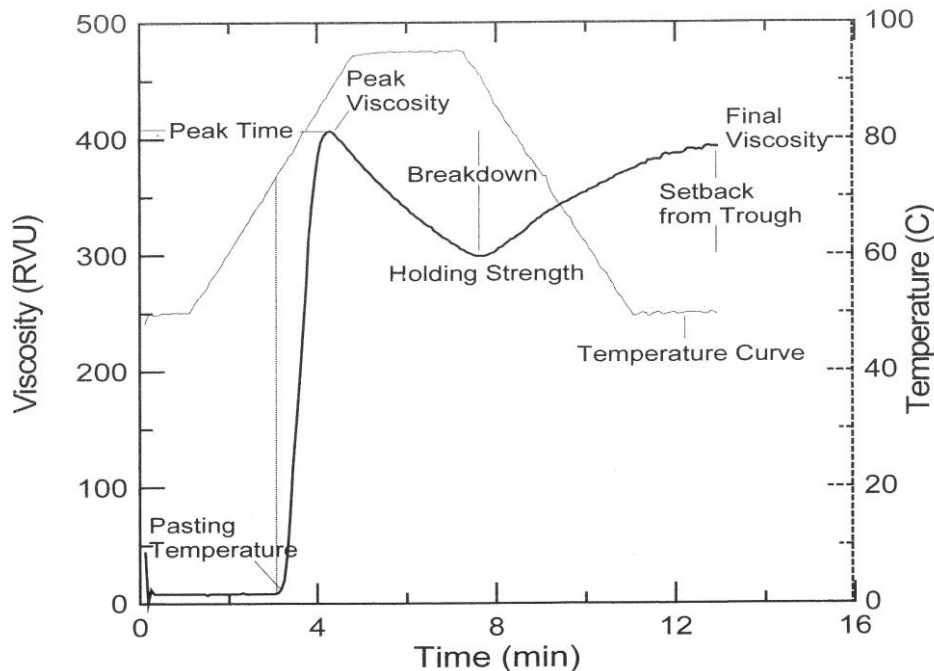
การทดสอบอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวทำโดยแช่เมล็ดข้าวสารในน้ำเย็นนาน 20 นาที และต้มในน้ำเดือด 10 นาที แล้วจึงวัดความยาวของข้าวสุกโดยใช้ vernier หรือวัดเงาของเมล็ดที่ขยายใหญ่ขึ้น เปรียบเทียบกับความยาวของข้าวสาร ดังนี้

$$\text{อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร}}$$

### 2.5.2.2 ความหนืดของแป้ง (Viscosity)

คุณสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งสุกเป็นคุณสมบัติสำคัญของแป้ง เมื่อได้รับความร้อนและมีการกวนหรือคนอย่างสม่ำเสมอจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปถึง 95 องศาเซลเซียส และคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที จึงจะลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส อีกครั้ง โดยทั่วไปโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่อยู่ในน้ำเย็นแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้มากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลลาติไนเซชัน (gelatinization) และอุณหภูมิที่ทำให้สารเริ่มเกิดเจลลาติไนเซชัน เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น เมล็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่ ซึ่งจะเป็จุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ณ จุดนี้อัตราการพองตัวจะสมดุลกับอัตราการแตกตัว และเมื่อเพิ่มความร้อนต่อไปและมีการกวนอย่างต่อเนื่องเม็ดแป้งจะยิ่งพองมากขึ้นจนทำให้โครงสร้างภายในแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลซึ่งโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำ แต่จะไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกทำ

ให้ความหนืดคงตัวมากขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือ การคืนตัว (setback) (Smith, 1979) โดยการวัดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (rapid visco analyzer, RVA)



ภาพที่ 2.3 กราฟจากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA  
(Newport Scientific Pty, Ltd., 1998)

ค่าต่างๆ ที่สามารถอธิบายได้จากกราฟโดยมีหน่วยเป็น Rapid Visco Unit (RVU) มีดังนี้

**Peak viscosity** : ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งสุกเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

**Breakdown** : ความแตกต่างระหว่างค่า Peak viscosity กับค่า Holding strength

**Final viscosity** : ค่าความหนืดสุดท้ายของการทดลอง

**Setback** : ความแตกต่างระหว่างค่า Final viscosity กับค่า Peak viscosity

**Pasting temperature** : อุณหภูมิที่ค่าความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น 2 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

ทั้งนี้ค่า breakdown จะอธิบายถึงความทนทานของเม็ดแป้งต่อการกวน และค่า setback จะอธิบายการคืนตัวของแป้งสุกที่เย็นลงและทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนืดสูงสุด ได้แก่ ปริมาณโปรตีน และอะไมโลส ซึ่งปริมาณอะไมโลสมีส่วน

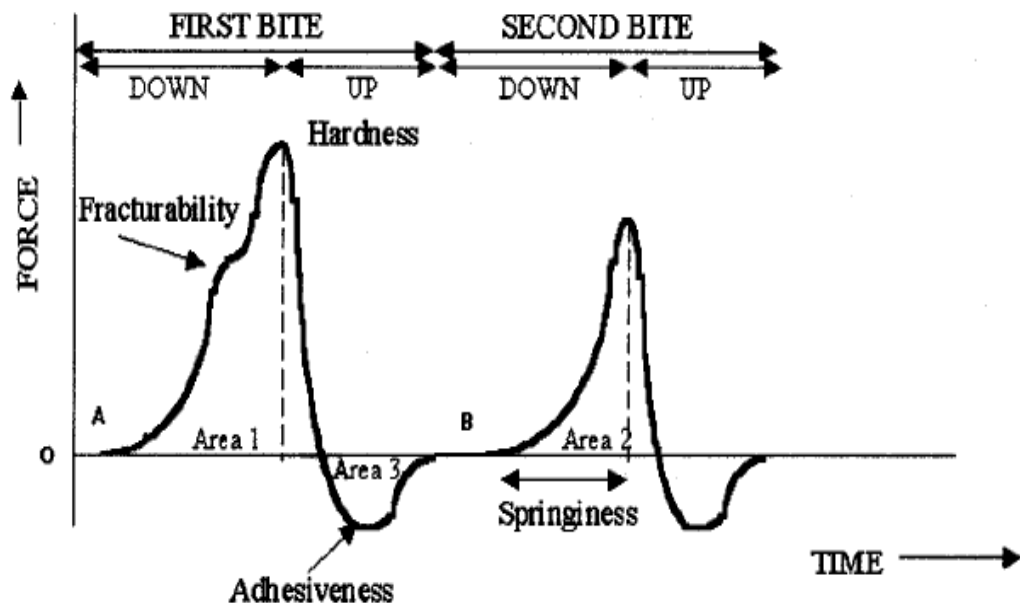
สำคัญต่อความหนืด กล่าวคือ ขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่มีกำลังพองตัวสูงและให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูง ปริมาณอะไมโลสจะมีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ถ้าแป้งชนิดใดมีปริมาณอะไมโลสสูงย่อมแสดงค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูงด้วยเช่นกัน เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่ต่างกัน ดังนั้นปริมาณอะไมโลสจึงมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้งสุก (setback) โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำซึ่งหากเปรียบเทียบระหว่างแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงด้วยกัน แป้งข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกเป็นชนิดอ่อนจะมีค่า peak viscosity และค่า setback ต่ำกว่าแป้งที่มีความคงตัวของแป้งสุกเป็นชนิดแข็ง

#### 2.5.2.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Texture of cooked rice)

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส และโดยการวัดด้วยเครื่องมือวัดมีบทบาทมาก เพราะข้าวแต่ละชนิดเมื่อหุงสุกจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแตกต่างกัน นอกจากปัจจัยเรื่องของพันธุ์ของข้าวแล้ว ยังมีปัจจัยอีกหลากหลายที่ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวนั้นมีความแตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติทางเคมี และเชิงฟิสิกส์ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวและวิธีการหุงต้ม

ในปัจจุบันมีเครื่องที่สามารถใช้วิเคราะห์เนื้อสัมผัสเพื่อให้ประเมินและเปรียบเทียบกับผลทางประสาทสัมผัสหลายชนิด เช่น เครื่องเท็กซ์โอมิเตอร์ (texturometer) เครื่องยูนิเวอร์แซล เทสติง (Universal Testing Machine) เครื่องยูนิเวอร์แซล เทกซ์เจอร์ แอนาไลเซอร์ (Universal Texture Analyzer) เครื่องชีयर เพรส (Shear Press) เครื่องแพบสต์ เทกเจอร์ เทสเตอร์ (Pabst Texture Tester) เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) โดยลักษณะของเนื้อสัมผัสที่วัดได้จากเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุก มีดังต่อไปนี้

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกสามารถวัดโดยเครื่อง Texture analyzer ทำการวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) จะได้ข้อมูลที่เป็นค่าตัวแปรทางเนื้อสัมผัสออกมา



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟจากการวัด Texture Profile Analysis (TPA)

(Sitakalin and Meullenet , 2000)

จากภาพมีนิยามเกี่ยวกับ Texture Profile Analysis (TPA) ต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Lyon *et al.* 2000)

**Hardness** (ความแข็งหรือความกระด้าง) คือ ความสูงของจุดสูงสุดของโค้งแรกของกราฟ

**Adhesiveness** (ความเหนียวติดกัน) คือ แรงที่มีค่าลบที่เกิดจากแรงดึงขึ้นของห้วกดขึ้นจากตัวอย่าง (area 3)

**Springiness** (ความยืดหยุ่น) คือ อัตราส่วนของเส้นทางระหว่างเส้นทางการกดของห้วกดเส้นโค้งที่สอง และเส้นโค้งแรก

**Cohesiveness** (ความเกาะติดกัน) คือ อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างเส้นโค้งที่สองกับเส้นโค้งแรก (area2/area1)

**Chewiness** (การเคี้ยว) คือ ผลคูณระหว่างค่าความเหนียวยึดติด กับความยืดหยุ่น การประยุกต์ใช้วิธีตรวจสอบทางกายภาพเพื่อแยกความแตกต่างของข้าวแต่ละพันธุ์ เป็นวิธีการที่สะดวกและเชื่อถือได้ โดยการนำเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกโดยวิเคราะห์ค่าโครงสร้างคุณลักษณะเนื้อสัมผัส (texture profile analysis, TPA) เพื่อวัตถุประสงค์เปรียบเทียบกับสภาวะจริงที่คนใช้ฟันกัดข้างลงแล้วดึงขึ้น พบว่าข้าวอะไมโลสต่ำมีความนุ่มเหนียวกว่าข้าวอะไมโลสปานกลาง และสูง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวอะไมโลสต่ำด้วยกัน

ได้แก่ หอมคลองหลวง ปทุมธานี 1 และขาวดอกมะลิ 105 พบว่าสามารถแยกข้าวแต่ละพันธุ์ออกจากกันได้ คือ ข้าวหอมมะลิ 105 มีความนุ่มและเหนียวกว่าข้าวหอมคลองหลวงและปทุมธานี 1 และข้าว 2 ชนิดมีความเหนียวติดกันใกล้เคียงกันแต่ข้าวปทุมธานี 1 มีค่าความแข็งต่ำกว่า จึงสามารถระบุข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อสุกจะมีความนุ่มและเหนียวมากที่สุด ส่วนข้าวหอมคลองหลวงมีความแข็งกว่าข้าวขาวดอกมะลิ และปทุมธานี 1 (สิริรัตน์, 2547)

### 2.5.3 คุณภาพการสีและคุณภาพในการซื้อขายข้าว

คุณภาพการสีของข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (whole grain) และต้นข้าว (head rice) ข้าวที่มีคุณภาพการสีดี เป็นข้าวที่เมื่อผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหัก (broken rice) น้อย สิ่งที่ได้จากขั้นตอนการสีประกอบด้วย ส่วนที่ 1 แกลบ (hull หรือ husk) เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลีบเลี้ยง หาง และข้าวเมล็ด เป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวมีประมาณ 20-24 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวเปลือก ส่วนที่ 2 รำ (bran) เป็นส่วนผสมของเยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen) คัพภะ (embryo) และผิวหนังของข้าวสาร รำมีประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวเปลือก และส่วนสุดท้าย ข้าวสาร (milled rice) ข้าวสารมีประมาณ 68-70 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวจะนำไปแยกเป็นข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น และข้าวหัก ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และข้าวต้นมีผลต่อราคาซื้อขายข้าว (กัญญา เชื้อพันธุ์, 2545)

ราคาซื้อขายข้าวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. ความชื้น ความชื้นมีบทบาทสำคัญในการซื้อขายข้าว ข้าวที่เก็บเกี่ยวในระยะที่เหมาะสมและลดความชื้นอย่างเหมาะสม เหลือ 13-15 เปอร์เซ็นต์ จะมีราคาสูงกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง เนื่องจากข้าวแห้งที่มีความชื้นเหมาะสม สามารถทำการสีได้ โดยไม่ต้องนำมาลดความชื้นอีก แต่หากรับซื้อข้าวที่มีความชื้นสูง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลดความชื้น และสูญเสียน้ำหนักข้าวหลังการลดความชื้น ดังนั้น ข้าวที่มีความชื้นเกินกำหนดจึงถูกตัดราคา

2. ลักษณะทางกายภาพของข้าว โดยการกะเทาะ และขัดสีเพื่อประเมินสีข้าวกล้อง ท้องไข ความใสของเมล็ด และสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น ข้าวแดง ข้าวเหลือง ข้าวเสีย หรือข้าวชนิดอื่นปน

3. คุณภาพการสี เพื่อประเมินผลของการแปรสภาพจากข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ปริมาณข้าวรวม ข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว ข้าวหักขนาดต่าง ๆ และปลายข้าว

4. ประเภทของข้าว ข้าวคุณภาพดี ตามความต้องการของตลาดและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค คุณภาพข้าวจะมีการแบ่งชั้นลงไปอีก