

บทที่ 3

วิตามินและแร่ธาตุ

(Vitamins and Minerals)

วิตามินและแร่ธาตุ เป็นสารอาหารที่ร่างกายคนต้องการในปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสารอาหารประเภทอื่น ๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมันและน้ำ สารอาหาร 2 ชนิดนี้ ไม่ได้ให้พลังงานแก่ร่างกาย แต่เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการทำงานเป็นปกติของอวัยวะและเซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย ถ้าร่างกายได้รับสารอาหาร 2 ชนิดนี้ไม่เพียงพอ จะเกิดโรคภัยไข้เจ็บได้ ปริมาณความต้องการวิตามินและแร่ธาตุต่อวันของหญิงและชายในวัยต่าง ๆ ตลอดจนเด็กและทารกซึ่งแนะนำโดย Food and Nutritional Board of the National Academy of Sciences-National Research Council ของสหรัฐอเมริกา แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

อาหารที่เรารับประทานในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ เช่น การหุงต้ม การแช่แข็ง การอบแห้ง เป็นต้น ขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินและแร่ธาตุได้ง่าย นักวิจัยอาหารจึงสนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารสองประเภทนี้ ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ ตลอดจนช่วงของการเก็บ แต่ข้อมูลเท่าที่หาได้จากผลการวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารสองชนิดนี้ในอาหารที่นับว่าเพียงพอมีเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากนักวิจัยส่วนใหญ่สนใจเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดเป็นพิเศษ และปัญหาในด้านการวิเคราะห์ ดังนั้น การศึกษาวิตามินและแร่ธาตุในบทนี้ นอกจากจะศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติและคุณค่าทางโภชนาการของวิตามินและแร่ธาตุแล้ว เราจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารอาหารเหล่านี้ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ จากข้อมูลเท่าที่หาได้

3.1 Recommended Daily Dietary Allowance

RECOMMENDED DAILY DIETARY ALLOWANCES¹
Designed for the maintenance of good nutrition of practically all healthy people in the U.S.A.

Age (Yr)	Weight (Kg)	Height (Cm)	Foil-soluble Vitamins				Water-soluble Vitamins							Minerals								
			Vita- min A Activity (RE) ²	Vita- min D Activity ³ (IU)	Vita- min E Activity ⁴ (IU)	Ascor- bic Acid (Mg)	Fola- cine ⁵ (µg)	Niac- in ⁶ (Mg)	Ribo- flavin (Mg)	Thia- min (Mg)	Vita- min B-6 (Mg)	Vita- min B-12 (µg)	Calc- cium (Mg)	Phos- phorus (Mg)	Iodine (µg)	Iron (Mg)	Magnesium (Mg)	Zinc (Mg)				
Infants	6	14	60	24	kg x 117	kg x 2.2	420 ⁴	1,400	400	4	35	5	5	0.1	0.3	0.3	360	240	35	10	60	3
0.5-1.0	9	20	71	28	kg x 108	kg x 2.0	400	2,000	400	5	35	8	8	0.6	0.5	0.4	540	460	45	18	70	5
Children	13	28	86	34	1,300	23	400	2,000	400	7	40	100	9	0.8	0.7	1.0	800	800	60	35	130	10
1-3	20	44	110	44	1,800	30	500	2,500	400	9	40	200	12	1.1	0.9	1.5	800	800	80	10	200	10
4-6	30	66	135	54	2,400	36	700	3,000	400	10	40	300	16	1.2	1.2	2.0	800	800	110	10	250	10
Males	7-10	44	97	63	2,800	41	1,000	3,000	400	12	45	400	18	1.5	1.4	1.6	1,200	1,200	130	18	350	15
11-14	61	134	172	69	3,000	54	1,000	5,000	400	15	45	400	20	1.8	1.5	2.0	1,200	1,200	150	18	460	15
15-18	67	147	172	69	3,000	54	1,000	5,000	400	15	45	400	20	1.8	1.5	2.0	800	800	140	10	350	15
19-22	70	154	172	69	2,700	56	1,000	5,000	400	15	45	400	18	1.6	1.4	2.0	800	800	130	10	350	15
Females	51+	70	154	172	2,400	44	800	4,000	400	12	45	400	16	1.3	1.2	2.0	800	800	110	10	300	15
11-14	44	97	155	62	2,400	44	800	4,000	400	12	45	400	14	1.1	1.1	1.6	1,200	1,200	115	18	300	15
15-18	54	119	162	65	2,100	48	800	4,000	400	12	45	400	14	1.1	1.1	2.0	1,200	1,200	115	18	300	15
19-22	58	128	162	65	2,000	46	800	4,000	400	12	45	400	13	1.2	1.0	2.0	800	800	100	18	300	15
23-50	58	128	162	65	1,800	46	800	4,000	400	12	45	400	12	1.1	1.0	2.0	800	800	100	18	300	15
Pregnant	51+	58	128	162	+300	+30	1,000	5,000	400	15	60	800	+2	+0.3	+0.3	2.5	1,200	1,200	125	18 ⁸	450	20
Lactating					+500	+20	1,200	6,000	400	15	80	600	+4	+0.5	+0.3	2.5	1,200	1,200	150	18	450	25

Source: Natl. Acad. Sci.-Natl. Res. Council. (1974).

¹ The allowances are intended to provide for individual variations among most normal persons as they live in the United States under usual environmental stresses. Diets should be based on a variety of common foods in order to provide for differences in requirements that have been well defined. See text for more detailed discussion of allowances and of nutrients not tabulated.

² Retinol equivalents.

³ Assumed to be all as retinol in milk during the first six months of life. All subsequent intakes are assumed to be half as much as β-carotene when calculated from international units. As retinol equivalents, 1/30 avo as retinol and 1/45 avo as β-carotene.

⁴ Total vitamin E activity, estimated to be 80% as α-tocopherol and 20% other tocopherols.

⁵ The folic acid allowances refer to dietary sources as determined by *Lactobacillus casei* assay. Pure forms of folic acid may be used in supplements. The allowances are expressed as µg of the recommended dietary allowance.

⁶ Although allowances are expressed as µg, it is recognized that on the average 1 mg of niacin is derived from each 50 mg of dietary tryptophan.

⁷ This increased requirement cannot be met by ordinary diets; therefore, the use of supplemental iron is recommended.

3.1 วิตามิน (Vitamins)

วิตามินเป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญต่อสุขภาพและการเจริญเติบโตของคนและสัตว์ เพราะเป็นสารที่จำเป็นสำหรับปฏิกิริยาเคมีในร่างกาย วิตามินส่วนใหญ่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นเองไม่ได้ ต้องได้รับจากอาหาร ปริมาณที่ร่างกายต้องการมีเพียงเล็กน้อย แต่ต้องได้รับสม่ำเสมอ บางชนิดต้องได้รับทุกวัน เพราะร่างกายเก็บสะสมไว้ไม่ได้ การขาดวิตามินจะทำให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บได้

ประวัติของการค้นพบวิตามินย้อนหลังไปเมื่อราวศตวรรษที่ 18 ได้มีการค้นพบว่า น้ำส้มและน้ำมะนาวสามารถใช้ป้องกันโรคโลหิตจาง (Scurvy) ซึ่งเกิดกับชาวเรือที่ท่องเที่ยวทะเลไปเป็นเวลานาน ๆ ต่อมาภายหลังจึงค้นพบว่า วิตามินที่มีอยู่ในน้ำส้มซึ่งใช้รักษาโรคโลหิตจางนั้น คือกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) หรือวิตามิน ซี

ในปลายศตวรรษที่ 19 ได้มีการค้นพบว่าโรคเหน็บชา (beriberi) เกิดจากการรับประทานข้าวที่สีแล้ว ต่อมาจึงพบว่า การเติมรำข้าวลงในอาหารจะช่วยป้องกันโรคนี้ได้ ภายหลังจึงค้นพบว่าสารที่ใช้ป้องกันโรคนี้คือ ไธอามีน (Thiamin) ซึ่งมีอยู่ในรำข้าวที่ถูกสีออกไป

ในต้นศตวรรษที่ 20 มีการค้นพบว่า สารอาหารที่จำเป็นต่อสุขภาพ และการเจริญเติบโตตามปกติของร่างกาย นอกจากโปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมัน ตลอดจนน้ำและแร่ธาตุแล้วยังไม่เพียงพอ จะต้องมีส่วนประกอบที่จำเป็นอื่นอีก ในปี 1911 Funk สกัดสารจากรำข้าวสามารถใช้รักษาโรคเหน็บชาได้ และเนื่องจากสารประกอบดังกล่าวเป็นสารประกอบประเภทเอมีน Funk จึงตั้งชื่อสารนี้ว่า "Vitamine" แปลว่า "เอมีนเพื่อชีวิต" (life amines) สารที่ใช้รักษาโรคเหน็บชาก็ดี หรือรักษาโรคโลหิตจางก็ดี ต่างก็เรียกชื่อว่า Vitamines ต่อมาในปี 1913 Dr. McCollum และ Dr. Davis ได้แบ่ง Vitamines ออกเป็น 2 พวก คือพวกที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ และได้ค้นพบต่อมาว่า สารเหล่านี้อาจเป็นเอมีนหรือเป็นสารชนิดอื่นก็ได้ จึงเปลี่ยนชื่อจาก Vitamine มาเป็น Vitamin

วิตามินเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันด้วย จึงมีการจำแนกวิตามินออกเป็น 2 ประเภท ตามคุณสมบัติการละลายของมัน คือ

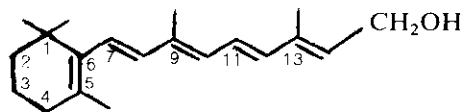
1. วิตามินที่ละลายในน้ำมัน เช่น วิตามิน เอ ดี เค และ อี
2. วิตามินที่ละลายน้ำ ได้แก่ วิตามิน บีรวม และซี เป็นต้น

วิตามิน บีรวม ได้แก่ บีหนึ่ง บีสอง ไนอะซิน บีหก บีสิบสอง กรดโฟลิก กรดแพนโทเทอริก ไบโอดีน อีโนซิทอล กรดพาราอะมิโนเบนโซอิกและโคลีน

3.1.1 วิตามินที่ละลายในไขมัน (Fat soluble vitamins)

1. วิตามิน เอ (Vitamin A)

วิตามิน เอหนึ่ง หรือเรตินอล (retinol) มีสูตรโครงสร้าง คือ



Vitamin A – 1 (or Vitamin A)

วิตามินเอหนึ่งเป็นของเหลวชั้นสีขาว เป็นสารประกอบแอลกอฮอล์ที่ไม่มีอมั้ว พันธะคู่ในโมเลกุลของวิตามินเอหนึ่งเป็นทรานส์หมด (all trans form) วิตามินเอหนึ่งพบในตับของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและปลาน้ำเค็ม ส่วนวิตามินเอสอง พบในตับของปลาน้ำจืด หรือในตาของสัตว์ร่วมกับวิตามินเอหนึ่ง วิตามินเอสองแตกต่างจากวิตามินเอหนึ่งเล็กน้อย คือ วิตามินเอสองจะมีพันธะคู่ซึ่งคอนจูเกตอยู่ในวงแหวนเพิ่มขึ้นอีก 1 พันธะ วิตามินเอหนึ่งมีแอกติวิตี (activity) สูงกว่าวิตามินเอสอง

วิตามินเออาจอยู่เป็นแอลกอฮอล์อิสระ เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นแอลดีไฮด์หรือเป็นกรด ตับของสัตว์เป็นแหล่งสะสมวิตามินเอ ทั้งในรูปแอลกอฮอล์อิสระและแอลดีไฮด์

ในพืชไม่พบวิตามินเอ แต่สารแคโรทีนอยด์ (carotenoid) หลายตัวในพืชสีเขียว สีเหลืองและแสดมีแอกติวิตีของวิตามินเอ เมื่อสัตว์บริโภคพืชที่มีแคโรทีนอยด์ แคโรทีนอยด์จะถูกเมตาโบไลส์และเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ แคโรทีนอยด์เหล่านี้จึงมีชื่อเรียกว่า โปรวิตามินเอ (Provitamin A) สูตรโครงสร้างตลอดจนแอกติวิตีของโปรวิตามินเอ ในแคโรทีนอยด์แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

แคโรทีน (carotenes) เป็นแหล่งสำคัญของวิตามินเอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเบต้า-แคโรทีน (β -carotene) ซึ่งประกอบด้วยวงเบต้า-ไอโอโนน (β -ionone ring) 2 วง ส่วนแอลฟา-แคโรทีนมีวงเบต้า-ไอโอโนนเพียงวงเดียว ส่วนอีกวงหนึ่งเป็นวงแอลฟา-ไอโอโนน (α -ionone ring) อยู่ทีปลายอีกด้านหนึ่ง มันจึงมีแอกติวิตีของวิตามินเอน้อยกว่าเบต้า-แคโรทีน แคโรทีนเหล่านี้ตลอดจนโปรวิตามินเออื่น ๆ ถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอในลำไส้ ถ้าแบ่งครึ่งเบต้า-แคโรทีน 1 โมเลกุล จะได้วิตามินเอ 2 โมเลกุล ผู้ป่วยเป็นโรคตีบความสามารถในการเปลี่ยนแคโรทีน

ไปเป็นวิตามินเอจะลดน้อยลง ยังไม่มีใครทราบสาเหตุเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้

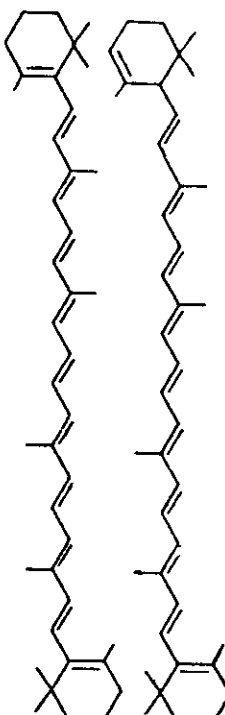
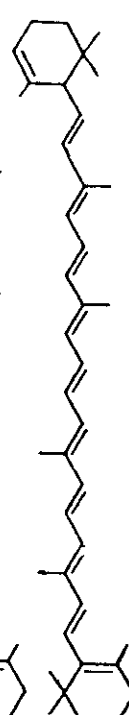
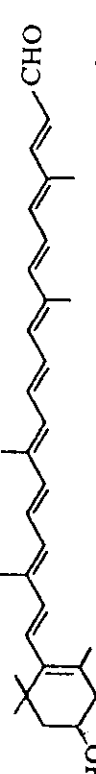
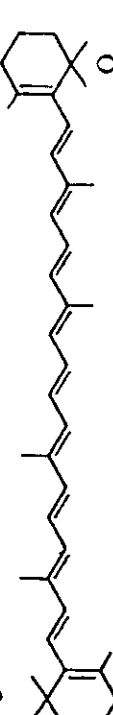
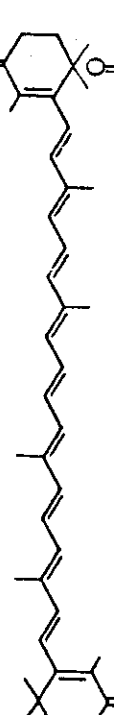
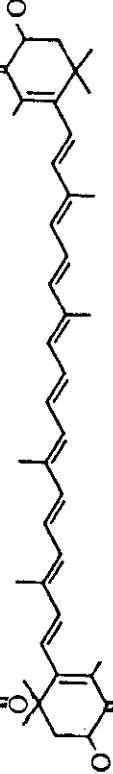
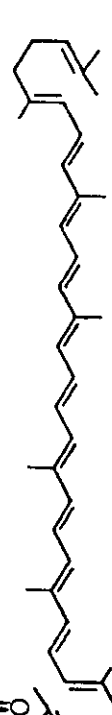
การสูญเสียโปรวิตามินเอในอาหาร

ผักสีเขียวและเหลืองเป็นแหล่งสำคัญของโปรวิตามินเอหรือแคโรทีน แคโรทีนถูกทำลายได้โดยแสงและออกซิเจนในอากาศ การทำลายโปรวิตามินเอในอาหารที่ผ่านขบวนการแปรรูปและอาหารในช่วงเก็บเกิดได้หลายทาง ขึ้นกับสภาวะของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดรวบรวมอยู่ในรูปที่ 3.1

ในสภาวะที่ไร้อากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน (Thermal transformation) เกิดขึ้นมากมาย โดยเฉพาะ cis-trans isomerization ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดในผักที่ต้มสุก และผักบรรจุกระป๋อง การสูญเสียทั้งหมดอาจมีตั้งแต่ 5 ถึง 40% ขึ้นกับอุณหภูมิ เวลาและชนิดของแคโรทีนอยด์ ที่อุณหภูมิสูง เบต้า-แคโรทีนอาจเกิดการแตกหักไปเป็นอะโรเมติก-ไฮโดรคาร์บอนหลายตัวที่สำคัญ คือ ไอโอเนน (ionene) (รูปที่ 3.1)

ในสภาวะที่มีอากาศอยู่ การสูญเสียแคโรทีนอยด์จะเกิดมากขึ้น จากการกระตุ้นของแสง เอ็นไซม์และโดยการเกิดออกซิเดชันร่วมกับลิปิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (lipid hydroperoxides) ออกซิเดชันทางเคมีของเบต้า-แคโรทีน ชั้นแรกจะให้ 5,6-อีพอกไซด์ ซึ่งจะเกิดไอโซเมอไรซ์ต่อไปเป็นมิวตาโครม (mutachrome) หรือ 5, 8-อีพอกไซด์ ออกซิเดชันที่เร่งโดยแสงชั้นแรกจะได้มิวตาโครม การแตกหักต่อไปของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากออกซิเดชันชั้นแรก จะให้สารประกอบที่ซับซ้อนคล้ายกับที่เกิดจากออกซิเดชันของกรดไขมัน ออกซิเดชันของวิตามินเอ จะทำให้เกิดการสูญเสียแอกติวิตีของมันทั้งหมด

ตารางที่ 3.2 แคโรทีนอยด์ : โครงสร้างและแอกติวิตีของโปรวิตามินเอ

แคโรทีนอยด์	โครงสร้าง	แอกติวิตีสัมพัทธ์
1. β - Carotene		50
2. α - Carotene		25
3. β - apo - 8' - carotenal		25-30
4. cryptoxanthin		0
5. Canthaxanthin		0
6. Astacene		0
7. Lycopene		0

กลางคืน (night blindness) สัตว์ที่ขาดวิตามินเออาจมีอาการแบบเดียวกัน นอกจากนี้ถ้าหนักจะลด 'ความต้านทานโรคต่ำ ติดโรคได้ง่าย ผิวแห้ง เป็นตุ่ม หยาบกระด้างและผิวหนังขรุขระเหมือนผิวหนังคอก เยื่อบุชั้นตาแห้ง เปลือกตาบวมเป็นแผล ถ้าเป็นมากจะตาบอดได้ (xerophthalmia)

การวิเคราะห์วิตามินเอ ใช้วิธีทางโครมาโตกราฟฟีและการวัดฟลูออเรสเซนส์ และแสดงผลเป็นความเข้มข้นของวิตามินเอ คือ หน่วยต่อมิลลิลิตร แคโรทีนหาโดยวิธีทางสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 3.4 ปริมาณของวิตามินเอในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)	อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)
ใบยอ	43,333	ยอดแค	12,466
ตับไก่	32,200	ใบบัวบก	10,962
ใบแมงลัก	26,000	ตับหมู	10,900
ตับวัว	24,940	ผักชะอม	10,066
ใบโหระพา	20,712	ผักคะน้า	9,300
ผักตำลึง	18,608	ผักกระถิน	7,883
แครอท	18,520	ไข่แดง	7,675
ปูทะเล, มัน	14,155	พริกชี้หนู, พริกชี้ฟ้า	7,010
ใบมันสำปะหลัง	13,155	เนย	3,300
ผักโขม	12,860	มะม่วงสุก	2,580

2. วิตามิน ดี (Vitamin D)

ในปี 1924 Steenbock ค้นพบว่า การรับประทานอาหารที่ฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต มีประสิทธิภาพในการรักษาโรคกระดูกอ่อนได้ ในที่สุดจึงพบว่า เป็นสารตัวหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับคอเลสเตอรอลหรือเป็นพวกลสเตอรอล (Sterol) และให้ชื่อว่า วิตามินดี ซึ่งพบมากในน้ำมันตับปลารวมกับวิตามินเอ มีผลในการรักษาโรคนี้ ทำให้ทราบความจริงว่า คนที่อยู่

CM 480

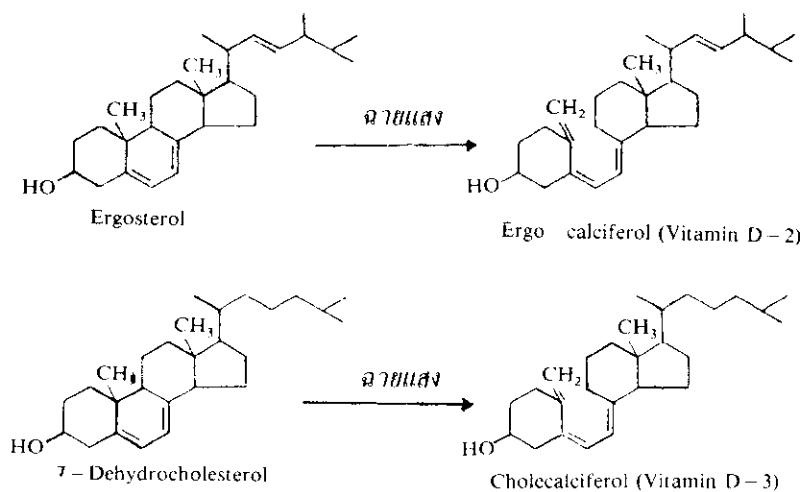
45

CM 480

40

ในเขตร้อนที่ได้รับแสงแดดเสมอ และเด็กพวกเอสกิโมที่บริโภคอาหารที่อุดมด้วยน้ำมันตับปลา จะไม่เป็นโรคนี้

เออโกสเตอรอล (Ergosterol) ซึ่งเป็นสเตอรอลในยีสต์และในเห็ด ergot เมื่อฉายด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดเป็นวิตามินดีสอง หรือเออร์โกแคลซิเฟอรอล (Ergocalciferol) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2 อนุพันธ์ของคอเลสเตอรอลซึ่งพบอยู่ได้ผิวหนัง คือ 7-ดีไฮโดรคอเลสเตอรอล (7-Dehydrocholesterol) เมื่อถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเปลี่ยนเป็นวิตามินดีสาม หรือคอเลแคลซิเฟอรอล (Cholecalciferol) ดังนั้น จึงถือได้ว่า เออโกสเตอรอลและ 7-ดีไฮโดรคอเลสเตอรอล เป็นโปรวิตามินดี (Provitamin D) (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 การเกิดวิตามินดีสองและดีสามโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

โปรวิตามินดีที่พบในธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่เป็นพวกสเตอรอล เมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต พันธะระหว่างคาร์บอนตัวที่ 9 และ 10 ในวงบีจะแตกออกได้วิตามินดี

เออร์โกแคลซิเฟอรอล (วิตามินดีสอง) ตกผลึกเป็นผลึกสีขาวจากอะซีโตน และออปติคัลลีแอคทีฟ (optically active) มี $[\alpha]_D^{20} = +102.5^\circ$ ละลายได้ในไขมันและตัวทำละลายไขมัน เช่น แอลกอฮอล์ อีเทอร์และอะซีโตน แต่ไม่ละลายในน้ำ หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 115-118°C และระเหิดที่ความดันต่ำมาก (0.0006 มม.) และดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ λ_{max} 265 nm ส่วนคอเลแคลซิเฟอรอลหลอมที่ 82-83°C วิตามินดีในธรรมชาติที่รู้จักมีราว 16 ชนิด ในบรรดาวิตามินดีเหล่านั้น วิตามินดีสองและดีสามเป็นวิตามินดีที่สำคัญที่สุดในอาหาร

วิตามินดีเป็นสารที่ทนต่อความร้อน อากาศ กรดและด่าง และไม่ละลายน้ำ ดังนั้น

การหุงต้มปกติจึงไม่ทำให้วิตามินดีสลายตัว นมและผลิตภัณฑ์นมส่วนใหญ่จะเสริมด้วยวิตามินดี และยังไม่เคยปรากฏว่ามีปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของวิตามินดีในอาหาร

วิตามินดีมีมากในน้ำมันตับปลา ไข่แดง น้ำมันสลัด เนยเหลวและตับ อาหารในธรรมชาติมีวิตามินดีน้อย ปริมาณวิตามินดีในอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปริมาณวิตามินดีในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)	อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)
น้ำมันตับปลา	8,500 – 60,000	ไข่เค็ม	200
ปลาเฮอริง	1,800	เนยเหลว	8 – 60
ปลาเซลมอนกระป๋อง	200 – 800	นมเสริมวิตามิน	42
ปลาทู	300 – 400	ตับหมู	40
ไข่แดง	150 – 400	ตับวัว	10

การขาดวิตามินดีจะทำให้เกิดโรคกระดูกอ่อน (rickets) ในเด็กและทารก ซึ่งเกิดจากร่างกายมีความสามารถในการดูดซึม และใช้แคลเซียม และฟอสฟอรัสน้อยลง มีอาการกระดูกอ่อนโดยเฉพาะกระดูกซึ่งรับน้ำหนักตัว จะเกิดขาโก่งโค้ง หัวเข่าชนกัน กระดูกอกนูนเหมือนอกไก่ ฟันมักขึ้นช้าและผุง่าย มักเกิดกับเด็กที่คลอดก่อนกำหนด หรือเด็กอายุต่ำกว่า 2 ขวบ ที่กินอาหารที่มีแคลเซียมต่ำ กินวิตามินไม่พอและรับแสงแดดไม่พอ

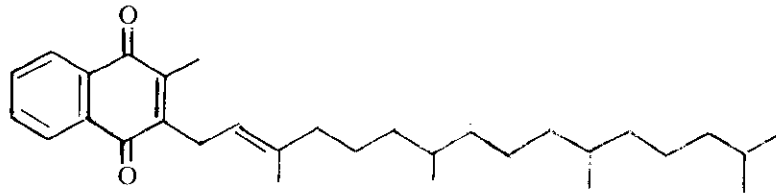
โรคกระดูกอ่อนที่เกิดในผู้ใหญ่ พบในหญิงมีครรภ์และหญิงที่ให้นมบุตร เรียกว่า Osteomalacia สาเหตุเกิดจากการขาดวิตามินดีหรือได้รับแสงแดดไม่พอ หรือให้นมบุตรนานเกินไป มีอาการฟันผุ กระดูกผิดรูปร่างและปวด เด็กที่คลอดจะสะสมวิตามินดีน้อยในร่างกายในผู้สูงอายุ เนื้อกระดูกจะบางและเป็นรูพรุน เปราะ (Osteoporosis) มิได้เกิดจากการขาดวิตามินดีหรือแคลเซียม แต่เกิดจากโปรตีนในเนื้อเยื่อกระดูกมีการสลายตัวมากขึ้น ทำให้เกลือแคลเซียมไปจับเกาะไม่เต็มที่

ถ้ากินวิตามินดีมากเกินไปจะทำให้เบื่ออาหารกระหายน้ำคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน ปวดปัสสาวะบ่อยและอ่อนเพลีย กระดูกจะเสียแคลเซียมมากกว่าปกติ และกระดูกจะเปราะ

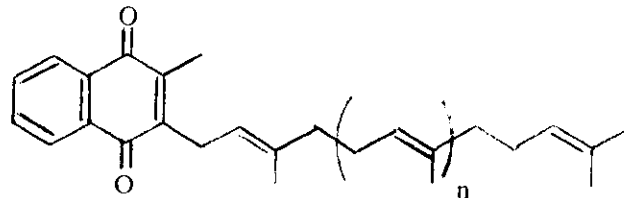
และแตกง่าย แคลเซียมและฟอสฟอรัสในเลือดสูงขึ้น กลีโกลีเซียมจะไปจับกับเนื้อเยื่ออื่น เช่น หัวใจ ตับ ไต ทำให้อวัยวะเหล่านี้ทำงานไม่ได้ และอาจถึงตายได้

3. วิตามิน เค (Vitamin K)

วิตามินเคหนึ่งและเคสอง พบในหญ้าแอลฟาฟา (Alfafa) โดย Dam และ Karrer ในปี 1939 และหลังจากนั้นไม่นาน Doisy สามารถแยกวิตามินเคสองจากอาหารปลาที่เริ่มเน่า และ Fieser สามารถสังเคราะห์วิตามินเคหนึ่งในปี 1939



Vitamin K-1 (2-Methyl-3-phytyl-1,4-naphthoquinone)



(n = 4, 6, 7 หรือ 8)

Vitamin K-2 (2-Methyl-3-difarnesyl-1,4-naphthoquinone)

ยังมีสารประกอบอื่น ๆ ที่มีแอกติวิตีของวิตามินเค ในสารประกอบเหล่านี้มีอยู่ตัวหนึ่งที่เป็นสารสังเคราะห์ และมีแอกติวิตีเท่า ๆ กับวิตามินเคหนึ่ง คือ เมนาไดโอน (menadiolone หรือ 2-methyl-1,4-naphthoquinone) ซึ่งให้ชื่อว่า วิตามินเคสาม นอกจากนี้ แอกติวิตีของวิตามินเคยังพบในอนุพันธ์ของเนฟโทควิโนน (naphthoquinone) อื่น ๆ

วิตามินเคหนึ่ง เป็นน้ำมันสีเหลืองข้นและออปติคัลแอคทีฟมี $[\alpha]_D^{20} = -0.4$ และจุดหลอมเหลวเท่ากับ -20°C ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ วิตามินเคสาม (menadiolone) ตกผลึกเป็นผลึกรูปเข็มสีเหลืองจากแอลกอฮอล์และปิโตรเลียมอีเธอร์ มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 107°C ไม่ละลายในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์และละลายได้ในอีเธอร์

การขาดวิตามินเคในสัตว์ทำให้เลือดแข็งตัวช้า ส่วนในคนมักไม่พบการขาดวิตามินนี้

เพราะในอาหารของคนส่วนใหญ่มีปริมาณวิตามินเคเพียงพอ และนอกจากนี้ ในลำไส้ยังมีแบคทีเรียที่สามารถสร้างวิตามินนี้ได้ ทารกที่เกิดใหม่อาจมีการขาดวิตามินเค แต่อาการของเลือดแข็งตัวช้าจะค่อย ๆ หดไป เมื่อเริ่มมีแบคทีเรียที่สร้างวิตามินเคได้ในลำไส้ หรือแก้โดยการให้รับประทานวิตามินเค

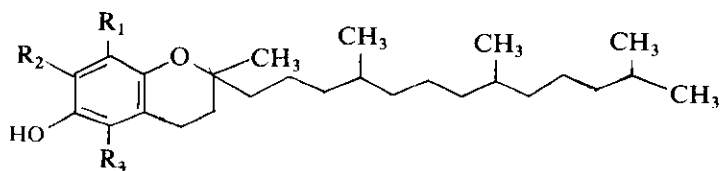
สารประกอบที่มีแอกติวิตีของวิตามินเคเหล่านี้ มีความไวต่อแสง (photoreactive) แต่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบเหล่านี้ ในอาหารมีน้อยมาก

วิตามินเคมีอยู่ในอาหารทั่วไป อาหารที่รับประทานตามปกติ มีวิตามินเคเพียงพอ แหล่งที่มีวิตามินเคมาก คือ หญ้าแอลฟาฟา, กะหล่ำปลี (ซึ่งมีตั้งแต่ร้อยละ 3.2 มิลลิกรัมขึ้นไป), ผักขม, ดอกกะหล่ำ พริกขี้หนูและผลไม้ไม่มีวิตามินเคน้อย

4. วิตามิน อี (Vitamin E)

ในปี 1920 มีผู้สังเกตว่า หนูที่บริโภคนมวัวอย่างเดียว ไม่สามารถสืบพันธุ์ตามปกติ 2-3 ปีต่อมา มีผู้พบว่าน้ำมันพืชโดยเฉพาะน้ำมันที่สกัดจากจมูกข้าวสาลี (Wheat germ oil) มีสารที่ช่วยให้สืบพันธุ์ได้ตามปกติ และได้มีการสกัดสารนี้จากน้ำมันในปี 1936 ให้ชื่อว่า โทโกเฟอรอล (Tocopherol) หรือวิตามินอี

สารประกอบโทโกเฟอรอลหลายตัว มีแอกติวิตีของวิตามินอีที่รู้จัก มีอยู่ 7 ตัว แต่ตัวที่มีแอกติวิตีสูงสุดคือ แอลฟา-โทโกเฟอรอล (α -tocopherol) ส่วนโทโกเฟอรอลอื่น ๆ มีแอกติวิตีต่าง ๆ กัน รูปดี-แอล (dl-form) ของแอลฟา-โทโกเฟอรอล มีผู้สังเคราะห์ขึ้นได้



α -Tocopherol ($R_1 = R_2 = R_3 = CH_3$)

โทโกเฟอรอลในธรรมชาติเป็นน้ำมัน แอลฟา-โทโกเฟอรอลเป็นน้ำมันสีเหลืองอ่อนขึ้น ออปติคัลแอคติฟ และมี $[\alpha]_D^{20} = +0.65$ มันหลอมที่อุณหภูมิ 2.5-3.5°C เมื่อต้มให้เดือดภายใต้ความดันที่ 35°C มันจะสลายตัว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์

วิตามินอีใช้เป็นแอนติ-ออกซิแดนท์ (anti-oxidant) ได้ มันช่วยยับยั้งออกซิเดชันของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในเนื้อเยื่อและใช้ป้องกันกลิ่นหืน อย่างไรก็ตาม ถ้าน้ำมันเกิดกลิ่นหืน

วิตามินอีจะสูญเสียไป นอกจากนี้การกลั่นน้ำมันก็ทำให้วิตามินอีสูญเสียไปได้ แต่การหุงต้ม ปกติจะไม่ทำลายวิตามินอี ในที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจน วิตามินอีทนต่อความร้อนและกรด แต่ถ้าถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต ออกซิเจนและด่าง มันจะสลายตัวง่าย นอกจากนี้ การสูญเสียอาจเกิดขึ้นบ้างในขบวนการผลิต และเก็บอาหารทางอุตสาหกรรม เช่น การ แช่แข็ง

ในระหว่างการผลิตน้ำมันพืช เนยเทียมและ Shortenings วิตามินอีจะสูญเสียไปได้ และจะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าเกิดออกซิเดชันในตัวเอง (autooxidation) ของลิปิดในอาหาร ในอาหารอบแห้งจะเกิดการสูญเสียวิตามินอีได้ เนื่องจากอาหารชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะถูกออกซิไดส์ ได้ง่าย

วิตามินอีมีมากที่สุดในน้ำมันพืช โดยเฉพาะน้ำมันสกัดจากจมูกข้าวสาลี น้ำมันรำ น้ำมันถั่ว น้ำมันข้าวโพด อาหารที่มีวิตามินอีมากรองลงมา คือ ถั่วเมล็ดแห้ง ผักใบเขียว ธัญพืชที่ขัดสีแต่น้อย ไข่ ตับ เนยเหลว เนยเทียม น้ำมันพืชมีวิตามินอีมากกว่าไขมันจากสัตว์ จึงเห็นเห็นน้อยกว่า เพราะวิตามินอีช่วยป้องกันกลิ่นหืนได้

จากการทดลองกับหมู เป็ดและไก่ พบว่าการขาดวิตามินอี ทำให้หมูตัวผู้เป็นหมัน ส่วนในหมูตัวเมีย การขาดวิตามินนี้ทำให้ลูกอ่อนในครรภ์ไม่เจริญเติบโตและสืบ ไก่ที่ขาด วิตามินอีไข่จะฟักไม่เป็นตัว การเป็นหมันในหมูตัวผู้รักษาไม่ได้ แต่ในหมูตัวเมียสามารถรักษา ได้โดยให้วิตามินอีในอาหารในช่วงแรก ๆ ของการตั้งครรภ์ นอกจากนี้หมูที่ขาดวิตามินอี จะมี creatine ในปัสสาวะสูงผิดปกติ แสดงว่าเกิดการสลายตัวของกล้ามเนื้อ หลอดไตอักเสบ ขน เปลี่ยนสี ถ้าขาดโปรตีนด้วยจะเป็นโรคตับอักเสบ ในคนไม่มีการดังกล่าว คนที่เป็นโรค เกี่ยวกับตับอ่อนหรือท่อน้ำดี หรือกินน้ำมันพาราฟินเป็นประจำ จะทำให้วิตามินอีซึ่งเข้าสู่ ร่างกายน้อยลง

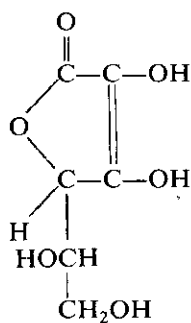
การกินวิตามินอีเกินขนาด คือวันละ 800 หน่วยสากลเป็นเวลา 5 เดือน ไม่พบว่ามีโทษแต่อย่างใด วิตามินอีมีมากเกินไป จะไม่สะสมในตับ แต่จะไปเก็บในกล้ามเนื้อและไขมัน ของร่างกาย ต่อมาได้สมองและต่อมหมวกไตมีวิตามินอีมากกว่าต่อมไม่มีที่อื่น ๆ ปัจจุบันมีผู้ ใช้วิตามินอีเพื่อรักษาโรคหัวใจและหลอดเลือดบางชนิด ช่วยลดไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือด และใช้รักษาโรคหืดทำให้ใช้ออกซิเจนน้อยลง

3.1.2 วิตามินที่ละลายในน้ำ (Water soluble vitamins)

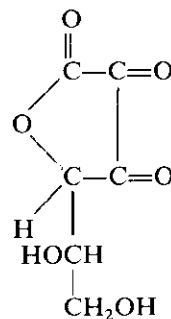
1. วิตามิน ซี (Vitamin C)

วิตามินซี มีชื่อทางเคมีว่า กรดแอสคอร์บิก โรคลักปิดลักเปิด (Scurvy) เป็นผลจาก

การขาดกรดแอสคอร์บิก วิตามินนี้ไม่อาจสังเคราะห์ขึ้นเองในร่างกายคน จำเป็นต้องได้จากอาหาร สูตรเอ็มไพริกัลของ “กรดแอสคอร์บิก” คือ $C_6H_8O_6$ สูตรโครงสร้างของกรดแอสคอร์บิก และกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก (dehydroascorbic acid) ซึ่งเกิดโดยการออกซิไดส์กรดแอสคอร์บิก และมีแอกติวิตีเช่นเดียวกับกรดแอสคอร์บิก คือ



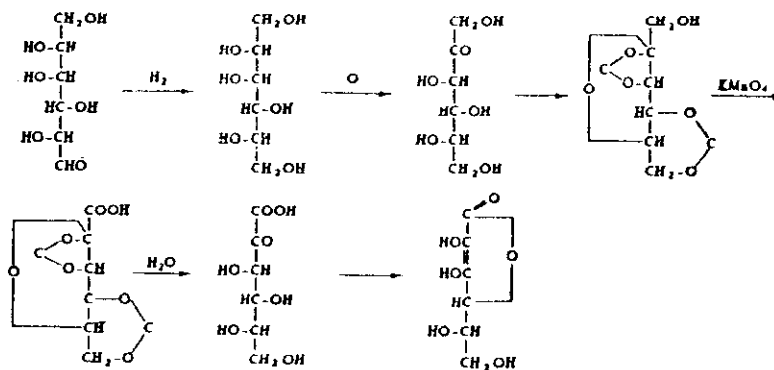
L - ascorbic acid



L - dehydroascorbic acid

วิธีสังเคราะห์กรดแอสคอร์บิก โดย Reichstein และ Grussner (1934) แสดงในรูปที่ 3.3 ขั้นแรกกลูโคสถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอลกอฮอล์คือ D-sorbitol โดยวิธี catalytic hydrogenation ภายใต้ความดัน สารประกอบนี้จะถูกออกซิไดส์โดยแบคทีเรีย *B. xylinum* ไปเป็น L-Sorbose ซึ่งจะต้องมีการจัดตัวใหม่ของโครงสร้าง (ต่อมา Reichstein (1934) ได้ใช้แบคทีเรีย *A. Suboxydans* แทน *B. xylinum*) จากนั้นจึงให้ L-Sorbose ทำปฏิกิริยากับสองโมเลกุลของ acetone โดยมีกรดซัลฟูริกอยู่ด้วย จะเปลี่ยน L-Sorbose ไปเป็น diacetone-L-Sorbose ขั้นต่อไปเป็นการออกซิไดส์ด้วย $KMnO_4$ โมเลกุลของ diacetone-L-Sorbose มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ 1 หมู่ ซึ่งจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นหมู่คาร์บอกซิล กรดที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอสคอร์บิกโดยตรงหรือเอสเตอริไฟด์ (esterified) ด้วยเมธีลแอลกอฮอล์และกรด HCl แล้วจึงถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอสคอร์บิกต่อไป โดยการทำปฏิกิริยากับเมธีลแอลกอฮอล์และโซเดียมวิธีนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้ในทางการค้าด้วย

กรดแอสคอร์บิกมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรง และคุณสมบัตินี้เกิดจากโครงสร้าง enediol ของมัน ซึ่งคอนจูเกตกับหมู่คาร์บอนิลในวงแลกโตน (lactone ring)



รูปที่ 3.3 การสังเคราะห์กรดแอสคอร์บิก

นอกจากนี้ กรดแอสคอร์บิกยังมีคุณสมบัติเป็นกรด ซึ่งเกิดจากการมีหมู่ enediol อยู่ มันเป็นกรดโมโนเบสิก และสามารถทำปฏิกิริยากับต่างได้เกลือ ในสารละลายหมู่ไฮดรอกซิลบน C-3 ไอออนไนซ์ได้ง่าย ($pK_1 = 4.04$ ที่ 25°C) และสารละลายของกรดอิสระมี pH 2.5 หมู่ไฮดรอกซิลหมู่ที่สองไอออนไนซ์ยาก ($pK_a = 11.4$)

กรดแอสคอร์บิกละลายน้ำได้ดีมาก ละลายได้ในแอลกอฮอล์และไม่ละลายในอีเทอร์ มันตกผลึกเป็นแผ่นหรือเป็นเข็มแบบโมโนคลินิก (monoclinic needles) หลอมที่ 102°C พร้อมกับสลายตัว มันหมุนระนาบแสงโพลาไรซ์ไปทางขวา และมี $[\alpha]_D^{20} = +24$ โมเลกุลของกรดแอสคอร์บิกมีอะซิมเมตริกคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม มันจึงมี 4 สเตอริโอไอโซเมอร์ที่เป็นไปได้ แต่ในจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ทั้งหมด เฉพาะกรด L-แอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ที่มีแอกติวิตีเป็นวิตามิน กรดไอโซแอสคอร์บิก (Isoascorbic acid) มีแอกติวิตีเล็กน้อย กรดแอสคอร์บิกยังดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ปานกลาง และการดูดกลืนรังสีขึ้นกับ pH ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การดูดกลืนรังสีของกรดแอสคอร์บิก

pH	$\lambda_{max}(nm)$
2	244
6-10	266
10	294

กรดแอสกอร์บิกละลายน้ำได้ดีมาก ดังนั้น มันจึงสูญเสียไปได้ง่ายจากการชะล้าง การหั่น การปอก หรือการซ้าของผิวอาหาร อย่างไรก็ตาม การสูญเสียที่สำคัญที่สุดหลังจากอาหารผ่านขบวนการ คือ เกิดการแตกหักทางเคมี (chemical degradation) ในอาหารซึ่งมีปริมาณกรดแอสกอร์บิกมาก เช่น ในผลไม้ การสูญเสียมักจะเกิดรวมกับการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง

วิธีทางที่นำไปสู่การแตกหักของกรดแอสกอร์บิกมีมากมายหลายทาง และขึ้นกับสภาวะของแต่ละระบบ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกการแตกหักประกอบด้วยอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือและน้ำตาล, pH, ออกซิเจน, เอ็นไซม์, โลหะที่เป็นตัวเร่ง, กรดอะมิโน, ตัวออกซิไดส์ และตัวรีดิวส์, ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดแอสกอร์บิก, และอัตราส่วนของกรดแอสกอร์บิกและดีไฮโดรแอสกอร์บิก

รูปที่ 3.4 แสดงถึงอิทธิพลของออกซิเจนและโลหะหนักที่มีต่อกรดแอสกอร์บิก เมื่อมีออกซิเจนในระบบ กรดแอสกอร์บิกจะมีการแตกหักเป็นกรดดีไฮโดรแอสกอร์บิก (A) โดยผ่านโมโนแอนไอออน (HA^-) อัตราเร็วของการแตกหักขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะที่เป็นตัวเร่ง (M^{n+}) ในระบบ เมื่อโลหะที่เป็นตัวเร่ง คือ Cu^{2+} และ Fe^{3+} อัตราเร็วของการแตกหักจะเพิ่มขึ้นมากกว่าการออกซิไดส์ที่เกิดขึ้นเอง (โดยไม่มีตัวเร่ง) ดังนั้น แม้จะมีโลหะเหล่านี้เพียงไม่กี่ส่วนในล้านส่วน ก็อาจทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินซีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ไม่มีโลหะเป็นตัวเร่ง จะไม่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ O_2 ในช่วงความดันย่อย (Partial pressure) ต่ำของ O_2 ดังแสดงในตารางที่ 3.7 เมื่อความดันย่อยของ O_2 ต่ำกว่า 0.40 บรรยากาศของ O_2 อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการเกิดออกซิเดชันโดยวิถี (pathway) ที่แตกต่างออกไป วิธีทางหนึ่งที่เป็นไปได้ คือ ออกซิเดชันโดยไฮโดรเปอร์ออกซิล เรดิคัล (hydroperoxyl radicals, HO_2) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในทางตรงข้าม อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งจะขึ้นกับความเข้มข้นของ O_2 จนถึงความดันย่อย 0.19 บรรยากาศ วิธีปฏิกิริยาที่มีหลักฐานยืนยันคือ การเกิดโลหะ-แอนไอออน (metal-anion complex, $MHA^{(n-1)+}$) ซึ่งจะรวมกับออกซิเจนให้โลหะ-ออกซิเจน-ลิแกนด์คอมเพล็กซ์ (metal-oxygen-ligand complex, $MHAO_2^{(n-1)+}$) คอมเพล็กซ์อันหลังนี้มีรูปเรโซแนนซ์ (resonance form) ของไดเรดิคัล (diradical) ซึ่งจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว ให้แอสกอร์เบท เรดิคัล แอนไอออน (A^-) แล้วทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับ O_2 ให้กรดดีไฮโดรแอสกอร์บิก (A) ปฏิกิริยาทั้งที่มีตัวเร่งและไม่มีตัวเร่งซึ่งขึ้นกับปริมาณของ O_2 เป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ใช้อธิบายกลไกของปฏิกิริยา

ซึ่งมี O_2 เกี่ยวข้องใน rate-determining step ของการเกิด $MHAO_2^{(n-1)+}$ การที่ O_2 มีส่วนในปฏิกิริยาเหล่านี้สำคัญมากในการอธิบายอิทธิพลของน้ำตาลและตัวถูกละลาย ที่มีต่อเสถียรภาพของกรดแอสกอร์บิก เช่น ในผลไม้ที่ใส่น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูง จะช่วยลดปริมาณของ O_2 ที่ละลาย ซึ่งจะป้องกันการทำลายกรดแอสกอร์บิกได้

ในวิถีปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง แอสกอร์เบทแอนไอออน (HA^-) จะถูกโจมตีโดยตรงจากโมเลกุลของ O_2 ให้แอสกอร์เบทเรดิคัลแอนไอออน A^- และ HO_2 และตามด้วยการเกิด A และ H_2O_2 อย่างรวดเร็ว ดังนั้น ทั้งปฏิกิริยามีตัวเร่งและไม่มีตัวเร่ง ต่างก็มีอินเทอร์มีเดียท (intermediate) ที่คล้ายกัน ซึ่งไม่อาจบอกความแตกต่างโดยการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิด ดีไฮโดรแอสกอร์เบทจะถูกเปลี่ยนเป็นแอสกอร์เบทได้โดยการรีดิวส์ การสูญเสียแอกติวิตีของวิตามินนี้ จะเกิดหลังจากไฮโดรลิซิสของแลคโตน (A) ไปเป็น 2,3-กรดไดคีโตกูโลนิก [2,3-diketogulonic acid (DKG)]

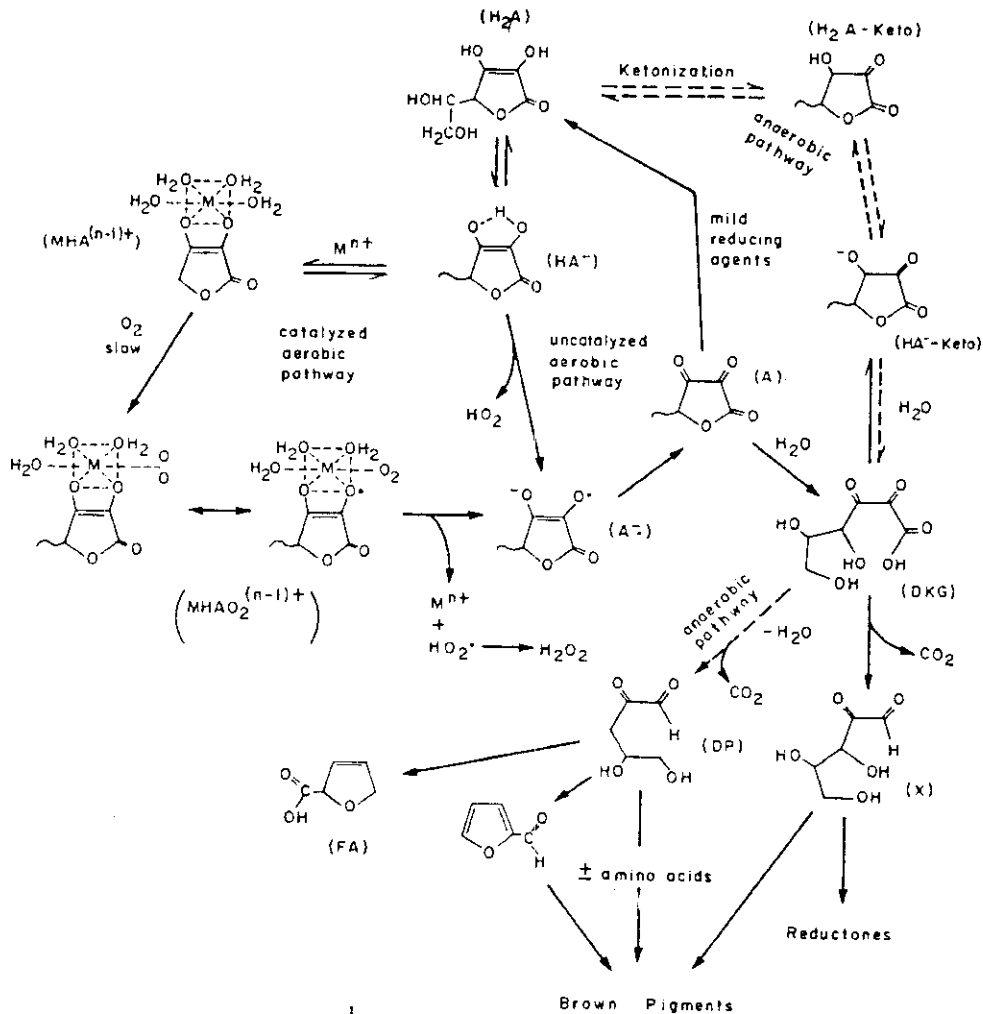
ตารางที่ 3.7 ค่าคงที่ของอัตราเร็ว (rate constants) (หน่วยเป็นวินาที⁻¹) ของกรดแอสกอร์บิก ในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงตามความดันย่อยของออกซิเจน

ความดันย่อยของออกซิเจน (ความดันบรรยากาศ)	ค่าคงที่ของอัตราเร็วจำเพาะสำหรับแอสกอร์เบทแอนไอออน
1.00	5.87
0.81	4.68
0.62	3.53
0.40	2.75
0.19	2.01
0.10	1.93
0.05	1.91

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่มีตัวเร่ง ที่ pH ตรงกับ pK_1 ของกรดแอสกอร์บิก อัตรา

เร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง pH 6 จากนั้นจะไม่เพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าขั้นแรกนี้ โมโนแอนไอออน (HA⁻) เป็นตัวที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรผกผันกับ H⁺ แสดงว่า H₂A และ HA⁻ แข่งขันกันในการทำปฏิกิริยากับ O₂ แต่ค่าคงตัวของอัตราเร็วสำหรับ HA⁻ มีค่าสูงกว่า H₂A 1.5-3 เท่า

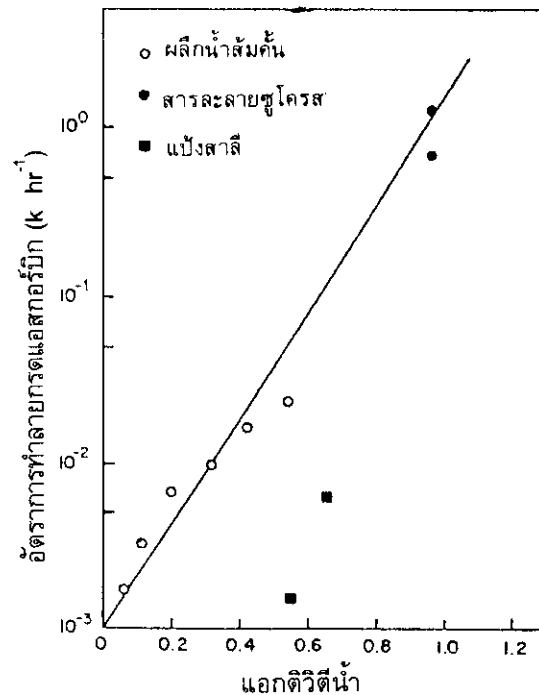
ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic conditions) อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะสูงสุดที่ pH 4 แล้วจะลดลงถึงจุดต่ำสุดที่ pH 2 และจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเป็นกรดมากขึ้น ปฏิกิริยาการแตกหักในสภาวะไร้อากาศ (รูปที่ 3.4) จากการเสนอแนะของ Kurata และ Sakurai คือกรดแอสกอร์บิกทำปฏิกิริยาในรูปของ keto tautomer คือ H₂A-keto tautomer นี้ อยู่ในสมดุลกับแอนไอออนของมัน (HA⁻-keto) ซึ่งจะเกิดการแตกแยกของวงแลกโตน ปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งและปฏิกิริยาในสภาวะไร้อากาศ อาจเกิดได้ในสภาวะที่มีอากาศ แต่ปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนจะเกิดในสภาวะที่มีอากาศได้มากกว่า



รูปที่ 3.4 การแตกหักของกรดแอสกอร์บิก

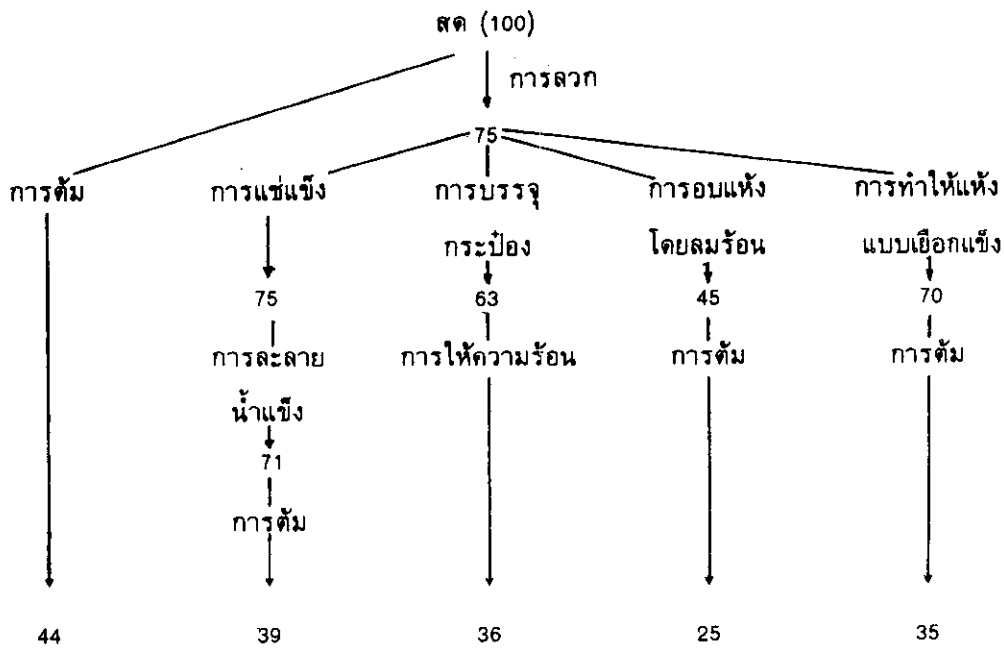
ในรูปที่ 3.4 การแตกหักต่อจาก DKG สามารถเกิดได้ แม้ว่าปฏิกิริยาเหล่านี้จะไม่มี ความสำคัญในด้านโภชนาการ เพราะคุณค่าทางโภชนาการได้สูญเสียไปแล้วที่จุดนี้ การสลายตัว ของกรดแอสกอร์บิกสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องในผลิตภัณฑ์ อาหารบางประเภท Xylosone (X) เกิดโดยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของ DKG ในขณะที่ 3-deoxypentosone (DP) เกิดโดยปฏิกิริยา β -elimination ที่ C-4 ของ DKG ตามด้วยดีคาร์บอกซิเลชัน ในขั้นนี้ปฏิกิริยาได้เริ่มแสดงถึงลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาการเกิด สีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง Xylosone จะแตกตัวต่อไปเป็น reductones และ ethylglyoxal ส่วน DP จะแตกตัวเป็นไป furfural (F) และ 2, 5-dihydrofuroic acid (E) สารประกอบเหล่านี้ สามารถรวมกับกรดอะมิโนทำให้เกิดสีน้ำตาลในอาหารได้

ในน้ำผลไม้กระป๋อง ปฏิกิริยาขั้นแรกนำไปสู่การสูญเสียกรดแอสกอร์บิกคือ การ แตกตัวที่ใช้ออกซิเจนซึ่งจะเกิดจนกระทั่งออกซิเจนเหนือที่ว่างในกระป๋องถูกใช้หมด จากนั้น จึงเกิดการแตกหักแบบแอนแอโรบิก ในน้ำมะนาวที่ทำให้แห้ง การแตกหักของกรดแอสกอร์บิก ขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้น อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อเสถียรภาพของกรดแอสกอร์บิก ในอาหารหลายประเภทแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 แม้ว่ากรดแอสกอร์บิกจะเกิดการแตกหักในสภาวะ ที่มีปริมาณความชื้นต่ำ แต่อัตราเร็วของการแตกหักจะช้าลงซึ่งจะช่วยให้เก็บได้นานขึ้น



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแอกติวิตีของน้ำและอัตราการทำลายกรดแอสกอร์บิก

แม้ว่าเสถียรภาพของกรดแอสกอร์บิกจะเพิ่มขึ้นถ้าลดอุณหภูมิของอาหารลง อุณหภูมิของการเก็บที่สูงกว่า -18°ซ อาจนำไปสู่การสูญเสียกรดแอสกอร์บิกในปริมาณที่มากพอควร โดยปกติการสูญเสียกรดแอสกอร์บิกในอาหารที่ไม่ใช่ประเภท ส้ม มะนาว (noncitrus food) จะมากที่สุดโดยใช้ความร้อน ดังจะเห็นได้จากถั่วหวาน (pea) ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียกรดแอสกอร์บิก

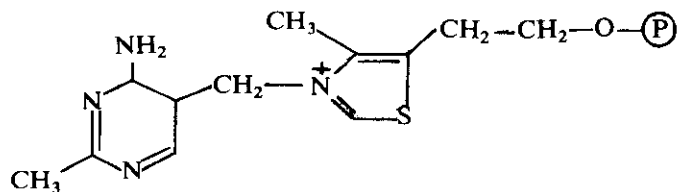


รูปที่ 3.6 ปริมาณของกรดแอสกอร์บิกที่ยังเหลืออยู่ในถั่วหวานหลังจากผ่านขบวนการต่าง ๆ

การวิเคราะห์หาปริมาณของกรดแอสกอร์บิก ใช้วิธีไตเตรดกับ 2,6-ไดคลอโรโรฟีนอลอินโดฟีนอล (2,6-Dichlorophenolindophenol) สารสีนี้จะถูกรีดิวส์โดยกรดแอสกอร์บิก ทำให้สีจางหายไป วิธีนี้ไม่ใช้กับกรดดีไฮโดรแอสกอร์บิก นอกจากนี้ยังอาจใช้วิธีฟลูออริเมตรีโดยวัดความเข้มของการเกิดฟลูออเรสเซนส์เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น

2. วิตามินบีหนึ่ง (Vitamin B₁)

วิตามินบีหนึ่งมีชื่อทางเคมีว่า ไธอามีน (Thiamine) โครงสร้างของไธอามีนเป็นไพริมิดีนที่มีหมู่แทนที่ (Substituted pyrimidine) เชื่อมต่อกับไธอะซอลที่มีหมู่แทนที่ (Substituted thiazole) โดยหมู่เมทิลีน (methylene group)



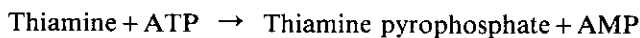
Thiamine pyrophosphate (TPP)

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่า โรคเหน็บชาซึ่งชาวตะวันออกเป็นกันมากเกิดจากการบริโภคข้าวที่สีแล้ว ในปี 1897 Eijkman แสดงให้เห็นว่า เบ็ดไก่ที่บริโภคข้าวที่สีแล้วเกิดโรคเหน็บชาและป้องกันได้โดยให้อาหารที่เหมาะสม ต่อมาในปี 1932 Windaus และผู้ร่วมงานได้เตรียมวิตามินบีหนึ่งที่บริสุทธิ์จากยีสต์และหาสูตรเอมไพริกัลของสารตัวนี้ได้ ในปี 1936 R.R. Williams และคนอื่น ๆ หาสูตรโครงสร้างของสารนี้ได้ และในปีเดียวกันก็ได้สังเคราะห์สารตัวนี้ขึ้น (Cline และผู้ร่วมงาน 1937, Williams และ Cline 1936)

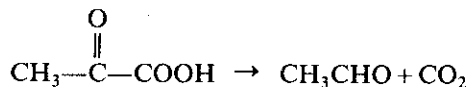
ธอามีนไฮโดรคลอไรด์ (thiamine hydrochloride) สามารถเตรียมในรูปผลึกไม่มีสีและเป็นรูปเข็มโมโนคลินิก (monoclinic needles) และมีจุดหลอมเหลว 20°ซ ละลายน้ำได้ดีมาก น้ำ 1 มล. สามารถละลายธอามีนได้ 1 กรัม สารละลายที่ได้ไม่อปติคัลแอคทีฟ (optically inactive)

ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสูตรโครงสร้างของธอามีน จะทำให้มันสูญเสียแอกติวิตีของวิตามินในทางสรีรวิทยา แต่เกลือหลายตัวของสารนี้มีคุณสมบัติเป็นวิตามิน นอกจากนี้บางรูปที่เกิดจากการเปิดวงไพอะซอลก็มีแอกติวิตีในระบบชีววิทยา

ธอามีนไพโรฟอสเฟต (thiamine pyrophosphate หรือ TPP) ทำหน้าที่เป็นโคเอ็นไซม์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างธอามีนและ ATP โดยตรง



ธอามีนไพโรฟอสเฟตยังเป็นที่รู้จักในชื่อ “cocarboxylase” ซึ่งเป็นโคเอ็นไซม์สำคัญในปฏิกิริยา decarboxylation ของ α -keto acids เช่น กรดไพลูวิก

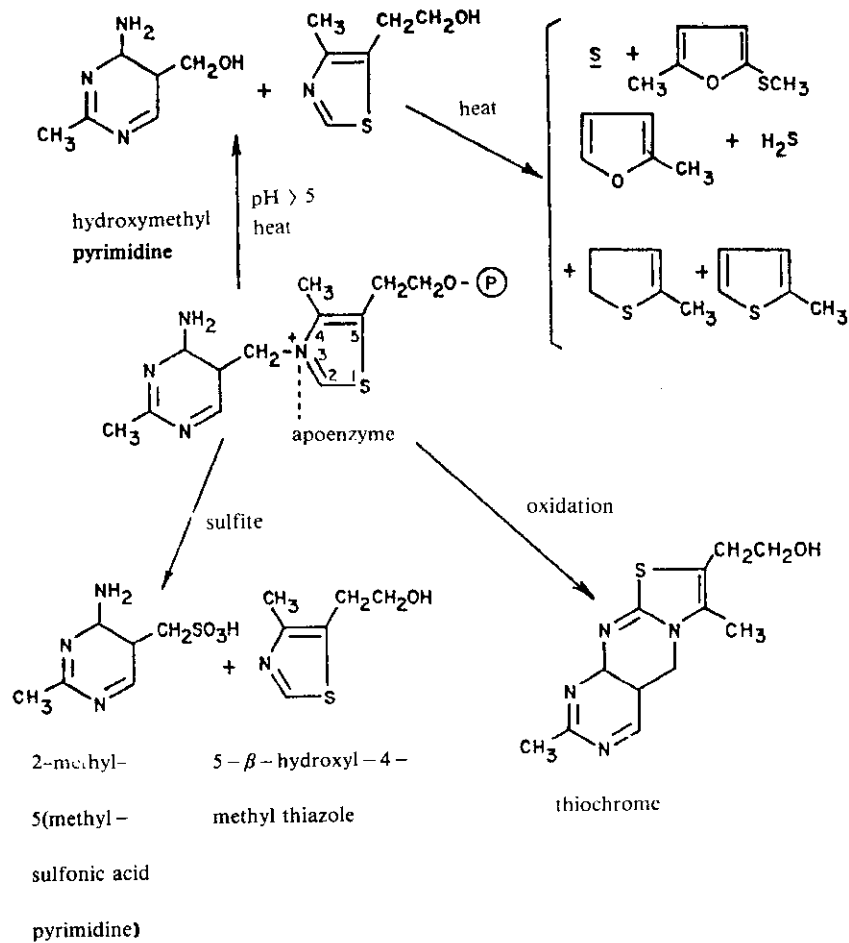


ดังนั้นถ้าขาดธอามีน จะมีสารที่เกิดจาก reduction คือกรดแลกติกสะสมอยู่มาก ทำให้เกิดอาการปวดเมื่อย ธอามีนยังสำคัญใน oxidative pathway โดยตรงสำหรับเมตาโบลิซึมของ

กลูโคส ในพืชไซอามีนส่วนใหญ่เป็นไซอามีนอิสระ กล้ามเนื้อสัตว์ประกอบด้วยไซอามีนอิสระ ประมาณครึ่งหนึ่ง

ไซอามีนเป็นวิตามินที่สูญเสียได้ง่ายที่สุดตัวหนึ่ง การชะล้างผักก่อนหุงต้มก็เกิดการสูญเสียวิตามินนี้ได้ ข้าวที่ผ่านการซาวเพียงครั้งเดียวก็สูญเสียไซอามีนมากถึง 25% เนื้อ, ผัก และผลไม้ที่ผ่านขบวนการแปรรูปต่าง ๆ และระหว่างการเก็บ ก็เกิดการสูญเสียไซอามีนได้ การใส่ น้ำ ในการหุงต้มอาหาร วิตามินนี้จะละลายในน้ำ และสูญเสียไปถ้าหากเทน้ำต้มผักทิ้งไป

เสถียรภาพของไซอามีนยังขึ้นกับ pH, อุณหภูมิ, ionic strength, ชนิดของบัฟเฟอร์ (buffer type) และสารอื่น ๆ ที่ทำปฏิกิริยากับไซอามีนได้ ปฏิกิริยาการแตกหักเกิดจากการแทนที่โดยนิวคลีโอไฟล์ที่เมธิลีนคาร์บอน (methylene carbon) ที่เชื่อมระหว่างระบบวงแหวน 2 วง ดังนั้นถ้ามีนิวคลีโอไฟล์ที่แรง เช่น HSO_3^- (ซัลไฟต์) จะทำลายวิตามินนี้ได้ การแตกหักของไซอามีนโดยซัลไฟต์หรือที่ pH เป็นต่างแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 ทั้งสองขบวนการนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เป็น 5- β -hydroxymethyl-4-methylthiazole และไพริมิดีนที่มีหมู่แทนที่ ในกรณีของซัลไฟต์จะได้ 2-methyl-5-(Methylsulfonyl acid) pyrimidine ส่วนในกรณีของปฏิกิริยาในต่างจะให้ hydroxymethylpyrimidine ปฏิกิริยาการแตกหักของไซอามีนโดยซัลไฟต์นี้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง และปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่ออาหารตากแห้ง เช่น ผัก และผลไม้แห้งที่ใส่ซัลไฟต์เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล สารละลายเอเคียสของไซอามีนที่ pH 3.5 สามารถทนความร้อนถึง 120°ซ เป็นเวลา 20 นาทีโดยไม่เกิดการสูญเสียไป ความร้อนทำลายไซอามีนได้ทำให้เกิดกลิ่นเฉพาะตัวซึ่งมีส่วนทำให้เกิดกลิ่น “เนื้อ” (“meaty” flavors) ในอาหารที่ต้มสุก ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้บางปฏิกิริยาแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 การแตกหักของไซอามีนเกิดวงไพริมิดีน และไซอะโซลได้กล่าวไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ลำดับที่สองยังเกิดได้จากวงไซอะโซล ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ ธาตุซัลเฟอร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารประกอบฟิวแรน (furan) ไทโอฟินและไดไฮโดรไทโอฟิน กลไกนำไปสู่ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังไม่ทราบแน่ชัดแต่คงจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักและการจัดตัวใหม่ของวงไซอะโซล



รูปที่ 3.7 การแตกหักของ Thiamine pyrophosphate

นอกจากนี้ การสูญเสียไรอามีนยังเกิดในผลิตภัณฑ์ปลาดิบ พวกสัตว์ตระกูลคราสตาเซีย (crustacean) เช่น กุ้งทะเลใหญ่ (lobster) และพวกหอย เช่น หอยก้ามมีเอ็นไซม์ Thiaminase ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแตกหักของไรอามีนและทำลายแอกติวิตีของไรอามีน ถ้าหากรับประทานอาหารทะเลเป็นอาหารหลักจะขาดไรอามีนได้

การขาดไรอามีนจะทำให้เป็นโรคเหน็บชา เบื่ออาหารและทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ ซีพจรต่ำ ประสาทอักเสบ (neuritis) ต่อไปจะเป็นอัมพาต และเป็นโรคเกี่ยวกับหัวใจและอาจถึงตายด้วยโรคหัวใจวายได้

ไรอามีนสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้โดยการออกซิไดส์ไรอามีนไปเป็นไฮโอโครม

(thiochrome) (รูปที่ 3.7) โดยใช้สารออกซิไดส์ที่แรง เช่น เฟอร์ไรไซยาไนด์ (ferricyanide), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโอโครมเป็นสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนส์ สามารถหาปริมาณของ วิตามินบี₁₂ได้โดยการวัดความเข้มของการเรืองแสง การตัดแปลงวิธีนี้กับอาหารคือ ไฮโดรไลส์ วิตามินให้เป็นไฮอามีนอิสระ และทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีโครมาโตกราฟี ก่อนจะออกซิไดส์ไปเป็น ไฮโอโครม

ไฮอามีนยังมีลักษณะเฉพาะคือ ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ การวัด λ_{max} ที่ไฮอามีน ดูดกลืนจะต้องควบคุม pH ให้เหมาะสม เพราะวิธีนี้จะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์เฉพาะในสภาวะ ที่จำกัดมาก เพราะผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวของไฮอามีนก็ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ได้ด้วย ค่า λ_{max} ที่ไฮอามีนดูดกลืนขึ้นกับ pH ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารละลายไฮอามีน

ระบบ	$\lambda_{max}(nm)$	ϵ
0.005 N HCl	247	14,500
pH 7.0	231	12,000
	267	8,600

ไฮอามีนมีมากในยีสต์ จมูกข้าว รำข้าว เครื่องในสัตว์ เนื้อหมู เมล็ดถั่วแห้ง ข้าวซ้อมมือ ไข่แดง ส่วนผักและผลไม้มีน้อย ปริมาณของวิตามินบี₁₂หนึ่งในอาหารต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ปริมาณของวิตามินบี₁₂หนึ่งในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
ยีสต์แห้ง	6.00	ถั่วเขียว	0.66
เมล็ดทานตะวัน	1.96	ถั่วดำ ไตแพะ	0.65
รำข้าว	1.85	ถั่วแขก (เมล็ด)	0.62
ถั่วลิสงทั้งเปลือก	1.14	ข้าวเสริมวิตามิน	0.60
ปลาสด	1.00	ถั่วแระ (เมล็ดแห้ง)	0.59
ถั่วลิสงปอกเปลือก	0.99	ไข่แดง	0.56

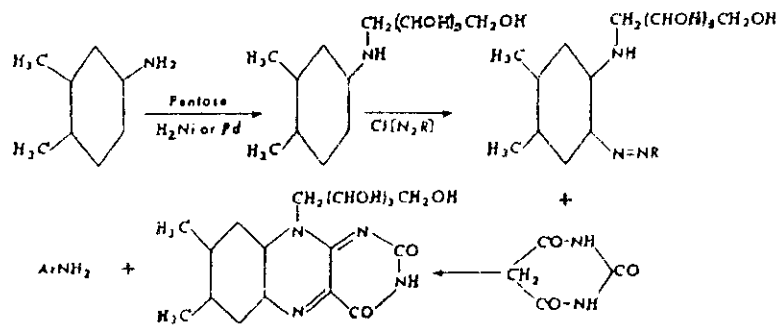
ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
ปูทะเล, มัน	0.79	ข้าวสาลี ถั่วแดง	0.54
หัวใจแกะ	0.70	ตับแพะ	0.51
เนื้อหมู	0.69	งาดำ งาขาว	0.50
เนื้อซี่โครงหมู	0.77	หัวใจวัว	0.48

3. วิตามินบีสอง (Vitamin B₂)

วิตามินบีสองหรือไรโบแฟลวิน (Riboflavin) เป็นสารที่แยกได้จากนมเป็นครั้งแรกในปี 1879 จึงมีชื่อว่า lactochrome ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเหลืองที่เกิดฟลูออเรสเซนส์ได้ในเวย์ (whey) ของนม จนกระทั่งถึงปี 1933 ได้มีการแยกวิตามินนี้จากตับและไข่อีก ประมาณเวลาเดียวกัน Warburg และ Christian ได้แยกวิตามินนี้จากยีสต์ วิตามินนี้เป็นองค์ประกอบของ flavin-protein complex หรือ yellow enzyme ซึ่งจำเป็นต่อการหายใจของเซลล์ยีสต์

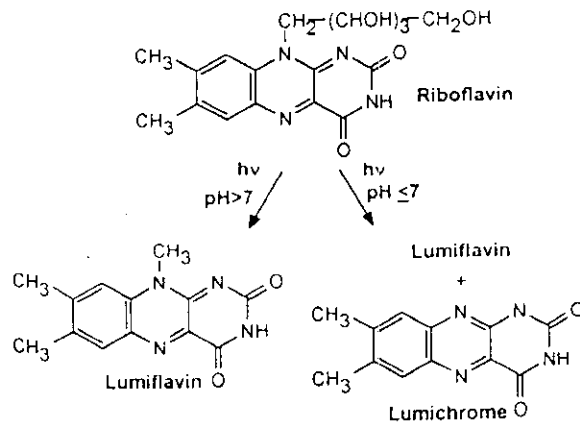
ไรโบแฟลวินมีสูตรโครงสร้างค้นพบโดย Karrer และ Kuhn และสังเคราะห์ได้เป็นครั้งแรกโดย Euler และผู้ร่วมงานในปี 1935 สารประกอบนี้คือ [6,7-dimethyl-9'-(1'-D-ribyl)-isalloxazine] การสังเคราะห์ไรโบแฟลวินในรูปที่ 3.8 เป็นวิธีของ Karrer และ Meerwein (1936) รวมกับขั้นสุดท้ายของ Tichler และผู้ร่วมงาน (1947)



รูปที่ 3.8 การสังเคราะห์ไรโบแฟลวิน

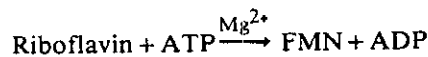
ไรโบแฟลวินตกผลึกเป็นรูปเข็มสีส้มเหลือง หลอมเหลวพร้อมกับสลายตัวที่ 20° ซละลายได้เล็กน้อยในน้ำ ในสารละลายเอเควียส (aqueous solution) มันมีสีเขียวเหลือง และเรืองแสง

ฟลูออเรสเซนต์สีเขียวเหลืองเข้ม การเติมกรดหรือด่าง จะทำให้ฟลูออเรสเซนต์เลื่อนหายไป
 ไรโบฟลาวินค่อนข้างเสถียรในอาหารภายใต้สภาวะปกติ มันทนต่อความร้อนในการ
 หุงต้ม แต่เกิดการสูญเสียได้เมื่ออาหารถูกปกหรือตัด ถูกสีหรือชะล้างในระหว่างการเตรียม
 อาหาร เช่นเดียวกับวิตามินที่ละลายน้ำอื่น ๆ ไรโบฟลาวินจะอยู่ตัวมากในกรด แต่ในสารละลาย
 ด่างมันจะสลายตัวค่อนข้างเร็ว และจะสูญเสียเร็วมากเมื่อถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต
 การสลายตัวเกิดจากการแตกออกของ ribitol โดยวิธีทางโฟโตเคมีได้ลูมิฟลาวิน (lumiflavin)

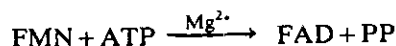


ลูมิฟลาวินที่เกิดเป็นสารออกซิไดส์ที่แรงกว่าไรโบฟลาวินและสามารถเร่งให้เกิด
 การทำลายวิตามินอื่น ๆ โดยเฉพาะกรดแอสคอร์บิก เมื่อหลายปีก่อนพบว่านมที่บรรจุในขวดใส
 และนำออกจำหน่าย ปฏิกริยาที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหานำไปสู่การสูญเสีย
 คุณค่าทางอาหารและยังมีปัญหาในเรื่องกลิ่นรสที่เรียกว่า “sunlight off flavor” นมที่ใสใน
 ขวดแก้วใสเมื่อถูกแสงแดด จะเกิดการสูญเสียไรโบฟลาวินในนมประมาณ 50% ภายในครึ่ง
 ชั่วโมง ต่อมาเมื่อบรรจุอาหารในกล่องกระดาษทึบหรือพลาสติกทึบปัญหานี้ก็หมดไป

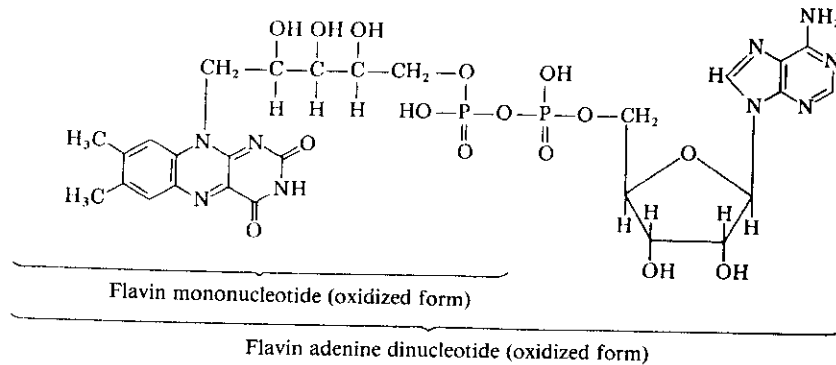
ไรโบฟลาวินมีแอกติวิตีเป็นโคเอ็นไซม์โดยอยู่ในรูปของ flavin coenzymes 2 แบบคือ
 flavin mononucleotide (FMN) และ flavin adenine dinucleotide (FAD) Flavin mononucleotide
 หรือ riboflavin-5-phosphate เกิดจากปฏิกริยาของไรโบฟลาวินกับ ATP โดยมีเอ็นไซม์
 flavokinase เป็นตัวเร่ง



FAD เกิดจาก FMN โดยทำปฏิกริยากับ ATP และเอ็นไซม์ flavin nucleotide pyro-
 phosphorylase



FMN เป็น prosthetic group ของเอนไซม์สีเหลือง (yellow enzyme) ในยีสต์ ส่วน FAD มีบทบาทเป็นโคเอนไซม์ด้วยโดยรวมกับเอนไซม์ เอนไซม์ที่รวมกับวิตามินนี้เรียกว่า แพลโวโปรตีน (flavoprotein) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือ dehydration และยังสำคัญต่อการย้ายไอออน (transport) อิเล็กตรอน FAD เป็นส่วนของเอนไซม์ acyl coenzyme A dehydrogenase ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกซิไดส์กรดไขมัน นอกจากอยู่ในรูปของ mononucleotide และ dinucleotide แล้ว ไรโบแฟลวินยังเกิดเป็นสารอิสระในธรรมชาติ



การขาดไรโบแฟลวินในคน จะทำให้ลิ้นอักเสบ (glossitis) มุมปากแตกเป็นแผลอักเสบ เกิดโรคปากนกกระจอก (cheilosis) ตาแดงเห็นเส้นเลือดที่ตาขาว คันตา ไม่กล้าสู้แสงสว่าง เปลือกตาบวมแดง มักเมื่อยนัยน์ตาและเห็นภาพไม่ชัด การขาดไรโบแฟลวินในคน มักเกิดพร้อมกับการขาดวิตามินบีอื่น ๆ ด้วย

ไรโบแฟลวินสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้โดยการวัดความเข้มของการเรืองแสง ฟลูออเรสเซนส์ในสารละลายเอควียส แหล่งของไรโบแฟลวินคือ รำข้าว ใต้ ไต หัวใจ จมูกข้าว ข้าวซ้อมมือ เนื้อสัตว์ ไข่ เนยแข็ง ถั่วเมล็ดแห้ง ผลไม้เปลือกแข็งและผักใบเขียว ปริมาณของวิตามินบีสองในอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ปริมาณวิตามินบีสองในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

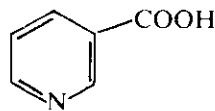
อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
ตับไก่	4.49	ไข่แดง	0.7
ไตหมู	4.36	เห็ดหูหนู	0.71
ตับหมู	3.03	ใบขี้เหล็ก	0.69

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

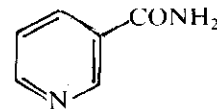
อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
นกพิราบ, เนื้ออก	1.82	ปลาทุสด	0.62
นมผง	1.70	ขาหมู	0.50
หัวใจหมู	1.56	เห็ด	0.44
ปูทะเล	0.89	ไขมันสำปะหลัง	0.43
ปลาเจ้า ไซนักรักษา	0.85	ปอดหมู ไล่หมู	0.41
หัวใจไก่	0.80	ดอกโสน	0.40
ตับวัว	0.76	เนยแข็ง	0.26

4. ในอาซีน, กรดนิโคตินิกและนิโคตินามิด (Niacin, Nicotinic acid and Nicotinamide)

ในอาซีนเป็นที่รู้จักกันเพียงแค่ว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์ตัวหนึ่งเป็นเวลานานกว่า 50 ปี ก่อนที่จะทราบว่ามันมีเอกลักษณ์เป็นวิตามินด้วย การขาดในอาซีนทำให้เกิดโรค pellagra (โรคหนังกระ) ซึ่งเป็นโรคเกี่ยวกับผิวหนัง มีอาการแดงอักเสบของผิวหนังโดยเฉพาะส่วนที่ถูกกับแสงแดด มีอาการท้องร่วงและวิกลจริตด้วย โรค pellagra รู้จักกันตั้งแต่ศตวรรษที่ 18 แต่จนกระทั่งถึง 1915 Goldberger จึงสามารถพิสูจน์ว่าเป็นโรคที่เกิดจากการขาดสารอาหาร Elvehjem และคนอื่น ๆ (1937) พบว่ากรดนิโคตินิกใช้รักษาโรค pellagra ในคนและโรคลิ้นดำ (black tongue) ในสุนัข ทั้งกรดนิโคตินิกและนิโคตินามิดมีเอกลักษณ์ของวิตามินเหมือนกัน



nicotinic acid

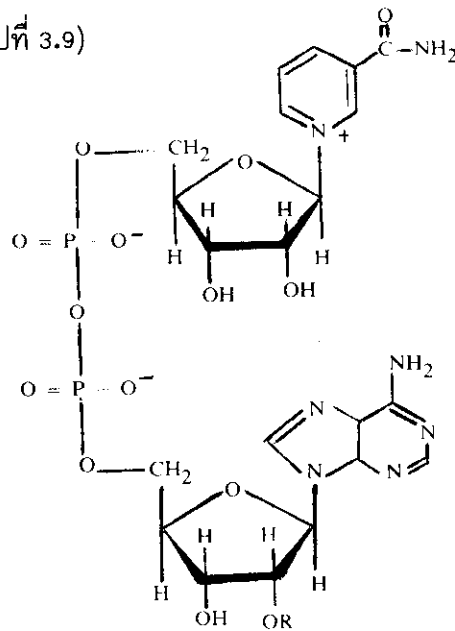


nicotinamide

วิธีสังเคราะห์กรดนิโคตินิก ซึ่งค้นพบโดย McElvain และ Goese (1941) มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ ขั้นแรกเป็นไฮโดรเมทิลเนชันของ pyridine โดยตรงได้ 3-bromopyridine ซึ่งจะเผากับ cuprous cyanide ไปเป็น 3-cyanopyridine จากนั้นจึงไฮโดรไลส์ 3-cyanopyridine ด้วย NaOH และในที่สุดทำให้เป็นกลางด้วย HCl จะได้กรดนิโคตินิก

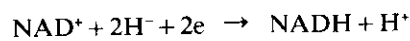
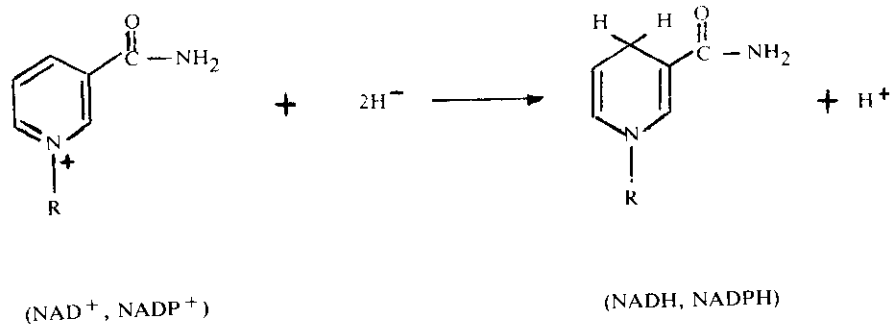
ในอาซีนเป็นองค์ประกอบของโคเอ็นไซม์สองตัวคือ nicotinamide adenine dinucleotide

(NAD⁺) และ nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADP⁺) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ เพราะสามารถรับไฮไดรด์ไอออน (hydride ion) และ เปลี่ยนเป็นรูปรีดิวซ์คือ NADH (reduced nicotinamide adenine dinucleotids) และ NADPH (reduced nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) (รูปที่ 3.9)



Nicotinamide adenosine dinucleotide (NAD⁺) ถ้า R=H

Nicotinamide adenosine dinucleotide phosphate (NADP⁺) ถ้า R=PO₄



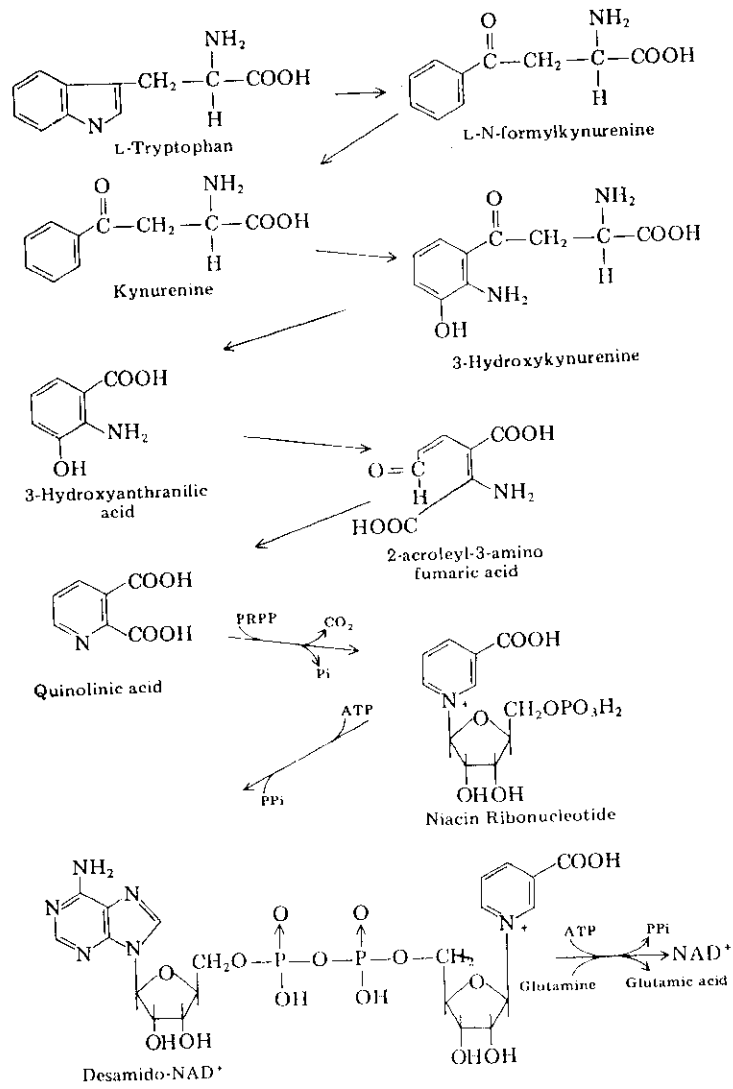
รูปที่ 3.9 Nicotinamide adenosine dinucleotide และ Nicotinamide adenosine dinucleotide phosphate

โคเอ็นไซม์ 2 ตัวนี้มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาทางชีวเคมีมากมาย เช่น ไพรูเวทเมตาโบลิซึม, วัฏจักรซิตริก (citric-acid cycle), ลิปิดเมตาโบลิซึมและการสังเคราะห์พันธะที่มีพลังงานสูง

ไนอาซีนคือ 3-pyridine-carboxylic acid และนิโคตินามิตก็คือ เอมีดของกรดนี้ ไนอาซีนตกผลึกเป็นรูปเข็มจากน้ำและแอลกอฮอล์มีจุดหลอมเหลว 236 - 237°C และระเหิดได้โดยไม่สลายตัว ละลายได้เล็กน้อยในน้ำและแอลกอฮอล์เย็นแต่ละลายได้ในน้ำร้อนและแอลกอฮอล์ร้อน ส่วนนิโคตินามิตละลายได้ดีมากในน้ำและแอลกอฮอล์ เป็นผงสีขาวแต่เกิดเป็นผลึกรูปเข็มเมื่อตกผลึกจากเบนซีน มีจุดหลอมเหลว 129 - 131°C และเดือดภายใต้การลดความดัน

ไนอาซีนเป็นวิตามินที่เสถียรที่สุดตัวหนึ่ง ทนต่อความร้อน กรด ด่าง ออกซิเจน และแสง ไนอาซีนที่อยู่ในอาหารอาจอยู่เป็นกรดนิโคตินิก นิโคตินามิต หรือโคเอ็นไซม์นิโคตินามิต NAD⁺, NADP⁺ ตัวใดตัวหนึ่ง การสูญเสียวิตามินตัวนี้เกิดจากการบด การหั่น การชะล้าง ในระหว่างการเตรียมอาหารพร้อม ๆ กับวิตามินที่ละลายน้ำอื่น ๆ ส่วนการหุงต้มปกติจะไม่มีผลต่อวิตามินนี้ ไนอาซีนมีความสัมพันธ์ทางโภชนาการกับกรดอะมิโนทริปโตเฟน ทริปโตเฟนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนอาซีนได้ (รูปที่ 3.10) ทริปโตเฟนประมาณ 60 มิลลิกรัมจะมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมของไนอาซีนในอาหาร

ไนอาซีนสังเคราะห์ได้โดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่แต่ปริมาณที่สังเคราะห์ได้ไม่พอกับความต้องการของคน ต้องได้รับจากอาหาร อาหารที่มีไนอาซีนมากคือ ยีสต์ รำข้าว ตับ เนื้อสัตว์ ถั่วเมล็ดแห้งและเครื่องในสัตว์ อาหารจากพืชมีไนอาซีนน้อยกว่าอาหารจากสัตว์ นมมีไนอาซีนน้อยก็จริง แต่มีทริปโตเฟนมากจึงเป็นแหล่งเกิดของไนอาซีนทางอ้อม พวกข้าวทุกชนิดมีไนอาซีนมาก ยกเว้นข้าวโพดซึ่งมีไนอาซีนและทริปโตเฟนน้อยกว่าข้าวชนิดอื่น และไนอาซีนในข้าวโพดยังเป็นชนิดที่ไม่อิสระรวมอยู่กับสารอื่น จึงใช้ประโยชน์ไม่ได้เต็มที่ ดังนั้นประชากรในประเทศที่กินข้าวโพดเป็นอาหารหลักมักเป็นโรคขาดไนอาซีนมาก

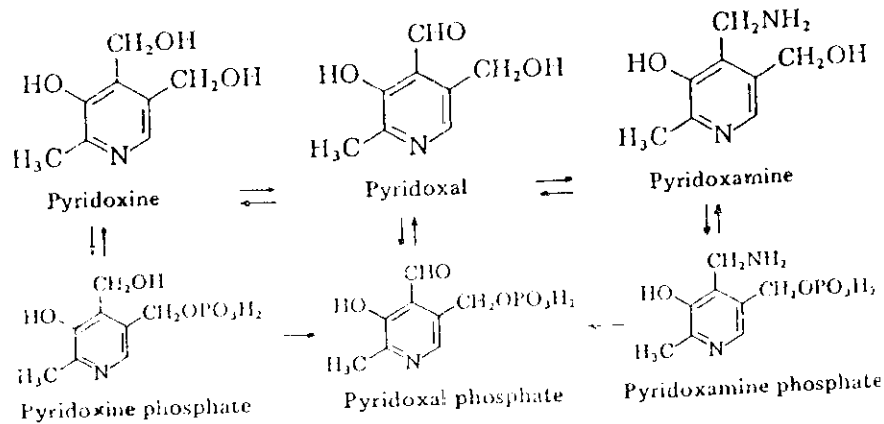


รูปที่ 3.10 เมตาบอลิซึมของทริปโตเฟนและการสังเคราะห์ NAD⁺

5. วิตามินบีหก (Vitamin B₆)

สารประกอบ 3 ตัวที่พบในอาหารที่มีแอกติวิตีของวิตามินบีหกคือ ไพริดอกซัล (pyridoxal), ไพริดอกซีน (pyridoxine) หรือ ไพริดอกซอล (pyridoxol) และไพริดอกซามีน (pyridoxamine) วิตามินนี้มีอยู่ทั่วไปในอาณาจักรพืชและสัตว์ วิตามินบีหกใช้ป้องกันโรคผิวหนังที่จุมูกและเล็บเท้าของหนูทดลองในระยะแรกของการค้นพบวิตามินนี้จึงให้ชื่อว่า anidermatitis vitamin วิตามินนี้จำเป็นต่อการรักษาสุขภาพของคน ไพริดอกซีน แยกได้จากยีสต์และตับของสัตว์ในปี 1938 และสังเคราะห์ได้เป็นครั้งแรกในปี 1939

วิตามินบีหกที่เกิดในเนื้อเยื่อส่วนใหญ่เป็นฟอสเฟตของไพริดอกซัลและไพริดอกซามีน เอ็นไซม์ kinase จำเพาะตัวหนึ่งจะฟอสฟอริเลท (phosphorylate) ไพริดอกซัลในตับ ซึ่งต่อไปจะถูกออกซิไดส์โดยฟลาวโอโปรตีน (flavoprotein) จำเพาะตัวหนึ่งไปเป็นไพริดอกซัลฟอสเฟต ไพริดอกซัลฟอสเฟตเป็นโคเอ็นไซม์ในปฏิกิริยาเคมีหลายปฏิกิริยาซึ่งเกี่ยวข้องกับกรดอะมิโน ความสัมพันธ์ระหว่างรูปต่าง ๆ ของวิตามินบีหกคือ



ไพริดอกซัลฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญใน transamination และ oxidative metabolism ของกรดอะมิโนและอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำกรดอะมิโนเข้าสู่ภายในเซลล์ นี่เป็นเหตุผลที่ต้องเพิ่มปริมาณความต้องการวิตามินนี้เมื่อบริโภคอาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูง

วิตามินบีหกในรูปไพริดอกซอลเป็นรูปที่เสถียรมาก และเป็นรูปที่ใช้เติม (fortification) ลงในอาหาร (fortification หมายถึงการเติมสารอาหารลงในอาหารในปริมาณที่มากกว่าหลายเท่าของที่มีในธรรมชาติ)

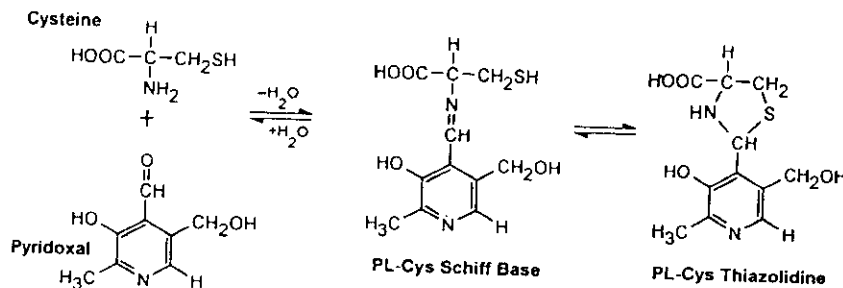
ไพริดอกซีนหรือไพริดอกซอล ตกผลึกจากอะซีโตนเป็นรูปเข็ม มีจุดหลอมเหลว 160 °C

ระเหิดได้และละลายได้ดีมากในน้ำและในแอลกอฮอล์ ไพริดอกซินไฮโดรคลอไรด์ตกผลึกเป็นแผ่นจากแอลกอฮอล์และอะซีโตน มันหลอมที่ 206-208°C และละลายได้ดีมากในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์

วิตามินบีหกที่มีอยู่ในอาหารสดและอาหารแปรรูปจะแตกต่างกัน เช่น ในนมสดจะมีปริมาณไพริดอกซัลสูง ส่วนในนมผง ไพริดอกซัลยังคงมีอยู่มากที่สุดแต่ปริมาณของไพริดอกซามีนจะมากขึ้นกว่าเมื่อเป็นนํ้านมสด นมระเหยจะมีไพริดอกซามีนเป็นส่วนใหญ่ ในเนื้อหมูสดส่วนพุง (pork loin) จะมีไพริดอกซัลมาก ส่วนในแฮมที่สุกแล้ว วิตามินบีหกส่วนใหญ่จะเป็นไพริดอกซามีน

มีผู้สนใจเกี่ยวกับเสถียรภาพของวิตามินบีหกในนมที่ผ่านขบวนการความร้อน เมื่อใส่ไพริดอกซอลในนม มันจะเสถียรระหว่างการสเตอริไลส์ (sterilization) อย่างไรก็ตามวิตามินบีหกที่มีในธรรมชาติเป็นไพริดอกซัลส่วนใหญ่ จากการศึกษา นํ้านมที่ผ่านการสเตอริไลส์พบว่า แอกติวิตีของวิตามินบีหกลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง และจะลดลงเรื่อย ๆ ต่อเนื่องกัน 7-10 วันหลังจากเสร็จขบวนการ เชื่อกันว่า วิตามินบีหกทำปฏิกิริยากับสารซึ่งปลดปล่อยจากโปรตีนของนมเมื่อนมได้รับความร้อน สารสำคัญตัวหนึ่งที่ถูกปลดปล่อยคือ ซิสเทอีน (cysteine) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไพริดอกซัลฟอสเฟตเกิดเป็น thiazolidine

เมื่อให้ซิสเทอีนทำปฏิกิริยากับไพริดอกซัลภายใต้สภาวะคล้ายคลึงกับในขบวนการสเตอริไลส์ พบว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไม่มีแอกติวิตีของวิตามินบีหกเหลืออยู่เมื่อทดลองกับหนู และแอกติวิตีเหลือเพียงประมาณ 20% ในจุลินทรีย์ *S. carlsbergensis* ที่ใช้ทดสอบ ผลิตภัณฑ์



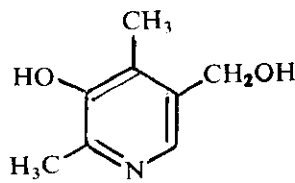
ตัวหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยานี้ปรากฏว่าเป็น bis-4-pyridoxyl disulfide ซึ่งคงจะเกิดจาก thiazolidine ปฏิกิริยาในทำนองเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อไพริดอกซัลทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลไฟดริล (sulfhydryl group) ของซีรัมโปรตีนจากนม ส่วนปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบีหกกับหมู่อะมิโน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างไพริดอกซัล และไพริดอกซามีนซึ่งทั้ง 2 รูปนี้ก็มีแอกติวิตีของวิตามินบีหก

ครบสมบูรณ์ ดังนั้น ปฏิกิริยาที่ทำลายเสถียรภาพของวิตามินบี₆ ในขบวนการความร้อนจึงควรเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากซิสเตอีน

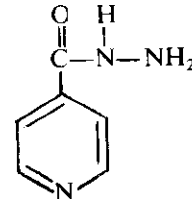
การขาดวิตามินบี₆ จะทำให้เกิดอาการชักในทารกได้ สาเหตุเกิดขึ้นเมื่อปี 1952 เมื่อทารกประมาณ 50 - 60 รายรับประทานนมซึ่งมีจำหน่ายในรูปของน้ำนมและนมผงแล้ว เกิดอาการชัก และจากการค้นพบในภายหลังว่าสาเหตุเกิดจากความไม่เสถียรของไพริดอกซัลในนมที่มีโปรตีนนมอยู่ ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการเติมไพริดอกซอลซึ่งเสถียรมากกว่าในผลิตภัณฑ์อาหารนั้น

ร่างกายสังเคราะห์วิตามินบี₆ ได้เองจากแบคทีเรียในลำไส้ ในคนจึงมักไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการขาดวิตามินบี₆ นอกจากในทารกถ้าขาดจะมีอาการชัก ส่วนในผู้ใหญ่ถ้าขาดจะเกิดโรคผิวหนังมีอาการคลื่นไส้อาเจียนง่าย ลึนแตก อาการเหล่านี้อาจเกิดจากการใช้ยาบางชนิด เช่น deoxypyridoxine หรือ isoniazid ซึ่งใช้เป็นยารักษาวัณโรคได้ deoxypyridoxine เป็นสารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายไพริดอกซิน จึงเป็น competitive inhibitor ส่วน isoniazid จะไปรวมกับไพริดอกซัลและฟอสเฟตของมันทำให้ร่างกายไม่สามารถใช้วิตามินบี₆ นี้

วิตามินบี₆ มีมากในธัญพืช ข้าว ไข่สด เครื่องในสัตว์ เนื้อสัตว์ ถั่วเมล็ดแห้ง และผักสด ปริมาณของวิตามินบี₆ ในอาหารประเภทต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.11



deoxypyridoxine



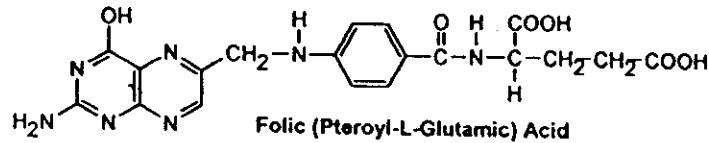
isoniazid

ตารางที่ 3.11 ปริมาณวิตามินบี₆ ในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	ไมโครกรัม	อาหาร	ไมโครกรัม
ไข่สด	3,930	เนื้อวัว	400
จมูกข้าวสาลี	1,030 - 1,120	กล้วย, ถั่วลิสง	300
ไตวัว	390 - 1,020	กะหล่ำปลี	290
ตับวัว	710 - 810	ข้าวโอ๊ต	190 - 250
แฮมสด	330 - 580	มันฝรั่ง	160
ข้าวโพด	250 - 570	ส้มเขียวหวาน	80
ข้าวสาลี	270 - 410	นมวัว	65 - 73

6. โฟเลท (Folate)

คำว่า " โฟเลท " เป็นชื่อเรียกกลุ่มสารประกอบที่มีโครงสร้างทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการที่คล้ายคลึงกับกรดโฟลิก(folic acid หรือ pteroyl-L-glutamic acid) กรดโฟลิกประกอบด้วย L-glutamic acid ซึ่งควบ(coupled) ผ่านหมู่แอลฟา - อะมิโน (α -amino group) ไปยังหมู่คาร์บอกซิลของ p-amino-benzoic acid ซึ่งอีกด้านหนึ่งจะเชื่อมต่อกับ 2-amino-4-hydroxy-pteridine

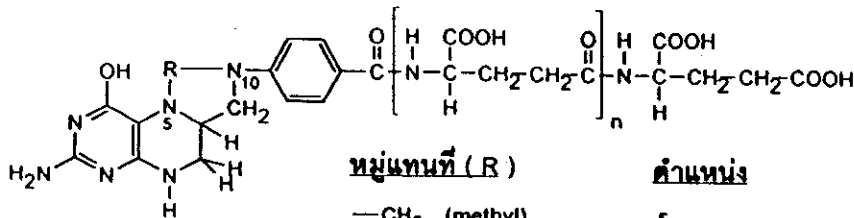


2-amino-4-hydroxypteridine p-amino-benzoic acid L-glutamic acid

Folic(Pteroyl-L-glutamic) acid

กรดโฟลิกที่เกิดในธรรมชาติมีเพียงเล็กน้อย โฟเลทส่วนใหญ่ในธรรมชาติที่มาจากแหล่งของพืช สัตว์และจุลินทรีย์ได้แก่ กลุ่ม 5,6,7,8-tetrahydrofolates(H_4 folates)ที่มีหมู่กลูตามิลหลายหมู่(polyglutamyl species) 7,8-dihydrofolates(H_2 folates)ก็มีอยู่บ้างในธรรมชาติ

Tetrahydrofolates เป็นโคเอ็นไซม์ที่ทำหน้าที่ย้ายโอนคาร์บอนหนึ่งหมู่ จึงมีโฟเลทที่มีคาร์บอนหนึ่งหมู่ในรูปต่างๆเช่น เมธิล, ฟอर्मิล(formyl), ฟอर्मิมิโน(formimino), เมธิลีน, เมธินิล(methenyl) มาเกาะอยู่ที่ตำแหน่ง N^5 หรือ N^{10} สำหรับหมู่เมธิลีน($-CH_2-$) หรือหมู่เมธินิล($-CH=$) จะเชื่อมต่อระหว่าง N^5 และ N^{10} ส่วนหมู่เมธิล($-CH_3$), หมู่ฟอर्मิล($-CHO$) หรือหมู่ฟอर्मิมิโน($-CH=NH$) จับกับ N^5 และ N^5 ไม่มีพันธะเชื่อมต่อกับ N^{10} โดย N^{10} มีไฮโดรเจนจับอยู่



หมู่แทนที่ (R)

$-CH_3$ (methyl)	5
$-CHO$ (formyl)	5 or 10
$-CH=NH$ (formimino)	5
$-CH_2-$ (methylene)	5 and 10
$-CH=$ (methenyl)	5 and 10

ตำแหน่ง

Polyglutamyl tetrahydrofolate

ความเสถียรของ tetrahydrofolates รูปต่างๆ เป็นผลจากหนึ่งหมู่คาร์บอนที่จับอยู่
 ง่ายต่อการถูกทำลายโดยออกซิเดชัน ในกรณีส่วนใหญ่ กรดโฟลิกเสถียรกว่า H₄folates หรือ
 H₂folates ลำดับความเสถียรของ H₄folates คือ 5-formyl-H₄folate > 5-methyl-H₄folate >
 10-Formyl-H₄folate > H₄folate

Tetrahydrofolates ทำหน้าที่เป็นโคเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายหมู่เมธิล(CH₃)
 ระหว่างชีวโมเลกุลซึ่งขบวนการดังกล่าวมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์เบส purine , pyrimidine
 ของกรดนิวคลีอิก สารประกอบที่โครงสร้างคล้ายกรดโฟลิก เช่น aminopterin และ methopterin
 สามารถยับยั้งการสังเคราะห์ Thymine และลดการสังเคราะห์ DNA ในเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโต
 และในเซลล์ที่แบ่งตัว ยา 2 ชนิดนี้จึงใช้ควบคุมโรคมะเร็งในเม็ดเลือดขาว(Leukamia) และโรค
 มะเร็งอื่นๆ

ปริมาณการสูญเสียโฟเลตเกิดมากในอาหารที่ผ่านการแปรรูปและระหว่างการเตรียม
 อาหาร ขบวนการทำลายแอกติวิตีของวิตามินนี้คือ ออกซิเดชัน โฟเลตถูกสกัดจากอาหารได้
 ง่ายโดยตัวกลางเอควีเยส(aqueous media)(ตารางที่ 3.12) การสูญเสียโฟเลตเกิดจากปัจจัย
 หลายอย่าง เช่น ขึ้นกับรูปต่างๆของกรดโฟเลตที่มีในอาหาร (กรดโฟลิกเป็นรูปที่เสถียรที่สุด ส่วน
 tetrahydrofolate เป็นรูปที่เสถียรน้อยที่สุด) และยังขึ้นกับธรรมชาติของสภาวะแวดล้อมทางเคมี
 เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา, สารออกซิไดส์, pH, ไอออน, ตัวกลางบัฟเฟอร์ เป็นต้น ดังนั้น ปริมาณการ
 สูญเสียแจ้งยากที่จะคาดคะเนได้ การทำลายโฟเลตจะเกิดพร้อมกับการทำลายกรดแอสคอร์บิก
 ด้วย และการเติมกรดแอสคอร์บิกทำให้โฟเลตเสถียร

ตารางที่ 3.12 ผลของการหุงต้มต่อปริมาณของโฟเลตในผักบางชนิด

ผัก (ต้ม 10 นาทีในน้ำ)	โฟเลตทั้งหมด (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมของผักสด)		
	ดิบ	ต้มสุก	โฟเลตในน้ำต้มผัก
หน่อไม้ฝรั่ง	175 + 25	146 + 16	39 + 10
บร็อกคอรี่	169 + 24	65 + 7	116 + 35
ถั่วงอกบรัสเซล	88 + 15	16 + 4	17 + 4
กะหล่ำปลี	30 + 12	16 + 8	17 + 4
ดอกกะหล่ำ	56 + 18	42 + 7	47 + 20
ผักขม	143 + 50	31 + 10	92 + 12

การขาดกรดโฟลิกจะทำให้เป็นโรคโลหิตจางชนิด Macrocytic คือเม็ดเลือดแดงเจริญเติบโตไม่เต็มที่ มีขนาดโตกว่าปกติและสีสด แต่จำนวนเม็ดเลือดแดงในเลือดมีน้อยกว่าปกติ โรคโลหิตจางชนิดนี้มักเกิดคู่กับการขาดวิตามินซีและบีสิบสอง การเจริญเติบโตไม่เป็นปกติและปริมาณเม็ดเลือดขาวลดลง คนไข้มีอาการท้องร่วง (tropical sprue) แก้ได้โดยให้รับประทานกรดโฟลิก และคนไข้ที่มีอาการโรคโลหิตจางชนิด pernicious anemia จะแก้ได้โดยให้กรดโฟลิกและวิตามินบีสิบสองร่วมกัน

กรดโฟลิกมีมากในตับ ยีสต์ เนื้อสัตว์ ปลา ผักใบเขียว ธัญพืชและถั่วเหลือง ปริมาณของกรดโฟลิกในอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.13

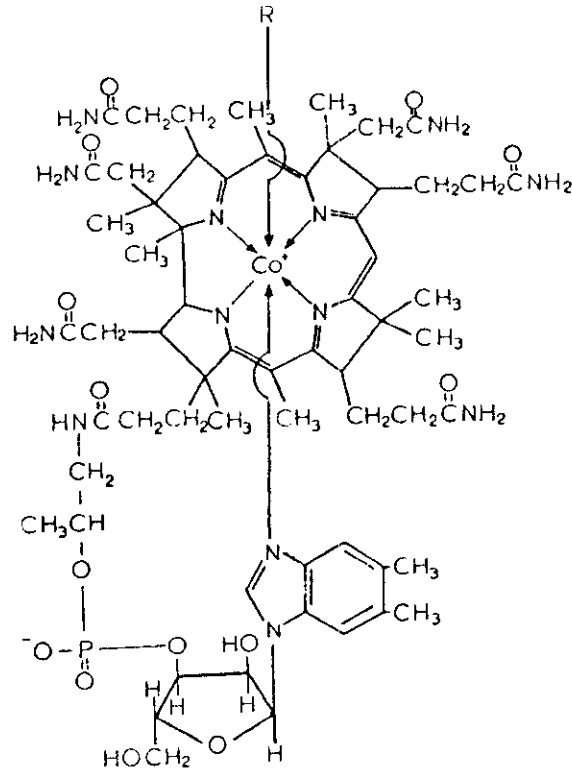
ตารางที่ 3.13 ปริมาณของกรดโฟลิกในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	ไมโครกรัม	อาหาร	ไมโครกรัม
ปลาแซลมอน	870	แตงโม	150
ตับวัว	380	เนื้อหมู (ตะโพก)	65 - 140
จมูกข้าว	280 - 330	มันฝรั่ง	140
ถั่วลิสงคั่ว	280	แฮม	58 - 120
เนื้อไก่	120 - 250	เนื้อวัว	100
หอยนางรม	240	กล้วย เห็ด	95
ผักซี	170	ไข่	86
เนื้อลูกวัว	92 - 170	ผักกาดหอม ส้มเขียวหวาน	69-84

7. วิตามินบีสิบสอง (Vitamine B₁₂)

วิตามินตัวนี้เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนมากสามารถสกัดได้จากตับ และราชนิด *Streptomyces griseus* สามารถใช้รักษาโรคโลหิตจางได้ วิตามินบีสิบสองเป็นสารธรรมชาติที่แปลกเพราะมันประกอบด้วยโลหะ cobalt และมีอีกชื่อว่า "Cyanocobalamin" เพราะมันเกิดเป็น coordination complex กับโลหะโคบอลต์ มีสูตรเอ็มไพริคัล คือ C₆₃H₉₀N₁₄O₁₄PCo วิตามินบีสิบสองมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.11

วิตามินบีสิบสองหรือ cyanocobalamin เป็นผลึกสีแดงเข้มและเป็นรูปเข็ม เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 200 - 210°ซ จะเปลี่ยนเป็นสีดำ แต่ไม่หลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°ซ ละลายน้ำได้ดี เป็นสารออปติคัลแอคทีฟ มี $[\alpha]_{D}^{25} = -59^{\circ} \pm 9^{\circ}$ ปัจจุบันพบว่า cobalamin ใช้แทนบีสิบสองได้



รูปที่ 3.11 วิตามินบีสิบสอง

- 1) เป็น cyanocobalamin เมื่อ R = cyanide
- 2) เป็นรูปโคเอ็นไซม์ของบีสิบสองเมื่อ R = 5' - deoxyadenosyl

รูปโคเอ็นไซม์ของวิตามินบีสิบสองคือ cobamide ซึ่งมีวงแหวนคอร์ริน (corrin ring) เป็นศูนย์กลางของโครงสร้าง ประกอบด้วยโคบอลต์และมีโคบอลต์เป็นไดเวเลนต์ โคเอ็นไซม์นี้ ประกอบด้วย deoxyadenosine โคเอ็นไซม์บีสิบสองหรือ cobamide เกี่ยวข้องกับการขนย้ายหมู่ อัลคิล ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยน methyl malonyl CoA ไปเป็น succinyl CoA และการเปลี่ยนกรด กลูตามิกไปเป็น β -methyl aspartic acid ทั้งโคเอ็นไซม์ของบีสิบสอง และกรดโฟลิกจะทำหน้าที่ ร่วมกันในการเติมหมู่เมทิล เช่น ในการเปลี่ยน deoxyuridylic acid ไปเป็น thymidylic acid เชื่อกันว่าการที่ไขกระดูกมีปริมาณการสร้าง thymidylic acid ไม่เพียงพอ ทำให้ขาดความสมดุล ของสารจำพวก nucleotides ซึ่งจะนำไปสู่ความผิดปกติของการสร้างฮีโมโกลบิน ดังนั้น การขาด วิตามินบีสิบสองจึงทำให้เป็นโรคโลหิตจางได้

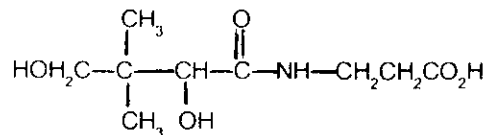
การขาดวิตามินบีสิบสองจะเป็นโรคโลหิตจางที่เรียกว่า Pernicious anemia คือเม็ดเลือดแดงโตผิดปกติ ลึนอักเสบ ระบบประสาทผิดปกติ เช่น แขนขาแข็งกระวานกระวาย มีนงง คนที่เป็นโรคนี้อาจเกิดความบกพร่องทางกรรมพันธุ์ คือขาดสาร mucopolysaccharide ที่เรียกว่า Intrinsic factor (IF) ในน้ำย่อยจากกระเพาะอาหาร IF เป็นสารพวกโปรตีนซึ่งช่วยทำให้วิตามินบีสิบสองที่รวมอยู่กับสารอื่นในอาหารแยกตัวเป็นอิสระและดูดซึมเข้าร่างกายได้สะดวก คนที่เป็นโรค Pernicious anemia จึงมักรักษาด้วยการฉีดวิตามินบีสิบสองหรือให้กินตับซึ่งอุดมด้วยวิตามินบีสิบสอง

มีข้อมูลน้อยมากเกี่ยวกับเสถียรภาพของวิตามินบีสิบสองในอาหาร วิตามินนี้เสถียรที่สุดที่ pH 4-6 ช่วง pH นี้ การสูญเสียจะน้อยมากแม้จะนิ่งด้วยหม้ออัดความดัน ที่ pH สูงกว่านี้หรือถ้ามีสารรีดิวส์อยู่ เช่น กรดแอสคอร์บิกหรือซัลไฟต์ จะเกิดการสูญเสียมาก

วิตามินบีสิบสองมีมากที่สุดในตับ ไต และหอย นอกจากนี้ยังมีในเนื้อสัตว์ เช่น เนื้อวัว เนื้อหมู เนื้อเป็ด ไข่ เนื้อแกะ และปลาน้ำเค็ม นม เนยแข็ง ไข่แดง อาหารพวกพืช เช่น ผัก ข้าวและถั่วเมล็ดแห้งมีวิตามินบีสิบสองน้อยมาก แต่อาหารหมัก เช่น น้ำปลา ซีอิ๊ว เต้าเจี้ยว ฯลฯ มีวิตามินบีสิบสองมากพอควร นอกจากนี้แบคทีเรียในลำไส้ใหญ่สามารถสังเคราะห์วิตามินนี้ได้ แต่การดูดซึมของวิตามินบีสิบสองจะดูดซึมได้ต้องอาศัย IF ดังที่กล่าวมาแล้ว

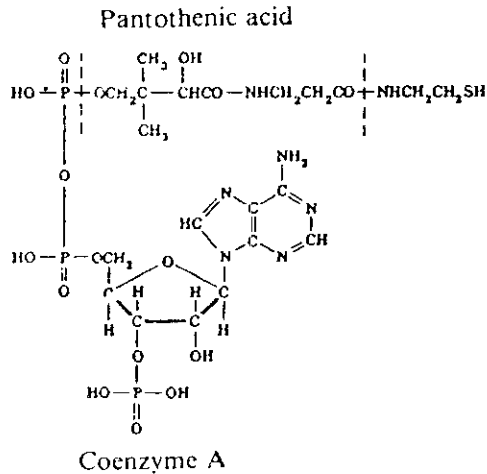
8. กรดแพนโทเทมิก (Pantothenic acid)

สารประกอบนี้ได้ถูกค้นพบว่าเป็นปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโตของยีสต์ โดย R.J. Williams ในปี 1933 ต่อมาก็พบว่ามีความสำคัญในโภชนาการของสัตว์ สารประกอบนี้จัดอยู่ในกลุ่มของวิตามินบีคอมเพล็กซ์



Pantothenic acid

วิตามินนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของ coenzyme A และโดยปกติจะอยู่ในรูปนี้ในเนื้อเยื่อของสัตว์



ส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นประในโมเลกุลของ coenzyme A ที่แสดงไว้นี้คือส่วนของกรดแพนโตเทนิค Coenzyme A สำคัญมากต่อเมตาโบลิซึมของไขมัน, คาร์โบไฮเดรตและสารประกอบในโครโมโซมในร่างกาย กรดแพนโตเทนิคสามารถสังเคราะห์ได้ บุคคลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารตัวนี้มีหลายกลุ่มด้วยกัน (Stiller และผู้ร่วมงาน 1940; Williams และผู้ร่วมงาน 1950)

กรดแพนโตเทนิค เป็นน้ำมันสีเหลืองขุ่นหมุนระนาบแสงโพลาไรส์ไปทางขวา (dextro-rotatory) มี specific rotation $[\alpha]_D^{25} = +37.5^\circ$ แคลเซียมแพนโตเทเนท (calcium pantothenate) ซึ่งผลิตขึ้นในทางการค้าเป็นเกลือที่มีผลึกเล็กมาก (microcrystothenate salt) หมุนระนาบแสงโพลาไรส์ไปทางขวา มี $[\alpha]_D^{25} = +28.2$ วิตามินอีละลายน้ำได้ดีมากและละลายได้ในอีเธอร์ ส่วนเกลือแคลเซียมของกรดแพนโตเทนิคละลายได้ในอีเธอร์ ส่วนเกลือแคลเซียมของกรดแพนโตเทนิคละลายน้ำได้แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

กรดแพนโตเทนิคเสถียรมากที่สุดในช่วง pH 4-7 ในอาหารมันจะเป็นส่วนของ coenzyme A นอกเหนือจากช่วง pH ที่กล่าวมาแล้ว หมู่เอมีดของกรดแพนโตเทนิคจะถูกไฮโดรไลส์ได้ง่าย และได้เบต้า-อะลานีน (β -alanine) และกรดแพนโทอิก (pantoic acid) วิตามินนี้อาจสูญเสียมากถึง 50% ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านขบวนการความร้อน

การขาดแพนโตเทนิคจะพบในสัตว์ทดลองทำให้ผิวหนังและขนเปลี่ยนสีเกิดโรคผิวหนังโรคกระเพาะและลำไส้ เป็นหมัน ระบบประสาทและต่อมหมวกไตอีกเสบเป็นแผลและทำงานผิดปกติ สัตว์ทดลองจะพบขนหงอกเร็ว ขนร่วง ผิวหนังอักเสบ เป็นวงรอบขอบตาและบริเวณปาก ในคนไม่เกี่ยวกับผมหงอกแต่จะร้อนช้ำที่มือและเท้า เหนื่อย นอนไม่หลับ ปวดศีรษะ

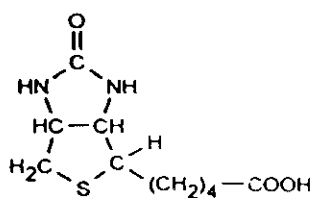
คลื่นไส้ อาเจียน กล้ามเนื้อเป็นตะคิว การประสานงานของอวัยวะเสียไป ภายหลังจากนี้เชื่อกันว่ากรดนี้ช่วยผ่อนคลายอารมณ์เครียดได้ และยังจำเป็นสำหรับผลิตสารต่อต้านเชื้อโรคในร่างกาย คนทั่วไปมักไม่พบการขาดวิตามินนี้ เพราะแบคทีเรียในลำไส้สังเคราะห์ให้ได้ การขาดวิตามินนี้พบในคนที่เป็โรคพิษสุราเรื้อรังและรับประทานอาหารไม่ถูกหลักโภชนาการ หรือเป็นโรคขาดวิตามินอื่นโดยเฉพาะบีสอง

กรดแพนโทเทนิคมีมากในเนื้อสัตว์ ตับ ธัญพืชและถั่วเมล็ดแห้ง ผักและผลไม้ไม่มีกรดแพนโทเทนิคน้อย อาหารที่มีไวตามินบีสองมากมักมีกรดนี้มากด้วย ปริมาณของกรดแพนโทเทนิคในอาหารต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.14

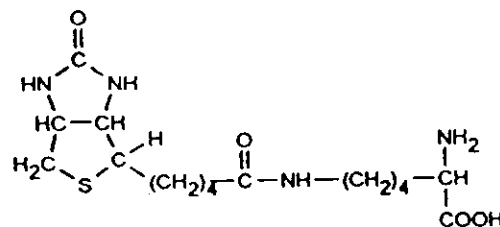
ตารางที่ 3.14 ปริมาณกรดแพนโทเทนิคในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	ไมโครกรัม	อาหาร	ไมโครกรัม
ยีสต์แห้ง	9924	มันเทศ	935
ตับวัว	9336	หมูแฮม	694
ไข่	1575	เมล็ดอัลมอนต์	578
กะเน้า	1288	นมสด	323
มะม่วงหิมพานต์	1162	มะเขือเทศ	314
ข้าวสาลี	1095	กล้วย	306
แห้ว	970	เนยแข็ง, กะหล่ำปลี	280

9. ไบโอดีน (Biotin)



Biotin



Biocytin

ไบโอตินมีโครงสร้างเป็นไบไซคลิก (bicyclic) ทำหน้าที่เป็นโคเอ็นไซม์ในปฏิกิริยา Carboxylations และ transcarboxylations วิตามินนี้ที่เกิดในธรรมชาติมี 2 รูป คือ D-Biotin ซึ่งอยู่อย่างอิสระและ biocytin (ϵ -N-biotinyl-L-lysine) Biocytin เป็นรูปโคเอ็นไซม์ประกอบด้วยไบโอตินต่อกับไลซีนเรซิดิว (biotinyl lysyl residue) และต่อด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ไซโปรตีนหนึ่งของเอ็นไซม์ carboxylases เอ็นไซม์เหล่านี้ทำหน้าที่นำคาร์บอนไดออกไซด์มาจับกับโมเลกุลอินทรีย์ ปฏิกิริยาสำคัญได้แก่ การสังเคราะห์ malonyl CoA ซึ่งมี Acetyl CoA carboxylase เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาเริ่มแรกของการสังเคราะห์กรดไขมัน

ระบบวงของไบโอตินสามารถอยู่ในสเตอริโอไอโซเมอร์ได้ถึง 8 รูป แต่มีเพียงสเตอริโอไอโซเมอร์เดียวที่เกิดในธรรมชาติและมีแอกติวิตีเป็นวิตามิน ไบโอตินมีอยู่ทั่วไปในผลิตภัณฑ์อาหารที่มาจากพืชและสัตว์

ไบโอตินเสถียรต่อความร้อน แสง และ ออกซิเจน pH ที่ต่ำหรือสูงไปทำให้ไบโอตินเสื่อมสลายได้ เนื่องจากช่วง pH ดังกล่าวอาจทำให้เกิดไฮโดรลิซิสของพันธะ $-N-C=O$ (amide) ของระบบวงของไบโอติน ในสภาวะที่เหมาะสมไบโอตินจะถูกออกซิไดส์ เช่น เมื่อสัมผัสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไบโอตินจะถูกออกซิไดส์ที่ซัลเฟอร์เกิดเป็น biotin sulfoxide หรือ sulfone ซึ่งจะทำให้ไบโอตินสูญเสียแอกติวิตี ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนิลของวงกับเอมีนก็อาจเกิดขึ้นได้ แม้ว่า จะยังไม่มีมีการตรวจสอบปฏิกิริยาดังกล่าว กล่าวโดยรวม ไบโอตินค่อนข้างจะเสถียรในอาหาร

การรับประทานไข่ขาวดิบเป็นประจำ จะทำให้ร่างกายขาดไบโอติน เพราะ avidin ซึ่งเป็นโปรตีนในไข่ขาวสามารถจับไบโอตินอย่างแน่นหนา ทำให้ไบโอตินไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็ก แต่ถ้าลวกหรือต้มไข่ให้สุก avidin จะสูญเสียสภาพธรรมชาติและไม่สามารถจับไบโอติน ไบโอตินก็ถูกดูดซึมได้ ดังนั้น จึงควรต้มไข่ให้สุกก่อนบริโภค

ปกติมักไม่พบการขาดไบโอตินในคน เพราะแบคทีเรียในลำไส้คนสามารถสังเคราะห์ไบโอตินได้ และอาหารที่เราบริโภคตามปกติก็ให้ไบโอตินเพียงพอ การขาดไบโอตินจะทำให้เป็นโรคผิวหนังอย่างรุนแรง ระบบน้ำ ระบบประสาทผิดปกติ เกิดโรคโลหิตจางและผมร่วง

อาหารที่มีไบโอตินมากที่สุด ได้แก่ ไข่ ไต นม ไข่แดง และยีสต์ นอกจากนี้ยังมีมากในผักและผลไม้สดหลายชนิด อาหารที่มีไบโอตินน้อยมากคือ เนื้อสัตว์ เมล็ดธัญพืช และผลิตภัณฑ์จากข้าวและแป้ง

3.2 แร่ธาตุ (minerals)

แร่ธาตุเป็นสารอาหารที่จำเป็นในการเสริมสร้างความแข็งแรงของร่างกาย และควบคุมการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของร่างกาย ร่างกายคนมีแร่ธาตุเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 4% ของน้ำหนักตัว ปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีในร่างกายคนแสดงอยู่ในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ปริมาณของแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ในร่างกายคน (น้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

แร่ธาตุ	กรัม	แร่ธาตุ	กรัม
แคลเซียม	1,295	เหล็ก	5.0
ฟอสฟอรัส	700	แมงกานีส	0.21
โพแทสเซียม	245	ทองแดง	0.10
ซัลเฟอร์	175	ไอโอดีน	0.028
โซเดียม	105	สังกะสี	1.8
คลอรีน	105	โคบอลต์, ฟลูออรีน	} น้อยมาก
แมกนีเซียม	35	โมลิบดีนัม และ	
		ซิลิเนียม	

แร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมีทั้งหมดประมาณ 17 ชนิด มีอยู่ในร่างกายและในอาหารที่รับประทาน แร่ธาตุที่ร่างกายต้องการเป็นปริมาณมาก (macronutrients) คือ แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก กำมะถัน แมกนีเซียม โซเดียม คลอรีนและโพแทสเซียม ส่วนแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการเป็นปริมาณน้อย (micronutrients) คือ ทองแดง ไอโอดีน โคบอลต์ ฟลูออรีน แมงกานีส สังกะสี โมลิบดีนัม ซิลิเนียมและโครเมียม

3.2.1 แคลเซียม (Calcium)

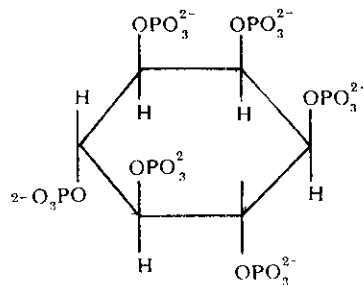
แคลเซียมเป็นแร่ธาตุที่มีมากที่สุดในร่างกาย ผู้ใหญ่มีแคลเซียมประมาณร้อยละ 1.5-2 ของน้ำหนักร่างกาย ส่วนใหญ่หรือร้อยละ 99 ของแคลเซียมทั้งหมดในร่างกายอยู่ในกระดูกและฟันในรูปของเกลือแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมที่เหลือมีในเนื้อเยื่อนิ่มและเลือด ในซีรัม (serum) ของเลือด 100 ชซ. มีแคลเซียมประมาณ 10 มิลลิกรัม (9 - 11.5 มิลลิกรัม) ประมาณครึ่งหนึ่งของแคลเซียมในเลือดอยู่ในรูปแคลเซียมไอออน และอีกครึ่งหนึ่งรวมกับโปรตีนในรูปของแคลเซียม

โปรตีนเท (calcium proteinate)

หน้าที่ของแคลเซียมคือ เป็นสารสำคัญในการสร้างกระดูกและฟัน การสร้างกระดูกและฟันต้องอาศัยฟอสฟอรัสและวิตามินดีด้วย แคลเซียมในเลือดสำคัญสำหรับการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ถ้าเลือดมีแคลเซียมต่ำ ประสาทจะตอบสนองต่อสื่อกระตุ้นไวผิดปกติ (Hyperexcitability) เกิดการชัก แต่ถ้าเลือดมีแคลเซียมสูงเกินไปประสาทจะทำงานช้าลง (Hypoexcitability) นอกจากนี้แคลเซียมยังช่วยในการแข็งตัวของเลือด ช่วยให้ร่างกายไม่สูญเสียเลือดมากเวลาเกิดบาดแผล

สารบางอย่างในอาหารมีส่วนช่วยหรือขัดขวางการดูดซึมของแคลเซียมในร่างกาย วิตามินดีช่วยในการดูดซึม ขนส่งและการใช้แคลเซียมและฟอสฟอรัสในร่างกาย ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีต่อเมตาโบลิซึมของแคลเซียมคือ แล็กโตส เมื่อมีแล็กโตสในอาหาร หนูทดลองจะมีปริมาณแคลเซียมในร่างกายสูงกว่าเมื่อไม่มีแล็กโตสอยู่

ส่วน Sodium phytate (hexaphosphoinositol) เป็นสารที่ขัดขวางการดูดซึมของแคลเซียม



Hexaphosphoinositol

สารประกอบนี้สามารถเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำกับแคลเซียม ทำให้แคลเซียมไม่มีฟอสเฟตที่ถูกดูดซึม อาจแก้ได้โดยเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

สัตว์บางชนิด (ไม่รวมคน) มีเอนไซม์ซึ่งชื่อว่า phytases ช่วยทำให้แคลเซียมแตกตัวจาก calcium phytate จึงช่วยให้แคลเซียมสามารถดูดซึมได้

ในผักถ้ามีเซลลูโลสมากอาจขัดขวางการดูดซึมแคลเซียมได้เช่นกัน กรดออกซาลิก (oxalic acid) ที่มีมากในผักโขม ใบชะพลู จะรวมตัวกับแคลเซียมเป็นแคลเซียมออกซาลาเลที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แคลเซียมถูกดูดซึมได้น้อยลง อาหารที่มีไขมันสูงก็อาจขัดขวางการดูดซึมของแคลเซียมเพราะไปรวมกับแคลเซียมเกิดเป็นสบู่ขึ้น

การขาดแคลเซียมมักพบในอาหารที่มีปริมาณโปรตีนและ/หรือสารอาหารอื่น ๆ ต่ำกว่ามาตรฐาน แคลเซียมเป็นที่ต้องการของคนมากในช่วงของการเจริญเติบโต ช่วงที่มีครรภ์

และช่วงที่ให้นมบุตร ปริมาณที่ต้องการต่อวันแตกต่างกันตั้งแต่ 800 - 1300 มิลลิกรัม แหล่งสำคัญของแคลเซียมคือ นมและผลิตภัณฑ์นมและธัญพืชซึ่งเป็นอาหารหลักของประชากรทางซีกโลกตะวันออก เช่น ญี่ปุ่น ไทย และฟิลิปปินส์

การขาดแคลเซียมในเด็ก ถ้าขาดน้อยจะทำให้กระดูกหรือเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ฟันไม่แข็งแรง ถ้าขาดมากและได้รับวิตามินดีหรือแสงแดดไม่พอเพียง จะเป็นโรคกระดูกอ่อน แคลเซียมในเลือดต่ำเลือดจะแข็งตัวช้าและมีอาการชัก ในหญิงมีครรภ์และหญิงในช่วงให้นมบุตร ถ้าได้รับแคลเซียมไม่พอ รับแสงแดดหรือกินวิตามินดีไม่พอด้วย ฟันจะผุและเป็นโรคกระดูกอ่อน จากการสำรวจพบว่า อาหารของคนไทยมีแคลเซียมค่อนข้างต่ำ แต่ไม่ค่อยพบอาการของการขาดแคลเซียม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคนไทยได้รับแสงแดดเพียงพอ แสงแดดช่วยให้ร่างกายใช้แคลเซียมได้ดี ความต้องการแคลเซียมจึงไม่มากเหมือนคนในประเทศหนาว

อาหารที่มีแคลเซียมมาก ได้แก่ กุ้งแห้ง งา นม เนยแข็ง ผักใบเขียว ถั่วเหลือง ปลาตัวเล็กที่กินได้ทั้งกระดูก กุ้ง ปู หอย ไข่แดง เป็นต้น อาหารที่แช่น้ำปูนใสจะมีแคลเซียมมากขึ้น

3.2.2 ฟอสฟอรัส

ร่างกายคน (ผู้ใหญ่) ต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 800 - 1200 มิลลิกรัมต่อวัน ฟอสฟอรัสมีอยู่ในเซลล์ทุกแห่งทั่วร่างกายในรูปของสารอินทรีย์ ได้แก่ ADP, ATP, glucose-6-phosphate, fructose-6-phosphate, 2-phosphoglycerate และ phytate ส่วนฟอสฟอรัสในรูปของสารอนินทรีย์ ได้แก่ รูปออร์โทฟอสเฟต เช่น H_3PO_4 , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} ในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เหล่านี้ ฟอสฟอรัสอะตอมมีเลขออกซิเดชัน (oxidation number) เท่ากับ 5

ฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของสารเคมีที่สำคัญของร่างกาย เช่น กรดนิวคลีอิก นิวคลีโอโปรตีน เอ็นไซม์ โคเอ็นไซม์ ฟอสโฟลิปิด และสารที่ให้พลังงานสูงคือ ATP และ ADP ในเลือดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในเม็ดเลือดแดง ส่วนโซเดียมมักอยู่ในซีรัมของเลือด ฟอสฟอรัสยังมีบทบาทสำคัญต่อการเสริมสร้างกระดูกและฟันร่วมกับแคลเซียม

ฟอสฟอรัสมีมากในนมและผลิตภัณฑ์นม ธัญพืช เนื้อและไข่ ในอาหารเหล่านี้ ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของเคซีน (casein) ในนม, ไฟเตต (phytates) ของธัญพืช, ฟอสฟอเอสเทอร์ของเนื้อ, และ ฟอสฟิติน (phosvitin) ของไข่

3.2.3 โซเดียม

ร่างกายคน (ผู้ใหญ่) ต้องการโซเดียมประมาณ 800 - 1200 มิลลิกรัมต่อวัน โซเดียมมีความสำคัญมากต่อการรักษาสมดุลของน้ำและแรงดันออสโมซิสและยังช่วยรักษาความเป็นกรดต่าง (pH) ของร่างกาย โซเดียมส่วนใหญ่อยู่ในของเหลวภายนอกเซลล์ (ในพลาสมา) ส่วนของเหลวภายในเซลล์มีโพแทสเซียมและแมกนีเซียมอยู่มากกว่า เยื่อเซลล์ส่วนมากมีความสามารถในการขับ (pump) Na^+ จากภายในออกสู่ภายนอก และ K^+ จากภายนอกเข้าสู่ภายในเซลล์ โดยอาศัยพลังงานจากการแยกสลาย ATP ด้วยน้ำ เอนไซม์ ATPase ซึ่งอยู่ในเยื่อเซลล์ถูกกระตุ้นได้ด้วย Na^+ และ K^+ และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกลไกการขับ Na^+ และ K^+ ซึ่งเรียกว่าระบบ K^+/Na^+ pump กลไกการขับ Na^+ และ K^+ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ประสาทและเซลล์กล้ามเนื้อ มีส่วนสำคัญต่อการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ

โซเดียมมีอยู่ในอาหารทั่วไปที่ได้จากพืชและสัตว์ น้ำดื่มมีโซเดียมมากพอควร นมและเนื้อไม้ปริมาณโซเดียมสูงแต่ผักและผลไม้ไม่มีปริมาณโซเดียมต่ำกว่าเกลือของโซเดียม เช่น NaCl ใช้ในการปรุงรสอาหารและช่วยถนอมอาหาร

การขาด Na^+ อาจเกิดจากอาเจียน ท้องร่วงอย่างรุนแรง การขับปัสสาวะมากผิดปกติ การเสียเหงื่อมากหรือเป็นโรคบางชนิด เช่น โรคมอด (Tuberculosis) เยื่อหุ้มสมองหรือไขสันหลังอักเสบ การขาดโซเดียมจะทำให้อ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ น้ำหนักลดและเป็นตะคริว

การกินอาหารที่มีโซเดียมมากเกินไปเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคตับและโรคไต คนที่เป็นโรคเหล่านี้ ควรรับประทานอาหารที่มีปริมาณโซเดียมต่ำ

3.2.4 โพแทสเซียม

ร่างกายคน (ผู้ใหญ่) ต้องการโพแทสเซียมประมาณ 2.5 มิลลิกรัมต่อวัน โพแทสเซียมสำคัญในการรักษาสมดุลของน้ำ และช่วยรักษาความเป็นกรดต่าง (pH) ของของเหลวในร่างกาย โพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในของเหลวภายในเซลล์ ส่วนโซเดียมส่วนใหญ่อยู่ในของเหลวภายนอกเซลล์และพบในพลาสมา (plasma) ปริมาณของโพแทสเซียมในของเหลวภายในเซลล์มีอยู่เฉลี่ยประมาณ 140 มิลลิอ็อกซิเจนเดนต์ต่อลิตร และ Na^+ ประมาณ 20 มิลลิอ็อกซิเจนเดนต์ต่อลิตร ส่วนในพลาสมามี Na^+ 155 มิลลิอ็อกซิเจนเดนต์ต่อลิตร และ K^+ 5 มิลลิอ็อกซิเจนเดนต์ต่อลิตร ข้อมูลเหล่านี้แสดงว่า Na^+ และ K^+ ไม่อิสระในการแพร่ (diffuse) มิฉะนั้นแล้วความเข้มข้นของ Na^+ และ K^+ ภายนอกและภายในเซลล์คงจะไม่แตกต่างกันมากเท่านี้

ปกติมักไม่พบการขาดโพแทสเซียมในคนปกติ แต่การขาดโพแทสเซียมซึ่งเรียกว่า

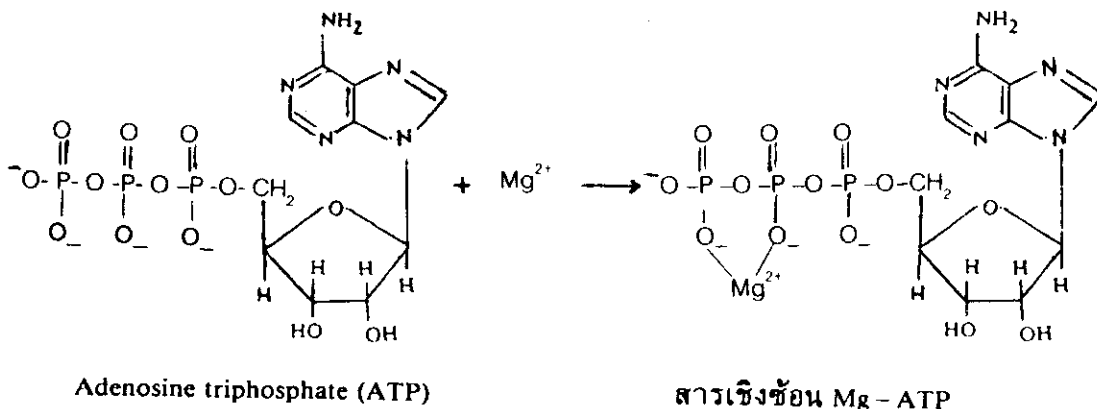
hypokalemia อาจพบในคนหลังจากผ่าตัดหรือมีบาดแผลสาหัส จะทำให้ K^+ ในพลาสมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเอพิเนฟริน (epinephrine) หรืออะดรีนาลิน (adrenalin) ที่ขับออกมาระหว่างที่เจ็บป่วย ผลก็คือเกิดการปล่อย K^+ จากตับเข้าไปในพลาสมา จะทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้ออ่อนแอ หัวใจอ่อนแอและลำไส้ทำงานช้าลง ในทารกที่รับประทานอาหารที่มีโปรตีนต่ำหรือโปรตีนที่คุณภาพต่ำจะเกิดการขาดกรดอะมิโนที่จำเป็น จะรบกวนสมดุลของน้ำทำให้เกิดการสูญเสีย K^+ จากเซลล์ และถ้ามีท้องร่วงด้วยจะทำให้เกิดการสูญเสีย K^+ มากยิ่งขึ้น

อาหารที่ได้จากพืชมีปริมาณโพแทสเซียมมากกว่าโซเดียม การบริโภคพืชที่มีปริมาณโพแทสเซียมสูงมาก ๆ จะมีการขับ Na^+ ออกจากร่างกายมาก ดังนั้น ในสัตว์ที่บริโภคพืชเป็นอาหารหลัก เช่น วัวควายและแกะ จะต้องเพิ่ม $NaCl$ ในอาหารถ้าบริโภคอาหารที่มีปริมาณโพแทสเซียมสูง อาหารที่มีโพแทสเซียมมากได้แก่ มันฝรั่งและโมแลส (molasses)

3.2.5 แมกนีเซียม

ร่างกายคน (ผู้ใหญ่) ต้องการแมกนีเซียมประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อวัน แมกนีเซียมประมาณครึ่งหนึ่งอยู่ในโครงกระดูก และมักอยู่ในของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์ (intracellular fluid) แมกนีเซียมประมาณ 35% อยู่ในซีรัมของเลือดรวมอยู่กับโปรตีน เด็กแรกเกิดมีปริมาณแมกนีเซียมต่ำแต่เมื่อโตขึ้นจะมีแมกนีเซียมมากขึ้น

แมกนีเซียมเป็นแร่ธาตุที่ขาดไม่ได้ในสิ่งมีชีวิต ในพืชมีแมกนีเซียมอยู่ในคลอโรฟิลล์ ในคนแมกนีเซียมมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยา phosphorylation ซึ่งมี adenosine triphosphate (ATP) เกี่ยวข้องอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น phosphorylation ของกลูโคสโดยเอนไซม์ glucokinase ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญในเมตาโบลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ในปฏิกิริยานี้ Mg^{2+} จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อน $Mg-ATP$ และทำหน้าที่สำคัญในปฏิกิริยานี้



ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่แมกนีเซียมมีส่วนอยู่ด้วย คือปฏิกิริยาของ enolase ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเปลี่ยนกลับไปมาระหว่าง 2-phosphoglycerate และ phosphoenol pyruvate และปฏิกิริยาที่เปลี่ยน phosphoenol pyruvate (PEP) ไปเป็น pyruvate โดยมี pyruvate kinase เป็นตัวเร่ง Pyruvate kinase จะทำงานได้ดีถ้ามี Mg^{2+} และ Mn^{2+} อยู่ ซึ่งจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะกับ active site ของเอ็นไซม์ PEP ADP และไอออนของโลหะจะร่วมกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว สิ่งที่น่าสนใจคือ pyruvate kinase จะว่องไวยิ่งขึ้น ถ้า K^+ และ NH_4^+ มาจับกับเอ็นไซม์ที่ตำแหน่งที่มีชื่อ active site ด้วย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงคอนฟอร์เมชัน (conformation) ของเอ็นไซม์ไปเป็นโครงสร้างที่ว่องไวยิ่งขึ้นในการเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้แมกนีเซียมยังมีส่วนในการควบคุมการทำงานของระบบประสาท และกล้ามเนื้อเช่นเดียวกับแคลเซียม

แมกนีเซียมมีอยู่ทั่วไปในอาหารที่ได้จากพืชและสัตว์ แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ในพืชสีเขียว ผลไม้เปลือกแข็งมีแมกนีเซียมกว่าพืชอื่น ๆ ในนมโคประกอบด้วยแมกนีเซียมประมาณ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.6 เหล็ก

เหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนที่มีฮีม (heme) ร่างกายคน (ผู้ใหญ่) มีเหล็กประมาณ 5 กรัม สองในสามของเหล็กจะอยู่ในรูปของฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ส่วนโปรตีนที่มีฮีมอื่น ๆ คือไมโอโกลบิน (myoglobin) ในกล้ามเนื้อและไซโตโครม (cytochrome) ในระบบการหายใจ จะมีเหล็กในปริมาณที่น้อยกว่า ปกติประมาณหนึ่งในสี่ของเหล็กในร่างกายถูกเก็บในตับ ม้ามและไขกระดูก ซึ่งจะรวมกับโปรตีนพิเศษที่เรียกว่าเฟอร์ริทิน (ferritin) ในโมเลกุลของเฟอร์ริทินประกอบด้วยเหล็ก 20% ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ไมเซลล์ (ferric hydroxide micelles) ติดกับโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 465,000 บทบาทของเฟอร์ริทินคือ เก็บเหล็กไว้เพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบพอร์ไฟริน (porphyrin)

ปกติเหล็กในอาหารมักอยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินหรือ สารประกอบเชิงซ้อนเหล็ก-โปรตีน (iron-protein complex) การที่เหล็กจะถูกปลดปล่อยออกจากสารเชิงซ้อนนี้จะต้องอาศัยกรดจากกระเพาะเพื่อเหล็กจะถูกดูดซึมได้ ถ้ามีกรดไฟติก (phytic acid) หรือ ฟอสเฟตจะเกิดเกลือของเหล็กที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เหล็กไม่ถูกดูดซึม อาหารที่มีฟอสฟอรัส น้อย และกรดแอสคอร์บิกมากจะช่วยให้เหล็กดูดซึมได้ดี เหล็กจากไข่จะถูกดูดซึมได้น้อย อาจ

เป็นเพราะเหล็กเกิดสารเชิงซ้อนกับฟอสเฟตของฟอสโฟโปรตีนของไข่แดง แม้ว่าเหล็กจะถูกดูดซึมได้ไม่ทัน แต่เหล็กที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดเลือดแดงที่หมดอายุภายในม้ามจะถูกนำกลับมาสร้างฮีโมโกลบินในไขกระดูกได้อีก

การขาดเหล็กมักพบในลูกอ่อนของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เหล็กที่มีอยู่ในนม (คน โค และแพะ) ปกติมีปริมาณ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นมน้ำเหลือง (colostrum) มีเหล็กประมาณ 1.5 - 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กที่อยู่ในนมเป็นสารเชิงซ้อนของเหล็กกับโปรตีนคือ เฟอร์ริแลคติน (ferrilactin) ซึ่งแยกได้จากนมของคนและโค

ทารกปกติควรจะได้รับเหล็กในอาหาร แม้ว่าผู้เป็นมารดาจะได้รับเหล็กเพียงพอในระหว่างตั้งครรภ์ก็ตาม ผู้ใหญ่อาจขาดเหล็กเนื่องจากการเสียเลือดมาก โรคโลหิตจางที่เกิดจากการขาดเหล็กอาจเกิดในหญิงในวัยที่มีบุตรได้ เนื่องจากการเสียเลือดในระหว่างรอบเดือน, ระหว่างตั้งครรภ์และให้นมบุตร ดังนั้น ผู้ใหญ่ที่บริโภคอาหารที่ปริมาณเหล็กต่ำ (เช่นผัก) ควรเสริมเหล็กในอาหารให้เพียงพอ

อาหารที่มีเหล็กมากได้แก่ เครื่องในสัตว์ เช่น ตับ ไตและหัวใจ ไข่แดง โกโก้ น้ำอ้อยและผักชีฝรั่ง ส่วนเนื้อสัตว์ ปลา เบ็ดไก่ ผักใบเขียวและขนมปังมีเหล็กปริมาณน้อยกว่า ส่วนนมและผลิตภัณฑ์นม น้ำตาลทรายขาว ข้าวสีและผลไม้สดมีเหล็กอยู่น้อย

3.2.7 ทองแดง

ร่างกายคนประกอบด้วยทองแดงประมาณ 100 มิลลิกรัม ทองแดงมีอยู่ทั่วไปในเนื้อเยื่อ แต่ส่วนใหญ่อยู่ในตับ สมอง ไต หัวใจและเส้นผม นอกจากนี้ยังอยู่ในส่วนที่มีสีของตา และเคลือบฟันมีปริมาณทองแดงสูง ทองแดงมีส่วนช่วยในการใช้เหล็กสร้างฮีโมโกลบิน และช่วยในการดูดซึมของเหล็ก

ทองแดงในเลือดคนจะรวมกับโปรตีน ในเม็ดเลือดขาว ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่รวมกับโปรตีน เรียกว่า เอริโทรคิวพรีน (erythrocuprein)

ในพลาสมาของเลือด ทองแดงรวมกับเซรูโลพลาสมิน (ceruloplasmin) ซึ่งเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กจาก Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} ปฏิกิริยานี้สำคัญมาก เพราะเหล็กรูป Fe^{+3} ในเลือดเท่านั้นที่ถูกขนส่งไปเก็บไว้ที่ตับโดยโปรตีนทรานสเฟอร์ริน (transferrin)

อาหารมีผลต่อปริมาณของทองแดงในเลือด โลหะบางตัว เช่น สังกะสี แคดเมียม และโมลิบดีนัมทำให้การดูดซึมทองแดงลดลง กรดแอสคอร์บิกก็มีส่วนทำให้การดูดซึมน้อยลง

การขาดทองแดงทำให้เป็นโรคโลหิตจาง การเจริญเติบโตช้า กระดูกผิดปกติ เป็นหมัน การทำงานผิดปกติของหัวใจ ในคนปกติไม่เคยพบการขาดทองแดง เพราะอาหารจากพืชและสัตว์ที่รับประทานเป็นปกติมีทองแดงเพียงพอ สัตว์เคี้ยวเอื้อง (ruminant) เช่น แกะ ที่บริโภคหญ้าจากดินที่ขาดทองแดงจะให้ขนแกะน้อยลง เตินโซเซ ล้มง่ายและอาจตาย ในที่สุด

อาหารที่มีเหล็กเพียงพอจะมีทองแดงเพียงพอด้วย นมมารดาในอาทิตย์แรกของการให้นม จะมีปริมาณทองแดงประมาณ 0.62 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ต่อมาจะลดเหลือประมาณ 0.16 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นมโคมีปริมาณทองแดงเพียง 0.6 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

3.2.8 แมงกานีส

แมงกานีสจำเป็นต่อการเจริญเติบโตเป็นปกติและการสืบพันธุ์ของพืชและสัตว์ การขาดแมงกานีสจะทำให้ไม่เจริญเติบโต โครงกระดูกผิดปกติ อวัยวะสืบพันธุ์ผิดปกติ การขาดแมงกานีสไม่เคยพบในคน

เอนไซม์ที่ต้องการ Mg^{2+} มักจะทำงานได้ดีถ้ามี Mn^{2+} อยู่ด้วย เช่น pyruvate kinase, Pyruvate carboxylase เป็นเอนไซม์ที่มี Mn^{2+} เป็นส่วนของโครงสร้างแมงกานีสมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์มิวโคโพลีแซคคาไรด์ (mucopolysaccharides) ของกระดูกอ่อน และเอนไซม์อาร์จินเนส (arginase) ในตับก็ประกอบด้วยแมงกานีส

แมงกานีสมีมากในไมโตคอนเดรีย ดังนั้น เนื้อเยื่อที่มีไมโตคอนเดรียอยู่มากจะประกอบด้วยแมงกานีสมาก หัวใจ ไต ตับ และตับอ่อนมีปริมาณแมงกานีสสูง

นมโคมีแมงกานีส 10 - 40 ไมโครกรัมต่อลิตร นมน้ำเหลืองมีแมงกานีสประมาณสิบเท่าของนมธรรมดา ไชมีแมงกานีสประมาณ 10 - 15 ไมโครกรัม

อาหารที่มีแมงกานีสมากคือ ธัญพืชและถั่วเมล็ดแห้ง เบ็ดไก่ ผลิตภัณฑ์นม อาหารทะเลมีแมงกานีสน้อยมาก (เฉลี่ยประมาณ 0.37 ไมโครกรัมต่อกรัม) น้ำชา 1 แก้วมีแมงกานีสประมาณ 1.3 มิลลิกรัมในขณะที่กาแฟ 1 แก้วมีแมงกานีสเพียง 0.15 มิลลิกรัม

3.2.9 สังกะสี

ในร่างกายคนหนัก 70 กิโลกรัม มีสังกะสีประมาณ 1.4 - 2.3 กรัม สังกะสีเป็นองค์ประกอบสำคัญของเอนไซม์ เช่น carbonic anhydrase, carboxypeptidase, alcohol dehydrogenase, alkaline phosphatase, malic dehydrogenase, lactic dehydrogenase และ glutamic

dehydrogenase เอ็นไซม์อื่นที่ใช้สังกะสีเป็นโคแฟกเตอร์ ได้แก่ arginase, peptidase, oxalacetate decarboxylase, enolase และ carnosinase

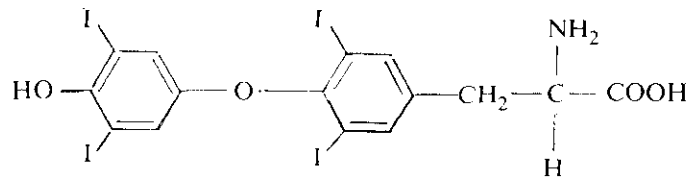
สังกะสีมีความสำคัญทางสรีรวิทยาของคนและสัตว์คือ ช่วยในการรักษาบาดแผลให้หาย คนหรือสัตว์ที่เป็นแผลถ้ากินสังกะสีซัลเฟตแผลจะหายเร็วขึ้น

การขาดสังกะสีในคนเคยพบในตะวันออกกลาง มีอาการที่เป็นชัดคือการเหี่ยวลีบของอวัยวะเพศ แต่ในคนปกติยังไม่พบการขาดสังกะสี

นมโคมีสังกะสีประมาณ 3 - 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นมวัวเหลืองมีสังกะสีถึง 20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และจะลดลงเรื่อย ๆ ในช่วงที่ให้นม อาหารที่มีสังกะสีมากคือ หอยนางรม (1000 ไมโครกรัมต่อกรัม) จมูกข้าวสาลีและรำข้าว (40 - 120 ไมโครกรัมต่อกรัม) อาหารที่มีสังกะสีปริมาณปานกลางคือ แป้งและขนมปัง ผักที่มีใบ เนื้อ ปลา ไข่ ธัญพืชและถั่วเมล็ดแห้ง

3.2.10 ไอโอดีน

ไอโอดีนเป็นส่วนประกอบสำคัญของฮอร์โมนไทรอกซีน (thyroxine) ในต่อมไทรอยด์ (thyroid)



Thyroxine (3,5 - ,3',5' - tetraiodothyronine)

สารประกอบไอโอดีนอื่น ๆ ในต่อมไทรอยด์เป็นอนุพันธ์ของไทโรนีน (Thyronine) และไทโรซีน (tyrosine) เช่น 3-ไอโอดิไทโรซีน; 3, 5-ไดไอโอดิไทโรซีน และ 3, 5, 3'-ไตรไอโอดิไทโรนีน

ไทรอกซีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของร่างกายและสมองและเมตาโบลิซึมของสารอาหาร แร่ธาตุและน้ำ การขาดไอโอดีนทำให้เป็นโรคคอหอยพอก (goiter) สมัยก่อนโรคนี้เกิดทั่วไปกับคนที่อยู่แถบภูเขาและที่ราบสูงห่างไกลจากทะเล แต่ปัจจุบันการใช้เกลือที่เติมไอโอดีน ในรูปของ $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ จะช่วยควบคุมโรคนี้ได้

3.2.11 ฟลูออรีน

ฟลูออรีนมีอยู่ในโครงสร้างของกระดูกและฟัน โดยเฉพาะในส่วนของเคลือบฟันทำให้ฟันแข็งแรง น้ำดื่มที่มีฟลูออรีนประมาณ 1 ไมโครกรัมต่อซีซีช่วยป้องกันฟันผุได้ ปัจจุบันยาสีฟันมักมีการเติมโซเดียมฟลูออไรด์เพื่อป้องกันฟันผุ การรับประทานฟลูออไรด์มากเกินไปจะทำให้เคลือบฟันเป็นลาย

3.2.12 โมลิบดีนัม

โมลิบดีนัมเป็นองค์ประกอบสำคัญของ xanthine oxidase และ aldehyde oxidase การขาดโมลิบดีนัมยังไม่เคยพบในคน แต่ทำให้ขาดได้ในสัตว์ทดลอง วัว ควาย ที่กินหญ้าจากดินที่มีโมลิบดีนัมมาก จะต้องการทองแดงมากขึ้น

3.2.13 ซีลีเนียม

ซีลีเนียมในรูปของซีลีไนต์ (selenite) เป็น prosthetic group ของเอนไซม์ glutathione peroxidase ซีลีเนียมเกี่ยวข้องกับการทำงานและการเก็บรักษาวิตามินอี โดยป้องกันมิให้วิตามินอีถูกทำลายโดยออกซิเดชัน

ซีลีเนียมมีอยู่น้อยในอาหารทั่วไป ปริมาณของซีลีเนียมในพืชขึ้นกับปริมาณของซีลีเนียมในดิน ถ้ามีซีลีเนียมในดินมาก อาจเกิดการแทนที่กรดอะมิโนซิสเตอีนในพืชบางส่วนโดยกรดซีลีโน-อะมิโน (seleno - amino acid) ซึ่งเป็นพิษร้ายแรงต่อสัตว์ที่กินหญ้าได้

การหุงต้มอาหารมีผลต่อปริมาณของซีลีเนียม น้ำจากการหุงต้มผักจะละลายซีลีเนียมส่วนใหญ่ในผักออกมา ซีลีเนียมเป็นแอนติออกซิแดนต์ มีในบรอกเคอร์ลี (broccoli) และข้าวกล้อง

3.3 การวิเคราะห์โลหะและแอนไอออน

วิธีวิเคราะห์โลหะและแอนไอออนที่มีมากพอควรในอาหารอาจใช้วิธีเผาอาหารให้เป็นเถ้า แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโดยการชั่งน้ำหนัก (gravimetric analysis) การไตเตรต (titration) หาปริมาณหรือวิเคราะห์โดยมาตรเทียบสี (colorimetric analysis) อย่างไรก็ตาม โลหะที่มีปริมาณน้อยมากอาจวิเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวไม่ได้ วิธีที่อาจใช้ได้คือเฟลมอิมิสชัน (flame emission) และอะตอมมิคแอบซอร์ปชัน (atomic absorption)

สำหรับเฟลมอิมิสชัน [รูปที่ 3.12(ก)] สารละลายตัวอย่างจะถูกสูบ (aspirated) เข้าไปสู่

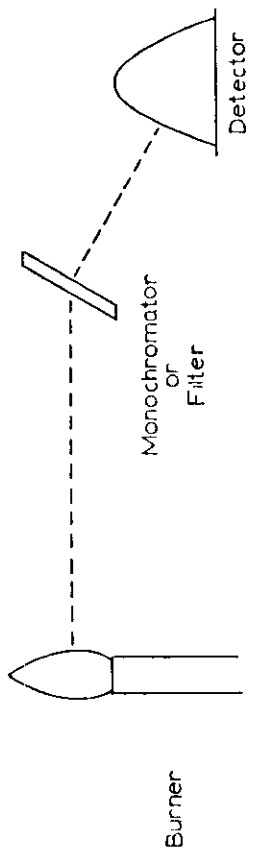
เปลวไฟร้อน แร่ธาตุหรือโลหะจะถูกเร้า (excited) และอิเล็กตรอนที่วงนอกสุดของโลหะจะกระโดดไปสู่สภาวะเร้าเกิดเป็นโลหะที่เป็นกลาง และเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) จะเปล่งรังสีที่มีความยาวคลื่นจำเพาะสามารถวิเคราะห์ได้ โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) จะทำการเลือกความยาวคลื่นที่ละความยาวคลื่นเพื่อผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจจับ (detector) ความเข้มของรังสีที่เปล่งออกจะถูกเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น

ส่วนอะตอมมิคแอบซอปชัน [รูปที่ 3.12(ข)] มีหลักการต่างกัน ในกรณีนี้ธาตุหรือโลหะจะไม่ถูกเร้า แต่จะแตกตัวจากพันธะของมันและอยู่ในสภาวะที่ไม่ถูกเร้าและไม่แตกเป็นไอออน ในสภาวะนี้ธาตุจะสามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นความยาวคลื่นเดียวกับรังสีที่เปล่งออกมาเมื่อถูกเร้าโดยเปลวไฟในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟลมอิมิสชัน

ขบวนการแตกตัวนี้ปกติจะเกิดได้โดยการเผาสารตัวอย่างในเปลวไฟ แต่ปกติจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีเป็น hollow cathode lamp ตะเกียงเหล่านี้จะบรรจุอาร์กอน (argon) หรือนีออนที่มีความดันต่ำ และแคโทด (cathode) ทำจากธาตุที่ถูกวิเคราะห์

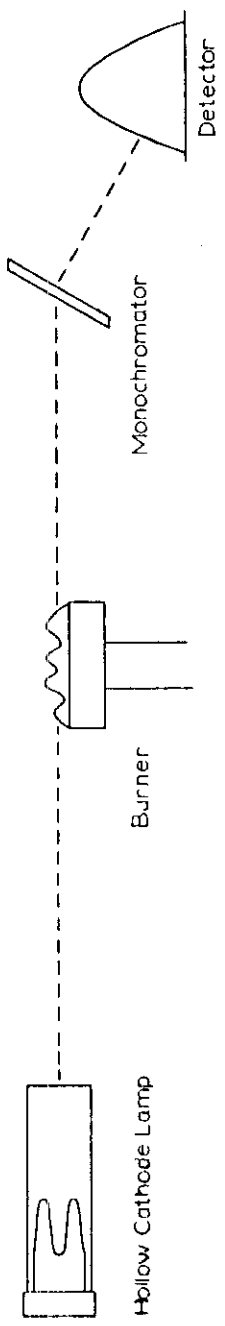
เฟลมอิมิสชันเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดีกับการวิเคราะห์โลหะไอออนหลายตัว เช่น Na^+ , K^+ ฯลฯ แต่เนื่องจากการรบกวนจากไอออนไนเซชัน (ionization) ของธาตุอื่น ๆ ในสารละลายทำให้ความเข้มข้นที่หาได้มีค่าผิดพลาด (สูงหรือต่ำเกินไป) แต่การรบกวนจากไอออนไนเซชันของธาตุอื่น ๆ มักมีน้อยกว่ามากเมื่อใช้วิธีวิเคราะห์อะตอมมิคแอบซอปชัน วิธีอื่น ๆ เช่น เอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และการวิเคราะห์โดยการเร้านิวตรอน (neutron activation analysis) ก็ใช้ได้

ธาตุบางธาตุ เช่น Co, Ni, Pb และธาตุอื่น ๆ มักเกิดในอาหารและน้ำในปริมาณต่ำกว่าระดับที่จะวิเคราะห์ได้โดยวิธีที่กล่าวมาแล้ว จึงอาจใช้เทคนิคอีกอย่างหนึ่งซึ่งใช้ได้ผลกับการวิเคราะห์ Pb, Co, Ni, Cu, Cd, Fe และ Mn โดยให้โลหะเหล่านี้เกิดคีเลชัน (chelation) กับแอมโมเนียมไพร์โรลิดีน ไดไซโอคาร์บอเนต (ammonium pyrrolidine dithiocarbamate) ตามด้วยการสกัดด้วยเมทิลไอโซบิวทิล คีโตน (methyl isobutyl ketone) การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายจึงใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอปชันหรือเทคนิคอื่น ๆ



Flame Photometry

(ก)



Atomic Absorption

(ข)

รูปที่ 8.12 แผนภาพวิธีแบบเปลว (ก) Flame photometry และ (ข) Atomic absorption

3.4 สาเหตุของการสูญเสียแร่ธาตุในอาหาร

ปริมาณของแร่ธาตุในอาหารที่ได้จากพืชและสัตว์เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับส่วนประกอบของดินและธรรมชาติของอาหารสัตว์ การสูญเสียแร่ธาตุที่เกิดจากการทำลายโดยปฏิกิริยาเคมีมีไม่มากเท่ากับการสูญเสียที่เกิดจากขบวนการเตรียมอาหารและการรวมกับสารอื่นเกิดเป็นสารที่ไม่สามารถดูดซึมหรือนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกาย

การสูญเสียแร่ธาตุเกิดจากการปอกหรือหั่นส่วนที่ไม่ต้องการของพืชออกไป เช่น ผักเมื่อถูกนำไปใช้ทำอาหารมักจะมีการตัดส่วนของลำต้นหรือใบออกไป การกระทำเช่นนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุบางส่วนไป การสีพวงข้าวทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุทุกชนิดเป็นส่วนใหญ่ ขบวนการต่าง ๆ ในการแปรรูปอาหารอาจนำไปสู่การสูญเสียแร่ธาตุได้ เช่น การล้าง การลวก ทำให้เย็นและการหุงต้ม ปริมาณการสูญเสียขึ้นกับ pH อุณหภูมิ อัตราส่วนของน้ำต่ออาหาร ความแก่อ่อน เป็นต้น ขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้อาจมีผลกระทบต่อปริมาณของสารอาหารบางชนิด เช่น เกิดการปนเปื้อนด้วยโลหะอื่น ๆ ในปริมาณน้อย และมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ในอาหารบางชนิดอาจสามารถเพิ่มปริมาณของแร่ธาตุได้ เช่น การแช่ผักหรือผลไม้ในน้ำกระด้างอาจเพิ่มปริมาณของแคลเซียมในอาหาร

การล้างอาหาร เช่น ผักและผลไม้ อาจนำไปสู่การสูญเสียสารอาหารได้ การลวกผักทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารมากถ้าใช้วิธีที่ไม่ถูกต้อง เช่น การลวกผักโดยใช้น้ำร้อนปริมาณมากแล้วเทน้ำทิ้งไปจะทำให้สูญเสียสารอาหารไปมาก การใช้ไอน้ำแทนน้ำร้อนจะลดการสูญเสียได้ การใช้เครื่องหุงต้มไมโครเวฟ (microwave cookers) ทำให้อาหารสุกจะลดการสูญเสียได้ดีที่สุด

ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุคือ การเกิดแรงกระทำ (interactions) ระหว่างแร่ธาตุกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในอาหาร แรงกระทำต่อกันนี้อาจให้ผลในทางบวกและทางลบ โพลีเวเลนต์แอนไอออน (polyvalent anions) เช่น ออกซาเลท (oxalate) และไฟเตต (phytate) สามารถเกิดเกลือกับแคทไอออนของโลหะไดวาเลนต์ (divalent metal cations) เกิดเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำและทำให้โลหะบางชนิด เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม ไม่สามารถดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกาย ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดซึมของเหล็กในร่างกายคนส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาไอโซโทปกัมมันตรังสีของเหล็ก คือ Fe^{59} ในอาหารโดยการปลูกผักในสารละลายที่มี Fe^{59} น้อยหรือฉีด Fe^{59} นี้เข้าไปในไก่หรือกระต่าย ทำให้ไข่ ดับ และเนื้อของสัตว์ประกอบด้วย Fe^{59} นม ขนมปั่นและอาหารอื่น ๆ ก็มีการทดลองเติม Fe^{59} ในทำนองเดียวกัน

การศึกษาเกี่ยวกับการดูดซึมของอาหารเหล่านี้ในร่างกายคนพบว่าความสามารถในการดูดซึมเหล็กจะแตกต่างกันขึ้นกับแต่ละบุคคล โดยปกติคนที่ขาดเหล็ก ร่างกายมักดูดซึมเหล็กได้ดีกว่าคนปกติ เหล็กที่ได้จากขนมปัง ตับ เนื้อและเลือดดูดซึมได้ดีกว่าเหล็กจากไข่หรือผักที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ เหล็กสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับฟอสเฟตของฟอสโฟโปรตีนของไข่แดง ซึ่งจะแก้ไขได้โดยเติมสารรีดิวส์(reducing agents) เช่น กรดแอสคอร์บิกหรือซิสเทอีน จะช่วยให้ดูดซึมดีขึ้น ส่วนในพืช เหล็กมักรวมกับกรดไฟติกเกิดเป็นเกลือไฟเตตที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เหล็กถูกดูดซึมน้อยลง

