# บทที่ 2

# วารสารปริทัศน์

## 2.1 ถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Glycine Max (L) Merrill ซึ่งเป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Leguminosae subfamily papilionoideae (2) จัดเป็นพืชตระกูลถั่วที่ปลูกและใช้บริโภคเป็นอาหารพื้นเมืองนานาชนิดในหมู่ชนแถบเอเชีย เช่น จีน เกาหลี ญี่ปุ่น ตลอดจนประเทศไทย ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะปลูกถั่วเหลืองในบริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันออกภาคกลางตอนบน และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดที่มีผลผลิตของถั่วเหลืองมากได้แก่ เชียงใหม่ กำแพงเพชร แพร่ ตาก สุโขทัย เลย ขอนแก่น สระบุรี กาญจนบุรี เป็นต้น

ลักษณะโดยทั่วไปของถั่วเหลืองจะมีขนาดเมล็ด 0.10 - 0.20 กรัม สีของเปลือกมีหลายสี เช่น สีเหลืองซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร สีดำใช้ในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมัน ส่วนสีเขียวและสีน้ำตาลไม่มีผู้นิยมนำมาใช้กันมากนัก จมูกของถั่วเหลืองชนิดเปลือกเหลืองมักมีสีน้ำตาลแต่บางพันธุ์มีจมูกเป็นสีขาว ส่วนของใบเลี้ยง (cotyledon) ซึ่งมีสองใบอยู่ภายใต้เปลือกมีสีเหลืองหรือเขียว อายุการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองแปรตามพันธุ์และสภาวะปลูก โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 90-100 วัน (2)

## 2.2 องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการของถั่วเหลือง

เมล็ดถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนและไขมันจากพืชที่ดีที่สุดแหล่งหนึ่ง ปริมาณของสารอาหารในแต่ละส่วนของเมล็ดแตกต่างกันไป เช่น ในส่วนใบเลี้ยงจะมีโปรตีนร้อยละ43-44ไขมันร้อยละ21-23 และคาร์โบไฮเดรทร้อยละ29-30 ส่วนยอดอ่อนมีโปรตีนร้อยละ 40-41 ไขมันร้อยละ 11-12 และคาร์โบไฮเดรทร้อยละ43-44 สำหรับถั่วเหลืองทั้งเมล็ดจะมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบร้อยละ 40-43 ไขมันร้อยละ 19-21 และคาร์โบไฮเดรทร้อยละ 34-36 พบว่าในเนื้อถั่วเหลืองโดยเฉพาะส่วนของใบเลี้ยงจะมีโปรตีนและไขมันรวมกันร้อยละ 60 ของน้ำหนักถั่วทั้งเมล็ด และร้อยละ 30 เป็นพวกคาร์โบไฮเดรท นอกจากนั้นยังมีสารอาหารประเภท phosphatides, เถ้าซึ่งจัดเป็นพวกแร่ธาตุและวิตามิน (2) ในถั่วเหลืองมีสารยับยั้งการใช้ประโยชน์จากโปรตีนโดยร่างกายชื่อ Trypsin inhibitor และ haemaglutinin สารเหล่านี้ทำลายได้ด้วยความร้อนที่ 100 °C เป็นเวลา10 - 15 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งผลจากความร้อนนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของ lypoxygenase และ urease ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเขียวในถั่วเหลือง (2) โปรตีนส่วนใหญ่ในถั่วเหลืองเป็นglobulin ซึ่งไม่ละลายน้ำที่ isoelectric pH(pH 4 - 5) เกลือที่ความเข้มข้นเหมาะสมทำให้ globulin ละลายได้มากขึ้นและโปรตีนส่วนใหญ่ละลายได้ดีขึ้นเมื่อ pH อยู่ห่างออกไปจาก isoelectric pH เมื่อนำสารละลายโปรตีนถั่วเหลืองไปผ่านกระบวนการ ultracentrifugation พบว่ามีส่วนของโปรตีน 4 ส่วนที่มีค่า sedimentation coefficient เป็น 2S, 7S, 11S และ 15S โดยที่โปรตีนส่วน 7S จะมีมากที่สุดคือประมาณร้อยละ 37 รองลงมาคือโปรตีนส่วน 11S, 2S และ 15S ตามลำดับ (2)

โปรตีนจากถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid) อยู่ครบทุกตัว แต่กรดอะมิโนที่มี sulfur เป็นองค์ประกอบได้แก่ cystine และ methionine มีอยู่ในปริมาณจำกัด แต่เมื่อเสริม methionine ในผลิตภัณฑ์โปรตีนถั่วเหลืองร้อยละ 1.5 จะทำให้ค่า PER (protein efficiency ratio) ของโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้นและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้นจาก 2.25 และ 1.60 เป็น 3.16 และ 2.28 ตามลำดับ (2)

กรดไขมันที่พบในถั่วเหลืองประกอบด้วยชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในอัตราส่วนค่อนข้างคงที่คือประมาณ 15 ต่อ 85 มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่จำเป็นกับร่างกายอยู่ในปริมาณสูง (ร้อยละ 30 - 40 ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว) โดยเฉพาะ linoleic และ linolinic acid (2)

คาร์โบไฮเดรทที่พบในถั่วเหลืองมีทั้งพวกที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ พวกแรกส่วนใหญ่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น sucrose, raffinose และ stachyose ส่วนพวกไม่ละลายน้ำเป็นกลุ่มที่มีโมเลกุลซับซ้อน เช่น arabinose,arabinogalactan และอาจรวมถึงสารในกลุ่มของ pectin ด้วย (2)

สำหรับเกลือแร่พบหลายชนิดในถั่วเหลือง อาทิ phosphorusร้อยละ0.78, sodium ร้อยละ 0.24, potassium ร้อยละ 1.83, calcium และ sulfur ร้อยละ 0.24, magnesium ร้อยละ 0.31 นอกจากนั้นยังพบแร่ธาตุที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ได้แก่ chloride, boron manganese และ copper เป็นต้น (2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 <u>ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง</u>

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมีหลายชนิด ได้แก่ (3)

2.3.1. <u>แป้งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม</u> (Full Fat Soy Flour)

ผลิตจากถั่วเหลืองที่กระเทาะเปลือกออก แล้วนำมาผ่านลูกกลิ้งรีดให้เป็นแผ่นบาง ผ่านความร้อนเพื่อทำลายเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยา oxidation ของไขมัน บดเพื่อให้ได้แป้งที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 mesh แล้วจึงลดความชื้น ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีโปรตีนประมาณร้อยละ 40 - 50

2.3.2 <u>แป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน</u> (Defatted Soy Flour)

ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารเพราะกรรมวิธีผลิตไม่ยุ่งยาก เก็บรักษาได้ง่ายไม่เกิดกลิ่นหืน เนื่องจากมีไขมันต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 1) วิธีผลิตจะใช้ถั่วเหลืองที่คัดเลือกและทำความสะอาด ทำให้ร้อนจนมีความชื้นประมาณร้อยละ10 อัดให้เป็นแผ่นบางแล้วสกัดไขมันออกด้วย hexane เมื่อไล่ hexane ออกแล้วบดร่อนผ่านตะแกรงตามขนาดที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์จะมีโปรตีนอยู่สูงกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักแห้ง

2.3.3 <u>โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น</u> (Soy Protein Concentrate)

เป็นแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันที่แยกคาร์โบไฮเดรทที่ละลายได้และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองเข้มข้นที่มีโปรตีนประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง

กระบวนการผลิตโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้นมี 3 วิธี คือ

2.3.3.1 ใช้สารละลายแอลกอฮอล์ละลายน้ำตาล sucrose, raffinose ,stachyose และส่วนที่ไม่ใช่โปรตีนออกเหลือเฉพาะส่วนโปรตีนและ polysaccharide

2.3.3.2 ใช้สารละลายกรดเจือจาง pH 4.5 ละลายน้ำตาลออก ทำให้เป็นกลาง แล้วทำให้แห้ง

2.3.3.3 ให้ความร้อนชื้นหรือไอน้ำ ทำให้โปรตีนเสื่อมสภาพจนไม่ละลายน้ำ แล้วใช้น้ำล้างน้ำตาลและสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4. <u>โปรตีนถั่วเหลืองสกัด</u> (Soy Protein Isolate)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโปรตีนสูงสุด คือมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้ง ผลิตได้จากการสกัดแยกโปรตีนจากแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันด้วยสารละลายด่าง (pH 10 - 11) แล้วตกตะกอนโปรตีนที่สกัดได้โดยปรับ pH ด้วยกรดให้อยู่ในช่วง isoelectric point (pH 4 - 5) แยกตะกอนโปรตีนออกแล้วทำแห้งหรือปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนทำแห้ง

2.3.5. โปรตีนถั่วเหลืองแปลงเนื้อสัมผัส (Textured Soy Protein)

เป็นผลิตภัณฑ์จากโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแปรรูปจนมีลักษณะเนื้อสัมผัสตลอดจน สี กลิ่น และสมบัติด้านการเคี้ยว คล้ายโปรตีนจากเนื้อสัตว์ (4)

## 2.4 การแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีน

การแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ และเคมีของสารโปรตีนจนลักษณะปรากฏ โครงสร้าง ขนาด ความรู้สึกขณะเคี้ยวเหมือนโปรตีนจากเนื้อสัตว์ สารโปรตีนที่แปลงเนื้อสัมผัสแล้วต้องคงสภาพโครงสร้างหรือเนื้อสัมผัสไว้ได้เมื่อผ่านกระบวนการประกอบอาหาร ตามคำนิยามของ USDA ผลิตภัณฑ์โปรตีนจากพืชที่แปลงเนื้อสัมผัส หมายถึง ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากแหล่งโปรตีนบริโภคได้ มีโครงสร้างและเนื้อสัมผัสเฉพาะตัวเมื่อนำไปประกอบอาหารต้องคงสภาพโครงสร้างไว้ได้โดยไม่เปลี่ยนแปลง(5) ลักษณะโครงสร้างของโปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสควรใกล้เคียงกับการจัดเรียงตัวของเส้นใยในกล้ามเนื้อสัตว์เพื่อการยอมรับของผู้บริโภค

### 2.4.1 ประวัติการแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีน

ความพยายามของมนุษย์ที่จะผลิตอาหารที่มีเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์เริ่มมีขึ้นตั้งแต่ศตวรรษที่ 14 โดย Boyer ใช้กระบวนการ spinning ผลิตอาหารที่มีลักษณะดังกล่าวและกระบวนการนี้ก็ได้พัฒนามาโดยตลอด (6) อีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ผลิตเส้นใยจากโปรตีนได้แก่ extrusion ซึ่งเริ่มมีขึ้นตั้งแต่ศตวรรษที่ 15 โดย Anson และ Pader(7) ส่วนกระบวนการที่สามคือ freeze texturization (8)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.4.2 กระบวนการ Fiber - Spinning

Boyer เป็นผู้นำกระบวนการนี้มาใช้กับอาหารโดยเริ่มศึกษาวิธีผลิตเส้นใยโปรตีนขึ้นก่อนแล้วจึงนำมาเชื่อมยึดเข้าด้วยกันจนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ กระบวนการของ Boyer เป็นแบบ wet fiber spinning ซึ่งใช้หลักการละลายโปรตีนบริโภคได้ด้วยสารละลายด่างและตกตะกอนที่ isoelectric point ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย จากนั้นเชื่อมให้เป็นมัดด้วยสารเชื่อมชนิดต่างๆ เช่น albuminoid protein (6,9)

โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับ polymer ที่จะเกิดเป็นเส้นใยคือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10,000-50,000 มีสมมาตรในแนวเส้นตรง ขนาดโมเลกุลยาว ไม่มี side chain

ขนาดใหญ่และมีความเป็นขั้วสูง (6)

Kinsella (9) ได้ผลิตอาหารจากสารละลายโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 ปรับ pH เป็น 10 - 12 ด้วยด่างที่อุณหภูมิ 50° C ซึ่งจะได้สารละลายมีความหนืดในช่วง 30 - 350 poise ขั้นตอนนี้อาจเติมสารให้สี กลิ่น รสชาติ ไปด้วยพร้อมกัน ถ้ามีสารประกอบที่ไม่ละลาย เช่นไขมันจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงน้อยลง การเติมสารปรุงแต่งกลิ่นรสและเสริมคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าร้อยละ 30 จะทำให้ค่า tensile strength ของเส้นใยลดลง (9) ในกระบวนการผลิตสารละลายโปรตีนจะเคลื่อนผ่าน multi orifice spinnerette (ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0075-0.075 มิลลิเมตร และมีรูประมาณ 1000 ถึง 15000 รู) ภายใต้ความดันเพื่อเคลื่อนตัวลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายกรดที่ pH 2-3 ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของเส้นใยขึ้น เส้นใยเหล่านี้จะผ่านมายังหน่วยปรับสภาพให้เป็นกลาง แล้วนำมายืดตัวภายใต้แรงดึง (tensile) ทำให้การเรียงตัวและค่า tensile strength ของเส้นใยเพิ่มขึ้น การเคลือบเส้นใยด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆเช่น albuminoid protein gelatin gum หรือ processed starch และให้ความร้อนจะทำให้เส้นใยเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยพันธะทางเคมีมีผลให้เกิดก้อนมวลที่มีลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ (9) Kinsella อธิบายกลไกในการเกิดเส้นใยว่าเริ่มจาก globular protein คลายตัวอยู่ในลักษณะ random coil โดยการเสื่อมสภาพในสภาวะด่างและเมื่อสารละลายผ่าน spinnerette มายังภาชนะที่บรรจุสารละลายกรด ความดันและแรงหนืบตัด(shear force) ที่ใช้ทำให้เกิดการเรียงตัวของเส้นใยโปรตีนตามแนวแกนยาว (9)

ได้มีการทดลองนำโปรตีนสกัดชนิดต่างๆ เช่นโปรตีนถั่วเหลืองสกัด, casein,whey หรือโปรตีนสกัดจากปอดและกระเพาะลูกวัวมาแปลงเนื้อสัมผัสโดยกระบวนการดังกล่าวพบว่าผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของโปรตีนสกัด (6,9)

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ spinning ใช้ในลักษณะเนื้อเทียม สามารถทนแรงบด เฉือน การแช่แข็งและการทำแห้ง มีความชื้นต่ำ จึงไม่มีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บ แต่เมื่อเก็บไว้นานจะเกิดสีเทา ความเหนียวเพิ่มขึ้นแต่ความยืดหยุ่นลดลง (9) ข้อเสียของกระบวนการนี้คือเทคนิคยุ่งยากซับซ้อน เครื่องมือราคาแพงและต้องการเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญสูง ถ้ามีอนุภาคที่ไม่ละลายในระบบโปรตีนจะทำให้เกิดรอยแตกในเส้นใย และอาจมีการอุดตันของรูใน spinnerette เนื่องจากการจับตัวเป็นก้อนของวัตถุดิบ (9)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.3 กระบวนการ Extrusion

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เกิดเส้นใยในผลิตภัณฑ์ ในระยะแรกใช้กระบวนการนี้สกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชหรือทำให้แป้ง (starch) เกิดเจล (9) Clark (7) กล่าวว่า Anson และ Pader นำกระบวนการนี้มาใช้กับอาหารโปรตีนเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสและสมบัติด้านการเคี้ยวคล้ายเนื้อสัตว์ และกระบวนการ extrusion ก็ได้พัฒนามาโดยตลอด

Atkinson (10) ทดลองใช้กระบวนการ extrusion ผลิตอาหารโปรตีน ที่มีลักษณะพอง (puff) มีช่องอากาศที่จัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่มีโครงสร้างเส้นใย แต่มีความรู้สึกขณะเคี้ยวเหมือนเนื้อสัตว์ ต่อมาเขาได้ปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อทำให้ฟองอากาศจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบเพื่อให้เกิดโครงสร้างเส้นใยในผลิตภัณฑ์ กระบวนการ extrusion ใช้หลักการนำอาหารโปรตีนชื้นผ่านแรงหนีบตัด (shear force) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้เกิดก้อนมวลที่ยืดหยุ่น (plasticized mass)อันเนื่องมาจากการเกิด gelatinization และ polymerization ของโปรตีน (7) ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากกระบวนการนี้คือชนิดและความชื้นของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้ไม่ควรอยู่ในลักษณะที่เสื่อมสภาพเพราะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแรงยืดน้อยหรือไม่มีเลย แหล่งของโปรตีนที่ใช้ทั่วไปได้แก่ แป้งถั่วเหลือง ถั่วเหลืองบดหยาบ หรือโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (7) ความชื้นของวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ พบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 15 - 40 กรณีที่วัตถุดิบมีความชื้นต่ำผลิตภัณฑ์จะมีเนื้อแน่นและไม่ขยายตัวแต่ถ้าความชื้นสูงเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อนุ่มและยุบบางส่วน นอกจากนั้นความชื้นของวัตถุดิบยังมีผลต่อการเกิด gelatinization แรงยืด และการปลดปล่อยไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์อีกด้วย (11) pH ของผลิตภัณฑ์มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เช่นกัน เมื่อ pH อยู่ในช่วง5 - 6.5 ผลิตภัณฑ์จะมีเนื้อแน่นและเหนียว แข็งตัวช้าและดูดน้ำไม่ดี ในขณะที่ pH ช่วงต่างให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตรงกันข้าม (9)

ขั้นตอนการแปลงเนื้อสัมผัสอาหารโปรตีนโดยวิธี extrusion เริ่มจากการผ่านส่วนผสมต่าง ๆ เข้าเครื่อง cooker extruder ที่ความดันประมาณ 300 -700 ปอนด์/ตารางนิ้ว โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 200 - 400 °C แล้วอัดผ่านรูเปิดที่มีขนาดและรูปร่างตามลักษณะผลิตภัณฑ์ เนื้อสัมผัสของโปรตีนจะเปลี่ยนไปขณะเคลื่อนที่ผ่านสกรูของเครื่อง จากอุณหภูมิและความดันระดับที่ใช้ทำให้โปรตีนเกิดการแปลงสภาพและมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายเนื้อสัตว์ จากนั้นลดความชื้นให้เหลือร้อยละ 6 - 8 (12) ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ extrusion จะแตกต่างกันในแง่ของความหนาแน่น รูปร่าง ขนาด สี และกลิ่นรส เนื่องจากความแตกต่างของสภาวะในการผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนผสมตั้งต้น รูปแบบของหัว die ที่ใช้ ความเร็วของใบมีดที่ตัดขณะผ่านออกจากเครื่อง(12)

เมื่ออนุภาคของวัตถุดิบผ่านเครื่อง extruder มันจะเคลื่อนตัวแบบเกลียว(helical pattern) ทำให้วัตถุดิบชนิดต่าง ๆ รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีและการถ่ายเทความร้อนในส่วนผสมก็ดีด้วย การเพิ่มพลังงานและแรงหนืบตัดให้ส่วนผสมขณะที่เคลื่อนผ่านสกรูจะทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดโครงตาข่าย (network) เชื่อมระหว่างสารโปรตีน ดังนั้นโปรตีนจะจัดเรียงตัวเป็นแผ่นในทิศทางที่มันเคลื่อนที่ไป อย่างไรก็ตามถ้าแรงหนืบตัดมากไปจะทำให้โครงสร้างมีรอยแตกและความเชื่อมแน่น(cohesiveness) ในผลิตภัณฑ์ลดลง (7)

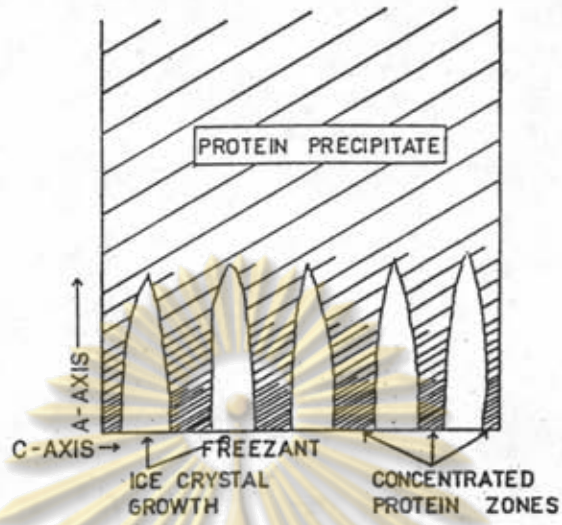
ปัจจุบันกระบวนการ extrusion ได้พัฒนามาเป็นแบบ double extrusion คือใช้เครื่องที่มีสกรู2ตัวต่อเนื่องกัน ตัวแรกทำหน้าที่ปรับความชื้นในวัตถุดิบให้เหมาะสม นวดให้เกิด dough เพิ่มอุณหภูมิ แปรสภาพโปรตีนและลดกลิ่นอันไม่พึงปรารถนาในแป้งถั่วเหลือง ส่วนสกรูตัวที่2 ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ปรับโครงสร้างของเส้นใยให้เชื่อมต่อกัน ลดอุณหภูมิและตัดผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดตามต้องการ เมื่อนำมาดูดน้ำคืนผลิตภัณฑ์จะมีเนื้อสัมผัสคล้าย myofibrillar protein (13)

ข้อดีของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้คือมีความชื้นต่ำจึงเก็บที่อุณหภูมิห้องได้ประมาณ 1 ปี คืนรูปได้โดยไม่เสียลักษณะโครงสร้าง มีจุลินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณต่ำเพราะผ่านอุณหภูมิสูงในขั้นตอนผลิต ดูดน้ำและไขมันดีทำให้สูญเสียน้ำหนักน้อยเมื่อผลิตเป็นอาหาร สำหรับข้อเสียคือความร้อนที่ใช้ทำให้สูญเสียสารอาหารบางตัวเช่นวิตามินซี(14) และยังเร่งปฏิกิริยา Maillard อันเป็นผลให้เกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อีกด้วย (14)

## 2.5 กระบวนการแปลงเนื้อสัมผัสโดยวิธีแช่แข็ง

การแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนโดยวิธีแช่แข็ง( freeze texturization )ทำได้โดยนำสารละลายหรือ slurry ของโปรตีนไปแช่แข็งโดยให้ความเย็นกับระบบโปรตีนเพียงด้านเดียว จนถึงจุด eutectic จะเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งเติบโตขึ้นเป็นเส้นตรงและจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวที่ได้รับความเย็น ขณะที่ผลึกน้ำแข็งเติบโตจะดันสารโปรตีนให้เคลื่อนเข้าหากันและดึงดูดโมเลกุลของน้ำจากสารโปรตีนให้มาเกาะที่ผิวทำให้สารโปรตีนในส่วนที่อยู่ระหว่างผลึกและกึ่งก้านของผลึกเข้มข้นมากขึ้น(รูปที่ 2.1) (15)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



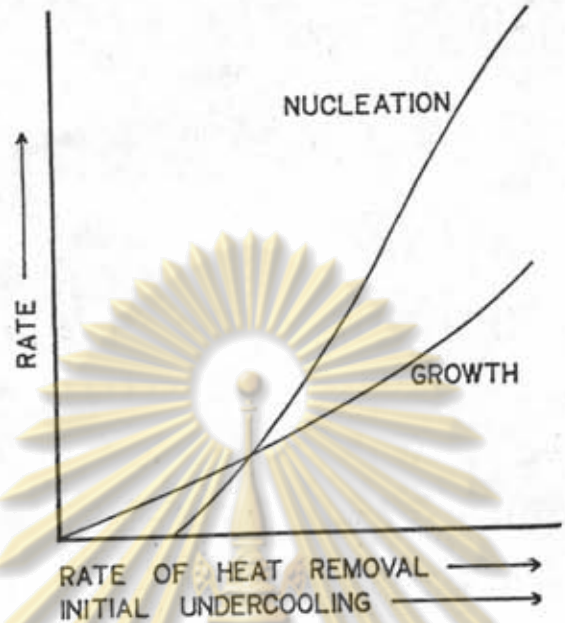

รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งเมื่อระบบโปรตีนสัมผัสตัวทำความเย็นด้านเดียว

โครงสร้างผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างแช่แข็งเป็นแม่แบบของโครงสร้างเส้นใยโปรตีน พบว่าจำนวน ขนาด ลักษณะทางธรรมชาติ และการจัดเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งมีผลต่อขนาด จำนวน และการจัดเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิด nucleus อัตราการเติบโต และทิศทางของผลึกน้ำแข็งจึงมีผลต่อโครงสร้างเส้นใยโปรตีนด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด nucleus และการเติบโตของผลึกน้ำแข็งของระบบสารละลายที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ø °C แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (15)

เมื่อเพิ่มอัตราการกำจัดพลังงานความร้อนออกจากระบบแช่แข็งโดยลดอุณหภูมิ อัตราการเกิด nucleusและอัตราการเติบโตของผลึกน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้น ในกรณีที่อัตราเร็วของการแช่แข็งต่ำ อัตราการเติบโตของผลึกจะมากกว่าอัตราการเกิด nucleus ทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่แต่มีจำนวนน้อย ดังนั้นเส้นใยที่เกิดขึ้นจึงใหญ่และมีจำนวนน้อยแต่เมื่ออัตราเร็วของการแช่แข็งสูงอัตราการเกิด nucleus จะมากกว่าอัตราการเติบโตของผลึกจึงได้เส้นใยขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก (15)

เมื่อผลึกน้ำแข็งละลายสารโปรตีนเข้มข้นยังคงเกาะตัวกันแน่น จึงเกิดช่องว่างขนาดเล็กเรียงขนานกันขึ้นแทนที่เป็นเหตุให้โปรตีนเข้มข้นเหล่านั้นอยู่ในลักษณะเส้นใย หลังจากกำจัดผลึกน้ำแข็งโดยการแช่ใน ethyl alcohol หรือใช้วิธี freeze drying จะนำโครงสร้างที่ได้มาทำให้เสถียรด้วยความร้อนซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทนอุณหภูมิและความดันสูงได้รวมทั้งสามารถดูดซับสารอื่น ๆ ได้ เช่น สารแต่งกลิ่นรส หรือไขมันเป็นต้น (15)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.2 อัตราการเติบโตและการเกิด nucleus ของผลิกน้ำแข็ง

ดังนั้นขั้นตอนสำคัญในการแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนโดยวิธีแช่แข็งได้แก่ การแยกวัฏภาคของสารขณะแช่แข็งเป็นผลิกน้ำแข็งและสารโปรตีนเข้มข้น การจัดเรียงตัวของผลิกน้ำแข็งซึ่งเป็นแม่แบบของการจัดเรียงตัวของสารโปรตีนเข้มข้นและการเสถียรโครงสร้างที่เกิดขึ้นโดยทำให้เกิดพันธะทางเคมี(16)

2.5.1 <u>ปัจจัยที่มีผลกับการแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนโดยวิธีแช่แข็ง</u>

ปัจจัยสำคัญที่มีผลกับคุณภาพโปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสจากกระบวนการนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของของแข็ง ความเป็นกรดด่าง(pH) สภาวะแช่แข็งและการทำให้โครงสร้างอยู่ตัวด้วยความร้อน (17) สำหรับความเข้มข้นของของแข็งพบว่ามีผลกับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โดยทั่วไปความเข้มข้นของของแข็งในระบบโปรตีนควรมีปริมาณต่ำเพราะเมื่อความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้นซึ่งจะไปขัดขวางการเติบโตของผลิกน้ำแข็งในแนวเส้นตรงจึงทำให้ความเป็นเส้นใย (fibrousness) ของผลิตภัณฑ์ลดลง ปัจจัยต่อมาที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ pH พบว่า pH ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดอยู่ในช่วงที่โปรตีนสามารถละลายได้มากซึ่งได้แก่ช่วงที่เป็นด่าง

(pH 7 - 10สำหรับโปรตีนส่วนใหญ่) เพราะโมเลกุลของโปรตีนสามารถคลายตัวได้ดีและเกิดปฏิกิริยา sulfhydryl-disulfide interchange ได้ดี (17,18) สำหรับสภาวะแช่แข็งต้องทำในลักษณะที่ผลึกน้ำแข็งเกิดเป็นเส้นตรงและจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวตัวทำความเย็น โดยทั่วไปจะให้พื้นผิวเพียงด้านเดียวของสารโปรตีนสัมผัสกับตัวทำความเย็นเช่น น้ำแข็งแห้ง ไนโตรเจนเหลว

สำหรับอัตราเร็วของการแช่แข็งที่จะทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.03 - 0.5 ฟุต/ชั่วโมง การทำให้โครงสร้างอยู่ตัวด้วยความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญอีกอันหนึ่งสำหรับกระบวนการนี้คือ การเสถียรโครงสร้างเส้นใยด้วยความร้อนมีผลให้โครงสร้างดังกล่าวไม่ละลายเมื่อดูดน้ำกลับ ในขั้นตอนนี้สิ่งสำคัญคือต้องไม่ให้หยดน้ำสัมผัสกับก้อนโปรตีนเพราะจะทำให้เส้นใยละลายและรวมกันเข้าอีกครั้งหนึ่งเป็นเหตุให้โปรตีนสูญเสียลักษณะเส้นใย

2.5.2 <u>ประวัติและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปลงเนื้อสัมผัสอาหารโปรตีนโดยวิธีแช่แข็ง</u>

การแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนโดยวิธีแช่แข็งเริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 ณ ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งนิยมผลิต kori-tofu โดยแช่ตะกอนโปรตีนถั่วเหลือง (tofu) ในหิมะ โดยมีวัตถุประสงค์ดั้งเดิมเพื่อเก็บถนอม tofu เมื่อละลายน้ำแข็งออกพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากคือมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำและคงสภาพโครงสร้างไว้ได้ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวที่อุณหภูมิห้องจึงใช้ความร้อนระเหยน้ำส่วนที่มากเกินพอออก (8)

ในปัจจุบันการผลิต kori-tofu ใช้ตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองที่บีบน้ำบางส่วนออก แล้วแช่แข็งที่อุณหภูมิ -10 ถึง -20 °C เก็บที่ -3 °C เป็นเวลา 3 - 4 สัปดาห์ (19) เมื่อละลายน้ำแข็งออกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวและมีความสามารถในการดูดน้ำคืนสูง (19) Okumura และ Wilkinson(20) ใช้โปรตีนไขมันต่ำเตรียมโปรตีน slurry แล้วแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะและเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์ เขาได้นำมาบดเพื่อความเหมาะสมในการประกอบอาหารต่อไป Middendrof และคณะ (21) เตรียม slurry จากโปรตีนถั่วเหลืองซึ่งผสมไขมันและเกลือแกง homogenize แล้วกำจัดฟองอากาศ จากนั้นแช่แข็งที่อุณหภูมิ -23 °C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง แล้วกำจัดผลึกน้ำแข็งพร้อมกับเสถียรโครงสร้างด้วยความร้อนแบบแห้งที่ 100 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความรู้สึกขณะเคี้ยวคล้ายเนื้อสัตว์ Matsumoto และคณะ (22) ทดลองแปลงเนื้อสัมผัสโปรตีนเนื้อปลาที่ผสมเกลือแกงโดยวิธีแช่แข็ง 2 ขั้นตอนคือที่อุณหภูมิ-10 ถึง-20 °C และ-25 ถึง-30 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างแบบแบ่งเป็นชั้น ( stratified structure ) เหนียวและมีอายุการเก็บที่ดีที่อุณหภูมิแช่แข็ง Rogozhin และ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะ (23) ได้สกัดโปรตีนชนิด myofibrillar จากเนื้อปลาในสภาวะด่าง แล้วแช่แข็งในภาชนะรูปทรงกระบอกที่อุณหภูมิ -10 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ละลายน้ำแข็งออกที่ 22 °C ได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะคล้าย jelly ซึ่งคงรูปร่างของภาชนะบรรจุและมีรูพรุนในโครงสร้างเส้นใย ( fine pored fibrous structure ) Lawrence และJelen (24)กับ Consolacion และ Jelen (25)ทดลองแช่แข็งโปรตีนสกัดจากเศษกระดูกไก่ในภาชนะรูปทรงกระบอก(semiinfinite cylinder)ที่อุณหภูมิ -76 °C ในตู้แช่แข็งที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นตัวทำความเย็น กำจัดผลึกน้ำแข็งและเสถียรโครงสร้างด้วยระบบ microwave พบว่าเกิดโครงสร้างเส้นใยที่ยึดเกี่ยวกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการแช่แข็งและ pH ของตะกอนโปรตีนก่อนแช่แข็งเพิ่มจาก 4.5 เป็น 6 นอกจากนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่การถ่ายเทความร้อนเกิดหลายทิศทางจะมีรูพรุนและเส้นใยจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีการยึดเกี่ยวน้อย Lugay และ Kim (17) แนะนำว่าโปรตีนที่ใช้แปลงเนื้อสัมผัสโดยวิธีแช่แข็งต้องมีการละลายและเสถียรได้ดีด้วยความร้อน นอกจากนั้นในระบบโปรตีนที่ใช้อาจมีอนุภาคที่ไม่ละลายปนอยู่ด้วยก็ได้แม้ว่าค่า tensile strength ของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับความเข้มข้นของอนุภาคดังกล่าว อย่างไรก็ตาม Kim ก็ไม่ได้แสดงผลของความเข้มข้นของอนุภาคที่ไม่ละลายต่อค่า tensile strength การใช้สารละลายโปรตีนเป็นวัตถุดิบในการแช่แข็งจะให้ผลดีหลายประการเช่น โปรตีนยังอยู่ในสภาพยืดตัวซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาpolymerizationระหว่างโมเลกุลของโปรตีนได้มาก ความเข้มข้นของของแข็งในระบบโปรตีนก่อนแช่แข็งควรอยู่ในช่วงร้อยละ3-40เพื่อให้เกิดเส้นใยที่ดี(17)

2.6 <u>ผลิตภัณฑ์อาหารจากโปรตีนแปลงเนื้อสัมผัส</u>

การบริโภคโปรตีนถั่วเหลืองแปลงเนื้อสัมผัสหรือเนื้อเทียมในประเทศไทยอยู่ในวงจำกัด เพราะเนื้อเทียมทุกชนิดในปัจจุบันไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเท่าที่ควร ไม่ว่าจะเป็นรสชาติ กลิ่น หรือเนื้อสัมผัส อีกทั้งราคายังค่อนข้างแพงแม้จะถูกกว่าเนื้อสัตว์ก็ตาม และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างใหม่สำหรับคนไทยส่วนใหญ่ กลุ่มผู้บริโภคที่ใช้โปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสเป็นอาหารได้แก่ ผู้มีปัญหาด้านโภชนาการ เช่น ผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงหรือโรคอ้วนซึ่งไม่ต้องการไขมันจากเนื้อสัตว์และกลุ่มผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติหรืออาหารเจ สำหรับการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ในประเทศไทยมีสองลักษณะคือสั่งจากต่างประเทศแล้วนำมาบรรจุใหม่เพื่อขายปลีก และผลิตพร้อมจำหน่ายเองเช่นโปรตีนเกษตรของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (4)

โปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสจากกระบวนการ spinning ประกอบด้วยเส้นใย (filament)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ร้อยละ40 สารเชื่อมเช่น albuminoid protein ร้อยละ10 ไขมันร้อยละ20 และส่วนผสมอื่น เช่น โปรตีนจากข้าวสาลี แป้งถั่วเหลือง น้ำตาล สารให้กลิ่นรสและสีร้อยละ 30 (4) ผลิตภัณฑ์นี้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่น ก้อน หรือชิ้นคล้ายเนื้อสัตว์ เช่นเนื้อวัว เบคอน แฮม เนื้อปลา เนื้อไก่และอาหารเช้าที่มีลักษณะเหมือนไส้กรอกไม่มีไขมันสัตว์รวมทั้ง cholesterol แต่มีโปรตีนสูง ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ส่วนใหญ่จำหน่ายในลักษณะแช่แข็ง เวลารับประทานก็อุ่นให้ร้อนเท่านั้น อย่างไรก็ตามโปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสจากกระบวนการนี้มีราคาแพงเพราะมีการผลิตหลายขั้นตอน การตลาดจำกัดอยู่เฉพาะในตลาดต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาเท่านั้น (4)

โปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสจากกระบวนการ extrusion เป็นอาหารราคาค่อนข้างถูกเพราะผลิตจากแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน มีจำหน่ายหลายขนาดหลายรูปร่างและมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยทั่วไปมีโปรตีนร้อยละ 40-60 ขึ้นกับชนิดส่วนผสม มีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นเช่น lysine ระหว่าง 57-64 มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน ค่า PER อยู่ระหว่าง 2.44-3.21 และไขมันร้อยละ 1 (4)

ลักขณา (26) ได้ศึกษาคุณภาพทางโภชนาการของโปรตีนเกษตรพบว่า ความต้องการโปรตีนจากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวของคนเท่ากับ 0.95 กรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน การดูดซึมและการสะสมไนโตรเจนจากโปรตีนเกษตรในร่างกายต่ำกว่าไข่เพียงเล็กน้อย ผู้วิจัยวิจารณ์ว่าโปรตีนเกษตรเมื่อบริโภคไม่ทำให้เกิดอาการเบื่ออาหาร อาเจียร เวียนศีรษะ ท้องเสียหรือมีลมในท้อง

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ extrusion มีความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 6-8 จึงมีอายุการเก็บที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ปี (4) ดังนั้นต้องแช่น้ำให้นิ่มก่อนนำไปประกอบอาหาร เช่น พะแนง แกงเขียวหวาน ยำวุ้นเส้นโดยใช้แทนเนื้อสัตว์ทั้งหมดหรือบางส่วน ทัศนีย์ (27) ทดลองใช้โปรตีนถั่วเหลืองแปลงเนื้อสัมผัสทดแทนเนื้อสัตว์ในกุนเชียงและไส้กรอกเวียนนาพบว่าสามารถใช้ทดแทนเนื้อหมูได้ร้อยละ 15 สำหรับกุนเชียงและร้อยละ 10 สำหรับไส้กรอกเวียนนา เมื่อบรรจุกุนเชียงที่ผลิตได้ในถุง PP ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและเก็บที่ 30 °C ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บ 18 วัน สำหรับไส้กรอกเวียนนาที่บรรจุในถุง HDPE ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ เก็บที่ 4 °C มีอายุการเก็บ 14 วัน จิระศักดิ์ (28) ใช้โปรตีนถั่วเหลืองแปลงเนื้อสัมผัสโดยกระบวนการ extrusion (โปรตีนเกษตร)ทดแทนเนื้อสัตว์ในไส้กรอกแฟรงเฟอร์เตอร์ พบว่าทดแทนได้ถึงร้อยละ 18 ของน้ำหนักเนื้อสัตว์โดยที่ผลิตภัณฑ์ยังได้รับการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รส และการยอมรับรวมจากผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่เป็นชิ้นเล็กๆจึงใช้ทดแทนเนื้อสัตว์ที่ต้องหั่นหรือบดก่อนใช้งาน ดังนั้นจึงใช้ในวงจำกัดไม่สามารถทดแทนเนื้อสัตว์ในลักษณะเป็นก้อนหรือชิ้นใหญ่ได้ kori-tofu หรือเต้าหู้แห้งเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์แปลงเนื้อสัมผัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยการแช่แข็งที่นิยมบริโภคมากในประเทศญี่ปุ่นเพราะมีน้ำหนักเบา เก็บไว้ได้นาน 6-12เดือน มีโปรตีนร้อยละ 56 ไขมันร้อยละ 27 และคาร์โบไฮเดรทร้อยละ 6 สามารถเติมวิตามิน หรือสารแต่งกลิ่นรสให้คล้ายเนื้อสัตว์ได้ แต่เนื้อสัมผัสมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำไม่มีเส้นใยดังนั้นจึงไม่คล้ายเนื้อสัตว์นัก (29) สำหรับโปรตีนแปลงเนื้อสัมผัสโดยวิธีแช่แข็งที่เกิดเส้นใยสามารถนำมาดูดน้ำคืนในสารละลายที่มีองค์ประกอบอื่น เช่นสารให้กลิ่นรส น้ำตาลหรือเกลือได้ (30,31) แต่ยังไม่มีรายงานว่านำไปผลิตเป็นอาหารประเภทอื่นแต่อย่างใด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016016