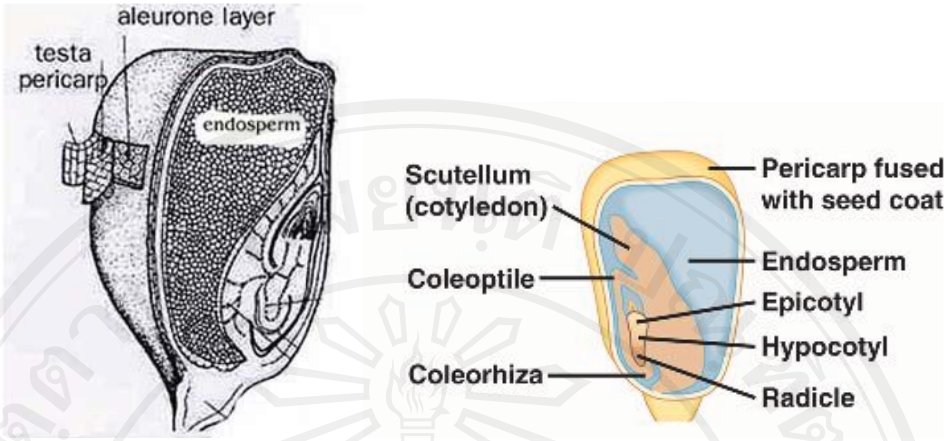
บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชในวงศ์ Gramineae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L. (White, 2003) เมล็ดข้าวโพดมี pericarp เป็นเยื่อบางๆหุ้มเมล็ด ไม่มีสี ที่ส่วนยอดของเมล็ดมีรอยเกิดจากเส้นไหมที่แห้งหลุดร่วงไป เรียกว่า silk scar ส่วน testa จะอยู่ถัดเข้ามาอีกชั้นซึ่งรวมกันเรียกว่า hull มีองค์ประกอบเป็นพวก cellulose และ hemicelluloses ใต้ชั้น testa มี alleurone layer เป็นเนื้อเยื่อบางๆห่อหุ้มส่วนของ endospermทั้งหมด มีความสำคัญต่อการงอกของเมล็ด เพราะเป็นที่สังเคราะห์ enzyme ที่ใช้ย่อยอาหารใน endosperm ซึ่ง endosperm เป็นส่วนที่เก็บสะสมอาหารของเมล็ด มีสีต่างๆ ทั้งสีเหลืองหรือสีขาว อาหารที่เก็บสะสมส่วนใหญ่เป็นแป้ง แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แป้งอ่อน (soft starch) เป็นแป้งซึ่งรวมกันอยู่อย่างหลวมๆ โดยมากพบที่ส่วนบนหรือส่วนกลางของเมล็ด มีสีขาวขุ่น และ แป้งแข็ง (hard starch) เป็นแป้งที่อยู่รวมกันแน่น พบที่ด้านข้างและด้านบนเมล็ด มีลักษณะค่อนข้างใส ส่วนที่อยู่ด้านล่างสุดของเมล็ดคือ embryo มีลักษณะใสมัน ฝังอยู่ทางด้านหนึ่งของ endosperm ประกอบด้วยแกนกลาง (central axis) ปลายข้างหนึ่งคือ radical ซึ่งมี coleorhizae หุ้มอยู่ไปทางด้าน pedicel อีกด้านหนึ่งเป็นส่วนของ stem tip ซึ่งมีใบอ่อน (embryonic leaves) ประมาณ 5 ใบม้วนติดกันเป็นกรวยและมี coleoptiles หุ้ม ด้านข้างของแกนกลางติดกับ endosperm จะพบ scutellum (cotyledon) ดังภาพที่ 2.1 (ไสว, 2534)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่2.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวโพด

(ที่มา: STKS Botany Project (2551))

2.2 องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นแหล่งของแป้ง 65% มีเยื่อใยต่ำ ให้พลังงานสูง จึงเหมาะที่จะนำมาแปรรูปเป็นอาหารสัตว์(พันทิพา, 2547) ภายในแป้งประกอบด้วยเมล็ดสตาร์ชซึ่งมีความชื้น 10-20% และประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัสเล็กน้อย และสารอนินทรีย์น้อยมาก ที่เหลือส่วนใหญ่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อะมิโลส(amylose) และอะมิโลเพกติน(amylopectin) โดยทั่วไปแล้วในข้าวโพดจะมีปริมาณอะมิโลสอยู่ถึง 25-30%(White, 2003) อะไมโลสเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อด้วยพันธะกลูโคดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (∝-1,4) เกาะกันเป็นเส้นตรง โมเลกุลของอะมิโลสจะมีด้านหนึ่งที่ไม่สามารถรีดิวส์(non-reducing end) สารอื่นได้ ส่วนอีกด้านมีสมบัติรีดิวส์สารอื่นได้ (reducing end) ที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (double helix) อะมิโลสไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็นแต่แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสมากเมื่อได้รับความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวกันเป็นก้อน อะมิโลสละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นด่าง(ปราณี, 2536) อะมิโลสามารถรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินซึ่งจะช่วยบ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส จึงใช้เป็นหลักในการหาปริมาณอมิโลสในตัวอย่างแป้งต่างๆ นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ 62.5 มิลลิไมครอน(กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2550) ข้าวโพดยังประกอบด้วยไขมัน 3-6% มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่สูง โดยไขมันเหล่านี้จะแทรกตัวตามส่วนต่างๆ ของเมล็ดและจะเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อเมล็ดเจริญเติบโตขึ้น จนเมื่อเมล็ดแก่เต็มที่จะมีไขมันสะสมมากที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในคัพภะ และจะมีไขมันพวกไตรกลีเซอไรด์มากที่สุด คือมีมากว่า 70% ของไขมันที่มีอยู่ทั้งหมดในเมล็ด นอกจากนี้ในเมล็ดข้าวโพดยังมีโปรตีนอยู่ 9-12%(White, 2003)โปรตีนประกอบด้วยอะมิโนต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ระหว่างกลุ่มคาร์บอซิล (COOH) ของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับกลุ่มแอลฟา-อะมิโน (NH_2) ของกรดอะมิโนตัวต่อไป ซึ่งชนิดของกรดอะมิโนนี้มีประมาณ 18 ชนิดที่พบในเมล็ด สัดส่วนลำดับการต่อกันของโปรตีนแตกต่างกัน ทำให้โปรตีนมีคุณสมบัติต่างๆ ในเม็ดข้าวโพดมีโปรตีน 2 ชนิดคือ เซอีนหรือซีน (zein) จะพบใน endosperm ซึ่งมีปริมาณมาก และกลูเทลิน (glutelin) โดยทั่วไปนั้นโปรตีนจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดตามลักษณะการละลายได้ในสารต่างๆ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ แอลบูมิน (albumins) ละลายได้ในน้ำ โกลบูลิน (globulins) ละลายในน้ำเกลือ โปรลามิน (prolamins) ละลายในแอลกอฮอล์ และกลูเตลิน (glutelin)ละลายในกรดหรือด่างเจือจาง โปรตีนแต่ละชนิดกระจายตัวอยู่ทั่วไปในทุกส่วนของเนื้อเยื่อเมล็ด จะมีมากในคัพภะ สกูเทลลัม และชั้นแอลิวโรน มากกว่าในส่วนเนื้อเมล็ด เปลือกหุ้มเมล็ดและเปลือกหุ้มผล(อรอนงค์, 2532)

2.3 การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ สามารทำรายได้ให้ประเทศอย่างมหาศาล มีมูลค่าการส่งออกในปี 2551 จำนวน 659,099 ตัน คิดเป็นมูลค่า 6,131 ล้านบาท มีพื้นที่ในการเพาะปลูกปีละประมาณ 6.69 ล้านไร่(กรมการค้าต่างประเทศ, 2552) แต่ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ผลิตได้ประมาณร้อยละ 90 จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ ส่วนที่เหลือจะถูกแปรรูปใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง เชื้อเพลิง อุตสาหกรรมน้ำมันข้าวโพด เป็นต้น (ชุติมา, 2547) ที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการในการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นวัตถุดิบเพิ่มขึ้นด้วย

ข้าวโพดรุ่นแรกจะปลูกในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม และเก็บเกี่ยวข้าวโพดที่ยังมีความชื้นสูงในช่วงเดือนกรกฎาคม-กันยายน ซึ่งเป็นระยะที่มีฝนตกชุก ทำให้มีปัญหาเรื่องการเน่าเสียและการปนเปื้อนของสารอะฟลาทอกซิน ส่วนข้าวโพดรุ่นที่ 2 จะปลูกในเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม และเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤศจิกา-ธันวาคม ข้าวโพดรุ่นนี้จะมีคุณภาพดี เนื่องจากข้าวโพดมีความชื้นต่ำและลดความชื้นได้ง่าย การเก็บเกี่ยวข้าวโพดที่มีความชื้นที่เหมาะสม คือ มีความชื้นต่ำกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ใบข้าวโพดแห้ง หรือตรวจสอบดูได้ด้วยการแกะเมล็ดจากฝักมาดู ถ้าที่ฐานเมล็ดส่วนติดกับซังมีสีดำแสดงว่าเมล็ดอยู่ในระยะสุกแก่(ไสว, 2534)

การลดความชื้นเมล็ดมีอยู่ 2 วิธีคือ การตากแดด ซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ ทำได้โดยการตากบนลานคอนกรีตซึ่งสามารถลดความชื้นได้ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน แต่มักพบปัญหา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในช่วงหน้าฝนที่เกิดในช่วงต้นฤดูการเก็บเกี่ยว และการใช้เครื่องลดความชื้น แม้จะทำให้ค่าใช้เพิ่มสูงขึ้น แต่สามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว รองรับผลผลิตที่มีมากในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว

การซื้อขายจะพิจารณาจากความชื้นของเมล็ดเป็นตัวกำหนดราคา โดยมีสามาคมพ่อค้าข้าวโพดแห่งประเทศไทยเป็นผู้กำหนด ในการตัดน้ำหนักนอกจากจะคำนวณตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เกินไปจาก 14.5 เปอร์เซ็นต์ แล้วยังรวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มขึ้นในการลดความชื้นและความเสี่ยงต่อการเสื่อมคุณภาพจากการที่ข้าวโพดมีความชื้นสูง ดังนั้นหากสามารถลดความชื้นของข้าวโพดให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ก็จะทำให้มีรายได้จากการขายข้าวโพดมากขึ้น แต่หากเก็บข้าวโพดไว้นานเกินไปหรือตากข้าวโพดจนความชื้นต่ำกว่ามาตรฐานการรับซื้อ จะทำให้สูญเสียน้ำหนักได้

2.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาผลผลิต

การเก็บรักษาข้าวโพดเพื่อรอราคาหรือระหว่างรอการแปรรูปต่างๆ มักพบกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงหรือการเกิดความเสียหายขึ้นกับผลผลิตเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น การเข้าไปทำลายของแมลง การเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ และการสูญเสียคุณภาพของเมล็ดเอง เหล่านี้ส่งผลกระทบทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบเศรษฐกิจ ดังเช่นความรุนแรงของการเกิดเชื้อราในเมล็ดข้าวโพดที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา เป็นไปได้ว่าอาจเกิดมาจากเชื้อราที่ติดมาตั้งแต่แปลงเพาะปลูก (field fungi) และเชื้อราที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา(storage fungi) แหล่งสะสมเชื้อราในโรงเก็บที่สำคัญคือ สายพานที่ใช้ปล่อยเมล็ดไปเก็บในตัวไซโล(ไสว, 2534) เชื้อราสามารถอาศัยอยู่ได้ในเมล็ดเป็นระยะเวลานานๆ เมื่อสภาวะเหมาะสมที่ส่งเสริมให้เชื้อเจริญ จึงเข้าทำลายเกิดความเสียหายให้แก่เมล็ด ซึ่งเชื้อราบางชนิดสามารถสร้างสารพิษได้อีกด้วย เชื้อราที่เข้าทำลายภายในเมล็ดพืชในระยะเบื้องต้นนั้นไม่สามารถสังเกตได้ เมื่อเสียหายมากแล้วจึงแสดงความผิดปกติภายหลัง โดยเกิดเส้นใยหรือสปอร์ปกคลุมอยู่ทั่วเมล็ดพืชจนไม่สามารถป้องกันหรือแก้ไขได้อีก เชื้อราในโรงเก็บพบว่ามีมากกว่า 150 ชนิดที่เข้าทำลายและสร้างความเสียหายให้แก่ผลผลิต เชื้อราที่พบเข้าทำลายเมล็ดพืชอาจพบได้จากเชื้อรา 3 classas คือ Phycomycetes, Ascomycetes, และ Deuteromycetes เชื้อราในกลุ่ม Dueteromycetes พบการเข้าทำลายมากที่สุดในเมล็ดพืช โดยเฉพาะเชื้อ *Aspergillus* และ *Penicillium*(สมบัติ, 2536) ในกลุ่มของ *Aspergillus* เป็นเชื้อราที่พบมากในการเข้าทำลายเมล็ดข้าวโพดและสร้างสารพิษที่เป็นอันตรายที่เรียกว่า อะฟลาทอกซิน (aflatoxin) มีอยู่สองชนิดที่สร้างสารพิษชนิดนี้ได้คือ *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus paraciticus*

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 ลักษณะโดยทั่วไปของเชื้อ *Aspergillus flavus*

Aspergillus flavus อยู่ใน Genus Aspergillus, Subdivision Deutoromycotina เป็นเชื้อสาเหตุสำคัญของโรคในพืชไร่ที่อยู่ในเขตร้อน เช่น ข้าวโพด และถั่ว อีกทั้งยังเป็นเชื้อราที่สามารถสร้างสารพิษ aflatoxin ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์

การจำแนกเชื้อรา Aspergillus ออกเป็นกลุ่มโดยอาศัยสีและลักษณะรูปร่างของ conidia head รวมทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างอื่นๆ เช่น vesicle, phialide, hulle cells และ ascospore เป็นต้น(Smith, 1993) เชื้อรา *A. flavus* เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็น โคโลนีสีเหลืองอมเขียว aerial mycelium เป็นปุยและบริเวณรอบนอกโคโลนีจะมี mycelium ละเอียดสีขาวครีม อัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 7 วันเส้นผ่าศูนย์กลางของโคโลนีเมื่อโตเต็มที่เท่ากับ 50 มม. เมื่อส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะมีผนังของ conidiophores หนาและขรุขระยาวประมาณ 1 มม. และมี vessicle รูปร่างกลมรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ10-65ไมโครเมตร เมื่อแก่ในพวกที่มี head ใหญ่ ส่วนในพวก head เล็กมีรูปร่างคล้ายกระบอง มี sterigma หรือ phialide จำนวน1-2แถว โคนิเดียรูปร่างกลมรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.5-4.5ไมโครเมตร โคโลนีจะมีสีตั้งแต่สีเหลืองเข้มจนถึงสีเขียวเหลืองอาจมีการสร้าง sclerotia เจริญได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-37 °C เชื้อรา *A. flavus* สามารถกระจายตัวได้ดีในธรรมชาติ ซึ่งมักพบในดินที่อยู่ในพื้นที่เขตร้อน ในการเก็บรักษาเมล็ด และพบในอาหารหลายชนิด บางครั้งอาจจะกระจายตัวไปยังที่ต่างๆได้โดยการนำพาของแมลงและสัตว์ จะเจริญได้หากได้รับความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตตามแหล่งอาหารต่างๆ

เนื่องจากกลุ่มของเชื้อรา *A. flavus* สามารถผลิตเอนไซม์พวก diastatic และ proteolytic ได้จึงมีการศึกษาเป็นจำนวนมากเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ เช่นในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวกับการผลิตถั่วเหลือง ในการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์จะใช้ข้าวบาร์เล่ย์ในการหมักโดยใช้เอนไซม์ที่สกัดได้จากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* เป็นเอนไซม์พวกย่อยแป้ง (amylolytic enzyme) เพื่อเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาลแซคาไรด์ ส่วน proteolytic enzyme ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิดย่อยโปรตีน ที่สกัดได้จากเชื้อรา *A. flavus* ถูกนำมาเตรียมการผลิตอุตสาหกรรมซอสถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์ถั่วเลืองหมักต่างๆ เป็นต้น มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ lypolytic ที่เชื้อรา *A. flavus* ผลิตได้ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในทางด้านการค้า ได้มีการเสนองานด้านวิจัยต่างๆ ของการผลิตสารปฏิชีวนะในเชื้อรา *A. flavus* บางสายพันธุ์ White (1940) อ้างโดย Keneth and Fennell (1965) รายงานว่าสารตั้งต้นบางชนิดที่เชื้อรา *A. flavus* ผลิตขึ้นมานั้นสามารถยับยั้งพวกเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้ ต่อมาในปี 1943 Waksman และ Bugie ได้พบว่า *A. flavus* และ *Aspergillus oryzae* สามารถสร้างสารยับยั้งแบคทีเรียได้สองชนิดคือ aspergillic acid และ สารตั้งต้นที่คล้ายกับ penicillin ยังมีงานวิจัยอีกมากมายในการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นำเชื้อรา *A. flavus* มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ นอกเหนือจากที่นำเสนอมา เช่น การนำเชื้อรา *A. flavus* มาสกัดวิตามิน สารกระตุ้นการเจริญเติบโต การสกัดสารสเตียรอยด์ การสกัดเพื่อให้ได้ไขมัน และโปรตีน เป็นต้น (Kenneth and Fennell, 1965)

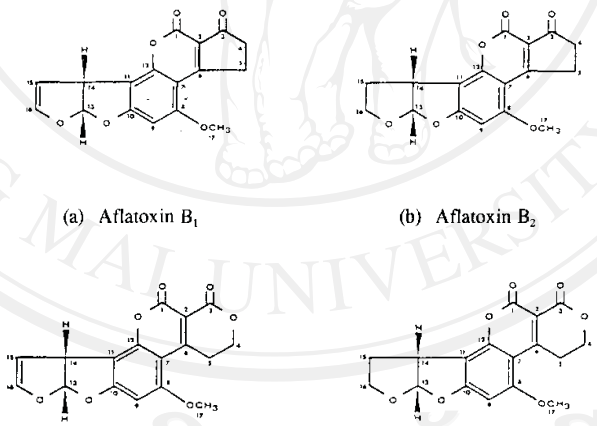
2.6 การเข้าทำลายของเชื้อรา *A. flavus* ในเมล็ด

เชื้อรา *A. flavus* เป็นสาเหตุของการเข้าทำลายในพืชไร่หลายชนิด เช่น ข้าวโพดและถั่วลิสง ซึ่งสามารถแพร่กระจายได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งยังสร้างสารพิษและมีวิวัฒนาการในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมส่งผลให้เกิดการติดเชื้อในร่างกายของมนุษย์(Leger *et al.,* 2000) *A. flavus* จะเข้าทำลายเมล็ดหากมีสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม(Richard and Payne, 2003) แหล่งของเชื้อราในชั้นปฐมภูมิที่มีศักยภาพมากที่สุดอยู่ในรูปสปอร์ของเชื้อรา (conidia) จะเกิดการปนเปื้อนไปกับเมล็ดตั้งแต่ก่อนการเก็บเกี่ยว ขณะเก็บเกี่ยว รวมถึงการปนเปื้อนจากเชื้อราที่แพร่กระจายทั่วไปในอากาศ (airborn) ติดไปกับภาชนะที่บรรจุ และปนเปื้อนติดไปกับแมลงในโรงเก็บ เพื่อความอยู่รอดแล้วสปอร์ของเชื้อราที่ติดไปกับพืชจะเคลื่อนตัวไปสู่ที่ที่เหมาะสมต่อการเจริญ ขบวนการเข้าทำลายเริ่มต้นเมื่อสปอร์ตกลงไปหรือติดไปกับส่วนของพืช หากสภาพแวดล้อมเหมาะสมจะก่อให้เกิดขบวนการทางชีวเคมีขึ้นมีผลทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อราเปลี่ยนแปลงไป และต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นจุดที่รับเชื้อจึงกลายเป็นจุดที่ติดเชื้อขึ้นมาเป็น infection unit ในเมล็ดข้าวโพดส่วนที่เป็น grem จะถูกทำเข้าทำลายสามารถสังเกตได้ เนื่องจากเชื้อรา *A. flavus* จะใช้เป็นแหล่งอาหาร(พันทิพา, 2547) เชื้อราเมื่อติดอยู่บนเมล็ดแล้วจะสร้างเอนไซม์ในการย่อยและทำลายเนื้อเยื่อผิวเมล็ด โดยอาจใช้วิธีผ่านผิวของชั้นนอกเมล็ดที่ชำรุดเสียหาย แต่หากสภาพสมบูรณ์ดี เชื้อสามารถเจริญผ่านขั้วเมล็ด และแทงผ่านรูเปิดทางธรรมชาติ หรือ micorpyle เข้าสู่เมล็ด ซึ่งเชื้อราจะลุกลามเข้าไปทีละน้อยเจริญไปที่ส่วน mycropyle end โดยเฉพาะตรงส่วนเนื้อเยื่อ peduncle ที่เสียหายชำรุดจะทำให้เชื้อเจริญเข้าสู่แหล่งสะสมอาหารของเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว(Mycock and Berjak, 1995) ในขั้นตอนการเข้าทำลายนั้นจะเริ่มจากส่วนที่เป็นสปอร์จะงอกออกมาเป็น germ tubes และงอกผ่าน cuticle ของพืชเข้าไปจะมีโครงสร้างหนึ่งเกิดขึ้น คือ มีการพองตัวเล็กน้อยของ germ tube และมีสารเหนียวเคลือบอยู่รอบนอกเป็นชั้นบางๆ โครงสร้างนี้เรียกว่า infection structure หรือ appressoria ซึ่งอาจแตกสาขาได้ตรงจุดที่เข้าทำลาย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถสร้างโครงสร้างดังกล่าวได้ถ้า hyphae สัมผัสพื้นผิว(Vijenda and James, 1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 สารพิษอะฟลาทอกซิน

อะฟลาทอกซินเป็นกลุ่มของสารพิษที่มีอยู่ทั้งหมด 16 ชนิดที่สำคัญมีอยู่ 4 ชนิด คือ B1, B2, G1 และ G2 มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 2.2 ชนิดที่มีความรุนแรงของพิษและพบมากคือชนิด B1 มีคุณสมบติละลายได้ในเมธานอลและคลอโรฟอร์ม ทนต่อความร้อนสูงมาก ไม่ถูกทำลายหรือเสื่อสลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า 260 °C แต่การอบ (roasting) จะลดปริมาณอะฟลาทอกซินลงได้ การ autoclave ในสภาพแอมโมเนีย หรือไฮโปคลอไรด์ สามารถทำลายอะฟลาทอกซินได้ โมเลกุลของอะฟลาทอกซินที่มี lactone ring จะไวต่อการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง ซึ่งลักษณะนี้สำคัญในขบวนการแปรรูปอาหารที่มีด่าง เพราะทำให้ลดการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์ แต่ในสภาพที่มีด่างเจือจาง การ acidification ทำให้ปฏิกิริยาผันกลับไปเป็นอะฟลาทอกซินเริ่มต้นอีก (เมทนีและคณะ, 2531) อะฟลาทอกซินสามารถตรวจหาได้โดยดูสมบัติการเรืองแสงสีน้ำเงิน หรือเขียว ภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต ช่วงความยาวคลื่น 365 nm



ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารพิษอะฟลาทอกซินที่สำคัญทั้ง 4 ชนิด
(ที่มา: FAO Corporate Document Repository (no date))

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การเปลี่ยนแปลงเมื่อสารพิษเข้าสู่ร่างกาย กระบวนการของการเปลี่ยนแปลงอะฟลาทอกซิน B1 ที่ตับเปลี่ยนไปเป็น aflatoxicol และ aflatoxicol H_1 โดยผ่านทาง aflatoxin Q_1 ดังแสดงในรูปนั้น แตกต่างจาก biotransformation อื่นๆ ซึ่งถูกกระตุ้นโดย liver microsomal enzymes เนื่องจากมี cytoplasmic NADH-dependent dehydrogenase มาเกี่ยวข้อง และสามารถยับยั้งการเกิด Aflatoxicol โดยฮอร์โมนเพศ 17-ketosteriod การผันกลับของ aflatoxicol (ซึ่งคาดไว้ว่าจะให้ “Metabolic reservoir” ของอะฟลาทอกซิน) มีความสัมพันธ์กับความไวต่อการชักนำให้เกิดเนื้องอกที่ตับ และปัจจุบันยอมรับว่า epoxide ของอะฟลาทอกซิน B_1 นั้นเป็น bacterial mutagen และ proximal carcinogen

ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดเพื่อความปลอดภัยในการบริโภคอาหารที่มีพิษปนเปื้อน โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย ซึ่งประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 พ.ศ. 2529 ได้กำหนดให้มีการยอมรับการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในอาหารและผลิตภัณฑ์ได้ไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม หรือ 20 พีพีบี(กระทรวงสาธารณสุข, ไม่ระบุปีที่ตีพิมพ์)

2.8 การป้องกันกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ด

2.8.1 วิธีทางเคมี

การรมก๊าซ ช่วยลดกระบวนการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสปอร์เชื้อราที่ติดมากับเมล็ดได้ ก๊าซที่ใช้รมทั่วไปเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน โอโซน methyl bromide phosphine ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ในการรมข้าวโพดต้องเริ่มรมตั้งแต่หลังการกะเทาะเมล็ดภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง จึงจะช่วยรักษาคุณภาพของข้าวโพดที่มีความชื้นอยู่ระหว่าง 20-30 เปอร์เซ็นต์ได้ 10 วัน เป็นอย่างต่ำ หลังจากนั้นต้องนำมาลดความชื้นให้เร็วที่สุด เพราะการรมก๊าซไม่สามารถทำลายสปอร์เชื้อราได้ กระบวนการรมก๊าซเริ่มจากนำข้าวโพดมากองไว้ปรับผิวกองให้เรียบเสมอ เพื่อลดช่องว่างระหว่างผิวกองกับผืนพลาสติก จากนั้นคลุมผิวกองด้วยแผ่นพลาสติกขนาดใหญ่ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.1 มิลลิเมตร แล้วทับปลายพลาสติกเพื่อปิดกองข้าวโพดให้มิดชิดรอบกอง ต่อท่อจากถังก๊าซเข้าไปในกอง โดยให้ก๊าซอัตรา 0.5 กิโลกรัมต่อเมล็ด 1 ตัน(วีรวัฒน์, 2547) วีรวัฒน์และคณะ(2540) ทำการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการรมก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* และสารแอฟลาทอกซินในข้าวโพดความชื้นสูง พบว่าการรมกองข้าวโพดด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตรา 0.5 กก./เมล็ด 1 ตัน รมกองข้าวโพดที่มีความชื้นโดยเฉลี่ย 24.7 % หลังจากกะเทาะมาแล้ว 1 วัน สามารถเก็บรักษาข้าวโพดได้นานถึง 15 วัน โดยไม่พบการเจริญของเชื้อรา *A.flavus* เมื่อตรวจดูด้วยตาเปล่า อุณหภูมิภายในกอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

คงที่(30 องศาเซลเซียส) และเมื่อทำการรมด้วยก๊าซไนโตรเจนแล้ว การปนเปื้อนของเชื้อสารอะฟลาทอกซินไม่เพิ่มขึ้นแม้ในขณะเริ่มต้นทดลองจะมีการปนเปื้อนอยู่บ้าง Stephen *et al.* (2001) รายงานถึงประสิทธิภาพของการรมโอโซนเพื่อการเก็บรักษาเมล็ดข้าวโพดเนื่องจากโอโซนสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีที่ติดมากับเมล็ดได้ดี ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา มีการใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ไม่มีสารพิษตกค้าง และไม่มีกลิ่นอีกด้วย

การคลุกเมล็ดด้วยสารเคมี วิธีนี้เหมาะสำหรับเมล็ดที่จะนำไปใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ ไม่นิยมใช้กับเมล็ดที่จะนำเป็นอาหาร การคลุกสารเคมีกับเมล็ดพันธุ์อาจทำให้เสียต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น แต่ให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่ามากกว่า เนื่องจากสามารถป้องกัน ความเสียหายจากโรคและแมลงในโรงเก็บได้ ทำให้เก็บรักษาเมล็ดได้เป็นระยะเวลานาน สารเคมีที่ใช้ป้องกันเชื้อราในโรงเก็บ ได้แก่ benomyl, botran, captan, thiram, TCMTB และPCNB ฯลฯ ซึ่งป้องกันเชื้อ *Alternaria, Fusarium, Helmithosporium*, *Macrophomina* และ *Rhizopus* อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารเคมีคลุกเมล็ดควรระมัดระวังผลที่จะเกิดกับการเสื่อมความงอกของเมล็ดด้วย เพราะสารเคมีบางชนิดแม้จะกำจัดเชื้อราได้ดี แต่ก็อาจทำลายความงอกของเมล็ดได้(วันชัย, 2542) Moreno-martínez *et al.* (1998) ได้ศึกษาถึงผลของสารป้องกันเชื้อราเพื่อการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลีที่มีความชื้นเมล็ดสูงและความชื้นในเมล็ดต่ำพบว่า สาร chloratalonil, captan และ corboxin+captan สามารถป้องกันเชื้อราในโรงเก็บได้ดี ยืดอายุการเก็บรักษาเมล็ดได้นานถึง 6 เดือน อีกทั้งยังสามารถป้องกันการงอกของเมล็ดระหว่างการเก็บรักษา และไม่ส่งผลกระทบต่อความงอกของเมล็ดอีกด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Noëlani *et al.* (2001) ที่ต้องการทดสอบสารที่ให้ผลดีที่สุดสำหรับลดเชื้อ *Alternaria cassiae* ที่ติดมากับเมล็ด cowpea พบว่า การใช้ captan ในอัตราที่แนะนำคือ 30g/l0l ให้ผลในการลดเชื้อราได้ดีที่สุด

2.8.2 วิธีเชิงกล

Hot-water Treatment การแช่เมล็ดในน้ำร้อนเป็นการควบคุมเชื้อโดยเฉพาะแบคทีเรียและไวรัสที่ติดมากับเมล็ด เป็นวิธีการในการควบคุมที่ดีที่สุด โดยต้องพิจารณาถึงสภาพของเมล็ดที่ต้องการกำจัดเชื้อ เมล็ดบางชนิดอาจใช้วิธีการแช่ในน้ำร้อนไม่ได้ เช่น ถั่วเหลือง และLegumes เหล่านี้มีเปลือกห่อหุ้มซึ่งจะดูดซับน้ำเข้าไป ทำให้เปลือกหลุดออกได้ง่ายเมื่อโดนน้ำ จึงจำต้องใช้สารเคมีในการกำจัดเชื้อที่ติดมาแทน วิธีนี้เหมาะสำหรับเชื้อที่ติดมากับเมล็ดและฝังตัวอยู่ลึกภายในซึ่งไม่สามารถกำจัดโดยวิธีอื่นได้ การจุ่มเมล็ดลงในน้ำร้อนต้องศึกษาวิธีการเหมาะสมกับชนิดของเมล็ดและชนิดของเชื้อก่อนทำ(vijendra and james, 1987) ในการป้องกันเชื้อ *Fusarium* ในเมล็ดบาเล่ย์เพื่อใช้ในกระบวนการ malting มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเชื้อราชนิดนี้สามารถสร้าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารอะฟลาทอกซินได้ Kottapalli and Wolf-Hall(2008) ได้ทำการศึกษาผลการใช้ Hot-water Treatment เพื่อกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ malting เนื่องจาก *Fusarium graminerarum* สามารถผลิตสาร deoxynivalenol หรือที่เรียกว่า vomitoxin ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดสารพิษ mycotoxin หากตรวจพบว่ามีสารชนิดนี้ปนเปื้อนเกิน 1 μg/g ในข้าวบาเล่ย์จะไม่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเบียร์ได้ จากการทดลองพบว่าการจุ่มเมล็ดลงในน้ำร้อนอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลานาน 20 นาที จะช่วยกำจัดเชื้อที่ติดมาได้ แต่มีผลทำให้คุณภาพของการทำ malting ลดลง หากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 50 °C ในทางตรงกันข้ามความร้อนและระยะเวลาที่ให้กับเมล็ดบาเล่ย์มีผลทำให้สาร deoxynivalenol ที่ตรวจพบลดลงมีค่าการปนเปื้อนไม่ถึง 0.5 μg/g

การใช้ลมร้อน การใช้ความร้อนในการจำจัดเชื้อราเป็นวิธีเชิงกลที่ใช้กันทั่วไปกับเมล็ดพืชต่างๆที่ติดมาจากแปลงปลูกและระหว่างการเก็บเกี่ยว การลดความชื้นของเมล็ดก็เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณเชื้อ Kristensen *et al.*(2005) ได้ทดลองการใช้ลมร้อนในการลดความชื้นกับข้าวไรย์เพื่อลดปริมาณเชื้อราทั่วไปที่ติดมากับเมล็ด โดยควบคุมอุณหภูมิเครื่องลดความชื้นแบบ drum dry ซึ่งพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิที่ 64 °C เป็นเวลา 10.5 นาที สามารถลดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดได้ถึง 99% อีกทั้งยังสามารถลดความชื้นของเมล็ดจาก 17-18% ให้ลดลงเหลือ 12% ได้ เมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพของแป้งต่อการอบพบว่าคุณภาพของแป้งไม่เปลี่ยนแปลง หากใช้อุณหภูมิไม่เกิน 70 °C

2.8.3 การใช้รังสี

การนำรังสีเข้ามาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดมีอยู่แพร่หลาย โดยการใช้รังสีต่างๆเช่น รังสีแกมม่า รังสียูวี จะช่วยลดจำนวนชนิด และการเจริญเติบโตของเชื้อราได้มาก เช่น การใช้รังสีแกมม่าอัตรา 2-5 เมกกาแรดกับเมล็ดข้าวสาลี ซึ่งมีความชื้นสูง 19% พบว่าสามารถเก็บข้าวสาลีได้เป็นเวลานาน 3 เดือน(สมบัติ, 2536) Ramakrishna *et al.*(1991) ได้ใช้รังสีแกรมมาเพื่อทำความสะอาดบริเวณผิวของเมล็ดบาเล่ย์ พบว่ารังสีแกมม่าที่อัตราตั้งแต่ 4 kGy สามารถกำจัดเชื้อรา *Alternaria, Fusarium* และ *Epicoccum* แต่เมื่อทำการทดสอบความงอกของเมล็ด การให้รังสีแกมม่าตั้งแต่ 8 kGy ความงอกลดลงตามลำดับ

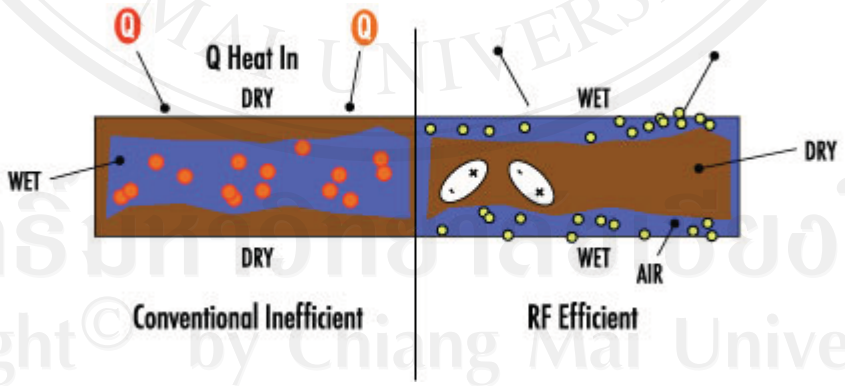
2.9 หลักการการทำงานเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

คลื่นความถี่วิทยุที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นความร้อนได้ถูกนำมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆมาเป็นระยะเวลานาน ตั้งแต่ที่ได้มีการค้นพบว่าคลื่นความถี่วิทยุสามารถให้พลังงานความร้อนกับวัสดุได้โดยตรง อีกทั้งยังมีความได้เปรียบกว่าการใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น ช่วยลดระยะเวลากระบวนการผลิต ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น การออกแบบความถี่วิทยุที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นความ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ร้อน ต้องอาศัยหลักการออกแบบเครื่อง การวางกระแสไฟฟ้าสลับที่ใช้เป็นตัวกำเนิดพลังงานพร้อมอุปกรณ์ติดตั้งอื่นๆ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งถึงประสิทธิภาพของการให้ความร้อนแก่วัสดุ และเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งาน

ความแตกต่างระหว่างการให้ความร้อนโดยทั่วไปกับความร้อนที่ได้จากRF ลักษณะของความร้อนโดยทั่วไป ความร้อนจะเป็นตัวเคลื่อนพาความชื้นบริเวณผิวหน้าวัสดุ จากนั้นจะเป็นกระบวนการนำความร้อนสู่ภายในวัสดุ ทำให้บริเวณภายนอกของวัสดุร้อนแห้ง แต่ภายในยังคงเย็นชื้น เนื่องจากบริเวณผิวหน้าวัสดุมีช่องว่างเล็กๆเพื่อให้ของเหลวผ่านไปมา เมื่อโดนความร้อนช่องว่างจึงถูกปิดลงจนน้ำภายในไม่สามารถไหลผ่านออกมาได้ เมื่อให้ความร้อนไปนานๆจะทำให้บริเวณผิวหน้าวัสดุแตกแยกออกจากกัน สารเคลือบผิวเป็นรอยขรุขระ เกิดการรั่วไหลของสารละลายภายในสู่ภายนอก และมีขนาดลดลง เป็นต้น แตกต่างจากความร้อนที่ได้จากRF จะเข้าไปทำให้ร้อนในระดับโมเลกุลโดยที่ความร้อนจะเกิดขึ้นจากภายในสู่ผิวนอกวัสดุ ทำให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง พลังงานที่ปล่อยออกมาจะเข้าไปทำให้ภายในวัสดุจะได้รับความร้อนเร็วกว่าบริเวณผิว คลื่นจะเข้าไปให้ความร้อนแล้วขับน้ำจากภายในออกมาสู่ภายนอก ความชื้นผ่านออกจากวัสดุเข้าสู่จุดสมดุล ไม่ทำให้เกิดการ overheating ซึ่งบริเวณผิวของวัสดุยังคงระเหยน้ำออกมาได้ ดังภาพที่ 2.3(PSC A litzler Company, 2003)



Differences between RF and conventional heating

ภาพที่ 2.3 ความแตกต่างของการให้ความร้อนแบบทั่วไปและการให้คลื่นความถี่

(ที่มา: PSC A litzler Company (2003))

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนจะมีช่วงความถี่คลื่นอยู่ที่ 300kHz ถึง 300 GHz คลื่นความถี่วิทยุ (RF) อยู่ในช่วง 300 kHz ถึง 300 MHz ส่วนคลื่นไมโครเวฟ (MF) จะอยู่ที่ 300 MHz ถึง 300 GHz ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่2.1 ช่วงคลื่นความถี่ที่ให้ความร้อน

Dielectric heating frequency ranges	
300-3000 kHz	Medium frequency (MF)
3-30 MHZ	High frequency (HF)
30-300 MHz	Very high frequency (VHF)
300-3000 MHz	Ultra high frequency (UHF)
3-30 GHz	Super high frequency (SHF)
30-300 GHz	Extremely high frequency (EHF)

ความแตกต่างระหว่าง RF และ คลื่นไมโครเวฟ (MW) อยู่ที่ RF มีแหล่งพลังงานที่มาจากขั้ว electrode ขณะที่คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนโดยการกระจายคลื่นและสะท้อนกลับไปมากับวัตถุ ซึ่ง RF ทำงานได้ดีกว่าเนื่องจากมีช่วงคลื่นที่สั้นมีการนำไอออนที่มากกว่า ที่ช่วงคลื่น 27.12 MHz คลื่นสามารถทะลุทะลวงชั้นวัตถุได้มากถึง 10 เมตร

ความถี่คลื่นที่อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์จะถูกจำกัดช่วงคลื่นที่กำหนดไว้แล้วเท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในการสื่อสาร ช่วงคลื่นที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมได้คือ 13.56 MHz (ศูนย์กลางคลื่น 22 เมตร) 27.12 MHz (ศูนย์กลางคลื่น 11 เมตร) 40.68 MHz (ศูนย์กลางคลื่น 7.3 เมตร) 915MHz (ศูนย์กลางคลื่น 32.8 เซนติเมตรเมตร) 2450 MHz (ศูนย์กลางคลื่น 12.2 เซนติเมตรเมตร) 5800 MHz (ศูนย์กลางคลื่น 5.2 เซนติเมตรเมตร) 24124 GHz (ศูนย์กลางคลื่น 1.24 เซนติเมตรเมตร)

คลื่นความถี่วิทยุมีหลักการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดพลังงาน (generator) ที่เกิดจากขั้ว electrode 2 ข้าง เมื่อนำวัตถุใส่เข้าไประหว่างขั้วทั้งสองจะทำให้โมเลกุลชนิดที่มีขั้วภายในวัตถุเกิดการสั่นสะเทือนและเสียดสีกันอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้วัตถุเกิดความร้อนขึ้นภายในตัววัตถุเอง(RF Technology, 2006) น้ำภายในวัตถุจะเกิดการเคลื่อนที่และหมุนตัวกลับไปมาอย่างรวดเร็วตามระดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งในคลื่นความถี่วิทยุมีการเคลื่อนที่ของประจุ 3-300 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที ส่งผลให้ความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันของน้ำในวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-3 วินาที หรือประมาณ 1 นาทีหลังได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ปริมาณความร้อนที่ให้กับวัตถุขึ้นอยู่กับความถี่ จำนวนโวลท์ของกระแสไฟที่ใช้ ขนาดของวัตถุ และการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าภายในวัตถุ

2.10 การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ

2.10.1 การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์อาหาร ได้มีการนำเอาคลื่นความถี่วิทยุมาประยุกต์ใช้ในการ sterilize และ pasteurize กับอาหาร เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุนั้นสามารถทำได้รวดเร็ว ประหยัดเวลาและให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนอื่น สามารถตรงเข้าไปทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับอาหารให้หมดไปได้ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีกระบวนผลิตเป็นจำนวนมาก ความได้เปรียบในการใช้ RF กับความร้อนทั่วไปคือ สามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ตรงเข้าไปให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ได้ลึก จึงสามารถให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก และความร้อนสามารถกระจายได้ทั่วทุกจุด เช่น ในอุตสาหกรรมเพื่อการ pasteurize นม Awuah *et al*.(2004) ประสบความสำเร็จในทดลองการให้ความร้อนจาก RF เพื่อใช้ในการกำจัดเชื้อ *Escherichia coli* และ *Listeria innocua* ที่มีอยู่ในน้ำนมด้วยระยะเวลาอันสั้น

2.10.2 การประยุกต์ใช้ด้านการเกษตร แนวทางการประยุกต์ใช้ RF สำหรับผลิตผลทางการเกษตรโดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. การปรับสภาพเมล็ดพันธุ์ (seed treatment) มีการใช้ RF เพื่อทดแทนกรรมวิธีดั้งเดิม และทดแทนการใช้สารเคมีต่างๆที่ใช้คลุกเมล็ดพันธุ์ได้ และมีข้อจำกัดได้เปรียบที่ใช้เวลาน้อยและไม่มีสารเคมีตกค้างในเมล็ด เช่น เมล็ดพันธุ์พืชบางชนิดที่มีการพักตัวแบบที่เปลือกหุ้มเมล็ดไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (impermeability seed coat) เช่นเมล็ดถั่ว alfalfa สามารถใช้ RF ทดแทนการใช้ heat treatment ในการแก้การพักตัวได้ และสำหรับพืชปลูกโดยทั่วไปเช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และฝ้าย เป็นต้น การใช้ RF treatment จะทำให้เพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้ สำหรับการใช้ RF เพื่อการทำลายเชื้อราและแบคทีเรีย ที่ติดมากับเมล็ด (seed decontamination) ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางและประสบผลสำเร็จในการทำลายเชื้อราบางชนิดที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ ทดแทนการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย การควบคุมแมลงขณะเก็บรักษา (Stored-grain insect control) สามารถทดแทนกระบวนการรมเมล็ดด้วยสารเคมี (fumigation) ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในผลผลิต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. กระบวนการผลิต (product Processing) มีความพยายามหาวิธีการใช้ RF เพื่อปรับปรุงคุณภาพผลผลิต เช่น ในถั่วเหลืองซึ่งมักพบว่ามี Trysin inhibitor เป็นองค์ประกอบซึ่งถ้าจะนำมาเป็นอาหารคนหรือสัตว์จำเป็นจะต้องกำจัดออกให้หมดเพื่อให้ได้คุณค่าอาหารอย่างเต็มที่ Borchers *et al*., 1972; Nelson *et al*., 1981 ประสบความสำเร็จในการทำลาย Trypsin inhibitor โดยใช้ RF และยังทำให้ Lipoxygenase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้รสชาติของอาหารไม่ดี (off-flavors) หายไปด้วย แต่ยังคงพบ Peroxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีประโยชน์ไม่สูญหายไปในระหว่างการให้ RF

3. การใช้ RF เพื่อวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของผลิตผล (Use of dielectric properties for measurement) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลผลิตนั้นมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับคุณภาพต่างๆของผลผลิตเช่น ความชื้น (moisture content) ความหนาแน่น (density) ดังนั้นเมื่อเราทราบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลิตผล เราสามารถประมาณคุณภาพของผลิตผลได้ Nelson and Stetson (1984) ได้พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อ RF ของข้าวสาลี มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งยวดต่อความหนาแน่นของแป้งที่ได้จากข้าวสาลีนั้น

อย่างไรก็ตามการใช้ RF กับผลิตผลทางการเกษตรต่างๆยังมีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความชื้นของผลผลิต (moisture content) อุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้ผลผลิตสูญเสียคุณภาพ (lethal temperature) ความถี่ของคลื่น RF ที่ใช้ กำลังไฟฟ้า (electric power) ระยะเวลา (processing time) ปริมาณตัวอย่าง (sample size) ดังนั้นการประยุกต์ใช้ RF เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆยังจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาโดยละเอียดต่อไป(ณัฐศักดิ์, 2549)

2.11 การเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ดเมื่อได้รับความร้อน

2.11.1 การลดลงของความชื้น

น้ำในอาหารแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ น้ำอิสระ (free water) และน้ำเกาะติด (bound water) น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำที่มีสารอื่นๆ ละลายอยู่หรือแขวนลอยอยู่น้ำชนิดนี้จะอยู่รอบๆเซลล์หรืออยู่ภายในเซลล์เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่พบในอาหาร และสามารถแยกออกจากองค์ประกอบอื่นๆ ของอาหารได้ง่าย เช่น การระเหยจากการอบแห้ง การสกัดหรือคั้นออกจากอาหารได้ง่าย ส่วนน้ำเกาะติด (bound water) เป็นน้ำที่จับ เกาะ หรือยึดอยู่กับโครงสร้างของสารอาหารอื่น แยกออกจากอาหารได้ยาก เกาะจับกับสารอื่นด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรง เช่น น้ำในผลึก เป็นต้น น้ำชนิดนี้ไม่สามารถเป็นตัวทำละลายของสารอาหารอื่น และมีความหนาแน่นมากกว่า น้ำอิสระ น้ำชนิดนี้อาจแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

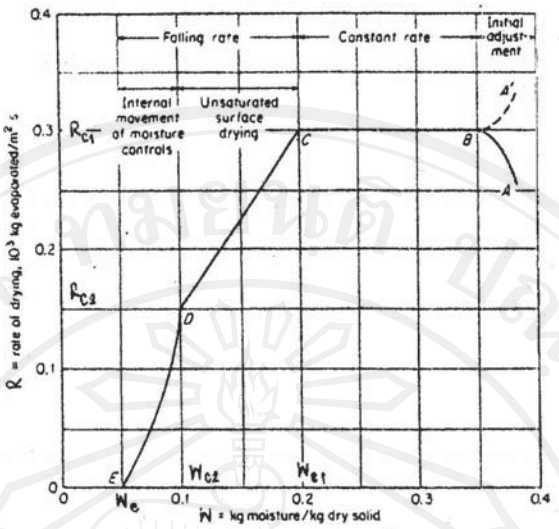
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- โมโนเลย์ หรือโมเลคคิวลาร์เลย์ (Monolayer or Molcular layer) น้ำชนิดนี้เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่ออาหาร โดยเกาะติดกับอาหารเป็นส่วนแรกด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก จนไม่สามารถกำจัดออกด้วยความร้อนปกติ น้ำส่วนนี้ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ไม่ละลายสารอาหารอื่น ไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ได้
- มิลลิเลย์หรือมัลติโมเลคคิวลาร์เลย์ (Multilayer or Multimolcular layer) เป็นน้ำในอาหารที่เกาะอยู่กับน้ำส่วนแรก มีคุณสมบัติเป็นตัวกระจายสารอาหารอื่นได้ ทำให้มีผลต่อความดันของไอของอาหาร แต่เป็นน้ำที่จุลินทรีย์ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ การกำจัดน้ำส่วนนี้ยังคงต้องใช้พลังงานมากกว่าปกติ
- น้ำในแคพพิลลารี่ (Capillary water) เป็นน้ำที่เกาะติดอยู่กับน้ำในส่วนที่สองอย่างหลวมๆ จุลินทรีย์บางชนิดที่ต้องการความชื้นต่ำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และมีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีบางชนิด เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด เป็นต้น(DeMan, 1990)

การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (heat and mass transfer) ในการระเหยของน้ำ จะเกิดทั้งการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยการถ่ายเทความร้อนจะเกิดภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์เนื่องมาจาก temperature gradient ระหว่างผิวหน้าผลิตภัณฑ์และผิวหน้าของน้ำในผลิตภัณฑ์ ปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทสู่น้ำเมื่อมากเพียงพอก็จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำได้ gradient จะทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างระหว่าง vapor pressure ที่ผิวหน้าน้ำ และ vapor pressure ของอากาศที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะเกิดที่ระดับโมเลกุล เป็นแบบการนำ (conduction) การถ่ายเทมวลสารจะแปรผันกับการแพร่ในระดับโมเลกุลของไอน้ำในอากาศที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ จะเกิดขึ้นโดยการพา (convection)

ในทฤษฎีของการทำแห้งอาหารเมื่อได้รับความร้อนกล่าวว่า เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่2.4 กราฟอัตราการแห้ง (จุด E คือความชื้นสมดุล , W_e)

(ที่มา: Geankoplis (2003))

ภาพที่2.4 แสดงกราฟอัตราแห้งซึ่งเป็นกราฟระหว่างอัตราการแห้ง (drying rate) และความชื้นในสารนั้น (moisture content ,W) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (initial adjustment period) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในอาหารปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อน อัตราการแห้งจะต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ จากรูปที่1 คือ ช่วง AB ซึ่งถือว่าเป็นช่วงสั้นๆ สามารถตัดทิ้งได้เมื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time) ส่วนช่วง A′B เป็นกรณีที่บริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรกจะสูงและค่อยๆลดลงจนคงที่

2. ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นช่วงที่น้ำในอาหารระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่อง คล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสมดุล ซึ่งน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก(Geankoplis, 2003)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.11.2 โปรตีนเสื่อมสภาพ

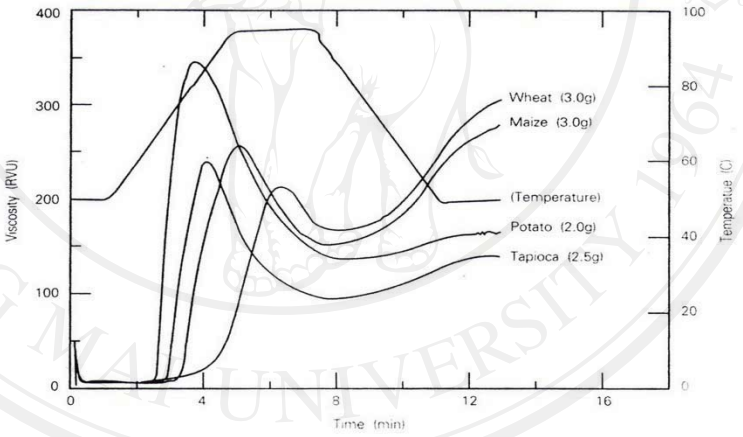
พืชสามารถสังเคราะห์โปรตีนได้เองโดยอาศัยการใช้ประโยชน์จากแหล่งไนโตรเจนอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรต และไนไตรต์ เปลี่ยนเป็นไนโตรเจนอินทรีย์ได้ โมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วยธาตุต่างๆ คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน โปรตีนบางชนิดมีฟอสฟอรัสเล็กน้อย หน่วยที่เล็กที่สุดในโมเลกุลของโปรตีน เรียกว่า กรดอะมิโน (amino acid) โปรตีนจึงเป็นโพลีเมอร์ของกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) เป็นสายยาวเรียกว่า สายโพลีเพปไทด์ (polypeptide chain) พันธะเพปไทด์จัดเป็นพันธะเอไมด์ (amide bond) ชนิดหนึ่ง โปรตีนโมเลกุลที่มีโครงสร้างขั้นต้น (primery structure) จะประกอบด้วยกรดอะมิโนต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ระหว่างกลุ่มคาร์บอซิล (COOH) ของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับกลุ่มแอลฟา-อะมิโน(NH_2)ของกรดอะมิโนตัวต่อไป ซึ่งชนิดของกรดอะมิโนนี้มีประมาณ 18 ชนิดที่พบในเมล็ดธัญพืช สัดส่วนและลำดับการต่อกันของโปรตีนแตกต่างกัน ทำให้โปรตีนมีคุณสมบัติต่างๆ(อรอนงค์, 2532) เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนจะเกิดการสูญเสียความสามารถในการถูกละลายหรือกิจกรรมของเอนไซม์เปลี่ยนไปเนื่องจากการหดตัวของสายเพปไทด์ของโปรตีน เมื่อโปรตีนเกิดการเสียสภาพอาจคืนสภาพได้หรือเกิดการเสียสภาพอย่างถาวร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพความร้อนที่โปรตีนได้รับ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อจำนวนพันธะโมเลกุลของโปรตีนที่เชื่อมต่อกันอย่างหลวมๆส่งผลให้พันธะเพปไทด์ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นโครงสร้างเป็นรูปแบบเกลียว (alfha-helix หรือ tertiary structure) ก่อตัวกันเป็นก้อนสามารถยืดหยุ่นได้ เกิดแตกออกจากกันระหว่างพันธะทำให้โครงร่างโปรตีนที่เกาะกันอยู่เป็นกลุ่มแตกกระจายอยู่ในสารละลาย หากกระบวนการให้ความร้อนกับโปรตีนหยุดลงในขั้นตอนนี้ โปรตีนสามารถคืนรูปให้อยู่ในโครงร่างโปรตีนเดิมได้โดยไม่เสียสภาพอย่างถาวร แต่ถ้าหากยังให้ความร้อนต่อไปอีกพันธะไฮโดรเจนที่เกาะกันเป็นโครงร่างโปรตีนที่ขดตัวกันอยู่จะเริ่มแตกออกจากกัน ขณะที่พันธะแตกออกน้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาและก่อตัวเป็นพันธะเพปไทด์ใหม่กับกลุ่มเอไมด์และกลุ่มคาร์บอซิล พวกที่เป็นกลุ่ม hydrophobic แตกออกสู่สารละลาย ผลของการก่อตัวใหม่ของกลุ่มพันธะไฮโดรเจนและกลุ่ม hydrophobic ที่เพิ่มมากขึ้น น้ำจะเข้าไปรวมตัวกับโมเลกุลของโปรตีน ทำให้โปรตีนคลายตัวและเกิด hydrodynamic ภายในโมเลกุลเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความความหนืดเพิ่มขึ้น มีผลทำให้โปรตีนที่เกาะกันเป็นร่างแหแตกออกเป็นโปรตีนขนาดเล็ก ซึ่งไม่มีพลังงานไปเกาะกลุ่มกับพวกที่มีขั้ว ในขณะที่กลุ่ม hydrophobic แตกตัวแยกออกจากกันในสารละลาย เสร็จแล้วโปรตีนจึงบิดตัวเป็นเกลียวดังเดิม ซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง โปรตีนที่ก่อเกิดการรวมตัวหลังได้รับความร้อนจะเกาะกันอย่างหลวมๆเกลียวของโปรตีนที่ขดก็จะยืดตัวเป็นสายยาว ซึ่งมีสภาพแตกต่างจากโปรตีนตามธรรมชาติ (Lapanje, 1978) การเสียสภาพของโปรตีนเนื่องจากความร้อน จะเกิดการแข็งตัวกลายเป็นเจลหรือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกิด coagulation โปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติจะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในกระเพาะและลำไส้เล็ก และถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ดีกว่าโปรตีนที่อยู่ในสภาพหรือไม่ผ่านความร้อน(นิธิยา, 2549)

2.11.3 การเปลี่ยนแปลงของแป้ง

การเกิดความหนืดเมื่อแป้งได้รับความร้อน ซึ่งความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติความหนืดที่แตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 2.5 ความหนืดที่เกิดขึ้นของน้ำแป้ง เมื่อให้ความร้อนและมีการกวนหรือคนอย่างสม่ำเสมอ จากอุณหภูมิ 50°C ไปถึง 95°C และคงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 2.5 นาที จึงลดอุณหภูมิลงเป็น 50°C อีกครั้ง จะเห็นว่าแป้งแต่ละชนิดจะให้ลักษณะ (profile) ของความหนืดแตกต่างกัน โดยวัดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA)



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง

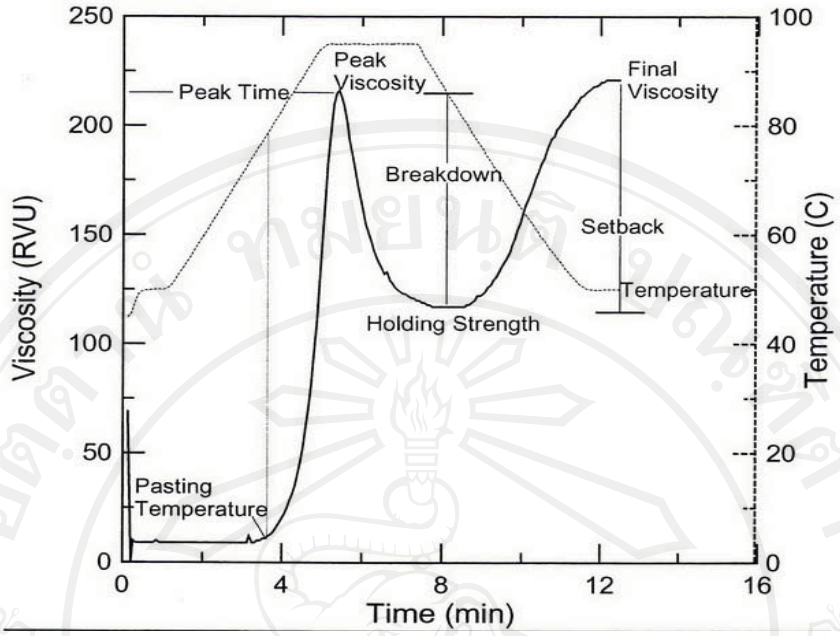
(ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd., 1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วิธีการวัดความหนืดสามารถทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆกัน ดังนี้

- การใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบรูคฟิล์ด (Brookfield viscometer) สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้จะคูณด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดเครื่อง ค่าที่วัดได้จากเครื่องนี้จะมีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (centipoise)
- การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Cappillary viscometer) สามารถใช้ความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆเท่านั้น มีหน่วยของความหนืดเป็น mPa.s
- การใช้เครื่องบราเบนเดอร์ อะมิโลสกราฟ (Brabender amylograph) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็น centipoises ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 centipoise ความหนืดค่าต่างๆ จะแสดงให้เห็นลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด
- Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อน และเย็นได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้จึงทำให้สามารถหา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ได้ภายในระยะเวลาอันสั้น (13 นาที)ได้ เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดแสดง ดังภาพที่ 2.5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



(ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd., 1998)

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ ในหน่วย % หรือ RVU ดังนี้

(1) Peak time เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที

(2) Pasting temperature อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

(3) Peak temperature อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

(4) Peak viscosity ความหนืดที่ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU

(5) Holding strength ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU

(6) Breakdown ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

(7) Final viscosity ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU

(8) Setback from peak ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU

(9) Setback from trough ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การเกิดเจลาทิไนเซชัน โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) เป็นจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช การเกิดเจลาทิไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยืดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัดเจน เม็ดแป้งยังคงลักษณะรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวและผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาทิไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกสารใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินเกิดขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆได้ดีกว่า

ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างเจลาทิไนซ์จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงที่สุด และมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืด (thickening power) สูงด้วย ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดแป้งมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะมิโลสและไขมันนอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

องค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอกันทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่างๆมีลักษณะการเกิดเจลที่แตกต่างกันไป การตรวจสอลการเจลาทิไนเซชันนอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้าง การบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เช่น Kofler gelatinization temperature range แล้วสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการซึ่งเครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (กล้าณรงค์และเกื้อกุล 2550)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ RF เพื่อการกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ด ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ดังเช่นการทดลองของ Akaranuchat *et al.* (2007) ที่ได้ศึกษาการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุกับข้าวบาเล่ย์ เพื่อลดเชื้อราที่เป็น seed-borne fungi ที่สำคัญได้แก่ *Aspergillus flavus, Alternaria sp., Penicilium sp.* และ *Rizopus sp* ในระดับอุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน พบว่าการให้คลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เชื้อลดลงมากที่สุด โดยยังคงเหลือเชื้อเพียง16.7, 0,0 และ 0% ตามลำดับ ซึ่งเชื้อราพวก *Aspergillus flavus* ในการทดลองไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ เนื่องจากเชื้อราชนิดนี้ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง สอดคล้องกับการทดลองของกรกิตติ์ (2552) ที่ต้องการกำจัดเชื้อรา *Aspergillus flavus* ซึ่งเข้าทำลายเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ระหว่างการเก็บรักษาเพื่อรอการจำหน่าย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งให้ความร้อนเพื่อการกำจัดเชื้อรา แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้เช่นกัน เนื่องจากการให้ความร้อนกับเมล็ดพันธุ์มีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อการงอกของเมล็ดได้ จึงได้เสนอว่าควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการกำจัดเชื้อรา *A. flavus* ที่ก่อปัญหาในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ระหว่างการเก็บรักษาเพื่อนำมาผลิตเป็นอาหารสัตว์ เพราะสามารถใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงได้

ปรัชญาและคณะ (2549) เสนองานทดลองที่เกี่ยวกับระดับความชื้นภายในเมล็ดที่มีผลต่อกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ RF ซึ่งว่าด้วยเรื่องการเป็น dielectric power คือพลังงานจะผ่านเข้าไปได้ต้องมีตัวกลางในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ซึ่งในเมล็ดพืชต่างๆมีน้ำเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ จึงได้ทดสอบการกำจัดเชื้อราโดยนำเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้น 2 ระดับ คือ 10.5% และ 14% มาผ่านคลื่นความถี่วิทยุ จนมีอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C เป็นเวลา 10

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นาที จากนั้นจึงทำการตรวจหาเชื้อ *Fusarium semitectum* พบว่าการลดลงของเปอร์เซ็นต์การติดเชื้อรา *F. semitectum* มีความสัมพันธ์กันระหว่างระดับของอุณหภูมิที่ให้แก่เมล็ดและค่าความชื้นในเมล็ด

การที่จะกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดให้หมดไปได้นั้นต้องอาศัยอุณหภูมิร้อนเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่ง พัทยาและสุชาดา (2549) ได้ศึกษาถึงความร้อนสูงในการใช้ RF เพื่อการกำจัดเชื้อราในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิพร้อมกับการกำจัดแมลง โดยนำเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้น 10.4% ความมีชีวิต 80% มีการปนเปื้อนของเชื้อรา *Trichoconis padwickii, Fusarium sp., Bipolaris oryzae และ Curvularia lunata* และจัดให้มีมอดข้าวเปลือกเข้าทำลาย เมล็ดพันธุ์ข้าวถูกนำมาผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับ 27.12 MHz ภายใต้อุณหภูมิ 70, 75, 80 และ 85 °C เป็นเวลา 180 วินาที ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อรา การสังเกตความมีชีวิตของมอดข้าวเปลือกและตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ พบว่าระดับอุณหภูมิสูงเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดเชื้อราให้หมดไปได้ ไม่พบมอดเปลือกข้าว และระดับความมีชีวิตของเมล็ดพันธุ์ลดลง

มีรายงานที่เกี่ยวเนื่องถึงผลกระทบต่างๆที่เกิดจากการให้ความร้อนต่อองค์ประกอบทางเคมีอยู่เป็นจำนวนมาก ดังเช่น การทดลองของ *Lewandowicz et al.* (2000) ที่ได้ศึกษาผลของการใช้คลื่นไมโครเวฟพืชที่มี starch เป็นองค์ประกอบ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี พบว่าหากการให้ความร้อนเป็นแบบ Heat-moisture treatment คือภายในเมล็ดมีความชื้นสูงตั้งแต่ 30% ขึ้นไป จะทำให้เกิดกระบวนการ gelatinization ในแป้งที่เป็นองค์ประกอบภายในเมล็ด และยังได้อธิบายถึงกระบวนที่เกิดขึ้นว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีที่ทำให้เกิดกระบวนการเช่นนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างการเกิดผลึกของแป้งเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของอะไมโลส (amylose) ในเมล็ดด้วย

ณคณิณ (2551) ได้ทำการให้ RF กับข้าวหอมมะลิ 105 พบว่าความร้อนที่ได้จาก RF ที่ระดับต่างๆส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์อะไมโลส เมื่อนำไปวิเคราะห์ถึงคุณภาพแป้งด้วยเครื่อง RVA การเพิ่มขึ้นของอะไมโลสที่ข้าวได้รับทำให้ค่า final viscosity สูงขึ้นตาม เช่นเดียวกับค่า setback ซึ่งสามารถบอกได้ว่าแป้งมีความคงตัวเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวัดเปรียบเทียบกับค่าความคงตัวของน้ำแป้ง (Gelconsistency) อัตราการไหลของแป้งลดลง เกี่ยวเนื่องจากเปอร์เซ็นต์อะไมโลสที่เพิ่มขึ้นทำให้ข้าวเมื่อได้รับความร้อนทำให้คุณภาพข้าวเปลี่ยนไปเกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น

Sadeghi and Shawrang (2006) ศึกษาผลของการใช้คลื่นไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 800 Watt กับเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเวลา 3,5 และ 7 นาที dry matter (DM) และcrude protein (CP) ภายในเมล็ดไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังได้รับความร้อน แต่เมื่อทำการทดสอบข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวเพื่อการวิเคราะห์การดูดซึมภายในลำไส้ของสัตว์ กลับพบว่า โปรตีนที่สำคัญทั้ง 4 ชนิดคือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Globulins, Glutelins, Zein และ Albumins มีปริมาณลดลง แตกต่างจากข้าวโพดที่ไม่ผ่านคลื่น ซึ่งอธิบายได้ว่า การที่สัตว์สามารถดูดซึมโปรตีนที่ผ่านกระบวนการทำให้ร้อนจนทำให้เกิดการ denature สัตว์จึงสามารถดูดซึมโปรตีนดังกล่าวได้ง่ายกว่า สอดคล้องกับงานทดลองที่ให้คลื่นไมโครเวฟกับข้าวบาเล่ย์ในปี 2008

ประสิทธิภาพของ RF ที่ทำให้เกิดความร้อนกับวัตถุได้อย่างรวดเร็วส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในวัตถุ ที่เห็นได้ชัดเจนคือ การระเหยของน้ำเมื่อได้รับความร้อน มีความพยายามในการตัดแปลง RF เพื่อใช้ในการลดความชื้นในเมล็ดพืช และอาหารเป็นจำนวนมาก RF สามารถทะลุทะลวงชั้นวัตถุได้ลึกกว่าแหล่งพลังงานทั่วไปที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน Jumah (2005) ได้ใช้ดัดแปลงการอบแห้งแบบ Fluidized bed ร่วมกับการใช้ RF ซึ่งให้ผลในการลดความชื้นกับเมล็ดพืชได้เป็นอย่างดี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved