

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ขนมปัง (Bread)

##### ชนิดของขนมปัง

ขนมปังสามารถแบ่งได้ตามปริมาณของน้ำตาลและไขมันในสูตรได้เป็น 4 ประเภทคือ

1) ขนมปังฮาร์ท (Hearth Bread) มีปริมาณน้ำตาลน้อยคือ 0-2% และมีไขมัน 0-3% เนื้อของขนมปังที่ได้จะค่อนข้างแห้งมีเปลือกแข็ง เช่น ขนมปังฝรั่งเศส ขนมปังขาไก่

2) ขนมปังจีต (Loaf Bread) จะมีปริมาณน้ำตาลตั้งแต่ 3-8% และมีไขมัน 3-6% เช่น ขนมปังแซนวิช ขนมปังหัวกะโหลก

3) ขนมปังกึ่งหวาน (Soft Bun) มีปริมาณน้ำตาล 9-15% และมีไขมัน 6-12% ขนมปังที่ได้เนื้อจะนุ่ม นิยมทำรูปร่างทรงกลมอาจมีไส้ หรือไม่มีก็ได้ไส้ที่นิยมมักเป็นไส้คาว เช่น แสมเบอร์เกอร์

4) ขนมปังหวาน (Sweet Bread) มีปริมาณน้ำตาลสูง 16-30% และมีไขมัน 12-24% ขนมปังจะนุ่ม และมีรสชาติค่อนข้างหวาน หรือขนมปังไส้หวานต่างๆ เช่น ขนมปังผลไม้ ขนมปังมะพร้าว

##### ส่วนผสมของขนมปัง

ประกอบด้วยแป้งสาลีโปรตีนสูง หรือที่เรียกทั่วไปว่าแป้งสาลีชนิดทำขนมปัง ผสมกับยีสต์ น้ำ และเกลือ ทั้ง 4 ส่วนนี้จัดเป็นส่วนผสมหลักซึ่งจำเป็นต้องมีในสูตรทำขนมปังทั่วไป นอกจากนี้อาจใส่สารอื่น เพื่อปรับปรุงลักษณะของขนมปังให้แตกต่างกันไป ตามความต้องการของผู้บริโภค ได้แก่ ไขมัน แป้งมอลต์ แป้งถั่วเหลือง ธัญพืชอื่นๆ อาหารยีสต์ สารอิมัลซิไฟเออร์ ผลิตภัณฑ์จากนม ผลไม้ และกลูเตน เป็นต้น

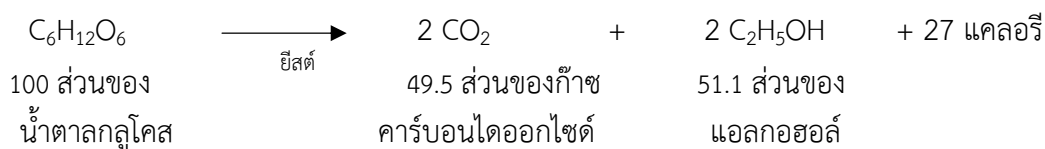
1) **แป้งสาลี** ที่ใช้ทำขนมปัง เป็นแป้งไม่จากข้าวสาลีธรรมดาชนิดแข็ง มีปริมาณโปรตีนสูง (12-14%) ในบางประเทศ อาจใช้แป้งไม่จากข้าวสาลีชนิดนุ่มเพราะมีโปรตีนสูง เพื่อทำเป็นขนมปังชนิดแบนแบบอาหรับ แต่โดยทั่วไปแล้วแป้งที่ใช้จะมีสีขาวนวลมีความชื้นไม่เกิน 14% เป็นแป้งที่ดูดซึมน้ำได้มาก (60-65%) มีเถ้า 0.4-0.5% และโปรตีน 10-16% หน้าที่ของแป้งสาลีในขนมปังคือเป็นโครงร่างสำคัญ มีความยืดหยุ่นในขณะผสมขึ้นฟูในขณะหมัก และในที่สุดแข็งตัวเป็นโครงร่างของขนมปังเนื้อนุ่มเหนียวต่อการเคี้ยวเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงเกิด

จากองค์ประกอบทางเคมีในแป้งที่สำคัญ คือ สตาร์ช และ กลูเตน รวมทั้งองค์ประกอบอื่น เช่น ไขมัน เพนโตซาน น้ำตาล และอื่นๆ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อผสม แป้งกับน้ำยีสต์และเกลือเข้าด้วยกันจนเป็น โด

2) **น้ำ** เป็นส่วนผสมหลักสำคัญทำให้แป้งกลายเป็นโด และมีผลต่อลักษณะของ โดโดยตรง กล่าวคือโดจะมีความนุ่ม ยืดหยุ่น และไม่ติดมือ ถ้าน้ำที่ใช้เป็นน้ำกระด้างปานกลาง เช่น น้ำประปา ซึ่งมีแร่ธาตุ บางชนิดปนอยู่อย่างเหมาะสม จะทำให้โดมีความแข็งแรง และยืดหยุ่นตัวดี ถ้าน้ำกระด้างมาก หรือถาวร จะทำให้โดแข็งเกินไป ส่วนน้ำอ่อนก็จะมีผลให้โดนุ่ม และแฉะติดมือ ดังนั้น การตรวจสอบ คุณภาพก่อนนำไปทำขนมปังจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อแก้ไขปรับปรุงสภาพน้ำให้เหมาะสม โดยใช้เกลือ และอาหารยีสต์ที่ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ เข้าช่วย เช่น ถ้าน้ำอ่อนก็เพิ่มเกลือและอาหารยีสต์ในสูตร แต่ถ้าน้ำกระด้างมากก็ลดเกลือ อาหารยีสต์ และเพิ่มปริมาณยีสต์ พร้อมทั้งใช้เวลาหมักนานขึ้นเป็นต้น โดยปริมาณน้ำที่เติมในสูตรจะอยู่ในช่วง 55-65% ขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง กล่าวได้ว่า น้ำมีผลต่อการทำขนมปังมากเริ่มจากทำหน้าที่ในการละลายส่วนผสมต่าง ๆ ให้สามารถผสมเป็นเนื้อโดอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นวดแป้งกับน้ำจนได้โดก็จะมีกลูเตนเกิดขึ้น และโดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของยีสต์ และเอนไซม์ต่าง ๆ เนื่องจากน้ำในส่วนผสมจนเกิดก๊าซทำให้โดพองฟูขณะหมัก เมื่อนำเข้าอบน้ำมีส่วนทำให้สตาร์ชเกิดเจลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลูเตนขยายตัว ส่วนอื่นที่ดิบกลายเป็นสุก และคงรูปร่างของขนมปัง ส่วนน้ำที่ยังเหลืออยู่จะทำให้ขนมปังนุ่มและเนื้อ ขนมปังเหนียว เคี้ยวอร่อย จนในที่สุดมีผลต่อการเก็บรักษาขนมปัง กล่าวคือถ้าเก็บในภาชนะบรรจุไม่เหมาะสมก็จะทำให้ขนมปังแห้ง หรือขึ้นและจนขึ้นรา ก็ทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับ

3) **เกลือ** ที่เติมลงไปในขนมปัง เพื่อจุดประสงค์ 3 ประการที่สำคัญ คือ ทำให้ขนมมีกลิ่นรสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ประการที่สองช่วยให้กลูเตนแข็งแรงและคงทนเพิ่มขึ้นทำให้โดไม่แฉะ ประการที่สามคือ ควบคุมการทำงานของยีสต์ให้ช้าลง มีการหมักนานขึ้นทำให้ขนมปังขึ้นฟูสม่ำเสมอ และมีโครงสร้างดีปริมาณเกลือที่ใส่อยู่ระหว่าง 1.75-2.2% ซึ่งเป็นเกลือป่นธรรมดาชนิดใส่อาหาร

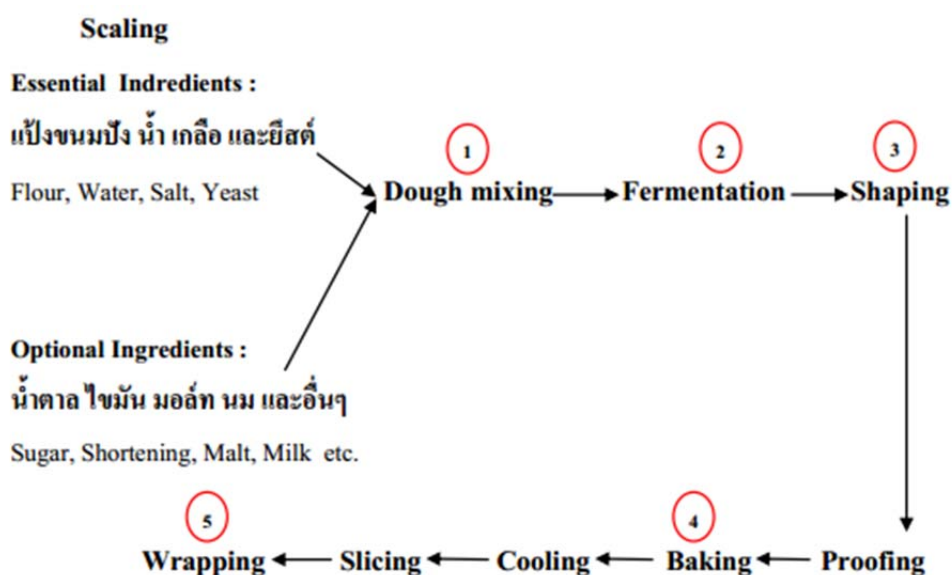
4) **ยีสต์** มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Saccharomyces cerevisiae* หรือมีชื่อทั่วไปว่ายีสต์สำหรับทำขนมอบ (Bakers' yeast) เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวซึ่งมีหน้าที่หลักในขนมปังอยู่ 3 อย่าง คือ ช่วยให้เกิดก๊าซ ภายในโดปรับสภาพโดให้เหมาะสมและให้กลิ่นรสแก่ขนมปังยีสต์ที่ผสมอยู่ในโดจะเริ่มเติบโตเนื่องจากมีน้ำและอากาศจากการผสม และมีอาหารคือน้ำตาลและสารอาหารอื่นจากโด ทำให้ยีสต์เพิ่มจำนวนมากขึ้นในขณะเดียวกัน เอนไซม์ต่างๆ ในยีสต์จะย่อยสารอาหารโดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตได้แก่ น้ำตาลให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และพลังงานดังสมการ



โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาพที่ไม่มีอากาศ เรียกว่ากระบวนการหมัก ซึ่งเป็นผลให้ภายในโดมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดันให้โดพองตัวขึ้นจากเดิมหลายเท่า ในขณะที่เดียวกันก็ปรับสภาพโดให้ยืดตัว มีก๊าซแทรกอยู่พร้อมทั้งมีกลิ่นหมักแอลกอฮอล์ร่วมกับกลิ่นอื่นๆ เมื่อนำโดเข้าเตาอบ ขณะที่ความร้อนยังไม่แผ่กระจายเข้าสู่โดมากนักยีสต์จะยังทำงานเป็นเหตุให้โดขึ้นฟูในเตาอีก ระยะหนึ่งจนในที่สุดความร้อนกระจายทั่วก้อนโด ทำให้ยีสต์ตาย และขนมปังคงรูปร่างขึ้นฟูพร้อมกับมีกลิ่นหมักกลิ่นยีสต์ และสารอื่นเป็นกลิ่นเฉพาะของขนมปังที่ผู้บริโภคพอใจ

5) ส่วนผสมอื่น ๆ ไขมันเป็นส่วนผสมที่นิยมใส่จนดูเหมือนว่าเป็นส่วนผสมจำเป็น เนื่องจากไขมันช่วยในการหล่อลื่นกลูเตนให้ยืดหยุ่นได้ดีเก็บกักก๊าซได้เหมาะสมทำให้เนื้อขนมปังนุ่ม มีเซลล์บางมีปริมาตรมากขึ้น และเสริมกลิ่นรสที่ดีแก่ขนมปังเช่นเดียวกันกับอิมัลซิไฟเออร์ที่ใส่ในขนมปังบางชนิด แป้งมอลต์ช่วยปรับสภาพเอนไซม์ในแป้งให้เหมาะสม แป้งถั่วเหลืองช่วยเพิ่มคุณค่าอาหารอาหารยีสต์ และน้ำตาลช่วยให้การทำงานของยีสต์ดีขึ้นนม และผลิตภัณฑ์จะเสริมคุณค่าอาหารและช่วยให้ขนมปังมีรสชาติดีขึ้นสำหรับธัญพืชอื่น และผลไม้ต่าง ๆ มีผลให้ขนมปังมีรสชาติและรูปร่างที่หลากหลายแบบ

### ขั้นตอนกรรมวิธีผลิตขนมปัง



ภาพที่ 2.1 ลำดับ 5 ขั้นตอนสำคัญของการทำขนมปัง  
ที่มา : Pomeranz and Shellenberger, (1971)

ขั้นตอนสำคัญในการทำขนมปังจัดเป็นลำดับมี 5 ขั้นตอน (ดังภาพที่ 2.1) คือ

### 1) การผสม (Mixing)

การผสมโดเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ ส่วนผสมทั้งหลายผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และการนวดผสมเป็นการทำให้เกิดกลูเตนสม่ำเสมอ ทำให้โดมีลักษณะแห้งและ เรียบเนียนเมื่อผสมได้ที่แล้ว การนวดผสมจะใช้เวลา 10-20 นาที แล้วแต่ชนิดของเครื่อง ซึ่งจะผ่าน 4 ขั้นตอน ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งโดนวดผสมได้ที่ดังนี้คือ

**1.1) ขั้นตอนที่ 1 พิคอัพ (Pick-up stage)** เป็นขั้นตอนที่ส่วนผสมที่เป็นของแห้ง และของเหลวถูกนำมาผสมเข้าด้วยกันจุดนี้ส่วนผสมยังแฉะ และรวมตัวเป็นก้อนหยาบ ๆ และติดบริเวณอ่างเป็นเพราะแป้ง และโปรตีนยังดูดน้ำได้ไม่เต็มที่

**1.2) ขั้นตอนที่ 2 คลีนอัพ (Clean-up stage)** แรงจากการนวดผสมกลับก้อนแป้งไปมาแป้งและโปรตีนมีโอกาสดูดน้ำได้รวดเร็วทำให้ก้อนโดเริ่มแห้ง และเหนียวกลูเตนที่เกิดขึ้นจะช่วยยึดจับก้อนแป้งให้รวมตัวไม่ติดบริเวณอ่างผิวยังไม่เรียบ

**1.3) ขั้นตอนที่ 3 ดีเวลอปเม้นท์ (Development stage)** โดนวดได้ที่ มีลักษณะแห้ง และยืดหยุ่นแต่จะขาดง่ายเมื่อดึง

**1.4) ขั้นตอนที่ 4 ขั้นสุดท้าย (Final stage)** โดจะถึงจุดที่ได้รับการนวดผสมที่พอเหมาะจะมีลักษณะแห้งผิวเรียบเนียนเป็นเหมือนใยไหม และสามารถยืดออกได้เป็นแผ่นบางโดยไม่ขาด และนุ่มมือหากผสมเลยจากจุดนี้ไปแล้วโดจะมีลักษณะเสียสภาพการอุ้มน้ำกลูเตนฉีกขาดง่ายทำให้น้ำถูกซบออกมา โดจึงมีลักษณะเหนียวเหนอะแฉะ และนอกเสียจากแป้งที่ใช้จะเป็นชนิดที่มีคุณภาพดี ทนต่อการนวดได้นาน อย่างไรก็ตามหากโดมีลักษณะดังกล่าวควรหยุดการผสม เนื่องจากกลูเตนได้รับการนวดมากเกินไปและเกิดการฉีกขาด (Break down stage) ทำให้ไม่สามารถเก็บกักก๊าซที่เกิดในช่วงของการหมักได้ดังนั้นเมื่อนำไปอบขนมปังที่ได้จะมีปริมาตรต่ำ

### 2) การหมักโด (Fermentation)

ปรากฏการณ์ภายนอกของโดจะเปลี่ยนแปลงไปโดยการพองตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการหมักของยีสต์ ยีสต์จะใช้น้ำตาลต่างๆในกระบวนการหมักจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อกระบวนการหมักดำเนินต่อไปกลูเตนจะยึดตัวมีความยืดหยุ่นมากขึ้นลักษณะคล้ายสปริงการเปลี่ยนแปลงของกลูเตนเกิดจากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เอนไซม์โปรตีโอไลติก แอลกอฮอล์ที่เกิดระหว่างการหมักกรดอินทรีย์ และกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นทำให้โดกลายเป็นกรดอ่อน ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะเปลี่ยนกลูเตนที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ให้มีลักษณะที่ยึดตัวบางขึ้น ห่อหุ้มก๊าซไว้ได้ภายใน ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้กลูเตนสามารถแผ่ขยาย และยืดโดยไม่ฉีกขาด โดที่ผสมและหมักได้ที่แล้วจะขยายตัวยืดหยุ่นเหมือนสปริงทำให้เก็บกักก๊าซไว้ได้มาก ตรงกันข้ามถ้าโดหมักไม่ได้ที่ คือหมักน้อยไปหรือหมักมากเกินไปจะมีผลกระทบต่อคุณ

**2.1) ปฏิกริยาของยีสต์กับการหมัก** ยีสต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของการหมัก โดยการใช้อาหารที่มีอยู่ในโด หมักเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ กรด และเอสเทอร์ และมีค่าความเป็นกรดอ่อนทำให้กลูเตนอ่อนตัวการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สลับซับซ้อนยีสต์จะค่อย ๆ แบ่งตัวซ้ำ ๆ ในช่วงแรกของการหมัก และจะเร็วขึ้นในช่วง

กลาง และจะลดลงในช่วงสุดท้ายในช่วงแรกยีสต์จะใช้อาหารจากน้ำตาลกลูโคส และซูโครสก่อน หลังจากนั้นน้ำตาลอิสระเหล่านี้หมดยีสต์จึงไปใช้มอลโทสต่อไปผลที่ได้จากการหมักจะได้แอลกอฮอล์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแอลกอฮอล์มีผลกระทบต่อลักษณะความเหนียวทำให้เกิดการคลายตัวของโปรตีน ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดการพองตัวของโดตลอดการหมักจนกระทั่งช่วงสุดท้ายของการหมักในถาดก่อนนำเข้าอบ รวมทั้งการอบในช่วงแรก

**2.2) ปฏิกริยาของเอนไซม์ในการหมัก** เมื่อการหมักดำเนินไปในเวลาเดียวกันจะเกิดปฏิกริยาทางเคมีและชีวเคมีตามธรรมชาติเกิดขึ้นในโดซึ่งจะมีเอนไซม์หลายชนิดเข้ามาเกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นเอนไซม์ที่มีอยู่ในแป้ง หรือที่เติมลงไปในการบวนการผลิตแป้งสาลีเอนไซม์เหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ในองค์ประกอบของโดเอนไซม์อะมิเลสจะย่อยสแตร์ช และสแตร์ชเสียหายให้เป็น เด็กซ์ตริน และมอลโทสส่วนกลุ่มของเอนไซม์โปรตีโอไลติกจะย่อยโปรตีนในโดที่ซับซ้อนให้อยู่ในภาพที่ไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถจะเปลี่ยนสภาพได้โดยยีสต์เช่นการยึดตัว นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์อื่นๆ เช่น ลิเพสจะย่อยส่วนที่เป็นไขมัน และส่วนของเกลีออินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในอาหารของยีสต์รวมทั้งสารออกซิแดนซ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโดจากปฏิกริยาดังกล่าวจะได้ผลิตผลของแอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ และกรดอินทรีย์ รวมทั้งผลพลอยได้อื่นๆ ที่จำเป็นต่อการย่อย ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกไปยังส่วนที่เป็นของเหลว ในช่วงการหมัก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดสะสมเป็นฟองอากาศเล็กๆ ส่วนโปรตีนจะมีบทบาทในการทำให้เกิดลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มบาง ๆ ช่วยคุณสมบัติในการเก็บกักก๊าซ นอกจากนี้การเกิดโปรตีน และไขมันที่จับตัวกันเป็นร่างแหโดยมีเม็ดแป้งแทรกตัวอยู่ด้วยจะทำให้เกิดเป็นผนังมีโพรงอากาศ

#### หน้าที่ของการหมัก คือ

1. คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกริยาการหมักจะทำให้เกิดฟองอากาศในขนมปัง
2. ผลพลอยได้จากการหมักคือ Ethanol ทำให้เกิดกลิ่นในขนมปัง
3. ทำให้โดมีคุณสมบัติของ Viscoelastic ที่สามารถเก็บกักก๊าซได้ดีระหว่างการอบ

**การควบคุมการหมัก** จุดประสงค์ของการหมักคือการเก็บกักก๊าซที่เกิดขึ้นรวมทั้งกระจายก๊าซที่เกิดขึ้นไปยังโครงสร้างที่เป็นยางเหนียวในโดทำให้สามารถเก็บกักก๊าซให้เป็นไปอย่างสอดคล้องสมดุลกัน การหมักคือการควบคุมการเกิดก๊าซและการเก็บกักก๊าซให้เป็นไปอย่างสอดคล้องสมดุลกัน การควบคุมการหมักจะประสบผลดีจะต้องมีการควบคุมสูตรส่วนผสมและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหมัก ได้แก่

1. ปริมาณยีสต์ในโด ยีสต์มากการหมักจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว
2. ชนิดของแป้งที่ใช้แป้งโปรตีนสูงต้องใช้เวลากการหมักนาน
3. ปริมาณของส่วนผสมอื่นๆ เช่นเกลือที่ปริมาณเกิน 1% จะช่วยลดระดับการหมักให้ช้าลงน้ำตาลที่เกิน 8% จะชะลอการหมักให้ช้าลง และอาหารยีสต์จะช่วยเร่งปฏิกริยาการหมัก

4. อุณหภูมิของโด อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการหมักอยู่ที่ 77-79 °F (25-26 °C) การหมักจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ถ้าอุณหภูมิของโดสูงเกินไป
5. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมกับการหมัก จะอยู่ที่ 75-85°F (24-29.5 °C) อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80-90 %
6. ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 4.7

### 3) การปั้นแต่งโดหรือทำรูปร่าง (Dough Make-up หรือ Shaping)

เป็นขั้นตอนเตรียมโด หลังการหมักไปจนถึงก่อนเข้าเตาอบ ประกอบด้วยการทำงานเป็น 6 ลำดับดังต่อไปนี้

**3.1) การตัดแบ่ง (Scaling)** นำโดที่หมักดีแล้วมาต่อย หรือยุบโด (Punching) เพื่อไล่อากาศออกจากโดแล้วทำการตัดแบ่งซึ่งน้ำหนักตามต้องการ

**3.2) การคลึงกลม (Rounding)** นำก้อนโดที่ตัดน้ำหนักมาคลึงเป็นก้อนกลมซึ่งจะเป็นการไล่อากาศและปั้นโดใหม่ให้มีผิวเรียบ และตั้งจะได้เก็บก๊าซอีกครั้ง และเพื่อไม่ให้โดเหนียวติดมืออาจใช้แป้งนวลโรยบางๆ ขณะคลึงกลม

**3.3) การพักโด (Intermediate Proof / Benching)** การพักโด หลังจากการคลึงก้อนกลมพักไว้ระยะ 5-20 นาที โดยเฉลี่ย 6-10 นาที เรียกว่า Intermediate Proof ถ้าระยะพักโดนานจะนำโดเข้าไว้ใน ตู้พักพิเศษ เรียกว่า Retarder ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และเนื่องจากโดที่ถูกตัดแบ่งน้ำหนักจะสูญเสียก๊าซไปบ้าง ดังนั้นเพื่อให้โดทนต่อแรงกดในช่วงการทำรูปร่างโดยไม่ทำให้ผิวฉีกขาด และโครงสร้างเซลล์เสียโดจึงต้องมีการพักตัวก่อนจะถึงขั้นการทำรูปร่างระยะเวลาที่เหมาะสมในการพักขึ้นอยู่กับสภาพของโด เมื่อพักได้ที่โดจะไม่ฉีกขาดเมื่อนำมาทำรูปร่าง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการพักโด คือ 80-85 °F (27-29 °C) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75% เพื่อกันไม่ให้ผิวของโดแห้งเป็นไต ซึ่งจะส่งผลให้โดเกิดรอยปริแตกในขณะอบ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้โดสูญเสียก๊าซมาก

**3.4) การทำรูปร่าง (Moulding/ Make up)** ขั้นตอนนี้สำคัญเพราะจะมีผลต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์สำเร็จมีหลายวิธีที่จะทำรูปร่างแต่จุดที่สำคัญคือการม้วนโดให้แน่นเพื่อป้องกันการเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ในเนื้อขนมปังเมื่ออบเสร็จความหนาของรูปร่างจะต้องสม่ำเสมอเพื่อให้ขนมปังที่อบเสร็จมีรูปร่างสวยตลอดก่อนจากนั้นบรรจุในถาดโดยวางด้านที่มีรอยม้วนไว้ด้านล่างของถาดแล้วจึงนำไปหมักขั้นสุดท้าย (Final Proof)

**3.5) การใส่ถาด หรือลงพิมพ์ (Panning)** โดที่ม้วนรูปร่างแล้วจะถูกนำมาใส่ถาดที่ทาด้วยไขมันตามขนาดน้ำหนักที่ต้องการวางก้อนโดที่เป็นตะเข็บไว้ด้านล่างเพื่อกันมิให้รอยตะเข็บแตกปริระหว่างการอบ ซึ่งจะทำให้รูปร่างขนมปังเสียไป การทาถาดด้วยไขมันอย่างทั่วถึงจะช่วยให้ขนมปังไม่ติดถาดเมื่ออบสุก ขนาดของโดจะต้องสัมพันธ์กับขนาดของถาด ถาดที่เล็กหรือใหญ่เกินไปจะทำให้ขนมปังไม่ได้ขนาดและมีผลต่อปริมาณอาจทำให้เนื้อขนมปังแน่นหรือหยาบเกินไปได้

**3.6) การหมักครั้งสุดท้าย (Final proof)** เป็นการหมักด้วยไอน้ำก่อนอบ เนื่องจากโดที่ไล่อากาศเพื่อทำรูปร่างยังมีขนาดเล็กและแน่นจึงจำเป็นต้องพักไว้อีกระยะหนึ่งเพื่อให้

พองตัวอีกครั้งโดยยีสต์จะได้รับอากาศใหม่เข้าไปทำให้มีกำลังในการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โด จะยึดตัวห่อหุ้มก๊าซใหม่ที่เกิดขึ้นไว้ การหมักครั้งสุดท้ายมักจะเป็นการหมักในพิมพ์ (Pan Proof) การหมักครั้งสุดท้ายนี้จะต้องการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น เบเกอร์รีขนาดเล็กมักจะไม่ค่อยมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ส่วนเบเกอร์รีขนาดใหญ่อาจใช้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยเครื่องอัตโนมัติโดยการผ่านการหมักช่วงสุดท้ายด้วยสายพานลำเลียงเคลื่อนที่ผ่านบริเวณ ที่ควบคุมความชื้น และอุณหภูมิอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิ และความชื้นที่เหมาะสม คือ 95 °F (35 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ 85% โดที่ผ่านการหมักช่วงสุดท้ายบริเวณผิวจะมีความชื้นแต่ไม่ถึงกับเปียก ระยะเวลาหมักช่วงนี้ต้องอาศัยการสังเกตดูการตั้งเวลาการหมักบางครั้งอาจไม่ได้ผลเป็นไปตามต้องการ เนื่องจากสภาพอากาศอาจเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นการใช้ประสบการณ์จากการดูควบคู่ไปกับเวลาจึงจะได้ผลดีปัญหาบางประการที่เกิดขึ้นของโด ในระหว่างการหมักครั้งสุดท้าย

#### 4) การอบ (Baking) การอบแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

**4.1) ช่วงแรก (Initial Stage)** เมื่อขนมปังเข้าเตาอบนั้นการหมักโดยังคงดำเนินต่อไปเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์อัลฟาอะมิเลส ยังคงทำงาน ย่อยสลายเม็ดสตาร์ชให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลที่เล็กลงที่ยีสต์สามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะกระจายไปทั่วโดทำให้โดยืดและขยายตัวเก็บกักอยู่ในร่างแหกลูเตน ในช่วงแรกของการอบยีสต์จะผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นรวดเร็วทำให้ระดับการพองตัวของขนมปังขยายตัวรวดเร็วในช่วงการอบ 10 นาทีแรก เรียกว่า โอเวน สปริง (Oven Spring)

**4.2) ช่วงกลาง (Intermediate Stage)** เซลล์ของยีสต์จะค่อยๆ ลดการทำงานลงที่อุณหภูมิประมาณ 110 °F (43 °C) และจะตายที่อุณหภูมิ 130 °F (54 °C) สตาร์ชเริ่มเกิดเจลลิตไนซ์ที่อุณหภูมิ 130 °F (54 °C) เอนไซม์ที่ย่อยแป้งจะเร่งการทำงานที่อุณหภูมิแป้งสูง จากนั้น จะหยุดการทำงานที่อุณหภูมิระหว่าง 149-194 °F (65-95 °C) กลูเตนเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นการแข็งอยู่ตัวที่อุณหภูมิ 165 °F (74 °C) ทำให้น้ำที่กลูเตนดูดซับเคลื่อนตัวออกมายังสตาร์ชช่วยให้สตาร์ช เกิดเจลลิตไนซ์ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นภายนอกขนมปังจะมีอุณหภูมิสูงกว่าภายในจึงทำให้เกิดผิวแข็งด้านนอก

**4.3) ช่วงสุดท้าย (Final Stage)** ที่บริเวณผิวขนมปังจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโนจากการย่อยสตาร์ชเป็นเด็กซ์ทรินโดยเอนไซม์รวมทั้งการเกิดคาราเมลไลเซชัน ของน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิสูงทำให้ผิวขนมปังเกิดเป็นสีน้ำตาลใหม่โดยระยะเวลาในการอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและประสิทธิภาพของเตาอบ ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่อบและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เข้าอบแต่ละครั้งด้วย การอบขนมปังปอนด์จะใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบขนมปังแซนวิชที่เป็นแถวยาว ขนมปังผิวแข็ง (Hearth Rolls) ควรอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 450 °F (232 °C) พร้อมกับการฉีดไอน้ำเป็นฝอยในเตาอบ ขนมปังหวานชนิดต่าง ๆ ควรอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อไม่ให้ผิวไหม้เร็วเกินไป ปกติตามหลักของการอบขนมปังนั้น ขนมปังสูตรเจี้อาจควรอบที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้นส่วนขนมปังสูตรเข้มข้นใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และระยะเวลานานกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำตาล และนมจะค่อนข้างไวต่อความร้อนสูง ทำให้ขนมปังไหม้ได้ง่าย อุณหภูมิ

การอบขนมปังทั่วไปอยู่ระหว่าง 350-450°F ขนมปังที่อบยังไม่สุกจะสังเกตได้โดยขนมปังจะยุบตัวทันทีที่นำออกจากเตาอบ

**5) การทำให้เย็นและบรรจุหีบห่อ (Cooling & Packaging)** ช่วงของการทำขนมปังให้เย็น แป้งสตาร์ชที่สุกแล้วร่วมกับโปรตีนจะค่อย ๆ แข็งตัวตามธรรมชาติทำให้ขนมปังไม่เสียรูป เมื่อนำขนมปังออกจากเตาอบ และทำให้เย็นแล้วจึงบรรจุถุง ถ้าขนมปังถูกหั่นขณะที่เพิ่งเอาออกจากเตาอบหรือยังไม่เย็นสนิท ขนมปังจะติดกัน และจะเป็นรอยย่นบริเวณรอยตัดนั้น ๆ ดังนั้นจึงควรหั่นขนมปังเมื่ออุณหภูมิเย็นลงถึง 100 °F (37.8 °C) หรือต่ำกว่านั้น และไม่ควรบรรจุถุงพลาสติกจนกว่าขนมปังจะเย็นสนิทมิฉะนั้นจะเกิดไอน้ำและทำให้ผิวของขนมปังและ และเสียเร็ว การทำให้เย็นควรทำให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลง และต้องควบคุมความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นระเหยจากผิวเร็วเกินไปจะทำให้ผิวขนมปังเกิดการย่น ปกติที่นิยมการทำให้เย็น โดยวางขนมปังไว้ในห้องปรับอากาศที่มีอุณหภูมิ 72-78 °F (22-25.5 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ 85% ซึ่งจะใช้เวลาอย่างน้อย 1.5 ถึง 3 ชั่วโมง

#### คุณภาพของขนมปัง

ขนมปังที่ใหม่สดและมีคุณภาพดีคือมีปริมาณฟองโตสัมพันธ์กับน้ำหนัก ผิวขนมปังเป็นสีน้ำตาลทอง เนื้อขนมปังมีความยืดหยุ่น มีเนื้อสัมผัสที่เนียนละเอียด และควรจะมีกลิ่นรสที่ผสมผสานของกลิ่นที่หอมหวาน กลิ่นแอลกอฮอล์ กลิ่นยีสต์ กลิ่นแป้งโด และกลิ่นของข้าวสาลีปนกัน ซึ่งกลิ่นของผิวขนมปังจะมีกลิ่นหอมของน้ำตาลไหม้และกลิ่นของข้าวสาลีปะปนอยู่ด้วย กลิ่นของขนมปังเกิดจากคุณสมบัติที่สลับซับซ้อนของส่วนผสม ปฏิกริยาจากกระบวนกรหมักและการอบ เป็นกลิ่นที่สลับซับซ้อนเกินกว่าที่จะทำกลิ่นเทียมได้ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการผลิตกลิ่นขนมปังจากการหมักจำหน่ายให้โรงงานขนมปัง

#### การเสื่อมสภาพ หรือความเก่าของขนมปัง (Bread staling)

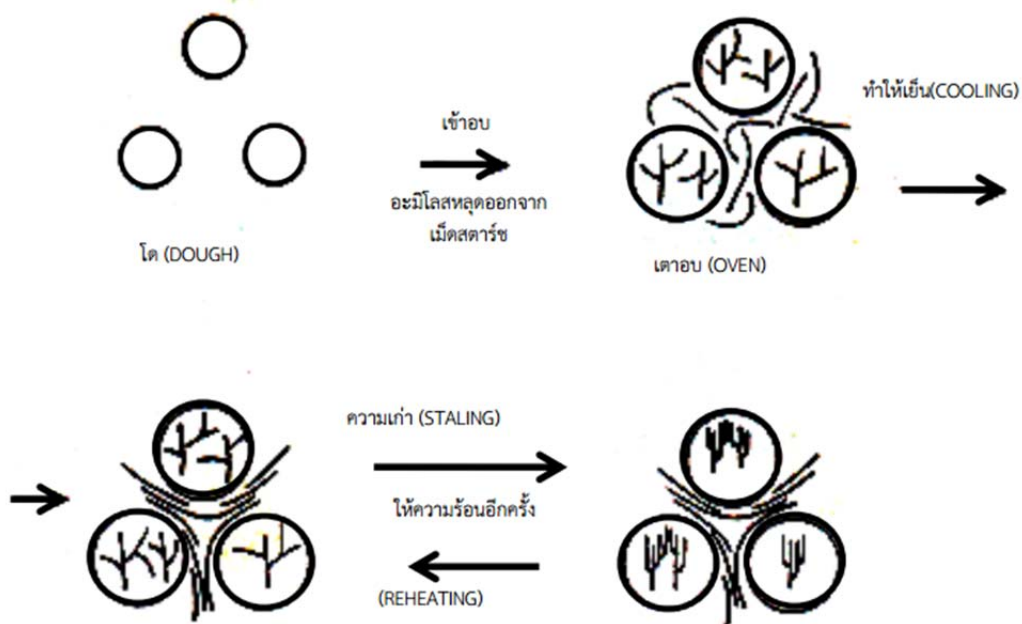
การเสื่อมสภาพ (Staling) ของขนมปังเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผู้บริโภค และนักวิจัยให้ความสำคัญและสนใจในการศึกษาตลอดมาการเสื่อมสภาพตามความเห็นของผู้บริโภคคิดว่ามีผลต่อการกินในแง่ของรสชาติ กลิ่น ความแข็งกระด้าง เนื้อสัมผัส และผิวที่แห้งกรอบ ส่วนนักวิทยาศาสตร์ด้านเคมีธัญพืชให้ความเห็นว่า การเสื่อมสภาพของขนมปังเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีที่มีผลกระทบต่อผู้บริโภค เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีผู้ทำการศึกษาเรื่องนี้หลายท่าน ได้แก่ D' Appolonia & Morad (1980), Kim & Appolonia (1977), Pylar (1988) และ Willhoft (1973) เป็นต้น

เนื่องจากการทำปฏิกริยาในองค์ประกอบที่มีในขนมปังทำให้เกิดคุณลักษณะที่สลับซับซ้อนของของขนมปังที่อบเสร็จใหม่รวมทั้งปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพ สิ่งที่ใช้ในการพิจารณาออกไปจากลักษณะทางการสัมผัสในการศึกษาการเสื่อมสภาพยังรวมการตกผลึกของสตาร์ช และความร่วนแข็งของเนื้อขนมปัง และความชุ่มชื้นของเนื้อ สิ่งทั้งหลายที่กล่าวมานี้ล้วนเพิ่มขึ้นระหว่างการเสื่อมสภาพความสามารถในการดูดซึมน้ำปริมาณของสตาร์ชที่ละลายได้ ซึ่งง่ายต่อการเข้า

ย่อยทำลายของเอนไซม์จะลดลงในช่วงการเสื่อมสภาพ ส่วนผลกระทบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ความกรอบของผิวลดลง รสชาติเสียไปและพัฒนาการไปสู่เนื้อขนมปังที่แข็งกระด้าง

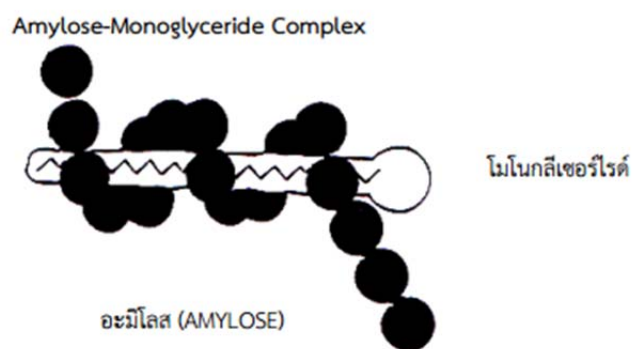
ความสลับซับซ้อนของปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจริงว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างขนมปังเสื่อมสภาพซึ่งเราสามารถควบคุมสภาพ หรือกำจัดการเปลี่ยนแปลงบางอย่างโดยไม่กระทบกระเทือนสิ่งอื่น ๆ

ลักษณะการเพิ่มความกระด้างของขนมปังมักจะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์การพิจารณาการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสามารถวัดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องที่สอดคล้องกับลักษณะทางประสาทสัมผัส วิธีการวัดที่ใช้แรงกดเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งของเนื้อขนมปัง ได้แก่ เครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM) อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบซึ่งเป็นที่ยอมรับได้เขียนไว้ใน AACC 1995 เป็นที่ทราบกันดีว่าการแข็งของเนื้อขนมปังระหว่างการเก็บรักษานั้นเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสตาร์ช (Starch Retrogradation) ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลสที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง จะถูกชะให้หลุดจากเม็ดสตาร์ช (Amylose Leaching) ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนสูงในเตาอบ เนื่องจากสภาพที่มีน้ำในปริมาณจำกัดภายนอกเม็ดสตาร์ช โมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของสตาร์ชที่อยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเม็ดแป้งจะเป็นตัวที่ง่ายต่อการชูนกลับคืน พบว่าความชูนกลับคืนที่เกิดจากอะมิโลสจะเกิดขึ้นสมบูรณ์หลังจากที่ขนมปังถูกทิ้งให้เย็นหลังจากอบสุกแล้ว ซึ่งเห็นว่าขนมปังช่วงนี้ที่ยังมีความนุ่มอยู่นั้นเป็นเพราะเม็ดแป้งที่อยู่ในเจลยังมีความนุ่มอยู่นั่นเอง การแข็งตัวที่เกิดขึ้นหลังจากนี้เชื่อว่าส่วนใหญ่เกิดจากโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านของอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในเม็ดแป้งที่มีการพองตัวแล้วมีมากกว่าการรวมตัวกันของอะมิโลเพกตินที่เป็นกิ่งก้านตรงบริเวณเส้นตรง จะทำให้เกิดการแข็งตัวของเม็ดแป้งซึ่งอาจเป็นการรวมตัวภายในโมเลกุลเดียวกัน หรือรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลอื่นก็เป็นได้ ดังภาพที่ 2.2

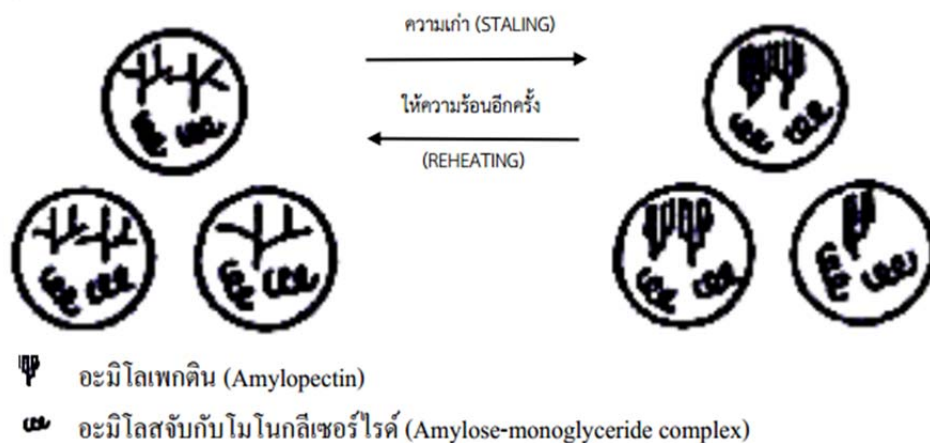


ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในสตาร์ชของขนมปัง  
ที่มา : Pyler, (1988)

Kulp Ponte (1981) กล่าวว่า การแข็งตัวของสตาร์ชในขนมปังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติของสตาร์ชด้วยการจับตัวเป็นเกลียวที่ซับซ้อน (Helical Complex) กับโมเลกุลของอะมิโลสที่พองตัวโดยโมโนกลีเซอไรด์ (ภาพที่ 2.2) จะทำหน้าที่ป้องกันการเคลื่อนย้ายของเม็ดแป้ง ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลของอะมิโลสไม่สามารถหลุดออกจากเม็ดแป้งได้ จึงทำให้เนื้อขนมปังแห้งน้อยลง เนื่องจากไม่เกิดโครงสร้างของเจลภายนอกเม็ดแป้งขึ้นเลย ส่วนโมเลกุลของอะมิโลเพกตินจะไม่มีผลกระทบจากอิมัลซิไฟเออร์ และยังคงเกิดการแข็งตัวตามปกติตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เนื้อขนมปังที่เก็บไว้นานยังคงมีความแข็งกระด้างเกิดขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.4

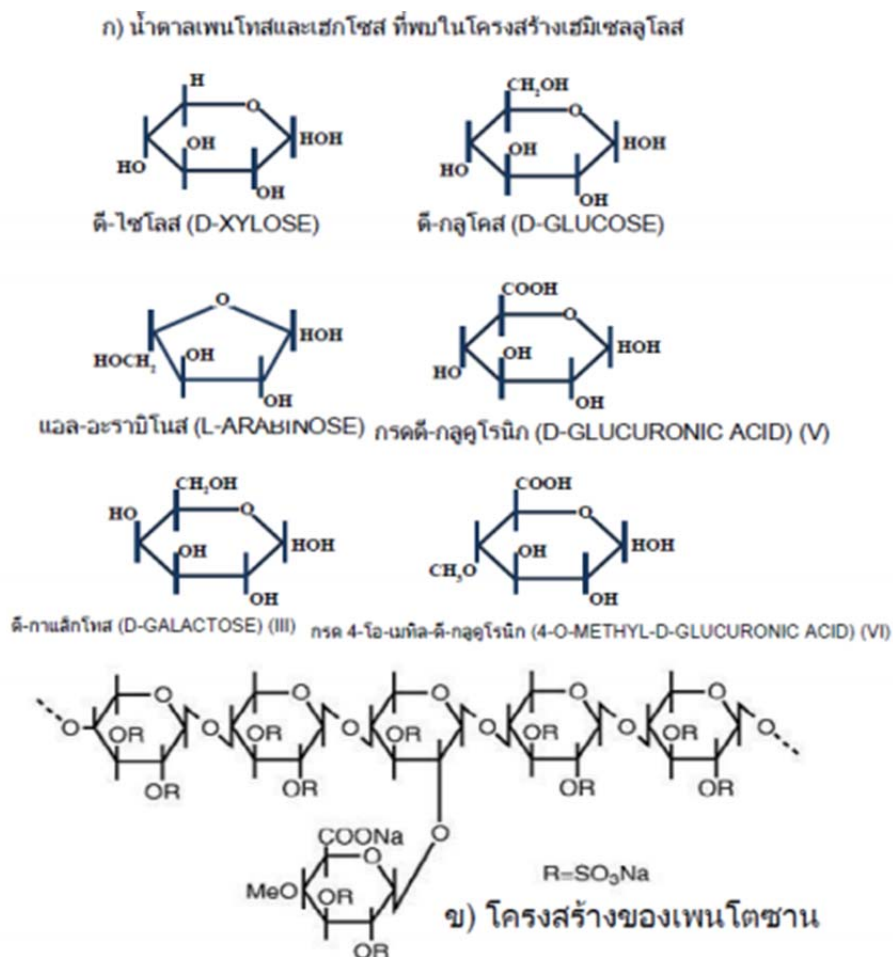


ภาพที่ 2.3 การจับกันของอะมิโลสกับโมโนกลีเซอไรด์  
ที่มา : Pyler (1988)



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในขนมปังที่เติมสารโมโนกลีเซอไรด์  
ที่มา : Pyler (1988)

ผู้ศึกษาการใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ตัวอื่นๆ ได้ให้ข้อสังเกตว่าผลดีที่เกิดเนื่องจากการใช้สารอิมัลซิไฟเออร์มิใช่การกันให้เกิดการแข็งตัวของเนื้อขนมปังแต่ช่วยให้ระดับการเกิดการแข็งของเนื้อขนมปังระหว่างการเก็บเป็นไปช้าลง เพนโตซาน (ภาพที่ 2.5) เป็นสารที่พบว่ามีส่วนช่วยให้การเกิดความชุ่มกลับคืนของสตาร์ชช้าลง ด้วยการลดปริมาณสตาร์ช ที่จะก่อให้เกิดความชุ่ม หรือเกิดการเป็นผลึก (Crystallization) ให้เหลือน้อยลง ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณความชื้นในขนมปังที่เกิดจากการเติมและการดูดน้ำของแป้ง พบว่ามีผลกระทบต่อระดับการเกิดความเก่าของขนมปังได้ สันนิษฐานว่าความเก่าของขนมปังจะเกิดช้า เมื่อขนมปังมีความชื้นสูง แต่อย่างไรก็ตามคำสันนิษฐานดังกล่าวพบว่าจะถูกจำกัดที่ระดับความชื้นสูงสุด 38% ในขนมปังขาวซึ่งเป็นมาตรฐานของขนมปังอเมริกาจึงได้มีการศึกษาที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กันในขนมปังโดยใช้ระยะเวลาในการอบที่ต่างกัน ขนมปังที่มีปริมาณความชื้นสูงจะนุ่มกว่าขนมปังที่มีปริมาณความชื้นต่ำ แต่ระดับการแข็งตัวของเนื้อขนมปังไม่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัด และยังพบว่าไม่ว่าขนมปังนั้น จะมีระดับความชื้นสูง หรือต่ำ เนื้อขนมปังยังคงมีคุณ ลักษณะที่เปลี่ยนเป็นแข็งขึ้นได้โดยความชื้นในขนมปังมิได้สูญเสียไป



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของเพนโตซาน

ที่มา : Pylar (1988)

นอกจากมีการศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำจากก้อนขนมปังแล้วยังได้มีการศึกษา การเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ภายในก้อนขนมปังในช่วงของการเก็บอีกด้วย พบว่าในช่วงการเก็บที่ทำให้ เกิดความเก่าของขนมปังนั้น น้ำจะเคลื่อนย้ายจากเนื้อไปสู่บริเวณผิวของขนมปังทำให้ผิวของขนมปัง นิ่ม และเหนียว ในขณะที่เนื้อของขนมปังจะเพิ่มความแข็งกระด้างขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นดังกล่าวดูเหมือนจะ เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าเป็นผลมาจากความรู้สึกทางประสาทสัมผัสว่าแข็งกระด้างเกิดจากน้ำที่สูญหายไป จากสถานการณ์ดังกล่าวได้มีการทดลองทำขนมปัง 2 ชุดโดยการห่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการ สูญเสียความชื้น พบว่าขนมปังดังกล่าวยังคงสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ส่วนเนื้อขนมปัง จะแข็งขึ้นในช่วงเวลาของการเก็บ นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับความสด (Freshness) มีความแตกต่างกัน ระหว่างระยะการเก็บด้วย ดังนั้นความยากในการที่จะหาความสอดคล้อง ระหว่างการใช้เครื่องมือ วัดกับการทดสอบทางประสาทสัมผัสยังคงเป็นปัญหาที่นักวิจัยยังคงจะต้องทำการศึกษาให้ได้คำตอบ ต่อไปการศึกษาการเคลื่อนย้ายที่ของความชื้นในองค์ประกอบของเนื้อขนมปังพบว่า การเคลื่อนย้าย นั้นไม่คงที่เสมอไปบางครั้งความ ชื้นจะเคลื่อนที่จากสตาร์ชไปยังกลูเตน ดังรายงานของ Cluskey et al (1959) หรือความชื้นอาจเคลื่อนย้ายจากกลูเตนไปยังสตาร์ชได้เช่นกัน ดังรายงาน ของ Willhoft (1973) กล่าวว่าอุณหภูมิของการเก็บขนมปัง มีผลกระทบต่อระดับการเกิดการแข็งตัวของ เนื้อขนมปัง ที่อุณหภูมิต่ำระดับการเกิดจะเพิ่มขึ้นจนใกล้อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง นั่นคือ เนื้อขนมปัง จะแข็งตัวได้มากในอุณหภูมิตู้เย็นและช้าลงหลังจากแช่ถึงจุดเยือกแข็ง ดังนั้นการเก็บขนมปังจึงควรทำ ให้ขนมปังเย็นลงถึงจุดเยือกแข็งอย่างรวดเร็วที่สุด

การเสื่อมสภาพ หรือความเก่าของขนมปังถือเป็นการสูญเสียด้านเศรษฐกิจที่สำคัญ ความพยายามที่จะลดการสูญเสียดังกล่าว ด้วยการพัฒนาทางด้านการผลิต โดยการใส่สาร ด้านการแข็งตัว (Antifirming) สารจับความชื้น (Moisture-retaining Substances) ผสมลงในสูตร ขนมปัง การศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่พยายามศึกษากลไกของปฏิกิริยาทางเคมี ที่เป็น ต้นเหตุของการเสื่อมสภาพโดยพยายามที่จะหาเครื่องมือในการวัดเพื่อที่จะลด หรือขจัด การเสื่อมสภาพดังกล่าว โดยสรุปการเกิดการเสื่อมสภาพ หรือความเก่าของขนมปังเกิดได้ 2 แหล่งคือ ที่ผิวขนมปัง และในเนื้อขนมปัง

### 1) การเสื่อมสภาพบริเวณผิวขนมปัง

เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์โดยขนมปังที่สดใหม่ผิวจะแห้ง และ ค่อนข้างกรอบและแตกง่ายเมื่อเสื่อมสภาพ หรือเก่าผิวขนมปังจะนิ่มและเหนียวกลิ่นรสเมื่อสดใหม่จะ หอม เมื่อเก่ากลิ่นหอมจะหมดไป สาเหตุของการเกิดความเก่าที่ผิวขนมปัง เป็นเพราะดูดซับเอา ความชื้นในอากาศ และโดยเฉพาะภายในเนื้อขนมปัง เพราะผิวขนมปังที่อบสุกใหม่จะแห้งจึงดูดซับ ความชื้นซึ่งเคลื่อนจากภายในสู่ภายนอกได้ง่าย ขนมปังเมื่ออบเสร็จใหม่ความชื้นบริเวณผิวมีปริมาณ 12% (เทียบกับเนื้อขนมปังมี 44-45%) หลังจากเวลาผ่านไป 3-4 วัน เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 70 ° F (21.2 °C) ภายใต้สภาวะที่ไม่สูญเสียความชื้นผิวขนมปังจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นประมาณ 28% ในขณะที่ ความชื้นภายในเนื้อขนมปังจะลดลง นั่นคือการเปลี่ยนแปลงของความชื้นจากเนื้อขนมปังไปยังผิว ซึ่งเป็นผลงานการค้นพบกลไกการเสื่อมสภาพศึกษาโดย Bechtel (1954) แสดงให้เห็นว่าขนมปังที่

เก่าเก็บ 1 วัน จะมีความชื้นในเนื้อขนมปังลดลงไป 2% โดยพิจารณาในแง่ของความแข็งที่ทดสอบทางประสาทสัมผัส

## 2) การเสื่อมสภาพบริเวณเนื้อขนมปัง

เกิดจากการเปลี่ยนแปลง โดยจะเริ่มจากกลิ่นและรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไปเนื้อขนมปังมีความชุ่ม และแข็งร่วนประสิทธิภาพในการดูดน้ำของเนื้อขนมปังลดลงเมื่อการเสื่อมสภาพยังคงดำเนินต่อไปจะปรากฏสภาพของการสูญเสียความชื้นโดยรวมอีกด้วยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพดังกล่าวมีผู้ค้นพบว่าเกิดขึ้นตามลำดับ คือ เกิดความแข็งกระด้างของเนื้อขนมปังก่อนตามด้วยลักษณะที่มีความร่วน และสูญเสียความชื้นโดยการระเหยในที่สุด Willhoft (1973) กล่าวว่า กระบวนการเบื้องต้นที่ทำให้เนื้อขนมปังเกิดการแข็งตัวนั้นเกิดจากความชุ่มกลับคืนของสตาร์ช การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกลูเตนที่มีความชื้นไม่คงที่ และการดูดซับความชื้นไว้ชั่วคราวโดยสตาร์ชที่มีความชุ่มกลับคืน ผลก็คือเกิดการกระจายความชื้นบางส่วนกลับคืนไปกระบวนการเบื้องต้นร่วมกับการเคลื่อนที่ของความชื้นจากใจกลางก้อนขนมปังไปยังส่วนที่อยู่บริเวณขอบของขนมปัง

## 3) การเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นรสของขนมปังเก่า

เมื่อขนมปังเสื่อมสภาพและพบว่ากลิ่นหอมและรสชาติของขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องและสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไประหว่าง 48-72 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาเดียวกับที่ผู้บริโภคสังเกตเห็นความเก่าของขนมปังทั้งนี้เพราะกลิ่นหอมต่างๆ เริ่มจางหายหลังจาก 48 ชั่วโมง กลิ่นเอทานอลจะจางหายไปจากเนื้อขนมปังกลิ่นข้าวสาลีจะลดลงกลิ่นเปรี้ยวและแฉะหมักจะเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถทดสอบความเก่าได้จนถึงจุดที่ขนมปังเสียเมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง เป็นช่วงที่ขนมปังมีคุณลักษณะกึ่งเสื่อมสภาพกึ่งเก่า ซึ่งสังเกตได้จากกลิ่นยีสต์ที่ผ่านการเก็บจะไม่มีกลิ่นหอมหวานเนื่องจากเปลี่ยนสภาพเป็นกรดหมักหลังจาก 96 ชั่วโมง ทั้งกลิ่นและรสชาติจะยิ่งแย่งกว่าเดิม การออกซิเดชันของอัลดีไฮด์เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพเป็นสาเหตุที่ทำให้รสชาติของขนมปังเกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อทำการเก็บขนมปังไว้ 5 วัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัลดีไฮด์ (มีกลิ่นหอม) โดยที่อัลดีไฮด์จะลดลง และคีโตน (มีกลิ่นเหม็น) จะเพิ่มขึ้น

## 4) ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของขนมปัง

ได้มีนักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษาค้นพบทฤษฎี ที่อธิบายที่เกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของขนมปังไว้หลายท่าน และผลที่กระทบต่อคุณภาพของขนมปัง การศึกษาปัจจัยที่เชื่อกันว่าทำให้ขนมปังเสื่อมสภาพ ที่บันทึกไว้เป็นสำคัญ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์หลายท่านเชื่อว่าขนมปังเสื่อมสภาพเพราะการสูญเสียความชื้น Boussingalt (1852) ได้ศึกษาเมื่อ 135 ปีล่วงมาแล้วว่าขนมปังยังคงเสื่อมสภาพได้ แม้เก็บในสภาพที่ปิดผนึกกันความชื้น และพบว่าขนมปังที่เสื่อมสภาพนั้นสามารถทำให้คืนสภาพความชื้นได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °F (60 °C). หลักการนี้ต่อมาได้มีผู้ให้การสนับสนุนการศึกษานี้ ซึ่งได้พิสูจน์ว่าถ้าขนมปังมีความชื้นลดลงต่ำกว่า 30% จะไม่สามารถคืนสภาพความชื้นเหมือนใหม่ได้อีก Lindet (1902) เป็นคนแรกที่พบปรากฏการณ์ของการเสื่อมสภาพขนมปังว่า เนื่องมาจากความชุ่มกลับคืนของสตาร์ชเมื่อสตาร์ชเกิดสภาพความชุ่ม

กลับคืน จะเปลี่ยนสภาพจาก Amorphous Stage ไปเป็น Crystalline Stage ซึ่งดูดน้ำได้น้อยลง และในขณะเดียวกันจะคายน้ำซึ่งเข้าใจว่าถูกดูดซึมไว้โดยกลูเตนหลักการนี้เป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่ น่าเชื่อถือในการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพของขนมปัง Katz (1928) เชื่อว่าขนมปังจะไม่ เกิดเชื่อมสภาพอีกต่อไปถ้าลดความชื้นลงเหลือ 16.4% หรือถ้ามีความชื้นพอเขาได้ทดลองศึกษา การเก็บขนมปังภายใต้สภาพการควบคุมความชื้นเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง และพบว่า

- ขนมปังคงสภาพสดใหม่เมื่อเก็บที่ 140 °F (60 °C) หรือสูงกว่า
- เก็บอบจะเชื่อมสภาพเมื่อเก็บที่ 140 °F (30 °C)
- ใกล้เคียงเชื่อมสภาพเมื่อเก็บที่ 86 °F (17 °C)
- เชื่อมสภาพมากที่ 32 °F (0 °C)

ขนมปังจะคงสภาพสดใหม่เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 14 ถึง -300 °F (-70 ถึง -184 °C) และเชื่อว่าขนมปังเชื่อมสภาพเนื่องมาจากความชุ่มกลับคืนของสตาร์ชเมื่อศึกษาโดยใช้เอกซเรย์ พบว่าขนมปังที่มีความใหม่รูปแบบของสตาร์ชจะเป็นแบบตัววี (V-pattern) ขณะที่ขนมปังเชื่อมสภาพ สตาร์ชจะเป็นรูปแบบตัวบี (B-pattern) ซึ่งเป็นลักษณะของผลึกสตาร์ช Schoch สรุปว่าปัจจัยที่มีผล ต่อการแข็งตัวของเนื้อขนมปังระหว่างการเชื่อมสภาพเป็น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ที่เกิดมาจาก โมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านของอะมิโลเพกตินที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายในเม็ดแป้งที่พองตัวสุกแล้วในขนม ปังอบเสร็จใหม่ๆ และทิ้งให้เย็นแล้วนั้น ในส่วนที่เป็นกิ่งก้านของอะมิโลเพกตินส่วนที่อยู่นอกจะค่อยๆ เริ่มเกิดการรวมตัว และเข้ามาใกล้ชิดติดกันใหม่ด้วยแรงยึดเหนี่ยว (Bonds) ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะนั้น การรวมตัวที่เกิดขึ้นเป็นการรวมตัวภายใน ของโมเลกุลของอะมิโลเพกติน ซึ่งมีความ แข็งแรงน้อยกว่าการเกิดความชุ่มกลับคืนในอะมิโลส ซึ่งการรวมตัวของโมเลกุลอะมิโลเพกตินที่ ทำให้เกิดความแข็งนั้นสามารถสลายหรือเปลี่ยนกลับคืนเป็นความนุ่มได้ ด้วยการนำไปให้ความร้อน ขนาดปานกลางใหม่อีกครั้งหนึ่ง Schoch ได้ตั้งข้อสังเกตที่สนับสนุนการเกิดการเชื่อมสภาพของเนื้อ ขนมปังนี้ว่า ความแข็งกระด้างของขนมปังนั้นเกิดขึ้นได้ในระดับต่างๆ กัน เป็นเพราะแรงจากการจับ ตัวกัน (Bonds) ของขนาดความยาวโมเลกุลสตาร์ชที่ต่างกันโมเลกุลของอะมิโลสที่มีลักษณะต่อกัน เป็นเส้นตรงที่มีความ ยาวมากขณะเกิดการชุ่มกลับคืน ไม่ว่าจะเป็ลักษณะ Insoluble Precipitate หรือเจลก็ตามจะต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 284-302 °F (140-150 °C) ในการทำให้สภาพ กลับคืนดั้งเดิมได้ ตรงกันข้ามกับโมเลกุลของอะมิโลเพกตินที่เชื่อมต่อแบบกิ่งก้านแต่มีขนาดสั้นต่อกัน ลักษณะของโมเลกุลภายใน (Intra Molecular) นั้นจะใช้ความร้อนต่ำเพียง 122-140 °F (50-60 °C) เท่านั้นที่จะทำให้การจับตัวระหว่างกิ่งก้านกลับคืนสู่สภาพที่นุ่มดั้งเดิม

## สนามแม่เหล็ก

เป็นแร่หรือโลหะที่มีสมบัติดูดเหล็กได้ หินแมกแนเซียนเป็นวัตถุที่ดูดเหล็กได้ แม่เหล็กสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ นั่นคือมันสามารถส่งแรงดูดหรือแรงผลักออกไปรอบๆ ตัวมันได้ มีคุณสมบัติในการดูดและการผลักกันระหว่างแท่งแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กสามารถแบ่งได้เป็นสนามแม่เหล็กที่มีขนาดคงที่ตลอดเวลา (Static Magnetic Field) จากแม่เหล็กถาวรหรือสนามแม่เหล็กโลก และสนามแม่เหล็กที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Electromagnetic Field) โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันรอบเหล็ก แรงเหนี่ยวนำในขดลวดทำให้เหล็กนั้นกลายเป็นแม่เหล็กชั่วคราว และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ เหล็กนั้น

แม่เหล็กถาวรมีหลายประเภทด้วยกัน สามารถแบ่งตามชนิดของวัสดุได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ (นิรนาม , 2558)

1) แม่เหล็กจากธาตุโลหะ (Metallic Element) ได้แก่ แม่เหล็กที่ทำเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ รวมถึงแม่เหล็กที่มาจากธาตุโลหะในกลุ่มแร่เอิร์ทบางชนิดที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ เช่น แกโดลิเนียม (gadolinium) ดิสโพรเซียม (dysprosium) เป็นต้น

2) แม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิต (Composite) แบ่งได้ 5 ประเภท คือ

2.1) แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic) หรือแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นแม่เหล็กคอมโพสิตที่ผลิตจากวัสดุผสมของเหล็กออกไซด์ (iron oxide) กับแบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate) หรือสตรอนเชียมคาร์บอเนต (Strontium carbonate) แม่เหล็กเซรามิก ถูกพัฒนาออกมาในช่วงทศวรรษที่ 1960 ใช้กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตกันที่มีราคาถูก จึงเป็นส่วนประกอบในสินค้าหลายชนิด เช่น แผ่นแม่เหล็กติดตู้เย็น เป็นต้น แต่เปราะ (Brittle) หักง่าย และมีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำ

2.2) แม่เหล็กอัลนิโค (Alnico) ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1931 เป็นแม่เหล็กที่มีอะลูมิเนียม นิกเกิล โคบอลต์ เป็นธาตุหลัก และมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติของแม่เหล็ก ผลิตด้วยวิธีการหล่อ (Casting) หรือการเผาผนึก (Sintering) พบเป็นส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ลำโพงเสียง มีคุณสมบัติไม่เสียสมบัติแม่เหล็กง่ายแม้ใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง และมีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าแม่เหล็กเซรามิกแต่มีราคาแพง

2.3) แม่เหล็กทิโคนอล (Ticonal) พัฒนาขึ้นมาโดยบริษัท ฟิลิปส์ สำหรับใช้กับลำโพงเครื่องเสียง แม่เหล็กชนิดนี้มีไทเทเนียม โคบอลต์ นิกเกิล และอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก และมีเหล็กกับธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อย

2.4) แม่เหล็กแบบฉีดเข้าแบบ (Injection molded) องค์ประกอบแม่เหล็กชนิดนี้มี 2 อย่างคือ 1. ผงเรซิน (โพลีเมอร์) ซึ่งเป็นตัวประสาน กับ 2. ผงแม่เหล็กจากวัสดุต่างๆ ดังนั้นความแรงของแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ การผลิตแม่เหล็กจะขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าแบบ ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยทั่วไปแม่เหล็กชนิดนี้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับต่ำถึงปานกลาง และรับแรงกดหรือน้ำหนักได้น้อย

2.5) แม่เหล็กแบบดัดงอได้ (Flexible) แม่เหล็กชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่น การผลิตใช้วิธีฉีดเข้าแบบ และใช้โพลีเมอร์ที่มีสมบัติดัดงอได้ เช่น ไวนิล (vinyl) เป็นตัวประสาน แม่เหล็กชนิดนี้มีราคาถูก แต่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ

3) แม่เหล็กจากธาตุแรร์เอิร์ท (Rare Earth) เป็นแม่เหล็กที่ผลิตจากโลหะผสมของธาตุแรร์เอิร์ท โดยมีการพัฒนาออกมาตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1970 – 1980 แม่เหล็กในกลุ่มนี้มีสมบัติหลายอย่างเหนือกว่าแม่เหล็กอัลนิโค และแม่เหล็กเซรามิก จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการสนามแม่เหล็กความเข้มสูง เช่น ฮาร์ดดิสต์คอมพิวเตอร์ รถไฟแม่เหล็กความเร็วสูง (mag-lev train) แม่เหล็กยกของ (magnet lifter) แต่มีราคาแพง ค่อนข้างเปราะหักง่าย และไม่ทนต่อการกัดกร่อน (จึงต้องชุบหรือเคลือบผิวเพิ่มเติมเพื่อให้ทนทานต่อแรงกระแทกระหว่างการขนส่ง) ปัจจุบันมีการผลิตแม่เหล็กกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ท ออกมา 2 ชนิดคือ แม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์ (Samarium-cobalt) และ แม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodymium)

แม่เหล็กนีโอดีเมียม (NdFeB Magnet) เป็นแม่เหล็กถาวรในกลุ่ม Rare Earth Magnet ซึ่งมีความแรงของแม่เหล็กสูงสุด ส่วนประกอบหลักทำจาก นีโอดีเมียม (Neodymium) เหล็ก และโบรอน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- 1) Sintered NdFeB Magnet
- 2) Bonded NdFeB Magnet

สนามไฟฟ้า (Electric field) คือปริมาณซึ่งใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุภายในบริเวณโดยรอบหน่วยของสนามไฟฟ้าคือ นิวตันต่อคูลอมบ์หรือโวลต์ต่อเมตร

ศักย์ไฟฟ้า (อังกฤษ: Electric Potential) ในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลาสสิก ศักย์ทางไฟฟ้า (ปริมาณสเกลาร์แสดงโดย  $\Phi$ ,  $\Phi_E$  หรือ  $V$  และ ยังถูกเรียกว่า ศักย์สนามไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าสถิต) ที่จุดหนึ่งของที่ว่างคือปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่มีศักย์ภาพที่ที่ซึ่งมีประจุไฟฟ้ามารวมกันที่จุดนั้น

ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะหมายถึงความแตกต่างของจุดใดๆ หรือวัตถุใดๆ ที่มีศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลตามกฎของโอห์ม

### สนามแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Field : EMF)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดทองแดงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ เส้นลวดนั้น โดยลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นลวดและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วยหลักการนี้เรียกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการนี้ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบและเส้นลวดทองแดง เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการพันขดลวดทองแดงจะเสริมอำนาจกันทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- 1) จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ หากพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำมากปริมาณสนามแม่เหล็กก็เกิดมาก
- 2) ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวดตัวนำ หากกระแสไฟฟ้าผ่านมากสนามแม่เหล็กก็เกิดขึ้นมาก

- 3) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือสารที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็ก เพอร์ไรท์
- 4) ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะให้สนามแม่เหล็กมากกว่าแกนที่มีขนาดเล็ก

### กฎแรงของลอเรนซ์

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะมีแรงทางแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้นแรงกระทำนี้เรียกว่าแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

$$F = qv T$$

F	คือ	แรงที่กระทำบนประจุและทำให้ประจุเบี่ยงเบนได้ หน่วย นิวตัน
q	คือ	ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านสนามแม่เหล็ก หน่วย คูลอมบ์
v	คือ	ความเร็วของประจุไฟฟ้า q วัดในหน่วยเมตรต่อวินาที
T	คือ	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก วัดในหน่วยเทสลา

ในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีบริเวณไม่กว้างมากนัก ประจุไฟฟ้าที่เข้ามาในสนามแม่เหล็กจะถูกแรงกระทำเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยแรงกระทำมีทิศทางเปลี่ยนตลอดเวลา ความเร็วเปลี่ยนแต่อัตราเร็วคงเดิม เมื่อพ้นจากสนามแม่เหล็กแล้วประจุจะเดินทางเป็นเส้นตรงด้วยอัตราเร็วเท่ากับครั้งแรก

**เทสลา (T)** คือ หน่วยวัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ จำนวนเส้นสนามแม่เหล็ก 1 เวเบอร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$T = \frac{Wb}{m^2}$$

$$Wb = \frac{J}{A}$$

$$J = N m$$

$$T = \frac{Nm}{A m^2}$$

$$T = \frac{N}{A m}$$

$$T = \frac{m kg}{A sec^2 m}$$

$$T = \frac{kg}{\text{sec}^2} \frac{1}{A}$$

แกนกลางของแม่เหล็ก สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

- 1) แม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) เป็นสภาพแม่เหล็กที่มีความแรงสูงสุด เกิดจากการเรียงของสปินของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้น d ที่ไม่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ เช่น นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ และกลุ่ม rare earth เช่น ซามาเรียม
- 2) แม่เหล็กพารา (Paramagnetism) มีพฤติกรรมเทียบเคียงได้กับสภาพขั้วทางไฟฟ้า (Polarization) มีความแรงน้อยกว่าสภาพแม่เหล็กเฟอร์โร พฤติกรรมส่วนใหญ่อธิบายได้ด้วยทฤษฎีแบบฉบับ เกิดจากอันตรกิริยาของสนามแม่เหล็กกับไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนชั้น s และ p ที่ไม่มีคู่อิเล็กตรอน เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีอิเล็กตรอนในชั้น p เพียงตัวเดียวที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์
- 3) แม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) เกิดจากอันตรกิริยาของสนามแม่เหล็กกับไดโพลแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำในอะตอม มีความแรงน้อยกว่าสภาพแม่เหล็กเฟอร์โรมาก พฤติกรรมต่างจากสภาพขั้วทางไฟฟ้าอย่างสิ้นเชิง สภาพแม่เหล็กไดอาจำแนกจากความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ที่มีทิศทางสวนกับทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอก มักจะพบในสารที่มีอิเล็กตรอนครบคู่ในวงโคจร

สนามไฟฟ้า หมายถึง "บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง" หรือ "บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้น" ตามจุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกันจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไปนอกจากนั้น ณ จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมจะปรากฏศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ กันด้วยซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้า ชนิดเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้าอันเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้าจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป

**เส้นแรงไฟฟ้า** เรากำหนดเพื่อความสะดวกในการศึกษาไม่มีปรากฏอยู่จริงโดยกำหนดเป็นหลักให้เข้าใจตรงกันว่า เมื่อวางประจุไฟฟ้าบวกอิสระลงในสนามไฟฟ้าถ้าประจุไฟฟ้าบวกอิสระนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้แนวทางที่ประจุไฟฟ้าบวกอิสระนี้จะเคลื่อนที่ไป กำหนดว่าเป็นเส้นแรงไฟฟ้า และทิศทางของเส้นสัมผัสซึ่งสัมผัสเส้นแรงไฟฟ้าที่จุดใดๆ ก็คือทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้น

### คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้าคุณสมบัติเส้นแรงไฟฟ้า

- 1) เส้นแรงไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุไฟฟ้าบวก และพุ่งเข้าสู่ประจุไฟฟ้าลบ
- 2) เส้นแรงไฟฟ้าแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน
- 3) เส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันไม่เสริมเป็นแนวเดียวกันแต่จะเบนแยกจากกันเป็นแต่ละแนว ส่วนเส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันจะเสริมเป็นแนวเดียวกัน
- 4) เส้นแรงไฟฟ้าที่พุ่งออกจากกันหรือพุ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุยอมตั้งได้ฉากกับผิวของวัตถุนั้น ๆ เสมอ
- 5) เส้นแรงไฟฟ้าจะไม่พุ่งผ่านวัตถุตัวนำเลย เส้นแรงไฟฟ้าจะสิ้นสุดอยู่เพียงบริเวณผิวของวัตถุตัวนำเท่านั้น
- 6) สำหรับวัตถุตัวนำรูปทรงกลมกลวงที่มีประจุไฟฟ้า และไม่มีวัตถุอื่นที่มีประจุไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในทรงกลมกลวงนั้นจะไม่มีเส้นแรงไฟฟ้าอยู่ในทรงกลมกลวงนั้นเลย เส้นแรงไฟฟ้าจะมีปรากฏสิ้นสุดอยู่เพียงผิวนอกของทรงกลมกลวงเท่านั้นโดยเส้นแรงไฟฟ้าจะมีแนวเข้าสู่จุดศูนย์กลางของทรงกลมกลวง และในกรณีนี้ภายในทรงกลมกลวงจะไม่มีสนามไฟฟ้า ไม่มีแรงกระทำไฟฟ้า กล่าวได้ว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์

**จุดสะท้อนในสนามไฟฟ้า** หมายถึง จุดในสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ทั้งนี้เนื่องมาจาก ณ จุดนั้นอาจปรากฏมีสนามไฟฟ้าอย่างน้อยที่สุดสองสนามมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามอำนาจไฟฟ้าจึงหักล้างกันหมด หรือหาก ณ จุดนั้นมีสนามไฟฟ้ามากกว่าสองสนามแต่ค่าความเข้มและทิศทางของสนามไฟฟ้าเหล่านั้นอยู่ในลักษณะที่อำนาจไฟฟ้าหักล้างกันหมดจุดนั้นเป็นจุดสะท้อนได้ ในกรณีซึ่งมีสนามไฟฟ้าสองสนามซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าสองประจุวางใกล้กันจุดสะท้อนที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากผ่านประจุไฟฟ้าทั้งสองนั้นมีหลักเกณฑ์ดังนี้

(ก) ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองเป็นประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันตำแหน่งจุดสะท้อนจะอยู่ระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสอง ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จุดสะท้อนจะอยู่ที่ตรงกึ่งกลางระยะถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าไม่เท่ากัน จุดสะท้อนจะอยู่ใกล้กับประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่า

(ข) ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองเป็นประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน กรณีนี้ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะไม่มีจุดสะท้อนเกิดขึ้น ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าไม่เท่ากัน จะเกิดจุดสะท้อนอยู่นอกระยะระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสองโดยอยู่ใกล้กับประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่า

### ปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สนามไฟฟ้า

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพทางพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ โดยเฉพาะในกระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพัลส์สนามไฟฟ้า มีดังนี้

1) ความเข้มสนามไฟฟ้า มีผลกับเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเซลล์ รวมถึงการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อเซลล์มีขนาดลดลงจะต้องการความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ถ้าเซลล์มีรูปร่างที่ต่างกันจำเป็นต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับค่า Dielectric Strength (ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก) ของอาหาร (Ho & Mittal, 2003) และมีขอบเขตอยู่ในช่วง 60-80 kV/cm นอกจากนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การใช้สนามไฟฟ้าที่สูงมากจะเกิดการทำลายเซลล์ แต่ก็มีข้อเสียคือเกิดประกายไฟฟ้าจากกระแสมีฟองอากาศเกิดขึ้น เกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรด และอาจเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ไม่ต้องการได้

2) เวลาในการผ่านสนามไฟฟ้าการเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้ความกว้างของพัลส์และจำนวนของพัลส์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า จะมีผลต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น (Heinz, et al., 2000)

3) อุณหภูมิของกระบวนการ อุณหภูมิมีผลต่อความเสถียรของเชื้อจุลินทรีย์คือที่อุณหภูมิต่ำหนึ่งในส่วนประกอบของเซลล์เมมเบรนที่เรียกว่า Phospholipids นั้นจะมีลักษณะคล้ายเจล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นผลึกของของเหลวซึ่งจะมีความเสถียรน้อยกว่า Dunn & Pearlman (1987) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 40°C เป็น 50°C สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *S. dublin* ในน้ำนมเพิ่มขึ้น และ Jayaram (2000) สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *L. brevis* เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงขึ้น (จาก 24°C เป็น 60°C) และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Phospholipids

4) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ผันกลับกับความต้านทาน มีหน่วยเป็นซีเมนต่อเมตร (S/m) การนำไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นประจุของอาหารและไฮโดรพลาสซึม [16] เยื่อหุ้มเซลล์จะอ่อนแอลงเมื่อความเข้มข้นของประจุสูงขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง แต่ Hülshager, et al (1981) และ Vega-Mercado, et al (1996) พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นและค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

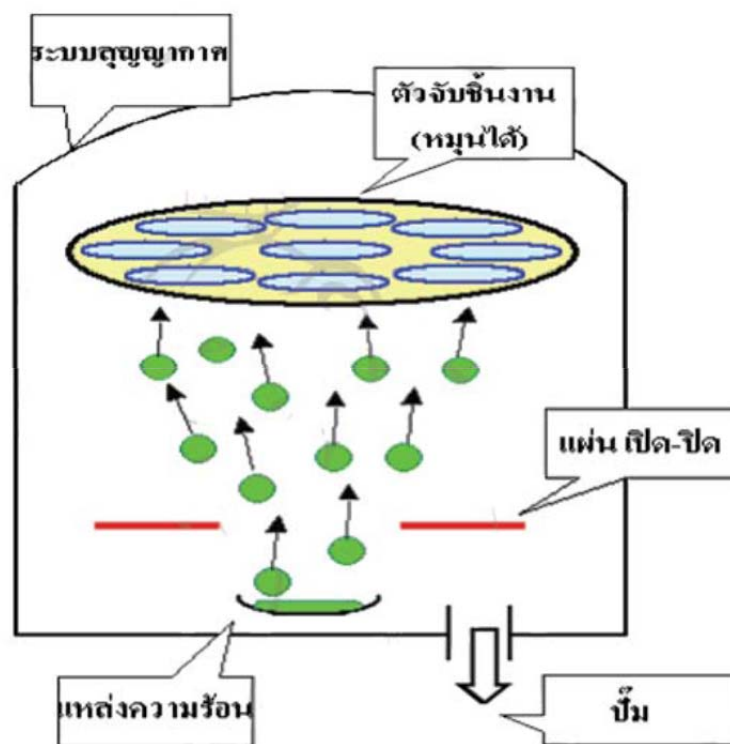
5) ผลของฟองอากาศฟองอากาศและอนุภาคฟองอากาศจะเกิดที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูง ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30-50 kV/cm ไม่ควรมีอากาศในอาหาร เนื่องจากเมื่อมีการไหลของกระแสภายในช่องแคบจะเกิดฟองอากาศ และที่บริเวณผิวของฟองอากาศความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลง ความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก็ลดลงไปด้วย (Stefan, 2006)

6) คุณสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์ (Sale & Hamilton, 1967) พบว่าเซลล์ยีสต์จะไวต่อสนามไฟฟ้ามากกว่าแบคทีเรีย (Hülsher, et al., 1981) อธิบายว่าจุลินทรีย์ที่ต่างชนิดกันมีส่วนประกอบของเมมเบรนที่ต่างกัน ดังนั้นความต้านทานจึงต่างกัน จุลินทรีย์แกรมบวกจะมีความไวต่อสนามไฟฟ้าน้อยกว่าแต่ไม่ได้มีการตรวจสอบถึงระยะของการเจริญที่ต่างกัน

### กระบวนการเทคนิควิธีในการทำฟิล์มบาง

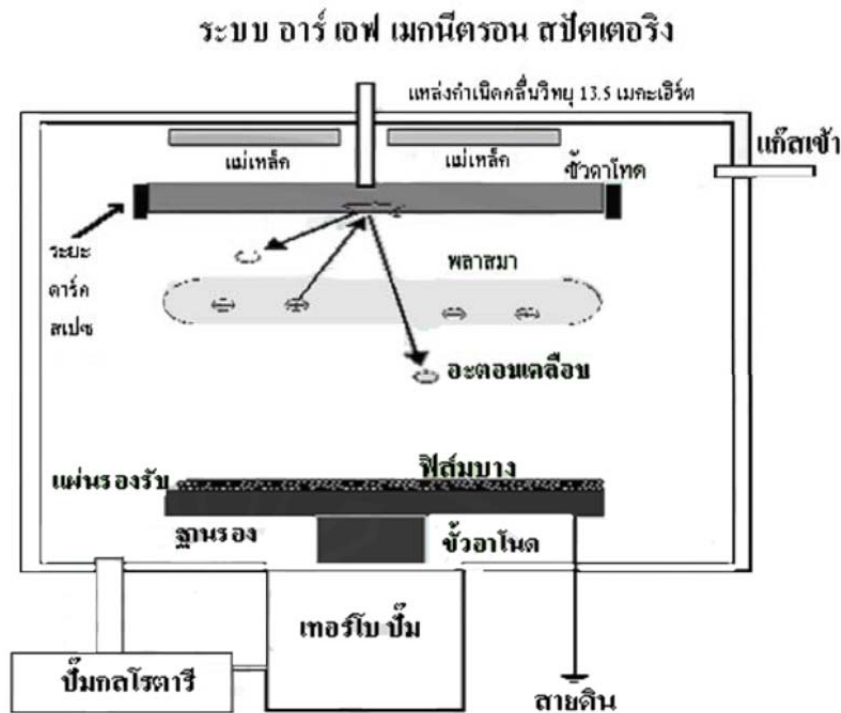
การเคลือบฟิล์มบางอาศัยหลักการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศหรือสภาวะต่างๆ ที่ทำการสร้างขึ้น โดยจะขอยกตัวอย่างดังนี้

1) การทำฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหย เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศโดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูน โตเป็นชั้นฟิล์มบางต่อไป ดังภาพที่ 2.6 ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้ คือ แรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ



ภาพที่ 2.6 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร  
ที่มา : Chapman Brain (1980)

2) การทำฟิล์มบางด้วยเทคนิคโกลดิสซาร์จ (Glow Discharge Technique) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งชนวัสดุรองรับ และมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง  
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

เทคนิคโกลดิสซาร์จประกอบด้วย 3 กระบวนการดังนี้

- 1) กระบวนการก๊าซดิสซาร์จ (Gas Discharge Process)
- 2) กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)
- 3) การสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง (DC Sputtering)

โดยมีรายละเอียดในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการก๊าซดิสซาร์จ (Gas Discharge Process) ภายใต้ความดันบรรยากาศต่ำ ๆ ประมาณ 75 มิลลิทอร์ ก๊าซจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกกับอิเล็กตรอน เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วที่วางห่างกันอิเล็กตรอนจะถูกขัดขวางด้วยสนามไฟฟ้า วิ่งเข้าหาขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แต่กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำมาก ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Break down voltage) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ระหว่างขั้วไฟฟ้าจนถึงแรงดันไฟฟ้าทะลาย จะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

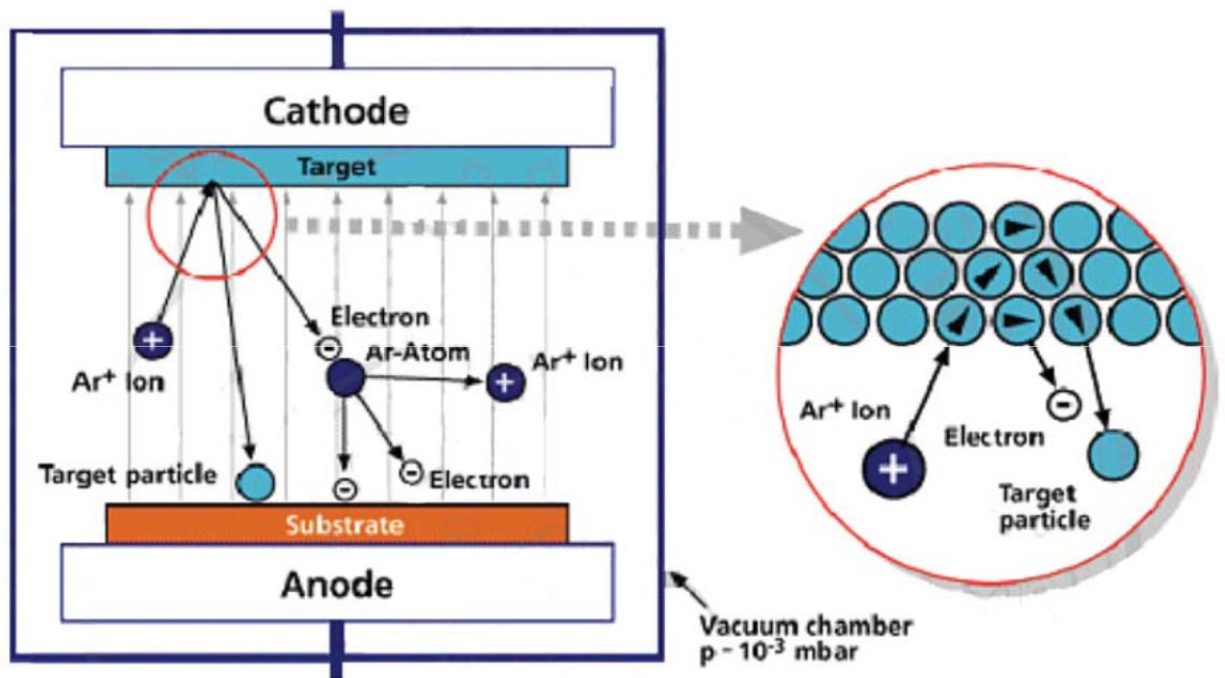
1.1) สนามไฟฟ้าที่แรงดันทะลาย จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากพอที่จะไอออไนซ์ (Ionize) โมเลกุลของก๊าซ เมื่อเกิดการชนกันทำให้อิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและเร่งเข้าสู่ขั้วบวก ส่วนอนุภาคไอออนจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซจะวิ่งเข้าสู่ขั้วลบ

1.2) อนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนขั้วลบ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวก ทำให้เกิดการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซอย่างต่อเนื่องและรักษาภาวะโกลดิสชาร์จไว้ได้ พร้อมกันนี้อะตอมของขั้วลบที่ถูกชน จะหลุดออกมาและฟุ้งกระจายในบรรยากาศต่ำ ๆ ซึ่งพร้อมที่จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ตกลงบนแผ่นรองรับ อะตอมที่หลุดออกมาส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า

1.3) หลังการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับอิเล็กตรอน จนเกิดการไอออไนซ์เซชันไอออนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้บริเวณใกล้ขั้วบวกมี โพสิทีฟสเปซชาร์จ (Positive space charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนถูกกวาดด้วยสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวกอย่างรวดเร็ว การเกิดโพสิทีฟ สเปซชาร์จ ใกล้ขั้วลบ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วลบมีค่าสูงชันตักดีไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด พ้นจากบริเวณนี้ สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ หลังการ ไอออไนซ์อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปมาก และไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวมันเองได้ภายใต้สนามไฟฟ้าต่ำนี้ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงไม่มีพลังงานสูงพอ ที่จะไอออไนซ์ก๊าซในการชนครั้งต่อไปโอกาสที่เป็นไปได้คือ ผลจากการชนจะทำให้เกิดก๊าซในสถานะกระตุ้น (Excited state) เป็นส่วนใหญ่

1.4) อนุภาคเมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วจะเป็นกลางทางไฟฟ้า และกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) หรือการตกจากสถานะกระตุ้นของอะตอมสู่สถานะพื้น จะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความถี่แสง ทำให้บริเวณนั้นเกิดการเรืองแสงหรือที่เรียกว่า โกลดิสชาร์จ ส่วนการรวมกันของไอออนกับอิเล็กตรอนจะคายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) และเกิดได้ยากกว่ามากทำให้บริเวณนั้นมีมืด (Dark space region) ซึ่งเป็นบริเวณระหว่างขั้วลบบกับโพสิทีฟสเปซชาร์จที่ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงนิยมใช้ก๊าซอาร์กอน เนื่องจากเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งมี Atomic mass สูงปานกลาง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มในระหว่างการสปัตเตอริง ราคาไม่แพงและหาง่าย

**2.1) กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)** เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของเป้าเม็ตสาร (Target) หลุดออกมา เนื่องจากการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ในระหว่างการชนหรือกระทบกันจะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ถูกชนและอะตอมใกล้เคียง การที่อะตอมบริเวณผิวหน้าของสารสามารถเคลื่อนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของสารนั้นได้จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะชนะแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีกับอะตอมใกล้เคียง และเป็นพลังงานจลน์ให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวสาร



ภาพที่ 2.8 กระบวนการสปัตเตอริงภายในแชมเบอร์

ที่มา : Chapman Brain (1980)

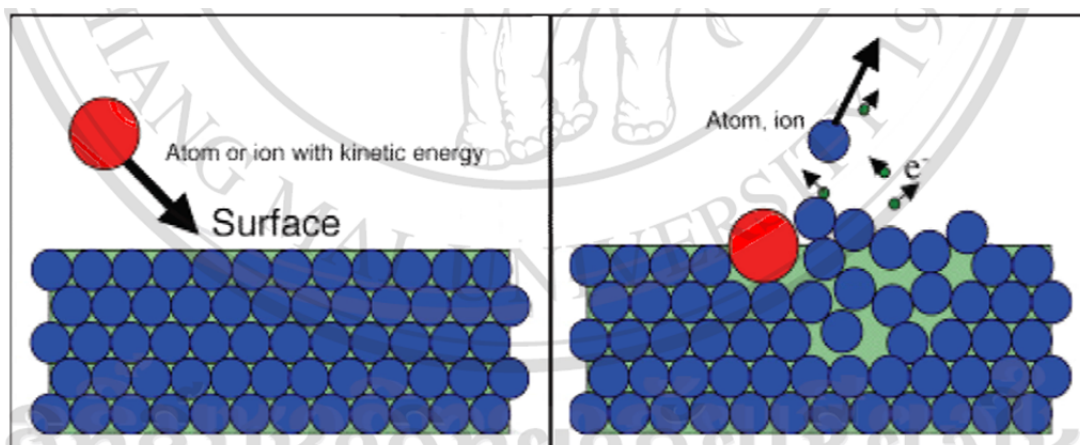
เนื่องจากเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า อะตอมที่หลุดออกมาจะมีสถานะเป็นไอออนหรือบางครั้งการชนของอนุภาคพลังงานสูง อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ ดังนั้นในการสปัตเตอริง จำเป็นต้องมีกระบวนการดังนี้ คือ

2.1) มีเป้าหมาย (Target) เพื่อให้อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ (Substrate)

2.2) อนุภาคพลังงานสูงที่สามารถเคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมาย จะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมาย ได้อย่างมีประสิทธิภาพและที่สำคัญอนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีใด ๆ กับเป้าหมาย อนุภาคอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบเป็นอนุภาคที่ง่ายต่อการผลิตและสามารถเร่งให้เกิดพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ง่าย แต่มวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมาย ซึ่งทำให้การถ่ายเทพลังงานและการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่ถูกชน เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การถ่ายเทพลังงานโมเมนตัม จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อมวลของอนุภาคที่ชนและอนุภาคที่ถูกชนมีค่าเท่ากัน ดังนั้น จำเป็นต้องเลือกอะตอมและสามารถเร่งอนุภาคไอออนของอะตอมนั้นในสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้อะตอมของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน เป็นต้น ซึ่งทำให้อัตราการหลุดของอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมายสูงเพียงพอตามที่ต้องการ

2.3) อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องตามความต้องการ ซึ่งสามารถผลิตอนุภาคพลังงานสูง ได้จากกระบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas discharge process) เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของเป้า

เม็ดสาร ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร และปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายหลังการชนสามารถอธิบายได้ง่าย ๆ ด้วยการชนกันของลูกบิลเลียด โดยการยิงลูกบิลเลียดลูกหนึ่งเข้าไปชนกับกลุ่มของลูกบิลเลียดที่วางอยู่กับที่ ภายหลังการชนจะเกิดการกระเจิงของลูกบิลเลียดไปในทิศทางต่าง ๆ กัน บางลูกสะท้อนกลับออกมา นั่นคือ การหลุดออกมาของอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร แต่ในกระบวนการสปีดเตอริงจริง ๆ นั้น พลังงานระหว่างการชนกันของอะตอมแตกต่างกันไปจากพลังงานระหว่างการชนของลูกบิลเลียด ภาพที่ 2.9 เป็นรูปแบบการชนของลูกบิลเลียดซึ่งเป็นการยกตัวอย่างให้เข้าใจ ถึงกลไกของการสปีดเตอริงเท่านั้น



ภาพที่ 2.9 การชนกันของอะตอมในลักษณะของลูกบิลเลียด  
ที่มา : Chapman Brain (1980)

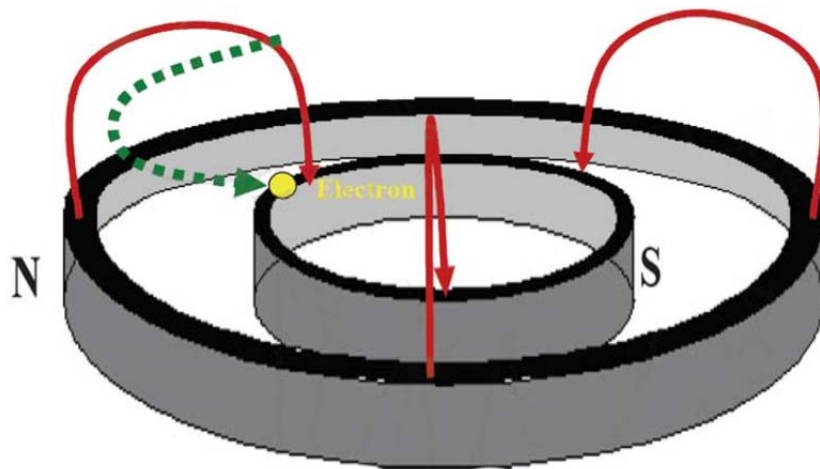
เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป่าสารเคลือบ ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าเม็ดสารเกิดขึ้นดังนี้

1. ไอออนอาจจะสะท้อนกลับจากผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปแบบของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป่าเม็ดสาร
2. การชนกันของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป่าเม็ดสาร เมื่อไอออนมีพลังงานสูงมากพอ
3. ไอออนอาจฝังตัวลงไปในผิวของเป่าเม็ดสาร (Ion implantation) ซึ่งระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน
4. การชนของไอออนบนผิวเป่าเม็ดสาร ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของเป่าเม็ดสารใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice) เรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered surface layers
5. การชนกันของไอออน อาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่อง ระหว่างอะตอมของเป่าเม็ดสาร ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป่าเม็ดสาร ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปีดเตอริง

### 3) การสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง (DC Sputtering)

ระบบ ดีซี สปัตเตอริง ใช้กับเป้าเม็ตสาร (Target) ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า วางไว้ที่ขั้วคาโทดและแผ่นรองรับวางไว้ที่ขั้วแอโนด โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและแอโนดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 4 - 10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของแชมเบอร์มีค่าต่ำ ระยะ Dark space ในระบบ โดยทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 1- 4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งของแอโนดอยู่ในบริเวณ Negative glow อุปกรณ์ ทำงานอยู่ในช่วง Abnormal glow discharge ก๊าซที่ใช้ในระบบนิยมใช้ก๊าซเฉื่อย ซึ่งให้ค่าอิเล็กตรอนสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ มีราคาสูงกว่าก๊าซเฉื่อยอื่นๆ ในขณะที่การเกิดกระบวนโกลว์ดีสชาร์จที่ความดันของก๊าซค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดีสชาร์จไว้ ตรวจจับที่ระยะ Dark space ไม่มากกว่าระยะทางระหว่างคาโทดกับแอโนด เมื่อความดันของก๊าซลดลงหรือแรงดันไฟฟ้า ระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะ Dark space ขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงมีปริมาณไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันก๊าซต่ำกว่า  $10^{-2}$  ทอร์ ระยะ Dark space ยาวกว่าระยะระหว่างขั้ว อิเล็กโทรดและกระแสลดลงสู่ศูนย์ กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าเม็ตสารเนื่องจากการสปัตเตอริง ขณะความดันก๊าซสูงขึ้น ระยะ Dark space หดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น และกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันก๊าซ

อัตราการเกิดสปัตเตอริง ขึ้นกับอัตราการวิ่งชนเป้าเม็ตสารของอนุภาคไอออน ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มอัตราการสร้างอนุภาคไอออน ก็สามารถเพิ่มอัตราการเกิดสปัตเตอริงได้ วิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ แมกนีตรอน สปัตเตอริง หมายถึง การเพิ่มปริมาณไอออน โดยการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุ เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียว หรือเป็นวงกลม เมื่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำมุมกับสนามแม่เหล็ก ทำให้โอกาสที่อนุภาคที่มีประจุเหล่านี้จะไปชนกับอนุภาคอื่น ๆ มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณมากเพียงพอกับความต้องการ นอกจากนั้นสนามแม่เหล็กก็สามารถกักอิเล็กตรอนและอนุภาคที่มีประจุไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ออกไป ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก

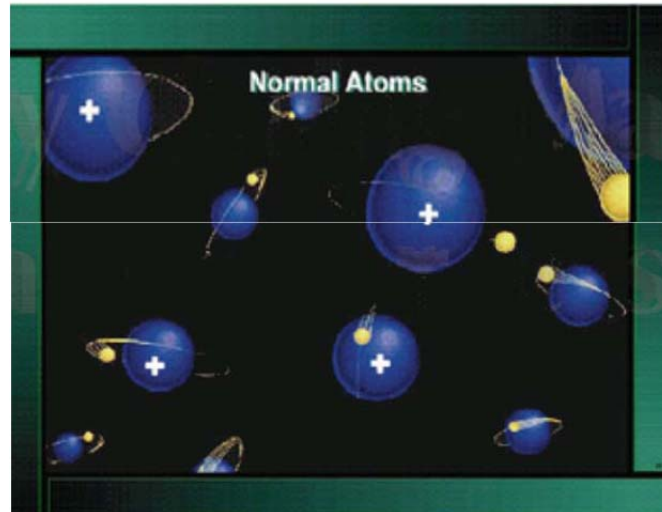
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานสนามไฟฟ้าเรียกว่า Longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพของการเพิ่มปริมาณไอออนไม่สูงมากนัก แต่สามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มไว้ได้ดี ในกรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า Transverse filed เป็นกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวางทิศทางของสนามแม่เหล็กขนานกับสนามไฟฟ้า สำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มบางโดยวิธีการสปัตเตอร์ สามารถเตรียมได้ทั้งสารที่เป็นโลหะและอโลหะ ไม่ว่าจะมียุคหลอมเหลวสูงหรือต่ำ โดยอาศัยการดิซชาร์จไฟฟ้าของก๊าซเฉื่อยภายใต้ความดันต่ำระหว่าง  $10^{-3} - 10^{-1}$  ทอร์ ให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงภายใต้ความต่างศักย์ระหว่าง 400 - 10,000 โวลต์ เข้าชนเป้าสารเคลือบ (Target) ซึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง อะตอมของสารเคลือบจะหลุดออกมาด้วยพลังงานเฉลี่ยค่อนข้างสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอนโวลต์/อะตอม ฟุ้งกระจายในสภาพอะตอมเดี่ยว โดยอะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกมาส่วนหนึ่งจะเคลื่อนย้ายที่ภายใต้สนามไฟฟ้าลงไปเคลือบบนแผ่นรองรับในลักษณะของแผ่นฟิล์ม ทำให้การยึดเกาะมีความคงทนสูง ไม่หลุดล่อนออกได้ง่ายในกรณีที่ต้องเตรียมสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าในลักษณะแผ่นฟิล์มจะใช้วิธี DC sputtering แต่ถ้าเป็นฉนวนไฟฟ้าจะใช้วิธี RF sputtering (Radio frequency sputtering) สำหรับความถี่ที่ใช้ในการสปัตเตอร์แบบ RF sputtering จะใช้ความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz ตามข้อตกลงของ International Agreement for Unlimited Radiation ซึ่งเป็นความถี่ที่ให้อัตราการionization สูงและไม่รบกวนต่อสัญญาณของระบบโทรคมนาคม

#### การทำฟิล์มบางโดยใช้หลักการอาร์ค (Arc spray technique)

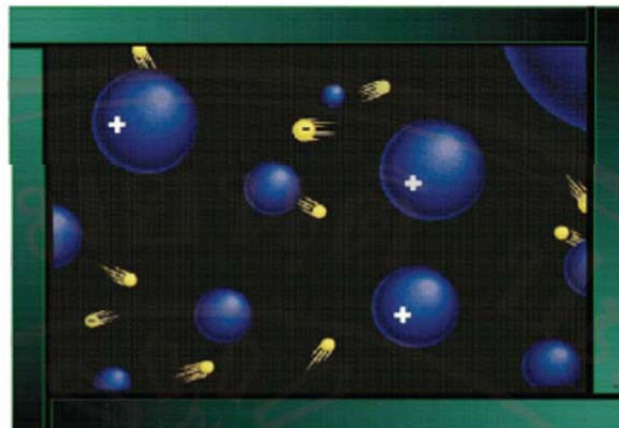
เป็นเทคนิคการทำให้เกิดฟิล์มบางโดยใช้หลักการอาร์ค (Arc) ลวดโลหะด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อให้ไอเล็กตรอนที่อยู่บริเวณปลายเส้นลวดโลหะถูกกระตุ้นและชนกับโมเลกุลของอากาศบริเวณปลายเส้นลวดโลหะจนทำให้โมเลกุลของอากาศแตกตัวกลายเป็นไอออนบวกและลบดังภาพที่ 2.11 และ 2.12

## Normal atoms are charge neutral



ภาพที่ 2.11 อะตอมของอากาศในสภาวะปกติ

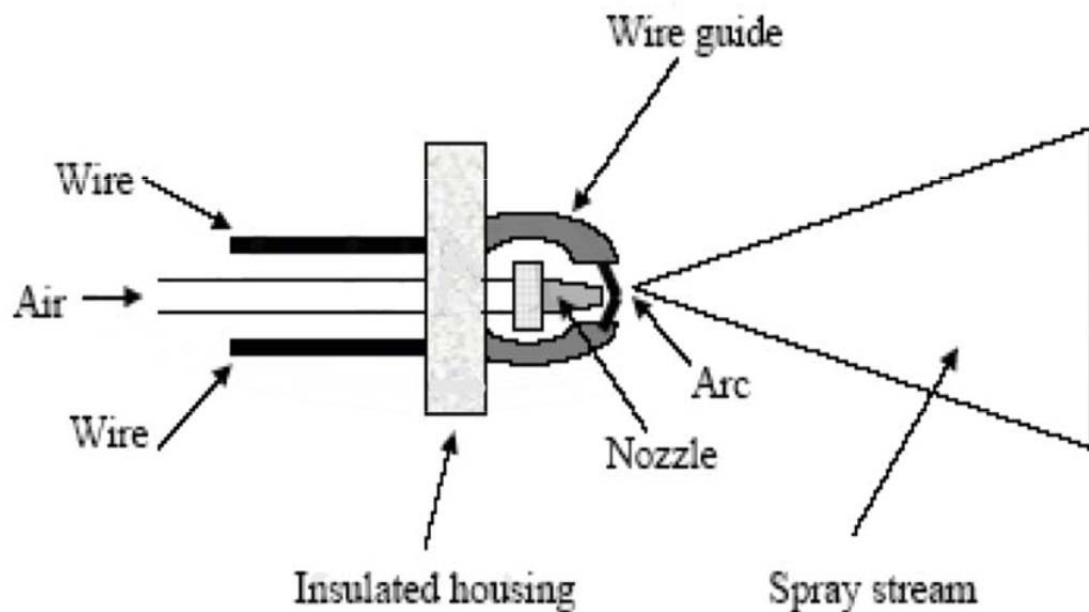
**Add some thermal energy**  
 electrons acquire enough energy to escape from atomic-  
 binding forces => ions & electrons



ภาพที่ 2.12 อะตอมของอากาศเมื่อได้รับพลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม  
 ที่มา : Chapman Brain (1980)

เมื่ออะตอมเกิดการแตกตัว ไอออนบวกจะวิ่งชนปลายเส้นลวดด้านแคโทด ในขณะที่ไอออนลบจะวิ่งชนบริเวณปลายเส้นลวดโลหะด้านแอโนด จนทำให้เกิดความร้อนมากพอที่จะทำให้ก้อนอนุภาคเล็ก ๆ บริเวณปลายลวดโลหะหลุดออกมาในปริมาณมาก จากภาพที่ 2.12 จะมีที่อากาศ

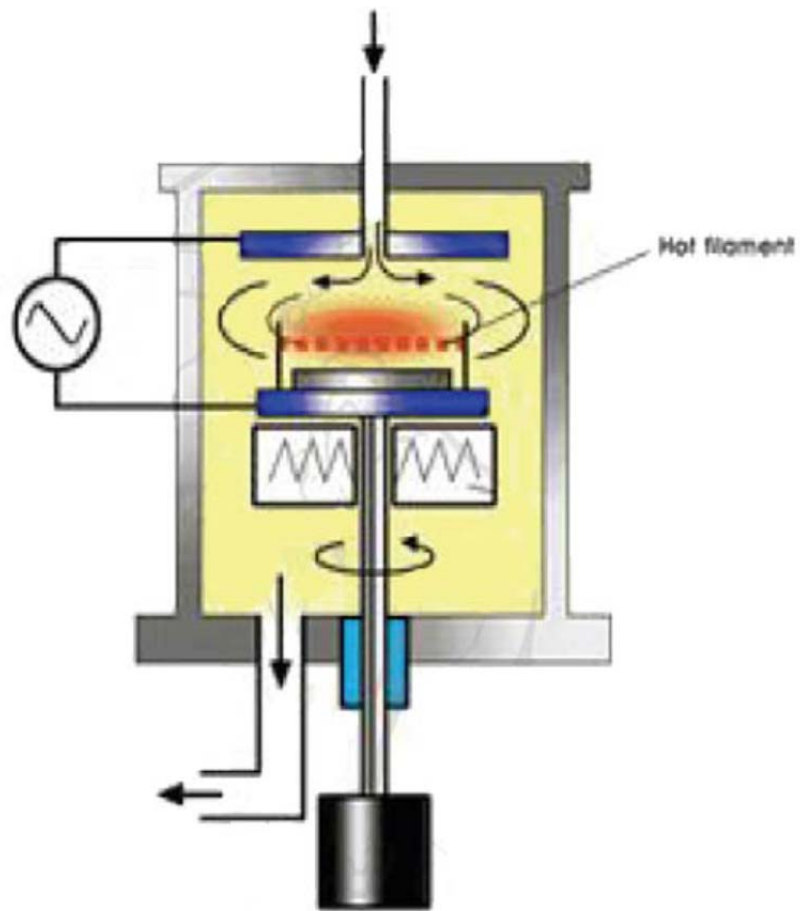
สำหรับพ่นอนุภาคที่หลุด ให้เกาะติดกับ substrate ในลักษณะของฟิล์มบาง โดยเทคนิคนี้จะช่วยให้อนุภาคที่ถูกพ่นเกาะติดแน่นขึ้น



ภาพที่ 2.13 เทคนิคของ Two-wire arc spray gun  
ที่มา : Chapman Brain (1980)

การทำฟิล์มบางวิธีการตกไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) วิธีการตกสะสมไอสารเคมี เป็นวิธีที่ให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่หน้าที่เป็นแหล่ง กำเนิดคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้คือ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) และอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) เป็นต้น ส่วนแหล่งความร้อนที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของแก๊สให้แตกเป็นอะตอมของคาร์บอนนั้นนิยมใช้พลาสมาหรือขดลวดความร้อน การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้สามารถควบคุมโดยอัตราการไหลของ ก๊าซและความร้อนที่ให้ไปได้ ทั้งนี้วิธีการนี้ต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น

เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น แดกตัวและตกบนฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว ดังภาพที่ 2.13



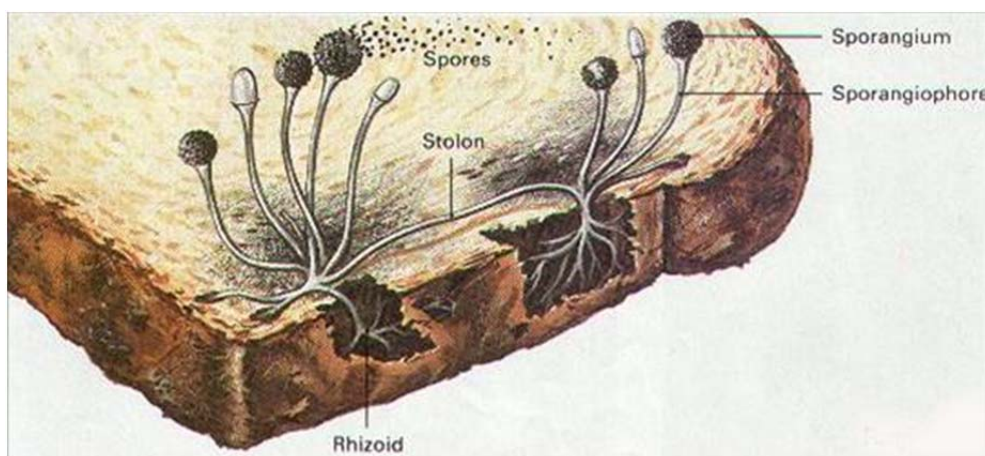
ภาพที่ 2.14 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา  
ที่มา : Chapman Brain (1980)

## เชื้อรา

เชื้อรามักเกิดขึ้นภายหลังจากการอบเสร็จแล้ว เพราะปกติแล้วความร้อนที่ใช้ในการอบขนมปังจะสูงเพียงพอต่อการทำลายสปอร์ของราที่อยู่ทั้งด้านในและด้านนอกของขนมปัง โดยรามีส่วนมากปนเปื้อนจากอากาศที่ไม่สะอาดเข้าไปในขนมปังขณะปล่อยรอให้เย็น หรือปนเปื้อนขณะขนส่ง หรือปนเปื้อนมากับวัสดุห่อขนมปัง การเจริญของรามักเริ่มต้นที่รอยตัดของขนมปัง ชนิดของราที่เกี่ยวข้องกับการเน่าเสียของขนมปัง เช่น *Rhizopus nigricans* ซึ่งมีไมซีเลียมเป็นบุยุฝ้ายสีขาว และสร้างสปอร์สีดำ *Penicillium expansum* หรือ *Penicillium stoloniferum* สร้างสปอร์สีเขียว *Aspergillus niger* สร้างสปอร์สีเขียว สีออกม่วงหรือน้ำตาลจนถึงดำ และมีการสร้างสีขึ้นโดยสีจะซึมเข้าไปในเนื้อขนมปังทำให้ขนมปังมีสีเหลือง *Monilia (Neurospora) sitophila* จะให้ *Conidia* สีชมพู เป็นต้น การเน่าเสียของขนมปังจากเชื้อราขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การปนเปื้อนหลังจากการอบ เช่น จากสปอร์ของราในอากาศ จากเมล็ดพันธุ์ขนมปัง เป็นต้น

### 1. *Rhizopus*

ไรโซปัส (*Rhizopus*) คือชื่อจีนัสของเชื้อรา (Mold) ซึ่งเป็นฟังไจในไฟลัม *Zygomycota* ที่สำคัญต่ออาหาร เป็นราแบบเส้นใยไม่มีผนังกัน (Non Septate Hypha) มักสร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศคือ สปอร์แรงจิโอสปอร์ (Sporangiospore) ซึ่งรวมกันอยู่ใน Sporangium ที่มีรูปร่างกลม ที่ฐานของ Sporangiphore ซึ่งเป็นก้านชูสปอร์ มีไรโซยด์ (Rhizoid) และสโตลอน (Stolon) ซึ่งเป็นเส้นใยที่เชื่อม Sporangiospore ไรโซปัสสามารถสร้างสปอร์แบบมีเพศ เรียกว่า ไชโกสปอร์ (Zygospore)



ภาพที่ 2.15 *Rhizopus stolonifer* หรือราขนมปัง (Bread Mold)

ที่มา : พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปพนธ์ (2555)

### 1.1 สายพันธุ์ของเชื้อราไรโซปัสที่สำคัญในอาหาร

1) *Rhizopus oligosporus* เป็นเชื้อรา (Mold) ในสกุล ไรโซปัส (*Rhizopus*) ใช้ผลิตเทมเป้ (Tempeh)

2) *Rhizopus stolonifer* หรือ Bread Mold คือ เชื้อราในจำพวก ไรโซปัส (*Rhizopus*) ที่สำคัญต่ออาหารเป็นสาเหตุทำให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial Spoilage) ค่า Water Activity ต่ำสุด (Minimum  $a_w$ ) ที่เจริญได้ คือ 0.93 *Rhizopus stolonifer* เป็นราแบบเส้นใยไม่มีผนังกัน (Non Septate Hypha) มักสร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศคือ สปอร์แรงจิโอสปอร์ (Sporangiospore) ซึ่งรวมกันอยู่ใน Sporangium ที่มีรูปร่างกลม ที่ฐานของ Sporangiochore ซึ่งเป็นก้านชูสปอร์ มีไรซอยด์ (Rhizoid) และสโตลอน (Stolon) ซึ่งเป็นเส้นใยที่เชื่อม Sporangiospore

### 1.2 บทบาทของเชื้อราไรโซปัสในอาหาร

1) ทำให้เกิดโรคพืชไรโซปัสผลิตเอนไซม์ (Enzyme) เพกทีเนส (Pectinase) ทำให้เกิดโรคเน่าในพืช ผัก (Vegetable) ผลไม้

2) ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial Spoilage) เช่น *Rhizopus stolonifer* หรือราขนมปัง (Bread Mold) เป็นราที่ทำให้ขนมปัง (Bread) เสื่อมเสีย

3) ใช้ในการแปรรูปอาหาร เพื่อการหมัก (Fermentation) เช่น เทมเป้ (Tempeh) ใช้เชื้อไรโซปัส โอลิโกสปอร์รัส (*Rhizopus oligosporus*)

### 2. *Penicillium*

*Penicillium* เป็นชื่อวงศ์ของ เชื้อราชนิดหนึ่ง ซึ่งอยู่ในอาณาจักรฟังไจ (Fungi) *Penicillium* เป็นราที่พบได้ทั่วไปทุกหนทุกแห่ง มีชื่อเรียกกันว่า Green Mold และ Blue Mold ตามสีสปอร์ของรา สปอร์แบบไม่อาศัยเพศ ของ *Penicillium* เป็นแบบ Codinia

ความสำคัญในอาหาร เชื้อรา *Penicillium* เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย (Microbial Spoilage) ของอาหารหลายชนิด เช่น ผลไม้ อาหารกึ่งแห้ง แต่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอาหารหมัก เช่น เนยแข็ง

*Penicillium expansum* หรือ *Penicillium stoloniferum* จะสร้างสปอร์สีเขียว

### 3. *Aspergillus*

*Aspergillus* คือชื่อ วงศ์ (Genus) ของเชื้อรา (Mold) ที่มีความหลากหลาย มีสายพันธุ์มากกว่า 100 สายพันธุ์ พบทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial Spoilage) ได้ทั้งเนื้อสัตว์ น้านม ผักผลไม้ เพราะสามารถผลิตเอนไซม์ได้หลายชนิด เช่น เอนไซม์ อะไมเลส (Amylase) ย่อยโมเลกุลของสตาร์ชให้เป็นน้ำตาล เอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ย่อยโมเลกุลของโปรตีนให้เป็นกรดแอมิโน เอนไซม์เพกทีเนส (Pectinase) ย่อยสลายเพกทิน (Pectin) ซึ่ง

เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชและบางสายพันธุ์ยังสร้างสารพิษ (Mycotoxin) เช่น *Aflatoxin Ochratoxin* ซึ่งเป็นอันตรายในอาหาร

*Aspergillus niger* จะสร้างสปอร์สีเขียวออกม่วง หรือน้ำตาลจนถึงดำ และเมื่อมีการสร้างสปอร์แล้วสปอร์จะซึมเข้าไปในขนมปังทำให้ขนมปังมีสีเหลือง

### 3.1 ลักษณะทั่วไป

*Aspergillus* จัดเป็นราในกลุ่ม Ascomycetes เป็นเชื้อราที่พบได้ทั้งในรูปของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศและแบบอาศัยเพศ การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศจะสร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ เรียกว่า Conidia

ไฮฟา (Hyphae) เป็นแบบไม่ผนังกัน มีเส้นใยที่แตกแขนง เส้นใยของเชื้อราไม่มีสี แต่ละส่วนที่กั้นแล้วมีนิวเคลียสหลายอัน ก้านชูสปอร์ (Conidiophore) เกิดจาก Foot Cell ก้านชูสปอร์ อาจมีผนังกันหรือไม่ก็ได้ ที่ส่วนปลายของก้านชูสปอร์ จะโป่งออกเป็นเวสซิเคิล (Vesicle) และมีส่วนที่ยื่นออกมาเป็นสเตอริกมา (Sterigma) ซึ่งอาจมีชั้นเดียวหรือสองชั้นก็ได้ โคนิเดีย (Conidia) ถูกสร้างขึ้นภายในสเตอริกมาโคนิเดียที่สร้างขึ้นภายหลังจะดันโคนิเดียอัน แรก ๆ ออกมา และยังคงติดต่อกันอยู่จึงเกิดเป็นสายของโคนิเดียมีรูปร่างทรงกลมมีหลายสี เช่น ดำ เขียว น้ำตาล

### 3.2 การใช้ประโยชน์

1) การหมักอาหาร (Fermentation) เชื้อรา *Aspergillus* ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในแถบเอเชีย ได้แก่ ประเทศจีน ญี่ปุ่น ไทย และอินโดนีเซีย โดยเฉพาะ *Aspergillus oryzae* ซึ่งใช้เพื่อการผลิต อาหารหมัก จากถั่วเหลือง (Soybean) และเมล็ดธัญชาติ (Cereal Grain) เช่น ซีอิ๊ว (Fermented Soy Sauce) มิโซ (Miso) เต้าเจี้ยว และสาเก (Sake) เป็นต้น

2) ใช้ผลิต เอนไซม์

3) การหมักเพื่อผลิต กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก (Citric Acid) เป็นผู้ย่อยสลายสารต่าง ๆ ในระบบนิเวศ โดยมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ได้หลายชนิดเพื่อสร้างออกมาย่อยเซลล์ของพืช ในธรรมชาติได้

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### เบเกอรี่

Alain Le-Bail et al. (2011) ได้นำขนมปังเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและสภาวะสุญญากาศ และศึกษาอัตราการเกิด Staling ภายหลังจากอบครั้งสุดท้าย Vacuum chilled breads (VCBs) มีการสูญเสียความชื้นมากกว่า Conventionally Chilled Bread (CCB) พลังงานที่สูงกว่าจะละลายผลึกของอะไมโล เพคติน Vacuum chilled breads (VCBs) จะผลเสียต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง ค่าความแข็งของเศษขนมปังจะเพิ่มขึ้น 20% จลนพลศาสตร์การเกิด Staling ของ VCB จะเร็วกว่า 10% หลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 12 วัน อัตราการเกิด Staling ของ VCB จะเป็น 2 เท่าของ CCB อัตราการเกิด Staling ของ CCB จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับภายหลัง Partial Baking ข้อมูลความร้อนที่ใช้ในการละลายอะไมโลเพคตินแสดงถึงปริมาณอะไมโลเพคตินที่เกิดขึ้น ณ จุดสุดท้ายของการเกิด Staling สำหรับ CCB ภายหลัง part baked process และ Full Baking process VCB แสดงถึงปริมาณการเกิดผลึกของอะไมโลเพคตินที่มากกว่า 10% ณ จุดสุดท้ายของการเกิด Staling

Besbes et al. (2014) ได้ศึกษาผลของสภาวะการอบต่อจลนพลศาสตร์การแข็งตัวของขนมปังและคุณลักษณะทางกายภาพของ pan bread เมื่ออบที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 30 นาที และ ที่อุณหภูมิ 220°C เวลา 28.6 นาที หลังจากการอบทำการหั่นและนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 9 วัน ทำการทดสอบค่าเนื้อสัมผัส Young Modulus , Crumb Density , Crust/Crumb Ratio ในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อและปริมาณความชื้น พบว่าค่าความแข็งตัวของขนมปัง (Staling) สามารถแสดงได้ในรูปของแบบจำลองความสัมพันธ์อันดับหนึ่ง ตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยการใช้ความร้อนที่มีอัตราเร็วสูง จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า Staling จะเร็วกว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยการใช้ความร้อนที่มีอัตราเร็วต่ำ ขนมปังเปลือกแข็งจะมีอัตราการเกิด Staling สูงกว่าขนมปังที่เปลือกไม่แข็งและด้านนอกของเปลือกขนมปังจะมีอัตราการเกิด Staling สูงกว่าด้านใน

Belyaev et al. (1995) พบว่า E.coli มีการตอบสนองที่สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำคือ 30  $\mu$ T อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 เฮิร์ตจะส่งผลต่อการสิ้นสະเทือนของโครงสร้างยีน โดยสามารถวัดการสิ้นสະเทือนได้จากค่าความหนืดที่ขึ้นกับเวลาและความเข้มข้นของเซลล์ที่แตกตัว ซึ่งผลการทดลองพบว่าแบบจำลองตามทฤษฎีสามารถอธิบายถึงผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อปริมาณเซลล์ที่แตกตัวได้

Ludek et al. (2002) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ (50 Hz, Bm=2.8-10 mT, เวลาการทดลอง 0-12 นาที, อุณหภูมิห้อง) ต่อการทำงานของแบคทีเรียแกรมลบ(E. coli) ซึ่งอัตราการเจริญจะลดลงเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก จากการทดลองทั้งสองแบบอัตราการเจริญของเชื้อจะลดลงกว่าตัวควบคุม ความสามารถในการก่อตัวเป็นโคโลนีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสนามแม่เหล็กและเวลาเพิ่มขึ้น

Jeanette et al. (2011) ได้ศึกษากลไกในการต่อต้านการเกิด Staling ในขนมปังแบ่งสาลีขาว โดยศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิด staling , การเสื่อมสภาพของอะไมโลเพคติน

คุณลักษณะของน้ำ (water content, การกระจายตัวของ Crumb&crust) ขนมปังจะถูกอบใน Pan Bake ตัว Anti-staling ที่ใช้ คือ maltogenic  $\alpha$ -amylase , monoglyceride and lipase จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพของแป้ง กลูเตนและแป้งเจลทั้งสี่ชนิดจะหาปริมาณอะไมโลเพคตินหรือการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพคติน อัตราการเกิด Staling จะถูกวัดโดยค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) และการคืนตัว (Springness) วิเคราะห์อัตราการเสื่อมสภาพของอะไมโลเพคตินและ amylose-lipid complex จะถูกวิเคราะห์โดย DSC และ water content , water loss และ water migration พบว่า การเติม  $\alpha$ -amylase เป็นปัจจัยที่ปรับปรุงค่า Staling มากที่สุด

Lucia et al. (2004) ได้ศึกษาถึงสนามแม่เหล็กที่ความเข้ม 300 mT ต่อการลดอัตราการเจริญของเซลล์และยีน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กคงตัว (SMF) จะส่งผลให้เซลล์มีการเจริญอย่างรวดเร็วและเกิดการเปลี่ยนแปลงของยีน

Lukas et al. (2004) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ ( $t < 30$  min,  $B_m = 10$  mT, ความถี่ 50 Hz) ต่อเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ประเภท คือ Escherichia coli , Leclercia adecarboxylata และ Staphylococcus aureus โดยเปรียบเทียบด้วยผลของ CFU ซึ่งค่าที่ได้จะลดลงเมื่อระยะเวลาในการได้รับสนามแม่เหล็กยาวนานขึ้นและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มเพิ่มขึ้น โดยจะส่งผลต่อ E.coli อย่างมาก แต่ S.aureus จะไม่ได้รับผลมาก ซึ่งอัตราการเจริญที่ลดลงจะเกิดขึ้นทันทีที่เปิดสนามแม่เหล็ก

Mittenzwey et al. (1996) ได้มีการนำเชื้อแบคทีเรียแต่ละแบบมาทดลองที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ 2-50 Hz ที่ความเข้ม 1-10 mT และได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทำการวิเคราะห์การเจริญเติบโต การสังเคราะห์โปรตีน และการเรืองแสงของแบคทีเรีย ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์โปรตีน ส่วนอัตราการเจริญของ E.coli จะลดลง จากผลการทดลองแสดงว่าแบคทีเรียค่อนข้างจะต่อต้านสนามแม่เหล็ก

Vulicevic et al. (2004) ในระหว่างการเก็บรักษา Frozen par-baked คุณภาพของขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการเพิ่มความแน่นเนื้อ(Firmness) ความชื้น และมีการสูญเสียด้านกลิ่น ได้ทำการทดลองขนมปัง 4 ชนิด โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $-18^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 9 เดือนเพื่อประเมินผลกระทบของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของคุณภาพ คุณภาพขนมปังจะประเมินจากค่าการทดสอบทางประสาทสัมผัส เคมี และกายภาพ อายุการเก็บรักษาจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงระดับคุณภาพของขนมปัง และทำการวิเคราะห์เพื่อบ่งชี้ถึงความแน่นยำ 90% ของปัจจัยคุณภาพ 19 ชนิด โดยใช้องค์ประกอบพื้นฐานสองชนิด จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้อย่างดี

Wei et al. (2011) ผลของ Pulse electric field ต่อลักษณะทางเคมีของกรดโอเลอิก ปัจจัยของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดโอเลอิก คือ acid value , peroxide value และ carbonyl value จะทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากผ่าน Pulse electric field และในระหว่างการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Pulse electric field ไม่มีผลต่อค่า acid value แต่กระบวนการ Pulse electric field จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า peroxide value ทั้งในส่วนที่ผ่าน Pulse electric field และเมื่อทำการเก็บรักษา ส่วน Carbonyl value เมื่อผ่านการ Pulse electric

field จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ภายใน 8 วันแรกของการเก็บรักษาหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว Hydrogen radicals ในกรดโอเลอิกเมื่อผ่าน Pulse electric field จะถูกตรวจสอบโดย electron spin resonance spectroscopy ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดอนุมูลอิสระ

Wenjin et al. (2009) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กสถิตต่อ E.coli โดยวิเคราะห์จากค่า CFU ในการทดลองได้วัด CFU ด้วยปัจจัยของอุณหภูมิ และค่าสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองพบว่า CFU จะลดลงเมื่อช่วงเวลาที่ได้รับสนามแม่เหล็กยาวนานขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (25 เป็น 40°C) ค่า CFU จะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง(B)

Xin, et al. (2008) ได้พัฒนาแบบจำลองของเทคนิคการใช้สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงต่ออายุของไวน์ โดยศึกษาถึงผลต่อกลิ่นและรสชาติ ผลจากการทดลองทางประสาทสัมผัสพบว่ามีการเกิดขึ้นอย่างมาทั้งในแง่บวกและลบ สภาวะที่ดีที่สุด คือ ที่สนามไฟฟ้า 600 V/cm เวลา 3 นาที ที่สามารถเร่งอายุของไวน์ได้ ทำให้วัตถุดิบของไวน์มีความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้และมีรสชาติที่ดีขึ้น การวิเคราะห์ค่าทางเคมีด้วย HPLC และ GC/MS ใช้ในการบ่งชี้ถึงความแตกต่างของตัวอย่างที่ได้รับและไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และในไวน์ที่มีแอลกอฮอล์สูงสารระเหย aldehyde จะมีการลดลงเป็นจำนวนมาก แต่ ester และ amino acid จะเพิ่มขึ้น ส่วนสารอื่นๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ตลอดการทดลอง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสามารถนำมาใช้ในการบ่มไวน์ได้ช่วยเร่งเวลาในการบ่มให้สั้นลงและได้ไวน์ที่มีคุณภาพดีขึ้นได้

Ya, Ye., Yu. & S.P. (1995) การตอบสนองของเซลล์ *Escherichia coli* เมื่อโดนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาก (ELF EMFs) คือการตรวจสอบที่การเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก ความกว้าง 30  $\mu$ T. ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาก กับ ที่ความถี่ 9 Hz ในการเปิดเผยการทำทอนก่อนหน้าของชิ้นการสร้างจีโนม (GCS) จะถูกตรวจสอบ ผลกระทบของการทำทอนซึ่งวัดจากวิธีเวลาที่มีความหนืดผิดปกติขึ้นอยู่กับเวลา ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเซลล์ที่สัมผัส ผลที่ได้คือการเลียนแบบตัวเองขึ้นมาอีกในแต่ละความเข้มข้น การเปลี่ยนแปลง GCS ที่เพิ่มขึ้นของความเข้มข้นที่เซลล์สัมผัสและถึงที่สูงประมาณ  $6 \times 10^3$  เซลล์/มล นั้นหมายความว่าเซลล์มีการโต้ตอบระหว่างปฏิกิริยาการทำทอนเพื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีการเพิ่มขึ้นของผลกระทบความอึดตัวของผลกระทบที่ระดับความเข้มข้นใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อที่มียูคาริโอตสูงอาจจะสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของพารามิเตอร์นี้สำหรับการควบคุมของระบบที่อยู่อาศัย การทดลองนี้ถูกจัดตั้งโดยอาศัยการทำทอนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลของความเข้มข้นที่เซลล์สัมผัสถูกอธิบายไว้อย่างดีจากรูปแบบทางทฤษฎี รูปแบบนี้ได้มาจากการสมมติว่าผลผลิตจากการจับกันเอนไซม์โดยการปฏิสัมพันธ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเซลล์ในระดับมิลลิเมตร ในช่วงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ในกรณีของการเกิดปฏิกิริยาการทำทอนของเซลล์ E.Coli ที่คลื่นความถี่ต่ำระดับมิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงของ CGS แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงในระดับสเปกตรัมของโปรตีน บริเวณดีเอ็นเอ

### สนามแม่เหล็ก

Amonrat et al. (2012) ความคงตัวรำข้าวจากความร้อนเนื่องจากการสกัดต่อ extraction yield, quality และคุณสมบัติทาง antioxidant ของการสกัดเย็น extraction yield จะได้ปริมาณสูงสุดเมื่อใช้ความร้อนจากลมร้อน คือ 5.53g/100 g bran , ความร้อนจากไมโครเวฟ 4.81g/100 g bran, การอบ 4.77g/100 g bran และไอน้ำ 3.41g/100 g bran ความร้อนจากลมร้อนและไมโครเวฟจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดและมีผลต่อความคงตัวของน้ำมันรำข้าว คือ acid value 6.30-6.38 mg KOH/g oil , Free fatty acid(FFA) 3.51-3.17% และ Peroxide value(PV) 11.72-12.13 mg Eqv/kg oil. น้ำมันรำข้าวที่ได้จากลมร้อนจะมี gamma oryzanol สูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ )

Belyaev et al. (1995) พบว่า E.coli มีการตอบสนองที่สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำคือ 30  $\mu$ T อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 เฮิร์ตจะส่งผลต่อการสันสเทือนของโครงสร้างยีน โดยสามารถวัดการสันสเทือนได้จากค่าความหนืดที่ขึ้นกับเวลาและความเข้มข้นของเซลล์ที่แตกตัว ซึ่งผลการทดลองพบว่าแบบจำลองตามทฤษฎีสามารถอธิบายถึงผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อปริมาณเซลล์ที่แตกตัวได้

Fojt et al. (2004) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำต่อเชื้อ 3 ชนิด คือ *Escherichia coli*, *Leclercia adecarboxylata* และ *Staphylococcus aureus* ที่สภาวะ ( $t<30$  min,  $B_m = 10$  mT ,  $f=50$ Hz) เปรียบเทียบปริมาณเชื้อ (CFU) ต่อเวลาในสนามแม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็ก ซึ่งเชื้อทุกชนิดจะลดลงเมื่อเวลาในสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อด้วย โดยจะมีผลมากที่สุดกับเชื้อ E.Coli และน้อยสุดกับ S.aureus

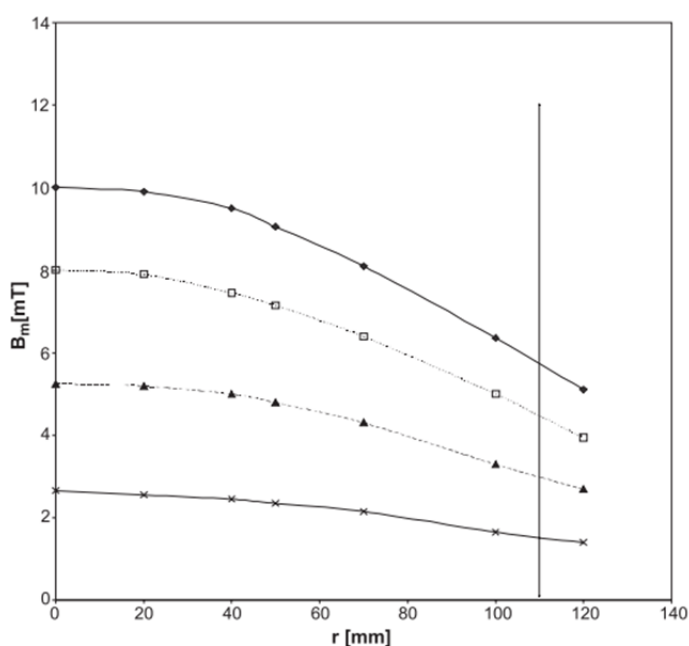


Fig. 1. Dependence of the magnetic field induction  $B_m$  in the coil on the distance from the coil axis for different current values:  $\blacklozenge$  – 1.9 A,  $\square$  – 1.5 A,  $\blacksquare$  – 1.0 A,  $\times$  – 0.5 A (the vertical line in the graph at the distance 110 mm represents the radius of the coil).

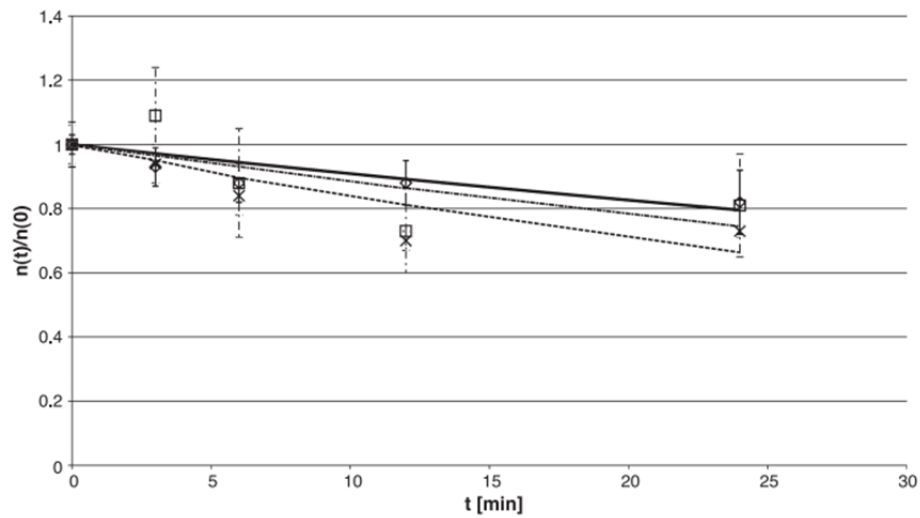


Fig. 2. Dependence of the relative number of CFU on the duration of the exposure ( $B_m = 10$  mT).  $\times$  - - - *E. coli* ( $y = e^{-0.0302t}$ ),  $\square$  - - - - *L. adecarboxylata* ( $y = e^{-0.0121t}$ ),  $\diamond$  - *S. aureus* ( $y = e^{-0.0096t}$ ).

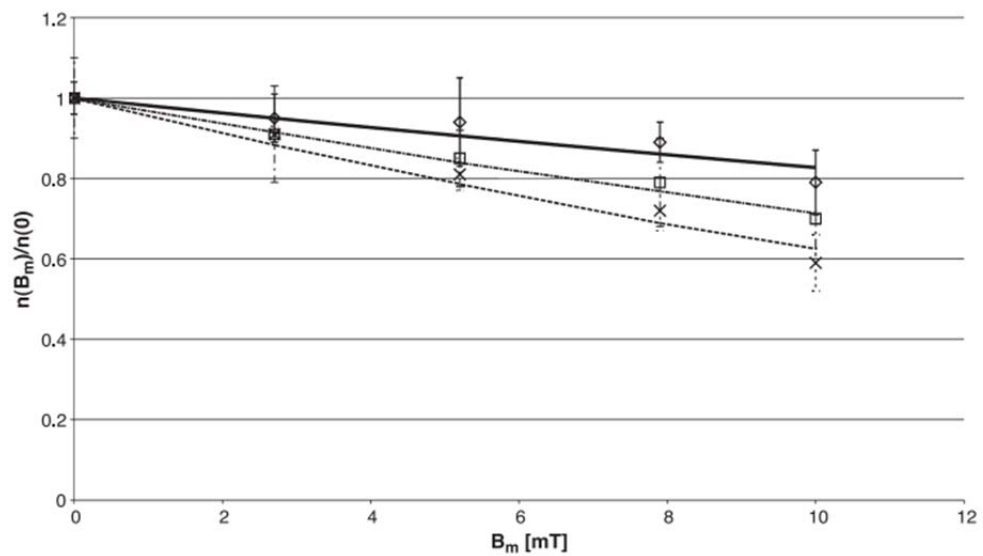


Fig. 3. Dependence of the relative number of CFU on the value of the magnetic field induction ( $t = 12$  min).  $\times$  - - - *E. coli* ( $y = e^{-0.047B_m}$ ),  $\square$  - - - - *L. adecarboxylata* ( $y = e^{-0.035B_m}$ ),  $\diamond$  - *S. aureus* ( $y = e^{-0.019B_m}$ ).

Lipiec et al. (2004) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กชนิดแกว่งแบบจังหวะ (Oscillating magnetic field pulse) ต่อการเหลือของเชื้อจุลินทรีย์บนมันฝรั่ง พบว่ามีผลกับ *Ervinia carotovora* และ *Streptomyces scabies* มากที่สุด แต่ไม่ส่งผลมากนักกับ *Alternaria solani* โดยเทคนิคการแกว่งของสนามแม่เหล็กจะสามารถนำไปใช้สำหรับการฆ่าเชื้อในอาหารและผลิตผลทางการเกษตร

Ludek et al. (2002) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ (50 Hz,  $B_m=2.8-10$  mT, เวลาการทดลอง 0-12 นาที, อุณหภูมิห้อง) ต่อการทำงานของแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) ซึ่งอัตราการเจริญจะลดลงเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก จากการทดลองทั้งสองแบบอัตราการเจริญของเชื้อจะลดลงกว่าตัวควบคุม ความสามารถในการก่อตัวเป็นโคโลนีจะลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กและเวลาเพิ่มขึ้น

Lucia et al. (2004) ได้ศึกษาถึงสนามแม่เหล็กที่ความเข้ม 300 mT ต่อการลดอัตราการเจริญของเซลล์และยีน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กคงตัว(SMF) จะส่งผลให้เซลล์มีการเจริญอย่างรวดเร็วและเกิดการเปลี่ยนแปลงของยีน

Lukas et al. (2004) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ ( $t<30$  min,  $B_m=10$  mT, ความถี่ 50 Hz) ต่อเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ประเภท คือ *Escherichia coli*, *Leclercia adecarboxylata* และ *Staphylococcus aureus* โดยเปรียบเทียบกับผลของ CFU ซึ่งค่าที่ได้จะลดลงเมื่อระยะเวลาในการได้รับสนามแม่เหล็กยาวนานขึ้นและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มเพิ่มขึ้น โดยจะส่งผลต่อ *E.coli* อย่างมาก แต่ *S.aureus* จะไม่ได้รับผลมาก ซึ่งอัตราการเจริญที่ลดลงจะเกิดขึ้นทันทีที่เปิดสนามแม่เหล็ก

Mittenzwey et al. (1996) ได้มีการนำเชื้อแบคทีเรียแต่ละแบบมาทดลองที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ 2-50 Hz ที่ความเข้ม 1-10 mT และได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทำการวิเคราะห์การเจริญเติบโต การสังเคราะห์โปรตีน และการเรืองแสงของแบคทีเรีย ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์โปรตีน ส่วนอัตราการเจริญของ *E.coli* จะลดลง จากผลการทดลองแสดงว่าแบคทีเรียค่อนข้างจะต่อต้านสนามแม่เหล็ก

Sowbhagya and Bhattacharya (1976) สภาวะการเก็บรักษาคืออุณหภูมิและแสงมีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันของไขมันในข้าว ข้าวที่สกัดไขมันออกด้วยเฮกเซนเป็นการลดปริมาณกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว จึงช่วยลดการเกิดออกซิเดชันที่ทำให้เกิดกลิ่นหืนของข้าวระหว่างการเก็บรักษา แต่ไม่ทำให้คุณภาพในการหุงดีขึ้น การเก็บรักษาข้าวสารในที่มืดแสงที่อุณหภูมิห้องช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสภาวะความชื้นปกติหรือความชื้นสูงช่วยชะลอ onset of oxidation ในข้าวที่สีเล็กน้อยรวมทั้งในข้าวสารด้วย และพบว่าระดับการสีมีผลอย่างมากกับออกซิเดชันในข้าวดิบ ข้าวที่ไม่ได้ผ่านการสีมีความเสถียรมาก เนื่องจากมีสารต้านการเกิดออกซิเดชัน แต่อัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อข้าวได้รับการสีเพิ่มขึ้นแต่ในข้าวนี้กลับพบว่าได้รับผลกระทบจากระดับการสีเล็กน้อย

Teo et al. (2000) ทดลองเก็บแป้งข้าวและ isolated starch ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า ความหนืดของน้ำแป้งที่ได้จากแป้งข้าวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น fresh flour paste มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่า isolated starch และมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างช้า แต่คงที่กว่า isolated starch paste และไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ ใน isolated starch และพบว่า starch-oryzenin interaction ลดลงระหว่างการเก็บจึงมีอิทธิพลต่อความหนืดของน้ำแป้งด้วยแต่ไม่มากนัก เนื่องจากแป้งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติการไหล ดังนั้น pasting behavior ของ aged rice flour จึงใกล้เคียงกับ isolated rice starch เมื่อทดลองเติม isolated

oryzenin ลงใน isolated starch (reconstituted flour) พบว่า pasting behavior ใกล้เคียงกับ แป้งข้าว (aged flour 35°C, 14 สัปดาห์)

Wei et al. (2011) ผลของ Pulse electric field ต่อลักษณะทางเคมีของกรดโอเลอิก ปัจจัยของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดโอเลอิก คือ acid value , peroxide value และ carbonyl value จะทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากผ่าน Pulse electric field และในระหว่างการ เก็บรักษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Pulse electric field ไม่มีผลต่อค่า acid value แต่ กระบวนการ Pulse electric field จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า peroxide value ทั้งในส่วนที่ผ่าน Pulse electric field และเมื่อทำการเก็บรักษา ส่วน Carbonyl value เมื่อผ่านการ Pulse electric field จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ภายใน 8 วันแรกของการเก็บรักษาหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว Hydrogen radicals ในกรดโอเลอิกเมื่อผ่าน Pulse electric field จะถูกตรวจสอบโดย electron spin resonance spectroscopy ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดอนุมูลอิสระ

Wenjin et al. (2009) ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กสถิตต่อ E.coli โดยวิเคราะห์จากค่า CFU ในการทดลองได้วัด CFU ด้วยปัจจัยของอุณหภูมิ และค่าสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองพบว่า CFU จะลดลงเมื่อช่วงเวลาที่ได้รับสนามแม่เหล็กยาวนานขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (25 เป็น 40°C) ค่า CFU จะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง (B)

Xanthakis et al. (2013) ได้มีการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กแบบคงที่กับการแช่แข็ง เนื้อหมูต่อขนาดของโครงสร้างผลึกน้ำแข็ง พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นสนามแม่เหล็กอัตราการเย็นตัวจะลดลง ได้ทดสอบการลดลงของอุณหภูมิจาก 3.93±1.3°C ถึง 1.92±1.45°C สำหรับตัวควบคุม และตัวอย่างที่ 12 kV SEF พบว่าพื้นผิวของน้ำแข็งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เส้นผ่านศูนย์กลางสัมพัทธ์เฉลี่ยของผลึกน้ำแข็งมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มสนามแม่เหล็ก มีค่าจาก 32.79±4.04 µm สำหรับตัวควบคุม และ 14.55±8.20µm สำหรับตัวอย่างที่ขนาดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กสูงสุด

Xin et al. (2008) ได้พัฒนาแบบจำลองของเทคนิคการใช้สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงต่อ อายุของไวน์ โดยศึกษาถึงผลต่อกลิ่นและรสชาติ ผลจากการทดลองทางประสาทสัมผัสพบว่า มีผล เกิดขึ้นอย่างมากทั้งในแง่บวกและลบ สภาวะที่ดีที่สุด คือ ที่สนามไฟฟ้า 600 V/cm เวลา 3 นาที ที่ สามารถเร่งอายุของไวน์ได้ ทำให้วัตถุดิบของไวน์มีความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้และมีรสชาติที่ดีขึ้น การวิเคราะห์ค่าทางเคมีด้วย HPLC และ GC/MS ใช้ในการบ่งชี้ถึงความแตกต่างของตัวอย่างที่ได้รับ และไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า และในไวน์ที่มีแอลกอฮอล์สูง สารระเหย aldehyde จะมีการลดลงเป็น จำนวนมาก แต่ ester และ amino acid (Cystein) จะเพิ่มขึ้น ส่วนสารอื่นๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ใดๆ ตลอดการทดลอง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสามารถนำมาใช้ ในการบ่มไวน์ได้ช่วยเร่งเวลาในการบ่มให้สั้นลงและได้ไวน์ที่มีคุณภาพดีขึ้นได้

กรอบแนวคิดในการวิจัย

