บทที่ 6
เนื้อและผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์
(Meat and Meat Products)

เนื้อสัตว์ที่มนุษย์ใช้บริโภคมาจากสัตว์หลายชนิด ได้แก่ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น โค กระบือ สุกร แพะ แกะ เป็นต้น สัตว์ปีก เช่น นก เป็ด ไก่ เป็นต้น และสัตว์น้ำ เช่น ปลา ปู กุ้ง หอย เป็นต้น

ในบางประเทศประชาชนอาจนิยมบริโภคเนื้อสัตว์ที่แตกต่างไปจากนี้ ทั้งนี้ขึ้นกับความเคยชิน วัฒนธรรมและศาสนาของแต่ละประเทศ เนื้อสัตว์เป็นอาหารที่อุดมด้วยโปรตีน, ไขมัน, แร่ธาตุและวิตามิน (ตารางที่ 6.1) เนื้อสัตว์จึงเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะสำหรับประชากรทางซีกโลกตะวันตกและออสเตรเลีย ประชากรแถบทวีปเอเชียยังบริโภคเนื้อสัตว์น้อย ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเนื้อสัตว์มีราคาแพง และในบางประเทศ เนื้อสัตว์บางชนิดอาจจะหายากด้วย

6.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเนื้อสัตว์

เนื้อสัตว์ประกอบด้วยเนื้อเยื่อหลายประเภท เช่น เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (muscle tissue) หรือเส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber), เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นพังผืดที่หุ้มกล้ามเนื้อไว้ และเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) ซึ่งเป็นแหล่งเก็บสะสมไขมัน นอกจากนี้กล้ามเนื้อยังมีเส้นใยประสาท (nerve fiber) และเส้นโลหิตผ่านเข้าและออกจากกล้ามเนื้อด้วย

6.1.1 กล้ามเนื้อ

กล้ามเนื้อสัตว์แยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. กล้ามเนื้อลาย คือ กล้ามเนื้อที่อยู่ใต้บังคับของจิตใจ (voluntary cross-straited muscle) ได้แก่ กล้ามเนื้อโครงสร้าง (skeletal muscle) เช่น กล้ามเนื้อส่วนแขน ขา เป็นต้น เป็นกล้ามเนื้อที่ใช้ในการเคลื่อนไหว

CM 480 213

ตารางที่ 6.1 ปริมาณสารอาหารในเนื้อสัตว์ส่วนที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	น้ำ	พลังงาน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรท	โปรตีน	แคลเซี่ยม	ฟอสฟอรัส	เหล็ก	วิตะมิน				
									เอ	บีหนึ่ง	บีสอง	ไนอะซิน	ซี
	กรัม		กรัม	กรัม	กรัม	มก.	มก.	มก.	หน่วย	มก.	มก.	มก.	มก.
1. ไก่, เนื้อไก่อ่อน	66.0	200	12.6	0	20.2	14	200	1.5	410	0.08	0.16	8.0	0
2. ไก่, เนื้อไก่แก่	55.9	302	25.0	0	18.0	14	200	1.5	810	0.08	0.16	8.0	0
3. ไก่, เนื้อขา	76.3	97	0.1	0	22.6	4	86	1.0	–	0.11	0.07	5.2	–
4. ไก่, เนื้อขาไก่อ่อน	76.7	108	2.7	0	19.6	10	157	1.6	–	0.12	0.12	6.0	–
5. ไก่, เนื้ออก	75.5	100	0.1	0	23.3	4	171	0.7	–	0.04	0.02	11.7	–
6. ไก่, เนื้ออก, ไก่สาว	76.7	108	2.7	0	19.0	10	157	1.6	–	0.12	0.12	6.1	–
7. ไก่, กึ่น	73.8	111	1.0	2.5	21.8	18	72	0.6	–	0.06	0.25	4.8	4
8. ไก่, ตับ	72.7	128	3.9	4.0	18.1	14	152	3.5	32200	0.31	4.19	11.2	35
9. ไก่, หัวใจ	74.3	134	6.0	0.1	18.6	4	158	3.3	30	0.06	0.80	4.6	4
10. กระต่าย, เนื้อ	70.0	162	8.0	0	21.0	20	352	1.3	–	0.08	0.06	12.8	–
11. แกะ, เนื้อ	66.3	206	14.8	0	17.1	10	191	2.6	–	0.15	0.21	4.9	0
12. แกะ, เนื้อติดมัน	55.8	317	27.7	0	15.7	9	157	2.4	–	0.14	0.20	4.5	0
13. กวาง, เนื้อขา	76.7	95	0.2	0	21.9	12	170	1.3	Tr.	0.15	0.13	8.5	–
14. กวาง, เนื้อซี่โครง	76.8	94	0.1	0	21.9	19	158	3.7	Tr.	0.09	0.11	7.1	–
15. กบ, เนื้อ	77.5	95	0.6	0	20.9	46	168	1.8	–	0.06	0.12	5.0	–

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

อาหาร	น้ำ	พลังงาน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรท	โปรตีน	แคลเซียม	ฟอสฟอรัส	เหล็ก	วิตะมิน เอ	วิตะมิน บีหนึ่ง	วิตะมิน บีสอง	วิตะมิน ไนอะซิน	วิตะมิน ซี
	กรัม	แคลอรี่	กรัม	กรัม	กรัม	มก.	มก.	มก.	หน่วย	มก.	มก.	มก.	มก.
16. กบ, ขา	81.9	73	0.3	0	16.4	18	147	1.5	0	0.14	0.25	1.2	–
17. ควาย, เนื้อ	75.6	106	1.6	2.0	19.6	11	187	2.9	–	0.08	0.17	4.7	0
18. เต่า	80.0	79	1.0	2.0	16.0	100	–	1.0	–	0.20	0.50	3.0	–
19. นก, เนื้อ	72.2	109	0.6	–	25.9	30	250	–	–	–	–	–	–
20. นกปากซ่อม	74.7	118	3.2	0	21.0	29	219	3.7	–	0.29	1.03	8.7	–
21. นกกระจอกทั้งกระดูก	72.5	119	4.6	–	19.4	470	590	–	30	–	–	6.8	0
22. เป็ด, เนื้ออก	73.7	115	1.7	0	23.3	7	203	2.8	–	0.15	0.39	11.7	–
23. เป็ด, เนื้อขา	73.1	139	6.0	0	19.8	11	164	2.8	–	0.18	0.38	4.1	–
24. เป็ด, กึ๋น	–	–	–	–	25.0	11	119	2.9	–	–	–	5.4	–
25. เป็ด, ตับ	–	–	–	–	16.5	15	167	5.6	–	–	–	9.0	–
26. วัว, เนื้อไม่มีมัน	70.5	149	6.1	0	22.2	–	245	3.4	–	0.22	0.29	6.4	–
27. วัว, เนื้อไม่มีมันย่าง	56.8	190	2.9	0	38.5	–	281	4.9	–	0.25	0.34	8.6	–
28. วัว, เนื้อไม่มีมันต้ม	61.5	187	5.7	0	31.7	–	237	2.7	–	0.16	0.24	4.9	–
29. วัว, เนื้อไม่มีมันทอด	49.3	250	8.6	0	40.4	–	210	7.0	–	0.17	0.35	7.9	–
30. วัว, เนื้อติดมัน	60.0	273	22.0	0	17.5	10	150	2.6	40	0.08	0.16	4.2	0

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

อาหาร	น้ำ	พลังงาน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรท	โปรตีน	แคลเซี่ยม	ฟอสฟอรัส	เหล็ก	วิตะมิน เอ	วิตะมิน บี๑ หนึ่ง	วิตะมิน บี๒ สอง	ไนอะซิน	วิตะมิน ซี
	กรัม	แคลอรี่	กรัม	กรัม	กรัม	มก.	มก.	มก.	หน่วย	มก.	มก.	มก.	มก.
31. วัว, เนื้อสันย่างนุ่ม	72.0	134	4.1	0	22.8	7	210	2.4	–	0.04	0.06	7.8	–
32. วัว, หาง	50.7	365	33.3	0	15.8	13	70	1.5	–	0.04	0.28	1.3	–
33. วัว, ซี่โครงย่าง	55.9	319	28.2	0	15.1	7	104	0.5	–	0.02	0.09	5.4	–
34. วัว, เนื้อขาตอนล่าง	73.9	123	3.4	0	21.7	6	138	1.8	–	0.03	0.11	7.3	–
35. วัว, เนื้อโคนขา	71.0	151	6.8	0	21.1	9	174	3.3	–	0.04	0.06	6.6	–
36. วัว, เนื้อสะโพก	75.9	110	2.4	0	20.7	7	150	1.5	–	0.07	0.10	7.3	–
37. วัว, กระเพาะ	78.5	116	5.6	0.2	15.1	53	51	0.4	55	0.04	0.17	1.6	–
38. วัว, ตับ	71.3	127	2.3	2.9	22.2	–	312	9.2	24940	0.17	0.76	6.4	–
39. วัว, ตับ, ต้ม	65.2	160	4.0	4.0	22.5	15	279	4.6	–	0.16	0.36	4.4	–
40. วัว, ไต	80.5	86	1.7	1.4	15.3	24	158	2.1	660	0.23	3.30	6.2	–
41. วัว, ปอด	77.9	99	1.9	2.1	17.1	22	138	1.6	40	0.10	0.27	3.5	–
42. วัว, ลิ้น	64.8	218	15.2	4.4	14.8	42	154	1.5	–	0.09	9.18	3.6	–
43. วัว, ลิ้นต้ม	57.8	267	19.2	4.0	18.2	96	123	2.2	–	0.03	0.06	1.8	–
44. วัว, ลำไส้เล็ก	76.7	130	7.2	1.5	14.0	14	115	4.0	–	0.08	0.19	2.6	–
45. วัว, ลำไส้ใหญ่	78.2	128	8.0	1.1	12.2	15	59	Tr.	–	0.05	0.32	1.7	–

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

อาหาร	น้ำ	คาลอรี่	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรท	โปรตีน	คัลเซี่ยม	ฟอสฟอรัส	เหล็ก	วิตะมิน				
									เอ	บีหนึ่ง	บีสอง	ไนอะซีน	ซี
	กรัม		กรัม	กรัม	กรัม	มก.	มก.	มก.	หน่วย	มก.	มก.	มก.	มก.
46. วัว, หัวใจ	75.0	133	5.9	–	18.8	11	170	4.1	30	0.48	0.87	6.8	14
47. วัว, ม้าม	78.0	96	1.7	1.8	17.2	11	201	9.7	195	0.15	0.44	4.7	29
48. วัว. แห้ง	47.7	203	6.3	0	34.3	20	404	5.1	–	0.07	0.32	3.8	0
49. หมู, เนื้อ	50.0	376	35.0	0	14.1	8	151	2.1	0	0.69	0.16	3.7	0
50. หมู, เนื้อติดมัน	42.0	457	45.0	0	11.9	7	117	1.8	0	0.58	0.14	3.1	0
51. หมู, เนื้อสันอย่างนุ่ม	53.4	242	18.9	0	16.7	14	157	1.5	–	0.69	0.29	5.3	–
52. หมู, ขา	68.6	179	10.2	0	20.3	16	139	0.5	–	0.36	0.41	4.9	–
53. หมู, ซี่โครง, เนื้อ	57.0	302	26.0	0	15.8	9	177	2.4	0	0.77	0.18	4.1	0
54. หมู, ซี่โครง, ติดมัน	53.0	351	32.0	0	14.6	8	158	2.2	0	0.71	0.17	3.8	0
55. หมู, กระเพาะ	77.2	125	6.5	2.6	13.1	11	106	1.0	–	0.09	0.29	2.4	2
56. หมู, ตับ	71.6	131	3.7	2.6	20.6	10	356	19.2	10900	0.30	3.03	16.4	23
57. หมู, ตับทอด	54.0	241	11.5	2.5	29.9	15	539	29.1	14900	0.34	4.36	22.3	22
58. หมู, ไต	76.8	114	4.3	2.4	15.4	13	198	5.1	121	0.38	1.71	9.7	–
59. หมู, ไต, ต้ม	64.4	–	–	–	17.0	–	245	5.3	–	0.17	0.58	4.2	–
60. หมู, ปอด	83.2	76	1.8	2.0	12.2	14	159	3.1	71	0.11	0.41	3.1	10

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

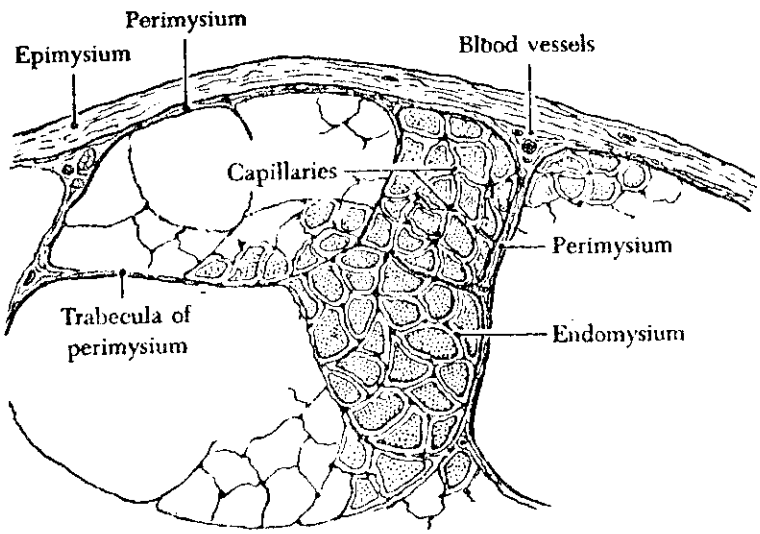
อาหาร	น้ำ	แคลอรี่	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรท	โปรตีน	แคลเซียม	ฟอสฟอรัส	เหล็ก	วิตะมิน				
									เอ	บีหนึ่ง	บีสอง	ไนอะซิน	ซี
	กรัม		กรัม	กรัม	กรัม	มก.	มก.	มก.	หน่วย	มก.	มก.	มก.	มก.
61. หมู, ลำไส้ใหญ่	81.8	83	2.2	5.6	9.6	12	89	1.1	–	0.08	0.24	1.7	–
62. หมู, ลำไส้เล็ก	84.2	74	2.3	0	12.6	9	150	2.4	–	0.17	0.33	2.9	14
63. หมู, ม้าม	80.2	91	2.5	0	16.1	13	206	6.9	–	0.21	0.41	4.4	–
64. หมู, ม้าม, ต้ม	80.2	98	3.7	0	15.2	12	187	5.4	–	0.13	0.26	2.9	–
65. หมู, ลิ้น	61.5	274	23.8	0	13.9	17	116	1.1	–	0.17	0.21	3.4	–
66. หมู, เลือด	85.5	57	0.1	1.5	11.7	8	30	1.1	–	0.01	0.01	0.3	–
67. หมู, หัวใจ	76.6	120	5.3	0.6	16.4	6	139	1.5	35	0.22	1.56	5.2	4
68. หมู, แฮม	60.2	281	24.2	0	14.8	12	114	1.1	–	0.32	0.26	5.9	–
69. หมู, เบคอน, ดิบ	19.3	665	69.3	1.0	8.4	13	108	1.2	0	0.36	0.11	1.8	–
70. หมู, เบคอนทอด เอาน้ำมันออก	8.1	611	52.0	3.2	30.4	14	224	3.3	0	0.51	0.34	5.2	–
71. หมู, ไส้กรอก	24.9	590	60.0	3.5	8.3	25	16	1.2	–	0.33	0.14	2.2	–

อดิศคณะอนุกรรมการสาขาโภชนศาสตร์ ฯ *ตำราโภชนาการ* โรงพิมพ์คุรุสภา 2517 หน้า 249–252

2. กล้ามเนื้อเรียบ คือ กล้ามเนื้อที่อยู่นอกอำนาจการบังคับของจิตใจ (involuntary smooth muscle) ได้แก่ กล้ามเนื้อของอวัยวะภายใน เช่น กล้ามเนื้อของกระเพาะ ลำไส้ ตับไต และปอด เป็นต้น

3. กล้ามเนื้อหัวใจ (cardiac muscle) คือ กล้ามเนื้อลายที่ไม่อยู่ใต้บังคับของจิตใจ

โครงสร้างของกล้ามเนื้อประกอบด้วยมัดของกล้ามเนื้อ (muscle bundle) หลายมัด มีความยาวและความหนาแตกต่างกัน ในแต่ละมัดของกล้ามเนื้อประกอบด้วยเส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber) เส้นใยกล้ามเนื้อมีลักษณะเรียวยาว มีความยาวตั้งแต่ 1 ถึง 41 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 10 ถึงมากกว่า 100 ไมโครเมตร ความยาวนี้อาจแตกต่างกันแม้ในเนื้อสัตว์ชนิดเดียวกัน หรือแม้แต่กล้ามเนื้อมัดเดียวกันก็ตาม



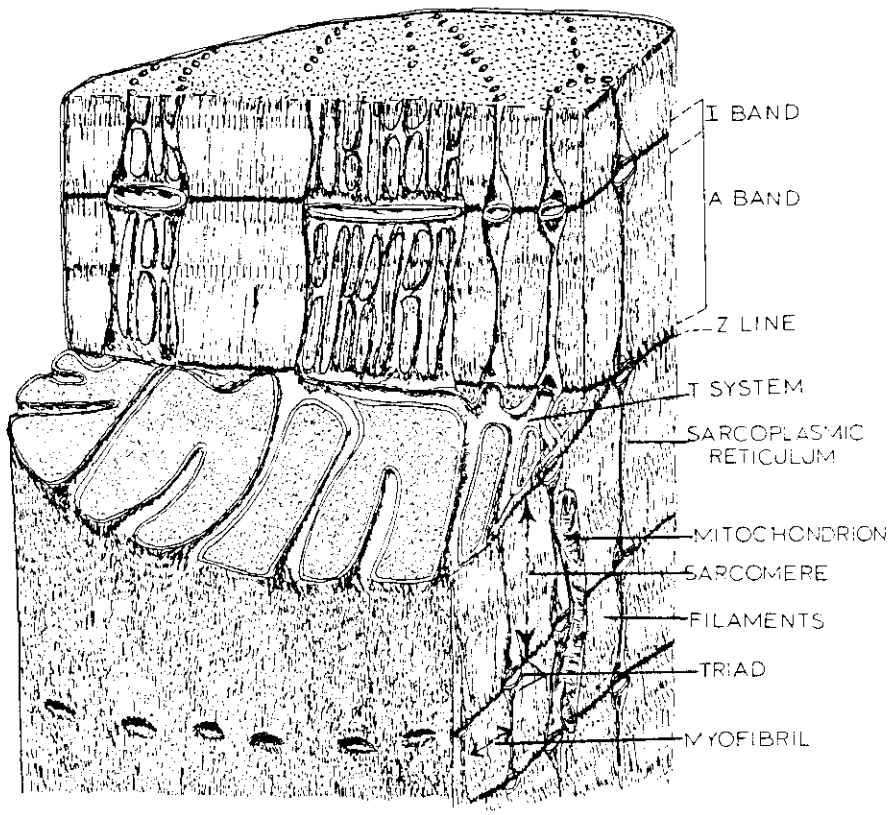
รูปที่ 6.1 โครงสร้างกล้ามเนื้อตัดตามขวาง

CM 480 219

รอบ ๆ กล้ามเนื้อทั้งหมดมีพังผืดหนาซึ่งเป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันหุ้มอยู่ เรียกว่า เอพิไมเซียม (epimysium) จากผิวด้านในของเอพิไมเซียม จะมีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งล้อมรอบกล้ามเนื้อแต่ละมัดไว้ เรียกว่า เปอริไมเซียม (perimysium) ภายในกล้ามเนื้อแต่ละมัดประกอบด้วยเส้นใยกล้ามเนื้อ พังผืดที่ล้อมรอบเส้นใยกล้ามเนื้อ เรียกว่า เอ็นโดไมเซียม (endomysium) กล้ามเนื้อเหล่านี้มีเส้นเอ็น (tendons) ยึดติดกับกระดูกอีกทีหนึ่ง เนื้อเยื่อเกี่ยวพันเหล่านี้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.1

รอบ ๆ เส้นใยกล้ามเนื้อมีเยื่อหุ้ม เรียกว่า ซาร์โคเลมมา (sarcolemma) ซาร์โคเลมมาประกอบด้วย 3 ชั้น ชั้นนอกที่เป็นโครงข่าย (net work) ของคอลลาเจนไฟบริล (collagen fibrils), ชั้นกลาง (middle layer) และเยื่อพลาสมา (plasma membrane) ที่อยู่ชั้นใน เยื่อพลาสมาเกิดเป็นโครงข่ายของท่อเล็ก ๆ (tubules) เรียกว่า transverse tubules (T tubules) หรือ transverse system (T system) ปลายของ T tubules จะไปบรรจบภายในของเส้นใยกล้ามเนื้อใกล้กับถุงเทอร์มินัล (terminal sacs) ของซาร์โคพลาสมิก เรติคิวลัม ซาร์โคพลาสมิก เรติคิวลัมเป็นระบบเยื่อซึ่งอยู่ในเส้นใยกล้ามเนื้อ และมักจะจัดตัวขนานกับแกนยาวของเส้นใยกล้ามเนื้อ บริเวณที่ T tubules และซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมมาบรรจบกัน เรียกว่า triadic joint พบอยู่ภายในกล้ามเนื้อที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันขึ้นกับชนิดของกล้ามเนื้อ ในกล้ามเนื้อกบและปลา triadic joint มักอยู่ที่เส้น Z (Z line) หรือรอบ ๆ เส้น Z (รูปที่ 6.2) ส่วนในกล้ามเนื้อของสัตว์เลื้อยคลาน นกและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะอยู่ที่รอยต่อระหว่าง แบนด์ A และ I (A and I bands) (รูปที่ 6.2)

เมื่อมีการเปลี่ยนขั้ว (depolarization) ของเยื่อพลาสมาและ T tubules เป็นตัวจุดชนวนให้ปลดปล่อย Ca^{2+} จากถุงเทอร์มินัลของซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม Ca^{2+} ที่ถูกปลดปล่อยเข้าสู่ซาร์โคพลาสซึมทำให้ ATPase ของไมโอซินมีแอกติวิตีเพิ่มขึ้น และทำให้กล้ามเนื้อหดตัวพร้อม ๆ กัน เมื่อกล้ามเนื้ออยู่ในสภาพพัก ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมจะดูด Ca^{2+} กลับเข้าไปดังเดิม



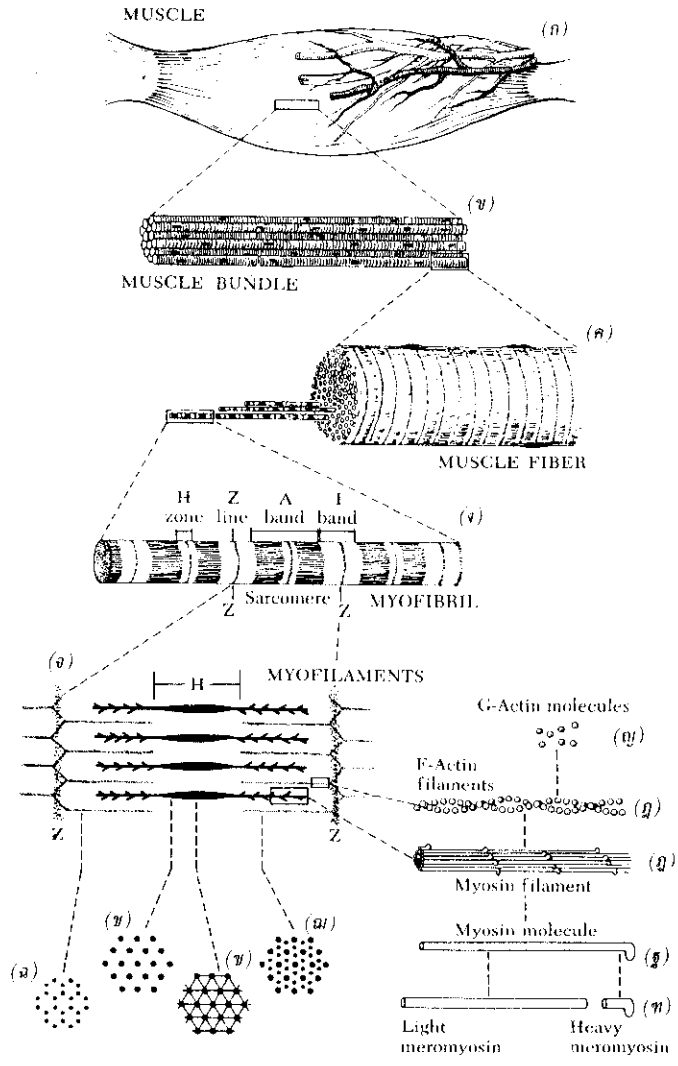
รูปที่ 6.2 เส้นใยกล้ามเนื้อ แสดง T system และซาร์โคพลาสมิกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ไมโตคอนเดรียร์เป็นแหล่งผลิตพลังงานสำหรับเซลล์ของกล้ามเนื้อ และมีอยู่ทั่วไปในเซลล์ ในบางกรณีจะมีไมโตคอนเดรียร์มากใกล้เส้น Z หรือใกล้เยื่อพลาสมา

นิวเคลียสกระจัดกระจายอยู่ใกล้ผิวของเส้นใยกล้ามเนื้อ และมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์โปรตีน

Golgi apparatus ประกอบด้วยถุง (vesicle) ภายในถุงจะบรรจุผลิตภัณฑ์จากเมตาโบลิซึมของเซลล์ เพื่อที่จะขนส่งออกนอกเซลล์ไป ฉะนั้น จึงทำหน้าที่ในขบวนการขนถ่าย (secretion)

ไลโซโซม (Lysosome) เป็นถุงเล็ก ๆ อยู่ในซาร์โคพลาสซึม ประกอบด้วยไฮโดรลิติกเอ็นไซม์ (hydrolytic enzymes) สามารถย่อยเซลล์และองค์ประกอบภายในเซลล์ ในเอ็นไซม์เหล่านี้มีกลุ่มเอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีนอยู่ด้วย ได้แก่ คาเธปซิน (cathepsins) คาเทปซินหลายตัวสามารถย่อยโปรตีนของกล้ามเนื้อได้ ดังนั้น มันจึงอาจมีส่วนในการทำให้เนื้อนุ่มระหว่างที่เก็บเนื้อ (aging) เพื่อให้คลายจากริกอร์มอร์ติส (rigor mortis)



รูปที่ 6.3 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้ามเนื้อโครงสร้าง

(ก) กล้ามเนื้อโครงสร้าง (ข) มัดกล้ามเนื้อ

(ค) เส้นใยกล้ามเนื้อแสดงไมโอไฟบริล

(ง) ไมโอไฟบริลแสดงซาร์โคเมีย แบนด์และเส้นต่าง ๆ

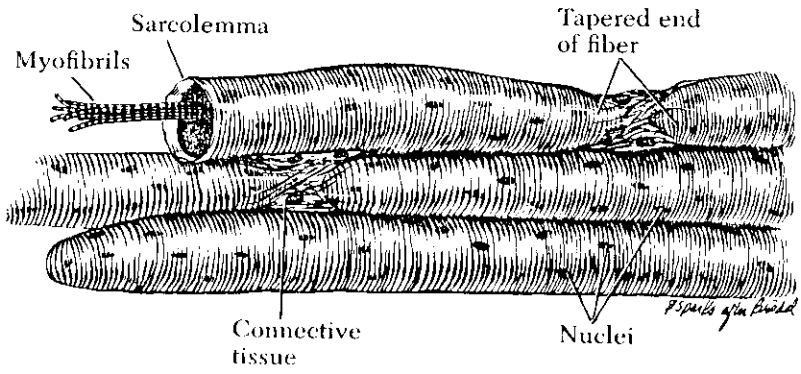
(จ) ซาร์โคเมีย แสดงตำแหน่งของไมโอฟิลาเมนต์

(ฉ-ฌ) รูปตัดตามขวางแสดงการจัดตัวของไมโอฟิลาเมนต์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของซาร์โคเมีย

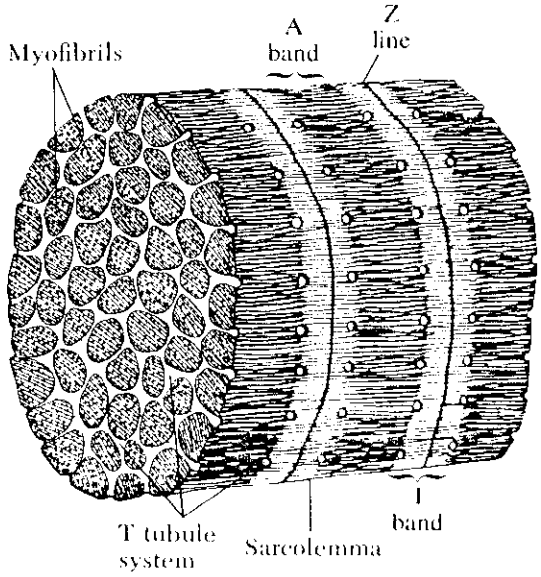
(ญ) จี-แอกติน (ฎ) เอฟ-แอกติน ฟิลาเมนต์

(ฏ) ไมโอซินฟิลาเมนต์ (ฐ) โมเลกุลไมโอซิน

(ฑ) เมโรไมโอซินเบาและเมโรไมโอซินหนัก



รูปที่ 6.4 ภาพวาดแสดงเส้นใยกล้ามเนื้อและไมโอไฟบริลในเส้นใยกล้ามเนื้อ



รูปที่ 6.5 ภาพวาดแสดงส่วนที่ตัดตามขวางของเส้นใยกล้ามเนื้อตรงรอยต่อระหว่างแบนด์ A และแบนด์ I

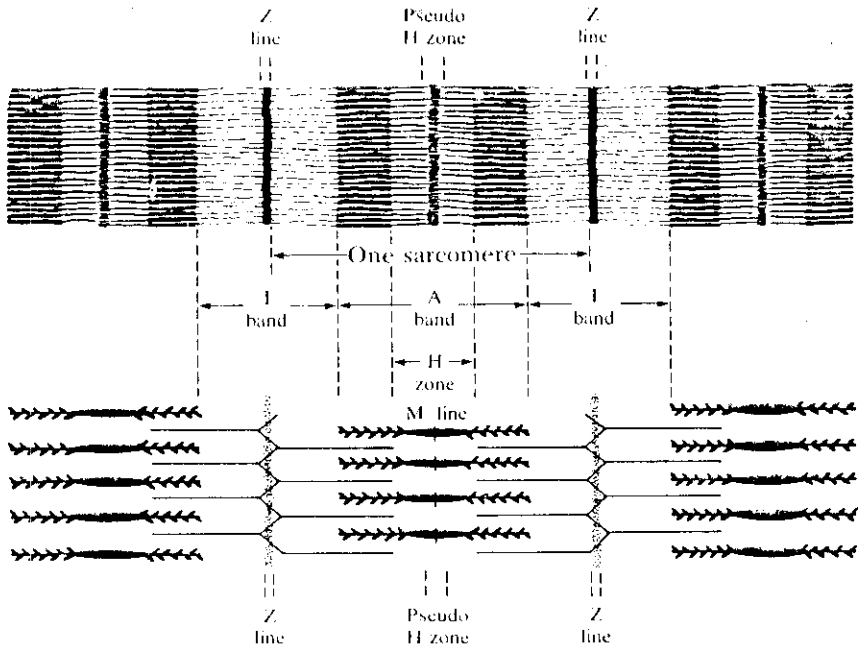
นอกจากนี้ในเส้นใยกล้ามเนื้อยังประกอบด้วยไกลโคเจน (glycogen) และลิปิดหยดเล็ก ๆ (lipid droplets)

องค์ประกอบของเส้นใยกล้ามเนื้อที่กล่าวมานี้ รวมทั้งไมโอไฟบริล (myofibril) ที่จะกล่าวถึงต่อไป มีอยู่ในซาร์โคพลาสซึม ซึ่งเป็นสารกึ่งของไหล (semifluids) และประกอบด้วยองค์ประกอบที่ละลายได้ เช่น ไมโอโกลบิน (myoglobin), เอ็นไซม์บางชนิดและสารบางชนิดจากเมตาโบลิซึมของเซลล์

เส้นใยกล้ามเนื้อแต่ละเส้นประกอบด้วยไมโอไฟบริล (myofibrils) ซึ่งเป็นไฟบริลเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก (รูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5) ไมโอไฟบริลถูกล้อมรอบโดยซาร์โคพลาสซึมและองค์ประกอบอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้ว เช่น ไมโตคอนเดรียร์, ระบบ "T tubules" และซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม

ลักษณะที่เป็นเส้นลาย ๆ ของกล้ามเนื้อโครงสร้าง เกิดจากการจัดตัวที่มีลักษณะซ้ำ ๆ ของโปรตีนในไมโอไฟบริล การจัดตัวนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.3(ง) และรูปที่ 6.6 แบนด์สีเข้มเรียกว่า แบนด์ A (A band) และแบนด์สีอ่อนเรียกว่า แบนด์ I (I band) ที่กึ่งกลางของแบนด์ I มีเส้นสีเข้มเรียกว่า เส้น Z ที่ส่วนกลางของแบนด์ A มีโซนที่มีสีอ่อนกว่าส่วนอื่นในแบนด์ A เรียกว่า โซน H และที่กึ่งกลางของโซน H มีเส้น M สีเข้ม ระยะระหว่างเส้น Z 2 เส้นที่ติดกันเรียกว่า ซาร์โคเมียร์ (sarcomere)

แต่ละซาร์โคเมียร์ประกอบด้วยฟิลาเมนต์หนาและฟิลาเมนต์บาง แบนด์ A ประกอบด้วยฟิลาเมนต์หนา ส่วนแบนด์ I ประกอบด้วยฟิลาเมนต์บาง ฟิลาเมนต์บางมีอยู่ทั้งสองด้านของเส้น Z และในส่วนของแบนด์ A ฟิลาเมนต์บางเกย (overlap) กับฟิลาเมนต์หนา โซนสีอ่อนในแบนด์ A หรือโซน H เป็นบริเวณที่ฟิลาเมนต์บางไม่เกยกับฟิลาเมนต์หนา กล้ามเนื้อที่หดตัวจะมีผลต่อขนาดของแบนด์และโซนเหล่านี้ เมื่อกล้ามเนื้อหดตัวฟิลาเมนต์บางและฟิลาเมนต์หนาจะเลื่อนข้ามซึ่งกันและกันได้ แบนด์ A จะยังมีความยาวคงที่ แต่แบนด์ I และโซน H จะหดสั้นลง เมื่อกล้ามเนื้อหดตัว



รูปที่ 6.6 ภาพวาดแสดงส่วนของไมโอไฟบริลและหนึ่งซาร์โคเมียร์และแผนภาพแสดงถึงแบนด์, โซน และเส้นภายในซาร์โคเมียร์

ที่กล่าวมานี้ เป็นกล้ามเนื้อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม กล้ามเนื้อลายของสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังและไม่มีกระดูกสันหลังส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน แต่ก็มีบางส่วนที่แตกต่างกัน เช่น การจัดตัวของไมโอไฟบริล, ปริมาณของซาร์โคพลาสซึม, ความสัมพันธ์ระหว่างนิวเคลียสและไมโตคอนเดรียกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของเส้นใยกล้ามเนื้อ, การจัดตัวของซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม และตำแหน่งของ triadic joint เป็นต้น

(1) ส่วนประกอบทางเคมีของกล้ามเนื้อ

ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อโครงสร้าง (skeletal muscle) คือ น้ำ (~75%) ซึ่งมีมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ โปรตีน (~20%) ส่วนที่เหลืออีก 5% ประกอบด้วยไขมัน คาร์โบไฮเดรตและองค์ประกอบอนินทรีย์

1. โปรตีน โปรตีนในกล้ามเนื้ออาจแบ่งได้ดังนี้

ก. โปรตีนในซาร์โคพลาสซึม (sacroplasmic proteins) เป็นโปรตีนที่สกัดได้ด้วยน้ำและสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออน (ionic strengths) ต่ำ ได้แก่ ไมโอโกลบิน (myoglobin), เฮโมโกลบิน (hemoglobin), และเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับไกลโคลิซิส (glycolysis),

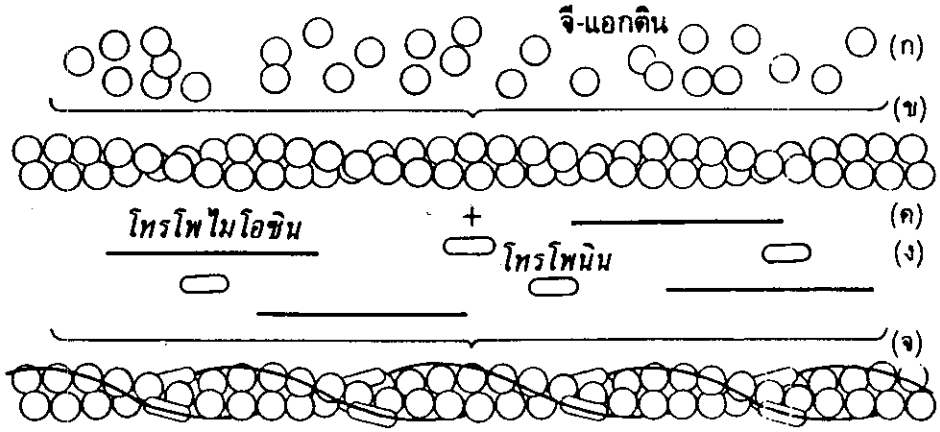
วัฏจักรกรดซิตริก (citric acid cycle) และลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport chain) เช่น glyceraldehyde phosphate dehydrogenase (GAPDH), enolase (EN), triose phosphate isomerase (TPI), phosphoglucose isomerase (PGI), creatine kinase (CK), aldolase (ALD), phosphoglucomutase (PGM), และ pyruvate kinase (PK)

ข. โปรตีนในไมโอไฟบริล (myofibrillar proteins) เป็นโปรตีนที่สกัดได้โดยใช้สารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนสูง ได้แก่ แอกติน (actin), ไมโอซิน (myosin), โทรโปไมโอซิน (tropomyosin), โทรโพนิน (troponin), แอลฟา-แอกตินิน (α – actinin) และเบต้า-แอกตินิน (β – actinin) เป็นต้น

ค. โปรตีนส่วนที่ไม่ละลายทั้งในน้ำและไม่ละลายในสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนต่ำและสูง ได้แก่ โปรตีนของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน, โปรตีนของเยื่อ (membrane proteins) และโปรตีนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อ แต่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย

(2) โปรตีนของไมโอไฟบริล

ก. แอกติน เป็นโปรตีนสำคัญของฟิลาเมนต์บาง (thin filament) มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 ของโปรตีนในไมโอไฟบริล และเป็นโปรตีนที่ติดแน่นกับโครงสร้างของกล้ามเนื้อมากกว่าไมโอซิน แอกตินประกอบด้วยกรดอะมิโนโพรลีน (proline) จำนวนมาก กรดอะมิโนนี้ประกอบด้วยหมู่อิมิโน (imino group, N—H) ทำให้เกิดการขดพันกันระหว่างโซ่โพลีเปปไทด์ (polypeptide chain) เกิดเป็นโมเลกุลรูปโกลบูลาร์ (globular shaped molecule) หรือรูปทรงกลม ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5.5 นาโนเมตร โมเลกุลรูปโกลบูลาร์นี้คือ จี-แอกติน (G-actin หรือ globular actin) และเป็นรูปโมโนเมอร์ (monomeric form) ของแอกติน แอกตินฟิลาเมนต์ (actin filament) ซึ่งเป็นเส้นใยเกิดจากจี-แอกตินโมโนเมอร์มาเชื่อมต่อกันตามยาวเกิดเป็นเอฟ-แอกติน (F-actin หรือ Fibrous actin) ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.3 (ญ) และ (ฏ) การเชื่อมต่อกันของจี-แอกตินคล้ายกับไข่มุกที่ร้อยเป็นพวงยาว เอฟ-แอกติน 2 เส้น ซึ่งขดเป็นเกลียวจะพันกันไปมา ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.3 (ฏ) เกิดเป็นซุปเปอร์เฮลิกซ์ (super helix) ซึ่งเป็นลักษณะของแอกตินฟิลาเมนต์ เส้นผ่าศูนย์กลางทั้งหมดของแอกตินฟิลาเมนต์ยาวประมาณ 6-8 นาโนเมตร ไอโซอิเล็กทริก pH (isoelectric pH หรือ pH ที่มีประจุไฟฟ้าน้อยที่สุดและการละลายน้อยที่สุด) ของแอกตินประมาณ 4.7



รูปที่ 6.7 โครงสร้างละเอียดของแอกตินฟิลาเมนต์ (ฟิลาเมนต์บาง)

(ก) จี-แอกติน

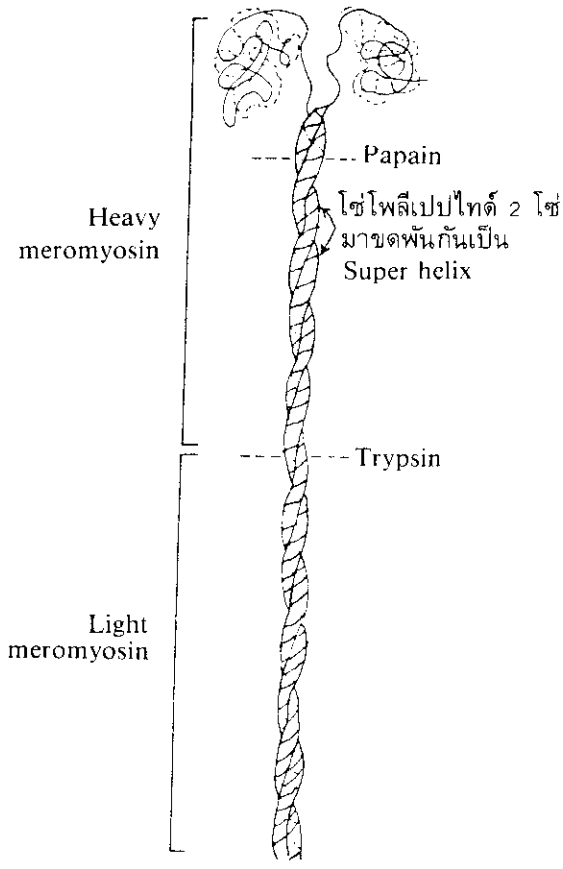
(ข) เอฟ-แอกติน เกิดจากโพลีเมอไรเซชันของโมโนเมอร์จี-แอกติน และเอฟ-แอกติน 2 โซ่มาขดพันกัน เกิดเป็นซุปเปอร์-เฮลิกซิชัน เป็นลักษณะของแอกตินฟิลาเมนต์

(ค) โมเลกุลของโทรโพไมโอซิน เป็นเส้นบางยาว

(ง) โมเลกุลของโทรโพนินรูปร่างเป็นเม็ด

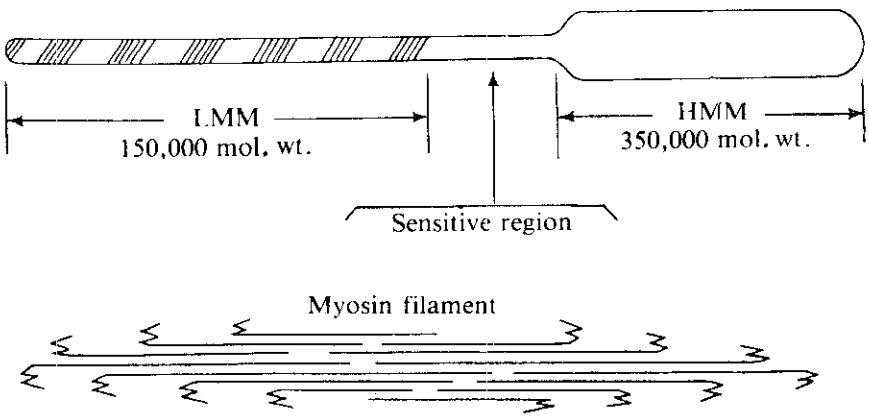
(จ) ฟิลาเมนต์บาง

ข. ไมโอซิน เป็นโปรตีนของฟิลาเมนต์หนา (thick filaments) เป็นโมเลกุลที่ยาวมากและมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500,000 ไมโอซินประกอบด้วยโซ่โพลีเปปไทด์ เหมือนกัน 2 โซ่ ซึ่งแต่ละโซ่มีโครงสร้างเป็นแอลฟา-เฮลิกซ์ (α-helical structure) โพลีเปปไทด์ 2 โซ่นี้มาขดพันกันเป็นซุปเปอร์เฮลิกซ์(super helix)ดังแสดงในรูปที่ 6.8 โมเลกุลของไมโอซินมีหัวกลม (globular heads) ซึ่งมีเอ็นไซม์ ATPase อยู่ และเป็นส่วนที่สามารถเกิดแรงกระทำ (interaction) กับแอกตินได้ เอ็นไซม์ ATPase สามารถย่อยสลาย ATP ไปเป็น ADP และฟอสเฟตอนินทรีย์ (Pi) หัวกลมนี้มี 2 หัว และเป็นส่วนที่สิ้นสุดของโพลีเปปไทด์ทั้ง 2 โซ่ ไมโอซินถูกไฮโดรไลส์ได้โดยเอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีน เช่น ทริปซิน (trypsin) ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเรียกว่า เมโรไมโอซินเบา (light meromyosin) อีกส่วนหนึ่งเรียกว่า เมโรไมโอซินหนัก (heavy meromyosin) หลังจากการไฮโดรไลส์ เมโรไมโอซินหนักก็ยังคงมีความสามารถที่จะเกิดแรงกระทำกับแอกตินได้ และแอกติวิตีของเอ็นไซม์ ATPase ก็ยังคงอยู่



รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงโมเลกุลของไมโอซิน แสดงส่วนที่เป็นหัวกลม และหางยาว และแสดงจุดที่แตกออกเมื่อถูกไฮโดรไลส์โดยเอ็นไซม์

ไมโอซินมีอยู่ประมาณร้อยละ 50-60 ของโปรตีนในไมโอไฟบริล ฟิลาเมนต์หนาแต่ละเส้นประกอบด้วยโมเลกุลของไมโอซินประมาณ 400 ไมเลกุล โมเลกุลเหล่านี้จะมีขั้วมากเมื่อมันมีแรงกระทำต่อกัน และจะต่อกันแบบหัวต่อหางใน 2 ทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 6.9 การมีขั้วของโมเลกุลนี้เองที่มีผลต่อการหดตัวของกล้ามเนื้อ ฟิลาเมนต์หนาสามารถทำให้เกิดได้จากโมเลกุลของไมโอซินที่แยกออกมา



รูปที่ 6.9 โมเลกุลของไมโอซินและส่วนของฟิลาเมนต์หนา แสดงการจัดตัวที่เป็นไปได้ของโมเลกุลของไมโอซิน

ไมโอซินสามารถสกัดได้โดยใช้น้ำเกลือที่มีความแรงของไอออนสูง (ionic strength 0.6) ที่มี pH เป็นด่างเล็กน้อย มันสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้โดยการตกตะกอนใหม่หลายครั้ง ตามด้วยการละลายในน้ำเกลือที่มีความแรงไอออนสูง สารละลายที่ใช้กันทั่วไปในการสกัด คือ 0.3 M HCl และ 0.15 M ฟอสเฟตที่ pH 6.5 หรือ 0.47 M KCl, 0.1 M ฟอสเฟต, และ 0.1 M ไพโรฟอสเฟตที่ pH 6.5

ค. แอกโตไมโอซิน เมื่อผสมแอกตินและไมโอซินที่บริสุทธิ์ในหลอดทดลอง จะเกิดสารเชิงซ้อนแอกโตไมโอซิน แอกโตไมโอซินมีลักษณะข้นมาก แม้ว่าแอกตินจะไม่มีแอกติวิตีของเอ็นไซม์ (enzymic activity) แต่มันสามารถเปลี่ยนแปลงแอกติวิตีของ ATPase ของไมโอซินในสารเชิงซ้อนแอกโตไมโอซิน แอกติวิตีของไมโอซินที่บริสุทธิ์จะถูกกระตุ้นโดย Ca^{2+} แต่ยับยั้งโดย Mg^{2+} การเกิด cross bridge ระหว่างแอกตินและไมโอซิน มีหมู่ซัลไฟดริลเกี่ยวข้องอยู่ด้วย สารเชิงซ้อนแอกโตไมโอซินในสภาวะที่เหมาะสมสามารถหดตัวได้ และสามารถแยกตัวเป็นแอกตินและไมโอซิน เมื่อมี Mg^{2+} และ ATPase อยู่ด้วย

ง. โทรโพไมโอซิน มีอยู่ร้อยละ 8 ถึง 10 ของโปรตีนในไมโอไฟบริล เป็นโมเลกุลที่มีประจุมาก โดยมีกรดอะมิโนชนิดที่เป็นกรดและเบส (acidic and basic amino acids) เป็นจำนวนมาก จุดไอโซอิเล็กตริก (isoelectric point) ของโทรโพไมโอซิน มีค่าประมาณ 5.1 โมเลกุลของโทรโพไมโอซินมีปริมาณโพรลีนต่ำ ซึ่งทำให้มันมีคุณสมบัติเป็นเส้นใย โมเลกุลของโทร-โพ ไมโอซิน ประกอบด้วยโซ่โพลีเปปไทด์ 2 โซ่ มาต่อกันปลายต่อปลาย เกิดเป็นเส้นบางยาว

ในแอกตินฟิลาเมนต์จะมีเส้นโทรโพไมโอซินพันไปตามผิวนอกของสายโซ่คู่ที่ขดเป็นเกลียวของเอฟ-แอกติน ความยาวของ 1 โมเลกุลของโทรโพไมโอซิน เท่ากับจี-แอกติน 7 โมเลกุล ในแอกตินฟิลาเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.7

จ. โทรโพนิน เป็นโปรตีนชนิดโกลบูลาร์ (globular protein) มีปริมาณโพรลีนค่อนข้างสูง มีอยู่ประมาณร้อยละ 8 ถึง 10 ของโปรตีนในไมโอไฟบริล เช่นเดียวกับโทรโพไมโอซิน โทรโพนินวางตัวอยู่ตามร่องของสายโซ่คู่ของเอฟ-แอกติน และคร่อมบนเส้นโทรโพไมโอซิน หรืออาจอยู่ใกล้ส่วนปลายของโมเลกุลของโทรโพไมโอซิน โทรโพนินจะมีอยู่เป็นระยะ ๆ ตามความยาวของแอกตินฟิลาเมนต์ ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของเอฟ-แอกติน, โทรโพไมโอซิน และโทรโพนินในแอกตินฟิลาเมนต์ แสดงอยู่ในรูปที่ 6.7 โทรโพนินสามารถจับกับ Ca^{2+} และมีบทบาทสำคัญต่อการหดตัวของกล้ามเนื้อ

โปรตีนอีก 2 ชนิดที่พบในปริมาณน้อย แต่มีความสำคัญต่อการทำงานของกล้ามเนื้อ คือ แอลฟา-แอกตินินและเบต้า-แอกตินิน โปรตีนเหล่านี้รวมอยู่กับแอกตินฟิลาเมนต์ แอลฟา-แอกตินินสามารถทำให้เอฟ-แอกตินเกิดเป็นเจลได้ (gelation) ปรากฏการณ์นี้ขึ้นกับอุณหภูมิ และผันกลับได้ถ้ามีโทรโพไมโอซินอยู่ แอลฟา-แอกตินินเป็นโกลบูลาร์โปรตีน มีอยู่ในเส้น Z (Z line) และมีอยู่ประมาณร้อยละ 2-2.5 ของโปรตีนในไมโอไฟบริล แอลฟา-แอกตินินมีส่วนต่อโครงสร้างของเส้น Z

เบต้า-แอกตินินก็เป็นโกลบูลาร์โปรตีน อยู่ที่ปลายของแอกตินฟิลาเมนต์ และเชื่อกันว่ามันเป็นสารที่ควบคุมความยาวของแอกตินฟิลาเมนต์ โดยรักษาความยาวของแอกตินฟิลาเมนต์ให้อยู่ประมาณ 1 ไมโครเมตร ในแต่ละครึ่งของซาร์โคเมียร์ ถ้าไม่มีเบต้า-แอกตินิน แอกตินฟิลาเมนต์ในหลอดทดลองจะมีความยาว 3-4 ไมโครเมตร หรือยาวกว่านี้

(3) การหดตัวของกล้ามเนื้อ

การหดตัวของกล้ามเนื้อ มีโปรตีนเกี่ยวข้องด้วยอยู่ 4 ชนิด คือ แอกติน ไมโอซิน โทรโพไมโอซินและโทรโพนิน การหดตัวของกล้ามเนื้อเกิดจากฟิลาเมนต์บาง และฟิลาเมนต์หนาในซาร์โคเมียร์ เลื่อนผ่านกันและกันโดยได้รับพลังงานจากการแยกสลายของ ATP โดยเอ็นไซม์ ATPase ระหว่างการหดตัวของกล้ามเนื้อ ส่วนหัวของไมโอซินจะเกิด crossbridge กับจี-แอกตินของแอกตินฟิลาเมนต์ เกิดเป็นสารเชิงซ้อนแอกโตไมโอซิน การเกิดแอกโตไมโอซิน

ทำให้กล้ามเนื้อเกิดการเกร็งตัวหรือหดตัว แอกโตไมโอซินเป็นโปรตีนสำคัญที่พบในกล้ามเนื้อสัตว์หลังสัตว์ถูกฆ่า การเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างโทรโพนินและโทรโพไมโอซิน สามารถยับยั้ง (inhibit) การเกิด crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซินฟิลาเมนต์

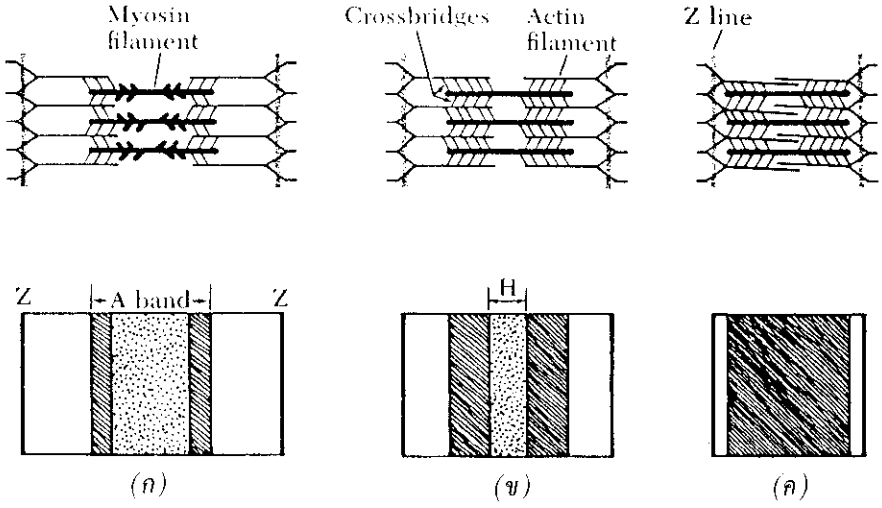
ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ก็มีบทบาทสำคัญมากในการควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อ กล้ามเนื้อที่มีชีวิต (living muscle) สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว เมื่อได้รับคำสั่งจากระบบประสาท และเมื่อหมดคำสั่งแล้วก็สามารถหยุดทำงานได้อย่างรวดเร็วด้วย อัตราการใช้ ATP ขณะทำงานอาจเพิ่มขึ้นถึงพันเท่าของอัตราขณะพักงาน ในเส้นใยกล้ามเนื้อแต่ละเส้นมีไมโอไฟบริลเป็นจำนวนมากซึ่งจะทำงานพร้อม ๆ กันเมื่อได้รับคำสั่ง การทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและพร้อมเพรียงกันนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยกล้ามเนื้อมีระบบซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม (sarcoplasmic reticulum) ซึ่งเป็นระบบที่คล้ายกับเอ็นโดพลาสมิกเรติคิวลัม (endoplasmic reticulum) ของเซลล์อื่น ๆ ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมประกอบด้วยท่อเล็ก ๆ (tubules) และถุงเทอร์มินัล (terminal sacs) ซึ่งอยู่รอบ ๆ ไมโอไฟบริล ท่อและถุงของซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมทำหน้าที่เป็นตัวดูด (pump) และปล่อย Ca^{2+} เพื่อควบคุมการทำาานของกล้ามเนื้อ เมื่อกล้ามเนื้ออยู่ในสภาพพัก ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมจะดูด (pump)Ca^{2+} เข้าตลอดเวลา โดยขบวนการ active transport ซึ่งต้องใช้พลังงานจากการแยกสลายของ ATP การดูด Ca^{2+} ต้องมีประสิทธิภาพมาก เมื่อกล้ามเนื้อได้รับคำสั่งจากระบบประสาทให้ทำงาน (หดตัว) ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมก็จะปล่อย Ca^{2+} ออกมาอย่างรวดเร็ว และเมื่อกล้ามเนื้อทำงานเสร็จแล้ว ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมจะดูด Ca^{2+} กลับเข้าไปดังเดิม

เมื่อกล้ามเนื้ออยู่ในสภาพพัก แคลเซียมจะถูกปลดปล่อยเข้าสู่ซาร์โคพลาสซึมน้อย (ความเข้มข้นของ Ca^{2+} น้อยกว่า 10^{-7} โมลต่อลิตร) และความเข้มข้นของ ATP จะต้องสูง ATP ส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารเชิงซ้อน Mg – ATP สารเชิงซ้อน Mg – ATP จะต้องมีอยู่เพื่อป้องกันการเกิด crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซิน และเพื่อให้กล้ามเนื้ออยู่ในสภาพพัก โทรโพไมโอซินและโทรโพนินจะรวมกันเป็นสารเชิงซ้อนโทรโพนิน-โทรโพไมโอซิน สารเชิงซ้อนนี้สามารถยับยั้งการเกิด crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซิน

เมื่อ Ca^{2+} ถูกปลดปล่อยเข้าสู่ซาร์โคพลาสซึมมาก (ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-5} โมลต่อลิตร) มันจะจับกับโทรโพนิน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคอนฟอร์เมชัน (conformation) ของโปรตีนในฟิลาเมนต์บาง สารเชิงซ้อนโทรโพไมโอซิน-โทรโพนินจะไม่สามารถยับยั้งการเกิด crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซินอีกต่อไป ไมโอซินจึงมีอิสระ

CM 480 231

ที่จะเกิด crossbridge กับแอกตินฟิลาเมนต์ ขณะเดียวกัน ATP จะถูกไฮโดรไลส์โดย ATPase ของไมโอซินเป็น ADP และฟอสเฟตอนินทรีย์ และให้พลังงานเคมีออกมา พลังงานเคมีจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกลในการเลื่อนแอกตินฟิลาเมนต์เข้าหากัน (รูปที่ 6.8)



รูปที่ 6.8 ความยาวของหนึ่งซาร์โคเมียร์ของเส้นใยกล้ามเนื้อ
(ก) กล้ามเนื้อยืดออก
(ข) กล้ามเนื้อในสภาพพัก
(ง) กล้ามเนื้อหดสั้นลงมาก

(4) องค์ประกอบที่ละลายได้ในกล้ามเนื้อ

องค์ประกอบที่ละลายได้ (ในน้ำและสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนต่ำ) ในกล้ามเนื้อ ได้แก่ โปรตีนของซาร์โคพลาสซึมซึ่งส่วนใหญ่เป็นเอ็นไซม์ของขบวนการไกลโคลิซิส เอ็นไซม์ของลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอน และเอ็นไซม์ของวัฏจักรซิตริก นอกจากนี้ยังมีโปรตีนซึ่งเก็บสะสมออกซิเจนได้ของเส้นใยกล้ามเนื้อ คือ ไมโอโกลบิน

องค์ประกอบอื่น ๆ ที่ละลายได้ในซาร์โคพลาสซึม ประกอบด้วยสารประกอบที่มีไนโตรเจน เช่น กรดอะมิโน นิวคลีโอไทด์ คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดแลกติก (lactic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญของไกลโคลิซิส โคแฟคเตอร์ของเอ็นไซม์ (enzyme cofactors) เป็นจำนวนมาก ไอออนอนินทรีย์ เช่น ฟอสเฟตอนินทรีย์ โพแทสเซียม โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียมและเหล็ก

(5) องค์ประกอบที่ไม่ละลายในกล้ามเนื้อ

องค์ประกอบที่ไม่ละลายในกล้ามเนื้อ ได้แก่ องค์ประกอบที่ไม่ละลายทั้งในน้ำ สารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนต่ำ และสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนสูง ซึ่งใช้สกัดโปรตีนในไมโอไฟบริลได้ โปรตีนที่ไม่ละลายในกล้ามเนื้อ ได้แก่ โปรตีนบางส่วนที่ไม่ละลายที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อ โปรตีนของเยื่อบางส่วน และโปรตีนที่มีมากที่สุด คือ โปรตีนของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่ละลายที่มีมากที่สุดในกล้ามเนื้อด้วย

นอกจากนี้ ยังมีองค์ประกอบที่ไม่ละลายอื่น ๆ เช่น เม็ดไกลโคเจน (glycogen granules) และไขมันหยดเล็ก ๆ (lipid droplets)

สารลิปิดที่มีมากที่สุดในกล้ามเนื้อ รวมอยู่กับเยื่อต่าง ๆ และสารเหล่านี้ปกติจะมีฟอสฟอลิปิด (phospholipids) อยู่มาก ปริมาณของฟอสฟอลิปิดของเยื่อจะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของเยื่อ ในส่วนของลิปิดของไมโตคอนเดรียจะมีฟอสฟอลิปิดอยู่ร้อยละ 90 และในเยื่อพลาสมาจะมีฟอสฟอลิปิดร้อยละ 50 ปริมาณของลิปิดในกล้ามเนื้อมีน้อย มีเพียงประมาณร้อยละ 3 ถึง 4 ของน้ำหนักทั้งหมดของเส้นใยกล้ามเนื้อ แต่ลิปิดเหล่านี้มีความสำคัญมาก เพราะมันเป็นส่วนของโครงสร้างของเยื่อต่าง ๆ และมีความสำคัญมากต่อปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกลิ่นหืนในเนื้อสัตว์

ฟอสฟอลิปิดที่สำคัญคือ เลซิธิน (lecithin) หรือฟอสฟาติดิลคอลีน (phosphatidyl choline), ฟอสฟาติดิลเอธานอลามีน (phosphatidyl ethanolamine), ฟอสฟาติดิลเซอรีน (phosphatidyl serine), ฟอสฟาติดิลอิโนซิตอล (phosphatidyl inositol) และกลีเซอรอลฟอสฟาไทด์ที่เป็นกรด (acidic glycerol phosphatides) บางชนิด เช่น คาร์ดิโอไลพิน (cardiolipin) ส่วนประกอบของลิปิดจะแตกต่างกัน ขึ้นกับกล้ามเนื้อของสัตว์แต่ละชนิด

ลิปิดที่เป็นกลางที่สำคัญในกล้ามเนื้อ คือ ไตรกลีเซอไรด์และคอเลสเตอรอล (cholesterol)

(6) ชนิดของกล้ามเนื้อ

กล้ามเนื้ออาจแยกได้เป็น 2 ชนิด ตามสีที่ปรากฏให้เห็นเป็นกล้ามเนื้อขาวและกล้ามเนื้อแดง แม้แต่กล้ามเนื้อของสัตว์ตัวเดียวกัน ก็อาจมีสีแตกต่างกันได้ เช่น กล้ามเนื้ออกไก่มีสีขาว ส่วนกล้ามเนื้อของน่องไก่มีสีเข้ม นอกจากนี้ สีของเนื้อชิ้นเดียวกันยังอาจมีสีแตกต่างกัน โดยมีสีแดงที่ส่วนนอกของเนื้อมากกว่าส่วนกลาง โดยทั่วไปกล้ามเนื้อสีขาวจะสามารถหดตัวได้เร็วและล้า (fatique) เร็วด้วย ส่วนกล้ามเนื้อสีแดงหดตัวช้ากว่ามาก แต่หดตัวอยู่ได้

นานกว่า

การจำแนกกล้ามเนื้อตามสีที่ปรากฏนั้น ไม่ค่อยถูกต้องนัก เพราะกล้ามเนื้อส่วนใหญ่ประกอบด้วยเส้นใยทั้งสีแดงและสีขาว กล้ามเนื้อสีแดงก็คือกล้ามเนื้อที่ประกอบด้วยเส้นใยสีแดงมากกว่าเส้นใยสีขาว ส่วนกล้ามเนื้อสีขาวคือ กล้ามเนื้อที่ประกอบด้วยเส้นใยสีขาวมากกว่าเส้นใยสีแดง ดังนั้น กล้ามเนื้อจึงอาจแตกต่างกันที่ระดับความแดงและระดับความขาว

นอกจากความแตกต่างของสีแล้ว ยังมีลักษณะอื่น ๆ ที่แตกต่างกันอีก เช่น เส้นใยสีแดงมักจะเล็กกว่า (เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า) ประกอบด้วยไมโตคอนเดรียมากกว่า และมีขนาดใหญ่กว่า มีความเข้มข้นของไมโอโกลบินและลิปิดมากกว่า มีความหนาแน่นของท่อรูเข็ม (capillary density) มากกว่า ซึ่งจะช่วยในการขนส่งของเสียจากเมตาโบลิซึมและสารอาหาร (โดยเฉพาะออกซิเจน) ไปมาผ่านเส้นเลือด อย่างไรก็ดี โกลโคเจนและเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับไกลโคลิซิสในเส้นใยสีแดง จะน้อยกว่าในเส้นใยสีขาว นอกจากนี้ เส้นใยสีแดงยังมีซาร์โคเลมมาที่หนากว่า ลักษณะเป็นเม็ด (granular) น้อยกว่าเส้นใยสีขาว เส้น Z ของเส้นใยสีแดงก็หยาบกว่าและหนากว่าเส้นใยสีขาว

การจำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อเป็นสีแดงและขาว ยังไม่สมบูรณ์นัก เพราะยังมีเส้นใยกล้ามเนื้ออีกประเภทหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างเส้นใยสีแดงและเส้นใยสีขาว จึงเรียกว่า เส้นใยอินเทอร์มีเดียท (intermediate fiber) คุณลักษณะหลายอย่างของเส้นใยสีแดง สีขาว และเส้นใยอินเทอร์มีเดียทแสดงอยู่ในตารางที่ 6.2

เส้นใยสีแดงและสีขาวมีแอกติวิตีทางชีวเคมี (biochemical activities) หลายอย่างแตกต่างกัน เส้นใยสีแดงมีระบบท่อมากกว่า จึงมีปริมาณออกซิเจนมากในเส้นใย และยังมีปริมาณของไมโอโกลบินสูง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมตาโบลึซึมที่ใช้ออกซิ-เจนอยู่มาก ดังนั้น เส้นใยสีแดงจึงมีอัตราการเกิดเมตาโบลิซึมที่ใช้ออกซิเจน (oxidative metabolism) สูงกว่าเส้นใยสีขาว และปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถดำเนินต่อเนื่องกัน ตราบใดที่ยังมีออกซิเจนอยู่ และให้พลังงานออกมา ปริมาณของลิปิดที่มากกว่าในเส้นใยสีแดง ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเมตาโบลิซึมได้ด้วย ส่วนเส้นใยสีขาวมีเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับไกลโคลิซิสมากกว่าเส้นใยสีแดง เมตาโบลิซึมของไกลโคเจน (glycolytic metabolism) สามารถเกิดได้โดยใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ นอกจากนี้ เส้นใยสีขาวยังมีซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมและระบบ T tubules ที่พัฒนาแล้วอยู่มากกว่า นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้เส้นใยสีขาวหดตัวได้เร็วกว่าเส้นใยสีแดงแต่ล้า (fatigued) เร็วกว่า ส่วนเส้นใยสีแดงหดตัวช้ากว่ามาก แต่หดตัวได้นาน เพราะ

เมตาโบลิซึมยังคงดำเนินต่อไป ตราบใดที่มีออกซิเจนอยู่ ส่วนเส้นใยอินเทอร์มีเดียทหดตัวได้เร็วกว่าเส้นใยสีแดง แต่ล้าช้ากว่าเส้นใยสีขาว

ตารางที่ 6.2 คุณลักษณะของเส้นใยสีแดง เส้นใยสีขาว และเส้นใยอินเทอร์มีเดียท

คุณลักษณะ	เส้นใยสีแดง	เส้นใยอินเทอร์มีเดียท	เส้นใยสีขาว
สี	แดง	แดง	ขาว
ปริมาณไมโอโกลบิน	สูง	สูง	ต่ำ
เส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใย	เล็ก	เล็ก-กลาง	ใหญ่
อัตราการหดตัว	ช้า	เร็ว	เร็ว
ลักษณะการหดตัว	ต่อเนื่องนาน	ต่อเนื่องนาน	คลายเร็ว
จำนวนไมโตคอนเดรีย	มาก	ปานกลาง	น้อย
ความหนาแน่นของท่อรูเข็ม	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ขนาดของไมโตคอนเดรีย	ใหญ่	ปานกลาง	เล็ก
เมตาโบลิซึมที่ใช้ออกซิเจน	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
เมตาโบลิซึมของไกลโคเจน	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
ปริมาณลิปิด	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ปริมาณไกลโคเจน	ต่ำ	สูง	สูง

6.1.2 เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

เนื้อเยื่อเกี่ยวพันประกอบด้วยเส้นใยหลายชนิด เซลล์หลายชนิด และ ground substances เนื้อเยื่อเกี่ยวพันทำหน้าที่ยึดและค้ำจุนกล้ามเนื้อ ได้แก่ เส้นเอ็น (tendons), พวกพังผืด เช่น เอพิไมเซียม (epimysium), เพอริไมเซียม (perimysium) และเอ็นโดไมเซียม (endomysium)

Ground substances เป็นสารผสมที่ไม่มีโครงสร้างแน่นอน (nonstructured mixture) ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตโปรตีนและลิปิด (lipids) สารผสมนี้บางส่วนล้อมรอบเซลล์อยู่เป็นส่วนของซาร์โคเลมมา

มีเซลล์หลายชนิดในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ได้แก่ ไฟโบรบลาสต์ (fibroblasts), เซลล์มีเซน-

เมสเคม์ (mesenchyme cell), เซลล์มาโครฟาจ (macrophages), เซลล์ลิมฟอยด์ (lymphoid cells), เซลล์แมสต์ (mast cells) และเซลล์อีออซิโนฟิลิก (eosinophilic cells)

เซลล์ไขมันเป็นเซลล์ที่น่าสนใจ เซลล์ไขมันเกิดจากเซลล์มีเซนไคม์ที่ไม่เปลี่ยนสภาพ (undifferentiate mesenchyme cells) และมักจะเกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นเลือดในกล้ามเนื้อ เมื่อเริ่มมีเซลล์ไขมัน มันจะค่อย ๆ สะสมหยดไขมันและหยดไขมันเหล่านี้จะสะสมมากเข้าจนกลายเป็นเซลล์ไขมันที่เจริญเต็มที่ประกอบด้วยเม็ดไขมันใหญ่เม็ดเดียว เซลล์ไขมันเริ่มแรกประกอบด้วยไซโตพลาสซึม, ไมโตคอนเดรีย ไรโบโซมอิสระและเอ็นโดพลาสมิกเรติคิวลัม (endoplasmic reticulum) เมื่อเซลล์ไขมันโตเต็มที่ มันจะมีไขมันอยู่เต็มไซโตปลาสซึม ไมโตคอนเดรีย, นิวเคลียส และองค์ประกอบอื่น ๆ ของเซลล์จะถูกผลักดันไปอยู่ด้านข้าง เซลล์ไขมันมีอยู่เป็นจำนวนมากและมีทั่วไปในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ที่แข็งแรงและโตเต็มที่แล้ว ในสัตว์อ่อน มักจะมีการสะสมไขมันรอบ ๆ ไส้พุงและไต และเมื่อสัตว์รับประทานอาหารมากและเจริญเติบโตมากขึ้น ไขมันจะสะสมอยู่ระหว่างกล้ามเนื้อ อยู่ใต้ผิวหนังและในที่สุดจะแทรกอยู่ภายในกล้ามเนื้อ (marbling fat) การที่จะให้มีไขมันแทรกอยู่ใต้ผิวหนัง จำเป็นต้องให้อาหารสัตว์เป็นจำนวนมาก ไขมันที่อยู่รอบและภายในกล้ามเนื้อจะไม่คงที่ แต่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับอาหารที่สัตว์บริโภคและปัจจัยอื่น ๆ กล้ามเนื้อที่มีมันแทรกอยู่เป็นกล้ามเนื้อชั้นดีและมีราคาแพง เพราะจะมีกลิ่นรสดีกว่าเนื้อที่ไม่มีมันแทรก เนื้อชนิดนี้จะมีความนุ่ม (tenderness) และฉ่ำ (juiciness)

ปริมาณของไขมันในเนื้อสัตว์แตกต่างกันตามส่วนต่าง ๆ ของกล้ามเนื้อ เช่น เนื้อน่องมีไขมันน้อยกว่าเนื้อสันและเนื้อสะโพก เนื้อหมูมีไขมันมากกว่าเนื้อวัว และเนื้อไก่แก่มีไขมันมากกว่าเนื้อไก่อ่อน

สีของเนื้อเยื่อไขมันขึ้นกับชนิดของสัตว์ พันธุ์สัตว์ อายุ และอาหารของสัตว์ มันของควาย แกะ และหมูมีสีขาว ส่วนมันวัวมีสีเหลืองซึ่งมาจากสีของแคโรทีนอยด์ในอาหาร อาหารที่มีแคโรทีนอยด์สูงมันวัวจะยิ่งเหลือง มันของวัวแก่มีสีเหลืองกว่าวัวอ่อน มันของวัวพันธุ์นมก็เหลืองกว่าวัวพันธุ์เนื้อ

เยื่อที่อยู่รอบ ๆ เซลล์ไขมันประกอบด้วยฟอสฟอลิปิด (phopholipids) เล็กน้อย และมีคอเลสเตอรอล (cholesterol) อยู่บ้าง ปริมาณของลิปิดที่มีมากที่สุดในเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) คือ ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ ไขมันเหล่านี้สามารถใช้เป็นน้ำมันในการประกอบอาหาร นอกจากนี้ น้ำมันเหล่านี้ยังอาจนำไปผลิตเป็นชอทเทอร์นิ่ง (shortening) และมาร์การีน (margarine) ในทางอุตสาหกรรม

6.1.3 โปรตีนของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

โปรตีนสำคัญในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน คือ คอลลาเจน (collagen), อีลาสติน (elastin) และเรติคิวลีน (reticulin)

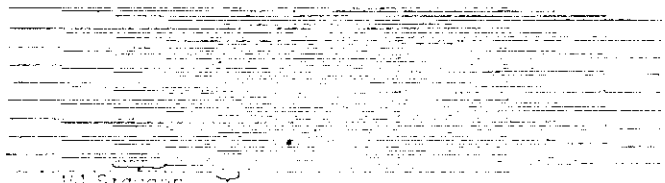
ก. คอลลาเจน

คอลลาเจนเป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และมีความสำคัญต่อความเหนียวของเนื้อ คอลลาเจนเป็นโปรตีนสำคัญของโครงสร้างของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และเป็นองค์ประกอบสำคัญของเส้นเอ็น (tendens), ผิวหนัง, กระดูก, ระบบเส้นเลือดของสัตว์ และเป็นพังผืดหุ้มกล้ามเนื้อ คอลลาเจนมีอยู่ประมาณเท่ากับหรือมากกว่าหนึ่งในสามของโปรตีนทั้งหมดในกล้ามเนื้อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ส่วนหนึ่งของคอลลาเจนละลายได้ในสารละลายเกลือที่เป็นกลาง บางส่วนละลายได้ในสารละลายเกลือที่เป็นกรด และบางส่วนไม่ละลาย

หน่วยย่อยของโครงสร้างของคอลลาเจน คือ โทรโพคอลลาเจนซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 2,800 แองสตรอม (Å) และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 ถึง 15 แองสตรอม (Å) ประกอบด้วยโพลีเปปไทด์ 3 โซ่ (ใน 3 โซ่นี้ มี 2 โซ่เหมือนกัน) ขดพันกันไปมาเป็นซุปเปอร์เฮลิกซ์ (superhelix) โซ่โพลีเปปไทด์ ในโทรโพคอลลาเจนมี 2 ชนิด เรียกว่า ชนิดที่ 1 และ 2 ซึ่งมีขนาดประมาณเท่า ๆ กัน แต่ละโซ่ของโพลีเปปไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 เกิดเป็นโมเลกุลของโทรโพคอลลาเจนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 300,000 โพลีเปปไทด์ในโทรโพคอลลาเจนมีโครงสร้างแบบเฮลิกซ์ (helical structural) แต่แตกต่างไปจากแอลฟา-เฮลิกซ์ (α – helix)ธรรมดาทั่วไป เพราะปริมาณของโพรลีน (proline) ซึ่งมีมากทำให้มันไม่สามารถเกิดเป็นแอลฟา-เฮลิกซ์ โมเลกุลของโทรโพคอลลาเจนจะเชื่อมต่อกันปลายต่อปลาย และอยู่ติดกันเกิดเป็นคอลลาเจนไฟบริล (collagen fibril) แต่ละโมเลกุลของโทรโพคอลลาเจน จะวางเหลื่อมกับโทรโพคอลลาเจนอีกโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวของมัน ทำให้เกิดเป็นลายขวางบนเส้นใยคอลลาเจน ดังแสดงในรูปที่ 6.9

CM 480 237

(ก)



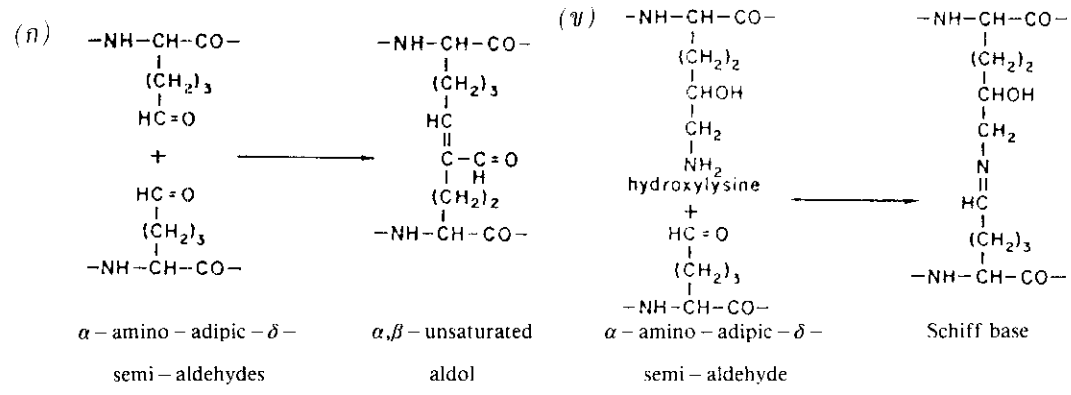
(ข)

รูปที่ 6.9 (ก) ภาพแสดงคอลลาเจนไฟบริล
(ข) การเขียนแสดงการวางตัวของโมเลกุลของโทรโพคอลลาเจน ในคอลลาเจนไฟบริล

กรดอะมิโนที่มีมากที่สุดในคอลลาเจน คือ ไกลซีน (glycine) ซึ่งมีอยู่ประมาณหนึ่งในสามของกรดอะมิโนทั้งหมด และกรดอะมิโนนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอที่ทุก ๆ ตำแหน่งที่สามของโซ่เปปไทด์ตลอดเกือบทั้งโมเลกุล ยกเว้นช่วงของกรดอะมิโน 15 ตัวแรก นับจากปลายไนโตรเจน (N terminus) และช่วงของกรดอะมิโน 10 ตัวแรก นับจากปลายคาร์บอน (C – terminus) ที่ไม่มีการจัดตัวของไกลซีนในลักษณะดังกล่าว คอลลาเจนยังมีลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ คือ มีปริมาณของไฮดรอกซีโพรลีนสูง (มากถึง 10%) และประกอบด้วยกรดอะมิโนไฮดรอกซีไลซีน (hydroxylysine) นอกจากนี้ ยังมีกรดอะมิโนโพรลีนมากด้วย ในโมเลกุลของคอลลาเจนแทบไม่มีกรดอะมิโนทริปโตเฟน (tryptophan) อยู่เลย คอลลาเจนจึงเป็นโปรตีนที่มีคุณค่าน้อยในทางโภชนาการ

ระหว่างโซ่โพลีเปปไทด์ของโทรโพคอลลาเจน สามารถเกิดครอสลิงค์แบบพันธะโคเวเลนต์ (covalent crosslinks) ถ้าโซ่โพลีเปปไทด์สองโซ่ของโทรโพคอลลาเจนเกิดครอสลิงค์แบบพันธะโคเวเลนต์กัน จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เบต้า คอมโพเนนต์ (β – component) และถ้าโซ่โพลีเปปไทด์สามโซ่มาเชื่อมโดยเกิดครอสลิงค์แบบพันธะโคเวเลนต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า แกมม่า คอมโพเนนต์ (γ component) การเกิดครอสลิงค์ระหว่างโมเลกุลของโทรโพคอลลาเจนจะเกิดขึ้นเอง โดยวิธีคอนเดนเซชันของหมู่แอลดีไฮด์ (condensation of aldehyde groups) เรียกว่า แอลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol condensations) หรือโดยการเกิด Schiff base

เมื่อแอลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโน ปฏิกิริยาเหล่านี้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 การเกิดครอสลิงค์ในคอลลาเจนโดยหมู่ข้างเคียงของโซ่ (side chain groups)
(ก) แอลดอลคอนเดนเซชันตามด้วยการสูญเสียน้ำ
(ข) การเกิด Schiff base ไลซีนจะทำปฏิกิริยาในลักษณะที่เหมือนกับไฮดรอกซีไลซีน

การเกิดครอสลิงค์ในคอลลาเจน จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัตว์มีอายุมากขึ้น นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้สัตว์แก่มีเนื้อเหนียวกว่าสัตว์อ่อน ถึงแม้ว่าในสัตว์อ่อนอาจจะมีคอลลาเจนในกล้ามเนื้อมากกว่าสัตว์แก่ แต่คอลลาเจนของสัตว์อ่อนเกิดครอสลิงค์น้อยกว่า คอลลาเจนของสัตว์อ่อนเป็นชนิดที่ละลายน้ำได้ แต่สัตว์แก่เป็นชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

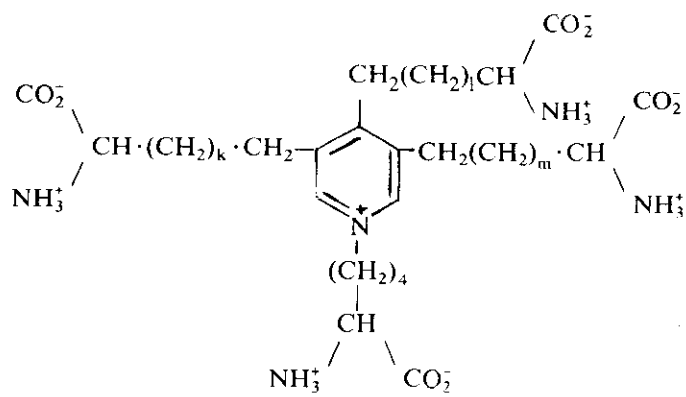
เอ็นไซม์ที่ไฮโดรไลส์คอลลาเจน เรียกว่า Collagenase ซึ่งเกิดโดยธรรมชาติ ในกล้ามเนื้อและมันยังอาจมาจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมา เอ็นไซม์เหล่านี้ปกติจะทำให้โซ่ของคอลลาเจนแตกได้อย่างมาก 3 โซ่ และไม่ทำให้มันสูญเสียโครงสร้างแบบเฮลิกซ์ เอ็นไซม์นี้อาจมีส่วนในการทำให้เนื้อนุ่มในช่วงที่เก็บเนื้อไว้มาก ภายหลังสัตว์ถูกฆ่า

ถ้าต้มเส้นใยคอลลาเจนนาน ๆ พันธะระหว่างโมเลกุล (intermolecular bonds), พันธะภายในโมเลกุล (intramolecular bonds) เช่น พันธะที่เกิดจากแอลดอลคอนเดนเซชันและพันธะของ Schiff base ตลอดจนพันธะเปปไทด์ของโซ่สำคัญบางโซ่ จะถูกไฮโดรไลส์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคอลลาเจนจากโพลิเปปไทด์ 3 โซ่ พันกันไปเป็นรูปอสัณฐาน (amorphous form) เรียกว่า เจลาติน (gelatin) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ หมายถึง การแปลงสภาพ (denaturation) ของโมเลกุลของคอลลาเจน แต่ยังไม่ถึงจุดที่ทำลายโครงสร้างทั้งหมดของมัน เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นคอลลาเจนจะเปลี่ยนเป็นกาว (glue) แทนที่จะเป็นเจลาติน

ข. อีลาสติน (elastin)

อีลาสตินเป็นโปรตีนที่มีอยู่ในปริมาณน้อยกว่าคอลลาเจนมาก มีลักษณะคล้ายยาง คือ ยืดออกได้มากและหดกลับที่เดิมได้ทันที อีลาสตินมีในเส้นเอ็น (ligament) และผนังของเส้นโลหิตแดงและอวัยวะอื่น ๆ อีลาสตินพบมากในกล้ามเนื้อวัว แต่ในกล้ามเนื้อสัตว์อื่นมีปริมาณอีลาสตินค่อนข้างน้อย ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในอีลาสตินแตกต่างจากคอลลาเจน แต่ไกลซีนก็ยังคงมีมากที่สุดในอีลาสติน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโพรลีนในปริมาณมากพอควร กรดอะมิโนพิเศษที่พบในอีลาสตินคือ เดสโมซีน (desmosine) และไอโซเดสโมซีน (isodesmosine)

โมเลกุลของเดสโมซีนและไอโซเดสโมซีน ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล 4 หมู่ และกรดอะมิโนไลซีน 4 โมเลกุล และมีวงควอเทอนารีไพริดิเนียม (quarternary pyridinium rings) ด้วย แต่กรดอะมิโนนี้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งแตกต่างจากกรดนิโคตินิก (nicotinic acid) ไพริดินนิวเคลียส (pyridine nucleus) ของกรดอะมิโนสองชนิดนี้ ถูกทำลายได้โดยการออกซิไดส์อย่างอ่อนด้วยแอลคาไลน์เฟอร์ไรไซยาไนด์ (alkaline ferricyanide) จากผลของการออกซิไดส์นี้ เดสโมซีนและไอโซเดสโมซีนส่วนใหญ่จะถูกทำลาย และไลซีนจะถูกปลดปล่อยออกมา



Desmosine

(โครงสร้างบางส่วนที่เป็นไปได้)

อีลาสตินไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้เพราะมันประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่โพลา (nonpolar amino acids) จำนวนมาก (ประมาณ 90%) นอกจากนี้ยังอาจเกิดครอสลิงค์ระหว่างโซ่โพลีเปปไทด์ของอีลาสตินด้วย

โมเลกุลของอีลาสตินไม่มีกรดอะมิโนที่จำเป็นในด้านโภชนาการอยู่ มันจึงมีคุณค่าน้อย

โปรตีนเหล่านี้ทำให้เนื้อสัตว์เหนียว

ค. เรติคิวลิน (Reticulin)

เรติคิวลินประกอบด้วยเส้นใยเล็ก ๆ ซึ่งเกิดเป็นโครงข่ายที่ละเอียดอ่อน (delicate networks) อยู่รอบ ๆ เซลล์ต่าง ๆ ในเส้นโลหิตแดง, ในโครงสร้างของระบบประสาทและเยื่อบุผิว ระหว่างการเจริญเติบโตของลูกสัตว์ในท้อง เส้นใยที่เกิดขึ้นครั้งแรกคือเส้นใยเรติคิวลิน และต่อมาจะเพิ่มจำนวนขึ้น แต่มีเส้นใยคอลลาเจนเกิดมากจนท่วมทัน อย่างไรก็ตาม เส้นใยเรติคิวลินยังคงมีอยู่ในกล้ามเนื้อสัตว์จนสัตว์โตเต็มที่แล้ว และเป็นส่วนของโครงสร้างของพวกเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

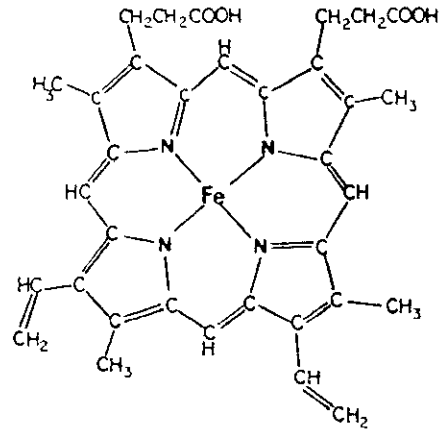
6.1.4 สีของเนื้อ

รงควัตถุที่ให้สีแดงของเนื้อสัตว์เป็นโปรตีน ได้แก่ ไมโอโกลบิน (myoglobin) ซึ่งมีมากในกล้ามเนื้อ และเฮโมโกลบิน (hemoglobin) ซึ่งมีมากในเลือด ในกล้ามเนื้อ เฮโมโกลบินจะยังคงเหลือติดอยู่บ้างในเส้นเลือดฝอย และในอวัยวะที่มีเลือดไปหล่อเลี้ยงมาก เช่น ตับและหัวใจ เป็นต้น รงควัตถุทั้งสองชนิดนี้มีหน้าที่รับออกซิเจนไว้ใช้สำหรับเมตาโบลิซึมของสัตว์ เฮโมโกลบินพาออกซิเจนไปตามเส้นโลหิตไปสู่อวัยวะต่าง ๆ ส่วนไมโอโกลบินรับออกซิเจนจากเฮโมโกลบินเพื่อใช้ในการหดตัวของกล้ามเนื้อ

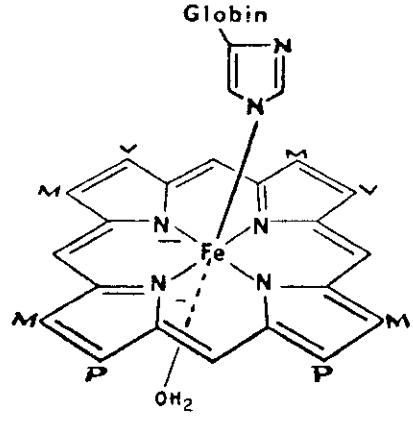
ไมโอโกลบินและเฮโมโกลบินเป็นโปรตีนที่ซับซ้อน ประกอบด้วยฮีม (heme) และส่วนที่เป็นโปรตีนคือโกลบิน (globin) ฮีมประกอบด้วยวงพอร์ไฟรีน (porphyrin ring) ซึ่งแบนราบและเหล็ก ฮีมมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับคลอโรฟิลล์โดยแมกนีเซียมถูกแทนที่ด้วยเหล็ก

ไมโอโกลบินประกอบด้วยฮีมเพียงหมู่เดียว ส่วนเฮโมโกลบินประกอบด้วยฮีม 4 หมู่ เราจึงอาจพิจารณาได้ว่า เฮโมโกลบินประกอบด้วยไมโอโกลบิน 4 โมเลกุล ในการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของรงควัตถุเหล่านี้ เราจึงจะกล่าวเฉพาะของไมโอโกลบินเท่านั้น รูปที่ 6.11 แสดงโครงสร้างของฮีมซึ่งเมื่อรวมกับโกลบิน จะเกิดเป็นไมโอโกลบิน (รูปที่ 6.12)

CM 480 241

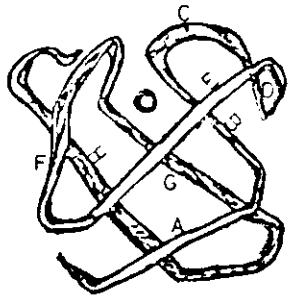


รูปที่ 6.11 โครงสร้างของฮีม



รูปที่ 6.12 โครงสร้างของไมโอโกลบิน

ความจริงโครงสร้างของไมโอโกลบินซับซ้อนกว่าที่เห็นอยู่นี้มาก ถ้ามองแบบง่าย ๆ คือ ส่วนของโปรตีนจะขดวนรอบเหล็กของฮีมเป็นแบบแอลฟา-เฮลิกซ์ รวมแล้วมีส่วนที่ขดอยู่ 8 แห่ง (A ถึง H) ดังแสดงในรูปที่ 6.13

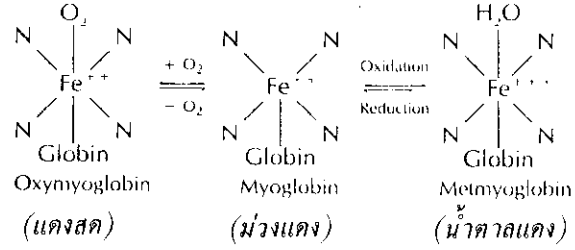


รูปที่ 6.13 โครงสร้างรูปสามมิติของโมเลกุลของไมโอโกลบิน

จากรูปที่ 6.13 เหล็กและฮีมแสดงโดยวงกลมอยู่ที่ส่วนกลางด้านบนของรูป และโซ่เปปไทด์ที่เป็นเฮลิกซ์แสดงโดย A ถึง H โดยเริ่มต้นจากปลายของหมู่อะมิโนจนถึงปลายของหมู่คาร์บอกซีของโมเลกุล

ไมโอโกลบินเป็นโปรตีนที่พบในซาร์โคพลาสซึมของกล้ามเนื้อ ละลายได้ในน้ำและสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนต่ำ ไมโอโกลบินของสัตว์ที่มีชีวิตมีสีม่วงแดง เมื่อรวมกับออกซิเจนจะมีสีแดงของออกซีไมโอโกลบิน (oxymyoglobin) เมื่อสัตว์ถูกฆ่า ออกซิเจนถูกใช้ไปหมดอย่างรวดเร็ว ไมโอโกลบินจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง ถ้าเก็บเนื้อไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (แช่แข็ง) เป็นเวลานาน เนื้อชั้นในจะมีสีม่วงแดง เพราะไม่ได้รับออกซิเจน เวลาตัดขายตามร้านตัดมีสีแดงสดชั่วขณะหนึ่ง เพราะไมโอโกลบินรวมกับออกซิเจนในอากาศอีก ด้วยเหตุนี้ เนื้อจึงมีสีแดงสดเฉพาะด้านนอก ส่วนด้านในมีสีม่วงแดง

สีน้ำตาลแดง สีเทา และสีเขียว เป็นสีที่ผิดปกติของเนื้อ สีน้ำตาลของเนื้อเป็นสีของเมทไมโอโกลบิน (metmyoglobin) ซึ่งเกิดจากออกซิเดชันของเหล็กในไมโอโกลบิน จาก Fe^{++} ไปเป็น Fe^{+++} ไมโอโกลบินดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตที่ λ_{max} 555 นาโนเมตร อยู่ในส่วนที่เป็นสีเขียวของสเปคตรัมและเกิดเป็นสีม่วง ส่วนเมทไมโอโกลบินมีพีคสำคัญที่ 505 นาโนเมตรในส่วนที่เป็นสีน้ำเงินของสเปคตรัม และมีพีคเล็ก ๆ ที่ 627 นาโนเมตรในส่วนที่เป็นสีแดงของสเปคตรัม สีที่ปรากฏให้เห็นจึงเป็นสีน้ำตาล รูปที่ 6.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงรงควัตถุในเนื้อดิบ



รูปที่ 6.14 การเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุในเนื้อดิบ

การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ไม่ทำให้กลิ่นรสของเนื้อเปลี่ยนไป เพียงแต่ทำให้สีไม่น่าดู สารที่ลดออกซิเจน เช่น กรดแอสกอร์บิก มีประโยชน์ในการรีดิวส์เมทไมโอโกลบินกลับไปเป็นไมโอโกลบินได้

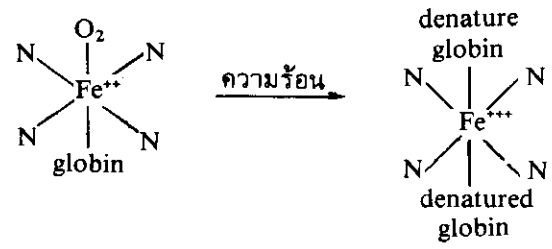
การเกิดเมทไมโอโกลบินเกิดเร็วมาก ถ้าหากเนื้อมีเชื้อแบคทีเรียเจือปนอยู่ และที่อุณหภูมิสูง ในสภาวะที่ทำให้โกลบินถูกแปลงสภาพ (denatured) จะเร่งปฏิกิริยาการเกิดเมทไมโอโกลบินได้ เช่น การแช่แข็ง, การหมักเกลือ, แสงอัลตราไวโอเลต และโลหะบางชนิด การป้องกันการเกิดเมทไมโอโกลบินในเนื้อสัตว์แช่แข็ง อาจใช้วิธีเติมกรดแอสกอร์บิกในเนื้อ

สีเขียวที่เกิดในเนื้อ เกิดจากรงควัตถุสีเขียวซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของฮีม ปฏิกิริยาเกิดที่วงพอร์ไฟรินโดยจุดที่ถูกทำลาย คือ α – methene bridge ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการทำลายพันธะคู่ ณ จุดนี้ จากนั้นจะมีการทำลายพันธะคู่หลายพันธะที่เป็นส่วนของวงพอร์ไฟรินและทำลายโครงสร้างเรโซแนนซ์ของมัน วงพอร์ไฟรินอาจไม่แตกหักในขั้นนี้ เพราะอาจเกิดรงควัตถุสีเขียวที่ประกอบด้วยวงพอร์ไฟรินอยู่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดเวอร์โดฮีม (verdohemes) สีเขียว ซึ่งเกิดจากการแตกออกของคาร์บอน อะตอมที่ α – methene bridge ทำให้เกิดการเปิดวงพอร์ไฟริน methene bridge อื่น ๆ ก็อาจเกิดปฏิกิริยาในทำนองเดียวกัน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยวงไพร์โรล (pyrrole fragements) หลายส่วน

การเกิดสีเขียวในเนื้ออาจเกิดจากการเกิด H_2S หรือ H_2O_2 ในเนื้อ กรณีเช่นนี้อาจเกิดจากเชื้อแบคทีเรีย ในกรณีของเนื้อสด การเกิด H_2O_2 ไม่มีปัญหาอะไร เพราะในเนื้อมีเอ็นไซม์คาทาเลส (catalase) ซึ่งย่อยสลาย H_2O_2 ได้ ในกรณีของเนื้อบ่มไม่มีเอ็นไซม์คาทาเลสอยู่ ถ้ามี H_2O_2 อยู่จะทำให้เกิด choleglobin สีเขียวขึ้นที่เนื้ออย่างรวดเร็ว **ส่วนผลของ H_2S และออกซิเจนที่มีต่อไมโอโกลบินคือ ทำให้เกิด** Sulfmyoglobin **ซึ่งมีสีเขียว**

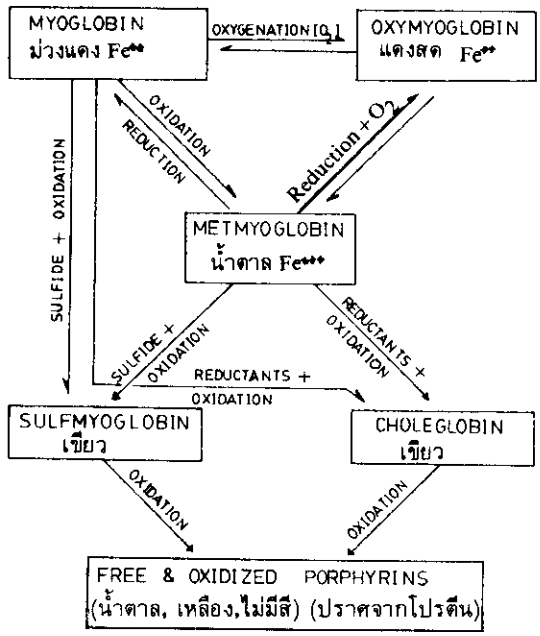
ปฏิกิริยาการเกิดรงควัตถุสีแดง สีน้ำตาลแดงและสีเขียวของเนื้อสัตว์ แสดงอยู่ในรูปที่ 6.15

เมื่อต้มเนื้อสดซึ่งมีสีแดง เนื้อจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เกิดจากโปรตีนโกลบินในไมโอโกลบินถูกแปลงสภาพไป และเหล็กถูกออกซิไดส์จาก Fe^{++} ไปเป็น Fe^{+++} ได้สารชื่อว่า denatured globin hemichrome ดังสมการต่อไปนี้



oxymyoglobin (*แดงสด*) denatured globin hemichrome (*สีน้ำตาล*)

สารนี้จะเร่งปฏิกิริยาการเกิดกลิ่นหืนของไขมันในเนื้อสุก ดังนั้นเนื้อสุกที่เก็บในตู้เย็นหรือแช่แข็งไว้ จึงเกิดกลิ่นหืนภายในเวลาอันสั้น



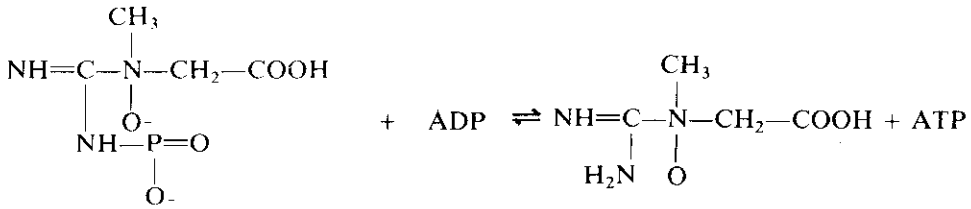
รูปที่ 6.15 การเปลี่ยนแปลงของสีในกล้ามเนื้อ

การบ่มเนื้อเป็นขบวนการสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อหลายประเภท และยังใช้สำหรับถนอมเนื้อได้ด้วย ขบวนการดังกล่าวนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนสีของเนื้อที่บ่ม รายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 6.7

ปฏิกิริยาของรงควัตถุฮีมทั้งในเนื้อสดและเนื้อบ่ม แสดงอยู่ในรูปที่ 6.17

6.2 แหล่งของพลังงานสำหรับการหดตัวของกล้ามเนื้อ

การทำงานของกล้ามเนื้อเป็นระบบหนึ่งซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนพลังงานเคมี ไปเป็นพลังงานกลในระบบสิ่งมีชีวิต การยืดหด (contractile) ของกล้ามเนื้อต้องการพลังงานโดยเฉพาะการหดตัว (contraction) ของกล้ามเนื้อต้องการพลังงานมากมาย พลังงานนี้จะได้มาทันทีจากสารพลังงานสูงคือ ATP ในกล้ามเนื้อขณะพักมีสารพลังงานสูง คือ ฟอสโฟคลีเอตีน (phosphocreatine) ซึ่งจะย้ายอนุมูลฟอสเฟตที่มีพลังงานสูงไปยัง ADP เพื่อสร้าง ATP ขึ้นใช้ เพื่อป้องกันมิให้ระดับของ ATP ลดลงเร็วเกินไประหว่างที่กล้ามเนื้อทำงาน การสร้าง ATP ขึ้นใหม่จาก ADP และฟอสโฟคลีเอตีนมีเอ็นไซม์คลีเอตีนไคเนส (creatine kinase) เป็นตัวเร่ง (รูปที่ 6.16)



Phosphocreatine creatine

รูปที่ 6.16 ปฏิกิริยาระหว่างฟอสโฟคลีเอตีนและ ADP ก่อให้เกิด ATP

ปฏิกิริยานี้ผันกลับได้ แต่สมดุลจะไปทางทิศทางการเกิด ATP อย่างไรก็ตาม ฟอสฟอคลีเอตีนเป็นแหล่งกำเนิด ATP เพียงชั่วคราว ถ้ากล้ามเนื้อต้องทำงานหนักติดต่อกัน สารนี้ก็จะหมดไป ดังนั้นจึงต้องมีการผลิต ATP เพิ่มขึ้น แหล่งผลิต ATP ที่ให้ผลดีที่สุดคือ เมตาโบลิซึมที่ใช้ออกซิเจน (oxidative metabolism) ซึ่งได้แก่ เมตาโบลิซึมของสารอาหาร (nutrients) เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน สารอาหารเหล่านี้จะแตกสลายไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะใช้ในการสร้าง ATP ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกสลายของสารอาหารทั้งหมด จะผ่านปฏิกิริยาเหล่านี้ในที่สุด เราจะใช้การแตกสลายของกลูโคสเป็นตัวอย่าง เพื่ออธิบายขบวนการเมตาโบลิซึมที่ใช้ออกซิเจนนี้

ในกล้ามเนื้อมีไกลโคเจน (glycogen) สะสมอยู่ ซึ่งจะแตกสลายให้กลูโคส – 1 – ฟอสเฟต และเข้าสู่ขบวนการไกลโคลิซิส (glycolysis) ขบวนนี้เกิดในซาร์โคพลาสซึมและเอ็นไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาก็เป็นเอ็นไซม์ที่ละลายในซาร์โคพลาสซึม แต่ละหน่วยของกลูโคสจะถูกแยกเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม ได้ผลิตภัณฑ์คือ กรดไพรูวิก (pyruvic acid) ขบวนการ

ไกลโคลิซิสจะให้ 3 ATP และ 4 H^+ ซึ่งจะรับไว้โดย NAD^+ (nicotinamide adenosine dinucleotide) และขนส่งไปยังไมโตคอนเดรียเพื่อเกิดปฏิกิริยาส่วนที่สามต่อไป

ปฏิกิริยาส่วนที่สองคือ วัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิก (Tricaboxylic acid cycle) หรือ วัฏจักร TCA ซึ่งเกิดในไมโตคอนเดรีย สารประกอบซึ่งอนุพันธ์จากกรดไพรูวิก (ที่ได้จากขบวนการไกลโคลิซิส) จะเข้าสู่วัฏจักร TCA และแตกสลายให้คาร์บอนไดออกไซด์ และ H^+ คาร์บอนไดออกไซด์แพร่กระจายไป และในที่สุดจะเข้าสู่เส้นเลือดกลายเป็นของเสีย ส่วน H^+ จะรับไว้ โดย NAD^+ ผลิตภัณฑ์จากการแตกสลายของกรดไขมันและโปรตีน ก็เข้าสู่วัฏจักร TCA ด้วย และถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานที่มีประโยชน์

ปฏิกิริยารีฟอสฟอริเลชัน (rephosphorylation) เกิดในปฏิกิริยาส่วนที่สาม ซึ่งได้แก่ ลูกโซ่ไซโตโครม (cytochrome chain) ไซโตโครมเป็นกลุ่มของเอ็นไซม์ที่ประกอบด้วยเหล็กในลูกโซ่ไซโตโครม H^+ จากไกลโคลิซิส และวัฏจักร TCA จะขนส่งจาก NAD^+ และรวมกับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็นน้ำ และพลังงานส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยออกมาจะใช้ในการรีฟอสฟอริเรท (rephosphorylate) ADP ไปเป็น ATP และที่เหลือจะสูญเสียไปเป็นความร้อน สำหรับแต่ละคู่ของ H^+ จากวัฏจักร TCA จะให้ 3 ATP

ดังนั้น จาก 1 โมเลกุลของกลูโคส ซึ่งแตกสลายไปจากไกลโคเจนและเมื่อผ่านปฏิกิริยาทั้งหมด ATP ที่ได้จะเป็นดังนี้

1. ไกลโคลิซิสได้ 3 ATP และ 4 H^+ ซึ่งจะให้อีก 4 ATP ในขบวนการลูกโซ่ไซโตโครม

2. หลังจากขบวนการไกลโคลิซิส 1 โมเลกุลของกลูโคสจะให้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล แต่ละ 1 โมเลกุลของกรดไพรูวิกจะให้ 10 H^+ ดังนั้น จากไฮโดรเจนอะตอม 20 อะตอมในวัฏจักร TCA จะถูกเปลี่ยนเป็น 30 ATP ในขบวนการลูกโซ่ไซโตโครม

ดังนั้น จากกลูโคส 1 โมเลกุลที่ได้จากไกลโคเจนจนแตกสลายไปเป็น CO_2 และ H_2O จะให้ 37 ADP ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็น 37 ATP

ถ้ากล้ามเนื้อทำงานช้า ๆ ออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอ เมตาโบลิซึมที่ใช้ออกซิเจนและการแตกสลายของฟอสโฟคลีเอตีน สามารถให้พลังงานเพียงพอ แต่ถ้ากล้ามเนื้อหดตัวอย่างรวดเร็ว ออกซิเจนจะมีไม่เพียงพอที่จะเอื้ออำนวย ให้มีการสังเคราะห์ ATP ขึ้นใหม่ได้ทันกับความต้องการ ในกรณีเช่นนี้ ขบวนการไกลโคลิซิสในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic glycolysis) จะกลายเป็นขบวนการสำคัญในการผลิต ATP เพื่อใช้ชั่วคราว เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีไม่เพียงพอ H^+ ที่ปลดปล่อยจากไกลโคลิซิสและวัฏจักร TCA จะไม่สามารถรวมกับออกซิเจน

ในอัตราเร็วพอเพียง มันจึงถูกสะสมอยู่ในกล้ามเนื้อ H^+ ที่มีมากเกินพอนี้ จะรีดิวส์กรดไพรูวิกไปเป็นกรดแลกติก (lactic acid) ซึ่งจะช่วยให้ไกลโคลิซิสเกิดได้เร็วขึ้น จากขบวนการไกลโคลิซิส 1 โมเลกุลของกลูโคส จะให้ ATP ได้ 3 โมเลกุลดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้น ขบวนการไกลโคลิซิสที่ไม่ใช้ออกซิเจน จึงสามารถให้พลังงานสำหรับการทำงานหนักของกล้ามเนื้อ อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ได้จากไกลโคลิซิสที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะมีปริมาณจำกัด ถ้ากรดแลกติกสะสมมากขึ้น pH ของกล้ามเนื้อจะลดลงต่ำลง และที่ pH ต่ำกว่า 6.0-6.5 ขบวนการไกลโคลิซิสจะเกิดช้าลง ทำให้การผลิต ATP ช้าลงด้วย กรณีเช่นนี้กล้ามเนื้อจะเกิดการเมื่อยล้าอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถหดตัวได้อีก เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ และมีปริมาณกรดมากเกินไป (pH ต่ำ) ด้วย

หลังจากกล้ามเนื้อพักจากการหดตัวแล้ว เซลล์มีวิธีที่จะสร้างฟอสฟอครีเอตินขึ้นใหม่ และกำจัดกรดแลกติกออกไป ออกซิเจนที่ถูกส่งมาจากปอดไปยังเซลล์กล้ามเนื้อจะใช้ในการผลิต ATP จากไมโตคอนเดรีย ส่วนหนึ่งของกรดแลกติกจะถูกออกซิไดส์กลับไปเป็นกรดไพรูวิก ซึ่งจะถูกออกซิไดส์ต่อไปในไมโตคอนเดรีย ATP ที่สร้างขึ้นใหม่ จะผลักดันปฏิกิริยาในรูปที่ 6.16 ให้ผันกลับไปทางซ้าย เพื่อสร้างฟอสโฟครีเอตีนกลับคืนมา ATP อีกส่วนหนึ่งจะนำไปสร้างไกลโคเจนขึ้นใหม่ในเซลล์กล้ามเนื้อจากกรดแลกติก กรดแลกติกที่เหลือส่วนใหญ่จะแพร่เข้าไปในเส้นเลือดและวิ่งเข้าตับ ซึ่งจะใช้กรดแลกติกนี้สร้างไกลโคเจนขึ้นใหม่ในเซลล์ของตับ

6.3 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัตว์หลังสัตว์ถูกฆ่า

ปฏิกิริยาบางปฏิกิริยาที่กล่าวในหัวข้อ 6.2 ยังคงดำเนินต่อไปภายหลังสัตว์ถูกฆ่าและมีผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อ ในเนื้อเยื่อของสัตว์ที่มีชีวิต มีระบบการหมุนเวียนของโลหิต แต่หลังสัตว์ถูกฆ่า ระบบเหล่านี้จะหยุดชะงักและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่ออย่างฉับพลัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคือ การขาดออกซิเจน เกิดสภาวะไร้อากาศ (anaerobic conditions) และเกิดการสะสมของเสียคือกรดแลกติก ซึ่งมีผลทำให้ pH ของเนื้อต่ำลงในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังสัตว์ถูกฆ่า ระบบไมโตคอนเดรียจะหยุดทำงานทั้งหมด ยกเว้นเซลล์ที่อยู่บริเวณผิวของกล้ามเนื้อ เพราะออกซิเจนภายในกล้ามเนื้อจะหมดไปอย่างรวดเร็ว เมตาโบลิซึมของซับสเตรต (substrate) บางชนิด เช่น เมตาโบลิซึมของลิปิดจะหยุดชะงัก ATP จะค่อย ๆ หมดไปจากการย่อยสลายโดย ATPase ซึ่งบางส่วนมาจากโปรตีนของกล้ามเนื้อ แต่ส่วนใหญ่มาจากระบบเยื่อ ATP บางส่วนจะถูกผลิตขึ้นชั่วคราว โดยฟอสโฟคลีเอตีนเปลี่ยนไปเป็นคลีเอตีน

และมีการย้ายฟอสเฟตของมันไปที่ ADP หลังจากฟอสโฟคลีเอตีนถูกใช้หมด ซึ่งเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว ขบวนการไกลโคลิซิสที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะผลิต ATP บางส่วนต่อไป พร้อมกับการสะสมกรดแลกติก ขบวนการนี้จะช้าลงเมื่อ pH ลดลง และเมื่อ pH ลดลงมาก เอ็นไซม์ที่สำคัญบางตัว เช่น ฟอสโฟฟรุกโตไคเนส (phosphofructokinase) จะถูกยับยั้ง (inhibited) และขบวนการไกลโคลิซิสจะหยุดชะงัก pH ที่จุดนี้อยู่ระหว่าง 5.1-5.5 (pH ของกล้ามเนื้อของสัตว์ที่มีชีวิตประมาณ 7.4)

pH ของเนื้อสัตว์มีความสำคัญต่อคุณภาพของเนื้อสัมผัส (texture) ของเนื้อสัตว์, ความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อ, การต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์และสีของเนื้อ ถ้าสัตว์ตื่นตระหนกตกใจและดิ้นมากก่อนถูกฆ่า ปริมาณของไกลโคเจนในเนื้อจะลดลง และกรดแลกติกจะเกิดน้อยกว่าปกติ ทำให้ pH ของเนื้อสูงขึ้นกว่าปกติเล็กน้อย ที่ pH สูงขนาดนี้ (pH 6.6) เนื้อจะมีสีแดงคล้ำ (dark red) หรือสีม่วง เนื้อแน่นเหนียวและแห้ง (dark, firm and dry meat หรือ DFD-meat) ซึ่งเกิดจากเนื้ออุ้มน้ำไว้ภายในเซลล์ได้ดีมาก และเป็น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อแบกทีเรีย เนื้อลักษณะเช่นนี้เป็นเนื้อที่มีคุณภาพต่ำและไม่เป็นที่ยอมรับ ความผิดปกตินี้ป้องกันได้โดยเลี้ยงสัตว์ให้อิ่มและให้สัตว์ได้พักผ่อนเพียงพอก่อนนำไปฆ่า

อีกกรณีหนึ่ง ถ้า pH และ ATP ของเนื้อสัตว์ลดลงเร็วเกินไปหลังสัตว์ถูกฆ่า เนื้อจะมีสีซีด นุ่มและมีน้ำเยิ้มที่ผิว(exudative) เกิดจากเนื้อสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำไปบางส่วน สภาวะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะ PSE(pale-soft-exudative)ซึ่งหบบ่อยในเนื้อหมู อาจเกิดจากสาเหตุหลายอย่างรวมกัน สาเหตุเหล่านี้มีผลทำให้เกิดการแปลงสภาพ (denaturation) ของโปรตีนบางชนิดในเนื้อ ถ้า pH ในเนื้อลดลงมาก่อนที่เนื้อจะถูกแช่เย็นจนมีอุณหภูมิต่ำเพียงพอ (นั่นคือ pH 6.0 และ 35°ซ) โปรตีนจะถูกแปลงสภาพไปมากและเกิดสภาวะ PSE

การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกิดในกล้ามเนื้อสัตว์ หลังจากที่สัตว์ตายแล้ว คือ การเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "รีเกอร์มอร์ติส" (Rigor mortis) การเกร็งตัวของกล้ามเนื้อเกิดจากการเกิด crossbridges ที่ถาวร ระหว่างแอกตินและไมโอซินฟิลาเมนต์ในกล้ามเนื้อ ในขณะที่ ATP ค่อย ๆ หมดไปจากกล้ามเนื้อ การเกิด crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซินในสัตว์ที่ตายแล้ว จะไม่สามารถผันกลับ เพราะขาดพลังงานที่จะแตกสลายพันธะของแอกโตไมโอซิน ผลที่เกิดขึ้นคือ กล้ามเนื้อขาดความยืดหยุ่นและหดสั้นลง ทำให้เนื้อเหนียวและแข็ง

อาการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อจะเกิดอย่างรวดเร็วกับสัตว์ที่ออกกำลังมาก หรือดิ้นมาก

ก่อนถูกฆ่า และกับสัตว์ที่มีอายุน้อย เนื้อหมูจะเกร็งเร็วกว่าเนื้อวัวมาก แต่หายเกร็งภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง วัวเริ่มเกิดอาการเกร็งหลังฆ่าประมาณ 10 ถึง 24 ชั่วโมง และเกร็งอยู่นาน 24 ถึง 72 ชั่วโมง ช่วงเวลาที่เริ่มเกร็งตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย เนื้อวัวจะเริ่มเกร็งตัวหลังถูกฆ่าเพียง 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37°ซ

6.4 Aging หรือ Ripening

ในต่างประเทศ หลังฆ่าสัตว์แล้วมักจะแขวนเนื้อสัตว์ที่ชำแหละแล้วในห้องเย็นชั่วระยะหนึ่ง เพื่อให้เนื้อผ่านระยะริกอร์มอติส จนเนื้อสัตว์นุ่มขึ้นจึงนำออกจำหน่าย ขบวนการเก็บเนื้อนี้เรียกว่า aging หรือ ripening ส่วนขบวนการที่มีผลทำให้เนื้อคลายจากการเกร็งตัวและนุ่มขึ้นนี้เรียกว่า resolution of rigor

การที่เนื้อนุ่มขึ้นหลังเก็บไว้ชั่วระยะเวลาหนึ่งนั้น มิได้เกิดจากการแตกสลายของพันธะของแอกโตไมโอซิน หรือแอกโตไมโอซินผันกลับไปเป็นแอกตินและไมโอซิน เพราะในกล้ามเนื้อของสัตว์ที่ตายแล้ว จะไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะแตกสลายพันธะของแอกโตไมโอซิน แต่เชื่อกันว่า เกิดจากโปรตีนบางส่วนในเซลล์ของกล้ามเนื้อถูกไฮโดรไลส์โดยเอ็นไซม์คาเธปซิน (cathepsin) อาจมีการทำลายโปรตีนของเส้น Z ซึ่งจะลดความแข็งของไมโอไฟบริล นอกจากนี้ยังอาจมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ crossbridge ระหว่างแอกตินและไมโอซินฟิลาเมนต์ทำให้ซาร์โคเมียยาวขึ้น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากการกระทำของเอ็นไซม์คาเธปซิน หรือไม่ก็อาจเกิดจากผลการกระทำของเอ็นไซม์คาเธปซินที่มีต่อเยื่อเซลล์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเยื่อเซลล์ในการควบคุมการผ่านเข้าออกของสาร (cell membrane permeability) การทำลายโครงสร้างของเยื่อเซลล์ อาจเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะไม่มีการพิสูจน์โดยการทดลอง แต่พบว่ามีการแพร่กระจายของไอออนบางส่วนเข้าไปบริเวณรอบ ๆ โปรตีนของกล้ามเนื้อ ทำให้เกิดการแทนที่ไดเวเลนต์ไอออน (divalent ions) ของโซ่โปรตีนด้วยโมโนเวเลนต์ไอออน (monovalent ions) ผลก็คือทุก ๆ ไดเวเลนต์ไอออนที่ถูกแทนที่ จะเกิดหมู่ธาตุอิสระบนโปรตีน 1 หมู่ที่จะจับกับน้ำได้ และแรงที่ดึงโปรตีนของเนื้อเข้าด้วยกันจะลดลง การแลกเปลี่ยนไอออนในโปรตีนของกล้ามเนื้อ ยังมีผลในการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อด้วย

ระยะเวลาที่เก็บเนื้อสัตว์แต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน เนื้อหมู แพะ ลูกวัวและไก่ ไม่จำเป็นต้องเก็บนาน เนื้อวัวซึ่งมีไขมันมากกว่าต้องเก็บไว้นานหลายสัปดาห์ หลังจากการเก็บ เนื้อจะนุ่มขึ้นและมีกลิ่นรสดีขึ้น ห้องเย็นที่ใช้เก็บเนื้อต้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิด้วย เพื่อ

ป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ปกติมักนิยมเก็บเนื้อที่อุณหภูมิ 2°ซ เนื้อจะนุ่มภายใน 2 อาทิตย์ แต่ถ้าเก็บที่ 7°ซ ใช้เวลาถึง 5 ถึง 6 วัน และที่ 13°ซ จะใช้เวลาเพียง 3-4 วัน ทั้งนี้เพราะความนุ่มของเนื้อเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของเอ็นไซม์ ซึ่งจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่อุณหภูมิที่ใช้เก็บเนื้อจะต้องมีขีดจำกัด โดยต้องคำนึงถึงการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ด้วย ในทางอุตสาหกรรมจะใช้รังสีอัลตราไวโอเลตทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในเนื้อ ในกรณีนี้สามารถเก็บเนื้อที่อุณหภูมิสูงถึง 15°ซ และใช้เวลาเพียง 3 วัน การเก็บเนื้อที่อุณหภูมิสูงต้องคำนึงถึงความชื้นด้วย เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในเนื้อ

6.5 ความนุ่มของเนื้อสัตว์

ความนุ่มเป็นคุณสมบัติสำคัญของเนื้อสัตว์ และเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เนื้อนุ่มจึงมีราคาแพงกว่าเนื้อเหนียว องค์ประกอบของเนื้อที่มีผลต่อความนุ่มของเนื้อ คือ เนื้อเยื่อเกี่ยวพันและเส้นใยกล้ามเนื้อ ส่วนไขมันที่แทรกอยู่ในเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (marbling fat) นั้น เดิมเข้าใจว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อนุ่ม แต่จากการศึกษาวิจัยเป็นเวลาหลายปีพบว่า ไขมันเหล่านี้มีส่วนในการทำให้เนื้อชุ่ม (juiciness) และมีกลิ่นรสดีเท่านั้น แต่ไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อนุ่ม

ความนุ่มของเนื้อขึ้นกับชนิดและปริมาณของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (พังผืด) ที่มีอยู่ในเนื้อ เนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่สำคัญคือ เส้นใยคอลลาเจนที่มีสีขาวและเส้นใยอีลาสตินที่มีสีเหลือง เส้นใยคอลลาเจนมีมากที่สุดในกล้ามเนื้อ และเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เนื้อเหนียว เส้นใยคอลลาเจนในสัตว์ที่มีอายุน้อยจะเกิดครอสลิงค์ระหว่างโมเลกุลน้อย ส่วนสัตว์ที่มีอายุมากขึ้นจำนวนครอสลิงค์ระหว่างโมเลกุลในเส้นใยคอลลาเจนจะมากขึ้น เนื้อของสัตว์ที่มีอายุมาก จึงเหนียวกว่าเนื้อของสัตว์ที่มีอายุน้อย ส่วนเส้นใยอีลาสตินมีอยู่น้อยในกล้ามเนื้อ แต่ในเนื้อส่วนที่ออกกำลังมากจะมีเส้นใยคอลลาเจนมากและมีเส้นใยอีลาสตินมากด้วย เส้นใยอีลาสตินเหนียวและยืดหยุ่นได้มาก เป็นโปรตีนที่ย่อยยากมาก การต้มเนื้อนาน ๆ เส้นใยคอลลาเจนจะสลายตัวไปเป็นเจลาติน แต่เส้นใยอีลาสตินจะไม่เปลี่ยนแปลง วิธีที่ย่อยสลายเส้นใยอีลาสตินได้ คือการใช้เอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีน (proteolytic enzymes)

ปริมาณและชนิดของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (พังผืด) จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิด เพศและอายุของสัตว์ เนื้อหมูมีพังผืดน้อยกว่าเนื้อวัว เนื้อปลาส่วนใหญ่มีพังผืดน้อยเนื้อจึงนุ่ม สัตว์ตัวผู้มีพังผืดมากกว่าสัตว์ตัวเมีย ยกเว้นสัตว์ตัวผู้ที่ตอนแล้ว เนื้อไก่ตอนจะนุ่มมาก เนื้อส่วนที่ออกกำลังมาก เช่น เนื้อส่วนขา และเนื้อสะโพกของวัว ซึ่งมีพังผืดมากและมีอีลาสตินมากด้วย จะ

CM 480 251

นุ่มน้อยกว่าเนื้อสันใน เนื้ออกไก่จะนุ่มกว่าเนื้อที่น่อง เป็นต้น

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อความนุ่มของเนื้อ เกิดจากคุณสมบัติของเส้นใยกล้ามเนื้อ คือการเกร็งตัว (การเกิดริเกอร์มอร์ติส) ของกล้ามเนื้อหลังสัตว์ถูกฆ่า ซึ่งจะมีผลทำให้เนื้อแข็งและเหนียว ถ้าต้มเนื้อทันทีหลังสัตว์ตายใหม่ ๆ แต่ยังไม่เริ่มการเกร็งตัว เนื้อจะนุ่ม เพราะแอกตินและไมโอซินฟิลาเมนต์ในไมโอไฟบริลของกล้ามเนื้อ ยังไม่เกิดแรงกระทำซึ่งกันและกัน แต่เมื่อกล้ามเนื้อเกิดการเกร็งตัวแล้วซาร์โคเมียร์จะสั้นลง ถ้านำเนื้อไปต้ม เนื้อจะเหนียว วิธีที่จะทำให้เนื้อนุ่มขึ้น คือ การเก็บเนื้อไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง (aging) เพื่อให้เนื้อคลายจากการเกร็งตัว (resolution of rigor) เนื้อก็จะนุ่มขึ้น

6.6 สารที่ทำให้เนื้อนุ่ม (Meat tenderizers)

การใช้เอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีน (proteolytic enzymes) เพื่อทำให้เนื้อนุ่มมีมาช้านานแล้ว เอ็นไซม์ที่ใช้มากที่สุดคือปาเปน (papain) จากมะละกอ นอกจากนี้ยังมีเอ็นไซม์ไฟซิน (ficin)จากผลมะเดื่อ,เอ็นไซม์โบรเมเลน (bromelain)จากสับปะรด,ทริปซิน (trypsin) จากตับอ่อนของสัตว์ และโรไซม์ (Rhozyme) จากเชื้อรา เอ็นไซม์เหล่านี้ใช้ในทางการค้า สำหรับวิธีการใช้อาจใช้เอ็นไซม์เพียงตัวเดียว หรือใช้สารผสมของเอ็นไซม์ก็ได้ หรืออาจฉีดเอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีนเข้าไปในเนื้อวัวก่อนจะฆ่า ก็สามารถเพิ่มความนุ่มของเนื้อได้

เอ็นไซม์แต่ละชนิดมีปฏิกิริยาไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่น โบรเมลินย่อยคอลลาเจนได้มาก ปาเปนย่อยแอกโตไมโอซินและอีลาสตินได้มาก แต่ย่อยคอลลาเจนได้น้อย ส่วนไฟซินย่อยโปรตีนทุกชนิดได้

เอ็นไซม์จะทำงานได้ผลเพียงไร ขึ้นกับวิธีการใช้ด้วย เช่น ปาเปนสามารถซึมเข้าไปในชิ้นเนื้อได้เพียง 0.5-2 มิลลิเมตร ดังนั้น ถ้าจะให้ได้ผลดีจะต้องใช้ส้อมจิ้มเนื้อให้เป็นรูเสียก่อนที่จะคลุกกับเอ็นไซม์ จากการศึกษาพบว่าเอ็นไซม์มีประสิทธิภาพมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส คือ อุณหภูมิขณะหุงต้มนั่นเอง ดังนั้น การหมักเนื้อกับเอ็นไซม์ทิ้งไว้สักพักหนึ่งที่อุณหภูมิธรรมดา จะมีผลเท่ากับการคลุกเนื้อกับเอ็นไซม์แล้วหุงต้มทันที

6.7 การบ่มเนื้อ (Curing)

การบ่มเนื้อเป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อ เช่น แฮม เบคอน แหนม และไส้กรอก ส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่างที่ใช้ในการบ่มเนื้อ ได้แก่ เกลือแกง (โซเดียมคลอไรด์)

และไนเตรต (nitrate) หรือไนไตรต์ (nitrite) นอกจากนี้อาจใส่น้ำตาลและสารปรุงรส (seasonings) อื่น ๆ เป็นต้น การใส่เกลือแกงก็เพื่อปรุงรสของเนื้อ มิได้มีจุดประสงค์เพื่อการถนอมเนื้อ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเกลือแกงที่ใช้จะมีความเข้มข้นต่ำ แต่ก็มีผลอยู่บ้างในการช่วยถนอมเนื้อ โดยเกลือแกงจะช่วยลดปริมาณน้ำซึ่งเป็นแหล่งเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ แต่เกลือแกงทำให้เกิดออกซิเดชันของไมโอโกลบินได้ เนื้อที่หมักเกลือแกงอย่างเดียวจึงมีสีคล้ำไม่น่าดู ดังนั้น จึงใส่เกลือไนเตรตหรือไนไตรต์เพื่อให้เนื้อที่บ่มมีสีชมพูคงทน

การทำให้เกิดสีชมพูบนเนื้อที่บ่ม สามารถทำได้โดยให้ไมโอโกลบินในเนื้อสัมผัสโดยตรงกับก๊าซไนตริกออกไซด์ (nitric oxide) ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีสีและละลายน้ำได้เล็กน้อย แต่ในทางการค้ายังไม่มีการใช้วิธีดังกล่าวในการบ่มเนื้อ วิธีที่ใช้กันคือ การทำให้เกิดก๊าซไนตริกออกไซด์โดยการรีดิวส์ (reduced) ไนเตรตและไนไตรต์ ถ้าใช้ไนเตรตมันจะต้องถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์ก่อนแล้ว จึงจะถูกรีดิวส์ไปเป็นไนตริกออกไซด์ ถ้าใช้ไนไตรต์โดยตรง สีจะเกิดเร็วขึ้น ดังนั้น ในทางการค้าจึงนิยมใช้ไนไตรต์มากกว่าไนเตรต ในทางกฎหมายได้จำกัดปริมาณของไนไตรต์ในผลิตภัณฑ์เนื้อสุดท้ายไม่ให้เกิน 200 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และปริมาณของไนเตรตจะต้องไม่ให้เกิน 500 ppm ปริมาณสูงสุดของไนไตรต์ในรูปของโซเดียมไนไตรต์ และโพแทสเซียมไนเตรตที่ใช้ในการบ่มเนื้อ คือ 2 ปอนด์ใน 100 แกลลอนของน้ำเกลือ (239.7 กรัมต่อ 100 ลิตร) ปริมาณที่ใช้ในการบ่มแห้ง (dry cure) คือ 1 ออนซ์ต่อ 100 ปอนด์ (62.8 กรัมต่อ 100 กิโลกรัม) ของเนื้อ ส่วนปริมาณในการทำไส้กรอก (sausage) คือ $\frac{1}{4}$ oz. ต่อ 100 ปอนด์ (15.7 กรัมต่อ 100 กิโลกรัม) ของเนื้อที่สับละเอียด ไนไตรต์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณเริ่มแรกที่ใส่เข้าไปมาก

มีกลไกหลายอย่างในการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ pH ของเนื้อ (5.5-6.0) ส่วนหนึ่งของสารละลายไนไตรต์ในน้ำจะกลายเป็นกรดไนตรัส (nitrous acid) (HNO_2) และที่ pH ดังกล่าวนี้ กรดไนตรัสจะสลายตัวให้ไนตริกออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

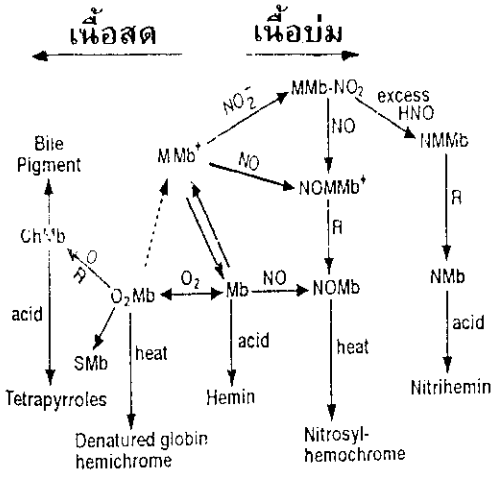
$$3HNO_2 \rightleftharpoons HNO_3 + 2NO + H_2O$$

แต่การเกิดไนตริกออกไซด์โดยวิถีทางนี้ ต้องใช้เวลามาก จึงเป็นวิธีที่มีความสำคัญน้อยต่อการบ่มเนื้อที่ต้องการความรวดเร็ว

ซับสเตรตและเอ็นไซม์จากปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น จากวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิกที่ยังมีอยู่และยังทำงานอยู่ สามารถให้สารรีดิวส์ เช่น NADH ภายใต้สภาวะไร้อากาศ สารรีดิวส์เหล่านี้จะถูกใช้โดยลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport chain) ของไมโตคอน-

เตรียไปรีดิวส์ไนไตรต์ ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) นี้ อาจทำให้เกิดก๊าซไนตริกออกไซด์บางส่วนที่จำเป็นสำหรับการเปลี่ยนสีของเนื้อ อย่างไรก็ตาม ขบวนการนี้เกิดช้ามาก และสามารถผลิตก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปริมาณเพียงพอเฉพาะเมื่อมีการบ่มนาน

การเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์อาจถูกเร่งให้เร็วขึ้น โดยใส่สารรีดิวส์ เช่น เกลือโซเดียมของกรดแอสกอร์บิกและกรดเอริธอร์บิก (erythorbic acid) ปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างการบ่มเนื้อ แสดงอยู่ในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 ปฏิกิริยาของไมโอโกลบินในเนื้อสดและเนื้อบ่ม ChMb = cholemyglobin (oxidized porphyrin ring); O_2Mb = oxymyoglobin (Fe^{2+}); MMb = metmyoglobin (Fe^{3+}); Mb = myoglobin (Fe^{2+}); $MMb\text{-}NO_2$ = metmyoglobin nitrite; NOMMb = nitrosylmetmyoglobin; NOMb = nitrosylmyoglobin; NMMb = nitrometmyoglobin; NMb = nitromyoglobin, ผลิตภัณฑ์ 2 ตัวหลังเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาระหว่างกรดไนตรัสและส่วนฮีมของโมเลกุล, R=สารรีดิวส์ , O=สภาวะออกซิไดส์อย่างรุนแรง

ไนไตรต์เป็นสารออกซิไดส์ (oxidizing agent) ที่ดีสำหรับไมโอโกลบิน ปฏิกิริยาขั้นแรกอาจเกิดจากไมโอโกลบินและออกซิไมโอโกลบิน ถูกเปลี่ยนเป็นเมทไมโอโกลบิน-และไนตริกออกไซด์จะรวมกับส่วนฮีมของเมทไมโอโกลบินเกิดเป็นไนตริก ออกไซด์เมท-ไมโอโกลบิน (nitric oxide metmyoglobin) ไนตริกออกไซด์เมทไมโอโกลบินจะต้องถูกรีดิวส์เป็นไนตริกออกไซด์ ไมโอโกลบิน จึงจะได้รงควัตถุของเนื้อที่บ่ม การรีดิวส์ไนตริก-ออกไซด์เมทไมโอโกลบินเกี่ยวข้องกับการเติมอิเล็กตรอน 1 ตัวเข้าที่ Fe^{+++} ของฮีม ทำให้ Fe^{+++} ถูกเปลี่ยนเป็น Fe^{++} การรีดิวส์ (reduction) นี้ อาจเกิดโดยธรรมชาติในเนื้อหรือโดยการเติมสารรีดิวส์ลงในส่วนประกอบที่ใช้บ่ม ถ้าใช้สารรีดิวส์ ระยะเวลาที่ใช้บ่มจะสั้นลงเป็นสองสามชั่วโมง แทนที่จะเป็นสองสามวันถ้าปล่อยให้เกิดการรีดิวส์เอง ในการบ่มเนื้อเพื่อทำแฮมและ

เบคอน จะใช้วิธีเติมสารรีดิวส์

การต้มเนื้อที่บ่มแล้วให้สุก จะได้ไนโตรซิลเฮโมโครม (nitrosyl hemochrome) ซึ่งโปรตีนในไมโอโกลบินจะถูกแปลงสภาพไป แต่โครงสร้างของฮีมที่มีไนตริกออกไซด์ติดอยู่ยังคงเดิม การแปลงสภาพของโปรตีนโดยการต้มเนื้อ มีผลทำให้ไนตริกออกไซด์ไมโอโกลบินซึ่งมีสีแดง เปลี่ยนเป็นไนโตรซิลเฮโมโครมซึ่งมีสีชมพู สีของไนโตรซิลเฮโมโครมคงทนกว่าสีของไนตริกออกไซไมโอโกลบิน

ถ้าต้มเนื้อนาน ๆ สีของไนโตรซิลเฮโมโครมจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าไนตริกออกไซด์ไมโอโกลบิน และไนโตรซิลเฮโมโครมถูกแสงสีจะซีดลงได้ ถ้าเอาเนื้อที่บ่มแล้วไปวางไว้ใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent elumination) ในขณะที่สัมผัสกับอากาศด้วย สีที่ผิวเนื้อจะซีดลงภายในประมาณหนึ่งชั่วโมง ภายใต้สภาวะเดียวกันนี้ เนื้อสดจะยังคงมีสีเดิมเป็นเวลา 3 วัน หรือนานกว่านั้น การที่สีของเนื้อบ่มซีดลงเกิดจากขบวนการ 2 ขั้นตอน คือ

1. การแตกตัวของไนตริกออกไซด์จากฮีม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เร่งด้วยแสง

2. ติดตามด้วยการออกซิไดส์ไนตริกออกไซด์โดยออกซิเจน นอกจากนี้หมู่ฮีมก็ถูกออกซิไดส์โดยออกซิเจนได้ด้วย เกิดสีเทาน้ำตาลบนผิวของเนื้อในระหว่างที่แสงทำให้สีซีดลง ทั้งนี้ เพราะในขณะนี้รงควัตถุสีซีดซึ่งบางทีเรียกว่า เฮมิโครม (hemichrome) มีหมู่ฮีมของมันอยู่ในสภาวะเฟอร์ริก

การป้องกันไม่ให้สีซีดทำได้โดยการป้องกันมิให้ออกซิเจนสัมผัสกับผิวของเนื้อ วิธีที่ได้ผลคือ การบรรจุเนื้อแบบสุญญากาศ หรือบรรจุในแผ่นฟิล์มที่ออกซิเจนผ่านเข้าออกไม่ได้ ถ้าปราศจากออกซิเจน ไนตริกออกไซด์จะไม่ถูกออกซิไดส์ และสามารถรวมกับฮีมได้ใหม่ การเติมแอสกอร์เบท (ascorbate) ในเนื้อบ่ม หรือการพ่นแอสกอร์เบทบนผิวของเนื้อหรือวัสดุที่บรรจุเนื้อ จะทำให้สีซีดช้าลง อาจเป็นเพราะแอสกอร์เบทจะช่วยให้มีการเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์อย่างต่อเนื่องจากไนไตรต์ที่มีในเนื้อ การใช้วัสดุบรรจุเนื้อที่ทึบแสง (opaque) ก็ป้องกันมิให้สีซีดได้ เพราะทั้งแสงและออกซิเจนมีส่วนทำให้เนื้อบ่มมีสีซีดลง

6.8 ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์

1. แฮม (Ham)

แฮมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักส่วนขาหลังของสุกร ในส่วนผสมคือ NaCl, KNO_3 และน้ำตาล วิธีหมัก คือ คลุกส่วนผสมที่เป็นผงแล้วถูให้ทั่วส่วนของขาสุกร วิธีนี้เรียกว่า

การบ่มแห้ง (dry cure) หรือใช้วิธีหมักด้วยการแช่ในน้ำเกลือ โดยเอาส่วนผสมเหล่านี้มาละลายในน้ำหรือน้ำเกลือ แต่ 2 วิธีนี้ต้องใช้เวลาหมักนาน เพื่อให้น้ำเกลือแทรกซึมเข้าไปทั่วทุกส่วนของเนื้อที่หมัก วิธีที่เร็วกว่าคือ การฉีดสารละลายของส่วนผสมเข้ากล้ามเนื้อหรือเส้นเลือด ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ผสมแล้วไม่ควรต่ำกว่า 65 องศาซาโลมิเตอร์ เมื่อบ่มจนเกลือแทรกซึมทั่วกล้ามเนื้อแล้ว นำไปแช่น้ำไว้ระยะหนึ่งเพื่อล้างเกลือส่วนที่มากเกินพอออก แล้วจึงนำไปรมควัน ไม้ที่ให้ควันไฟคุณภาพดีคือ ไม้เนื้อแข็ง แต่ไม่ใช่ไม้สนหรือไม้ยาง ในประเทศไทยไม้ที่ให้ควันไฟคุณภาพดีคือ ไม้สัก กาบมะพร้าว ชานอ้อย ซังข้าวโพด เป็นต้น ในการรมควันต้องให้อุณหภูมิภายในเนื้อแฮมสูงประมาณ 61 องศาเซลเซียส

2. เบคอน (Bacon)

กรรมวิธีในการทำเบคอนคล้ายคลึงกับการทำแฮม แต่ใช้ส่วนของสุกรแตกต่างกัน เบคอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากส่วนหน้าท้องของสุกร (สามชั้น) โดยทั่วไปเกลือที่ใช้หมักเบคอนจะเข้มข้นน้อยกว่าที่ใช้หมักแฮม

3. ไส้กรอก (sausage)

ไส้กรอกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอาเนื้อบดผสมกับไขมัน น้ำ ส่วนประกอบที่ใช้บ่ม (curing ingredients) เครื่องเทศ เป็นต้น แล้วบรรจุในไส้ ในการทำไส้กรอก เนื้อจะต้องผ่านการบดเป็นชิ้นเล็กลง (comminuted) การทำไส้กรอกบางชนิด อาจใช้เนื้อที่บดอย่างหยาบ ๆ เช่น ไส้กรอกซาลามิ (salami) ส่วนไส้กรอกแฟรงเฟอเตอร์ (Frankfurter) และไส้กรอกโบลอกนา (bologna) ต้องใช้เนื้อที่บดละเอียดมาก และคลุกเคล้าเข้ากับส่วนผสมอื่น ๆ ไส้ที่ใช้บรรจุเนื้ออาจเป็นไส้ของวัว หมู หรือของสัตว์อื่น ๆ หรือเป็นหลอดทำจากเส้นใยเซลลูโลส (cellulose tube) หรือทำจากวัสดุอื่น ๆ เช่น คอลลาเจนหรือพลาสติก เป็นต้น ไส้กรอกแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น ไส้กรอกสด ไส้กรอกรมควัน ไส้กรอกสุกและไส้กรอกแห้ง เป็นต้น ไส้กรอกสุกที่นิยมมาก ได้แก่ ไส้กรอกเวียนนาหรือแฟรงเฟอเตอร์ (Frankfurters) ซึ่งทำจากเนื้อวัวและเนื้อสุกรในอัตรา 60 ส่วนต่อ 40 ส่วน หมักกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ ไนเตรตและไนไตรต์ที่อุณหภูมิ 2 ถึง 5 องศาเซลเซียสอย่างต่ำ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบดผสมกับเครื่องเทศ ไขมันและน้ำแข็ง บรรจุในไส้แกะและมัดเป็นปล้อง นำไปรมควันและต้มให้สุก

ไส้กรอกแห้งที่นิยมมากในยุโรป ได้แก่ ซาลามี (salami) ส่วนในประเทศไทยมีไส้กรอกพื้นเมืองของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจัดเป็นไส้กรอกสด ซึ่งอาจทำจากเนื้อหมูหรือเนื้อโคก็ได้ นำมาสับหรือบดผสมกับมันหมูชิ้นเล็ก ๆ เกลือ กระเทียม น้ำตาล ข้าวสุกและบรรจุในไส้หมู

ผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่นิยมในประเทศไทยและแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ กุนเชียง ซึ่งทำโดยการหมักเนื้อสุกรและมันแข็งที่หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ กับส่วนประกอบอื่น ๆ บรรจุในไส้และตากให้แห้ง

4. แหนม

เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเนื้อที่ทำจากเนื้อสดสับละเอียดผสมกับเกลือ ข้าวสุก และหนังหมู บรรจุในไส้พลาสติกหรือห่อด้วยใบตอง เก็บไว้ประมาณ 2-3 วัน เพื่อให้เกิดกรดแลกติก

5. หมูยอ

นิยมทำจากเนื้อหมูดีผสมกับมันแข็ง น้ำแข็งและเครื่องปรุงจนเหนียว บรรจุหรือห่อและต้มให้สุก

6.9 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัตว์ระหว่างการหุงต้ม

จุดประสงค์ในการหุงต้มเนื้อสัตว์มีหลายประการ ได้แก่ การช่วยให้เนื้อมีลักษณะที่น่ารับประทานมากขึ้น ช่วยเพิ่มกลิ่นรสของเนื้อ ช่วยให้เนื้อนุ่มขึ้นและที่สำคัญที่สุดคือ ความร้อนในการหุงต้มจะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับเนื้อสัตว์ ความร้อนที่ใช้ในการหุงต้มเนื้อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเนื้อได้หลายอย่างดังต่อไปนี้

เอ็นไซม์ในเนื้อ

ความร้อนอาจทำลายแอกติวิตีของเอ็นไซม์บางส่วนหรือทั้งหมด ขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ให้กับเนื้อ การให้ความร้อนกับเนื้อที่อุณหภูมิ 60 ถึง 70°ซ ในช่วงระยะสั้น เอ็นไซม์บางชนิดในกล้ามเนื้ออาจไม่ถูกทำลาย อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนกับเนื้อไม่ว่าจะโดยวิธีใดมักจะมีผลในการทำลายแอกติวิตีของเอ็นไซม์ส่วนใหญ่

โปรตีนของเส้นใยกล้ามเนื้อ

เมื่อโปรตีนของเส้นใยกล้ามเนื้อได้รับความร้อน มันจะถูกแปลงสภาพ (denatured) และจับเป็นก้อน (coagulate) ซึ่งจะทำให้โปรตีนแข็งตัว (protein hardening) ที่อุณหภูมิเพียง 40°ซ โปรตีนจะไม่หดตัว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้โปรตีนจะหดตัวด้วย อุณหภูมิยิ่งสูงมาก โปรตีนจะยิ่งหดตัวและแข็งมากขึ้น การแปลงสภาพของโปรตีนในเส้นใยกล้ามเนื้อ จะทำให้โปรตีนสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ การใช้อุณหภูมิสูงในการต้มเนื้อ จึงทำให้เนื้อสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ แม้เนื้อที่แช่อยู่ในน้ำก็สูญเสียน้ำได้เช่นกัน ดังนั้น การต้มเนื้อที่อุณหภูมิสูง

เป็นเวลานาน เนื้อจะแห้งและเสียรสชาติ

เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

เมื่อเส้นใยคอลลาเจนได้รับความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลทำให้มันละลายได้ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงขั้นแรกคือ การหดตัวของเส้นใยคอลลาเจนจนเหลือความยาวหนึ่งในสามของความยาวเดิม การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นได้กับเส้นใยคอลลาเจนแม้ที่อุณหภูมิต่ำเพียง 50°ซ เท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 61-62°ซ เส้นใยคอลลาเจนจะหดเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม (collagen shrinkage) การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดพร้อมกับการละลายได้ดีขึ้นของคอลลาเจน ถ้าต้มเนื้อในน้ำต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง คอลลาเจนจะถูกไฮโดรไลส์ และเกิดเป็นเจลาติน ดังนั้น คอลลาเจนจะนุ่มขึ้น และสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้น แต่ความร้อนไม่ทำให้เส้นใยอีลาสตินเปลี่ยนแปลง เนื้อบางชนิดแม้จะต้มนานก็ไม่หายเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากในเนื้อมีปริมาณอีลาสตินสูง เนื้อชนิดนี้ต้องใช้เอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีน จึงจะช่วยให้นุ่มได้

ในการหุงต้มเนื้อสัตว์ ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม เนื้อบางชนิดควรใช้เวลาหุงต้มเพียงทำให้เนื้อสุกก็พอแล้ว และไม่ควรให้อุณหภูมิภายในเนื้อสูงเกินระดับที่ทำให้โปรตีนในเนื้อแข็งตัว แต่เนื้อบางชนิดอาจต้องต้มนานและต้องใช้อุณหภูมิสูงพอควร เพื่อทำให้เนื้อนุ่ม และให้มีสีของเนื้อตามที่ต้องการ อุณหภูมิสูงสุดที่ควรใช้ในการหุงต้มเนื้อหมูคือ 77°ซ สำหรับเนื้อเป็ด ไก่ อุณหภูมิสูงสุดที่ควรใช้คือ 77-82°ซ ส่วนอุณหภูมิที่พอเหมาะสำหรับเนื้อวัวขึ้นกับความต้องการของผู้บริโภค เนื้อวัวที่สุกขั้น rare ซึ่งเป็นที่นิยมของชาวตะวันตก มีอุณหภูมิภายในเนื้อสูง 58-60°ซ เนื้อนี้จะสุกเฉพาะภายนอก แต่ภายในยังแดงอยู่ เนื้อจะนูนและชุ่ม เนื้อที่สุกขั้น medium rare มีอุณหภูมิภายใน 66-68°ซ และอุณหภูมิที่สุกขั้น medium มีอุณหภูมิภายใน 73-75°ซ ส่วนเนื้อที่สุกทั่วทั้งชิ้นหรือสุกขั้น well done มีอุณหภูมิภายใน 80-82°ซ เนื้อนี้ค่อนข้างจะแข็งแห้งและไม่นูนเลย

โดยทั่วไปเนื้อหมูมักจะต้มให้สุกทั่วทั้งชิ้น เพราะในเนื้อหมูอาจมีพยาธิชื่อ trichinella spiralis ซึ่งทำให้เกิดโรค Trichinosis ในคนได้ ไข่ของพยาธินี้สามารถแพร่ไปตามกระแสเลือดและไปทั่วอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย ทำให้เนื้อเยื่ออักเสบ มันอาจถูกทำลายและขับออกจากร่างกาย แต่ถ้าพยาธินี้อยู่ในรูปของซิส (cyst) มันอาจจะมีชีวิตอยู่ในเส้นใยกล้ามเนื้อเป็นปี ๆ ดังนั้น จึงควรต้มเนื้อหมูให้สุก โดยให้อุณหภูมิภายในของเนื้อหมูเท่ากับ 65°ซ ก็นับว่าปลอดภัยแล้ว

การหุงต้มเนื้อโดยใช้ความร้อนสูงมาก โปรตีนและกรดอะมิโนอิสระของเนื้อจะมีการ

เปลี่ยนแปลงต่อไป โดยการแตกสลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้หลายชนิด ได้แก่ สารประกอบที่มีซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์, เมอร์แคปแทน (mercaptans), ซัลไฟด์และไดซัลไฟด์ ตลอดจนแอลดิไฮด์, คีโตน, แอลกอฮอล์, เอมีนที่ระเหยง่ายและอื่น ๆ องค์ประกอบของลิปิดอาจแตกสลายไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ระเหยง่ายได้ด้วย เช่น แอลดิไฮด์, คีโตน, แอลกอฮอล์, กรดหรือไฮโดรคาร์บอน สารประกอบที่ระเหยได้เหล่านี้ซึ่งมีอยู่ในไขมันและเนื้อสัตว์ส่วนที่มีไขมันน้อยมีส่วนช่วยให้เนื้อที่ต้มสุกมีกลิ่นรสดี

สีของเนื้อ

ความร้อนทำให้สีแดงของเนื้อสด (ไมโอโกลบิน) เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเนื้อสุก การเกิดสีน้ำตาลที่ผิวของเนื้อย่างและเนื้ออบ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนของโปรตีนในกล้ามเนื้อและน้ำตาลรีดิวส์ (reducing sugars) ซึ่งมีอยู่ในเนื้อเยื่อ (ปฏิกิริยาเมลลาร์ด) ส่วนการเปลี่ยนสีภายในเนื้อเกิดจากการแปลงสภาพ (denaturation) ของไมโอโกลบิน ไมโอโกลบินเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 50°ซ โดยเปลี่ยนจากสีม่วงแดงไปเป็นสีแดงสด เนื่องจากไมโอโกลบินรวมกับออกซิเจนเกิดเป็นออกซิไมโอโกลบิน ที่อุณหภูมิ 65-68°ซ ออกซิไมโอโกลบินเริ่มสลายตัวให้สีน้ำตาลของ denatured globin hemichrome ความร้อนภายในเนื้อที่สุกขั้น rare ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ไมโอโกลบินถูกแปลงสภาพ ดังนั้น ภายในเนื้อจึงยังคงเป็นสีแดง เนื้อวัวจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 70°ซ

ไขมัน

ไขมันส่วนใหญ่แทรกอยู่ในคอลลาเจน และบางส่วนแทรกอยู่ในเส้นใยกล้ามเนื้อ ความร้อนทำให้ไขมันละลายไหลออกมาจากชิ้นเนื้อ การละลายของคอลลาเจนทำให้เกิดช่องทางที่ไขมันสามารถแพร่กระจายไปได้ การแพร่กระจายของไขมันไปทั่วกล้ามเนื้อจะช่วยขวางกั้นมิให้เกิดการสูญเสียน้ำในระหว่างหุงต้ม ดังนั้นเนื้อที่มีไขมันแทรกอยู่ จะหดตัวน้อยระหว่างการหุงต้ม ทำให้เนื้อยังคงชุ่มอยู่ ไขมันยังช่วยให้เนื้อย่างไม่แห้งเกินไป และลดการสูญเสียน้ำจากเนื้อด้วย

คุณค่าทางโภชนาการ

ความร้อนอาจมีผลต่อปริมาณของวิตามินในเนื้อด้วย ขึ้นกับปริมาณความร้อนและระยะเวลาที่หุงต้ม โดยปกติวิตามินบีหนึ่ง จะถูกทำลายได้ง่ายที่สุด จึงเกิดการสูญเสียมากที่สุด

ส่วนวิตามินบีสอง และไนอาซีนสูญเสียไปเพียงเล็กน้อย แร่ธาตุและวิตามินอาจละลายในน้ำที่ใช้หุงต้ม การกินซุปเนื้อและการใช้ซุปเนื้อในการประกอบอาหาร จะช่วยให้สูญเสียอาหารเหล่านี้น้อยลง ในน้ำซุปเนื้อมีวิตามินที่ละลายน้ำและแร่ธาตุสูง น้ำซุปเนื้อยังมีรสอร่อยและช่วยเรียกน้ำย่อย ทำให้รับประทานอาหารได้มากขึ้น ชาวตะวันตกจึงนิยมรับประทานน้ำซุปก่อนอาหารเสมอ

6.10 วิธีหุงต้มเนื้อสัตว์

การหุงต้มเนื้อสัตว์ไม่ว่าจะใช้วิธีใด การที่จะให้ได้เนื้อสุกที่มีสีน่ารับประทาน เนื้อนุ่มและมีกลิ่นรสดีนั้น อุณหภูมิและระยะเวลาที่หุงต้มสำคัญมาก ถ้าใช้เวลานานเกินไป โปรตีนในเนื้อสัตว์จะแข็งตัวและหดตัว เนื้อจะแห้งและมีกลิ่นรสที่ไม่ดี อุณหภูมิและเวลาที่ต้องใช้ในการหุงต้มเนื้อด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งนั้น ขึ้นกับส่วนประกอบของเนื้อสัตว์ ขนาดความหนาและรูปลักษณะของชิ้นเนื้อนั้นด้วย สำหรับเนื้อที่ตัดเป็นชิ้นบาง ผู้ประกอบอาหารที่ชำนาญจะสามารถบอกถึงจุดที่จะยุติการให้ความร้อน โดยเพียงแต่พิจารณาสีและเนื้อสัมผัสของชิ้นเนื้อนั้น สำหรับเนื้อชิ้นหนา ต้องเสียบเทอร์โมมิเตอร์เข้าไปในส่วนหนาที่สุดของชิ้นเนื้อ จนถึงชั้นในสุดเพื่อวัดอุณหภูมิ จึงจะทราบระดับความสุกของเนื้อตามที่ต้องการ

1. **การหุงต้มโดยใช้ความร้อนแห้ง** (Dry heat cookery)

ได้แก่การย่างและการอบแบบแห้ง ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวนำความร้อน และการทอด ซึ่งใช้น้ำมันเป็นตัวนำความร้อน วิธีเหล่านี้เหมาะสำหรับเนื้อนุ่ม เพราะเวลาที่ใช้ในการหุงต้มน้อยเกินกว่าที่จะทำให้เนื้อเยื่อเกี่ยวพันแตกสลาย เนื้อนุ่มได้แก่ เนื้อสันในของวัว เนื้อหมู เนื้อไก่อ่อน ปลาและกุ้ง เป็นต้น เนื้อบดไม่ว่ามาจากส่วนใดของสัตว์ ก็ถือว่าเป็นเนื้อนุ่ม

ก. การย่างเนื้อ (Broiling) ในยุโรปและอเมริกานิยมย่างเนื้อในเตาอบ ซึ่งมีไฟอยู่เหนือและใต้ถาดที่ใส่เนื้อ เมื่อย่างจนด้านหนึ่งของเนื้อเป็นสีน้ำตาลแล้ว ก็กลับอีกด้านหนึ่งจนได้สีน้ำตาลเช่นกัน อาจต้องใช้มีดกรีดส่วนที่เป็นไขมันเพื่อมิให้เนื้อม้วนตัว และควรวางชิ้นเนื้อที่หนาให้ใกล้กับไฟมากกว่าเนื้อชิ้นบาง

การย่างเนื้อโดยใช้เตาถ่านเป็นวิธีที่นิยมมาก วิธีนี้ทำให้เนื้อมีกลิ่นรสดี เพราะเนื้อที่ย่างจะได้กลิ่นควันพิเศษจากถ่านที่เผาไหม้ และกลิ่นควันจากไขมันที่หยดลงบนเตาไฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการย่างมักจะต่ำกว่าการย่างในเตาอบ

การทอดคล้ายกับการย่างโดยใช้น้ำมันเป็นตัวนำความร้อนแทนอากาศ การทอดแบ่ง

เป็น 2 แบบคือ การทอดโดยใช้น้ำมันน้อยกับการทอดโดยใช้น้ำมันมากจนท่วมชิ้นเนื้อ การทอดใช้เวลาเพียงสั้น ๆ จึงควรใช้เนื้อนุ่มและไม่ควรหั่นเนื้อหนาเกินไป เพราะเนื้อข้างนอกอาจจะสุกเกรียม แต่ด้านในยังไม่สุก การทอดเนื้อชิ้นหนาควรใช้ไฟอ่อน ๆ

ข. การอบแห้ง (Roasting) วิธีนี้เหมาะสำหรับเนื้อนุ่มเท่านั้น โดยนำชิ้นเนื้อไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 150-175°ซ เนื้อที่อบควรมีชั้นไขมันหุ้มอยู่รอบ ๆ เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ถ้าเป็นเนื้อชิ้นใหญ่ ควรสอดเทอร์โมมิเตอร์เข้าไปในชิ้นเนื้อ เพื่อวัดอุณหภูมิภายในเนื้อ และอาจใช้อุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อย (120°ซ) และใช้เวลาอบนานมากขึ้น ไม่ควรเติมน้ำ และไม่ควรเอาฝาครอบเนื้อไว้

2. การหุงต้มโดยใช้ความร้อนเปียก (Moist heat cookery)

ได้แก่ การต้ม ตุ๋นหรือนึ่ง โดยมีน้ำหรือไอน้ำเป็นตัวนำความร้อน วิธีนี้ใช้เวลานานเพียงพอที่จะทำให้เนื้อเปื่อย จึงเหมาะสมสำหรับเนื้อส่วนที่ค่อนข้างเหนียว เช่น เนื้อวัวที่มีพังผืดมาก เนื้อควาย ไก่แก่ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม อาจใช้วิธีหุงต้มแบบความร้อนเปียกกับเนื้อส่วนที่นุ่มได้ และอาจใช้ความร้อนแห้งกับเนื้อส่วนที่เหนียวก็ได้ โดยการลดหรือเพิ่มเวลาตามความเหมาะสม เช่น การลวกเนื้อส่วนที่นุ่มเป็นการใช้ความร้อนเปียกโดยใช้เวลาเพียงสั้น ๆ หรือเอาเนื้อส่วนที่เหนียวมาอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลาหลายชั่วโมง ก็ทำให้เนื้อนุ่มได้ ไม่ว่าจะใช้วิธีใดในการหุงต้มต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการหุงต้ม ถ้าใช้เวลานานเกินไป เนื้อนุ่มอาจจะกลายเป็นเนื้อเหนียว เพราะโปรตีนในเนื้อแข็งตัวจนทำให้เนื้อหดตัว เนื้อจะแห้งและมีรสชาติไม่ดี

ก. การอบแบบมีน้ำ (Braising) วิธีนี้เป็นการอบเนื้อในน้ำ โดยใส่เนื้อในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดและใส่น้ำเล็กน้อย เติมเครื่องปรุง ซ้อส เครื่องเทศหรือแป้ง เพื่อให้มีกลิ่นรสตามที่ต้องการ แล้วปิดฝา ลดไฟเหลือเพียงให้เดือดปุด ๆ แต่ไม่ถึงกับเดือดพล่าน หรืออาจอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิต่ำก็ได้ ระหว่างอบควรเติมน้ำบ้างเพื่อมิให้เนื้อแห้ง

การอบหม้อดิน การอบกระทะหรือการผัดแล้วครอบทิ้งไว้ ก็เป็นวิธีหุงต้มโดยใช้ความร้อนเปียก การอบเนื้อโดยห่อเนื้อด้วยวัสดุกันการระเหยของน้ำในเตาอบ และการเผาปลาที่พอกโคลนหรือห่อด้วยใบตอง ก็เป็นการอบแบบมีน้ำ โดยน้ำในเนื้อไม่ระเหยไป จึงมีส่วนช่วยในการหุงต้มต่อไป

เนื้อชิ้นหนาซึ่งมีปริมาณเนื้อเยื่อเกี่ยวพันมาก สามารถใช้วิธีหุงต้มแบบนี้ โดยการต้มเนื้อในน้ำ น้ำจะไฮโดรไลส์เส้นใยคอลลาเจนไปเป็นเจลาติน การหุงต้มในน้ำที่อุณหภูมิต่ำ

แต่ใช้เวลานาน สามารถทำให้คอลลาเจนเปลี่ยนเป็นเจลาตินโดยไม่ทำให้โปรตีนของเส้นใยกล้ามเนื้อแข็งตัว การหุงต้มนี้ไม่มีผลต่ออีลาสติน ดังนั้น เนื้อที่ต้มนานแล้วยังไม่นุ่ม แสดงว่าเนื้อนั้นมีปริมาณอีลาสตินสูง

ข. การหุงต้มในน้ำ (Cooking in water) วิธีนี้ได้แก่ การต้มเนื้อในน้ำเพื่อทำแกงจืด เนื้อตุ๋น แกงเผ็ดและสตู เป็นต้น

การเคี่ยวเนื้ออาจใช้เนื้อหรือเนื้อที่ทอดน้ำมันจนผิวนอกเป็นสีน้ำตาลก่อน วางเนื้อในหม้อก้นลึก เติมน้ำจนท่วมเนื้อ เติมเครื่องปรุงตามที่ต้องการ แล้วปิดฝาให้แน่น ใช้ความร้อนต่ำเคี่ยวจนเนื้อเปื่อย เนื้อเหนียวและชิ้นใหญ่ต้องใช้เวลาเคี่ยวนาน จึงจะทำให้เปื่อยยุ่ยได้ เช่น การเคี่ยวเนื้อวัวชิ้นใหญ่เพื่อทำแกงมัสหมั่น ถ้าเป็นเนื้อสะโพกต้องใช้เวลาเคี่ยว 2 ชั่วโมง เนื้อผสมเอ็นใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ถ้าเป็นเนื้อจากบริเวณท้องใช้เวลานานถึง 5 ชั่วโมง ถ้าเป็นเนื้อชิ้นเล็กสำหรับทำแกงเขียวหวาน ใช้เวลาเคี่ยวเพียง 1 ชั่วโมงก็เปื่อย

3. การหุงต้มโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ (Microwave cookery)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ทันสมัย รวดเร็ว และมีการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ หลักการทำงานของเครื่องไมโครเวฟอาศัยการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อน โดยผลของความเสียดทานที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุลเมื่อโมเลกุลเกิดแรงกระทำกับคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ความถี่ที่ใช้กับเครื่องไมโครเวฟคือ 915 และ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ (megahertz) วิธีนี้ช่วยให้หุงต้มเร็วกว่าวิธีธรรมดาหลายเท่า เนื่องจากความร้อนจากขดลวดด้านนอกใช้เพื่อทำให้ผิวนอกของเนื้อเป็นสีน้ำตาล ในขณะที่ภายในเนื้อถูกทำให้สุกโดยรังสีไมโครเวฟ ปัจจุบันเครื่องไมโครเวฟใช้กันแพร่หลายในการหุงต้มเนื้อสัตว์ในโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป และยังนิยมใช้สำหรับการหุงต้มตามบ้านด้วย