

บทที่ 2 วาสารปรีทัศน์

2.1 แป้งข้าวเหนียว

ข้าวเหนียวมีคุณค่าและเป็นประโยชน์ในด้านสุขภาพต่อผู้บริโภคมากกว่าธัญพืชหลายชนิด เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี และชีวเคมีของข้าวเหนียวไม่มีสารที่ทำให้เกิดการแพ้ เพราะไม่มีกลูเตน ซึ่งพบในข้าวสาลี ข้าวไรย์ ข้าวบาร์เลย์ และข้าวทริทิกาลี จึงไม่ทำให้เกิดโรคเซลิแอค (Celiac disease) โปรตีนบางชนิดในกลูเตน รวมทั้งแอลฟา-ไกลอะดีน (α -gliadin) สามารถทำลายลำไส้เล็กของผู้ที่เป็นโรคนี้ที่ไม่มีภูมิคุ้มกันทานเหมือนคนปกติ (Kasarda, 2001) ผู้ที่มีอาการแพ้อาหารเหล่านี้ อาจรู้สึกปวดท้อง มีกรดหรือก๊าซในกระเพาะ และปวดเมื่อยร่างกาย การนำข้าวเหนียวและผลพลอยได้จากข้าวเหนียวมาใช้เป็นส่วนประกอบอาหารสำหรับบุคคลที่ป่วยเป็นโรคเซลิแอค ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ

แป้งข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้าวหักในขั้นตอนการแปรรูปขั้นต้น ยังไม่สามารถนำมาบริโภคได้โดยตรงจะต้องนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร กึ่งอาหาร และไม่ใช่อาหารต่อไป โดยการนำข้าวหักซึ่งนิยมใช้ข้าวหักใหญ่ชนิดเอวันเล็คพิเศษ เป็นข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไปประมาณร้อยละ 74 หรือข้าวหักเอวันเล็ค เป็นข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 6.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 นำมาทำความสะอาดด้วยชุดเครื่องทำความสะอาด เช่นเดียวกับการทำความสะอาดข้าวเปลือก และข้าวสารร่วมกัน ได้แก่ การผ่านเครื่องแยกแม่เหล็ก เครื่องแยกหิน และเครื่องขัดขาว เพื่อขัดผิวข้าวหักให้สะอาด ต่อจากนี้ก็จะขึ้นขั้นตอนการ โม่ให้เป็นแป้ง ซึ่งทำได้ 3 วิธี คือ

1) การ โม่เปียกหรือการ โม่ น้ำ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

เป็นวิธีการที่ใช้ในการผลิตแป้งเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหักซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ยังมีสิ่งเจือปนมาก ต้องทำความสะอาดในระบบแห้งด้วยเครื่องแยกชนิดต่างๆ แล้วยังต้องล้างด้วยน้ำให้สะอาดในการ โม่เปียก จะต้องแช่ข้าวหักจนนิ่ม แล้วจึงนำไปโม่พร้อมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมด้วยเครื่อง โม่แบบหินจานซึ่งใช้ไฟฟ้าจะทำให้ได้แป้งที่ละเอียดสม่ำเสมอ ต่อจากนั้นจึงผ่านน้ำแป้งเข้าเครื่องแยกน้ำออกจากแป้ง โรงงานขนาดใหญ่นิยมใช้เครื่องกรองด้วยแรงอัดสูง (filter press) จะได้อ่อนแป้งที่แห้งมีความชื้นประมาณร้อยละ 40 ต้องทำการตีปั่นก้อนแป้งแล้วจึงผ่านเข้าเครื่องอบแป้งให้แห้ง อาจใช้วิธีเป่าด้วยลมร้อน จนแป้งเป็นผงแห้ง นำมาผ่านเข้าเครื่องบดและร่อนเพื่อให้ได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะประมาณ 180 ไมโครเมตร มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13

2) การไม่แบบผสม

เป็นวิธีที่มีขั้นตอนการ ไม่คล้ายกับวิธีการ ไม่เปียกในช่วงล้างข้าวหัก และแช่ข้าวจนนุ่ม ต่อจากนั้นนำข้าวหักขึ้นจากน้ำแช่ให้สะเด็ดน้ำ แล้วผ่านไปยังเครื่องอบให้ข้าวมีความชื้นประมาณ ร้อยละ 15-17 จึงนำข้าวหักเข้าบดหรือไม่แห้ง ตามวิธีการ ไม่แห้งจนได้แป้งแห้ง ซึ่งจะถูกป้อนผ่าน เข้าเครื่องร่อนแป้งให้มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 180 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่า กรรมวิธีการ ไม่จะ ผสมระหว่าง ไม่เปียกกับ ไม่แห้งเข้าด้วยกัน จึงเรียกว่า วิธีการ ไม่แบบผสม (งามชื่น คงเสรี, 2539)

3) การไม่แห้ง

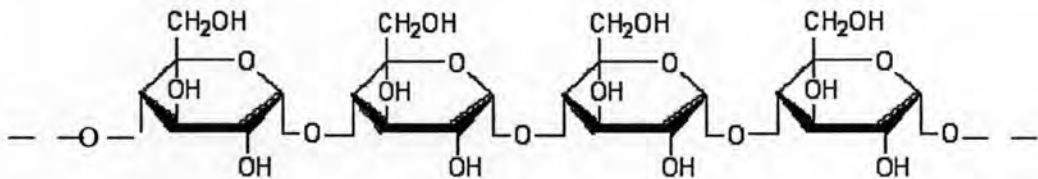
เป็นวิธีการนำข้าวหักที่ผ่านระบบการทำความสะอาดแบบแห้งแล้วนำเข้าสู่เครื่อง ไม่หรือ เครื่องบดแห้งเป็นแป้งผง ร่อนผ่านเครื่องร่อนให้มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 180 ไมโครเมตร

องค์ประกอบของแป้งข้าว โดยทั่วไปจะมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 80 มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 7-10 และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุ วิตามิน เป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบภายในแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.1.1.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α -1,4) ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : <http://www.chemsoc.org>

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลส สูงประมาณร้อยละ 28 แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) มีอะมิโลสน้อยมาก (ประมาณร้อยละ 1) น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมี น้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าแป้ง ข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งสาลีมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

(retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก คุณสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลส	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย (DP)	จำนวนสายเฉลี่ย	ความยาวสายเฉลี่ย	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-
อินดิกา (indica)	-	1,000	4.0	250	49
จาโปนิกา (Japonica)	-	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	4,900	9.5	240	

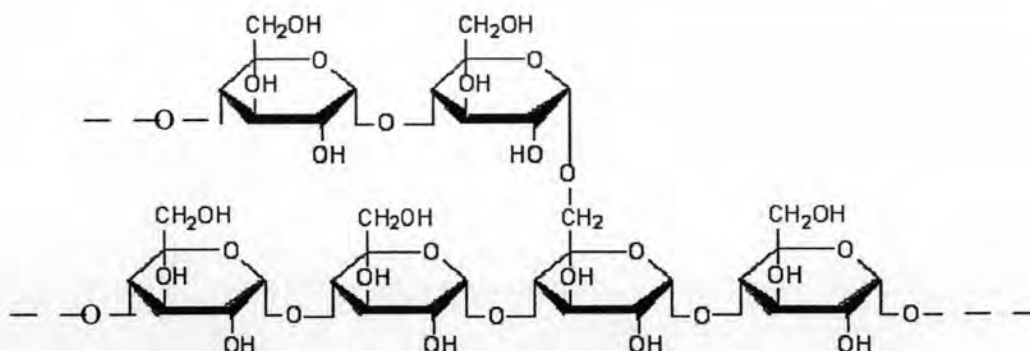
หมายเหตุ : DP = degree of polymerization

- ไม่ได้วิเคราะห์

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.1.1.2 อะมิโลเพกติน

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1,6 ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน

ที่มา : <http://www.chemsoc.org>

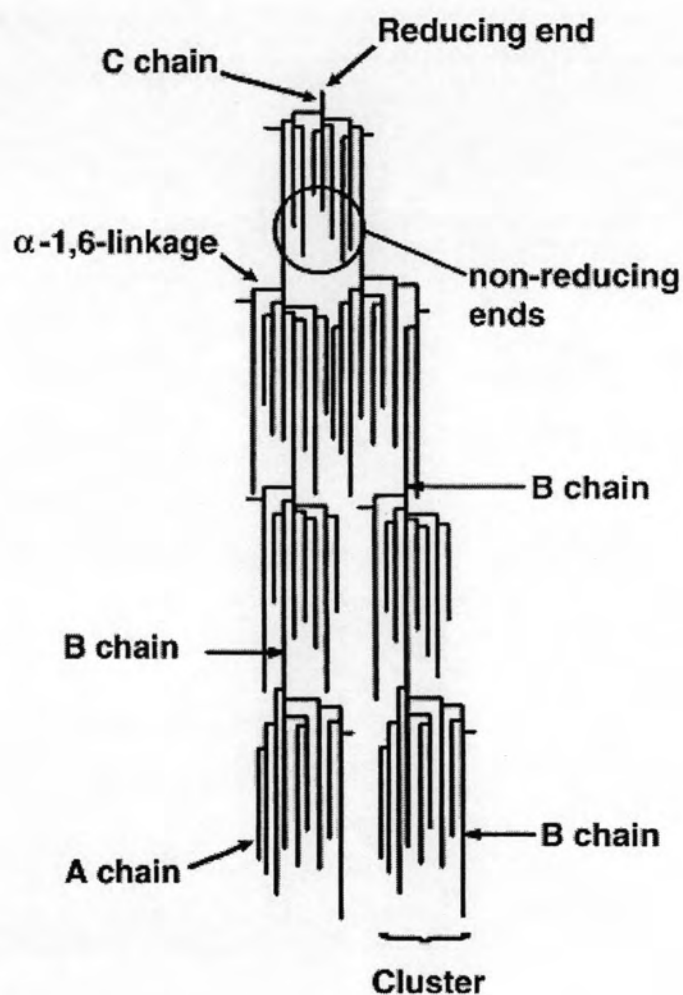
หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิก α -1,6 มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือประมาณ 10^7 ถึง 10^9 คาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิดคือ

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9 : 1
3. สาย C (C-chain) เป็นสายกิ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง (reducing) 1 หมู่ในอะมิโลเพกติน แต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกตินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกติน แสดงดังรูปที่ 2.3 อะมิโลเพกตินของแป้งข้าวเจ้า และข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80-90 ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10-20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกันหรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มใกล้เคียงกัน (Oates, 1997) และสมบัติทางโครงสร้างอะมิโลเพกติน แสดง

ดังตารางที่ 2.2 อะมิโลเพกตินถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกติน
ที่มา : Manners (1989)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกติน

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโล เพกติน	ขนาด โมเลกุล (DP) เฉลี่ย	ความ ยาวสาย เฉลี่ย	จำนวน สาย เฉลี่ย	ความยาว สายภาย นอกเฉลี่ย	ความยาว สายภาย ในเฉลี่ย
แป้งสาลี	72	4,800	19	150	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83	-	-	-	-	-
อินดิกา (Indica)	-	4,700	21	220	14	6
จาโปนิกา (Japonica)	-	12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว (waxy rice)	-	18,500	18	1,100	12	5
แป้งมันฝรั่ง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันสำปะหลัง	83	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : DP = degree of polymerization

- ไม่ได้วิเคราะห์

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.1.2 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

1. ไขมัน โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและสมบัติของแป้ง โดยลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการดูดน้ำของแป้ง เมื่อเกิดฟิล์มและแป้งเปียกหรือเพสต์ (paste) ไขมันจะรวมตัวกับอะมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฉื่อย (inert complex) ทำให้ฟิล์มและแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ไขมันที่รวมตัวเชิงซ้อนกับอะมิโลสจะไม่ก่อให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี มีกลิ่นแรงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีองค์ประกอบของไขมันสูง

2. โปรตีน ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีการดูดซับน้ำ การพองตัว และการเกิดเจลาตินในเข้ชั้นเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป โดยส่วนใหญ่เกิดในแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณ โปรตีนสูง

3. เถ้า แป้ง โดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โฟสเฟตเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ปริมาณเถ้าในแป้งมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในแป้งสำหรับ เถ้าในแป้งจากธัญพืชจะสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอริฟิด (Swinkels, 1985)

2.2 โปรตีนข้าว

โปรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปมีปริมาณน้อยกว่าในธัญชาติอื่น การวิเคราะห์และคำนวณปริมาณ โปรตีนในข้าวใช้แฟกเตอร์ 5.95 ควบใน โครเจน โปรตีนในข้าวนั้นจะพบตามส่วนต่างๆของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกจะมีโปรตีนมากกว่าใจกลางเมล็ด โปรตีนข้าวได้รับการพิจารณาว่าเป็นโปรตีนที่มีคุณค่าเนื่องจาก ไม่ก่อให้เกิดการแพ้ คอเลสเทอรอลต่ำ มีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบอยู่หลายชนิด (Chrastil, 1990) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายอยู่อย่างครบถ้วน เช่น ทริปโตเฟน ทรีโอนีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน เมทไธโอนีน ฟินิลอะลานีน ไทโรซีน และวาเลิน เป็นต้น

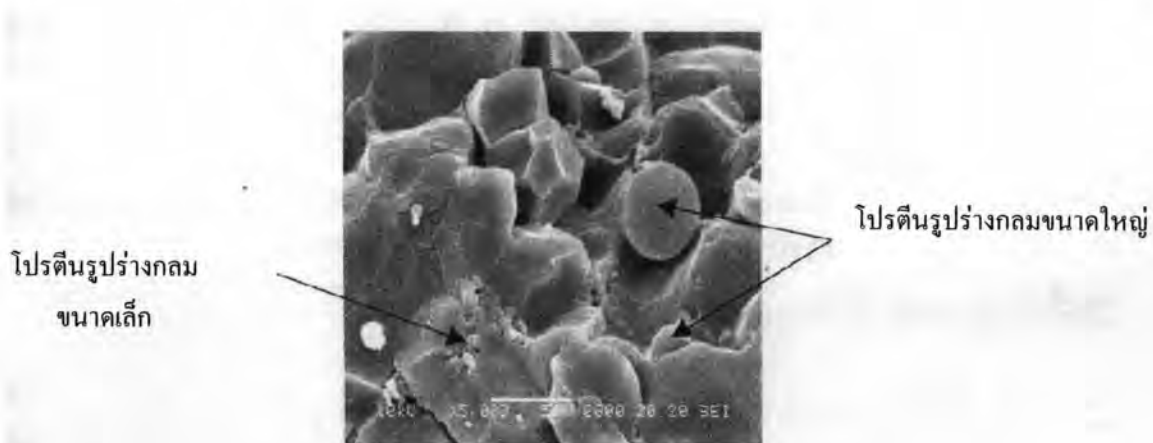
Cagampang และคณะ (1996) สกัดโปรตีนจากข้าว 3 สายพันธุ์ (ซึ่งมีโปรตีนประมาณ 6.8-8.5 กรัมต่อ 100 กรัมข้าว) พบว่าประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายในน้ำ หรือ แอลบูมิน (albumin) ประมาณ ร้อยละ 3.8-8.8 ของโปรตีนทั้งหมด โปรตีนที่ละลายในเกลือ หรือ โกลบูลิน (globulin) ประมาณร้อยละ 9.6-10 โปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ หรือ โพรลามิน (prolamin) ประมาณร้อยละ 66.1-78.0 ซึ่งเป็นโปรตีนหลักที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนสะสม (storage protein) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของกลูเทลินซึ่งเป็นโปรตีนบอดีมีกรดอะมิโนหลายชนิดในปริมาณที่สมดุล ทำให้โปรตีนข้าวมีคุณภาพดีกว่าในธัญชาติอื่นที่มีโพรลามินในโปรตีนสะสมเป็นหลัก ทำให้มีปริมาณไลซีน และทริปโตเฟนน้อยกว่าข้าว เพราะโครงสร้างใน โมเลกุลของโพรลามินมีกรดอะมิโนทั้งสองชนิดน้อยกว่ากลูเทลิน

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่มีใน โปรตีนข้าว

Amino acid	g/100 g rice flour
Tryptophan	0.072
Threonine	0.210
Isoleucine	0.244
Leucine	0.488
Lysine	0.207
Methionine	0.144
Cystine	0.107
Phenylalanine	0.317
Tyrosine	0.314
Valine	0.348
Histidine	0.149
Arginine	0.516
Alanine	0.332
Aspartic acid	0.549
Glutamic acid	1.097
Glycine	0.267
Proline	0.278
Serine	0.310

ที่มา : USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 18 (2005)

โปรตีนมีอยู่ในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวทั้งในส่วนของเอนโดสเปิร์ม และรำข้าว โดยส่วนใหญ่อยู่ในเซลล์เอนโดสเปิร์มอยู่ในรูปของโปรตีนบอดี (protein body) ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช (Cagampang และคณะ, 1996; Lasztity, 1996) โมเลกุลของโปรตีนที่รวมตัวกันเป็นโปรตีนบอดี มี 3 รูปแบบ คือ ผลึก (crystalline) แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ (รูปที่ 2.4) ซึ่งโปรตีนที่กระจายทั่วไปในเนื้อเมล็ดจะเป็น โปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็ก ส่วนโปรตีนรูปร่างกลมขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยกว่า และมีมากในส่วนใจกลางเมล็ดเท่านั้น โดยในองค์ประกอบของโปรตีนจะเป็นโพรลามีนร่วมกับกลูเทลิน สำหรับร่างแหโปรตีน (protein matrix) จะพบน้อยมากหรือไม่พบเลยในเนื้อเมล็ดของข้าวซึ่งต่างจากธัญชาติอื่น ถ้าพบก็จะมีลักษณะเชื่อมโยงเป็นเส้นใยโปรตีน (protein fibrils) ระหว่างโปรตีนบอดี



รูปที่ 2.4 โปรตีนรูปร่างกลมเล็ก และขนาดใหญ่แทรกระหว่างเม็ดสตาร์ชจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope) กำลังขยาย 5,000 เท่า
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

2.3 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในข้าว

เมื่อสลายโปรตีนข้าวด้วยกรดจะได้ กรดอะมิโน (amino acid) ซึ่งมีโครงสร้างเป็น $\text{NH}_2\text{-CHR-COOH}$ กรดอะมิโนทุกตัวจะมีหมู่อัลฟาอะมิโนที่มีค่า pKa ประมาณ 9-10 และหมู่แอลฟาคาร์บอกซิลที่มีค่า pKa ประมาณ 2 ดังนั้นกรดอะมิโนจะมีทั้งประจุบวกและประจุลบที่พีเอชเป็นกลาง นอกจากนี้กรดอะมิโนจะมีจุดไอโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ประจุสุทธิของกรดอะมิโนมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากมีปริมาณประจุบวกเท่ากับประจุลบพอดี

กรดอะมิโนที่พบอยู่มากในธรรมชาติมีประมาณ 20 ชนิด กรดอะมิโนเหล่านี้แตกต่างกันที่แขนงข้าง โดยแขนงข้างของกรดอะมิโนแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายอย่าง ซึ่งจากคุณสมบัติทางเคมีของแขนงข้างทำให้กรดอะมิโนบางตัวมีขั้วจึงมักจะพบที่บริเวณผิวนอกของโปรตีน เพราะชอบน้ำ (hydrophilic) ส่วนกรดอะมิโนอีกกลุ่มหนึ่งมีลักษณะไม่มีขั้ว และมักซ่อนอยู่ภายในโมเลกุลของโปรตีน เพราะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) กรดอะมิโนที่เหลือไม่มีแนวโน้มที่มีขั้วมากหรือไม่มีขั้วมากจึงเรียกว่าเป็นกลาง (ambivalent) จึงมักพบอยู่ทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลโปรตีน (มนตรี จุฬาวัดนทล และคณะ, 2530)

จากรายงานการวิจัยที่วิเคราะห์กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่มีอยู่ในข้าว รายงานว่า กรดอะมิโนที่พบในส่วนต่างๆ ของข้าวจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

Padhye และ Salunkhe (1979) วิเคราะห์กรดอะมิโนที่มีอยู่ในข้าวเท็กซัสซึ่งมีเมล็ดข้าว ด้วยการแช่ข้าว 1-2 มิลลิกรัมในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5.7 โมลาร์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสหลังจากนั้น ทำให้เย็น และทำแห้งส่วนที่ได้จากการย่อย จากนั้นนำไปละลายในซิเตรทบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในการวิเคราะห์กรดอะมิโนจะใช้เครื่อง Beckman model 120-B amino acid analyzer ซึ่งใช้คอลัมน์แบบ Durrum single column มีระบบ

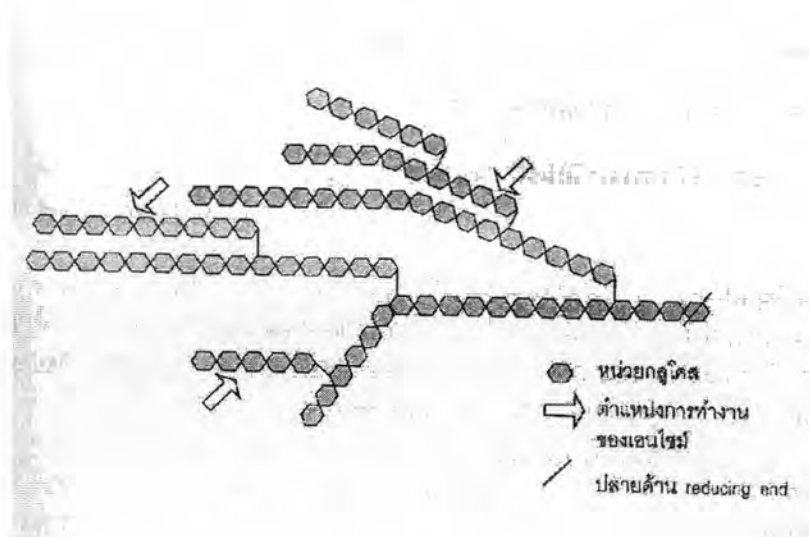
การชะโดยใช้บัฟเฟอร์ 3 ชนิด องค์ประกอบของกรดอะมิโนที่ได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณคุณค่าทางโภชนาการ โดยค่า E/T% จะคำนวณจากกรดอะมิโนจำเป็นทั้งหมดกับกรดอะมิโนทั้งหมดที่มีอยู่ในโปรตีน จากการทดลองพบว่าโปรตีนของข้าวทั้งหมดมีค่า E/T% เท่ากับ 41.0 มีค่า PER เท่ากับ 1.2 , 1.1 และ -2.1 และมีค่า BV เท่ากับ 42.0

Bradbury และคณะ (1980) รายงานการวิเคราะห์กรดอะมิโนที่มีอยู่ในข้าวพันธุ์ IR-32 โดยการวิเคราะห์ปริมาณของกรดอะมิโนนั้น ทำโดยการแช่ข้าว 5 มิลลิกรัมในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 โมลาร์ เป็นเวลานาน 22 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำให้เย็น แล้วจึงระเหยกรดไฮโดรคลอริกที่มีอยู่ในตัวอย่างออกไป ละลายตัวอย่างที่ได้ในบัฟเฟอร์ที่จะใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์กรดอะมิโน (amino acid analyzer) กรองส่วนที่ไม่ละลายออกไปและปรับปริมาตรให้ได้เท่ากับ 5 มิลลิลิตร วิเคราะห์ของเหลวที่ได้ด้วยเครื่อง technicon amino acid analyzer ซึ่งใช้คอลัมน์มาตรฐานแบบแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ปริมาณกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในส่วนต่างๆ ของข้าวมีอยู่ในปริมาณแตกต่างกัน โดยพบไลซีนและทรีโอนีนอยู่มากในส่วนของเอมบริโอ รองลงมา คือ ส่วนของเซลล์ aleurone ที่อยู่ร่วมกับส่วนที่หุ้มเมล็ดและพบกรดอะมิโน 2 ชนิดนี้น้อยที่สุดในส่วนของเอนโดสเปิร์มที่มีสตาร์ช

2.4 เอนไซม์ α -อะมิเลส

เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะ α -1,4 glucosidic linkage ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเท่านั้น ไม่สามารถตัดพันธะ α -1,6 glucosidic linkage ได้ ลักษณะการทำงานเป็นการทำงานแบบกลุ่มตัดภายใน (Nigam และ Singh, 1995; Nielsen และ Borchert, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เอนไซม์มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการ Ca^{2+} เพื่อให้เอนไซม์เสถียรและทำกิจกรรมได้ดี เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 5.5- 9 และที่อุณหภูมิห้องถึง 115 องศาเซลเซียส α -อะมิเลสมีชื่อทางการค้าเป็นที่รู้จักกันว่า Termamyl[®] และมีชื่อสามัญว่า ไดแอสเทส (diastase) สามารถผลิตได้จากพืช สัตว์ เชื้อรา และแบคทีเรีย ในทางอุตสาหกรรมมักใช้เอนไซม์ที่ได้จากเชื้อราและแบคทีเรีย โดยเฉพาะเอนไซม์จากแบคทีเรียซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ เมื่อใช้ α -อะมิเลสในการย่อยสารละลายแป้งจะทำให้ความหนืดและความสามารถในการข้อมติคัสไอโอดีนลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ reducing power เพิ่มขึ้นอีกด้วย

เอนไซม์ α -อะมิเลสที่ใช้ในการผลิตสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่ 1) เอนไซม์ α -อะมิเลสชนิดทนความร้อนสูง เป็นเอนไซม์ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ผลิตได้จากแบคทีเรีย เช่น *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* เป็นต้น และ 2) เอนไซม์ α -อะมิเลสชนิดที่ไม่ทนความร้อนสูง เป็นเอนไซม์ที่สามารถทำงานได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 37 - 66 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ผลิตได้จากเชื้อรา เช่น *Aspergillus oryzae* เป็นต้น



รูปที่ 2.5 การทำงานของเอนไซม์ α -อะมิเลส

ที่มา : Bruinenberge (1996)

2.5 การผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส

การผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส ทำโดยนำน้ำแป้งไปเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 30 นาที การเจลาติไนซ์ทำให้เอนไซม์สามารถย่อยได้มากขึ้น จากนั้นเติมเอนไซม์ α -อะมิเลส ควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อย หยุดการทำงานของเอนไซม์โดยการปรับ pH และให้ความร้อน และนำไปปั่นเหวี่ยง (centrifugation) ที่ $10,000 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที แยกส่วนของเหลว (supernatant) ออก อบแห้งส่วนที่เป็นของแข็งอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ได้เป็นแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง สตาร์ชส่วนที่ถูกย่อยแล้วส่วนใหญ่จะเป็นมอลโตเดกซ์ทริน

Hansen และคณะ (1981) ศึกษาการผลิตแป้งข้าวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสที่ผลิตจากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* (760 units/mg) ย่อยสตาร์ชในน้ำแป้งเจลาติไนซ์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยแปรความเข้มข้นเอนไซม์และหาปริมาณมอลโตสที่ผลิตได้ในเวลาต่างๆ กันด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร พบว่าการนำส่วนที่ได้จากการย่อยมาปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ $6000 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที แยกส่วนที่เป็นของเหลว (supernatant) ออก และนำส่วนที่ตกตะกอนไปทำให้แห้งโดยใช้ freeze-drier จะได้เป็นแป้งข้าวโปรตีนสูงที่มีโปรตีนอยู่ร้อยละ 25 ซึ่งมีโปรตีนสูงกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น 3 เท่า และมีองค์ประกอบอื่นแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้งข้าวด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลส

Nutrient	Substrate		Enzyme products
	Rice flour (%)	High-protein rice flour (%)	Carbohydrate fraction (%)
Protein	8.3	25.0	0.9
Starch	88.7	31.9	16.9
Sugar	0.6	37.0	81.4
Fat	1.4	4.1	0.2
Fiber	0.2	0.9	0.0
Ash	0.8	1.1	0.6
Yield	100.0	31.0	60.0

ที่มา : Hansen และคณะ (1981)

Chen และ Chang (1984) ศึกษาการผลิตซีรัปที่มีปริมาณฟรุคโตสสูง (high-fructose syrup) และฟลาวโปรตีนสูงจากข้าวหัก โดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส ออกแบบการทดลองโดยใช้ orthogonal array table (L27) เพื่อกำหนดภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส (Termamyl 60) ย่อยสตาร์ช ซึ่งภาวะเหมาะสมที่พบ คือใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส เข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 0.12 ความเข้มข้นน้ำแป้งข้าวร้อยละ 20 ควบคุมอุณหภูมิในการย่อยเท่ากับ 96 องศาเซลเซียส ย่อยเป็นเวลา 90 นาที หลังจากการย่อย นำไปปั่นเหวี่ยง ส่วนที่เป็นของเหลวถูกนำไปใช้ผลิตซีรัปที่มีปริมาณฟรุคโตสสูง ส่วนที่ตกตะกอนถูกนำไปทำให้แห้งโดยอาจใช้วิธีการพ่นกระจาย (spray-dry) หรือการใช้ลูกกลิ้ง (drum-dry) ซึ่งส่วนที่ได้จากวิธีการทำให้แห้งทั้งสองวิธีนี้ก็คือ ฟลาวที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงซึ่งมีโปรตีนสูงเป็น 3 เท่าของโปรตีนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของแป้งข้าวโปรตีนสูง

Nutrient	Raw material	High-protein rice flour	
	Rice flour (%)	Spray-dried (%)	Drum-dried (%)
Protein	8.6	27.2	28.8
Starch	89.3	35.7	33.8
Sugar	0.3	24.4	23.8
Fat	1.6	6.1	6.4
Fiber	0.8	1.5	1.0
Ash	0.7	2.8	2.7
Yield	100.0	31.6	29.9

ที่มา : Chen และ Chang (1984)

Chang และคณะ (1986) ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตและการประเมินคุณค่าทางโภชนาการของแป้งข้าวโปรตีนสูง ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต high-protein rice flour จากข้าวเจ้า 2 สายพันธุ์ โดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสที่ผลิตได้จาก *Bacillus spp.* (78 units/mg) ความเข้มข้นเอนไซม์ 0.25 มิลลิกรัม/ มิลลิลิตร น้ำแป้งข้าวเข้มข้นร้อยละ 5 เจลาติโนซ์ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และควบคุมอุณหภูมิในการย่อยที่ 60 องศาเซลเซียส ย่อยเป็นเวลา 90 นาที สตาร์ชที่ถูกย่อยแล้วจะถูกกำจัดออกโดยการปั่นเหวี่ยงที่ 10,000×g ทำแห้งส่วนที่ตกตะกอนโดยวิธี freeze-dry ได้เป็น high-protein rice flour ที่มีโปรตีนร้อยละ 38 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.6 จากผลการทดลองเห็นได้ว่าแป้งข้าวจากข้าวเจ้า 2 สายพันธุ์ที่มีปริมาณ โปรตีนใกล้เคียงกันเมื่อนำมาผลิตเป็นแป้งข้าวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสย่อยสตาร์ชบางส่วนออกไป แป้งข้าวโปรตีนสูงที่ได้มีปริมาณ โปรตีนที่ใกล้เคียงกันด้วย

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของแป้งข้าวและแป้งข้าวโปรตีนสูง

Composition (%)	Dehulled rice flour		High-protein rice flour	
	Tai-Nung No.67	Taichung No.3	Tai-Nung No.67	Taichung No.3
Protein (Nx 5.95)	7.17	7.21	38.54	38.50
Crude fats	1.51	1.42	12.90	13.00
Ash	0.78	0.80	2.92	2.87
Fiber	0.22	0.21	2.50	2.50
Moisture	12.00	12.00	3.18	3.14
Carbohydrate	77.63	78.36	39.96	39.99

ที่มา : Chang และคณะ (1986)

Shaw และ Sheu (1992) ศึกษาการผลิตซีรัปที่มีปริมาณมอลโตสสูง (high-maltose syrup) และแป้งข้าวโปรตีนสูงจากข้าวโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสที่ผลิตได้จาก *Bacillus licheniformis* (590 units/mg) โดยใช้แป้งเข้มข้นร้อยละ 10 เอนไซม์เข้มข้น 56.6 units/g dry solid สำหรับแป้งจากข้าวพันธุ์ Taichung Native 1 และ 28.32 units/g dry solid สำหรับแป้งจากข้าวพันธุ์ Tainung 70 Taichung Glutinous 7 และ Taichung Native 1 หลังการย่อยนำมาปั่นเหวี่ยงที่ 10,000×g เป็นเวลา 30 นาที ส่วนที่ตกตะกอนนำไปทำแห้งเป็นแป้งข้าวโปรตีนสูง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.7 โดยพบว่า ในแป้งข้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณโปรตีนอยู่ประมาณร้อยละ 9-10 หลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลส และแยกสตาร์ชที่ถูกย่อยออกไปแล้ว แป้งข้าวส่วนที่เหลือเป็นแป้งข้าวที่มีโปรตีนสูงร้อยละ 25-53 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ได้หลังจากการแยกสตาร์ชที่ถูกย่อยออกไปแล้วมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าโปรตีนสูงที่ผลิตได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสสูงกว่า และส่วนอะมิโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน (amylose-lipid complex) ได้ ทำให้เอนไซม์ α -อะมิเลสย่อยส่วนของสตาร์ชได้น้อยกว่า สำหรับแป้งข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าแต่มีปริมาณอะมิโลเพกตินมากกว่า ทำให้เอนไซม์ α -อะมิเลสย่อยสตาร์ชส่วนของสายโซ่กิ่งได้มากกว่า

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของแป้งข้าวโปรตีนสูงจากข้าวพันธุ์ต่างๆ

Rice cultivar	High-protein rice flour			
	Yield (g flour/g rice)	Composition (%)		
		Protein	Starch	Sugar
Tainung 70	0.303	30.3	31.3	22.3
Taichung Glutinous 70	0.184	52.9	16.4	17.7
Taichung Sen Glutinous	0.234	51.4	24.2	10.7
Taichung Native 1	0.362	28.5	38.7	13.9

ที่มา : Shaw และ Sheu (1992)

กล้าณรงค์ ศรีรอด (2544) ศึกษาการผลิตกลูโคสซีรัปและแป้งโปรตีนสูงจากปลายข้าวหอมมะลิโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสย่อยสลายโมเลกุลของแป้งในขั้น liquefaction ซึ่งจะทำให้ได้ส่วนที่เป็นของเหลวที่จะนำไปย่อยด้วยเอนไซม์ในขั้นตอน saccharification ต่อไปเป็นกลูโคสซีรัป ส่วนที่เหลือจากการแยกส่วนของเหลวออกไปแล้วเป็นส่วนของแป้งข้าวโปรตีนสูง จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยแป้งได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ ระยะเวลาในการย่อย และความเข้มข้นของน้ำแป้ง ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในกากส่วนที่เหลือจากขั้น liquefaction ซึ่งมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 26.83 พบว่าโปรตีนในกากที่เหลือจากขั้น liquefaction ไม่มีสมบัติเชิงหน้าที่ในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์และการเกิดโฟม ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนเสียสภาพจากความร้อนในขั้นตอนการเจลาติไนซ์

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสในการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

2.6.1 ความเข้มข้นน้ำแป้ง

แป้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากข้าวซึ่งข้าวแต่ละสายพันธุ์มีอัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่แตกต่างกัน เนื่องจากก่อนการย่อยด้วยเอนไซม์จะนำน้ำแป้งไปผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน ในการเกิดเจลาติไนเซชันนั้นต้องมีแป้ง น้ำ และความร้อน โดยต้องมีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 30 จึงจะเกิดเจลาติไนเซชันได้ และถ้าต้องการให้เกิดเจลาติไนเซชันที่สมบูรณ์ต้องมีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 50-60 ความเข้มข้นน้ำแป้งที่ใช้จึงถูกจำกัดด้วยสภาวะการเกิดเจลาติไนเซชัน ดังนั้นความเข้มข้นน้ำแป้งที่ใช้ต้องไม่เกินร้อยละ 30 การใช้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงนั้นนอกจากจะทำให้เกิดความหนืดสูง จนเกิดปัญหาในการผสมและการไหลของน้ำแป้ง

ยังทำให้ประสิทธิภาพของเอนไซม์ต่ำลงเนื่องจากโมเลกุลของแป้งเกิดเป็นโครงสร้าง ทำให้เอนไซม์สัมผัสกับแป้งไม่ทั่วถึง อัตราการย่อยแป้งโดยเอนไซม์จึงต่ำลง (Komolprasert และ Ofoli, 1991)

2.6.2 ความเข้มข้นเอนไซม์ α -อะมิเลส

ความเข้มข้นเอนไซม์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเอนไซม์จะไปย่อยสลายบางส่วนออกไปทำให้โปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวมืดมีความเข้มข้นสูงขึ้น ถ้าใช้ความเข้มข้นเอนไซม์สูงจะสามารถย่อยสลายได้มากและใช้เวลาสั้น แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นเอนไซม์สูงเกินไปทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากเอนไซม์มีราคาค่อนข้างสูง การเลือกใช้ความเข้มข้นเอนไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดมีสถานะเหมาะสมในการทำงานแตกต่างกันไป เช่น เอนไซม์ Termamyl (Termamyl[®] 120L, type LS; Novo Nordisk Co., Bagsvaerd, Denmark) มีแอกทิวิตี 120 Kilo Novo alpha-amylase Units (KNU) ต่อกรัม โดย 1 KNU คือปริมาณเอนไซม์ที่ย่อยแป้ง 5.26 กรัมต่อชั่วโมง ตามวิธีมาตรฐานของบริษัท Novo Nordisk (Denmark) เมื่อแป้งอยู่ในรูปสารละลายซึ่งมีแคลเซียม 0.0043 มิลลิโมลาร์ ค่าความเป็นกรดต่าง 5.6 และอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และเวลาของการย่อยในช่วงระหว่าง 7 ถึง 20 นาที

2.6.3 pH

ความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งต้องเหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยทั่วไป pH ที่เหมาะต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะอยู่ในช่วง 5.5-9 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์ เนื่องจากเอนไซม์ทุกชนิดเป็นโปรตีน โดยแต่ละชนิดมีลำดับของกรดอะมิโนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งผลิต ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของเอนไซม์ก็คือปัจจัยที่มีผลให้โครงสร้างของโปรตีนในระดับทุติยภูมิ ตติยภูมิ และ/หรือ จตุรภูมิ เปลี่ยนไป ความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนไป ทำให้เอนไซม์มีความเสถียรลดลง หรืออาจสูญเสียความเสถียรได้ สำหรับ pH ที่เหมาะต่อการทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งผลิต ตัวอย่าง pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์ α -อะมิเลสที่ผลิตจากแหล่งต่างๆ เช่น จาก *Aspergillus oryzae* มี pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.8-5.8 จาก *Bacillus subtilis* มี pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.85-6.0 และจาก *Bacillus licheniformis* มี pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.5-7.0 เป็นต้น

2.6.4 อุณหภูมิ

เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน เอนไซม์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นเอนไซม์แต่ละชนิดจึงมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานแตกต่างกัน ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติและสูญเสียกิจกรรมไป เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตแป้งข้าวมืดโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส ในงานวิจัยนี้ น้ำแป้งข้าวมืดต้องผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส) ก่อนที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลส ดังนั้นเอนไซม์ α -อะมิเลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ควรเป็นเอนไซม์ที่ทนความร้อนสูง (อย่างน้อยประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส)

2.6.5 ระยะเวลาในการย่อย

ระยะเวลาในการย่อยเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสในการผลิตแป้งข้าวโพดอินสูง สำหรับระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตแป้งข้าวโพดอินสูงจะสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเข้มข้นน้ำแป้ง ชนิดและความเข้มข้นของเอนไซม์ pH อุณหภูมิ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นต้น

2.7 การประยุกต์ใช้แป้งโปรตีนสูงโดยทั่วไป

อาหารหลักของทุกชนชาติมักมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น แป้งมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณโปรตีนเป็นองค์ประกอบรองลงมา ซึ่งปริมาณโปรตีนในแป้งแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของแป้ง แป้งที่ใช้ผลิตภัณฑอาหารส่วนใหญ่จะมีปริมาณโปรตีนไม่สูงมากนัก จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งให้มีปริมาณโปรตีนสูงขึ้น และนำแป้งโปรตีนสูง เช่น แป้งจากถั่วเหลือง แป้งข้าวโพดอินสูง เป็นต้น มาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ

Hansen และคณะ (1981) รายงานว่าแป้งข้าวโพดอินสูงที่ผลิตโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส มีลักษณะเป็นผงสีครีม ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย จึงสามารถนำไปใช้ในการทำนมผง พุดดิ้ง และสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารเด็กอ่อนเพื่อให้เด็กได้รับโปรตีนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมลักษณะที่ปรากฏและคุณสมบัติของอาหารเมื่อนำไปใช้ในการผลิตได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย (Deobald, 1972) กล่าวรงค์ ศรีรอด และคณะ (2544) รายงานว่าแป้งข้าวโพดอินสูงที่ได้จากขั้นตอน liquefaction ในการผลิตซีเรียไม่มีสมบัติในการเกิดอิมัลชัน และสมบัติในการเกิดโฟม ดังนั้นในการนำแป้งข้าวโพดอินสูงไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจึงเป็นเพียงแหล่งของโปรตีน โปรตีนที่ดีเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ แต่จะไม่ส่งเสริมให้ลักษณะของอาหารเป็นไปตามต้องการ

แป้งโปรตีนสูงนอกจากแป้งข้าวโพดอินสูงแล้วยังรวมถึงแป้งที่ได้จากถั่วต่างๆ เช่น แป้งถั่วเหลือง แป้งถั่วลิสง แป้งถั่วเขียวผ่าซีก เป็นต้น ซึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณโปรตีน ได้มีการนำแป้งโปรตีนสูงที่ได้จากถั่วต่างๆ มาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

Shfali และ Sudesh (2001) รายงานว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วเหลืองทั้งชนิดไขมันเต็ม (full fat) และชนิดที่สกัดไขมันออก (defatted) ในสูตรการผลิตขนมปังช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนแต่การทดแทนด้วยแป้งถั่วเหลืองมีข้อจำกัดเนื่องจากแป้งถั่วเหลืองซึ่งอาจจะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยสามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วเหลืองทั้งชนิดไขมันเต็มและชนิดที่สกัดไขมันออก ได้ไม่เกินร้อยละ 15 โดยที่ผลิตภัณฑ์ยังเป็นที่ยอมรับทั้งในด้านกลิ่นและคุณค่าทางโภชนาการสูง การเติมแป้งถั่วเหลืองในโดแป้งสาลีปริมาณสูงส่งผลไม่ดีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการทำขนมปัง (bread-making property) (D'Appolonia, 1998;

Lorimer และคณะ, 1991; Pomeranze และคณะ, 1969) Kullaya และ Yao-Wen (2005) รายงานว่าการผลิตพาสต้าโดยใช้แป้งจากมันเทศผสมกับแป้งถั่วเหลืองเพื่อเพิ่มปริมาณ โปรตีน เมื่อปริมาณโปรตีนจากแป้งถั่วเหลืองสูงขึ้นทำให้ firmness springiness และ stickiness ของพาสต้าลดลง เปรมวดี ฉายาปัญญา (2543) รายงานว่าการนำแป้งถั่วลิสงและแป้งถั่วเขียวซีกมาทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตบะหมี่ พบว่า เส้นบะหมี่หลังต้มสุกมีลักษณะขาดและหักง่าย และความเหนียวของเส้นบะหมี่หลังต้มสุกมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนด้วยแป้งถั่วลิสง การทดแทนด้วยแป้งถั่วซีกนั้นจะให้ค่าความต้านทานการดึงมากกว่าการทดแทนด้วยแป้งถั่วลิสงที่ระดับการทดแทนเท่ากัน แต่ยังมีน้อยกว่าความต้านทานการดึงของบะหมี่ที่ทำจากแป้งสาลีล้วน เนื่องจากปริมาณแป้งสาลีลดลงทำให้ปริมาณของกลูเตนลดลง โคของแป้งสาลีที่ทดแทนด้วยแป้งถั่วจึงมีความอ่อนตัว ไม่แข็งแรง

บะหมี่แถบเอเชียจะมีโปรตีนร้อยละ 10-12 (Shelke และคณะ, 1990) มีการปรับเพิ่มปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเส้นนี้ให้เพิ่มขึ้น ด้วยการทดแทนส่วนของแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วและโปรตีนเข้มข้น Jeffers และคณะ (1979) นำแป้งจากถั่ว yellow pea, green pea, navy pea และถั่วเหลือง ทดแทนบางส่วนในแป้งสาลีที่ใช้ในการผลิตเส้นอูด้งซึ่งชนิดของแป้งถั่วที่ใช้มีผลต่อคุณภาพของอูด้ง ปริมาณการทดแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้คุณภาพโดยรวมของเส้นอูด้งลดลง การทดแทนด้วย yellow pea จะทำให้เส้นอูด้งเป็นเหลืองน้ำตาล และการทดแทนด้วยแป้งถั่วเหลืองจะให้สีเหลืองออกเขียว ซึ่งการทดแทนด้วยแป้งถั่วเพื่อให้เส้นอูด้งมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับไม่ควรเกินร้อยละ 5-10 การทดแทนด้วยแป้งจากถั่วบางชนิด เช่น ถั่วเหลือง (Haber และคณะ, 1978) cowpea (Bergman และคณะ, 1994) garbanzo bean (Lee และคณะ, 1998) ทำให้สีของผลิตภัณฑ์คือยลง

2.8 บะหมี่ white salted noodle

บะหมี่ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเส้นทำจากแป้งสาลีอย่างเด็วหรืออาจผสมกับแป้งชนิดอื่น โดยอาจผ่านกระบวนการในการทำแห้งและสุกที่อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้เก็บได้นานและสามารถรักษาคุณภาพ กลิ่น และรสชาติของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

White salted noodle เป็นบะหมี่ที่ได้รับความนิยมมาก โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และจีน ซึ่งเตรียมได้จากการผสม แป้งข้าวสาลี น้ำ และเกลือ ริดเป็นแผ่น และตัดเป็นเส้น บะหมี่ถูกผลิตขึ้นมาหลายรูปแบบ เช่น แห้ง นึ่ง ต้ม และนึ่งแล้วทำให้แห้ง เป็นต้น ในประเทศญี่ปุ่น white salted noodle จะหมายถึง udon ซึ่งมีลักษณะเมื่อต้มแล้วจะมีสีครีม สว่าง มีความมันวาว และเรียบเนียน นุ่ม มีความยืดหยุ่น (Crosbie และคณะ, 1998)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเส้นบะหมี่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

1. แป้งสาลี เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตบะหมี่ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในสูตร ดังนั้นลักษณะของเส้นบะหมี่ทั้งกายภาพและทางเคมีจึงเป็นผลมาจากสมบัติของแป้งสาลี โดยแป้งสาลีที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมกับชนิดบะหมี่ที่ต้องการทำ เช่น บะหมี่จีนต้องการเหนียวควรใช้แป้งที่มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 10-12 ส่วนบะหมี่ญี่ปุ่นที่ต้องการความนุ่มเนียนควรใช้แป้งที่มีโปรตีนประมาณร้อยละ 9-10

2. น้ำ เป็นตัวทำละลายและทำให้ส่วนผสมต่างๆ กระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังทำให้แป้งจับตัวเป็นโค สามารถรีดเป็นแผ่นบางและตัดเป็นเส้นได้ น้ำจะมีผลต่อลักษณะของเส้นบะหมี่โดยตรง ถ้าใส่น้ำในส่วนผสมน้อยเกินไป โครงร่างของเส้นบะหมี่จะไม่แข็งแรง มีความร่วนและโปร่ง ทำให้เส้นบะหมี่แข็งและขาดง่าย แต่ถ้าใส่น้ำมากเกินไป โคจะแฉะเหนียวติดมือ และเมื่อตัดเป็นเส้นแล้วเส้นจะติดกันง่าย ส่วนใหญ่จะผสมน้ำในสูตรประมาณร้อยละ 30-40

3. เกลือ เติมเพื่อปรับสภาพน้ำให้เหมาะสมกับชนิดของบะหมี่ที่ต้องการ เกลือจะมีผลโดยตรงต่อกลูเตนของโค โดยจะเพิ่มความแข็งแรงและแรงต้านการยืดตัวของโค ช่วยให้โคไม่แฉะเมื่อตัดเป็นเส้นแล้วเส้นจะไม่ติดกัน นอกจากนี้เกลียวยังช่วยควบคุมการทำงานของ protease ทำให้กลูเตนไม่ถูกทำลาย ช่วยให้โคคงความเหนียวและยืดหยุ่นได้นาน และช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ จึงทำให้สามารถเก็บรักษาเส้นบะหมี่ได้นานขึ้น

การผลิตเส้นบะหมี่มีขั้นตอนหลักที่สำคัญดังนี้ (Kim, 1996)

1. การผสม เป็นขั้นตอนแรกในการผลิตบะหมี่ทุกชนิด วัตถุประสงค์คือเพื่อให้แป้ง น้ำ และส่วนผสมอื่นทั้งหมดผสมรวมเข้าด้วยกัน และเพื่อให้เกิดการรวมตัวของโปรตีน เม็ดแป้ง และน้ำ การผสมที่ดีและการเติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้เกิดโคที่ดี ไม่แห้งหรือแฉะ และมีสีสม่ำเสมอ

2. การพักโค เพื่อให้เกิดการดูดซึมน้ำเข้าไปในโมเลกุลของโปรตีน เม็ดแป้ง และ pentosan เพื่อให้ร่างแหของกลูเตนและเกิดการปรับสภาพโค

3. การรีดแผ่นและการตัดเป็นเส้น เป็นการนำก้อน โคมารีดเป็นแผ่นบางโดยค่อยๆลดความหนาของแผ่นโคเพื่อให้ได้โคที่เรียบเนียน มีความยืดหยุ่น มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปตัดเป็นเส้นขนาดประมาณ 2.0 มิลลิเมตร ด้วย cutting roll

คุณลักษณะทางกายภาพเคมีกายภาพของโค

เมื่อนวดแป้งกับน้ำ จะเกิดการจับกันของแป้งกับน้ำเกิดเป็นก้อนโค ซึ่งมีคุณสมบัติของความยืดหยุ่น จากลักษณะการยืดหยุ่น (elastic) ความข้นหนืด (viscous) และลักษณะของพลาสติก (plastic) รวมกัน เป็นผลจากความเปลี่ยนแปลงภายในของแป้ง ทั้งทางเคมี กายภาพ และชีวภาพ เรียกว่า การเกิดรีโอโลยีของโค (dough rheology) หรือวิทยากระแสของโค เป็นผลจากแรงดัน (stress) แรงเฉือน (shear) และแรงดึง (tensile) ต่อโค ในระยะเวลาและอุณหภูมิเหมาะสม โคจะมี

ลักษณะยืดหยุ่น ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรง (deformation) แบบนอน-นิวโตเนียน (non-Newtonian) มีลักษณะผสมผสานระหว่างความหนืดและความยืดหยุ่น (viscoelastic) เป็นผลให้โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีภายในเปลี่ยนแปลง โดยน้ำที่เติมลงไปจะเกิดเป็นฟิล์มบางๆ บนผิวแป้ง พอออกแรงนวดหรือใช้เครื่องผสม เกิดแรงเค้นและแรงเฉือน ทำให้น้ำซึมเข้าไปในแป้ง อยู่ระหว่างเม็ดแป้งเกิดแรงดึงดูดระหว่างแป้งกับน้ำ เป็นผลจากโปรตีนในแป้งเกิดการรวมตัวกัน โดยมีน้ำเป็นตัวเชื่อมกลายเป็นร่างแหของกลูเตน คลุมเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะยังไม่ดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิของการผสม โคนี้ ขณะผสมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลูเตนไปเรื่อยๆ จนถึงจุดที่กลูเตนมีความยืดหยุ่นเหมาะสมทำให้โดไม่ติดมือหรือภาชนะที่ใช้ผสม สามารถดึงยืดให้เป็นฟิล์มบางๆ ได้ ถ้าผสมต่อไปจะทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงเค้นรวมทั้งแรงดึงร่วมกัน มีผลให้กลูเตนฟิล์มหมดความยืดหยุ่นตัวทำให้ขาดเป็นสายโคเหนอะหนะติดมือและไหลได้ เนื่องจากการผสมมากเกินไป

ปริมาณน้ำที่เติมพิจารณาจากความชื้นที่เดิมของแป้ง ซึ่งเป็นปริมาณน้ำชนิดที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นรวมกับน้ำอิสระ โดยทั่วไปมีอยู่ประมาณร้อยละ 14 ดังนั้นน้ำที่เติมลงไปจะช่วยให้เกิดการเกาะเกี่ยวของน้ำกับสารอื่นเมื่อมีความชื้นถึงร้อยละ 25 หรือเท่ากับ 0.33 กรัมของน้ำหนักของแป้ง 1 กรัม และเมื่อมีความชื้นถึง 0.54 กรัมของน้ำหนักของแป้ง 1 กรัม (ความชื้นประมาณร้อยละ 35) โดจะมีลักษณะที่เหมาะสม มีส่วนของน้ำอิสระประมาณร้อยละ 10 (0.11 กรัมของน้ำต่อน้ำหนักของแป้ง 1 กรัม) และน้ำอิสระที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลทำให้โดอ่อนนุ่มและมีความลื่น ไม่ติดมือ และสามารถยืดเป็นฟิล์มได้ในแป้ง

กลูเตน เกิดจากการรวมตัวของไกลอะดินและกลูเตนินในปริมาณใกล้เคียงกัน โปรตีนส่วนใหญ่ (ร้อยละ 80-90) ในแป้งจะเกิดเป็นกลูเตน โปรตีนของข้าวสาลีมีไกลอะดินและ กลูเตนิน คิดเป็นร้อยละ 45 และร้อยละ 40 ตามลำดับ โปรตีนทั้งสองชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำที่ pH เป็นกลางและในสารละลายเกลือเจือจาง ไกลอะดินจะละลายในสารละลายเอธานอลร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนกลูเตนินจะไม่ละลายในสารละลายเอธานอลร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิห้อง โปรตีนอีกร้อยละ 15 คือ อัลบูมิน (albumins) และ โกลบูลิน (globulins) อัลบูมินละลายในน้ำและ โกลบูลินละลายในน้ำเกลือ ไกลอะดินและกลูเตนินก่อให้เกิด โครงร่างของกลูเตนจากการนวดโด เกิดแรงยึดเหนี่ยวของพันธะทางเคมีระหว่างกรดอะมิโน ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (covalent) พันธะไอออนิก (ionic) พันธะ Van der Waals

2.9 สมบัติทาง viscoelastic (ฉัตรชัย เกตุโกเมนทร์ และคณะ, 2545)

“วิทยากระแส” (Rheology) คือศาสตร์ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) และการไหล (flow) ของวัสดุพอลิเมอร์ก็เช่นเดียวกับวัสดุทั่วไป สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างและไหลได้ภายใต้สภาวะที่กำหนด เช่น ได้รับความเค้น หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเกิดได้ยากง่ายเพียงใดขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โครงสร้างของพอลิเมอร์ และความเป็นผลึก

ภายใต้แรงกระทำจากภายนอกที่กำหนดให้ วัสดุต่างชนิดกันจะมีรูปร่างในลักษณะต่างกัน วัสดุจำนวนมากสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น ได้อย่างสมบูรณ์ (completely elastic) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชั่วคราว หรือเกิดการไหลหนืดอย่างสมบูรณ์ (completely viscous) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร และยังมีวัสดุอีกมากเมื่ออยู่ภายใต้ภาวะที่ได้รับ ความเค้นปกติ จะเปลี่ยนรูปร่างได้ทั้งแบบยืดหยุ่นและไหลหนืดในเวลาเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า วิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติกที่สำคัญที่สุด ประเภทหนึ่ง

วัสดุพอลิเมอร์มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลหลายแบบ ซึ่งสามารถ จำแนกออกเป็น 4 แบบ คือ การไหลหนืด สภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง สภาพยืดหยุ่นแบบฮุกเคียน และ สภาพวิสโคอีลาสติก พฤติกรรมการไหลทั้ง 4 แบบนี้ ใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายสมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์ออสัญฐาน สำหรับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะขึ้นกับส่วนที่เป็นส่วนที่เป็นผลึก ด้วย ซึ่งอาจพิจารณาได้บางส่วนจากบริเวณที่เป็นอสัญฐาน

ของไหลทั่วไปเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก อาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งความ พยายามที่จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า consistency และสมบัติสำคัญที่สุดของการไหลคือ ความหนืด (viscosity) ความหนืดของพอลิเมอร์ที่เป็นของเหลวจะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล แรง ดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ และการกวนในภาชนะ เป็นต้น

เมื่อเกิดการไหลอนุภาคของสารจะเลื่อนผ่านไปบนกันและกันโดยเอาชนะแรงดึงดูด ระหว่างกัน การเลื่อนไหลดังกล่าวเรียกว่า การเฉือน (shear) ซึ่งอาจเกิดได้ในหลายๆ ขั้นตอนของ กระบวนการผลิตและการขึ้นรูป ได้แก่ การไหลภายในท่อ การไหลระหว่างลูกกลิ้ง การไหลผ่าน ช่องหรือรู และการกวนในภาชนะ เป็นต้น

การไหลหนืด (Viscous flow)

เกิดจากโมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันและกันโดยไม่ย้อนกลับ (irreversible) เป็น ผลให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างถาวร ซึ่งพอลิเมอร์แบบเส้นที่มีแรงดึงดูด ระหว่างโมเลกุลต่ำ จะแสดงพฤติกรรมไหลแบบนี้

ปี ค.ศ. 1685 นิวตัน (Newton) พบว่าของเหลวหลายๆ ชนิด เมื่อได้รับแรงเฉือนต่อพื้นที่ 1 หน่วย (F/A) ห่างจากผนังซึ่งอยู่กับที่เป็นระยะทาง x จะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และ ของเหลวในระนาบถัดลงมา ก็จะเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันด้วยความเร็วคงที่ในแต่ละระนาบ แต่ ความเร็วจะลดต่ำลงไปเรื่อยๆ ขึ้นกับระยะห่างจากผนังนั้น จนความเร็วของเหลวที่ติดกับผนังเป็น 0

ความหนืด เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่สำคัญมากในด้านวิทยากระแส ซึ่งนิยามว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress ; σ หรือ τ) กับความเร็วเกรเดียน (velocity gradient; dv/dx) หรืออัตราเฉือน (shear rate; $\dot{\gamma}$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{viscosity} = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear rate}} \quad (2.1)$$

$$\text{หรือ} \quad \eta = \sigma / \dot{\gamma}$$

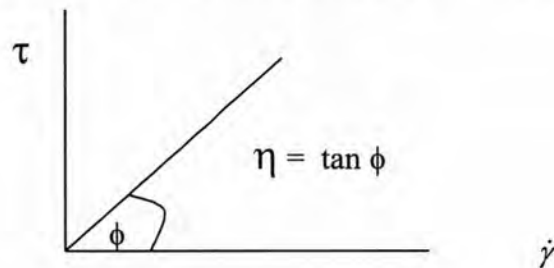
$$\text{โดย} \quad \sigma = F/A = \eta dv/dx = \eta \dot{\gamma}$$

ความหนืดมีหน่วยเป็น Pa.s โดยที่ 1 Pa.s = 1 Pi (Poiseuille) = 10 P (Poise)

โดยทั่วไป ความหนืดเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (T) ความดัน (P) และความเค้นเฉือน (τ) หรืออัตราการเฉือน ($\dot{\gamma}$)

อัตราการเฉือน (shear rate ; $\dot{\gamma}$) เป็นอัตราความเครียดเฉือนในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ วินาที⁻¹

ของไหลซึ่งมีความหนืดคงที่ ไม่ว่าจะอัตราเฉือนจะเป็นเท่าใด (อัตราเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นเฉือน) เรียกว่า ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) เช่นน้ำมัน และกรดซัลฟิวริก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าความชันของเส้นกราฟคงที่ (ความหนืดคงที่)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนของไหลนิวโตเนียน

ของไหลอีกหลายชนิดซึ่งค่าความหนืดไม่คงที่ จะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเฉือนหรือเวลาโดยความหนืดของของไหลอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของของไหล เรียกของไหลชนิดนี้ว่า ของไหลนอน-นิวโตเนียน (non-Newtonian fluid) เช่น ของเหลวประเภทแขวนลอย (suspension) ของเหลวที่มีโมเลกุลมีขนาดใหญ่และยาว ได้แก่ พอลิเมอร์หลอมเหลว และสารละลายอาหาร เป็นต้น

สภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง (Rubberlike-elasticity)

เกิดจากการเคลื่อนไหวเพียงบางส่วนของโมเลกุล แต่การเคลื่อนที่ทั้งโมเลกุลจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเชื่อมโยง จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบชั่วคราว และจะคืนกลับได้ทันทีที่เอาแรงกระทำออกไป เช่น ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์

วัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง จะมีสมบัติต่างจากของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปมีดังนี้

1. สามารถยืดได้ทันทีเมื่อได้รับแรงดึง และจะยืดตัวได้สูงมาก (ร้อยละ 500-1000) โดยไม่แรงต้านทานต่ำ นั่นคือ มีการสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนต่ำ
2. มีความทนแรงดึง และมอดูลัสสูง เมื่อถูกดึงให้ยืดตัวเต็มที่
3. สามารถหดกลับได้รวดเร็วเมื่อปล่อยแรงดึง แสดงปรากฏการณ์ของ snap และ rebound และพฤติกรรมเสมือนมีความทรงจำของสถานะเริ่มแรก ในขณะที่วัสดุอื่นจะสูญเสียความทรงจำนี้เมื่อผ่านการดึงเพียงครั้งเดียวแค่ประมาณร้อยละ 0.1 หรือมากกว่า
4. สามารถคืนกลับมาที่มีความยาวขนาดเท่าเดิม เมื่อเอาความเค้นออกไปและแสดงปรากฏการณ์ของรีซีแลนซ์ (resilience) และจะมี permanent set ต่ำ

สภาพยืดหยุ่นแบบฮุกเคียน (Hookean elasticity)

เป็นการเคลื่อนไหวที่มีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลที่จำกัดมาก จะมีเพียงการสั่น การยืดออกของพันธะ และการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะเท่านั้น เป็นผลให้พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือไหลได้น้อยมาก จึงมีพฤติกรรมที่คล้ายแก้ว

สภาพวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สามารถคืนกลับได้ แต่จะขึ้นกับเวลา (time dependent) เนื่องจากการบิดของสายโซ่โมเลกุลไปจาก conformation ที่สมดุล โดยการหมุนรอบพันธะโควาเลนต์ และเมื่อเวลาผ่านไป โมเลกุลจะพยายามคืนสู่ conformation ที่สมดุลอีกครั้ง

วัสดุพอลิเมอร์ซึ่งมีความอ่อนตัว และโมเลกุลมี coil conformation โมเลกุลจะเหยียดออกเมื่อได้รับความเค้น ซึ่งถ้าเกิดความเครียดต่างๆ พอลิเมอร์จะแสดงสภาพยืดหยุ่นเมื่อเอาความเค้นออกไป โดยคืนกลับมาที่มีความยาวเดิม แต่ถ้าความเครียดเพิ่มมากขึ้น โดยให้ความเค้นต่อไปเป็นเวลานานๆ หรือให้ความเค้นเพิ่มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน และเมื่อเอาความเค้นออกจะเกิด coil conformation ใหม่อีก แต่จะไม่กลับมาที่มีความยาวเดิม (หดกลับบ้างเล็กน้อย) เนื่องจากโมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน และไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์เหมือนพอลิเมอร์ที่มีสภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง

การเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเป็นสมบัติของของเหลว (เช่น การไหลหนืด) จึงกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์แสดงสมบัติของวิสโคอีลาสติก (มีทั้งสภาพยืดหยุ่นและการไหลหนืด) ถ้าพอลิเมอร์ได้รับความเค้นเป็นเวลายังนาน จะทำให้โมเลกุลสามารถไหลผ่านซึ่งกันและกัน ได้มากขึ้น และการคืน

รูปแบบยืดหยุ่น (elastic recovery) จะน้อยลงเมื่อเอาความเค้นออกไป ดังนั้นหลักสำคัญของสถานะวิสโคอิลาสติก คือสมบัติจะขึ้นกับเวลา ถ้าให้ความเค้นเป็นเวลาดสั้นๆ พอลิเมอร์จะมีพฤติกรรมที่เป็นอีลาสโตเมอร์ และถ้าให้ความเค้นเป็นเวลานานๆ พอลิเมอร์จะมีพฤติกรรมเป็นเหมือนของเหลวปรากฏการณ์สำคัญที่แสดงความเป็นวิสคูวิสโคอิลาสติก ได้แก่ creep และ recovery (การคืนรูป)

วัสดุที่มีสมบัติทาง viscoelastic หมายถึง วัสดุนั้นมีสมบัติของของแข็งยืดหยุ่นได้ (elastic material) คือ วัสดุเปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อรับแรงกระทำ (stress) และสามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับคืนรูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดให้แรงกระทำ ร่วมกับสมบัติของของเหลว (viscous materials) คือ วัสดุเริ่มไหลด้วยอัตราคงที่เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ และสามารถคงรูปร่างสุดท้ายได้เมื่อหยุดแรงกระทำ ซึ่งอาหารส่วนใหญ่มีสมบัติเป็น viscoelastic

สมบัตินี้ viscoelastic สามารถแสดงได้โดยค่า complex modulus (G^*) elastic modulus (G') และ viscous modulus (G'') โดยทั้งสามค่ามีความสัมพันธ์กันดังสมการข้างล่างนี้

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ	G^*	=	complex modulus
	G'	=	elastic modulus
	G''	=	viscous modulus

ค่า G' (elastic modulus) จะเป็นค่าที่บ่งถึงความเป็น elastic solid ของตัวอย่าง และ ค่า G'' (viscous modulus) จะเป็นค่าที่บ่งถึงความเป็น liquid ของตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างที่มีค่า G' มากกว่าค่า G'' เป็นตัวอย่างที่แสดงสมบัติของของแข็งมากกว่าสมบัติของเหลว สามารถคงตัวได้ดีกว่าเมื่อได้รับแรงกระทำ

creep (การคืบ) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อเวลาผ่านไป (เป็นฟังก์ชันของเวลา) ภายใต้ความเค้นคงที่ การทดสอบ creep มักกระทำภายใต้แรงดึง แต่แรงอัดและแรงเฉือนก็อาจทำได้ การทดสอบภายใต้ภาวะของแรงดึง ทำโดยให้น้ำหนักซึ่งคงที่กับชิ้นทดสอบ เมื่อชิ้นทดสอบได้รับความเค้น (ซึ่งคงที่และไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น) จะเกิดความเครียดขึ้นค่าหนึ่งในทันที และเมื่อเอาน้ำหนักออกชิ้นทดลองย่อมคืนกลับไปหาความยาวเดิมได้ทันที แต่ถ้าดึงไว้เป็นระยะเวลาหลายๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกอย่างถาวร

recovery (การคืนรูป) เป็นปรากฏการณ์ที่ต่อเนื่องจากการคืบภายหลังจากการเอาความเค้นออกไป ถ้าเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นจะหดกลับสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์ทันที ในขณะที่วัสดุซึ่งเป็นของไหลจะไม่มี การหดตัวกลับเลย สำหรับวิสคูวิสโคอิลาสติกซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุยืดหยุ่นและวัสดุที่เป็นของไหล จะเกิดการหดกลับได้บางส่วน และมีบางส่วนแปรรูปไป ในส่วนของการหด

กลับจะมี 2 ลักษณะ คือ เมื่อเอาความเค้นออกไป จะมีบางส่วนหดกลับได้ทันที หลังจากนั้นการหดกลับจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา

การทดสอบแบบ creep/recovery เริ่มจากการให้ความเค้นที่ต่ำอย่างคงที่แก่วัสดุแล้วบันทึกค่าการเปลี่ยนรูปทรงเทียบกับเวลาที่เราให้แรงกระทำแก่วัสดุ ดังนั้นกราฟที่ได้จากการทดสอบ creep/recovery มักจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (strain) หรือ compliance (J) เทียบกับเวลาที่ให้แรงกระทำแก่วัสดุ compliance (J) คือ สัดส่วนกลับของมอดูลัส (G), $J = 1/G = \gamma/\tau$, โดยที่ γ คือ strain และ τ คือ ความเค้นที่ให้แก่วัสดุ ลักษณะของกราฟ (creep curve) มีส่วนสำคัญในการบอกคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของวัสดุความสัมพันธ์ระหว่างค่า creep compliance เทียบกับเวลาที่ให้แรงกระทำแก่วัสดุสามารถแสดงได้ดังสมการ

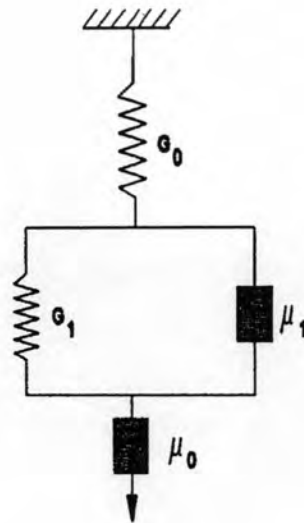
$$J = f(t) = J_0 + J_1(1 - \exp(-t/\lambda_{ret})) + t/\mu_0 \quad (2.3)$$

เมื่อ

- J = creep compliance (Pa^{-1})
- J_0 = instantaneous compliance (Pa^{-1})
- J_1 = retarded compliance (Pa^{-1})
- λ_{ret} = retardation time (μ_1/G_1) (s)
- μ_0 = Newtonian viscosity (Pa.s)

สมการข้างต้นเป็นสมการแบบ Four Element Burgers Model (รูปที่ 2.8) ซึ่งมีองค์ประกอบ 4 ตัวด้วยกันคือ instantaneous modulus (G_0), retarded modulus (G_1), Newtonian viscosity (μ_0) และ retarded viscosity (μ_1) สามารถเขียนสมการข้างต้นได้ในอีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

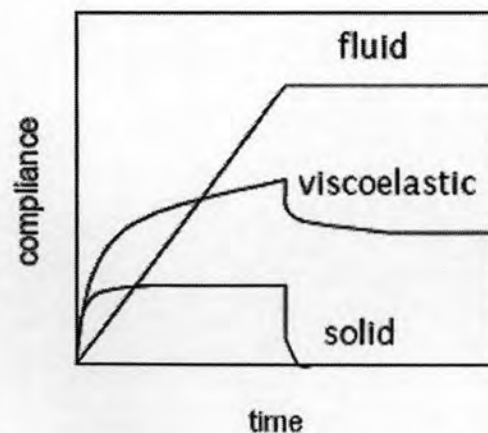
$$J = f(t) = (1/G_0) + (1/G_1)(1 - \exp(-t/\lambda_{ret})) + t/\mu_0 \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.7 Four-element Burgers Model

ที่มา : James F.S. (1996)

ถ้าความเครียดคงที่ตลอดเวลาที่เราให้ความเค้นและวัสดุมีการคืนตัวกลับร้อยละ 100 เมื่อปลดปล่อยความเค้นในช่วงเวลาคืนตัวกลับ (recovery time) วัสดุนั้นเป็นของแข็ง (อีลาสติก) สำหรับ วัสดุที่เป็นของเหลวจะแสดงพฤติกรรมที่สามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง นั่นคือความเครียดจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มีการให้ความเค้นที่คงที่ และเวลาที่เรปลดปล่อยความเค้นวัสดุจะไม่สามารถคืนตัวกลับได้เลย วัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายของแข็งและของเหลว (วิสโคอีลาสติก) จะแสดงตอบสนองแรงกระทำแบบไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากความสามารถในการคืนตัวกลับบางส่วน โครงสร้างด้วยพลังงานที่เก็บไว้ พฤติกรรม creep/recovery ของวัสดุของเหลว ของแข็ง และวิสโคอีลาสติก แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 พฤติกรรม creep/recovery ของวัสดุ ของเหลว ของแข็ง และวิสโคอีลาสติก

ที่มา : นิสภา สีตะปิ่นย์ (2545)

เมื่อให้แรงแก่วัตถุบางส่วนของวัตถุเกิดการเปลี่ยนรูปทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำ สำหรับ ideal elastic บางส่วนของวัตถุจะเปลี่ยนรูปทันทีเมื่อได้รับแรง และเมื่อนำแรงออกส่วนที่เป็น elastic จะมีสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทันที (ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองรูป spring ที่มี instantaneous modulus (G_0) เป็นสมบัติทาง viscoelastic) หลังจากนั้นวัตถุจะแสดงสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหน่วง (แทนด้วยแบบจำลองรูป spring ต่อขนานกับแบบจำลองรูป dashpot ที่มี retarded modulus (G_1) และ retarded viscosity (μ_1) เป็นสมบัติทาง viscoelastic ของ spring และ Dashpot ตามลำดับ และมี retardation time เท่ากับ λ_{ret}) พร้อมกับการไหลแบบ ideal Newtonian Fluid (แทนด้วยแบบจำลองรูป dashpot ที่มี Newtonian viscosity (μ_0) เป็นสมบัติทาง viscoelastic)