บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัตถุดิบ

2.1.1 ธัญพืช (cereal)

ธัญพืช หมายถึง พืชล้มลุกหลายชนิดและหลายสกุลของพืชในวงศ์หญ้า (Graminae หรือ Poaceae) เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เล่ย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวฟ่าง ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และลูกเดือย เป็นต้น ที่มนุษย์ใช้เมล็ดเป็นอาหาร (เต็ม และ วีระชัย, 2538) หรืออาจใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์ (ราชบัณฑิตยสถาน, 2538) นอกจากนี้ธัญพืชยังหมายรวมถึงพืชในตระกูลถั่วและงาด้วย โดยทั่วไป แบ่งธัญพืชเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ไม่มีเปลือกแข็งหุ้มและกลุ่มที่มีเปลือกแข็งหุ้ม (กองบรรณาธิการ, 2546; อรัญญา, 2550)

2.1.2 งา (sesame)

งามีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sesamum indicum* Linn. เป็นพืชไร่ประเภทไม้ล้มลุกมีความสูงประมาณ 30 - 100 เซนติเมตร ลักษณะลำต้นเป็นรูปเหลี่ยม มีร่องตามยาวของลำต้น มีขนปกคลุม ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงตรงข้ามหรือสลับ ใบเป็นรูปไข่หรือรูปใบหอก มีความกว้างประมาณ 2 - 5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 6 - 10 เซนติเมตร ดอกจะเป็นดอกเดี่ยว มีกลีบดอกสีขาวหรือสีชมพู โดยออกดอกตามซอกใบ ภายในผลมีเมล็ดขนาดเล็ก แบน รูปไข่ อาจมีสีดำ น้ำตาลหรือขาว มีกลิ่นรสคล้ายถั่ว (นันทนา, 2549)

ตามความหมายของธัญพืชในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ.2538 นั้นไม่รวมถึงเมล็ดงา แต่กองบรรณาธิการ (2546) และ อรัญญา (2550) ได้ให้ความหมายของธัญพืชโดยหมายรวมถึงงาด้วย นอกจากนี้ยังมีบทความอีกจำนวนมากที่จัดให้งาเป็นหนึ่งในธัญพืช เช่น บทความเรื่องธัญพืชเพื่อสุขภาพ (ชนา, 2552) ธัญพืชงากับสุขภาพ (สุวิทย์, 2548) งาธัญพืชแห่งวัฒนธรรมการดูแลสุขภาพ (นันทนา, 2549) เป็นต้น

งาเป็นแหล่งของโปรตีนและไขมัน รวมทั้งมีแร่ธาตุและวิตามินหลายชนิด เช่น วิตามินบี วิตามินอี ทองแดง แมงกานีส แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส สังกะสี และโซเดียม เป็นต้น นอกจากนี้ งายังมีสารประกอบจำพวกลิกแนน คือ เซซามินและเซซาโมลิน ซึ่งมีรายงานการวิจัยยืนยันว่าช่วยเพิ่มระดับของแกมม่าโทโคฟีรอล (gamma-tocopherol) ในเลือดให้มากขึ้น ช่วยลดระดับของเบต้าโทโคฟีรอล (beta-tocopherol) ในเลือด ช่วยยับยั้งการ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น และลดระดับของคอเลสเตอรอลในเลือดลงได้ นอกจากนี้ในเมล็ดงายังมีสารประกอบสเตอรอลจากพืช ซึ่งมีบทบาทในการให้พลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตับในด้านการกำจัดสารพิษ ช่วยในการทำงานของระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบหัวใจและระบบกล้ามเนื้อ ช่วยบำรุงสายตาและผิว ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด ช่วยลดความดันโลหิต ป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ช่วยต่อต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง และช่วยในการควบคุมน้ำหนัก (นันทนา, 2549; วิไลศรี, 2549)

การนำงาไปใช้เป็นอาหาร นิยมใช้ในรูปของการสกัดเป็นน้ำมันและการบริโภคโดยตรง เมล็ดงามีรสหวานเล็กน้อย นิยมคั่วให้หอมแล้วนำมาตกแต่งผลิตภัณฑ์ขนมหวาน นอกจากนั้นกากงาซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันงาก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกหลายอย่าง ทั้งเป็นอาหารมนุษย์ เลี้ยงสัตว์ ทำปุ๋ย ใช้เป็นเชื้อเพลิงและอื่นๆ

เมล็ดงาขาวมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ปริมาณความชื้นร้อยละ 5.9 โปรตีนร้อยละ 16.8 ไขมันร้อยละ 51.3 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 20.2 เส้นใยร้อยละ 4.4 และเถ้าร้อยละ 6.0 ส่วนกากงามีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ปริมาณโปรตีนร้อยละ 44.0 ไขมันร้อยละ 5.0 เส้นใยร้อยละ 6.1 และเถ้าร้อยละ 11.5 (ตารางที่ 2.1) นอกจากนี้ในเมล็ดงาขาวและกากงามีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่างๆ คือ ไลซีน (lysine) ร้อยละ 3.5 และ 1.2 เฟนิลอะลานีน (phenylalanine) ร้อยละ 6.3 และ 3.3 เมไทโอนิน (methionine) ร้อยละ 3.8 และ 1.2 ลิวซีน (leucine) ร้อยละ 7.4 และ 2.7 ไอโซลิวซีน (isoleucine) ร้อยละ 3.7 และ 1.7 วาลีน (valine) ร้อยละ 3.6 และ 5.3 และทรีโอนิน (threonine) ร้อยละ 3.9 และ 1.5 ตามลำดับ (ตารางที่ 2.2) นั่นคือ โปรตีนจากงามีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างไปจากพืชตระกูลถั่วและพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ คือมีกรดอะมิโนที่จำเป็นพวกเมไทโอนินสูง ซึ่งพืชส่วนใหญ่มักมีน้อย แต่งามีไลซีนต่ำ ดังนั้น ถ้านำงาหรือกากงามาเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์เลี้ยง ก็สามารถปรับระดับกรดอะมิโนของอาหารให้สมดุลยิ่งขึ้น และสามารถลดการบริโภคโปรตีนจากสัตว์ซึ่งมีราคาแพงได้บางส่วน (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2542)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขาว กากงา ลูกเดือย และข้าวโพด

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เมล็ดงาขาว [1]	กากงา [1]	ลูกเดือย [2]	ข้าวโพด [3]
ความชื้น	5.9	-	10.8	9.0 - 13.0
โปรตีน	16.8	44.0	14.9	9.3 - 10.7
ไขมัน	51.3	5.0	2.7	4.0 - 4.8
คาร์โบไฮเดรต	20.2	-	67.0	64.0 - 78.0
เส้นใย	4.4	6.1	0.3	2.1 - 2.3
เถ้า	6.0	11.5	1.0	0.9 - 1.5

ที่มา : [1] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2542; [2] กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2535; [3] ณรงค์, 2538

- หมายถึง ไม่ได้รายงานผล

ตารางที่ 2.2 กรดอะมิโนที่จำเป็นในเมล็ดงาขาว กากงา ลูกเดือย และเมล็ดข้าวโพด

กรดอะมิโน (%)	เมล็ดงาขาว [1]	กากงา [1]	ลูกเดือย [2]	เมล็ดข้าวโพด [3]
ไลซีน	3.5	1.2	2.2	2.0
เฟนิลอะลานีน	6.3	3.3	4.8	5.3
เมไทโอนิน	3.8	1.2	1.8	2.8
ลิวซีน	7.4	2.7	11.9	14.3
ไอโซลิวซีน	3.7	1.7	3.3	3.8
วาลีน	3.6	5.3	4.6	4.7
ทรีโอนิน	3.9	1.5	2.8	3.5
ทริบโตเฟน	-	-	0.6	-

ที่มา : [1] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2542; [2] สมเกียรติ, 2547; [3] ณรงค์, 2538

- หมายถึง ไม่ได้รายงานผล

โปรตีนในเมล็ดงาอยู่ในรูปของอัลบูมิน (albumin) ร้อยละ 8.9 โกลบูลิน (globulin) ร้อยละ 67.3 โพรลามิน (prolamin) ร้อยละ 1.3 และกลูเตนิน (glutenin) ร้อยละ 6.9 (Rivas และคณะ, 1981) โดยชนิดที่มีมากที่สุดคือ 11S โกลบูลิน หรือเรียกว่า alpha-globulin ซึ่งมีถึงร้อยละ 60 – 70 ของโปรตีนทั้งหมดในงา มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ (Hasegawa และคณะ, 1978) ส่วนชนิดที่รองลงมาคือ 2S อัลบูมิน หรือเรียกว่า beta-globulin มีประมาณร้อยละ 25 ของโปรตีนทั้งหมดในงา มีสมบัติละลายในน้ำได้ (Rajendran และ Prakash, 1988) และชนิดที่มีมากเป็นอันดับสามคือ 7S โกลบูลิน มีประมาณร้อยละ 5 ของโปรตีนทั้งหมดในงา (Prakash และ Nandi, 1978)

2.1.3 ลูกเดือย (job's tear, coixseed, adlay, adlai)

ลูกเดือยมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Coix lacryma-jobi* เป็นพืชตระกูลข้าวชนิดหนึ่ง มีวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม วิตามินเอ วิตามินบีหนึ่ง เป็นต้น ลูกเดือยเป็นธัญพืชหนึ่งที่ให้พลังงานสูงและมีสรรพคุณในการบำรุงกำลัง ในตำรายาจีนและไทยกล่าวว่า ลูกเดือย รสชุ่มจืด เย็น บำรุงม้าม ปอด แก้ไข้ แก้ท้องเสีย เหน็บชา ชักกระตุก บวมน้ำ ปอดอ่อนแอ ฝีหลายหัวที่ลำไส้ ตกขาวมากกว่าปกติ และแก้ร้อนใน ทั้งนี้ปริมาณที่ใช้ คือ เมล็ดแห้ง 10 – 30 กรัม ต้มน้ำกิน นอกจากนี้ลูกเดือยยังมีสรรพคุณทางเภสัชวิทยาอื่นๆ เช่น ต้านเชื้อแบคทีเรีย เชื้อราและยีสต์ ต้านอักเสบ ลดคอเลสเตอรอล ลดความดันโลหิตสูง ลดอุณหภูมิในร่างกาย แก้ปวดและขับปัสสาวะ เร่งการงอกของเส้นผมและการสร้างผิวหนัง เพิ่มการไหลเวียนของเลือดและทำให้เม็ดเลือดแดงเกาะกลุ่มกัน เป็นต้น (สมเกียรติ, 2547) นอกจากนี้ยังมีข้อมูลการทดลองทางวิทยาศาสตร์ว่าสาร coxenolide ในลูกเดือยมีสรรพคุณในการยับยั้งการเจริญของเนื้องอก และพบว่า สารสกัดด้วยน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์จากรากหรือลูกเดือยมีฤทธิ์ทำให้การหมุนเวียนของเลือดที่ผิวหนังดีขึ้น ทำให้เส้นผมเจริญดีขึ้น และยังมีสรรพคุณในการรักษาโรคหูดได้อีกด้วย สำหรับน้ำนมลูกเดือยให้ฟอสฟอรัสสูงมาก รองลงมาเป็นวิตามินเอ ช่วยบำรุงกระดูกและสายตา บำรุงธาตุ เป็นอาหารสำหรับคนไข้พักฟื้น ช่วยเจริญอาหาร (นิรนาม, 2550)

ลูกเดือยในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม ประกอบด้วย ปริมาณความชื้นร้อยละ 10.8 โปรตีนร้อยละ 14.8 ไขมันร้อยละ 2.7 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 67.0 เส้นใยร้อยละ 0.3 และเถ้าร้อยละ 1.0 (ตารางที่ 2.1) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2535) สำหรับปริมาณกรดอะมิโนในโปรตีนลูกเดือย Sato และ Miyata (1975) พบว่า ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย คือ ไลซีนร้อยละ 2.2 เฟนิลอะลานีนร้อยละ 4.8 เมไทโอนินร้อยละ 1.8 ลิวซีนร้อยละ 11.9 ไอโซลิวซีนร้อยละ 3.3 วาลีนร้อยละ 4.6 ทรีโอนินร้อยละ 2.8 และทริบโตเฟนร้อยละ 0.6 (ตารางที่ 2.2) และกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายชนิดอื่นๆ เช่น กรดกลูตามิก (glutamic acid)

โปรลีน (proline) อะลานีน (alanine) กรดแอสปาร์ติก (aspartic acid) เซอรีน (serine) ไทโรซีน (tyrosine) และไกลซีน (glycine) เป็นต้น

ทัศนีย์ (2530) ได้ศึกษาการทำน้ำนมลูกเดือย พบว่า น้ำนมลูกเดือยที่อยู่ในการยอมรับของผู้ทดสอบชิม คือ น้ำนมลูกเดือยที่มีสัดส่วนลูกเดือยต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 15 ส่วน เรืองศรี (2548) ได้ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์เต้าฮวยน้ำนมลูกเดือยผสมน้ำนมถั่วเหลือง พบว่า สามารถใช้น้ำนมลูกเดือยทดแทนน้ำนมถั่วเหลืองในอัตราส่วน 25 ต่อ 75 ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกับเต้าฮวยที่ทำจากน้ำนมถั่วเหลืองล้วน แต่เต้าฮวยที่ใช้น้ำนมลูกเดือยทดแทนน้ำนมถั่วเหลืองจะมีปริมาณไขมันน้อยกว่าเต้าฮวยที่ทำจากน้ำนมถั่วเหลืองล้วน และเมื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี พบว่า มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ร้อยละ 8.05 เถ้าร้อยละ 18.56 ไขมันร้อยละ 3.29 เส้นใยร้อยละ 0.61 โปรตีนร้อยละ 22.88

2.1.4 ข้าวโพด (corn)

ข้าวโพดจัดอยู่ในตระกูลหญ้า Gramineae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea may* L. var. *rugasa* หรือ *Zea may* var. *saccharata bailey* เป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางอาหารสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง ใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ และวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรม (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2534)

เมล็ดข้าวโพดมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ปริมาณความชื้นร้อยละ 9 - 13 โปรตีนร้อยละ 9.3 - 10.7 ไขมันร้อยละ 4.0 - 4.8 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 64.0 – 78.0 เส้นใยร้อยละ 2.1 - 2.3 และเถ้าร้อยละ 0.9 - 1.5 และมีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นดังนี้ ไลซีนร้อยละ 2.0 เฟนิลอะลานีนร้อยละ 5.3 เมไทโอนินร้อยละ 2.8 ลิวซีนร้อยละ 14.3 ไอโซลิวซีนร้อยละ 3.8 วาลีน ร้อยละ 4.7 และทรีโอนินร้อยละ 3.5 (ตารางที่ 2.2) นั่นคือ มีกรดอะมิโนหลายชนิดในปริมาณสูง เช่น ลิวซีน เมไทโอนิน เป็นต้น แต่มีไลซีนและทริบโตแฟนต่ำ (ณรงค์, 2538)

ข้าวโพดสามารถนำไปประกอบอาหารได้สารพัดชนิดทั้งคาวและหวาน และยังมีสรรพคุณทางด้านยาสมุนไพรอีกด้วย ได้แก่ ช่วยต้านพิษของพวกอนุมูลอิสระ ช่วยให้ความเสื่อมที่มากับความแก่ชรามีน้อยลง เช่น ต้อกระจกและโรคสมองเสื่อม ช่วยบำรุงหัวใจและปอด ทำให้รับประทานอาหารได้มากขึ้น เหมาะสำหรับคนฟื้นจากไข้หรือผู้ที่มีอาการอ่อนเพลีย และมีเบต้าแคโรทีน ช่วยบำรุงสายตา (ลักขณา, 2550)

โปรตีนที่พบในข้าวโพดอยู่ในรูปของอัลบูมินและโกลบูลินร้อยละ 25 กลูเตนิน ร้อยละ 25 โพรลามิน ที่เรียกว่าเซอีน (zein) ร้อยละ 48 และสคลีโรโปรตีน (scleroprotein) ร้อยละ 2 (Whitler และ Paschall, 1976)

2.2 **เต้าหู้** (tofu)

เต้าหู้เป็นอาหารชนิดหนึ่งที่ทำจากถั่วเหลือง มีลักษณะเป็นก้อน นุ่มนิ่ม สีขาวอ่อน โดยตัวของเต้าหู้จะไม่มีรสชาติ แต่สามารถปรุงแต่งรสได้ ทำให้มีสีและรสชาติแตกต่างกันไป เช่น หากนำไปเคี่ยวในซีอิ้วและน้ำตาลทรายแดง จะได้เต้าหู้ที่มีสีดำ มีรสเค็มและหวานเล็กน้อย เรียกว่าเต้าหู้ซีอิ้วดำ หรือหากนำไปหมักเกลือและผสมกับขมิ้น จะได้เต้าหู้ที่มีสีเหลือง มีรสเค็ม และเก็บได้นานขึ้น เรียกว่า เต้าหู้เหลือง เป็นต้น นอกจากจะมีสีและรสชาติที่แตกต่างกันแล้ว เต้าหู้แต่ละชนิดยังมีคุณค่าทางโภชนาการแตกต่างกันด้วย (จันทร และคณะ, 2546; อุบล, 2546) ถึงแม้ว่าถั่วเหลืองจะเป็นเมล็ดพืชที่มีปริมาณโปรตีนสูง แต่ก็มีกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดในปริมาณน้อย เช่น เมไทโอนิน ลิวซีน เป็นต้น ซึ่งกรดอะมิโนพวกเมไทโอนินพบมากในเมล็ดงา ส่วนลิวซีนพบมากในลูกเดือยและข้าวโพด (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2542; ณรงค์, 2538)

เต้าหู้ประกอบไปด้วยโปรตีน แร่ธาตุและวิตามินต่างๆ ให้พลังงานและไขมันชนิดอิ่มตัวต่ำ ไม่มีคอเลสเตอรอล นับได้ว่าเต้าหู้เป็นแหล่งของโปรตีนที่มีประโยชน์สูงเช่นเดียวกับเนื้อสัตว์และนม จึงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหาร เพื่อควบคุมน้ำหนัก อาหารมังสวิรัติและอาหารเพื่อสุขภาพได้เป็นอย่างดี (จันทร และคณะ, 2546; อุบล, 2546)

ถ้าแบ่งชนิดของเต้าหู้ตามลักษณะของเนื้อ ซึ่งมีความแตกต่างอยู่ที่ขั้นตอนการทำ (จันทร และคณะ, 2546; อุบล, 2546) จะแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.2.1 **เต้าหู้แข็ง** (hard or extra firm tofu)

มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีเนื้อแข็ง มีสีขาวนวล สำหรับวิธีการทำจะนิยมใช้ดีเกลือหรือเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตช่วยในการตกตะกอน เมื่อตกตะกอนแล้วนำมาใส่ผ้าขาวบางที่ปูในแม่พิมพ์ แล้วห่อให้เป็นก้อนและกดเอาน้ำออก ก็จะได้เต้าหู้แข็งสีขาว

2.2.2 **เต้าหู้อ่อน** (soft or firm tofu)

มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีสีขาวนวล มีวิธีการทำเช่นเดียวกับเต้าหู้แข็ง แต่นิยมใช้เจี๊ยะกอหรือแคลเซียมซัลเฟตช่วยในการตกตะกอน และในขั้นตอนการกดทับจะใช้น้ำหนักกดที่น้อยกว่าเต้าหู้แข็ง จึงได้ลักษณะเนื้อที่เนียนและอ่อนนุ่มกว่าเต้าหู้แข็ง

2.2.3 **เต้าหู้หลอด** (bagged or silken tofu)

มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีเนื้อนุ่ม สีขาวนวล เช่นเดียวกับเต้าหู้อ่อน แต่เนื่องจากวิธีทำต่างกัน คือ จะนำน้ำเต้าหู้มาบรรจุลงในหลอดพลาสติกแบบสุญญากาศไปพร้อมกับการตกตะกอนโปรตีนด้วยกลูโคโนเดลต้าแลคโตน (glucono-delta-lactone) โดยไม่มีการคนและไม่มีการกดทับเพื่อเอาน้ำออก ทำให้ได้เต้าหู้ที่มีความชื้นสูงและมีลักษณะที่ลื่นกว่าเต้าหู้อ่อน

เต้าหู้สดที่จำหน่ายในท้องตลาดมีอยู่หลายชนิด เช่น เต้าหู้แข็ง เต้าหู้อ่อน เต้าหู้หลอด เต้าหู้เหลือง เต้าหู้ทอด และเต้าฮวย ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการเก็บรักษาแบบแช่เย็น ส่วนลักษณะบรรจุภัณฑ์จะแตกต่างกันไปตามผู้ผลิตและชนิดของเต้าหู้ เช่น เต้าหู้แข็งนิยมใช้การห่อด้วยถุงพลาสติกแบบสุญญากาศ สำหรับเต้าหู้อ่อนอาจใช้การห่อด้วยถุงพลาสติกแบบสุญญากาศหรือการบรรจุในกล่องพลาสติกปิดสนิทที่ภายในมีน้ำสำหรับแช่เต้าหู้ ส่วนเต้าหู้หลอดจะบรรจุในหลอดพลาสติกแบบสุญญากาศ และสำหรับเต้าฮวยจะบรรจุในถ้วยพลาสติกปิดสนิท เป็นต้น (จันทร และคณะ, 2546; อุบล, 2546)

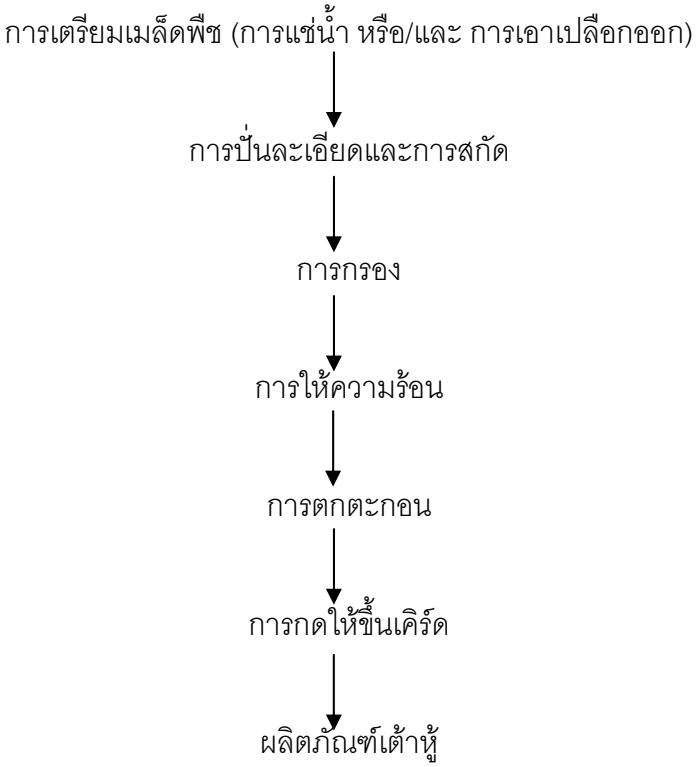
สำหรับอายุการเก็บรักษา พบว่า เต้าหู้สดจะค่อยๆ สูญเสียความสด กลิ่นและรสชาติเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงเกิดการเน่าเสียอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นเหม็น (Chang และคณะ, 2003) ทั้งนี้หากนำเต้าหู้สดใส่ในภาชนะที่ปิดสนิทและใส่น้ำหล่อเลี้ยงไว้ จากนั้นนำไปเก็บในตู้เย็นและเปลี่ยนน้ำใหม่ทุกวันจะทำให้เก็บได้นานขึ้น อาจเก็บได้ถึง 1 - 2 สัปดาห์ ส่วนเต้าหู้ที่ผลิตขายในเชิงอุตสาหกรรม จะผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์และเก็บรักษาแบบแช่เย็น ทำให้มีอายุการเก็บรักษาประมาณ 3 – 4 สัปดาห์ (วันชัย, 2527; อุบล, 2546)

เต้าหู้ที่ขายทั่วไปในท้องตลาด นอกจากจะเป็นเต้าหู้ที่ทำจากถั่วเหลืองแล้ว ยังมีเต้าหู้ชนิดอื่นๆ เช่น เต้าหู้ไข่ และเต้าหู้ปลา สำหรับเต้าหู้ไข่เป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นไข่ขาวหรือไข่ขาวผสมไข่แดง อาจผสมน้ำหรือเครื่องปรุงรส มีกระบวนการผลิตคล้ายเต้าหู้หลอด ส่วนเต้าหู้ปลาเป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่ได้จากการนำเนื้อปลาบดมาผสมเข้ากับส่วนประกอบต่างๆ เช่น น้ำนมถั่วเหลือง แป้งถั่วเหลือง แป้งมันสำปะหลัง ปรุงรสด้วยเครื่องปรุงแต่งรสและเครื่องเทศ นำไปนวดให้เหนียวและทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ ให้ความร้อนโดยการนึ่งหรือต้มจนสุก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548)

2.3 กระบวนการผลิตเต้าหู้จากเมล็ดพืชที่มีโปรตีนสูง

โดยทั่วไป เต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเมล็ดถั่วเหลืองมาล้าง แช่น้ำ และบดด้วยน้ำ ได้เป็นถั่วเหลืองบดเหลวข้น นำไปต้มให้เดือดแล้วกรองด้วยผ้า ของเหลวที่ได้มีลักษณะคล้ายน้ำนม เรียกว่า น้ำนมถั่วเหลือง เมื่อเติมสารตกตะกอนโปรตีนลงในน้ำนมถั่วเหลืองร้อน จะเกิดการฟอร์มตัวของเคิร์ด (curd) ที่สามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้สูง จากนั้นนำเคิร์ดที่ได้ไปกดทับ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เต้าหู้ (Liu, 1999; วันชัย, 2527) นอกจากถั่วเหลืองแล้ว ยังมีเมล็ดพืชชนิดอื่นๆ ที่มีโปรตีนสูงที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ได้ เช่น

เมล็ดกระเจี๊ยบเขียว (Martin และคณะ, 1979) เมล็ดถั่วลันเตา (Gebre-egziabher และ Summer, 1983; Cai และคณะ, 2001; Cai และคณะ, 2002) เมล็ดถั่วชิกพี (Cai และ Baik, 2001; Cai และคณะ, 2001; Cai และคณะ, 2002) เมล็ดถั่วเขียว เมล็ดถั่วเลนทิล และเมล็ดฟาวาบีน (Cai และคณะ, 2001; Cai และคณะ, 2002) เป็นต้น โดยสามารถสรุปกรรมวิธีการผลิตเต้าหู้ได้ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตเต้าหู้จากเมล็ดพืชที่มีโปรตีนสูง
ที่มา : ดัดแปลงจาก Liu, 1999

2.3.1 การเตรียมเมล็ดพืช (preparing)

เริ่มจากนำเมล็ดพืชไปล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ นำไปแช่น้ำ 8 – 10 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างของเซลล์นุ่มลง และเพิ่มอัตราการสกัดสารอาหารให้เร็วขึ้น ปกติปริมาณน้ำที่ใช้แช่จะมากกว่าปริมาตรเมล็ดพืช 2 - 3 เท่า สำหรับเมล็ดพืชที่มีเปลือกหุ้มอาจเอาเปลือกออก (dehulling) ด้วย

2.3.2 **การปั่นละเอียด** (grinding) **และการสกัด** (extracting)

เป็นการนำเมล็ดพืชไปบดหรือปั่นให้ละเอียด แล้วเติมน้ำสะอาดตามอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นที่ระดับความเร็วสูงสุด นานประมาณ 3 นาที แล้วนำไปกรองเอากากออกด้วยผ้าขาวบาง หรือนำไปปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ระดับ 1000 – 1500 กรัม นาน 15 นาที อาจนำส่วนที่เป็นกากนี้ไปทำการสกัดอีกครั้งด้วยน้ำสะอาด

2.3.3 **การให้ความร้อน** (heating)

เป็นการนำเอาสารละลายที่เตรียมได้จากเมล็ดพืชไปให้ความร้อนด้วยการต้มจนเดือดหรือต้มที่อุณหภูมิ 80 – 100 องศาเซสเซียส นาน 10 – 20 นาที เพื่อให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพและอยู่ในภาวะที่พร้อมกับการตกตะกอนโปรตีน ในสภาวะปกติ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโมเลกุลโปรตีนจะอยู่ด้านใน เมื่อได้รับความร้อน โมเลกุลโปรตีนจะคลี่ออก ทำให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำออกมาอยู่ด้านนอกและจับกันเอง ส่งผลให้โปรตีนมีประจุเป็นลบพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับสารตกตะกอนและเกิดเป็นเจลต่อไปแต่หากให้ความร้อนมากเกินไป หมู่ซัลฟ์ไฮดริลในโปรตีนจะถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศ ส่งผลให้ความสามารถในการเกาะกันของเจลลดลง การให้ความร้อนยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายสาร antinutritonal factors ในถั่วเหลืองดิบอีกด้วย

2.3.4 **การตกตะกอน** (coagulating)

เป็นการเติมสารตกตะกอนลงไปที่อุณหภูมิ 75 – 85 องศาเซลเซียส คนเล็กน้อยให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน นาน 20 – 30 นาที จะได้ตะกอนสีขาวขุ่น ทั้งนี้การที่โปรตีนสามารถละลายอยู่ในน้ำได้มีเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ ส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลโปรตีนสามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเอาโมเลกุลของน้ำมาล้อมรอบโมเลกุลโปรตีนได้ และอีกสาเหตุหนึ่งคือ บนโมเลกุลของโปรตีนมีประจุไฟฟ้าสุทธิสูงกว่าแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ ทำให้โมเลกุลของโปรตีนอยู่ห่างกัน ไม่สามารถรวมตัวเข้ามาอยู่ใกล้กัน จึงไม่สามารถตกตะกอนลงมาได้ ดังนั้นปัจจัยใดก็ตามที่สามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนด้วยกันเอง (protein-protein interaction) หรือลดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับน้ำ (protein-water interaction) ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโปรตีนลดลง ทำให้โปรตีนตกตะกอนในที่สุด (นิรนาม, 2551)

วิธีการตกตะกอนที่นิยมใช้ คือ การตกตะกอนด้วยไอออนของธาตุโลหะอัลคาไล (ธาตุหมู่ 1) หรือธาตุโลหะอัลคาไลเอิร์ธ (ธาตุหมู่ 2) นิยมใช้เกลือแคลเซียมและแมกนีเซียม เช่น แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ เป็นต้น โดยไอออนของธาตุโลหะอัลคาไลหรือธาตุโลหะอัลคาไลเอิร์ธ ซึ่งมีประจุบวกจะไปจับกับประจุลบของโปรตีน ทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวเชื่อมโมเลกุลเข้าด้วยกัน ทำให้โปรตีนตกตะกอนลงมา กล่าวคือ ไอออนของธาตุโลหะอัลคาไลหรือธาตุโลหะอัลคาไลเอิร์ธจะเข้าไปทำให้ประจุสุทธิรวม

ของโปรตีนให้เป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโปรตีนซึ่งมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ จึงมีอิทธิพลเหนือกว่าประจุ ประกอบกับมีประจุเป็นศูนย์ จึงมีแรงผลักทางไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้โปรตีนแต่ละโมเลกุลเข้ามาอยู่ใกล้กันมากเพียงพอที่จะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ระหว่างโมเลกุล และเกิดการรวมตัวกันแบบสุ่ม ได้เป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ เรียกว่า เจล (gel) แต่ถ้าเติมไอออนของธาตุโลหะอัลคาไลหรือธาตุโลหะอัลคาไลเอิร์ธมากเกินไปก็จะทำให้โปรตีนกลับมีประจุอีกและไม่ตกตะกอน (กุลยา, 2533)

2.3.5 การกดให้ขึ้นเคิร์ด (pressing)

ตักส่วนที่เกิดเป็นตะกอน ใส่ลงในพิมพ์ที่มีผ้าขาวบางปูไว้ และกดทับจากด้านบน เพื่อทำให้ตะกอนโปรตีนเกาะจับกันเป็นก้อน ส่วนที่เป็นน้ำจะถูกแยกออกมา โดยความแน่นของเนื้อเคิร์ดจะขึ้นอยู่กับแรงกดและระยะเวลาที่กด นิยมใช้แรงกดประมาณ 2 กิโลกรัม หรือความดัน 20 – 100 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้เวลากดทับนานประมาณ 20 – 60 นาที จากนั้นทำให้เย็นแล้วนำไปตัดแบ่งและบรรจุ ทั้งนี้หากนำเต้าหู้ไปใส่ในน้ำเย็นจะเก็บได้นาน 1 – 14 วัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายนอก

2.4 กลไกการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์เต้าหู้

กลไกการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ด้วยสารตกตะกอนประเภทเกลือหรือกรดจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาการเชื่อมข้าม การจับกันของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก และพันธะซัลฟ์ไฮดริลไดซัลไฟด์ (sulfhydryl-disulfide bond) โดยจะเกิดแบบสองขั้นตอน (Cheng และคณะ, 2005; Liu, 1999) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

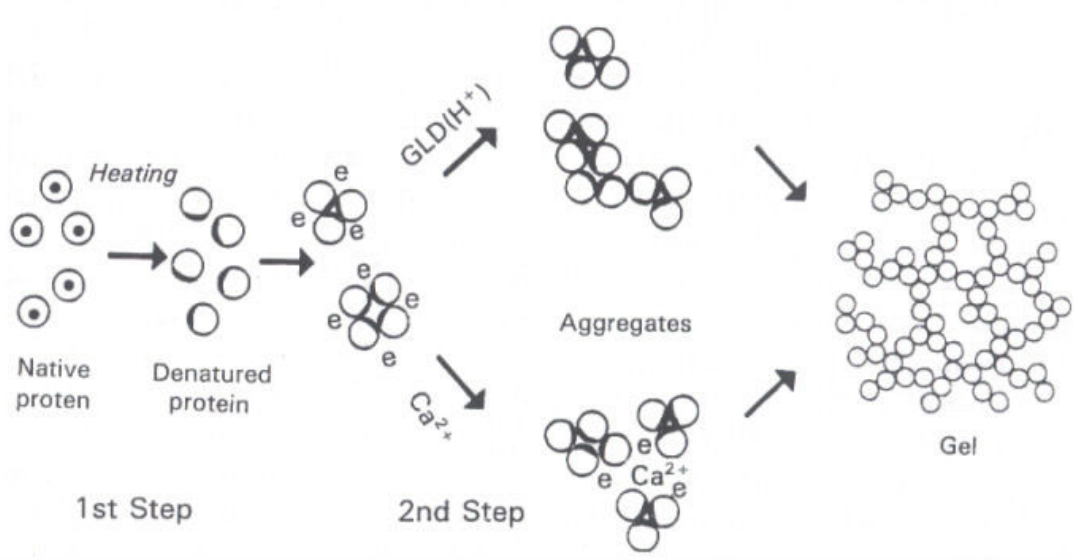
2.4.1 การเสียสภาพของโปรตีนถั่วเหลือง

มีกลไกคือ ณ สภาวะปกติ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโมเลกุลโปรตีนจะอยู่ด้านในเมื่อได้รับความร้อน โปรตีนถั่วเหลืองก็จะไม่แตกเป็นหน่วยย่อยๆ แต่โมเลกุลโปรตีนจะคลี่ออก ทำให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำออกมาอยู่ด้านนอกและจับกันเอง ส่งผลให้โปรตีนมีประจุเป็นลบ จึงพร้อมที่จะเกิดอันตรกิริยากับสารตกตะกอนและเกิดเป็นเจลต่อไป

2.4.2 การตกตะกอนของโมเลกุลโปรตีนถั่วเหลือง

มีกลไกคือ ไอออนจากสารตกตะกอนประเภทเกลือหรือโปรตอนจากสารตกตะกอนประเภทกรดจะเข้าไปทำให้ประจุสุทธิรวมของโปรตีนให้เป็นศูนย์ ทำให้มีแรงผลักทางไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้โปรตีนแต่ละโมเลกุลเข้ามาอยู่ใกล้กันมากเพียงพอที่จะสร้างพันธะไดซัลไฟด์

(disulfide bond : S-S) ระหว่างโมเลกุล และก่อให้เกิดการรวมตัวกันแบบสุ่มได้เป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ เรียกว่า เจล หรือ เคิร์ด ที่มีลักษณะขุ่น นอกจากนี้การใช้สารตกตะกอนประเภทเกลือยังอาจเกิดอันตรกิริยาการเชื่อมข้ามได้อีกด้วย ส่วนสารตกตะกอนประเภทกรดยังมีบทบาททำให้ค่าความเป็นกรดด่างลดลง ซึ่งโมเลกุลโปรตีนจะตกตะกอนเมื่อมีค่าความเป็นกรดด่างเข้าใกล้จุดไอโซอิเล็คทริค (isoelectric point)



ภาพที่ 2.2 กลไกการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองด้วยสารตกตะกอนประเภทเกลือหรือกรดในผลิตภัณฑ์เต้าหู้

ที่มา : Liu, 1999

ส่วนการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ด้วยสารตกตะกอนประเภทเอนไซม์ ส่วนใหญ่เป็นพวกเอนไซม์โปรติเอส ซึ่งมีกลไกคือ เอนไซม์จะมีบทบาททำให้โปรตีนถั่วเหลืองเกิดการเสียสภาพธรรมชาติและสูญเสียสมบัติการละลาย ส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการตกตะกอนลงมา (Liu, 1999)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ลักษณะและคุณภาพเต้าหู้

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ลักษณะ และคุณภาพเต้าหู้ มีดังต่อไปนี้

2.5.1 องค์ประกอบและความแตกต่างของวัตถุดิบ

ถั่วเหลืองแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งในด้านลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งในการผลิตเต้าหู้ จะเลือกใช้ถั่วเหลืองที่มีเมล็ดใหญ่ เปลือกบาง และมีสีของสะดือบนเมล็ดถั่วเหลือง (hilum) เป็นสีอ่อน เนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่มีสีอ่อน ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคทั่วไปยอมรับ ทั้งนี้ขนาดของถั่วเหลืองไม่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิตของเต้าหู้ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองมีผลต่อกลิ่นรส เนื้อสัมผัส และปริมาณผลผลิต ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของเต้าหู้ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของถั่วเหลืองที่มีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ คือ โปรตีนชนิด 11S และ 7S ซึ่งโปรตีนชนิด 11S และ 7S นี้มีความแตกต่างกันในด้านองค์ประกอบและโครงสร้าง จึงมีคุณค่าทางโภชนาการและสมบัติเชิงหน้าที่ที่ต่างกัน สำหรับคุณค่าทางโภชนาการ โปรตีนชนิด 11S มีกรดอะมิโนเมไทโอนินและซิสเทอีนต่อหน่วยโปรตีนสูงกว่าชนิด 7S ประมาณ 3 – 4 เท่า ซึ่งกรดอะมิโนทั้งสองชนิดนี้เป็นกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นโปรตีนชนิด 11S จึงมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าชนิด 7S สำหรับสมบัติเชิงหน้าที่ โปรตีนทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันในด้านความสามารถในการเกิดเจล ความคงทนต่อความร้อน และการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ โดยโปรตีนชนิด 11S มีความสามารถในการเกิดเจลได้ดีกว่าชนิด 7S แต่โปรตีนชนิด 7S มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีกว่าชนิด 11S (Liu, 1997)

โปรตีนในถั่วเหลืองชนิด 11S เรียกว่า ไกลซินิน (glycinin) และ ชนิด 7S เรียกว่า เบต้าคอนไกลซินิน (β-conglycinin) ซึ่งทั้งโปรตีนสองชนิดนี้มีคุณสมบัติในการเกิดเจลด้วยความร้อน แต่เคิร์ดที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เคิร์ดที่ได้จากการตกตะกอนโปรตีนชนิด 11S ด้วยแคลเซียมซัลเฟตจะมีความแข็ง (hardness) มากกว่าเคิร์ดที่ได้จากการตกตะกอนโปรตีนชนิด 7S โดยโปรตีนชนิด 11S เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดความแข็ง ความเปราะ (brittleness) และความหยุ่นตัว (gumminess) ของเคิร์ด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอนุภาคของโปรตีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope) พบว่า อนุภาคของโปรตีนชนิด 11S ที่อยู่ในโครงสร้างร่างแหของเคิร์ดที่ตกตะกอนด้วยแคลเซียมซัลเฟตหรือกลูโคโนเดลต้าแลคโตน มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของโปรตีนชนิด 7S อย่างเห็นได้ชัด

ในการเกิดเจลด้วยกลูโคโนเดลต้าแลคโตน โปรตีนชนิด 7S จะมีอัตราการเกิดเจลต่ำกว่า ใช้เวลาในการเกิดเจลนานกว่า และมีระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดเจลได้ ต่ำกว่าโปรตีนชนิด 11S และเมื่อเติมแคลเซียมซัลเฟตลงในส่วนผสมของโปรตีนชนิด 11S และ 7S พบว่า โปรตีนชนิด 11S เป็นองค์ประกอบหลักในการสร้างโครงสร้างร่างแห ขณะที่โปรตีนชนิด 7S จะขัดขวางการขับน้ำออกจากเจล

นอกจากนี้องค์ประกอบอื่นๆ ในถั่วเหลืองก็มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเต้าหู้ กล่าวคือ องค์ประกอบต่างๆ ในถั่วเหลืองมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบในน้ำนมถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณโปรตีน กรดไฟติก แคลเซียม ทองแดง และเหล็ก แต่มีเพียงกรดไฟติก ทองแดง และเหล็กเท่านั้นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบในเต้าหู้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนสูง จะได้เต้าหู้ที่มีปริมาณโปรตีนสูง มีความแน่นเนื้อและความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ ส่วนการใช้ถั่วเหลืองที่มีไขมันสูงก็ทำให้เต้าหู้ที่ได้มีปริมาณไขมันสูงเช่นกัน

ในการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองด้วยแคลเซียมซัลเฟต หากใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนและเถ้าสูงและมีฟอสฟอรัสต่ำ จะมีปริมาณผลผลิตของเต้าหู้เพิ่มขึ้น ส่วนการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองด้วยกลูโคโนเดลต้าแลคโตน หากใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีปริมาณผลผลิตและความแข็งของเต้าหู้เพิ่มขึ้น (Liu, 1997)

Cai และคณะ (2002) ทำการศึกษาปริมาณผลผลิต ความชื้น และลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ที่ทำจากถั่ว 6 ชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วชิกพี ถั่วเลนทิล ถั่วลันเตา ถั่วเขียว และฟาวาบีน พบว่า ชนิดของถั่วมีผลต่อปริมาณผลผลิตของเต้าหู้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเต้าหู้ถั่วเขียว มีปริมาณผลผลิตสูงสุด และเต้าหู้ถั่วชิกพีมีปริมาณผลผลิตต่ำสุด และพบว่าเต้าหู้ถั่วเขียวและถั่วเลนทิลมีปริมาณความชื้นสูงกว่าเต้าหู้ถั่วชิกพีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการเชื่อมข้ามด้วยพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบของโปรตีนเป็นตัวกำหนดความสามารถในการอุ้มน้ำ นั่นคือ เต้าหู้ถั่วเลนทิล ถั่วลันเตาและถั่วเขียวมีปริมาณพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเชื่อมระหว่างโปรตีนกับน้ำมากกว่า จึงทำให้มีความชื้นสูงกว่าเต้าหู้ถั่วเหลือง ถั่วชิกพีและฟาวาบีน

เมื่อพิจารณาในด้านเนื้อสัมผัสของเคิร์ด พบว่า การใช้ถั่วเหลือง ถั่วชิกพีและฟาวาบีน จะได้เต้าหู้ที่มีความแข็ง ความยืดหยุ่น (springiness) และความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) มากกว่าการใช้ถั่วเลนทิล ถั่วเขียว และถั่วลันเตา และพบว่า เมื่อเตรียมเต้าหู้จากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นถั่วที่มีปริมาณโปรตีน เถ้าและไขมันสูงที่สุดในบรรดาถั่วทั้ง 6 ชนิด จะได้เต้าหู้ที่มีความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกันสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมี

ความแข็งสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างกับ เต้าหู้ถั่วซิกพีและฟาวาบีนอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อนำน้ำนมถั่วทั้ง 6 ชนิดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) พบว่า โปรตีนถั่วเหลือง ถั่วซิกพี ถั่วเลนทิล ถั่วลันเตาและฟาวาบีน มีกระบวนการดูดความร้อนเกิดขึ้นสองครั้ง ซึ่งครั้งแรกและครั้งที่สองแสดงถึงปริมาณโปรตีนชนิด 7S และ 11S ตามลำดับ โดยถั่วเหลือง ถั่วซิกพี และฟาวาบีน มีปริมาณโปรตีนชนิด 11S สูงกว่าถั่วเลนทิลและถั่วลันเตา ซึ่งถั่วเลนทิลและถั่วลันเตา มีปริมาณโปรตีนชนิด 7S สูงกว่าถั่วเหลือง ถั่วซิกพี และฟาวาบีน ส่วนถั่วเขียวมีเพียงชนิด 7S เท่านั้น ดังนั้นการใช้เมล็ดพืชที่มีองค์ประกอบของโปรตีนเป็นชนิด 11S ในปริมาณสูง จะได้เต้าหู้ที่มีความแข็ง ความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกันสูงกว่าการใช้เมล็ดพืชที่มีองค์ประกอบโปรตีนเป็นชนิด 7S ในปริมาณสูง

2.5.2 อุณหภูมิในขั้นตอนการบด

อุณหภูมิในการบดมีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการบดถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 50 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ความแน่นเนื้อของเต้าหู้ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณหมู่ซัลฟ์ไฮดริลจะถูกทำลาย ทำให้มีปริมาณลดลง (Liu, 1997)

2.5.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดหรือความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมถั่ว

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำนมถั่วเหลืองมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอัตราส่วนของน้ำต่อถั่วเหลืองหรืออัตราส่วนของน้ำนมถั่วเหลืองต่อถั่วเหลือง กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อถั่วเหลืองหรืออัตราส่วนของน้ำนมถั่วเหลืองต่อถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำนมถั่วเหลืองก็จะลดลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองด้วย และเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำนมถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตและความสามารถในการเกาะกันของเต้าหู้จะลดลง แต่ความแข็งและความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น (Liu, 1997)

Cai และคณะ (2001) ทำการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมถั่วซิกพีที่มีต่อปริมาณผลผลิต ความชื้น และเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ถั่วซิกพี ซึ่งใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นสารตกตะกอน โดยทำการแปรระดับความเข้มข้นของโปรตีนถั่วซิกพี 8 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 2, 2.3, 2.5, 2.6, 3, 4 และ 9 พบว่า การเตรียมเต้าหู้ถั่วซิกพีโดยใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 1 ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนการใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2 – 4 ไม่มีผลทำให้ปริมาณผลผลิตเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และการใช้น้ำนมถั่วซิกพีที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 9 จะไม่สามารถเกิดลักษณะของเคิร์ดได้ และพบว่า ปริมาณความชื้นของเต้าหู้ถั่วซิกพีแตกต่างกัน

ไปตามระดับความเข้มข้นของโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 71.2 – 78.9 โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2.3 จะได้เต้าหู้ถั่วชิกพีที่มีปริมาณความชื้นสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากร้อยละ 2.0, 2.5, 3.0 และ 4.0 ($p > 0.05$) และเมื่อใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 1 จะมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ระดับความเข้มข้นของโปรตีนมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ถั่วชิกพีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของโปรตีนเพิ่มขึ้น ความแข็ง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการเกาะกันของเต้าหู้ถั่วชิกพี จะมีแนวโน้มลดลง โดยการใช้น้ำนมถั่วชิกพีที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 1 จะได้เต้าหู้ถั่วชิกพีที่มีความแข็งมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่การใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 3 จะมีค่าความแข็งเป็น 6.87 นิวตัน ซึ่งใกล้เคียงกับความแข็งของเต้าหู้ถั่วเหลือง และพบว่า การใช้น้ำนมถั่วชิกพีที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2 – 3 เต้าหู้ถั่วชิกพีที่ได้มีความแข็งและความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และการใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2.3 – 3 เต้าหู้ถั่วชิกพีที่ได้มีความสามารถในการเกาะกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จึงสรุปได้ว่า ระดับความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2.3 – 3 มีความเหมาะสมในการเตรียมเต้าหู้ถั่วชิกพีโดยใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นสารตกตะกอน

Cai และ Baik (2001) ทำการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมถั่วชิกพีที่มีต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วชิกพี โดยไม่ใช้สารตกตะกอน ทำการแปรระดับความเข้มข้นของโปรตีนถั่วชิกพี 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1.88, 2.51 และ 3.77 ซึ่งมีปริมาณของแข็งเท่ากับ ร้อยละ 3.68, 4.90 และ 7.35 ตามลำดับ พบว่า เมื่อใช้น้ำนมถั่วชิกพีที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 1.88 จะไม่สามารถเกิดลักษณะของเคิร์ดได้ และการใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2.51 และ 3.77 มีผลทำให้ได้เต้าหู้ถั่วชิกพีที่มีคุณภาพแตกต่างกัน โดยการใช้น้ำนมถั่วชิกพีที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 2.51 ให้เต้าหู้ถั่วชิกพีที่มีปริมาณผลผลิตและความชื้นมากกว่าแต่มีความแข็งและความสามารถในการเกาะกันต่ำกว่าการใช้ความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 3.77 ส่วนค่าสีและความยืดหยุ่นของทั้งสองระดับความเข้มข้นไม่มีความแตกต่างกัน

2.5.4 การให้ความร้อน

การให้ความร้อนแก่น้ำนมถั่วเหลืองทำให้เกิดการรวมตัว (aggregation) และการต่อกันเป็นสายยาว (polymerization) ของโปรตีนถั่วเหลือง โดยเฉพาะโปรตีนพวกที่เป็น 11S โดยจะเกี่ยวข้องกับการเชื่อมด้วยพันธะซัลฟ์ไฮดริลไดซัลไฟด์เป็นสำคัญ ซึ่งเมื่อได้รับความร้อน

จำนวนหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (-SH group) จะเพิ่มขึ้นทันทีจนถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดต่ำลง แต่หากให้ความร้อนมากไป หมู่ซัลฟ์ไฮดริลในโปรตีนจะถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศ ทำให้การประสานกันลดลง

การเสียสภาพด้วยความร้อนของโปรตีนชนิด 11S และ 7S มีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ต่างกัน โดยสำหรับโปรตีนชนิด 11S จำนวนหมู่ซัลฟ์ไฮดริลจะเพิ่มขึ้นระหว่างการให้ความร้อน และทำให้ความแข็ง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการเกาะกันของเต้าหู้เพิ่มขึ้น ส่วนโปรตีนชนิด 7S ก็มีจำนวนหมู่ซัลฟ์ไฮดริลเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ไม่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ ทั้งนี้โปรตีนชนิด 11S ต้องผ่านความร้อนจึงจะเกิดลักษณะที่เป็นเจล แต่โปรตีนชนิด 7S ไม่ว่าจะผ่านความร้อนหรือไม่ก็ตาม ก็เกิดลักษณะเป็นเจลได้ แต่จะไม่แข็งเท่าเจลที่ได้จากชนิด 11S ทั้งนี้เป็นเพราะว่าโปรตีนชนิด 7S จะไม่แตกตัว แต่จะรวมตัวกันและตกตะกอนด้วยความร้อน โดยเฉพาะเมื่อมีความแรงไอออนิก (ionic strength) สูง

ในการผลิตเต้าหู้เพื่อการค้า จะให้ความร้อนด้วยไอน้ำจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอย่างรวดเร็ว ทำให้โปรตีนชนิด 7S และ 11S เสียสภาพไปเกือบพร้อมกัน ทั้งที่โปรตีนชนิด 7S และ 11S มีอุณหภูมิในการเสียสภาพ (denaturation temperature) ที่ไม่เท่ากัน โดยชนิด 11S สามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าชนิด 7S กล่าวคือ โปรตีนชนิด 7S และ 11S จะเกิดการเสียสภาพที่อุณหภูมิ 65 – 75 และ 85 – 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Liu, 1997)

เสาวลักษณ์ (2544) ได้ศึกษาผลของสภาพกรดด่างต่อการจับก้อนของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองและสมบัติทางกายภาพของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า น้ำนมถั่วเหลืองเริ่มเกิดการจับก้อนเมื่อเติมสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 0.30 มิลลิโมลาร์ หรือมีค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 4 แต่เมื่อเติมสารละลายเบส พบว่า น้ำนมถั่วเหลืองไม่เกิดการจับก้อนเลย แต่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำนมถั่วเหลือง จะมีการจับก้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่มีต่อการจับก้อนของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง พบว่า การจับก้อนของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองเกิดได้ดี เมื่อต้มน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 70 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 – 15 นาที (เพ็ญศรี, 2544)

Cai และคณะ (2002) ได้นำน้ำนมถั่ว 6 ชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วชิกพี ถั่วเลนทิล ถั่วลันเตา ถั่วเขียว และฟาวาบีน ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimetry พบว่า น้ำนมถั่วแต่ละชนิดมีอุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีน 7S และ 11S ที่แตกต่างกันไป โดยโปรตีนถั่วเหลือง ถั่วชิกพี ถั่วเลนทิล ถั่วลันเตา และฟาวาบีนมีอุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีนชนิด 7S และ 11S อยู่ที่ 86.6 และ 109.2, 96.8 และ 115.3, 97.8 และ 110.5, 95.8 และ 111.5 และ 99.8 และ 113.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนโปรตีนถั่วเขียว ซึ่ง

ไม่มีโปรตีนชนิด 11S มีอุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีนชนิด 7S อยู่ที่ 103.6 องศาเซลเซียส ดังนั้น โปรตีนถั่วแต่ละชนิดอาจต้องการสภาวะการให้ความร้อนเพื่อการเกิดเคิร์ดที่แตกต่างกัน

Liu และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิการเสียสภาพของโปรตีนถั่วเหลืองด้วยการนำน้ำนมถั่วเหลืองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter โดยให้ความร้อนจาก 20 ถึง 98 องศาเซลเซียส พบว่า มีกระบวนการดูดความร้อนเกิดขึ้นสองครั้ง โดยครั้งแรก มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 65.3 และ 70.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีนชนิด 7S บริสุทธิ์ ส่วนครั้งที่สอง มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 85.6 และ 92 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีนชนิด 11S บริสุทธิ์ นั่นคือ สามารถทำให้โปรตีนชนิด 7S เกิดการเสียสภาพโดยไม่ทำให้โปรตีนชนิด 11S เสียสภาพได้ด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำนมถั่วเหลืองแบบสองขั้นตอน กล่าวคือ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 นาที เพื่อให้โปรตีนชนิด 7S เกิดการเสียสภาพ จากนั้นจึงให้ความร้อนอีกครั้งที่ 95 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้โปรตีนชนิด11S เกิดการเสียสภาพ

เมื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนต่อความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองและสมบัติทางกายภาพของเต้าหู้หลอดจากถั่วเหลือง พบว่า การเตรียมเต้าหู้หลอดโดยใช้การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอน คือ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส อีก 5 นาที จะทำให้น้ำนมถั่วเหลืองมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเต้าหู้หลอดมีความแข็งและความยืดหยุ่นมากกว่า และมีร้อยละการขับน้ำออกจากเจล (syneresis) ต่ำกว่าการให้ความร้อนขั้นตอนเดียวที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความหนืดแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนมีผลต่อกลไกการรวมตัวกันของโปรตีนระหว่างการเสียสภาพ กล่าวคือ ในระหว่างการให้ความร้อนในขั้นตอนแรก โปรตีนชนิด 7S ถูกทำให้เสียสภาพและเกิดการคลี่ออกแล้วรวมตัวกันเป็นร่างแหที่เป็นระเบียบ ต่อมาเมื่อให้ความร้อนในขั้นตอนที่สอง โปรตีนชนิด 11S จึงเกิดการเสียสภาพแล้วเข้าไปรวมตัวกับร่างแหเดิมของโปรตีนชนิด 7S ได้เป็นร่างแหที่ใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น และเมื่อนำเต้าหู้หลอดไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) พบว่า การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนทำให้ได้เต้าหู้หลอดที่มีโครงสร้างเรียบร้อยและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียว

เมื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 5, 7 และ 10 นาที พบว่า เวลาในการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวไม่มีผลทำให้ความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองและร้อยละการขับน้ำออกจากเจลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p > 0.05$) แต่มีผลทำให้เต้าหู้หลอดมีความแข็งและความยืดหยุ่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส อีก 5 นาที ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดจากการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอน ไม่ได้เป็นผลจากการที่เวลารวมในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น

Wang และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาผลของระดับอุณหภูมิในการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนที่มีต่อคุณภาพของเต้าหู้หลอดที่ทำจากถั่วเหลือง พบว่า การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนทำให้ความยืดหยุ่นของเต้าหู้หลอดเพิ่มขึ้นและร้อยละการขับน้ำออกจากเจลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยในขั้นตอนแรก การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อความยืดหยุ่นและร้อยละการขับน้ำออกจากเจลมากกว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ส่วนในขั้นตอนที่สอง การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีผลมากกว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ดังนั้น สภาวะการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนที่เหมาะสม คือ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที แล้วตามด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที

เมื่อศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอน พบว่า การให้ความร้อนในขั้นแรก นาน 5, 10 และ 30 นาที ไม่มีผลทำให้ความยืดหยุ่นและร้อยละการขับน้ำออกจากเจลเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนกับขั้นตอนเดียว พบว่า การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที แล้วตามด้วย 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที ได้ปริมาณผลผลิต ความแข็งและความยืดหยุ่นมากกว่า และมีร้อยละการขับน้ำออกจากเจลน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

2.5.5 ชนิดของสารตกตะกอน

โดยทั่วไป สารตะกอนโปรตีนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ เกลือ กรด และเอนไซม์ ซึ่งสารตกตะกอนที่นิยมใช้ในการผลิตเต้าหู้ ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต กลูโคโนเดลต้าแลคโตน เป็นต้น โดยการใช้สารตกตะกอนต่างชนิดกัน จะได้เต้าหู้ที่มีคุณภาพแตกต่างกันไป (Liu, 1997) เช่น

การใช้ยิปซัม (gypsum: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) หรือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต จะได้เต้าหู้ที่มีกลิ่นรสด้อยกว่า มีความสามารถในการเกาะกันต่ำกว่า เนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำและยากต่อการผสม แต่ได้ปริมาณผลผลิตสูงกว่าการใช้ nigari เนื่องจากมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดี ใช้ทำได้ทั้งเต้าหู้แข็ง เต้าหู้อ่อน และเต้าหู้หลอด ทั้งนี้เมื่อตั้ง

ทิ้งไว้เป็นเวลานาน ประสิทธิภาพในการตกตะกอนของสารละลายแคลเซียมซัลเฟตจะลดลง จึงจำเป็นต้องเตรียมสารละลายแคลเซียมซัลเฟตใหม่ทุกครั้งก่อนการใช้งาน

การใช้ nigari ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) หรือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จะได้เต้าหู้ที่มีรสชาติดี มีกลิ่นรสที่หวาน แต่จะมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มลื่นน้อยกว่าการใช้แคลเซียมซัลเฟต และเนื่องจากมีความสามารถในการจับน้ำไม่ดี จึงได้ปริมาณผลผลิตต่ำ โดยปฏิกิริยาการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเร็วมากและมีช่วงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมที่แคบมาก ทั้งนี้ไม่นิยมใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เต้าหู้หลอด

การใช้แคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมอะซิเตท สามารถใช้แทนการใช้แคลเซียมซัลเฟตได้ เนื่องจากได้เต้าหู้ที่มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสเช่นเดียวกัน อีกทั้งสารสองตัวนี้ยังมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่า จึงทำการเติมและผสมได้ง่าย ส่งผลให้ได้เต้าหู้ที่มีความสามารถในการเกาะกันมากกว่า (Liu, 1997) ส่วนการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตจะเกิดปฏิกิริยาในการตกตะกอนเร็วมาก ตะกอนจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ทำให้ได้เต้าหู้ที่มีเนื้อแน่นเหนียวเหมือนยาง นิยมใช้ในการทำเต้าหู้แข็ง (เพลินใจ, 2545)

การใช้กลูโคโนเดลต้าแลคโตน จะได้เต้าหู้ที่มีเนื้อละเอียดและเรียบลื่น มีกลิ่นรสที่ดี ปริมาณผลผลิตสูง ต้นทุนต่ำ และเก็บได้นาน แต่มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำกว่าการใช้สารตกตะกอนประเภทเกลือ สารนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว มีรสหวาน และ ไม่มีกลิ่น โดยผลการตกตะกอนจะเกิดจากการกระทำในรูปของกรดมากกว่ารูปของเกลือ กล่าวคือ เมื่อสารนี้ละลายในน้ำและได้รับความร้อน จะเกิดการไฮโดรไลซ์อย่างช้าๆ ได้เป็นกรดกลูโคนิก (gluconic acid) ทำให้ความเป็นกรดด่างของน้ำนมถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไปเป็นกรด ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีนถั่วเหลืองได้ (เพลินใจ, 2545) โดยการใช้สารนี้จะมีอัตราการตกตะกอนที่ช้ากว่าการใช้เกลือพวกแคลเซียม แต่มีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ หากใช้สารนี้ในปริมาณน้อยจะสามารถผสมในน้ำนมถั่วเหลืองที่เย็นได้ จึงนิยมใช้ในการทำเต้าหู้หลอด (Liu, 1997)

การใช้กรดอื่นๆ เช่น กรดแลคติก น้ำผลไม้ตระกูลส้ม น้ำมะนาว น้ำส้มสายชู เป็นต้น การเติมกรดลงไปในน้ำนมถั่วเหลือง ทำให้ความเป็นกรดด่างลดลง ส่งผลให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ได้ โดยเต้าหู้ที่ใช้กรดแลคติกเป็นสารตกตะกอน จะมีกลิ่นรสที่ดีและมีเนื้อสัมผัสที่ลื่นกว่าการตกตะกอนด้วยกลูโคโนเดลต้าแลคโตน ส่วนเต้าหู้ที่ใช้น้ำผลไม้ตระกูลส้มเป็นสารตกตะกอน จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสและปริมาณผลผลิตที่แย่กว่าการใช้สารตกตะกอนชนิดอื่นๆ

สารตกตะกอนประเภทเอนไซม์ที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ เอนไซม์ปาเปน (papain) เอนไซม์โปรติเอส (protease) เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase: TGase)

เป็นต้น โดยเอนไซม์ปาเปนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 – 3 สามารถใช้ในการทำเต้าหู้หลอดได้ ทั้งนี้เอนไซม์ปาเปนจะถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้เอนไซม์โปรติเอสเป็นสารตกตะกอนจะได้เต้าหู้ที่มีเนื้อสัมผัสเรียบลื่น และสำหรับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสต้องการแคลเซียมช่วยในการยึดสารตั้งต้นกับโครงสร้างของเอนไซม์หรือเร่งการเกิดอันตรกิริยาโดยตรงแต่หากเป็นเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่สกัดจากจุลินทรีย์ (microbial transglutaminase: MTGase) จะไม่ต้องการแคลเซียมในการเร่งการเกิดอันตรกิริยา โดยการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่สกัดจากจุลินทรีย์ จะได้เต้าหู้ที่มีความคงทนต่อการรีทอร์ทได้ดีกว่าการใช้สารตกตะกอนชนิดอื่นๆ (Liu, 1997)

Hou และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาถึงผลของ nigari และแคลเซียมซัลเฟตต่อปริมาณผลผลิตและลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อนที่ทำจากถั่วเหลือง พบว่า การใช้ nigari จะได้เต้าหู้อ่อนที่มีปริมาณผลผลิตสูงกว่า แต่มีความเปราะ ความแข็ง และความยืดหยุ่นต่ำกว่าการใช้แคลเซียมซัลเฟต สำหรับผลของแมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟตที่มีต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วชิกพี พบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต จะได้เต้าหู้ถั่วชิกพีมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1.0 – 2.0 การใช้แคลเซียมซัลเฟตจะได้ปริมาณผลผลิตและความชื้นสูงกว่า แต่มีความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกันต่ำกว่าการใช้แมกนีเซียมซัลเฟต (Cai และคณะ, 2001) ส่วนเพ็ญศรี (2544) ได้ทำการศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเกลือ 4 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีต่อการจับก้อนของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง พบว่า ค่าความเข้มข้นวิกฤติหรือความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดการจับก้อนของโปรตีนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ มีค่ามากกว่าแคลเซียมซัลเฟต

2.5.6 **ความเข้มข้นของสารตกตะกอน**

ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้เป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิตของเต้าหู้ กล่าวคือ หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสม จะได้เวย์ที่โปร่งใส มีรสหวาน และไม่มีส่วนที่ไม่ตกตะกอนเหลืออยู่ แต่ถ้าความเข้มข้นของสารตะกอนต่ำเกินไปจะส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของโปรตีนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นเคิร์ดที่แข็งแรงได้ และหากใช้ความเข้มข้นมากเกินไป จะทำให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการอัดตัวแน่นของโครงสร้างร่างแหและเพิ่มสูญเสียน้ำ เคิร์ดมีลักษณะที่หยาบ เวย์มีรสขมเล็กน้อย โดยปริมาณที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารตกตะกอนและลักษณะของเต้าหู้ที่ต้องการ

ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ใช้ในการตกตะกอนมีอิทธิพลต่อคุณภาพของเต้าหู้มากกว่าอิทธิพลของปริมาณโปรตีนในถั่วเหลือง กล่าวคือ การใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนต่างกัน จะได้เต้าหู้ที่มีคุณภาพต่างกัน แต่สามารถปรับปรุงคุณภาพได้ด้วยการปรับปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตที่ใช้ โดยปริมาณแคลเซียมซัลเฟตมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณโปรตีนในถั่วเหลือง นั่นคือ หากใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนน้อยลงก็ต้องใช้แคลเซียมซัลเฟตในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อให้ได้เต้าหู้ที่มีคุณภาพเหมือนเดิม (Liu, 1997)

Gebre-egziabher และ Sumner (1983) ทำการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตที่มีต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วลันเตา โดยทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟต 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0.15, 0.27, 0.40 และ 0.54 ของปริมาตรน้ำนมถั่วลันเตา หรือเท่ากับร้อยละ 0.75, 1.35, 2.00 และ 2.70 ของน้ำหนักถั่วลันเตา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตและค่าแรงเฉือน (shear stress) จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความชื้นจะลดลง โดยการใช้แคลเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 0.54 มีความเหมาะสมในการเตรียมเต้าหู้ถั่วลันเตา และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเต้าหู้ที่ทำจากถั่วเหลืองซึ่งเตรียมด้วยสภาวะเดียวกัน พบว่า เต้าหู้ถั่วลันเตามีปริมาณผลผลิตต่ำกว่า ความชื้นสูงกว่า เนื้อสัมผัสนิ่มกว่า มีค่าสีเหลืองน้อยกว่า แต่มีสีคล้ำกว่า มีปริมาณโปรตีนสูงกว่า ปริมาณไขมันต่ำกว่า และมีคะแนนการยอมรับน้อยกว่าเต้าหู้ที่ทำจากถั่วเหลือง แต่คะแนนการยอมรับของเต้าหู้ถั่วลันเตาที่ได้ยังอยู่ในช่วงชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง

Cai และคณะ (2001) ศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟตที่มีต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วชิกพี โดยทำการแปรระดับความเข้มข้น 4 ระดับ คือ แมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 ของน้ำหนักถั่วชิกพี และแคลเซียมซัลเฟต ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักถั่วชิกพี พบว่า ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 0.5 จะได้เต้าหู้ที่มีความแข็งและความสามารถในการเกาะกันต่ำที่สุด แต่มีความยืดหยุ่นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนการใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นสารตกตะกอน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 และ 2.0 จะได้เต้าหู้มีความแข็งและความสามารถในการเกาะกันสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ปิยวรรณ (2545) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้น้ำมะเขือเทศในการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองในกระบวนการทำเต้าหู้แข็ง โดยแปรปริมาณกรดของน้ำมะเขือเทศ 6 ระดับ คือ ร้อยละ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 (ในรูปกรดซิตริก) พบว่า การตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลือง

โดยใช้น้ำมะเขือเทศที่มีปริมาณกรดที่ต่างกันไม่ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำนมถั่วเหลืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และพบว่า การใช้น้ำมะเขือเทศที่มีปริมาณกรดเท่ากับร้อยละ 0.2 (ในรูปกรดซิตริก) จะไม่เกิดการตกตะกอนของโปรตีนถั่วเหลือง จึงไม่สามารถใส่พิมพ์เพื่อทำเป็นเต้าหู้แข็งได้ ส่วนการใช้น้ำมะเขือเทศที่มีปริมาณกรดมากกว่าร้อยละ 0.3 สามารถทำให้โปรตีนตกตะกอนและทำเป็นเต้าหู้แข็งได้ ทั้งนี้เต้าหู้แข็งที่ได้จะมีสีเหลืองอมส้ม ซึ่งสีจะจางลงเมื่อเปอร์เซ็นต์กรดในน้ำมะเขือเทศลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เต้าหู้แข็งในทุกระดับปริมาณกรดมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าและเส้นใย ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และจากการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า เต้าหู้แข็งที่ได้จากการตกตะกอนด้วยน้ำมะเขือเทศที่มีปริมาณกรดร้อยละ 0.5 ซึ่งเป็นปริมาณกรดในระดับที่มีอยู่ในน้ำมะเขือเทศตามธรรมชาติ ได้คะแนนการยอมรับด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมสูงที่สุด จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการตกตะกอนโปรตีนในกระบวนการทำเต้าหู้แข็งมากที่สุด

2.5.7 **อุณหภูมิในการตกตะกอน**

อุณหภูมิของน้ำนมถั่วเหลืองในขณะเติมสารตกตะกอน มีผลต่ออัตราการตกตะกอนและคุณภาพของเต้าหู้ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความแข็งและความยืดหยุ่นของเต้าหู้จะเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่อุณหภูมิสูง โปรตีนจะมีพลังงานสูง จึงนำไปสู่การตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เต้าหู้ที่มีร่างแหขนาดเล็ก ความสามารถในการจับน้ำต่ำ เนื้อสัมผัสแข็ง และปริมาณผลผลิตต่ำ ส่วนถ้ามีอุณหภูมิในขณะเติมสารตกตะกอนต่ำ จะเกิดการตกตะกอนได้ไม่สมบูรณ์ เต้าหู้ที่ได้มีน้ำมากและนิ่มเกินกว่าที่จะรักษารูปร่างไว้ได้ ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิในการตกตะกอนที่เหมาะสม คือ 70 – 80 องศาเซลเซียส โดยหากอุณหภูมิในการตกตะกอนต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส เต้าหู้ที่ได้จะมีลักษณะนิ่มเละ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส เต้าหู้ที่ได้จะแข็งมีความสามารถในการเกาะกันและปริมาณผลผลิตต่ำ (Liu, 1997)

2.5.8 **การผสมสารตกตะกอน**

การเติมสารตกตะกอนด้วยวิธีการเทลงไปในน้ำเต้าหู้โดยไม่มีการผสม จะได้เคิร์ดที่เรียบและแน่น และหากใช้อัตราผสมเร็วขึ้น เต้าหู้ที่ได้จะมีความแข็งและยืดหยุ่นมากขึ้น มีปริมาณของแข็งและโปรตีนเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำและการจับน้ำลดลง ทำให้ปริมาณผลผลิตต่ำ โดยการใช้อัตราการผสมที่ความเร็วต่ำว่า 250 รอบต่อนาที จะได้เต้าหู้ที่นิ่มและมีน้ำมาก มีปริมาณของแข็งและโปรตีนต่ำ แต่ถ้าหากใช้ความเร็วในการผสมสูงกว่า 250 รอบต่อนาที เต้าหู้จะมีรูหยาบๆ และได้ปริมาณผลผลิตต่ำ ทั้งนี้การใช้เวลาในการผสม 5, 10, 15 และ 20 วินาที ได้ปริมาณผลผลิตไม่แตกต่างกัน แต่การใช้เวลาในการผสม 30 วินาที จะได้ปริมาณผลผลิตลดลง (Liu, 1997)

Hou และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาถึงผลของความเร็วและเวลาในการผสมที่มีต่อปริมาณผลผลิตและลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน โดยแปรความเร็วในการผสม 3 ระดับ คือ 137, 207 และ 285 รอบต่อนาที และเวลาในการผสม 6 ระดับ คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 วินาที พบว่า การใช้ความเร็วในการผสมสารตกตะกอนเป็น 137 รอบต่อนาที จะไม่สามารถตกตะกอนน้ำนมถั่วเหลืองได้ ส่วนเมื่อใช้ความเร็วในการผสมสารตกตะกอนเป็น 285 รอบต่อนาที จะให้ปริมาณผลผลิตต่ำ แต่มีความเปราะ ความแข็งและความยืดหยุ่นสูงกว่าการใช้ความเร็วในการผสมเป็น 207 รอบต่อนาที และพบว่า การใช้เวลาในการผสมสารตกตะกอนนาน 30 นาที จะได้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเวลาในการผสมสารตกตะกอนมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การใช้เวลาในการผสมต่ำกว่า 25 วินาที มีความเหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ เพื่อป้องกันการแตกของเคิร์ด

Shih และคณะ (1997) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งในน้ำนมถั่วเหลือง ความเข้มข้นของnigari อุณหภูมิในการตกตะกอน และเวลาในการผสมที่มีต่อปริมาณผลผลิต และลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน โดยแปรปริมาณของแข็งเป็น 10 – 14 ^{0}Brix ความเข้มข้นของnigariเป็นร้อยละ 0.25 – 0.41 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตรน้ำนมถั่วเหลือง) อุณหภูมิขณะตกตะกอนเป็น 75 – 91 องศาเซลเซียส และเวลาในการผสมเป็น 5 – 25 วินาที และวางแผนการทดลองแบบ rotatable central composite design 4 ปัจจัย พบว่า ปริมาณของแข็งในน้ำนมถั่วเหลืองและความเข้มข้นของnigariมีผลต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณของแข็งและโปรตีนของเต้าหู้อ่อนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และพบว่า ระยะเวลาในการผสมมีผลต่อปริมาณของแข็งและโปรตีนของเต้าหู้อ่อนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณของแข็งในน้ำนมถั่วเหลืองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อนมากที่สุด ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology: RSM) พบว่า สภาวะการผลิตเต้าหู้อ่อนจากถั่วเหลืองที่เหมาะสม คือ การใช้ปริมาณของแข็งในน้ำนมถั่วเหลืองเป็น 11.8 – 12.3 ^{0}Brix ใช้nigariเข้มข้นร้อยละ 0.27 – 0.32 ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 85 – 91 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสมนาน 5.0 – 11.3 วินาที

2.5.9 ระยะเวลาในการตกตะกอน

ระยะเวลาในการตกตะกอนมีผลต่อลักษณะและคุณภาพของเต้าหู้ โดยถ้าให้เวลาในการตกตะกอนน้อยเกินไป จะเกิดการตกตะกอนได้ไม่สมบูรณ์ แต่หากให้เวลาในการตกตะกอนมากเกินไป อุณหภูมิของระบบจะลดลง ทำให้ยากต่อการขึ้นรูป ทั้งนี้ในการทำเต้าหู้หลอดนิยมใช้เวลาในการตกตะกอนนาน 30 นาที เต้าหู้อ่อนจะใช้เวลาในการตกตะกอนนาน 20 – 25 นาที ส่วนเต้าหู้แข็งจะใช้เวลาในการตกตะกอนนาน 10 – 15 นาที (Liu, 1997)

2.5.10 สภาวะในการเทใส่แบบพิมพ์

หลังจากการตกตะกอนโปรตีน เคิร์ดของเต้าหู้จะถูกทำให้แตก นำไปใส่ในแม่พิมพ์และกดทับเพื่อเอาน้ำเวย์ออกจากเคิร์ด มีผลทำให้เต้าหู้ที่ได้มีความแน่นเนื้อสูงขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุณหภูมิของเคิร์ดขณะทำการเทใส่พิมพ์ แรงกดและระยะเวลาที่ใช้ในขณะกดทับ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ดังนี้

ถ้าอุณหภูมิของเคิร์ดขณะทำการเทใส่พิมพ์สูงเกินไป โปรตีนจะไม่สามารถรวมตัว อย่างสมบูรณ์ และยังคงมีน้ำเหลืออยู่ในเคิร์ด แต่หากอุณหภูมิขณะเทใส่พิมพ์ต่ำเกินไป จะทำให้สามารถกำจัดน้ำออกจากเคิร์ดได้ง่าย แต่โปรตีนจะเกิดการรวมตัวกันได้ไม่สมบูรณ์ โดยอุณหภูมิขณะเทใส่พิมพ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 68 – 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ไม่ควรต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส

ในขณะกดทับ แรงกดจะช่วยให้โปรตีนเกิดการรวมตัวกันและทำให้ความแน่นเนื้อสูงขึ้น แต่ถ้าแรงกดสูงเกินไป จะเกิดการแตกของโครงสร้างร่างแหของเต้าหู้ และถ้าใช้ระยะเวลา ในการกดทับนานเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมาก ทั้งนี้ในการทำเต้าหู้อ่อนอาจกดทับด้วยน้ำหนักน้อยๆ ก่อน หรือใช้ความดันประมาณ 2 – 4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 5 นาที แล้ว จึงเพิ่มเป็น 15 กรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 10 – 15 นาที ส่วนการทำเต้าหู้แข็งควรใช้ความดัน 20 – 100 กรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลานาน 20 – 30 นาที (Liu, 1997)

Cai และ Baik (2001) ได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการกดทับต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วชิกพี โดยแปรระยะเวลาในการกดทับ 3 ระดับ คือ 15, 30 และ 45 นาที พบว่าเต้าหู้ถั่วชิกพีที่ได้มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 82.5 – 84.98 โดยเมื่อใช้เวลาในการกดทับมากขึ้น เต้าหู้ถั่วชิกพีจะมีปริมาณความชื้นลดลง ส่งผลให้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าและปริมาณผลผลิตลดลง และพบว่า ระยะเวลาในการกดทับไม่มีผลต่อค่าสี ความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกันของเต้าหู้ถั่วชิกพีอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่มีผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อระยะเวลาในการกดทับมากขึ้น เต้าหู้ถั่วชิกพีจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น

2.5.11 ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่มีผลกระทบต่อการผลิตและคุณภาพของเต้าหู้ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลือง โครงสร้างละเอียดและขนาดอนุภาคของโปรตีนที่ตกตะกอน ความเป็นกรดด่าง เป็นต้น กล่าวคือ สถานที่ ฤดูกาล และปีที่ปลูกถั่วเหลืองมีผลต่อปริมาณของโปรตีนชนิด 7S และ 11S ทำให้ถั่วเหลืองที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ส่วนความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห ขนาดของโปรตีนและการรวมกลุ่ม

ของโปรตีนในโครงสร้างร่างแหมีความสัมพันธ์กับความแข็งของเต้าหู้ โดยส่วนมาก กลุ่มโปรตีนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะได้จากโปรตีนชนิด 11S นอกจากนี้การแช่แข็งมีผลทำให้ได้เต้าหู้ที่มีโครงสร้างละเอียดอีกด้วย (Liu, 1997)

Noh และคณะ (2005) ได้ทำการศึกผลของการแช่แข็งถั่วเหลืองที่มีต่อการตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองและคุณภาพของเต้าหู้ พบว่า การแช่แข็งถั่วเหลืองไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยมีแนวโน้มว่าการใช้ถั่วเหลืองที่แช่แข็งจะได้ปริมาณผลผลิตต่ำกว่าการใช้ถั่วเหลืองที่ไม่แช่แข็ง และพบว่า การใช้ถั่วเหลืองแช่แข็งจะได้เต้าหู้ที่มีความแข็ง ความยืดหยุ่น ความหยุ่นตัว ความคงทนต่อการเคี้ยว (chewiness) ร้อยละการขับน้ำออกจากเจล และปริมาณโปรตีนสูงกว่า แต่มีปริมาณความชื้นและไขมันต่ำกว่าการใช้ถั่วเหลืองที่ไม่แช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) รวมทั้งยังได้รับการยอมรับด้านกลิ่นรสและความชอบโดยรวมมากกว่าการใช้ถั่วเหลืองที่ไม่แช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อการยอมรับด้านสีอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ถั่วเหลืองที่แช่แข็งจะเกิดการตกตะกอนของโปรตีนได้เร็วกว่าและได้เต้าหู้ที่มีความสามารถในการเกาะกันและมีความหนาแน่นมากกว่าการใช้ถั่วเหลืองที่ไม่แช่แข็ง

ความเป็นกรดด่างมีผลต่อการตกตะกอนโปรตีน กล่าวคือ โปรตีนถั่วเหลืองสามารถละลายได้ในน้ำที่มีสภาวะความเป็นกลางและค่อนไปทางด่าง และละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรด แต่จะไม่ละลายที่ช่วงค่าความเป็นกรดด่างเป็น 4.2 - 4.6 ซึ่งเป็น จุดไอโซอิเล็กตริก นอกจากนั้นค่าความเป็นกรดด่างยังมีผลต่อการจับโปรตีนของแคลเซียมไอออนเป็นอย่างมาก กล่าวคือ หากมีความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 3 แคลเซียมไอออนจะไม่จับโปรตีน ส่วนในช่วงความเป็นกรดด่างเป็น 3 – 7 แคลเซียมไอออนจะจับโปรตีนได้ดีขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หากความเป็นกรดด่างสูงกว่า 7 ความสามารถในการจับโปรตีนจะคงที่ ซึ่งโดยปกติน้ำนมถั่วเหลืองจะมีความเป็นกรดด่างประมาณ 6.4 - 6.6 อันเป็นช่วงที่แคลเซียมไอออนสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีนได้ และหากความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณโปรตีนที่ตกตะกอนได้มากขึ้น แต่จะเกิดการตกตะกอนในอัตราที่ช้า ต้องใช้สารตกตะกอนจำนวนมาก ถ้าค่าความเป็นกรดด่างลดลงจะเกิดการตกตะกอนได้เร็วขึ้น แต่จะได้ปริมาณผลผลิตต่ำ (Liu, 1997)

เสาวลักษณ์ (2544) ได้ทำการศึกษาถึงผลของสภาพกรด-เบสต่อการรวมตัวของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง พบว่า น้ำนมถั่วเหลืองเริ่มเกิดการรวมตัวเมื่อเติมสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 0.30 มิลลิโมลาร์ หรือมีความเป็นกรดด่างประมาณ 4 แต่เมื่อเติมสารละลายเบสน้ำนมถั่วเหลืองจะไม่เกิดการรวมตัว ส่วน Cai และ Baik (2001) ศึกษาผลของความเป็นกรดด่างต่อคุณภาพของเต้าหู้ถั่วชิกพี โดยศึกษาที่ระดับความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5.0, 5.6, 5.8, 6.0 และ

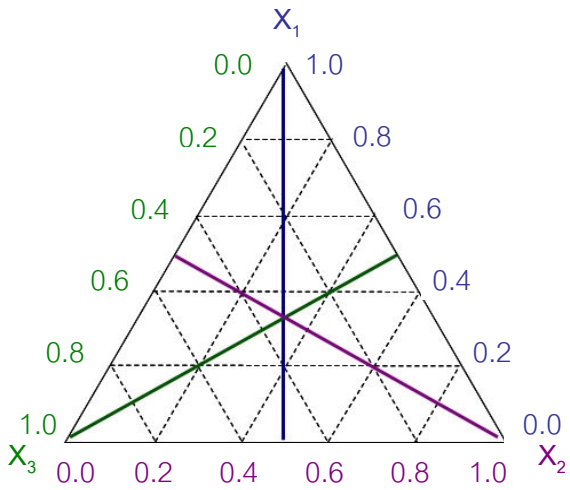
6.2 พบว่า ที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 6.2 จะต้องใช้เวลาในการกดทับนานถึง 4 ชั่วโมง จึงจะเกิดลักษณะของเคิร์ด ซึ่งก็ได้ปริมาณผลผลิตเพียงร้อยละ 83.7 เท่านั้น ส่วนที่ความเป็นกรดด่างระดับอื่นๆ ใช้เวลาในการกดทับเพียง 15 นาที ก็สามารถเกิดลักษณะของเคิร์ดได้ และพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรดด่างลดลงจาก 6.0 เป็น 5.0 จะได้เต้าหู้ถั่วซิกพีที่มีปริมาณผลผลิต ปริมาณความชื้น ความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกันลดลง แต่ความแข็งมากขึ้น และมีสีเข้มขึ้น

2.6 **สถิติที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์**

2.6.1 **แผนการทดลองแบบผสม** (mixture design)

แผนการทดลองแบบผสมเป็นเทคนิคที่เหมาะสำหรับการพัฒนาสูตร เมื่อสูตรนั้นมีส่วนประกอบมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design) ทั้งนี้แผนการทดลองแบบผสมอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อส่วนผสมใดเปลี่ยน ส่วนประกอบที่เหลือในสูตรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยที่ผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 1.0 หรือร้อยละ 100

ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบในแผนการทดลองแบบผสมที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด สามารถแสดงโดยใช้ระบบเส้นตรง 3 เส้น (trilinear coordinate system) ดังภาพที่ 2.3 โดยที่จุดยอดของแต่ละแกนจะมีค่าเท่ากับ 1.0 หรือร้อยละ 100 ส่วนปลายที่ตั้งฉากกับฐานจะมีค่าเท่ากับ 0 และมีข้อจำกัด คือ $\sum X_i = 1.0$ เมื่อ i = 1, 2, 3 โดยที่ X_i คือ ส่วนประกอบที่ i และ $0 \leq X_i \leq 1$ (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบในแผนการทดลองแบบผสมที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด
ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549

แผนการทดลองแบบผสม สามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ

2.6.1.1 แผนอย่างง่าย

วิธีนี้ทำได้โดยพิจารณาข้อจำกัดในส่วนประกอบว่ามีข้อกำหนดสูงต่ำได้เท่าไร แล้วนำมาสร้างพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับข้อกำหนดของส่วนประกอบทุกตัว จากนั้นกำหนดสิ่งทดลอง โดยนิยมกำหนดสูตรที่ใช้ส่วนประกอบที่น้อยและมากสุด ซึ่งมักอยู่บริเวณมุมของพื้นที่ที่เป็นไปได้ และเลือกสูตรที่มีส่วนประกอบทุกตัวในปริมาณเท่ากัน ซึ่งมักอยู่ตรงกลางของพื้นที่ที่เป็นไปได้

2.6.1.2 แผนการทดลองมาตรฐาน

วิธีนี้นิยมกำหนดสิ่งทดลองให้เป็นไปตามรูปร่างที่สมมาตรของรูปทรงเรขาคณิต เช่น แผนการทดลองแบบซิมเพลค (simplex design) ซึ่งจะกำหนดสิ่งทดลองตรงบริเวณจุดยอดของรูปสามเหลี่ยมและจุดมัธยฐาน

ส่วนการคำนวณและวิเคราะห์ผลแผนการทดลองแบบผสมนี้ สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิเคราะห์ความแปรปรวนของสิ่งทดลองและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย หรือใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาจุดที่เหมาะสม โดยมีข้อควรระวัง คือ แบบจำลองที่ใช้จะเป็นแบบพิเศษ เช่น sheffé model เนื่องจากตัวแปรทั้งหมดไม่เป็นอิสระต่อกัน (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.6.2 **วิธีการพื้นผิวตอบสนอง** (response surface methodolgy: RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนองเป็นการแสดงหรือตัวแทนทางเรขาคณิตที่ได้รับเมื่อผลตอบสนอง (response) ของตัวแปรถูกสร้างเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรเหล่านั้น โดยเทคนิคทางสถิติใช้แผนภาพคอนทัวร์ (contour plot) ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ ผลที่ได้คือ สามารถที่จะหาสูตรหรือสภาวะที่เหมาะสม (optimization) จากความสัมพันธ์เหล่านั้นได้ เมื่อพิจารณาปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมๆ กัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้คือ การวางแผนการทดลอง การวิเคราะห์สมการถดถอย และการใช้โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแผนภาพคอนทัวร์ ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีนี้ สามารถแสดงได้ดังสมการ $Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_3)+E$ โดยที่ Y คือ ค่าตอบสนอง ซึ่งเป็นตัวแปรตาม และ $X_1, X_2, \ldots, X_3$ คือ ตัวแปรที่สนใจหรือตัวแปรต้น และ E คือ error term ของความสัมพันธ์หรือฟังก์ชั่น ซึ่งฟังก์ชั่นของตัวแปรเหล่านี้มักใช้สมการลำดับที่หนึ่ง (first order model) หรือสมการลำดับที่สอง (second order model) หรือสมการพอลิโนเมียล (polynomial model) เป็นตัวอธิบาย ส่วนวิธีการทางสถิติที่ใช้คือ วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด (the least square method) เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยฟังก์ชั่นที่ใช้เรียกว่า fitted response function : $\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + \ldots + b_nX_n$ (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

แผนภาพคอนทัวร์เป็นอนุกรม (series) ของเส้นหรือกราฟซึ่งมีค่าที่แน่นอนและคงที่สอดคล้องกับระดับของปัจจัยที่เปลี่ยนไป แผนภาพคอนทัวร์มีหลายแบบสอดคล้องกับสมการถดถอยที่ตรวจสอบได้ โดยแผนภาพคอนทัวร์ที่สร้างเป็นแผนภาพ 3 มิติ เรียกว่า surface plot

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง มีขั้นตอนการทำได้ดังนี้

2.6.2.1 เลือกแผนการทดลองที่ให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้างแผนภาพคอนทัวร์

2.6.2.2 สร้างแบบจำลองหรือสมการเชิงเส้นที่ดีที่สุด

2.6.2.3 สร้างแผนภาพคอนทัวร์หรือ surface plot จากสมการที่หามาได้

2.6.2.4 ตรวจสอบหาค่าจุดหรือพื้นที่ที่เหมาะสม

2.6.2.5 พิสูจน์แบบจำลอง (validation) โดยทำการทดลองใหม่จากจุดที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว แล้วเปรียบเทียบค่าจากการทดลองและค่าที่ทำนายได้จากสมการ

2.6.2.6 ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสม (invalid) ให้สร้างแบบจำลองใหม่ โดยทำซ้ำตามข้อ 2.6.2.2 ถึง 2.6.2.5

ส่วนการเลือกแบบจำลองขึ้นอยู่กับการวางแผนตั้งแต่แรก โดยในกรณีที่วางแผนการทดลองล่วงหน้า การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง แต่หากไม่มีการวางแผนล่วงหน้า อาจดำเนินการโดยใช้วิธีการแบบจำลองสมบูรณ์ (full model technique) ซึ่งวิธีการนี้จะระบุแบบจำลองที่ต้องการใช้ เช่น แบบจำลองอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง หลังจากนั้นจึงใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวในแบบจำลอง หรือใช้วิธีการแบบจำลองลดรูป (reduced model technique) ซึ่งวิธีการนี้แสดงแบบจำลองแบบลดรูป โดยเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองมาใช้สร้างแผนภาพ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอย เช่น stepwise technique

สำหรับการวางแผนการทดลอง แผนการทดลองที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ต้องนำมาใช้ ถ้าต้องการแค่แบบจำลองอันดับหนึ่ง การทดลองที่มีปัจจัยแค่ 2 ระดับก็เพียงพอ แผนการทดลองที่นำมาใช้ ได้แก่ แฟคทอเรียล 2 x 2 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomized design: CRD) หรือแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (randomized complete block design: RCBD) หรือแฟคทอเรียลบางส่วนของ 2^k series ซึ่งอิทธิพลหลักไม่อัลเลียส (aliase) ซึ่งกันและกัน เป็นต้น การใช้แฟคทอเรียลที่มีปัจจัย 2 ระดับ ต้องระวังเมื่อใช้ในแบบจำลองอันดับหนึ่ง เพราะจะไม่สนใจเทอมอันตรกิริยา (cross product) และควรแน่ใจก่อนว่าปัจจัยที่นำมาศึกษาไม่มีอันตรกิริยากัน ส่วนในกรณีที่ต้องการใช้สมการลำดับที่ 2 จำเป็นต้องเลือกแผนการทดลองที่มีปัจจัย 3 ระดับขึ้นไป ได้แก่ 2^k ซึ่งจะรวมเทอมอันตรกิริยา หรือ 3^k หรือ แฟคทอเรียลบางส่วนใน CRD หรือ RCBD โดย k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา หรือแผนการทดลองแบบผสม เป็นต้น แต่ถ้าจำนวนสิ่งทดลองมีมากเกินไป อาจใช้แผนการทดลองที่ดัดแปลงจากแฟคทอเรียล เช่น การทดลองแบบหมุน (rotatable design) หรือ central composite design (CCD) หรือ box-behnken design ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นเดียวกัน (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)

2.7 การวิเคราะห์เค้าโครงลักษณะเนื้อสัมผัสทางกายภาพ (texture profile analysis)

วิธีการนี้ เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสจะทำการกดตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยหัวกดจะเคลื่อนที่ลงไปกดตัวอย่างจนได้ระยะทางที่กำหนดไว้ แล้วเคลื่อนที่ขึ้นด้วยอัตราเร็วเดิมจนกระทั่งหัวกดกลับมา ณ ตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นหัวกดจะเคลื่อนที่ลงทำการกดตัวอย่างซ้ำอีก 1 ครั้ง จนถึงตำแหน่งเดิมที่ได้กดไปในครั้งแรก แล้วเคลื่อนที่ขึ้นกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่

อีกครั้ง เป็นการสิ้นสุดการวัดค่า โดยที่การกดลงและขึ้นมาในรอบแรกเปรียบเหมือนการบดเคี้ยวอาหารครั้งแรกสุดที่อาหารเข้าสู่ปาก ส่วนในรอบที่สองเปรียบเหมือนการบดเคี้ยวอาหารครั้งที่สอง

ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต้านที่เกิดขึ้นกับเวลาทั้งหมด ซึ่งค่าแรง เวลา และพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดค่าคุณลักษณะเนื้อสัมผัสต่างๆ โดยสามารถอ่านค่าหรือคำนวณได้จากจุดต่างๆ ในกราฟ TPA (ภาพที่ 2.4) และมีความหมายในเชิงคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส ดังตารางที่ 2.3

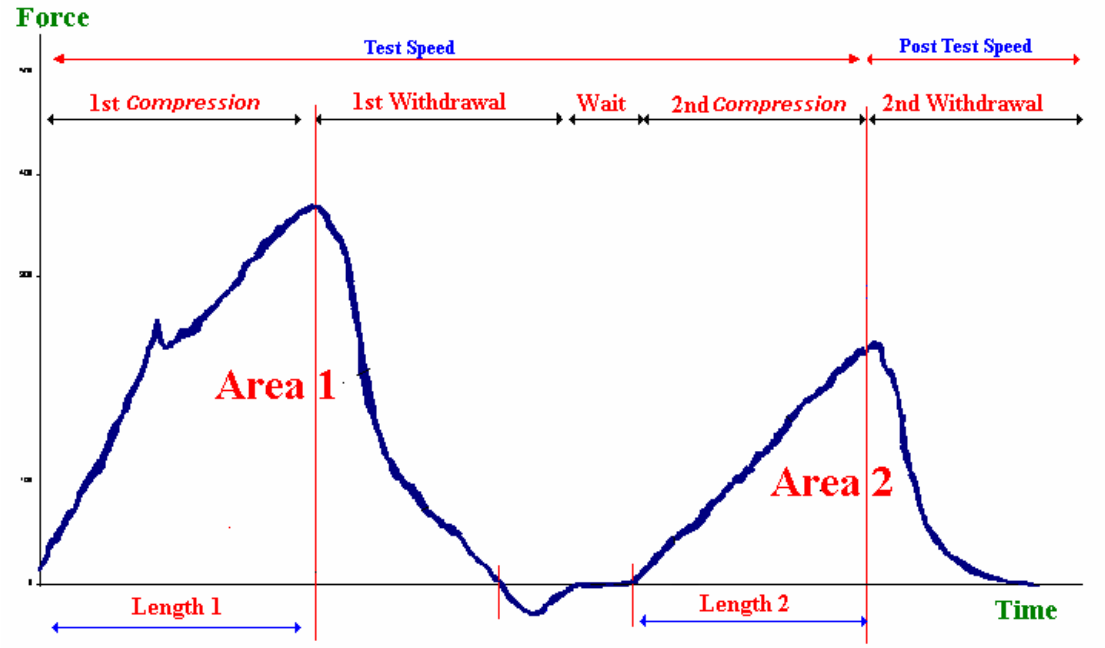
ความแข็ง (hardness) เป็นค่าแรงสูงสุดที่อ่านได้จากกราฟในการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ส่วนการแตกเปราะหรือแตกหัก (fracturability) อ่านได้จากค่าแรง ณ จุดที่ตัวอย่างเกิดการแตกหักภายในโครงสร้าง ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟที่มียอดแหลมแรกเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดค่าแรงสูงสุดในยอดแหลมถัดไป โดยค่านี้จะมีเฉพาะตัวอย่างบางชนิด เช่น ตัวอย่างอาหารที่มีความกรอบแข็ง

ความสามารถในการเกาะกัน หรือการรวมตัวกันภายในของอาหาร (cohesiveness) เป็นค่าที่ได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่ 2 หารด้วยพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่ 1 เนื่องจากเป็นอัตราส่วน ค่าที่คำนวณได้จึงไม่มีหน่วย โดยค่านี้แสดงถึงการรวมตัวเกาะกันเหนียวแน่นของตัวอย่างหลังถูกกดซ้ำ 2 ครั้ง ทั้งนี้หากมีค่าใกล้ 1 แสดงว่า ตัวอย่างรวมตัวเกาะกันภายในดี การบดเคี้ยวตัวอย่างต้องใช้พลังงานมากในการทำลายตัวอย่างให้แยกออกจากกัน

ความยืดหยุ่น หรือการกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิม (springiness) แสดงถึงความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมของตัวอย่าง เมื่อมีแรงมากระทำแล้วถอนแรงออกไป โดยสามารถหาได้ 2 วิธี คือ วิธีแรก ได้จากค่าระยะทางตามแนวแกนเวลาของกราฟขณะกดตัวอย่างครั้งที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ส่วนวิธีที่สอง คือ นำระยะทางตามแนวแกนเวลาของกราฟในขณะกดครั้งที่ 2 หารด้วยระยะทางตามแนวแกนเวลาในขณะกดครั้งที่ 1 วิธีนี้จะไม่มีหน่วย

การเกาะติดผิว (adhesiveness) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟหลังจากถอนแรงกดออกจากตัวอย่างไปแล้ว โดยค่านี้แสดงถึงความสามารถในการเกาะติดผิวที่ตัวอย่างอาหารไปสัมผัส ส่วนพลังงานในการเคี้ยว (chewiness) แสดงถึงการต้านทานการบดเคี้ยวเพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลง คำนวณได้จากผลคูณของความแข็ง ความสามารถในการเกาะกัน และความยืดหยุ่น โดยค่านี้จะมีเฉพาะตัวอย่างที่เป็นของแข็งเท่านั้น

ความหยุ่นตัว หรือความเป็นกาวยางหรือแป้งเปียก (gumminess) แสดงถึงความคงทนต่อการเคี้ยวตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็ง กล่าวคือ มีลักษณะเหนียวคล้ายกาวยางหรือแป้งเปียก โดยค่านี้คำนวณได้จากผลคูณของความแข็งและความสามารถในการเกาะกัน (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549)



ภาพที่ 2.4 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์เค้าโครงลักษณะเนื้อสัมผัสทางกายภาพ
ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร

ที่มา : Texture Technologies, 2008

ตารางที่ 2.3 ความหมายของคุณลักษณะเนื้อสัมผัสต่างๆ ในเชิงคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส

คุณลักษณะ	เชิงคุณภาพทางกายภาพ	เชิงคุณภาพทางประสาทสัมผัส
hardness (ความแข็ง)	แรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป	แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างฟันกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่าง
fracturability (การแตกหัก)	แรงที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก โดยเป็นตัวอย่างที่มีความแข็งสูงและความสามารถในการเกาะกันต่ำ	แรงกดทันทีทันใดในแนวดิ่งที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกหักเป็นชิ้นๆ และกระจายออกในแนวราบ
cohesiveness (ความสามารถในการเกาะกัน)	ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก	ความแข็งแกร่งของพันธะภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่างแล้วทำให้ตัวอย่างทนต่อแรงที่มากระทำก่อนที่ตัวอย่างจะแยกออกจากกัน
springiness (ความยืดหยุ่น)	อัตราการคืนรูปของวัสดุหลังจากการถูกกด	ระดับความสามารถในการคืนตัวกลับมาเหมือนเดิม เมื่อมีการถอนแรงกดออกไปจากตัวอย่าง
adhesiveness (การเกาะติดผิววัสดุ)	งานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุอื่นที่ตัวอย่างสัมผัสอยู่	แรงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวอย่างที่ติดอยู่ในปาก
chewiness (การคงทนต่อการเคี้ยว)	แรงที่ใช้ในการเคี้ยวหรือบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป โดยเป็นตัวอย่างที่มีลักษณะผสมของความแข็ง ความยืดหยุ่นและความสามารถในการเกาะกัน	ในระหว่างกระบวนการเคี้ยว ระยะเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวบดตัวอย่างที่เป็นของแข็งในอัตราการเคี้ยวที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้
gumminess (ความหยุ่นตัว)	แรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งจนกระทั่งเสียรูป โดยเป็นตัวอย่างที่มีความแข็งต่ำและมีความสามารถในการเกาะกันสูง	พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งในอัตราการเคี้ยวที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้

ที่มา : ธัญญาภรณ์, 2549