

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 ส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การหุงต้ม การแช่แข็ง การอบแห้ง เป็นต้น ขบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินและแร่ธาตุได้ง่าย นักวิจัยอาหารจึงสนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารสองประเภทนี้ ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ ตลอดจนช่วงของการเก็บ แต่ข้อมูลเท่าที่หาได้จากผลการวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารสองชนิดนี้ในอาหารที่นับว่าเพียงพอมีเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากนักวิจัยส่วนใหญ่สนใจเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดเป็นพิเศษ และปัญหาในด้านทฤษฎีวิเคราะห์ ดังนั้น การศึกษาวิตามินและแร่ธาตุในบทนี้ นอกจากจะศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติและคุณค่าทางโภชนาการของวิตามินและแร่ธาตุแล้ว เราจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารอาหารเหล่านี้ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ จากข้อมูลเท่าที่หาได้

ตารางที่ 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)	Energy (Kcal) ²	Protein (Gm)	Fat-soluble Vitamins					Water-soluble Vitamins										Minerals						
					Vita- min A Activity (RE) ³	Vita- min D Activity (IU)	Vita- min E Activity (IU)	Ascor- bic Acid (Mg)	Fola- cin ⁴ (Mg)	Nia- cin ⁵ (Mg)	Ribo- flavin (Mg)	Thia- min (Mg)	Vita- min B-6 (Mg)	Vita- min B-12 (µg)	Cal- cium (Mg)	Phos- phorus (Mg)	Iode- ne (µg)	Iron (Mg)	Mag- nesium (Mg)	Zinc (Mg)						
Infants	0.0-0.5	6	14	60	24	24	kg x 117	kg x 2.2	420 ⁴	1,400	400	4	35	50	5	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	360	240	35	10	60	3
Children	0.5-1.0	9	20	71	28	34	kg x 108	kg x 2.0	400	2,000	400	5	35	50	8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	540	400	45	15	70	5
	1-3	13	28	86	34	41	1,300	2.3	400	2,000	400	7	40	100	9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	800	800	60	15	130	10
	4-6	20	44	110	44	50	3,000	3.0	500	2,500	400	9	40	200	12	1.1	0.9	0.9	0.9	1.5	800	800	80	10	230	10
Males	7-10	30	66	135	54	63	2,400	3.6	700	3,000	400	10	40	300	16	1.2	1.2	1.2	1.2	2.0	800	800	110	10	250	10
	11-14	44	97	154	63	69	2,800	4.1	1,000	5,000	400	12	45	400	18	1.5	1.4	1.6	1.6	3.0	1,200	1,200	130	18	350	15
	15-18	61	134	172	69	74	3,000	5.4	1,000	5,000	400	15	45	400	20	1.8	1.5	2.0	2.0	3.0	1,200	1,200	150	18	400	15
Females	19-22	67	147	172	69	74	2,000	5.4	1,000	5,000	400	15	45	400	18	1.6	1.4	2.0	2.0	3.0	800	800	140	10	350	15
	23-50	70	154	172	69	74	2,700	5.6	1,000	5,000	400	15	45	400	16	1.5	1.2	2.0	2.0	3.0	800	800	130	10	350	15
	51+	70	154	172	69	74	2,400	5.6	1,000	5,000	400	15	45	400	16	1.3	1.2	2.0	2.0	3.0	800	800	110	10	300	15
Pregnant Lactating	11-14	44	97	155	62	65	2,400	4.1	800	4,000	400	12	45	400	14	1.4	1.1	2.0	2.0	3.0	1,200	1,200	115	18	300	15
	15-18	54	119	162	65	65	2,100	4.8	800	4,000	400	12	45	400	14	1.4	1.1	2.0	2.0	3.0	800	800	100	18	300	15
	19-22	58	128	162	65	65	2,000	4.8	800	4,000	400	12	45	400	13	1.2	1.0	2.0	2.0	3.0	800	800	80	10	300	15
51+	58	128	162	65	65	1,800	4.8	800	4,000	400	12	45	400	12	1.1	1.0	2.0	2.0	4.0	1,200	1,200	125	18 ⁶	450	20	
	68	128	162	65	65	+300	+30	1,000	5,000	400	15	60	800	+2	+0.3	+0.3	2.5	2.5	4.0	1,500	1,200	150	18	450	25	
						+500	+20	1,200	6,000	400	15	80	600	+4	+0.5	+0.5	2.5	2.5	4.0	1,500	1,200	150	18	450	25	

Source: Natl. Acad. Sci.-Natl. Res. Council. (1974).
¹The 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 other nutrients for which human requirements have been less well defined. See text for more detailed discussion of allowances and of nutrients not tabulated.
²Kilocalories (kcal) = 4.2 X kcal.
³Retinol equivalents.
⁴Ascorbic acid.
⁵Retinol and half as β-carotene when calculated from international units. All subsequent intakes are assumed to be half as retinol and half as β-carotene.
⁶This 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 น้ำส้มและน้ำมะนาวสามารถใช้ป้องกันโรคคลักปิดลักเปิด (Scurvy) ซึ่งเกิดกับชาวเรือที่ท่องเที่ยวทะเลไปเป็นเวลานาน ๆ ต่อมาภายหลังจึงค้นพบว่า วิตามินที่มีอยู่ในน้ำส้มซึ่งใช้รักษาโรคคลักปิดลักเปิดนั้น คือกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) หรือวิตามิน ซี

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

ในต้นศตวรรษที่ 20 มีการค้นพบว่า สารอาหารที่จำเป็นต่อสุขภาพ และการเจริญเติบโตตามปกติของร่างกาย นอกจากโปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมัน ตลอดจนน้ำและแร่ธาตุแล้วยังไม่เพียงพอ จะต้องมีส่วนประกอบที่จำเป็นอย่างอื่นอีก ในปี 1911 Funk สกิดสารจากรำข้าวสามารถใช้รักษาโรคเหน็บชาได้ และเนื่องจากสารประกอบดังกล่าวเป็นสารประกอบประเภทเอมีน Funk จึงตั้งชื่อสารนี้ว่า “Vitamine” แปลว่า “เอมีนเพื่อชีวิต” (life amines) สารที่ใช้รักษาโรคเหน็บชาก็ดี หรือรักษาโรคคลักปิดลักเปิดก็ดี 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

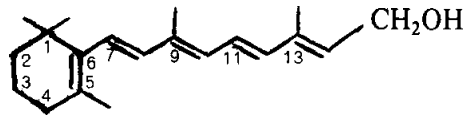
1. วิตามินที่ละลายในน้ำมัน เช่น วิตามิน เอ ดี เค และ อี
2. วิตามินที่ละลายน้ำ ได้แก่ วิตามิน บีรวม และซี เป็นต้น

วิตามิน บีรวม ได้แก่ บีหนึ่ง บีสอง ไนอะซิน บีหก บีสิบสอง กรดโฟลิก กรดแพนโทเทอริก ไบโอติน อินอซิทอล 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)

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

วิตามินเออาจอยู่เป็นแอลกอฮอล์อิสระ เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นแอลดีไฮด์ หรือเป็นกรด 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-แคโรทีน มีวงเบต้า-ไอโอโนนเพียงวงเดียว ส่วนอีกรวงหนึ่งเป็นวงแอลฟา-ไอโอโนน (α -ionone ring) อยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง มันจึงมีแอกติวิตีของวิตามินเอน้อยกว่าเบต้า-แคโรทีน แคโรทีนเหล่านี้ตลอดจนโปรวิตามินเออื่น ๆ ถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอในลำไส้ ถ้าแบ่งครึ่งเบต้า-แคโรทีน 1 โมเลกุล จะได้วิตามินเอ 2 โมเลกุล ผู้ป่วยเป็นโรคตับความสามารถในการเปลี่ยนแคโรทีน

ไปเป็นวิตามินเอจะลดน้อยลง ยังไม่มีใครทราบสาเหตุเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้

การสูญเสียโปรวิตามินเอในอาหาร

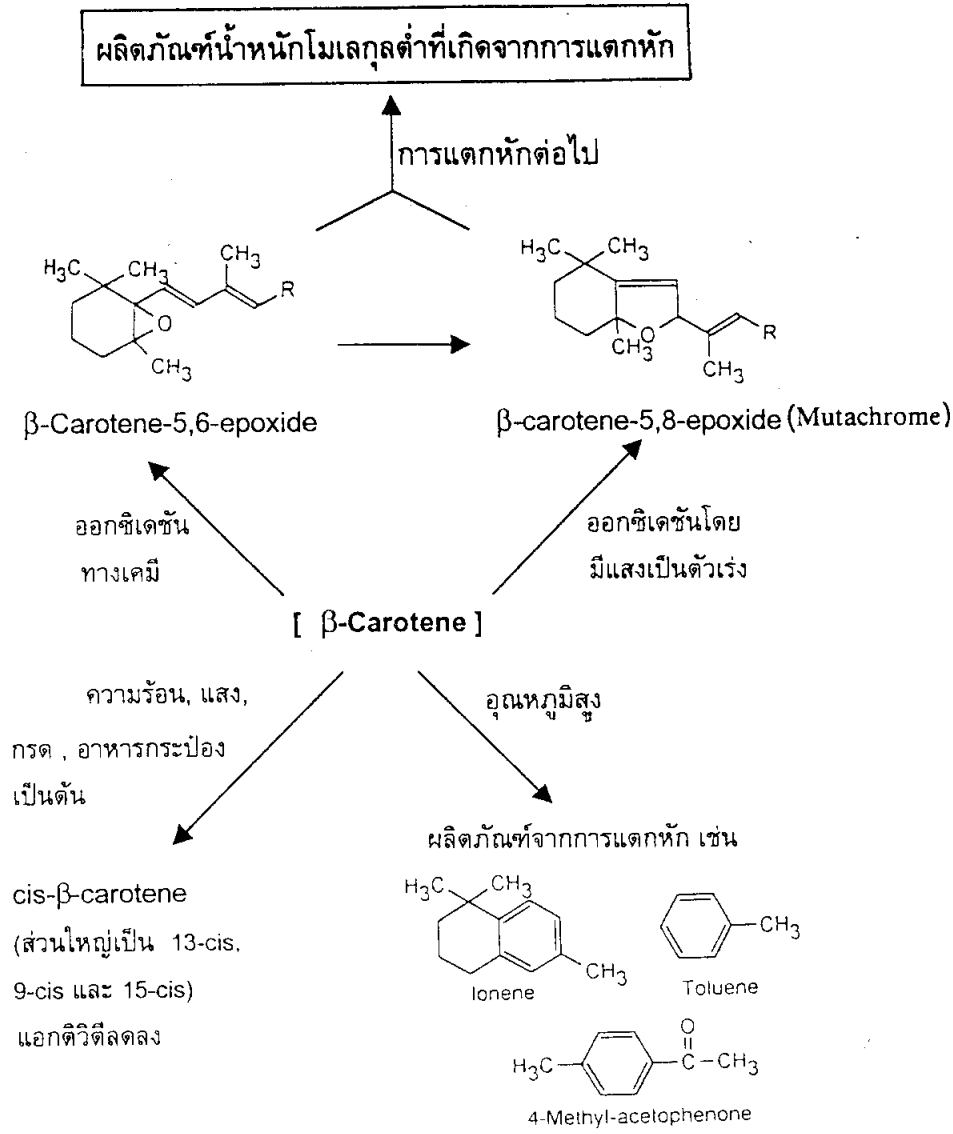
ผักสีเขียวและเหลืองเป็นแหล่งสำคัญของโปรวิตามินเอหรือแคโรทีน แคโรทีนถูกทำลายได้โดยแสงและออกซิเจนในอากาศ การทำลายโปรวิตามินเอในอาหารที่ผ่านขบวนการแปรรูปและอาหารในช่วงเก็บเกิดได้หลายทาง ขึ้นกับสภาวะของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดรวบรวมอยู่ในรูปที่ 3.1

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 ซึ่งจะเกิดไฮโซเมอไรซ์ต่อไปเป็นมิวตาโครม (mutachrome) หรือ 5, 8-อีพอกไซด์ ออกซิเดชันที่เร่งโดยแสงชั้นแรกจะได้มิวตาโครม การแตกหักต่อไปของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากออกซิเดชันชั้นแรก จะให้สารประกอบที่ซับซ้อนคล้ายกับที่เกิดจากออกซิเดชันของกรดไขมัน ออกซิเดชันของวิตามินเอ จะทำให้เกิดการสูญเสียแอกติวิตีของมันทั้งหมด

ตารางที่ 3.2 แคโรทีนอยด์: โครงสร้างและเอกลักษณ์ของโปรวิตามินเอ

แคโรทีนอยด์	โครงสร้าง	เอกลักษณ์สัมพัทธ์
1. β -Carotene (มีอยู่ทั่วไป)		+++
2. β -apo-8'-carotenal		+++
3. cryptoxanthin (ส้ม)		+++
4. α -Carotene (มีอยู่ทั่วไป)		++
5. Echinenone (Sea urchin)		++
6. Astacene (พวกกุ้ง, ปู)		0
7. Lycopene (มะเขือเทศ)		0



รูปที่ 3.1 การแตกหักของ เบต้า-แคโรทีน

ในอาหารอบแห้ง (Dehydrated foods) จะเกิดการสูญเสียแอกติวิตีของวิตามินเอและโปรวิตามินเออย่างที่สุดในช่วงที่เก็บ เพราะมันถูกออกซิไดส์ได้ง่าย การสูญเสียวิตามินเอที่เกิดจากขบวนการทำอาหารแห้งประเภทต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของเบต้า-แคโรทีนในแครอทสุกซึ่งทำให้แห้ง

สารตัวอย่าง	ช่วงของความเข้มข้น (ppm ของแห้ง)
- สด	980 – 1,860
- การทำให้แห้งแบบ Explosive puff	805 – 1,060
- การทำให้แห้งแบบเยือกแข็งสูญญากาศ (Vacuum freeze dried)	870 – 1,125
- การทำให้แห้งแบบธรรมดาโดยใช้ลมร้อน (Conventional air dried)	636-987

อัตราเร็วของออกซิเดชันขึ้นกับเอ็นไซม์ แอกติวิตีของน้ำ บรรยากาศของการเก็บ และอุณหภูมิ ดังนั้น การสูญเสียที่คาดไว้ขึ้นกับความรุนแรงของขบวนการอบแห้ง (ตารางที่ 3.3) และการปกป้องสารระหว่างการเก็บ

การกินวิตามินเอมากเกินไป เช่น กินวันละ 50,000 หน่วยสากลขึ้นไป จะทำให้เบื่ออาหาร ผม่วง ผิวหยาบแห้ง เป็นแผลเรื้อรัง ปากแตก แขนขาบวมและปวดกระดูก ถ้าเป็นเด็กกระดูกจะอ่อนและเปราะ (Decalcification) ผู้ใหญ่ที่กินวิตามินเอมากเกินไป จะเกิดเนื้องอกในสมอง ตับและม้ามโตและอาจตายได้

แหล่งของวิตามินเอ มีในอาหารที่บริโภคประจำ เช่น นมและผลิตภัณฑ์นม ไข่ดิบมีวิตามินเอสูงมากโดยเฉพาะตับปลา วิตามินเอที่ผลิตในทางการค้าเป็นวิตามินเอที่สกัดจากตับปลา ส่วนแหล่งของวิตามินเอในพืช คือโปรวิตามินเอหรือแคโรทีน ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอในลำไส้ พืชที่มีโปรวิตามินเอสูงคือ ผักสีเขียวย สีส้มและสีแดง เช่น ผักโขม ผักคะน้า ตำลึง แครอท มะเขือเทศ เป็นต้น ในผลไม้ เช่น มะละกอก็มีแคโรทีนสูง ปริมาณของวิตามินเอในอาหารที่กินได้ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.4

การขาดวิตามินเอ

การขาดวิตามินเอ จะทำให้การเจริญเติบโตช้าในลูกอ่อนของสัตว์ เพราะวิตามินเอเกี่ยวข้องกับการสร้างเซลล์ในร่างกาย อาการแรกของคนที่ขาดวิตามินเอ คือ อาการตาบอด

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

การวิเคราะห์วิตามินเอ ใช้วิธีทางโครมาโตกราฟีและการวัดฟลูออเรสเซนส์ และแสดงผลเป็นความเข้มข้นของวิตามินเอ คือ หน่วยต่อมิลลิลิตร แคโรทีนหาโดยวิธีทางสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 3.4 ปริมาณของวิตามินเอในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

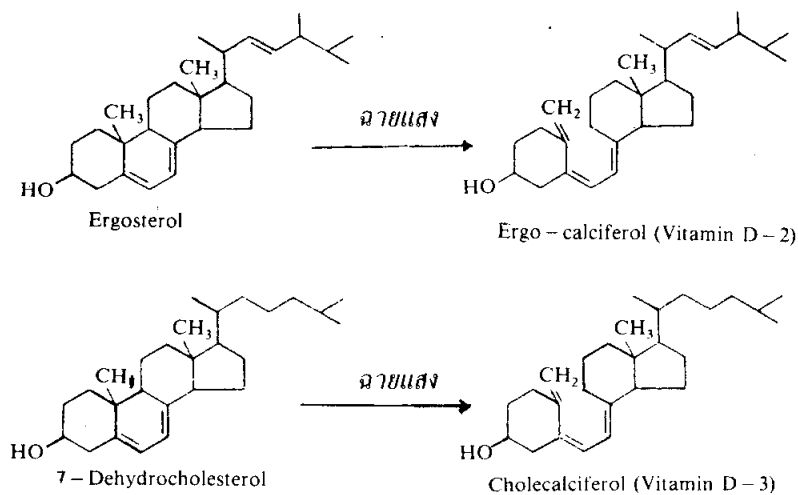
อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)	อาหาร	หน่วยสากล (I.U.)
ใบยอ	43,333	ยอดแค	12,466
ตับไก่	32,200	ใบบัวบก	10,962
ใบแมงลัก	26,000	ตับหมู	10,900
ตับวัว	24,940	ผักชะอม	10,066
ใบโหระพา	20,712	ผักคะน้า	9,300
ผักตำลึง	18,608	ผักกระถิน	7,883
แครอท	18,520	ไข่แดง	7,675
ปูทะเล, มัน	14,155	พริกชี้หนู, พริกชี้ฟ้า	7,010
ใบมันสำปะหลัง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

2. วิตามิน ดี (Vitamin D)

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

ในเขตร้อนที่ได้รับแสงแดดเสมอ และเด็กพวกเอสกิโมที่บริโภคอาหารที่อุดมด้วยน้ำมันตับปลา จะไม่เป็นโรคนี้

เออโกสเตอรอล (Ergosterol) ซึ่งเป็นสเตอรอลในยีสต์และในเห็ด ergot เมื่อฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดเป็นวิตามินดีสอง หรือเออร์โกแคลซิเฟอรอล (Ergocalciferol) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2 อนุพันธ์ของคอเลสเตอรอลซึ่งพบอยู่ใต้ผิวหนัง คือ 7-ดีไฮโดรคอเลสเตอรอล (7-Dehydrocholesterol) เมื่อถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเปลี่ยนเป็นวิตามินดีสาม หรือคอเลแคลซิเฟอรอล (Cholecalciferol) ดังนั้น จึงถือได้ว่าเออโกสเตอรอลและ 7-ดีไฮโดรคอเลสเตอรอล เป็นโปรวิตามินดี (Provitamin D) (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 การเกิดวิตามินดีสองและดีสามโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

โปรวิตามินดีที่พบในธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่เป็นพวกสเตอรอล เมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต พันธะระหว่างคาร์บอนตัวที่ 9 และ 10 ในวงบีจะแตกออกได้วิตามินดี

เออร์โกแคลซิเฟอรอล (วิตามินดีสอง) ตกผลึกเป็นผลึกสีขาวจากอะซีโตน และออปติคัลลิแอคทีฟ (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
ปลาเฮอริ่ง	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

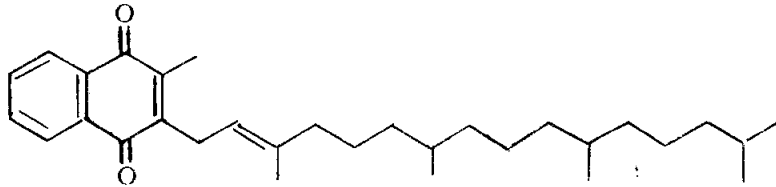
โรคกระดูกอ่อนที่เกิดในผู้ใหญ่ พบในหญิงมีครรภ์และหญิงที่ให้นมบุตร เรียกว่า Osteomalacia สาเหตุเกิดจากการขาดวิตามินดีหรือได้รับแสงแดดไม่พอ หรือให้นมบุตรนานเกินไป มีอาการฟันผุ กระดูกผิรูปร่างและปวด เด็กที่คลอดจะสะสมวิตามินดีน้อยในร่างกายในผู้สูงอายุ เนื้อกระดูกจะบางและเป็นรูพรุน เปราะ (Osteoporosis) มิได้เกิดจากการขาดวิตามินดีหรือแคลเซียม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

ถ้ากินวิตามินดีมากเกินไปจะทำให้เบื่ออาหารกระหายน้ำคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน ปวดปัสสาวะบ่อยและอ่อนเพลีย กระดูกจะเสียแคลเซียมมากกว่าปกติ และกระดูกจะเปราะ

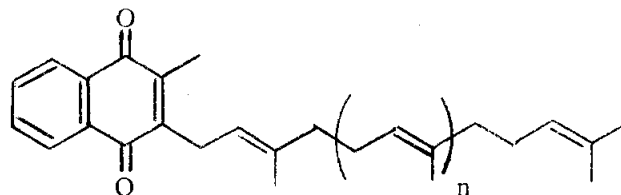
และแตกง่าย แคลเซียมและฟอสฟอรัสในเลือดสูงขึ้น เกล็ดแคลเซียมจะไปจับกับเนื้อเยื่ออื่น เช่น หัวใจ ตับ ไต ทำให้อวัยวะเหล่านี้ทำงานไม่ได้ และอาจถึงตายได้

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 (menadione 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 (menadione) ตกผลึกเป็นผลึกรูปเข็มสีเหลืองจากแอลกอฮอล์และปิโตรเลียมอีเธอร์ มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 107°C ไม่ละลายในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์และละลายได้ในอีเธอร์

การขาดวิตามินเคในสัตว์ทำให้เลือดแข็งตัวช้า ส่วนในคนมักไม่พบการขาดวิตามินนี้

เพราะในอาหารของคนส่วนใหญ่มีปริมาณวิตามินเคเพียงพอ และนอกจากนี้ ในลำไส้ยังมีแบคทีเรียที่สามารถสร้างวิตามินนี้ได้ ทารกที่เกิดใหม่อาจมีการขาดวิตามินเค แต่อาการของเลือดแข็งตัวช้าจะค่อย ๆ หดไป เมื่อเริ่มมีแบคทีเรียที่สร้างวิตามินเคได้ในลำไส้ หรือแก้โดยการให้รับประทานวิตามินเค

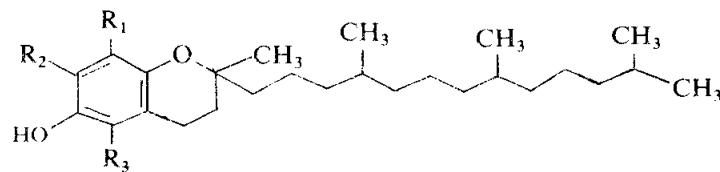
สารประกอบที่มีแอกติวิตีของวิตามินเคเหล่านี้ มีความว่องไวต่อแสง (photoreactive) แต่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบเหล่านี้ ในอาหารมีน้อยมาก

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

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 350°C มันจะสลายตัว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ วิตามินอีใช้เป็นแอนติ-ออกซิแดนท์ (anti-oxidant) ได้ มันช่วยยับยั้งออกซิเดชันของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในเนื้อเยื่อและใช้ป้องกันกลิ่นหืน อย่างไรก็ตาม ถ้าน้ำมันเกิดกลิ่นหืน

วิตามินอีจะสูญเสียไป นอกจากนี้การกลั่นน้ำมันก็ทำให้วิตามินอีสูญเสียไปได้ แต่การหุงต้มปกติจะไม่ทำลายวิตามินอี ในที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจน วิตามินอีทนต่อความร้อนและกรด แต่ถ้าถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต ออกซิเจนและต่าง มันจะสลายตัวง่าย นอกจากนี้การสูญเสียอาจเกิดขึ้นบ้างในขบวนการผลิต และเก็บอาหารทางอุตสาหกรรม เช่น การแช่แข็ง

ในระหว่างการผลิตน้ำมันพืช เนยเทียมและ Shortenings วิตามินอีจะสูญเสียไปได้ และจะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าเกิดออกซิเดชันในตัวเอง (autooxidation) ของลิปิดในอาหาร ในอาหารอบแห้งจะเกิดการสูญเสียวิตามินอีได้ เนื่องจากอาหารชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย

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

จากการทดลองกับหมู เป็ดและไก่ พบว่าการขาดวิตามินอี ทำให้หมูตัวผู้เป็นหมัน ส่วนในหมูตัวเมีย การขาดวิตามินนี้ทำให้ลูกอ่อนในครรภ์ไม่เจริญเติบโตและสืบ ไก่ที่ขาดวิตามินอีไข่จะฟักไม่เป็นตัว การเป็นหมันในหมูตัวผู้รักษาไม่ได้ แต่ในหมูตัวเมียสามารถรักษาได้โดยให้วิตามินอีในอาหารในช่วงแรก ๆ ของการตั้งครรรภ์ นอกจากนี้หมูที่ขาดวิตามินอี จะมี creatine ในปัสสาวะสูงผิดปกติ แสดงว่าเกิดการสลายตัวของกล้ามเนื้อ หลอดไตอักเสบ ขนเปลี่ยนสี ถ้าขาดโปรตีนด้วยจะเป็นโรคตับอักเสบ ในคนไม่มีอาการดังกล่าว คนที่เป็นโรคเกี่ยวกับตับอ่อนหรือท่อน้ำดี หรือกินน้ำมันพาราฟินเป็นประจำ จะทำให้วิตามินอีซึ่งเข้าสู่ร่างกายน้อยลง

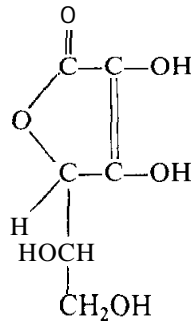
การกินวิตามินอีเกินขนาด คือวันละ 800 หน่วยสากลเป็นเวลา 5 เดือน ไม่พบว่ามีโทษแต่อย่างใด วิตามินอีมีมากเกินไป จะไม่สะสมในตับ แต่จะไปเก็บในกล้ามเนื้อและไขมันของร่างกาย ต่อมได้สมองและต่อมหมวกไตมีวิตามินอีมากกว่าต่อมไม่มีท่ออื่น ๆ ปัจจุบันมีผู้ใช้วิตามินอีเพื่อรักษาโรคหัวใจและหลอดเลือดบางชนิด ช่วยลดไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือด และใช้รักษาโรคหืดทำให้ใช้ออกซิเจนน้อยลง

3.1.2 วิตามินที่ละลายในน้ำ (Water soluble vitamins)

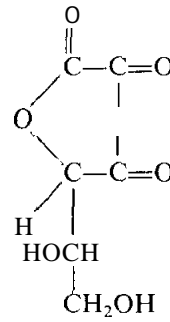
1. วิตามิน ซี (Vitamin C)

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

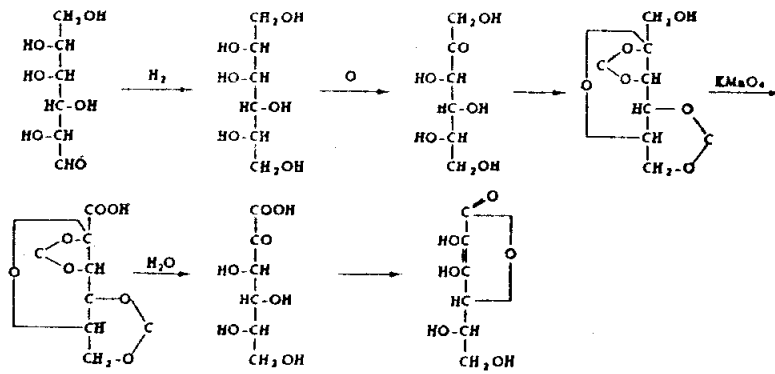


L - dehydroascorbic acid

a

วิธีสังเคราะห์กรดแอสคอร์บิก โดย Reichstein และ Grussner (1934) แสดงในรูปที่ 3.3 ชั้นแรกกลูโคสถูกรีดิวส์ไปเป็นแอลกอฮอล์คือ D-sorbitol โดยวิธี catalytic hydrogenation ภายใต้อุณหภูมิและความดัน 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 ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกซิไดส์ด้วย $KMnO_4$ โมเลกุลของ diacetone-L-Sorbose มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ 1 หมู่ ซึ่งจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นหมู่คาร์บอกซิล กรดที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอสคอร์บิกโดยตรงหรือเอสเตอริไฟด์ (esterified) ด้วยเมทิลแอลกอฮอล์และกรด HCl แล้วจึงถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอสคอร์บิกต่อไป โดยการทำปฏิกิริยากับเมทิลแอลกอฮอล์และไซเตียม วิธีนี้ได้ถูกตัดแปลงนำไปใช้ในทางการค้าด้วย

กรดแอสคอร์บิกมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรง และคุณสมบัตินี้เกิดจากโครงสร้าง enediol ของมัน ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกับหมู่คาร์บอนิลในวงแลกโตน (lactone ring)



รูปที่ 3.3 การสังเคราะห์กรดแอสคอร์บิก

นอกจากนี้ กรดแอสคอร์บิกยังมีคุณสมบัติเป็นกรด ซึ่งเกิดจากการมีหมู่ enediol อยู่ มันเป็นกรดโมโนเบสิก และสามารถทำปฏิกิริยากับด่างได้เกลือ 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 และการดูดกลืนรังสีนี้ขึ้นกับ pH ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การดูดกลืนรังสีของกรดแอสคอร์บิก

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

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

วิธีทางที่นำไปสู่การแตกหักของกรดแอสกอร์บิกมีมากมายหลายทาง และขึ้นกับสถานะของแต่ละระบบ 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 $A^{\cdot-}$ 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)]

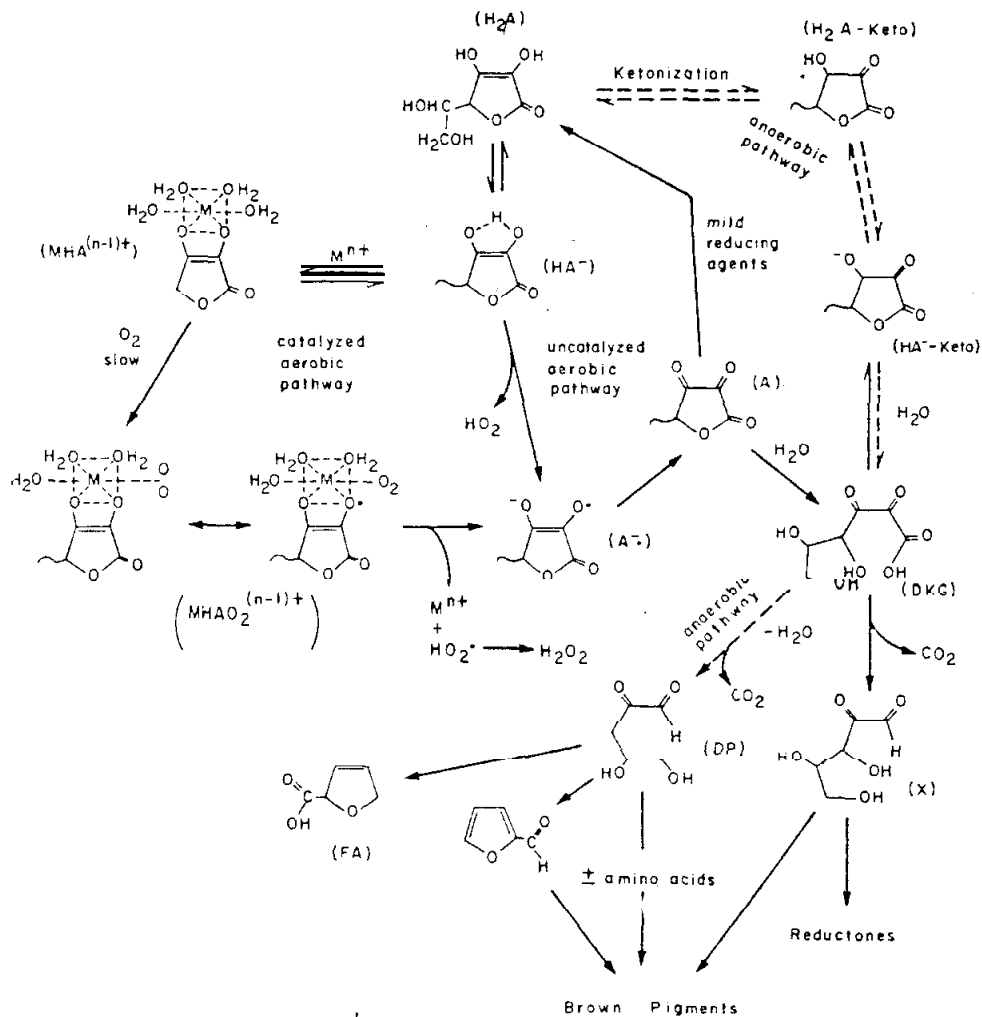
ตารางที่ 3.7 ค่าคงที่ของอัตราเร็ว (rate constants) (หน่วยเป็นวินาที⁻¹) ของกรดแอสกอร์บิก ในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงตามความดันย่อยของออกซิเจน

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 โมนิแอนไอออน (HA^-) เป็นตัวที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรผกผันกับ H^+ แสดงว่า H_2A และ HA^- แข่งขันกันในการทำปฏิกิริยากับ O_2 แต่ค่าคงตัวของอัตราเร็วสำหรับ HA^- มีค่าสูงกว่า H_2A 1.5–3 เท่า

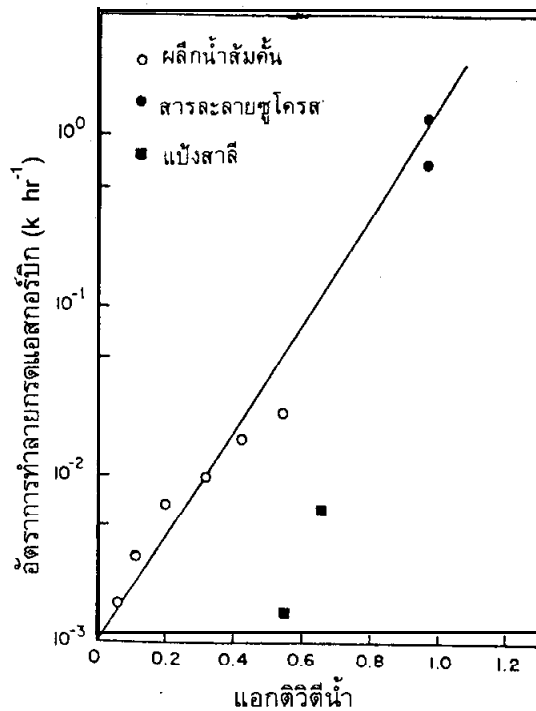
ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic conditions) อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสูงสุดที่ pH 4 แล้วจะลดลงถึงจุดต่ำสุดที่ pH 2 และจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเป็นกรดมากขึ้น ปฏิกิริยาการแตกหักในสภาวะไร้อากาศ (รูปที่ 3.4) จากการเสนอแนะของ Kurata และ Sakurai คือกรดแอสทอร์บิกทำปฏิกิริยาในรูปของ keto tautomer คือ H_2A -keto tautomer นี้ อยู่ในสมดุลกับแอนไอออนของมัน (HA^- -keto) ซึ่งจะเกิดการแตกแยกของวงแล็กโตน ปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งและปฏิกิริยาในสภาวะไร้อากาศ อาจเกิดได้ในสภาวะที่มีอากาศ แต่ปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนจะเกิดในสภาวะที่มีอากาศได้มากกว่า



รูปที่ 3.4 การแตกหักของกรดแอสทอร์บิก

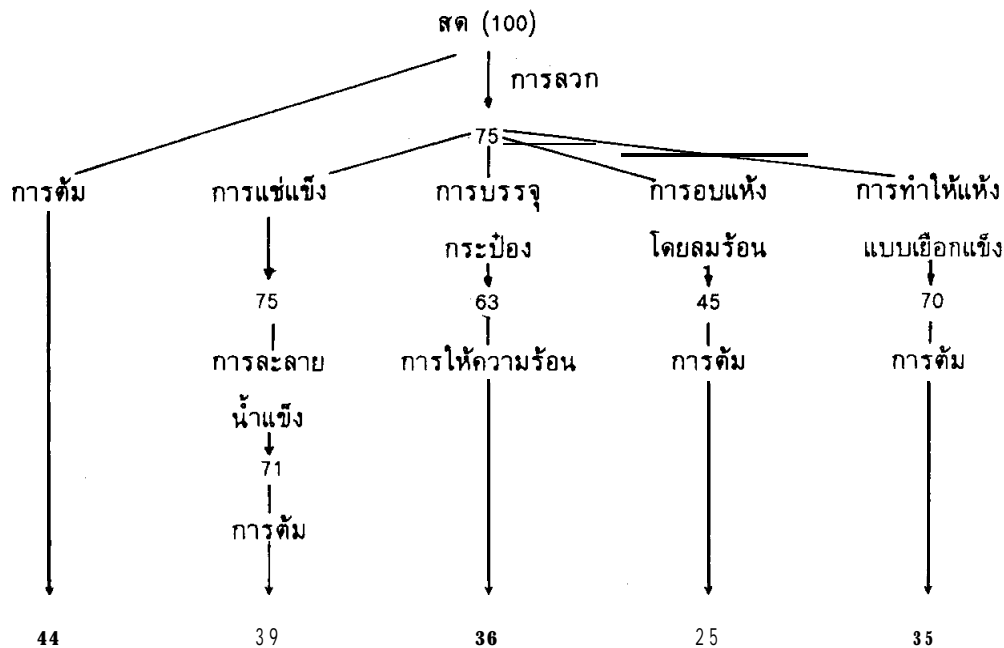
ในรูปที่ 3.4 การแตกหักต่อจาก DKG สามารถเกิดได้ แม้ว่าปฏิกิริยาเหล่านี้จะไม่มี ความสำคัญในด้านโภชนาการ เพราะคุณค่าทางโภชนาการได้สูญเสียไปแล้วที่จุดนี้ การสลายตัว ของกรดแอสกอร์บิกสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ อาหารบางประเภท Xylosone (X) เกิดโดยปฏิกิริยาดิคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของ DKG ในขณะที่ 3-deoxypentose (DP) เกิดโดยปฏิกิริยา β -elimination ที่ C-4 ของ DKG ตามด้วยดิคาร์บอกซิเลชัน ในขั้นนี้ปฏิกิริยาได้เริ่มแสดงถึงลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาการเกิด สีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับ 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

แม้ว่าเสถียรภาพของกรดแอสคอร์บิกจะเพิ่มขึ้นถ้าลดอุณหภูมิของอาหารลง อุณหภูมิของการเก็บที่สูงกว่า -18°ซ อาจนำไปสู่การสูญเสียกรดแอสคอร์บิกในปริมาณที่มากพอควร โดยปกติการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกในอาหารที่ไม่ใช่ประเภท ส้ม มะนาว (noncitrus food) จะมากที่สุดโดยใช้ความร้อน ดังจะเห็นได้จากถั่วหวาน (pea) ที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิก

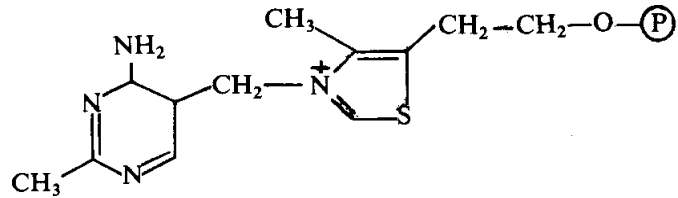


รูปที่ 3.6 ปริมาณของกรดแอสคอร์บิกที่ยังเหลืออยู่ในถั่วหวานหลังจากผ่านขบวนการต่าง ๆ

การวิเคราะห์หาปริมาณของกรดแอสคอร์บิก ใช้วิธีไตเตรดกับ 2,6-ไดคลอโรฟีโนลอินโดฟีโนล (2,6-Dichlorophenolindophenol) สารสีนี้จะถูกรีดิวส์โดยกรดแอสคอร์บิก ทำให้สีจางหายไป วิธีนี้ไม่ใช้กับกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก นอกจากนี้ยังอาจใช้วิธีฟลูออริเมตรีโดยวัดความเข้มของการเกิดฟลูออเรสเซนส์เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น

2. วิตามินบีหนึ่ง (Vitamin B₁)

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



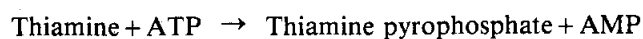
Thiamine pyrophosphate (TPP)

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

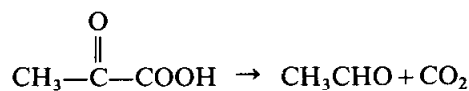
ไธอามีนไฮโดรคลอไรด์ (thiamine hydrochloride) สามารถเตรียมในรูปผลึกไม่มีสีและเป็นรูปเข็มโมโนคลีนิก (monoclinic needles) และมีจุดหลอมเหลว 20° ละลายน้ำได้ดีมาก น้ำ 1 มล. สามารถละลายไธอามีนได้ 1 กรัม สารละลายที่ได้ไม่อปติคัลแอคทีฟ (optically inactive)

ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสูตรโครงสร้างของไธอามีน จะทำให้มันสูญเสียแอกติวิตีของวิตามินในทางสรีรวิทยา แต่เกลือหลายตัวของสารนี้มีคุณสมบัติเป็นวิตามิน นอกจากนี้บางรูปที่เกิดจากการเปิดวงไธอะซอลก็มีแอกติวิตีในระบบชีววิทยา

ไธอามีนไพโรฟอสเฟต (thiamine pyrophosphate หรือ TPP) ทำหน้าที่เป็นโคเอ็นไซม์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไธอามีนและ ATP โดยตรง



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

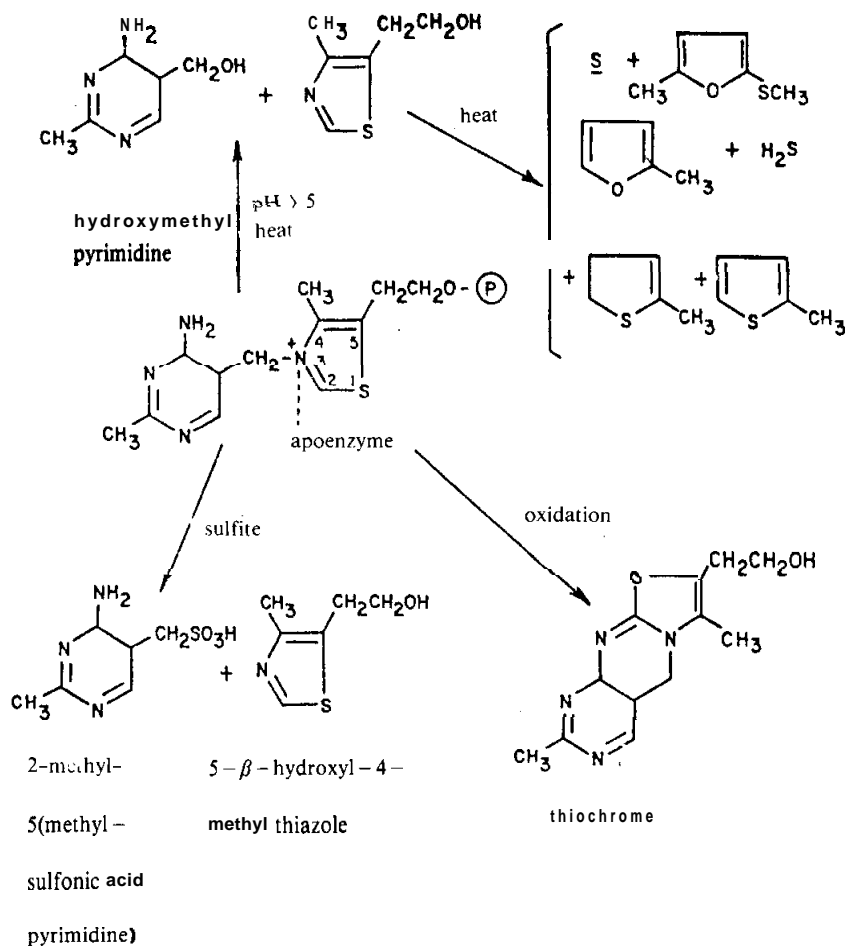


ดังนั้นถ้าขาดไธอามีน จะมีสารที่เกิดจาก reduction คือกรดแลกติกสะสมอยู่มาก ทำให้เกิดอาการปวดเมื่อย ไธอามีนยังสำคัญใน oxidative pathway โดยตรงสำหรับเมตาโบลิซึมของ

กลูโคส ในพืชไซทามีนส่วนใหญ่เป็นไซทามีนอิสระ กล้ามเนื้อสัตว์ประกอบด้วยไซทามีนอิสระ ประมาณครึ่งหนึ่ง

ไซทามีนเป็นวิตามินที่สูญเสียได้ง่ายที่สุดตัวหนึ่ง การชะล้างผักก่อนหุงต้มก็เกิดการสูญเสียวิตามินนี้ได้ ข้าวที่ผ่านการซาวเพียงครั้งเดียวก็สูญเสียไซทามีนมากถึง 25% เนื้อ, ผัก และผลไม้ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ และระหว่างการเก็บ ก็เกิดการสูญเสียไซทามีนได้ การใส่ น้ำ ในการหุงต้มอาหาร วิตามินนี้จะละลายในน้ำ และสูญเสียไปถ้าหากเหนื้ต้มผักทิ้งไป

เสถียรภาพของไซทามีนยังขึ้นกับ pH, อุณหภูมิ, ionic strength, ชนิดของบัฟเฟอร์ (buffer type) และสารอื่น ๆ ที่ทำปฏิกิริยากับไซทามีนได้ ปฏิกิริยาการแตกหักเกิดจากการแทนที่โดยนิวคลีโอไฟล์ที่เมธิลีนคาร์บอน (methylene carbon) ที่เชื่อมระหว่างระบบวงแหวน 2 วง ดังนั้นถ้ามีนิวคลีโอไฟล์ที่แรง เช่น HSO_3^- (ซัลไฟต์) จะทำลายวิตามินนี้ได้ การแตกหักของไซทามีนโดยซัลไฟต์หรือที่ pH เป็นด่างแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 ทั้งสองขบวนการนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เป็น 5- β -hydroxymethyl-4-methylthiazole และไพริมิดีนที่มีหมู่แทนที่ ในกรณีของซัลไฟต์จะได้ 2-methyl-5(Methylsulfonic acid) pyrimidine ส่วนในกรณีของปฏิกิริยาในด่างจะให้ hydroxymethylpyrimidine ปฏิกิริยาการแตกหักของไซทามีนโดยซัลไฟต์นี้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง และปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่ออาหารตากแห้ง เช่น ผัก และผลไม้แห้งที่ใส่ซัลไฟต์เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล สารละลายเอเคียสของไซทามีนที่ pH 3.5 สามารถทนความร้อนถึง 120°C เป็นเวลา 20 นาทีโดยไม่เกิดการสูญเสียไป ความร้อนทำลายไซทามีนได้ทำให้เกิดกลิ่นเฉพาะตัวซึ่งมีส่วนทำให้เกิดกลิ่น “เนื้อ” (“meaty” flavors) ในอาหารที่ต้มสุก ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้บางปฏิกิริยาแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 การแตกหักของไซทามีนเกิดวงไพริมิดีน และไซอะซอลได้กล่าวไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ลำดับที่สองยังเกิดได้จากวงไซอะซอล ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ ธาตุซัลเฟอร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารประกอบฟิวแรน (furan) ไฮโอฟินและไดไฮโดรไฮโอฟิน กลไกนำไปสู่ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังไม่ทราบแน่ชัดแต่คงจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการแตกหักและการจัดตัวใหม่ของวงไซอะซอล



รูปที่ 3.7 การแตกหักของ Thiamine pyrophosphate

นอกจากนี้ การสูญเสียวิตามินยังเกิดในผลิตภัณฑ์ปลาดิบ พวกสัตว์ตระกูลครัสเตเชีย (crustacean) เช่น กุ้งทะเลใหญ่ (lobster) และพวกหอย เช่น หอยกาบมีเอ็นไซม์ Thiaminase ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแตกหักของวิตามินและทำลายแอกติวิตีของวิตามิน ถ้าหากรับประทานอาหารทะเลเป็นอาหารหลักจะขาดวิตามินได้

การขาดวิตามินจะทำให้เป็นโรคเหน็บชา เบื่ออาหารและทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ ซีพจรต่ำ ประสาทอักเสบ (neuritis) ต่อไปจะเป็นอัมพาต และเป็นโรคเกี่ยวกับหัวใจและอาจถึงตายด้วยโรคหัวใจวายได้

วิตามินสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้โดยการออกซิไดส์วิตามินไปเป็นไฮโอโครม

(thiochrome) (รูปที่ 3.7) โดยใช้สารออกซิไดส์ที่แรง เช่น เฟอร์โรไซยาไนด์ (ferricyanide), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโอโครมเป็นสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์ สามารถหาปริมาณของ วิตามินนี้ได้โดยการวัดความเข้มของการเรืองแสง การตัดแปลงวิธีนี้กับอาหารคือ ไฮโดรไรส์ 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	λ_{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 ปริมาณของวิตามินบีหนึ่งในอาหารต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ปริมาณของวิตามินบีหนึ่งในอาหารที่กินได้ 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

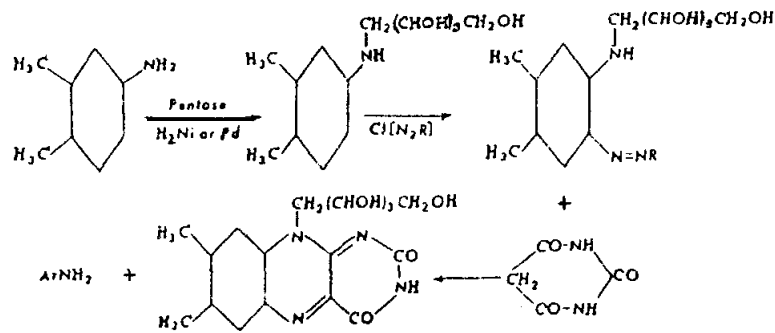
ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

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
เนื้อซีโครงหมู	0.77	หัวใจวัว	0.48

3. วิตามินบีสอง (Vitamin B₂)

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

ไรโบฟลาวินมีสูตรโครงสร้างค้นพบโดย Karrer และ Kuhn และสังเคราะห์ได้เป็นครั้งแรกโดย Euler และผู้ร่วมงานในปี 1935 สารประกอบนี้คือ [6,7 – dimethyl – 9' – (1' – D – ribityl) – isoalloxazine] การสังเคราะห์ไรโบฟลาวินในรูปที่ 3.8 เป็นวิธีของ Karrer และ Meerwein (1936) รวมกับขั้นตอนสุดท้ายของ Tichler และผู้ร่วมงาน (1947)

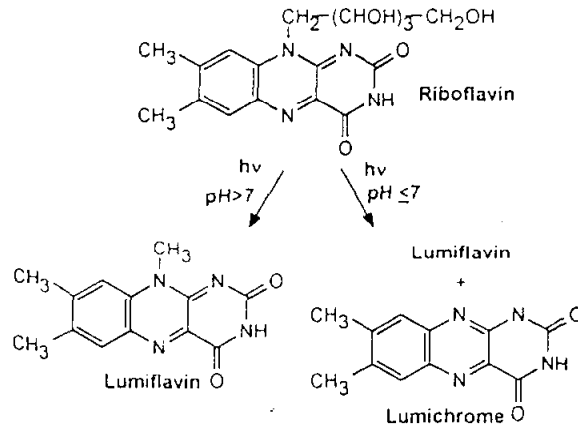


รูปที่ 3.8 การสังเคราะห์ไรโบฟลาวิน

ไรโบฟลาวินตกผลึกเป็นรูปเข็มสีส้มเหลือง หลอมเหลวพร้อมกับสลายตัวที่ 20° ซละลายได้เล็กน้อยในน้ำ ในสารละลายเอควีเอส (aqueous solution) มันมีสีเขียวเหลือง และเรืองแสง

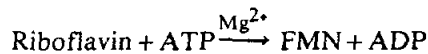
ฟลูออเรสเซนส์สีเขียวเหลืองเข้ม การเติมกรดหรือด่าง จะทำให้ฟลูออเรสเซนส์เลือนหายไป

ไรโบแฟลวินค่อนข้างเสถียรในอาหารภายใต้สภาวะปกติ มันทนต่อความร้อนในการหุงต้ม แต่เกิดการสูญเสียได้เมื่ออาหารถูกปกหรือตัด ถูกสีหรือชะล้างในระหว่างการเตรียมอาหาร เช่นเดียวกับวิตามินที่ละลายน้ำอื่น ๆ ไรโบแฟลวินจะอยู่ตัวมากในกรด แต่ในสารละลายต่างมันจะสลายตัวค่อนข้างเร็ว และจะสูญเสียเร็วมากเมื่อถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต การสลายตัวเกิดจากการแตกออกของ ribitol โดยวิธีทางโฟโตเคมีได้ลูมิแฟลวิน (lumiflavin)

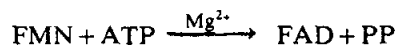


ลูมิแฟลวินที่เกิดเป็นสารออกซิไดส์ที่แรงกว่าไรโบแฟลวินและสามารถเร่งให้เกิดการทำลายวิตามินอื่น ๆ โดยเฉพาะกรดแอสคอร์บิก เมื่อหลายปีก่อนพบว่านมที่บรรจุในขวดใสและนำออกจำหน่าย ปฏิกริยาที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหานำไปสู่การสูญเสียคุณค่าทางอาหารและยังมีปัญหาในเรื่องกลิ่นรสที่เรียกว่า “sunlight off flavor” นมที่ใส่ในขวดแก้วใสเมื่อถูกแสงแดด จะเกิดการสูญเสียไรโบแฟลวินในนมประมาณ 50% ภายในครึ่งชั่วโมง ต่อมาเมื่อบรรจุอาหารในกล่องกระดาษทึบหรือพลาสติกทึบปัญหานี้ก็หมดไป

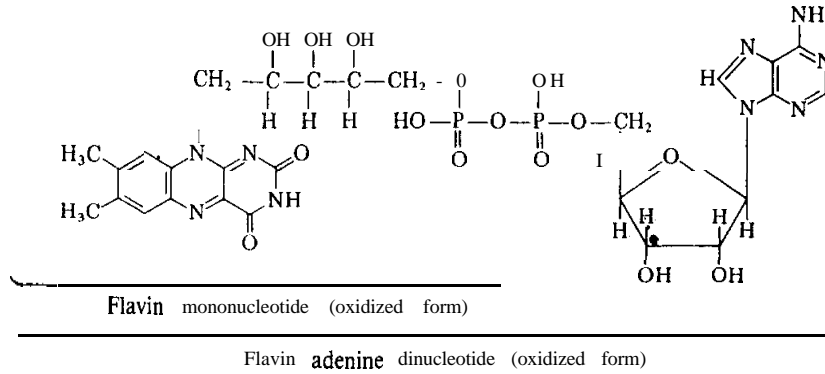
ไรโบแฟลวินมีแอกติวิตีเป็นโคเอ็นไซม์โดยอยู่ในรูปของ flavin coenzymes 2 แบบคือ flavin mononucleotide (FMN) และ flavin adenine dinucleotide (FAD) Flavin mononucleotide หรือ riboflavin-5-phosphate เกิดจากปฏิกริยาของไรโบแฟลวินกับ ATP โดยมีเอ็นไซม์ flavokinase เป็นตัวเร่ง



FAD เกิดจาก FMN โดยทำปฏิกริยากับ ATP และเอ็นไซม์ flavin nucleotide pyrophosphorylase



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



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

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

ตารางที่ 3.10 ปริมาณวิตามินบีสองในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

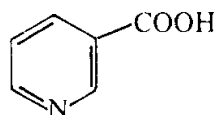
อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
ตับไก่	4.49	ไข่แดง	0.7
ไตหมู	4.36	เห็ดหูหนู	0.71
ตับหมู	3.03	ไบซีเหล็ก	0.69

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

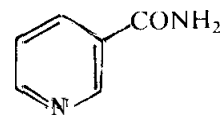
อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
นกพิราบ, เนื้ออก	1.82	ปลาทุสด	0.62
นมผง	1.70	ขาหมู	0.50
หัวใจหมู	1.56	เห็ด	0.44
ปูทะเล	0.89	ไขมันสำปะหลัง	0.43
ปลาเจ้า ไชนกกระทา	0.85	ปอดหมู ไล่หมู	0.41
หัวใจไก่	0.80	ดอกโสน	0.40
ตับวัว	0.76	เนยแข็ง	0.26

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

ในอาเซียนเป็นที่รู้จักกันเพียงแต่เป็นสารประกอบอินทรีย์ตัวหนึ่งเป็นเวลานานกว่า 50 ปี ก่อนที่จะทราบว่ามันมีเอกลักษณ์เป็นวิตามินด้วย การขาดไนอาซีนทำให้เกิดโรค 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

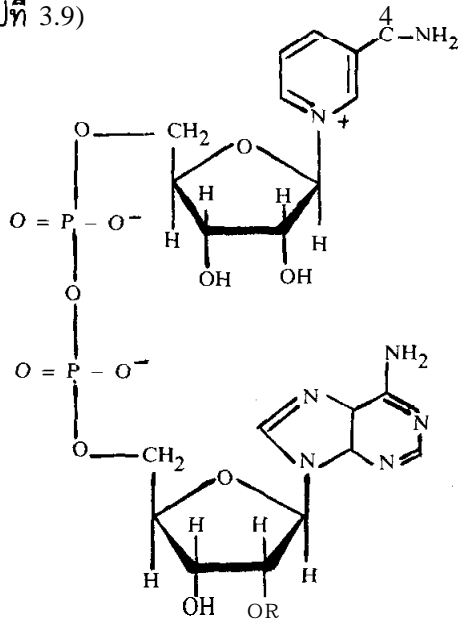


nicotinamide

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

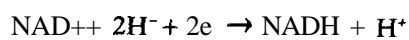
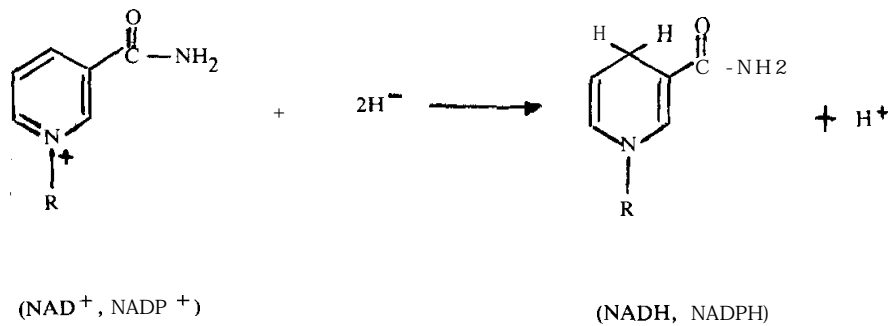
ในอาเซียนเป็นองค์ประกอบของโคเอ็นไซม์สองตัวคือ nicotinamide adenine dinucleotide

(NAD⁺) และ nicotinamide adenine dinucleotide phosphate(NADP⁺) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์เพราะสามารถรับไฮไดรด์ไอออน (hydride ion) และ เปลี่ยนเป็นรูปรีดิวส์คือ 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



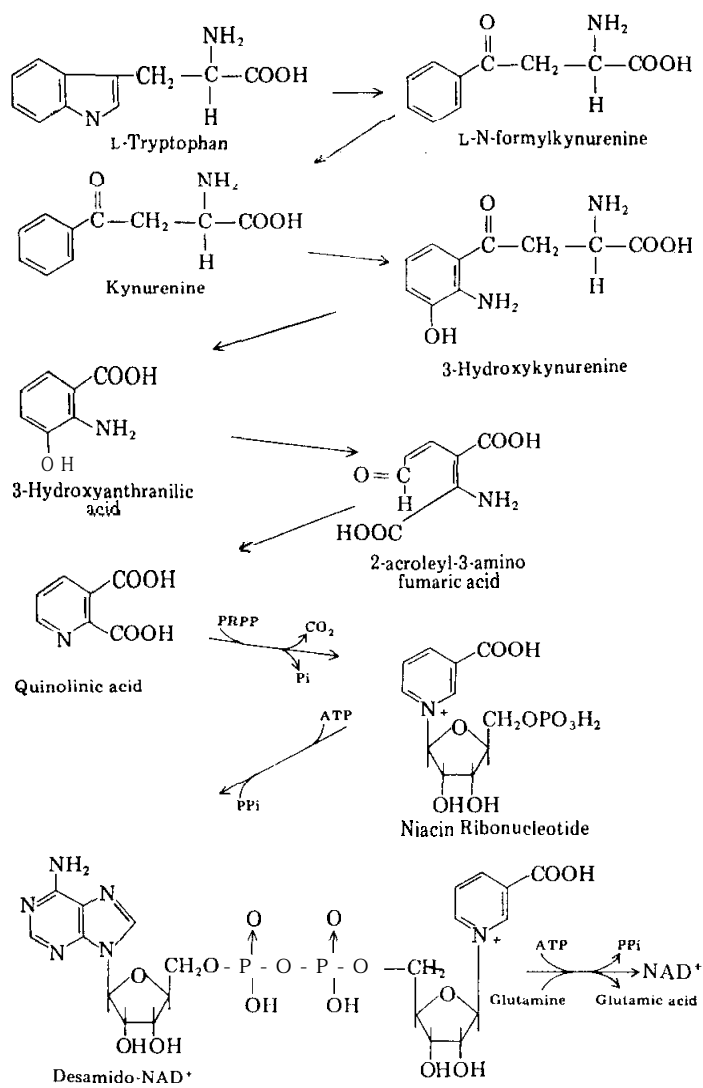
รูปที่ 3.9 Nicotinamide adenosine dinucleotide และ Nicotinamide adenosine dinucleotide phosphate

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

ไนอาซินคือ 3-pyridine-carboxylic acid และนิโคตินามิดก็คือ เอมีดของกรดนี้ ไนอาซินตกผลึกเป็นรูปเข็มจากน้ำและแอลกอฮอล์มีจุดหลอมเหลว 236 - 237°ซ และระเหิดได้โดยไม่สลายตัว ละลายได้เล็กน้อยในน้ำและแอลกอฮอล์เย็นแต่ละลายได้ในน้ำร้อนและแอลกอฮอล์ร้อน ส่วนนิโคตินามิดละลายได้ดีมากในน้ำและแอลกอฮอล์ เป็นผงสีขาวแต่เกิดเป็นผลึกรูปเข็มเมื่อตกผลึกจากเบนซีน มีจุดหลอมเหลว 129 - 131°ซ และเดือดภายใต้การลดความดัน

ไนอาซินเป็นวิตามินที่เสถียรที่สุดตัวหนึ่ง ทนต่อความร้อน กรด ด่าง ออกซิเจน และแสง ไนอาซินที่อยู่ในอาหารอาจอยู่เป็นกรดนิโคตินิก นิโคตินามิด หรือโคเอ็นไซม์นิโคตินามิด NAD⁺, NADP⁺ ตัวใดตัวหนึ่ง การสูญเสียวิตามินตัวนี้เกิดจากการปอก การหั่น การชะล้าง ในระหว่างการเตรียมอาหารพร้อม ๆ กับวิตามินที่ละลายน้ำอื่น ๆ ส่วนการหุงต้มปกติจะไม่มีผลต่อวิตามินนี้ ไนอาซินมีความสัมพันธ์ทางโภชนาการกับกรดอะมิโนทริปโตเฟน ทริปโตเฟนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนอาซินได้ (รูปที่ 3.10) ทริปโตเฟนประมาณ 60 มิลลิกรัมจะมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมของไนอาซินในอาหาร

ไนอาซินสังเคราะห์ได้โดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่แต่ปริมาณที่สังเคราะห์ได้ไม่พอกับความต้องการของคน ต้องได้รับจากอาหาร อาหารที่มีไนอาซินมากคือ ยีสต์ รำข้าว ตับ เนื้อสัตว์ ถั่วเมล็ดแห้งและเครื่องในสัตว์ อาหารจากพืชมีไนอาซินน้อยกว่าอาหารจากสัตว์ นมมีไนอาซินน้อยก็จริง แต่มีทริปโตเฟนมากจึงเป็นแหล่งเกิดของไนอาซินทางอ้อม พวกข้าวทุกชนิดมีไนอาซินมาก ยกเว้นข้าวโพดซึ่งมีไนอาซินและทริปโตเฟนน้อยกว่าข้าวชนิดอื่น และไนอาซินในข้าวโพดยังเป็นชนิดที่ไม่อิสระรวมอยู่กับสารอื่น จึงใช้ประโยชน์ไม่ได้เต็มที่ ดังนั้นประชากรในประเทศที่กินข้าวโพดเป็นอาหารหลักมักเป็นโรคขาดไนอาซินมาก

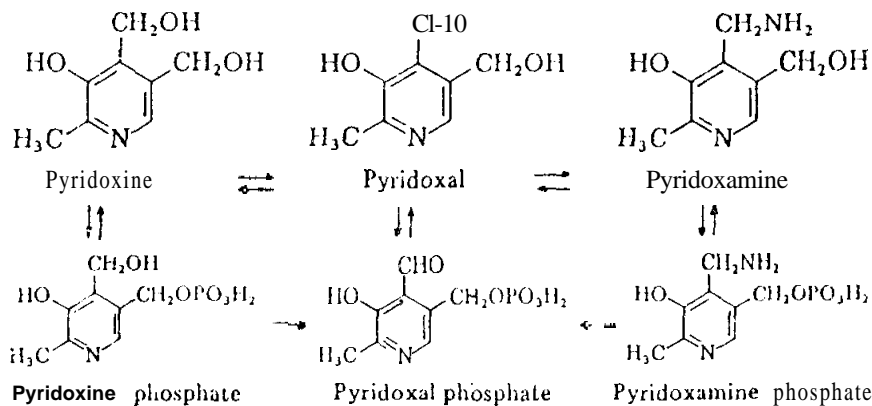


รูปที่ 3.10 เมตาบอลิซึมของทริปโตเฟนและการสังเคราะห์ NAD⁺

5. วิตามินบีหก (Vitamine B₆)

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

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



ไพริดอกซัลฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญใน transamination และ oxidative metabolism ของกรดอะมิโนและอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำกรดอะมิโนเข้าสู่ภายในเซลล์ นี่เป็นเหตุผลที่ต้องเพิ่มปริมาณความต้องการวิตามินนี้เมื่อบริโภคอาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูง

วิตามินบีหกในรูปไพริดอกซอลเป็นรูปที่เสถียรมาก และเป็นรูปที่ใช้เติม (fortification) ลงในอาหาร (fortification หมายถึงการเติมสารอาหารลงในอาหารในปริมาณที่มากกว่าหลายเท่าของที่มีในธรรมชาติ)

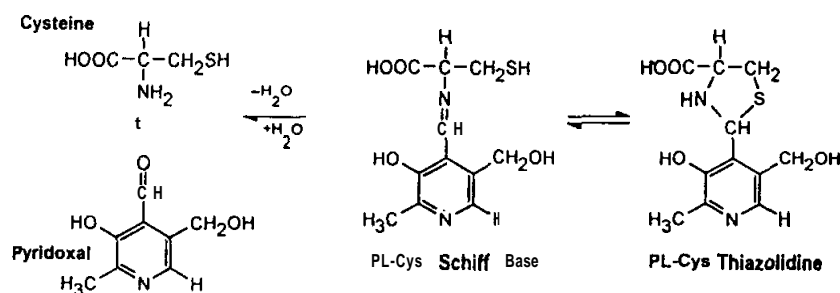
ไพริดอกซีนหรือไพริดอกซอล ตกผลึกจากอะซีโตนเป็นรูปเข็ม มีจุดหลอมเหลว 160°ซ

ระเหิดได้และละลายได้ดีมากในน้ำและในแอลกอฮอล์ ไพริดอกซีนไฮโดรคลอไรด์ตกผลึกเป็นแผ่นจากแอลกอฮอล์และอะซีโตน มันหลอมที่ 206 · 208°ซ และละลายได้ดีมากในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์

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

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

เมื่อให้ซิสเทอีนทำปฏิกิริยากับไพริดอกซัลภายใต้สภาวะคล้ายคลึงกับในขบวนการสเตอริไลส์ พบว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไม่มีแอคติวิตีของวิตามินบีหกเหลืออยู่เมื่อทดสอบกับหนู และแอคติวิตีเหลือเพียงประมาณ 20% ในจุลินทรีย์ *S. carlsbergensis* ที่ใช้ทดสอบ ผลิตภัณฑ์



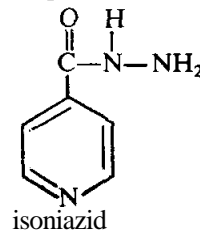
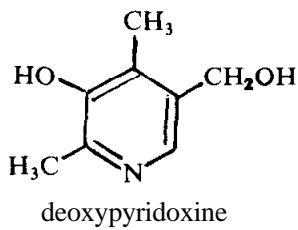
ตัวหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยานี้ปรากฏว่าเป็น bis - 4 - pyridoxyl disulfide ซึ่งคงจะเกิดจาก thiazolidine ปฏิกิริยาในทำนองเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อไพริดอกซัลทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลไฟดริล (sulfhydryl group) ของซีรัมโปรตีนจากนม ส่วนปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบีหกกับหมู่อะมิโน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างไพริดอกซัล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

ครบสมบูรณ์ ดังนั้น ปฏิกริยาที่ทำลายเสถียรภาพของวิตามินบี₆ ในกระบวนการความร้อนจึงควรเป็นปฏิกริยาที่เกิดจากซิสเตอีน

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

ร่างกายสังเคราะห์วิตามินบี₆ ได้เองจากแบคทีเรียในลำไส้ ในคนจึงมักไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการขาดวิตามินบี₆ นอกจากในทารกถ้าขาดจะมีอาการชัก ส่วนในผู้ใหญ่ถ้าขาดจะเกิดโรคผิวหนังมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนง่าย ลิ้นแตก อาการเหล่านี้อาจเกิดจากการใช้ยาบางชนิด เช่น deoxypyridoxine หรือ isoniazid ซึ่งใช้เป็นยารักษาวัณโรคได้ deoxypyridoxine เป็นสารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายไพริดอกซิน จึงเป็น competitive inhibitor ส่วน isoniazid จะไปรวมกับไพริดอกซัลและฟอสเฟตของมันทำให้ร่างกายไม่สามารถใช้วิตามินบี₆

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

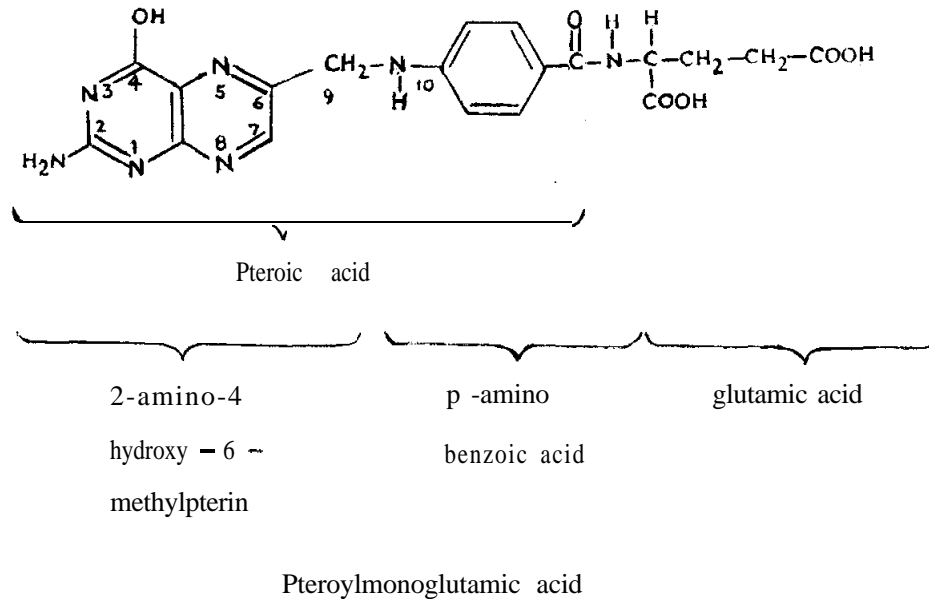


ตารางที่ 3.11 ปริมาณวิตามินบี₆ ในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

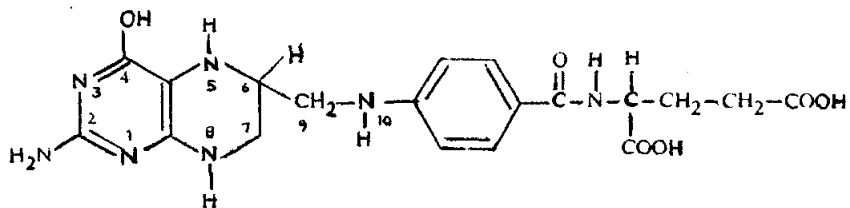
อาหาร	ไมโครกรัม	อาหาร	ไมโครกรัม
ยีสต์แห้ง	3,930	เนื้อวัว	400
จมูกข้าวสาลี	1,030 - 1,120	กล้วย, ถั่วลิสง	300
ไตวัว	390 - 1,020	กะหล่ำปลี	290
ตับวัว	710 - 810	ข้าวโอ๊ต	190 - 250
แฮมสด	330 - 580	มันฝรั่ง	160
ข้าวโพด	250 - 570	ส้มเขียวหวาน	80
ข้าวสาลี	270 - 410	นมวัว	65 - 73

6. กรดโฟลิก (Folic acid)

วิตามินนี้เป็น precursor ของโคเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องในการย้ายโอน 1 หน่วยคาร์บอน- (formyl, formaldehyde, hydroxymethyl) โครงสร้างของกรดโฟลิกประกอบด้วยวงแหวน pteridine เชื่อมต่อกับ p - amino - benzoic acid ซึ่งยังต่อกับกรดกลูตามิกโดยเอมิดลิงเกจ (amide linkage)



ในอาหาร กรดโฟลิกประกอบด้วยส่วนของกลูตาเมท (glutamate) มากกว่า 1 ส่วน โดยมีกลูตาเมทมาเชื่อมต่อกับหมู่แอลฟา-คาร์บอกซิลด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) นอกจากนี้ตำแหน่งที่ 2, 5, 6, 7 และ 8 ของวงแหวน pteridine อาจจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นรูปต่าง ๆ ได้ di- หรือ tetrahydrofolate เช่น 5,6,7,8 - tetrahydrofolate; 5,6 - ; 5,8 - ; 7,8 - dihydrofolate



กรดโฟลิกในรูปของ tetrahydrofolate เป็นโคเอ็นไซม์ทำหน้าที่โยกย้ายหมู่คาร์บอน 1 หมู่ เช่น เมทิล, ไฮดรอกซีเมทิลและฟอร์มิล (formyl) โดยเฉพาะในการสังเคราะห์ purine, pyrimidine ribotides และ deoxyribotides และในการเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างกรดอะมิโน สารที่คล้ายคลึงกับกรดโฟลิก เช่น aminopterin และ methopterin สามารถยับยั้งการสังเคราะห์ thymine และลดการสังเคราะห์ DNA ในเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโตและในเซลล์ที่แบ่งตัว ด้วยเหตุนี้ ยาสองชนิดนี้จึงใช้ในการควบคุมโรคลิวเคเมีย (leukemia) และโรคมะเร็งอื่น ๆ กรดโฟลิกจะถูกเก็บไว้ในตับ แต่ส่วนที่เกินจะถูกขับออกทางปัสสาวะ

กรดโฟลิกตกผลึกเป็นรูปเข็มสี่เหลี่ยมสาม เป็นสารออปติคัลแอคติฟมี $[\alpha]_D^{25} = +23^\circ$ มีสีคล้ำเมื่อถูกเผาและสลายตัวที่อุณหภูมิที่ 250°C ละลายได้เล็กน้อยในน้ำ และไม่ละลายในอีเทอร์ สามารถแยกได้จากตับและยีสต์

ปริมาณการสูญเสียกรดโฟลิกในอาหารที่ผ่านขบวนการต่าง ๆ ยังไม่กระจ่างนัก อย่างไรก็ตามการศึกษากรดโฟลิกที่ผ่านขบวนการแปรรูปและในช่วงเก็บซีให้เห็นว่า ขบวนการทำลายแอกติวิตีของมันคือ ออกซิเดชัน การทำลายกรดโฟลิกจะเกิดพร้อมกับการทำลายกรดแอสกอร์บิกด้วย และการเติมกรดแอสกอร์บิกจะทำให้กรดโฟลิกเสถียร วิตามิน 2 ตัวนี้จะเสถียรในนมได้ถ้ากำจัดออกซิเจนออกจากระบบ อย่างไรก็ตามการเก็บนมได้ 14 วันอุณหภูมิห้อง (15 - 19°C) แอกติวิตีของวิตามินนี้ก็ลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

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

กรดโฟลิกมีมากในตับ ยีสต์ เนื้อสัตว์ ปลา ผักใบเขียว ธัญพืชและถั่วเหลือง ปริมาณของกรดโฟลิกในอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.12

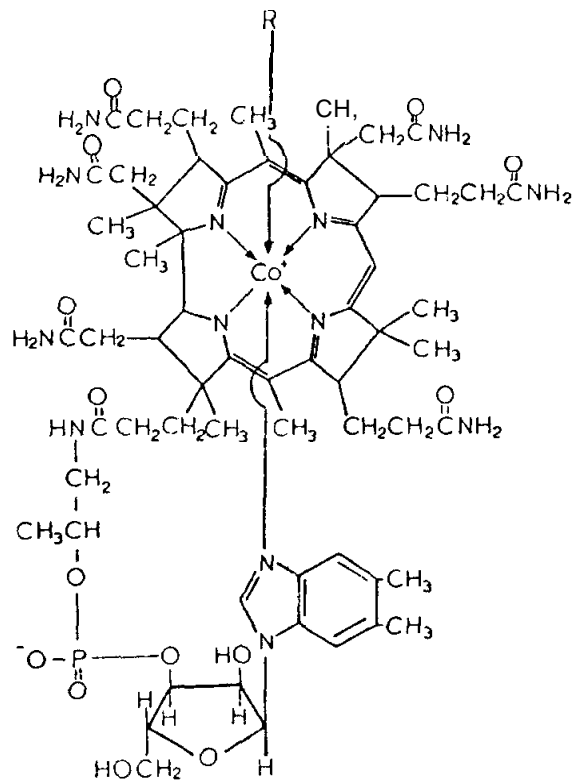
ตารางที่ 3.12 ปริมาณของกรดโฟลิกในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

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
ผักชี	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 $[\alpha]_{D}^{23} = -59^{\circ} \pm 9^{\circ}$ 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 อัลกิล 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

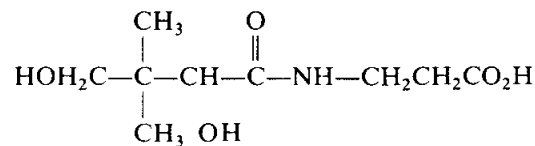
การขาดวิตามินบีสิบสองจะเป็นโรคโลหิตจางที่เรียกว่า Pernicious anemia คือเม็ดเลือดแดงโตผิดปกติ ลึนอักเสบบ ระบบประสาทผิดปกติ เช่น แขนขาแข็งกระวานกระวายเป็นนึ่ง คนที่เป็นโรคนี้อาจเกิดความบกพร่องทางกรรมพันธุ์ คือขาดสาร mucopolysaccharide ที่เรียกว่า Intrinsic factor (IF) ในน้ำย่อยจากกระเพาะอาหาร IF เป็นสารพวกโปรตีนซึ่งช่วยทำให้วิตามินบีสิบสองที่รวมอยู่กับสารอื่นในอาหารแยกตัวเป็นอิสระและดูดซึมเข้าร่างกายได้สะดวก คนที่เป็นโรค Pernicious anemia จึงมักรักษาด้วยการฉีดวิตามินบีสิบสองหรือให้กินตับซึ่งอุดมด้วยวิตามินบีสิบสอง

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

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

8. กรดแพนโทเทมิก (Pantothenic acid)

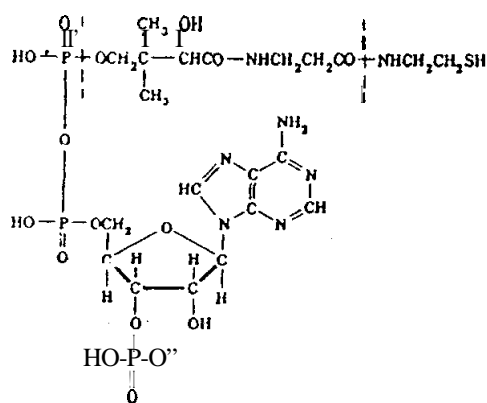
สารประกอบนี้ได้ถูกค้นพบว่าเป็นปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโตของยีสต์ โดย R.J. Williams ในปี 1933 ต่อมาก็พบว่ามีความสำคัญในโภชนาการของสัตว์ สารประกอบนี้จัดอยู่ในกลุ่มของวิตามินบีคอมเพล็กซ์



Pantothenic acid

วิตามินนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของ coenzyme A และโดยปกติจะอยู่ในรูปนี้ในเนื้อเยื่อของสัตว์

Pantothenic acid



Coenzyme A

ส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นประในโมเลกุลของ coenzyme A ที่แสดงไว้นี้คือส่วนของกรดแพนโทเทนิค Coenzyme A สำคัญมากต่อเมตาโบลิซึมของไขมัน, คาร์โบไฮเดรตและสารประกอบไนโตรเจนในร่างกาย กรดแพนโทเทนิคสามารถสังเคราะห์ได้ บุคคลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารตัวนี้มีหลายกลุ่มด้วยกัน (Stiller และผู้ร่วมงาน 1940; Williams และผู้ร่วมงาน 1950)

กรดแพนโทเทนิค เป็นน้ำมันสีเหลืองขุ่นหมุนระนาบแสงโพลาไรส์ไปทางขวา (dextro-rotatory) มี specific rotation $[\alpha]_D^{25} = +37.5^\circ$ แคลเซียมแพนโทเทเนต (calcium pantothenate) ซึ่งผลิตขึ้นในทางการค้าเป็นเกลือที่มีผลึกเล็กมาก (microcrystothenate salt) หมุนระนาบแสงโพลาไรส์ไปทางขวา มี $[\alpha]_D^{25} = +28.2$ วิตามินอิสระตัวนี้ละลายน้ำได้ดีมากและละลายได้ในอีเธอร์ ส่วนเกลือแคลเซียมของกรดแพนโทเทนิกละลายได้ในอีเธอร์ ส่วนเกลือแคลเซียมของกรดแพนโทเทนิกละลายน้ำได้แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

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

การขาดแพนโทเทนิคจะพบในสัตว์ทดลองทำให้ผิวหนังและขนเปลี่ยนสีเกิดโรคผิวหนังโรคกระเพาะและลำไส้ เป็นหมัน ระบบประสาทและต่อมหมวกไตอักเสบเป็นแผลและทำงานผิดปกติ สัตว์ทดลองจะพบขนหงอกเร็ว ขนร่วง ผิวหนังอักเสบ เป็นวงรอบขอบตาและบริเวณปาก ในคนไม่เกี่ยวกับผมหงอกแต่จะร้อนชู่ข่าที่มือและเท้า เหนื่อย นอนไม่หลับ ปวดศีรษะ

คลื่นไส้ อาเจียน กล้ามเนื้อเป็นตะคิว การประสานงานของอวัยวะเสียไป ระยะหลังนี้เชื่อกันว่ากรดนี้ช่วยผ่อนคลายอารมณ์เครียดได้ และยังจำเป็นสำหรับผลิตสารต่อต้านเชื้อโรคในร่างกาย คนทั่วไปมักไม่พบการขาดวิตามินนี้ เพราะแบคทีเรียในลำไส้สังเคราะห์ได้ การขาดวิตามินนี้พบในคนที่เป็โรคพิษสุราเรื้อรังและรับประทานอาหารไม่ถูกหลักโภชนาการ หรือเป็นโรคขาดวิตามินอื่นโดยเฉพาะบีสอง

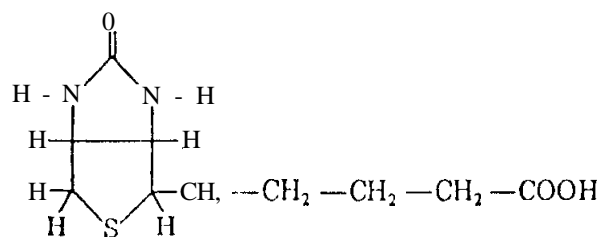
กรดแพนโทเทนิกมีมากในเนื้อสัตว์ ตับ ธัญพืชและถั่วเมล็ดแห้ง ผักและผลไม้มีกรดแพนโทเทนิกน้อย อาหารที่มีไวตามินบีสองมากมักมีกรดนี้มากด้วย ปริมาณของกรดแพนโทเทนิกในอาหารต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ปริมาณกรดแพนโทเทนิกในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

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

9. ไบโอดีน (Biotin)

Kogl และ Tonnis (1936) สามารถแยกสารตัวนี้ได้ในรูปแบบผลึกจากไข่แดงแห้ง



Biotin

ไบโอตินหลอมเหลวและละลายตัวที่ 232.3°ซ และตกผลึกเป็นรูปเข็มในน้ำ มันออปติคัล-ลีแอกติฟมี $[\alpha]_D^{22} = +92^\circ$ ไบโอตินสังเคราะห์ได้โดยห้องปฏิบัติการของบริษัท Merck ไบโอตินเป็นโคเอ็นไซม์ในปฏิกิริยา Carboxylations และ transcarboxylations ไบโอตินจับกับเอ็นไซม์หลายชนิดโดยพันธะโคเวเลนต์ และช่วยนำคาร์บอนไดออกไซด์มาจับกับโมเลกุลอินทรีย์ ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่ การสร้าง malonyl CoA โดย acetyl CoA carboxylase ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเริ่มแรกในการสร้างกรดไขมัน

ไบโอตินสามารถรวมกับ avidin ซึ่งเป็นโปรตีนในไข่ขาวดิบ การรวมกันเช่นนี้ทำให้ไบโอตินไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็ก ดังนั้น การรับประทานไข่ขาวดิบติดต่อกันนานจะเกิดการขาดไบโอตินได้ แต่ถ้าเอาไข่ไปต้มหรือลวกให้สุก avidin จะตกตะกอนไม่รวมกับไบโอติน ไบโอตินก็ถูกดูดซึมได้ ดังนั้น จึงควรต้มไข่ให้สุกก่อนบริโภค

ไบโอตินเสถียรต่อความร้อน แสง ไม่เสถียรในกรดและด่างแก่ แต่จะมีเสถียรภาพสูงสุดในช่วง pH 5-8 ซัลเฟอร์อะตอมของไบโอตินยังถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วย

ปกติมักไม่พบการขาดไบโอตินในคน เพราะแบคทีเรียในลำไส้คนสามารถสังเคราะห์ไบโอตินได้ และจากอาหารที่บริโภคตามปกติก็ได้ไบโอตินเพียงพอ การขาดไบโอตินจะทำให้เป็นโรคผิวหนังอย่างรุนแรง เลือดออกที่ผิวหนัง ระบบน้ำ ระบบประสาทผิดปกติ เกิดโรคโลหิตจาง และผมร่วง

อาหารที่มีไบโอตินมากที่สุด ได้แก่ ไข่ ไต นม ไข่แดง และยีสต์ นอกจากนี้ยังมีมากในผักและผลไม้สดหลายชนิด อาหารที่มีไบโอตินน้อยมากคือ เนื้อสัตว์ เมล็ดธัญพืช และผลิตภัณฑ์จากข้าวและแป้ง ปริมาณของไบโอตินในอาหารต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ปริมาณของไบโอตินในอาหารที่กินได้ 100 กรัม

อาหาร	ไมโครกรัม	อาหาร	ไมโครกรัม
ตับวัว	100	หมูเบคอน	7
ถั่วลิสงคั่ว	39	ข้าวโพด	6
ไข่ไก่	25	ปลาแซลมอน, นม	5
ดอกกะหล่ำ	17	เนื้อหมู	2 - 5
ไก่	5 - 10	เนื้อวัว กุ้ง	4
กากน้ำตาล, หอยนางรม	9	หัวแครอท, เนยแข็ง, มะเขือเทศ	2

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)

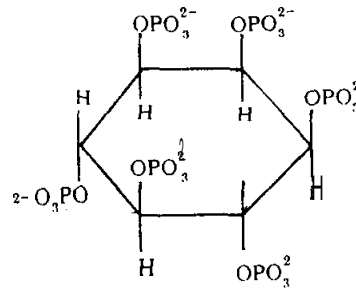
แคลเซียมเป็นแร่ธาตุที่มีมากที่สุดในร่างกาย ผู้ใหญ่มีแคลเซียมประมาณร้อยละ 1.5-2 ของน้ำหนักร่างกาย ส่วนใหญ่หรือร้อยละ 99 ของแคลเซียมทั้งหมดในร่างกายอยู่ในกระดูกและฟันในรูปของเกลือแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมที่เหลือมีในเนื้อเยื่อนิ่มและเลือด ในซีรัม (serum) ของเลือด 100 ซีซี. มีแคลเซียมประมาณ 10 มิลลิกรัม (9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

โปรตีน (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 ทำให้แคลเซียมไม่มีพอสที่จะถูกดูดซึม อาจแก้ได้โดยเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

สัตว์บางชนิด (ไม่รวมคน) มีเอ็นไซม์ซึ่งชื่อว่า phytases ช่วยทำให้แคลเซียมแตกตัวจาก calcium phytate จึงช่วยให้แคลเซียมสามารถดูดซึมได้

ในผักถ้ามีเชลลูโลสมากอาจขัดขวางการดูดซึมแคลเซียมได้เช่นกัน กรดออกซาลิก (oxalic acid) ที่มีมากในผักโขม ใบชะพลู จะรวมตัวกับแคลเซียมเป็นแคลเซียมออกซาเลทที่ไม่ละลายน้ำ 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, ฟอสโฟเอสเทอร์ของเนื้อ, และ ฟอสฟิติน (phosvitin) ของไข่

3.2.3 โซเดียม

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

โซเดียมมีอยู่ในอาหารทั่วไปที่ได้จากพืชและสัตว์ น้ำดื่มมีโซเดียมมากพอควร นมและเนื้อที่มีปริมาณโซเดียมสูงแต่ผักและผลไม้มีปริมาณโซเดียมต่ำกว่าเกลือของโซเดียม เช่น NaCl ใช้ในการปรุงรสอาหารและช่วยถนอมอาหาร

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

การกินอาหารที่มีโซเดียมมากเกินไปเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคตับและโรคไต คนที่เป็นโรคเหล่านี้ ควรรับประทานอาหารที่มีปริมาณโซเดียมต่ำ

3.2.4 โพแทสเซียม

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

ปกติมักไม่พบการขาดโพแทสเซียมในคนปกติ แต่การขาดโพแทสเซียมซึ่งเรียกว่า

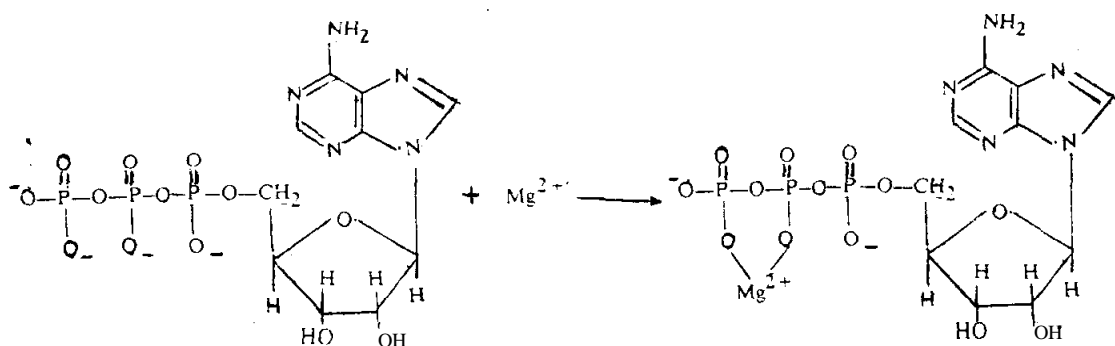
hypokalemia อาจพบในคนหลังจากผ่าตัดหรือมีบาดแผลสาหัส จะทำให้ K^+ ในพลาสมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเอพิเนฟริน (epinephrine) หรืออะดรีนาลิน (adrenalin) ที่ขับออกมาระหว่างที่เจ็บป่วย ผลก็คือเกิดการปล่อย K^+ จากตับเข้าไปในพลาสมา จะทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้ออ่อนเพลีย หัวใจอ่อนเพลียและลำไส้ทำงานช้าลง ในทารกที่รับประทานอาหารที่มีโปรตีนต่ำหรือโปรตีนที่คุณภาพต่ำจะเกิดการขาดกรดอะมิ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

อาหารที่ได้จากพืชมีปริมาณโพแทสเซียมมากกว่าโซเดียม การบริโภคพืชที่มีปริมาณโพแทสเซียมสูงมาก ๆ จะมีการขับ Na^+ ออกจากร่างกายมาก ดังนั้น ในสัตว์ที่บริโภคพืชเป็นอาหารหลัก เช่น วัวควายและแกะ จะต้องเพิ่ม $NaCl$ ในอาหารถ้าบริโภคอาหารที่มีปริมาณโพแทสเซียมสูง

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 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญในเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ในปฏิกิริยานี้ Mg^{2+} จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อน $Mg-ATP$ และทำหน้าที่สำคัญในปฏิกิริยานี้



Adenosine triphosphate (ATP)

สารเชิงซ้อน Mg-ATP

ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่แมกนีเซียมมีส่วนร่วมอยู่ด้วย 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 จะอ่อนไหวยิ่งขึ้น ถ้า K^+ และ NH_4^+ มาจับกับเอ็นไซม์ที่ตำแหน่งที่มี active site ด้วย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงคอนฟอร์เมชัน (conformation) ของเอ็นไซม์ไปเป็นโครงสร้างที่อ่อนไหวยิ่งขึ้นในการเร่งปฏิกิริยา 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 และกรดแอสทอริกมากจะช่วยให้เหล็กดูดซึมได้ดี เหล็กจากไข่จะถูกดูดซึมได้น้อย อาจ

เป็นเพราะเหล็กเกิดสารเชิงซ้อนกับฟอสเฟตของฟอสโฟโปรตีนของไข่แดง แม้ว่าเหล็กจะถูกดูดซึมได้ไม่ดีนัก แต่เหล็กที่ถูกปลดปล่อยจากเม็ดเลือดแดงที่หมดอายุภายในม้ามจะถูกนำกลับมาสร้างฮีโมโกลบินในไขกระดูกได้อีก

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

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

อาหารที่มีเหล็กมากได้แก่ เครื่องในสัตว์ เช่น ตับ ไตและหัวใจ ไข่แดง โกโก้ น้ำอ้อยและผักซีฝรั่ง 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 เดินโซเซ ล้มง่ายและอาจตายในที่สุด

อาหารที่มีเหล็กเพียงพอจะมีทองแดงเพียงพอด้วย นมมารดาในอาทิตย์แรกของการให้นม จะมีปริมาณทองแดงประมาณ 0.62 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ต่อมาจะลดเหลือประมาณ 0.16 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นมโคมีปริมาณทองแดงเพียง 0.6 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

3.2.8 แมงกานีส

แมงกานีสจำเป็นต่อการเจริญเติบโตเป็นปกติและการสืบพันธุ์ของพืชและสัตว์ การขาดแมงกานีสจะทำให้ไม่เจริญเติบโต โครงกระดูกผิดปกติ อวัยวะสืบพันธุ์ผิดปกติ การขาดแมงกานีสไม่เคยพบในคน

เอ็นไซม์ที่ต้องการ Mg^{2+} มักจะทำงานได้ดีถ้ามี Mn^{2+} อยู่ด้วย เช่น pyruvate kinase, Pyruvate carboxylase เป็นเอ็นไซม์ที่มี Mn^{2+} เป็นส่วนของโครงสร้างแมงกานีสมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์มิวโคโพลิแซคคาไรด์ (mucopolysaccharides) ของกระดูกอ่อน และเอ็นไซม์อาร์จินเนส (arginase) ในตับก็ประกอบด้วยแมงกานีส

แมงกานีสมีมากในไมโตคอนเดรีย ดังนั้น เนื้อเยื่อที่มีไมโตคอนเดรียอยู่มากจะประกอบด้วยแมงกานีสมาก หัวใจ ไต ตับ และตับอ่อนมีปริมาณแมงกานีสสูง

นมโคมีแมงกานีส 10 - 40 ไมโครกรัมต่อลิตร นม น้ำเหลืองมีแมงกานีสประมาณ สิบเท่าของนมธรรมดา ไข่มีแมงกานีสประมาณ 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 สังกะสีเป็นองค์ประกอบสำคัญของเอ็นไซม์ เช่น carbonic anhydrase, carboxypeptidase, alcohol dehydrogenase, alkaline phosphatase, malic dehydrogenase, lactic dehydrogenase และ glutamic

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

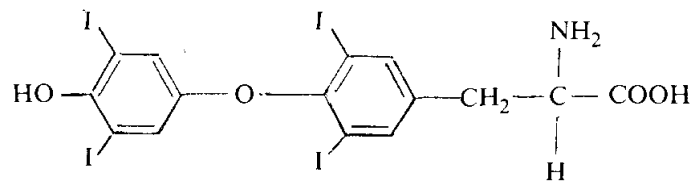
สังกะสีมีความสำคัญทางสรีรวิทยาของคนและสัตว์คือ ช่วยในการรักษาบาดแผล ให้อายุ คนหรือสัตว์ที่เป็นแผลถ้ากินสังกะสีซัลเฟตแผลจะหายเร็วขึ้น

การขาดสังกะสีในคนเคยพบในตะวันออกกลาง มีอาการที่เป็นช้ำคือการเหี่ยวลีบ ของอวัยวะเพศ 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 ในต่อมไทรอยด์เป็นอนุพันธ์ของไทรโรนีน (Thyronine) และไทโรซีน (tyrosine) เช่น 3-ไอโอดิไทโรซีน; 3, 5-ไดไอโอดิไทโรซีน และ 3, 5, 3'-ไตรไอโอดิไทโรซีน

ไทรอกซีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของร่างกายและสมอง และเมตาโบลิซึมของสารอาหาร แร่ธาตุและน้ำ การขาดไอโอดีนทำให้เป็นโรคคอหอยพอก (goiter) สมัยก่อนโรคนี้อาจเกิดทั่วไปกับคนที่อยู่แถบภูเขาและที่ราบสูงห่างไกลจากทะเล 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 วิธีที่อาจใช้ได้คือเปลวอิมมิสชัน (flame emission) และอะตอมมิคแอบซอร์ปชัน (atomic absorption)

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

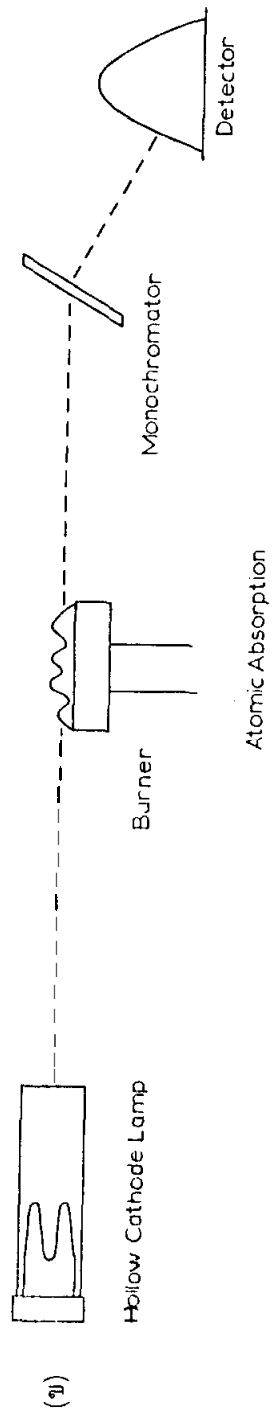
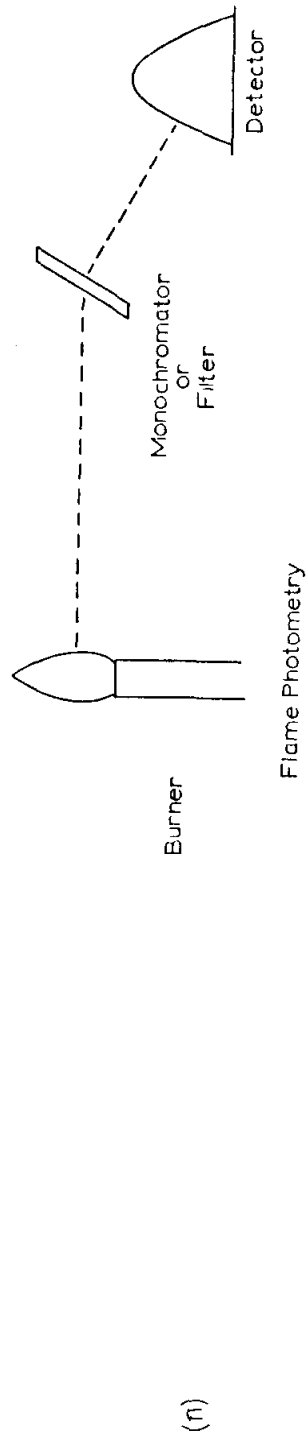
เปลวไฟร้อน แร่ธาตุหรือโลหะจะถูกเร้า (excited) และอิเล็กตรอนที่วงนอกสุดของโลหะจะกระโดดไปสู่สภาวะเร้าเกิดเป็นโลหะที่เป็นกลาง และเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) จะเปล่งรังสีที่มีความยาวคลื่นจำเพาะสามารถวิเคราะห์ได้ โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) จะทำการเลือกความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นเพื่อผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจจับ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

ส่วนอะตอมมีคอบซอปชัน [รูปที่ 3.12(ข)] มีหลักการต่างกัน ในกรณีนี้ธาตุหรือโลหะจะไม่ถูกเร้า แต่จะแตกตัวจากพันธะของมันและอยู่ในสภาวะที่ไม่ถูกเร้าและไม่แตกเป็นไอออน ในสภาวะนี้ธาตุจะสามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นความยาวคลื่นเดียวกับรังสีที่เปล่งออกมาเมื่อถูกเร้าโดยเปลวไฟในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟลมอิมิตชัน

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

เฟลมอิมิตชันเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดีกับการวิเคราะห์โลหะไอออนหลายตัว เช่น Na^+ , K^+ ฯลฯ แต่เนื่องจากการรบกวนจากไอออนไนเซชัน (ionization) ของธาตุอื่น ๆ ในสารละลายทำให้ความเข้มข้นที่หาได้มีค่าผิดพลาด (สูงหรือต่ำเกินไป) แต่การรบกวนจากไอออนไนเซชันของธาตุอื่น ๆ มักมีน้อยกว่ามากเมื่อใช้วิธีวิเคราะห์อะตอมมีคอบซอปชัน วิธีอื่น ๆ เช่น เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ 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 ไดไทโอคาร์บอเนต (ammonium pyrrolidine dithiocarbamate) ตามด้วยการสกัดด้วยเมทิลไอโซบิวทิล คีโตน (methyl isobutyl ketone) การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายจึงใช้วิธีอะตอมมีคอบซอปชันหรือเทคนิคอื่น ๆ



รูปที่ 3.12 แผนภาพเปรียบเทียบ (ก) Flame photometry และ (ข) Atomic absorption

3.4 สาเหตุของการสูญเสียแร่ธาตุในอาหาร

ปริมาณของแร่ธาตุในอาหารที่ได้จากพืชและสัตว์เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับส่วนประกอบของดินและธรรมชาติของอาหารสัตว์ การสูญเสียแร่ธาตุที่เกิดจากการทำลายโดยปฏิกิริยาเคมีมีไม่มากเท่ากับการสูญเสียที่เกิดจากขบวนการเตรียมอาหารและการรวมกับสารอื่นเกิดเป็นสารที่ไม่สามารถถูกดูดซึมหรือนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกาย

การสูญเสียแร่ธาตุเกิดจากการปอกหรือหั่นส่วนที่ไม่ต้องการของพืชออกไป เช่น ผักเมื่อถูกนำไปใช้ทำอาหารมักจะมีการตัดส่วนของลำต้นหรือใบออกไป การกระทำเช่นนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุบางส่วนไป การสีพวงธัญพืชทำให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุทุกชนิดเป็นส่วนใหญ่ 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 ไม่สามารถถูกดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกาย ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดซึมของเหล็กในร่างกายคนส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาไอโซโทปกัมมันตรังสีของเหล็ก คือ Fe^{59} ในอาหารโดยการปลูกผักในสารละลายที่มี Fe^{2+} น้อยหรือฉีด Fe^{2+} นี้เข้าไปในไก่หรือกระต่าย ทำให้ไข่ ตับ และเนื้อของสัตว์ประกอบด้วย Fe^{2+} นม ขนมอบังและอาหารอื่น ๆ ก็มีการทดลองเติม Fe^{59} ในทำนองเดียวกัน

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