บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดเม็ดปูนซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนต่างๆ (หินปูนหรือดินปูนขาว กับดินเหนียวหรือดินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดีซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอันได้แก่ แคลเซียม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ โดยการทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อและแข็งตัวตลอดจนความร้อนที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสม และการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตา (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน พื้น และถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับใช้งานพื้น หลังคา สะพาน อุโมงค์ และอื่นๆ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ $CaCO_3$ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ค (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)

2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณของธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินกว่าที่จำเป็น จึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น การเพิ่มปริมาณแร่เหล็ก (Iron ore) ซึ่งมีอยู่มากใน

ศิลาแลง (Laterite) เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่จะใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ หรือเลือกใช้วัตถุดิบที่มีธาตุเหล็กน้อยลงเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ขาว นอกจากนี้ยังมีการเติมยิบซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา เป็นต้น (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.3 **กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์** (Manufacture of Portland cement)

กรรมวิธีในการผลิตนั้นอาจเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry process) หรือการผลิตแบบเปียก (Wet process) กล่าวคือวัตถุดิบก่อนการเผาอาจจะให้ผ่านกระบวนการแห้งหรือกระบวนการเปียก ใน *กระบวนการแห้ง* วัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็กได้รับการทำให้แห้งก่อนการบดและ การผสม ปัจจุบันวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งเป็นระบบที่ทันสมัยที่สุดใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยผลิตน้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์แบบอื่น และไม่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเลยยกเว้นน้ำหล่อเย็นเครื่องจักร ส่วนใน *กระบวนการเปียก* วัตถุดิบซึ่งได้แก่ดินสองพอง ดินเหนียวได้รับการบดและการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์ และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้โดยมีราคาการผลิตต่ำ ซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการผลิตแบบแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ดีถ้าส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียกการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยและเหมาะสมกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก ซึ่งปัจจุบันในประเทศไม่มีการใช้วิธีผลิตแบบเปียกในการผลิตแล้วเนื่องจากค่อนข้างล้าสมัย

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว จะทำการป้อนส่วนผสมนี้เข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) ซึ่งเตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุดทำงานตลอด 24 ชม.โดยไม่มีการหยุดพัก เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบชนิดหมุน (Rotary kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 – 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 – 4 เมตร โดยภายในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บกักความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้าๆ ประมาณนาทีละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และ จับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณออกไซด์หลักของธาตุต่างๆที่มีอยู่ในปูนเม็ด ซึ่งจะเห็นว่ามีปริมาณรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณทั้งหมด (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540)

ออกไซด์		ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60 - 67
	SiO_2	17 - 25
	Al_2O_3	3 - 8
	Fe_2O_3	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.1 - 5.5
	$Na_2O + K_2O$	0.5 - 1.3
	TiO_2	0.1 - 0.4
	P_2O_5	0.1 - 0.2
	SO_3	1 - 3

สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะบ่งถึงการเผาว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ดีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุดๆก้อนใหญ่ ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มม. (1 นิ้ว) โดยปูนเม็ดที่เผาไม่ได้ที่จะมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ การเผาที่เกินพอไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแต่อย่างใดเพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ดทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอมีความแข็งมาก

ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมากจึงต้องได้รับการลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิกระทำโดยพ่นลมหรือน้ำเข้าไปในยุ้งลดความเย็น (Clinker cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary cooler) หรือแบบตะแกรง การทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต้องมีการควบคุมอย่างดี เพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าทำให้ปูนเม็ดเย็นตัวเร็วจะทำให้บดง่ายและความแข็งแรงภายใน 7 วันดีขึ้น แต่ถ้าทำให้ปูนเม็ดเย็นตัวช้าๆความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น โดยปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding mill) หากปูนเม็ดมีปริมาณของยิบซัมผสมอยู่น้อยต้องใส่ยิบซัมเพิ่มเข้าไปด้วย โดยให้มีปริมาณของยิบซัมผสมรวมอยู่ประมาณร้อยละ 5 ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้เกือบหมด การผสมยิบซัมลงไปด้วยก็เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวช้าลงเมื่อผสมน้ำ เพราะถ้าไม่มียิบซัมเมื่อปูนซีเมนต์ได้ผสมกับน้ำจะก่อตัวเร็วเกินไปจนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงแบบได้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่าจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อตัวเป็นก้อนและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่าส่วนปูนซีเมนต์ที่หยาบกว่าอาจทำให้เกิดการเยิ้ม หรือการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด

ปั้มจะปั้มผงปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้โดยใช้ลมไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่แนวตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้น เพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป ในประเทศไทยจะบรรจุในถุงกระดาษมีเนื้อปูนจริง 50 กก. (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.3.1 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่ อำเภอ แก่งคอย จังหวัดสระบุรี เตาเผามี 6 เตาในโรงงานมีกำลังการผลิตปูนเม็ดรวม 38,500 ตัน ต่อวันกระบวนการผลิตนั้นเริ่มต้นจากการระเบิดหินปูน (Limestone) และหินเชล (Shale) จาก เหมืองหินในเขตพื้นที่สัมปทาน ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้จะถูกนำมาเข้าเครื่องย่อยขนาดให้เป็นชิ้น เล็กๆ ขนาดต่ำกว่า 80 มิลลิเมตร ในการผลิตปูนเม็ด 1 ตัน ต้องใช้หินปูนประมาณ 1.6 ตัน ซึ่งคิด เป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของวัตถุดิบ หลังจากผ่านขั้นตอนของการย่อยขนาด หินที่ได้จะถูก นำมาผสมรวมกับวัตถุดิบพื้นฐานอื่นๆ เช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) โดยจะถูกนำมาบดผสมรวมกันจน ละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จากนั้นทั้งหมดก็จะถูกผสมให้เข้าเป็น เนื้อเดียวกันในไซโลผสมฝุ่นวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) ก่อนส่งเข้าไปยังหออบความร้อน (Preheater Tower) และไหลเข้าสู่เตาเผา หลังจากผ่านขั้นตอนของเตาเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ เรียกว่าปูนเม็ด ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังห้องลดความร้อนและลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล สำหรับใน กระบวนการขั้นสุดท้ายนั้น ปูนเม็ดจะถูกนำไปบดรวมกับยิปซัมและหินปูนในหม้อบดปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ผงตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บยังไซโลเพื่อรอการบรรจุและส่งไป จำหน่ายต่อไป (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

2.1.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของ ผลึกที่ละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเผา แล้ว อาทิเช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium sillcate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และเทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังตารางที่ 2.2 ที่ได้ ให้ชื่อย่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ชื่อย่อของออกไซด์ ของธาตุใดด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียวกล่าวคือ CaO ย่อเหลือ C; SiO_2 ย่อเหลือตัว S; Al_2O_3 ย่อเหลือตัว A และFe_2O_3 ย่อเหลือตัว F นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกที่ได้หลังจากการ เผา เช่น MgO, TiO_2, Mn_2O_3, K_2O และNa_2O ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO.SiO_2$	C_3S	33 - 55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Sillcate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S	15 - 35
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	7 - 15
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	5 - 10

2.1.4.1 **อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์**

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำให้เป็นมอร์ตาหรือคอนกรีต ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของสารประกอบที่สำคัญ

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วในระยะแรก (ประมาณ 14 วันหลังการผสม) มีอัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลาง ก่อตัวภายในไม่กี่ชั่วโมง ให้ความร้อนปานกลาง (ประมาณ 120 คาลอรีต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง (ตั้งแต่ 14 – 28 วัน และเรื่อยไปเมื่อได้รับการบ่มชื้น) ทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้าและให้ความร้อนที่น้อย (ประมาณ 60 คาลอรีต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและมีการหดตัวน้อย (Drying shrinkage) (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้รวดเร็วมากในช่วงระยะเวลาแรก (ประมาณ 1 วันหลังการผสม) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อตัวและแข็งตัวเร็ว ให้ความร้อนมาก (ประมาณ 210 คาลอรีต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ไม่ช่วยให้มีกำลังรับแรงอัดในระยะหลังทำให้เกิดความไม่คงตัว (Unsoundness) และไม่ทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

เทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรก และหลังเนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ ให้ความร้อนน้อย (ประมาณ 100 คาลอรีต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบนี้ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา-ดำ

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

คุณสมบัติด้านต่าง ๆ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังรับแรงอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังรับแรงอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากไฮเดรชัน (จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (500)	น้อย (250)	สูงมาก (850)	ปานกลาง(420)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หากมีอยู่ในปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักทำให้เกิดความไม่คงตัว โดยมีการขยายตัวในมอร์ตาและคอนกรีต เกิดการแตกร้าวเสียหาย

ปูนขาวอิสระหรือ Free Lime (CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว หากมีอยู่เกินกว่าร้อยละ 3 จะทำให้เกิดความไม่คงตัว และก่อตัวช้า

ยิบซัม ($CaSO_4.2H_2O$) ทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวและแข็งตัวช้าลง หากมีอยู่มากจะทำให้เกิดความไม่คงตัวและทำให้กำลังรับแรงน้อยลง

โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O) **และโซเดียมออกไซด์** (Na_2O) ซึ่งเป็นด่าง (Alkalies) ทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะแรกแต่ทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังลดลง ถ้าผสมใช้กับวัสดุผสมที่ทำปฏิกิริยากับด่างอาจทำให้เกิดการขยายตัวในมอร์ตาหรือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้นอกจากนี้ยังทำให้ปูนซีเมนต์ที่บรรจุอยู่ในถุง จับตัวเป็นก้อนเร็ว

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันเป็นปริมาณถึงร้อยละ 70-80 ของปริมาณทั้งหมด สารประกอบทั้งสองจะเป็นตัวควบคุมทำให้มอร์ตาหรือคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลัง หากต้องการให้เกิดกำลังรับแรงอัดเร็วในระยะแรกจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่สารปะกอบ C_3S ผสมอยู่มาก ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะมากด้วย ทำนองเดียวกันเมื่อต้องการให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในเวลาต่อมา ก็ต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบ C_2S ผสมอยู่มากเช่นกัน ส่วนผสมกรณีที่

ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีอยู่ในดินหรือน้ำ ก็จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ผสมอยู่น้อย (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.5 **ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ** (Hydration of cement) (หวังแก้ว บุญสวน, 2542; วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.5.1 **ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์**

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลัก คือ C_3S C_2S C_3A และC_4AF ซึ่งรวมกันแล้วมีปริมาณมากถึง ร้อยละ 90 ของปริมาตรรวม จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นพร้อมๆกันหลายปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการที่จะเข้าใจปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สามารถทำได้ โดยเริ่มด้วยการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัว

1. **แคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)**

สารประกอบ C_3S และ C_2S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO._2SiO_2.3H_2O$: $C_3S_2H_3$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ หรือ $CaO.H_2O$: CH) ซึ่ง C_3S จะให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า ดังสมการทางเคมีต่อไปนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3(CaO.H_2O) \quad (2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + CaO.H_2O \quad (2.2)$$

เมื่อผสม C_3S กับน้ำ ไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารละลายจะมีความเป็นด่างสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าพีเอชสูงกว่า 12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส (Hydrolysis) ซึ่งจะมีมากในระยะแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็ว การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อถึงจุดหนึ่งความเข้มข้นของไอออนในสารละลายจะสูงพอทำให้เกิดการตกผลึกของ CH และในเวลาเดียวกัน C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของ C_3S ทำให้เกิด CSH ล้อมรอบเม็ดปูนหนาแน่นขึ้น และ ปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากขึ้นแต่ยังคงเกิดขึ้นต่อไป ดังสามารถเขียนเป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้ (Camp, n.d.)

ขั้นที่ 1 เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid heat generation) ประมาณ 15 นาที เมื่อผสมกับน้ำ โดยที่ผิวของ C_3S จะปล่อยแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ พีเอชจะเพิ่มขึ้นจนเป็น

สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ถึงจุดวิกฤตจึงเกิดการสร้างรูปของผลึก CH และ C-S-H เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นแรกนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ขั้นที่ 2 ระยะดอร์แมนต์ (Dormant period) เกิดภาวะเป็นพลาสติกของซีเมนต์ (2 - 4 ชั่วโมง) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ามาก CH สร้างผลึกจากสารละลาย C-S-H เกิดขึ้นบนผิวของ C_3S และสร้างชั้นเคลือบผิว เนื่องจากชั้นที่หนาขึ้นดังนั้นเวลาที่ใช้ในการทะลุผ่านชั้นของน้ำจึงมากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงต่ำ C_2S เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นสารประกอบทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่า

ขั้นที่ 3 ขั้นตอนการเร่ง (Acceleration period) ความเข้มข้นวิกฤตของไอออน และซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ขั้นนี้ ซึ่งเป็นระยะที่ผ่านการก่อตัวระยะปลายมาแล้ว และกำลังเกิดการแข็งตัวในระยะต้น (4 – 8 ชั่วโมง)

ขั้นที่ 4 ขั้นการถดถอย (Deceleration) อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับการแพร่อย่างสมบูรณ์

ขั้นที่ 5 ขั้นคงที่ (Steady state) อัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่ (12 – 24 ชั่วโมง) ที่จุดนี้อุณหภูมิส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการเกิดไฮเดรชัน

ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S นั้นทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะ C_2S ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ C_3S ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S จึงน้อยกว่า C_3S

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท $C_3S_2H_3$ ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้อาจทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอลูมินาผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และ ยิปซัม

เนื่องจาก C_3A ทำปฏิกิริยารวดเร็วกับน้ำอย่างมากจะทำให้เกิดการก่อตัวโดยเฉียบพลัน (Flash set) ดังนั้นจึงผสมยิปซัม ($CaSO_4 - 2H_2O$ หรือ CSH_2) ลงในปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A ซึ่ง C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำและไอออนของซัลเฟตจากยิปซัม ดังสมการ

$$C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32} \qquad (2.3)$$

ซึ่งผลที่ได้ คือแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium sulpho aluminate hydrate: $C_6AS_3H_{32}$) หรือทั่วไปเรียกว่า เอททรินไกท์ (Ettringite) ซึ่งมีลักษณะยาวคล้ายเข็มและจะเกิดขึ้นรอบๆ C_3A เอททรินไกท์เพิ่มมากขึ้นรอบๆ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นและจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อไอออนของซัลเฟตที่ได้จากยิปซัมหมดไปก่อนที่ C_3A จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่ 2 สามารถเกิดขึ้นได้ โดยผลที่ได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรตที่มีซัลเฟตลดลงมีชื่อเรียกว่า โมโนซัลโฟอลูมิเนต (Monosulfoaluminate: C_4ASH_{12}) ดังสมการ

$$2C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12} \quad (2.4)$$

ซึ่งปฏิกิริยานี้อาจเกิดขึ้นก่อนการสร้างรูปของเอททรินไกท์ก็ได้ หากปฏิกิริยาของ C_3A และ ซัลเฟตนั้นเร็วกว่าที่ยิปซัมให้ได้ ถ้าโมโนซัลโฟอลูมิเนตได้รับไอออนของซัลเฟตอีกครั้งหนึ่งจะสร้าง เอททรินไกท์เพิ่มขึ้นและอาจทำให้เกิดรอยแตกซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการเกิดการทำลายด้วยซัลเฟต เนื่องจากเอททรินไกท์ มีปริมาตรมากกว่า โมโนซัลโฟอลูมิเนต

เมื่อไม่มีซัลเฟตที่ได้จากยิปซัม C_3A เกิดปฏิกิริยากับน้ำและสร้างรูปของแคลเซียมไฮเดรต 2 ชนิด ที่ไม่คงสภาพซึ่งต่อมาเปลี่ยนเป็นไฮโดรกราเนท ซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกันกับที่พบใน HAC โดยC_3A บริสุทธิ์อาจไม่ให้ค่าความแข็งแรงเมื่อก่อตัว

3. เททระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของเททระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) มีความคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) โดยยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A โดยปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (Calcium Sulphoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์ (Calcium Sulphoferrite)

นอกจากนี้ปฏิกิริยาจะทำให้เกิดสารประกอบ $(A\ F)H_3$ อันเนื่องมาจากปริมาณของปูนขาวไม่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยา ดังสมการ

$$C_4AF + 3CSH_2 + 29H \rightarrow C_6(AF)S_3H_{32} + (AF)H_3 \quad (2.5)$$

แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททรินไกท์ และทำนองเดียวกันแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์จะสามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ที่มีซัลเฟตต่ำ ดังสมการ

$$C_4AF + C_6(AF)S_3H_{32} + 7H \rightarrow 3C_4(AF)SH_{12}(AF)H_3 \quad (2.6)$$

ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_4AF มากและ C_3A ต่ำจะทนทานต่อการทำลายของซัลเฟต แสดงว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับจากโมโนซัลโฟอลูมิเนตที่เกิดจาก C_4AF เป็นเอททริงไกท์

2.1.5.2 **ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์**

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ สารประกอบต่างๆของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำและมีอิทธิพลต่อกัน เช่น C_3A และ C_4AF จะแย่งไอออนของซัลเฟต C_3A ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าจะแย่งไอออนของซัลเฟตได้มากกว่าเป็นผลให้ C_4AF ไม่ถูกหน่วงในการทำปฏิกิริยามากเท่ากับในกรณีของ C_3A นอกจากนี้ในปูนซีเมนต์นั้นยังมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ และถ้ามีในปริมาณมากพออาจมีผลต่อปฏิกิริยา เช่น P_2O_5 สามารถทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO

ปริมาณของยิปซัมในปูนซีเมนต์จะต้องมีพอเหมาะ ซึ่งถ้ามียิปซัมมากเกินไปจะทำให้เกิดเอททริงไกท์มากหลังจากซีเมนต์เพสต์ได้ก่อตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายตัวและเกิดการวิบัติของซีเมนต์เพสต์ได้ แต่หากถ้ามียิปซัมน้อยเกินไป C_3A จะทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นสารละลายแข็ง $C_3A(CS,CH)H_{12}$ ก่อนที่ C_3S จะก่อตัว ปฏิกิริยาของ C_3A ดังกล่าวต้องการไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ความเข้มข้นของไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ลดลง และการเริ่มตกผลึกเป็น CH และการก่อตัวของ C_2S ต้องล่าช้าออกไป

ความร้อนที่ได้จากการที่ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า heat of hydration วัดเป็นคาลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาให้ความร้อนประมาณ 85 ถึง 100 คาลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมาแต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงคอนกรีตอาจเสียความแข็งแรงได้ และความร้อนนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงต่างๆ ภายในเนื้อของคอนกรีตซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตที่บาง ความร้อนสามารถถ่ายเทออกได้แต่โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่และหนา เช่น เขื่อน จะต้องมีวิธีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต วิธีหนึ่งซึ่งอาจทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทสี่ ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ (ประมาณ 60 – 70 คาลอรีต่อกรัม)

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเพสต์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ

ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับการให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดาเป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลองจะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ดีตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วันหลังจากนั้นปูนซีเมนต์ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมมาจากใต้ดินหรือจากความชื้นในขณะฝนตกหรือในขณะที่ความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

2.2 กากอุตสาหกรรม

2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของเหลือทิ้งจากการผลิตหรือสิ่งของที่เสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้แล้ว หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งกากของเสียดังกล่าวยังมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปกากของเสียอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. กากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) คือ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ.2548) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารพิษ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ และสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2. กากของเสียที่ไม่อันตราย (Non-Hazardous Waste) คือ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549

2.2.2 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำของเสียจากแหล่งต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน หรือแม้แต่เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการลดต้นทุนในด้านการผลิต อีกทั้งยังสามารถกำจัดของเสียได้จากการนำมาเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงมาก อย่างไรก็ตามอย่างที่ทราบกันดีว่ากากอุตสาหกรรมส่วนมากมักมีโลหะหนักปะปนอยู่ดังนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ส่งผลเสียกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน จึงต้องมีการศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในขั้นกระบวนการผลิตและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จากการนำกากอุตสาหกรรมเหล่านี้มาใช้ ประเด็นสำคัญอันหนึ่งที่ควรคำนึงถึงคือการศึกษาเกี่ยวกับการชะละลายของโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำปูนซีเมนต์นั้นมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุน้ำอุปโภค/บริโภค ผลจากการศึกษาดังกล่าวคาดว่าจะนำมาซึ่งความเข้าใจเพื่อสร้างความเชื่อมั่นต่อผู้บริโภคและตอบคำถามที่ว่า การใช้ภาชนะบรรจุน้ำที่ทำจากซีเมนต์นั้นส่งผลต่อสุขภาพ หรือไม่อย่างไร ตารางที่ 2.4 – 2.7 แสดงตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบ และเชื้อเพลิงร่วม ในการผลิตปูนซีเมนต์

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และโลหะหนักนั้น มีอิทธิพลต่อทั้งความแข็งแรงของคอนกรีต/ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) และความสามารถในการชะละลายของโลหะตลอดอายุการใช้งานหรือแม้แต่หลังหมดอายุการใช้งานไปแล้ว เช่น การนำไปฝังกลบหรือการกำจัด ดังนั้นในการนำเทคโนโลยีเผาร่วม (Co-incineration) มาใช้นั้นจำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจอย่างละเอียดถี่ถ้วนเกี่ยวกับเสถียรภาพของโลหะหนักที่อยู่ในปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Environmental Toxicology International,1992; Trezza และ Scian, 2000; Achternbosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และTenorio, 2003; Shih ,Chang และ Chiang, 2003)

ชนิด	วัตถุที่ใช้
วัตถุดิบทดแทน	แร่เหล็ก ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ เถ้าหนัก เถ้าลอยจากถ่านหิน วัสดุจากการผลิตเหล็ก เถ้าจากการเผาน้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว กัลวานิคสลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า
เชื้อเพลิงทดแทน	เศษไม้ ตัวทำละลาย ของเสียพวกน้ำมัน ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงจากการผลิตขยะอุตสาหกรรมเฉพาะ เชื้อเพลิงทดแทนจากขยะชุมชน ขยะกระดาษ ขยะพลาสติก ส่วนผสมในกระดาษและพลาสติก วัสดุรถยนต์ วัสดุสิ่งทอ สารอินทรีย์ที่ใช้แล้ว เนื้อสัตว์และอาหารสัตว์

ตารางที่ 2.5 เชื้อเพลิงส่วนต่างๆที่ป้อนเข้าสู่ระบบสำหรับการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนี ปีพ.ศ.2542 (Achternbosch และคณะ, 2003)

ชนิดของเชื้อเพลิง	เชื้อเพลิงที่ป้อนสู่ระบบ	ปริมาณที่ป้อนเพื่อผลิตปูนเม็ด (ตัน/ปี)
เชื้อเพลิงปกติ	ถ่านหินแข็ง (Hard coal)	980,000
	ถ่านหินสีน้ำตาล (Brown coal)	2,140,000
	ถ่านโค้กน้ำมัน (Oil coke)	312,903
เชื้อเพลิงทดแทน	ยางที่ใช้แล้ว (Used types)	236,000
	น้ำมันที่ทิ้งแล้ว (Waste oil)	181,000
	เศษไม้ (Scrap wood)	77,000
	ชิ้นส่วนของเสียจากการค้าชุมชน และอุตสาหกรรม	290,000

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ในประเทศเยอรมนี ปีพ.ศ.2542 (Achternbosch และคณะ, 2003)

วัตถุดิบที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์(ตัน/ปี)
วัตถุดิบโดยตรง	หินปูน	35,695,913
	ดินเหนียวปนปูน	10,000,000
	ดินเหนียวรวมกันเบนโทไนต์/คาร์โอลิไนต์	1,985,000
	ทราย	1,240,000
วัตถุดิบทดแทน	วัสดุจากการผลิตเหล็ก	170,000
	แร่เหล็ก	117,000
	เถ้าจากกระบวนการเผา	240,000
	เถ้าลอยจากถ่านหิน	212,039
	ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ	140,000

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของของเสียอันตรายที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน (Achternbosch และคณะ, 2003)

ของเสีย	ส่วนประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละสูงสุดที่สามารถเติมได้	อ้างอิง
เถ้าจากการเผาน้ำมันรถที่ใช้แล้ว	CaO = 21.34, SiO_2 = 3.80, Al_2O_3 = 1.64 และ Fe_2O_3 = 2.32	-	Trezza และScian, 2000
กัลวานิคสลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า	Ca = 43.19, Si = 9.02, Al = 2.33 และ Fe = 1.88	2	Ract, Espinosa, และ Tenorio, 2003
เถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน	CaO = 27.02, SiO_2 = 29.4, Al_2O_3 = 18.0 และ Fe_2O_3 = 2.32	< 5	Shih และคณะ, 2003

สภาวะทางเคมี-ฟิสิกส์ของการชะละลายในแต่ละช่วงวัฏจักรของซีเมนต์นั้นแตกต่างกันและมีอิทธิพลอย่างมากต่อเสถียรภาพของโลหะหนักที่แฝงตัวอยู่ในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักในระบบสู่สิ่งแวดล้อม การทบทวนเอกสารที่จะแสดงต่อจากนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะสรุปความรู้และความเข้าใจที่มีอยู่ในปัจจุบัน เกี่ยวกับการเคลื่อนตัว/การชะละลายของอนุภาค/โลหะออกจากคอนกรีตหรือจากซีเมนต์เพสต์ในแต่ละช่วงวัฏจักร ตั้งแต่การผสมน้ำเพื่อหล่อแข็งตลอดจนถึงการใช้งาน อย่างไรก็ดีเนื่องจากการศึกษาการชะละลายของโลหะจากโครงสร้างที่ทำจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผลิตจากการใช้วัสดุเผาร่วมนั้นยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการอธิบายทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจึงเกิดจากการประยุกต์ใช้ผลและข้อสรุปจากการทดลองการชะละลายของกากอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรโดยการหล่อแข็ง (Solidification/Stabilization)

2.3 การรั่ว/ชะละลายของโลหะหนักเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรกในระบบซีเมนต์ (Release of trace elements into the mixing water)

ในกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งและปรับเสถียร (The solidification and stabilization process) ของของเสียที่มีโลหะหนักอยู่นั้น ซีเมนต์และของเสียจะผสมกันกับน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water to cement ratio) และของเสียต่อวัสดุประสาน (Waste to binder ratio) ตามที่ออกแบบไว้ โดยสมมุติว่าการชะละลายของโลหะหนักนั้นจะเกิดขึ้นมากทำให้มีความเข้มสูงขึ้นในระบบซีเมนต์-น้ำในช่วงนาทีแรกๆ ในทำนองเดียวกันในช่วงชั่วโมงแรกๆปฏิกิริยาไฮเดรชันจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนขั้นต้นของโลหะไฮดรอกไซด์และตามมาด้วยระยะที่เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน เช่น AF_m (โมโนซัลเฟต: Monosulphate) AF_t (เอททริงไกท์: Ettringite หรือ อลูมิโนเฟอร์ไรท์ ไตรซัลเฟต: $C_6AS_3H_{32}$) และ CSH (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท) เนื่องจากพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจากการเกิดปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์เม็ด ดังนั้นโลหะหนักทั้งหลายจะตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ในทันที ในขณะที่ผิวหน้าของซีเมนต์จะดูดติดโลหะหนักที่ไม่เกิดการตกตะกอน (Yousuf และคณะ, 1995 อ้างถึงใน Achternbosch และคณะ, 2003) อาทิ การรวมตัวของ แคดเมียม (Cadmium : Cd) โครเมียม (Chromium : Cr) แทลเลียม (Thallium : Tl) และ สังกะสี (Zinc : Zn) ในของผสมซึ่ง Seidel (1959 อ้างถึงใน Achternbosch และคณะ, 2003) รายงานไว้ว่ามี Cr^{6+} ละลายอยู่เกือบร้อยละ 100 เนื่องจากไม่สามารถตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ได้ตรงกันข้ามในสารละลายมี แทลเลียม และแคดเมียมหรือสังกะสีละลายเหลืออยู่เพียงร้อยละ0.1 และ 0.001 ตามลำดับ โดยกระบวนการต่างๆเกือบเสร็จสมบูรณ์หลังจากผ่านไป 4 สัปดาห์ และอนุภาคปริมาณน้อยๆทั้งหมดจะไม่เคลื่อนที่ เนื่องจากอยู่ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง โดย CSH จะจับอนุภาคปริมาณน้อย ๆ ที่มีอยู่ด้วยกันหลายรูป เช่น CdO หรือ HgO ซึ่งเป็นการป้องกันการชะละลาย (van der Sloot และคณะ, 2001 อ้างถึงใน Achternbosch และคณะ, 2003)

2.4 การชะละลายในระยะยาว (Long-term Leaching)

ถึงแม้ว่ากระบวนการดูดติด (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการตกผลึก (Crystalline) จะยึดโลหะหนักไว้ในซีเมนต์ในขั้นตอนแรกๆของการรวมตัวกับน้ำในช่วงอายุการใช้งาน แต่โครงสร้างดังกล่าวนั้นก็ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงการเผชิญหน้ากับสภาวะที่กระตุ้นให้เกิดการชะละลายของโลหะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ จากสภาวะทั้งหมดปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวกับการปล่อยโลหะออกสู่สิ่งแวดล้อม คือการสัมผัสกันระหว่างน้ำกับโครงสร้างคอนกรีต/ซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการใช้วัสดุร่วมเผา (Co-incinerated cement) นั้นโดยปกติจะนำมาทำเป็นคอนกรีต (Concrete) หรือมอตาร์ (Mortar) ซึ่งนำมาใช้เป็นฐานราก ภาชนะบรรจุน้ำ ท่อส่งน้ำ และ

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุปูพื้นถนน ในสภาพแวดล้อมดังที่กล่าวมานั้นจะสามารถสัมผัสกับน้ำได้ 2 วิธีคือ การไหลซึมผ่านโครงสร้าง (Percolation through the matrices) และการไหลรอบโครงสร้าง (Flow around the matrices) หรือส่วนของรอยแตก

ภาพรวมของการปล่อยอนุภาคละลายน้ำที่บรรจุอยู่ในรูพรุนของซีเมนต์ซึ่งสัมผัสกับน้ำ เป็นผลมาจากการเกิดองค์ประกอบเชิงซ้อน (Complex) และปรากฏการณ์อีก 2-3 ปรากฏการณ์ โดยการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นตัวกลางที่มีความพรุนขึ้นอยู่กับความความอิ่มตัวของสารละลาย การละลายของอนุภาคต่างๆ ในรูพรุนจะขึ้นอยู่กับสภาวะทางเคมีนั้นๆและมีอาจการเปลี่ยนแปลงของชนิดของอนุภาคที่ละลายอยู่ในชั้นรูพรุน (รวมถึงความเป็นไปได้ที่จะกลับมาตกตะกอนใหม่) หากสภาวะทางเคมีเปลี่ยนไปเนื่องจากการปล่อยอนุภาคชนิดที่ควบคุมพีเอช (เช่น Portlandite: $Ca(OH)_2$) การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากตัวกลางที่มีรูพรุนไปสู่สารชะละลายมีสาเหตุมาจากผลของความเข้มข้นที่แตกต่างกัน จากทฤษฎีของการชะละลายนั้นมีกลไกที่แตกต่างกัน 3 กลไก ที่ได้เสนอการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ละลายได้ในขณะที่เกิดการชะละลายของก้อนของแข็งใน ระยะสั้น กลาง และในระยะยาว ได้แก่ 1.การชะล้างที่จุดเริ่มต้นของการสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว (Surface wash off) 2.การละลายของโครงสร้างที่มีสารมลพิษบรรจุอยู่ (Solubilization) และ 3.การปลดปล่อยของอนุภาคที่ละลายอยู่ภายในโครงสร้างรูพรุนโดยอาศัยกลไกการแพร่ (Diffusion) ตามลำดับ (van der Sloot และ คณะ, 1990 อ้างถึงใน Barna และ คณะ, 1997) นอกจากนี้ยังพบว่าอาจมีกลไกการชะละลายเกิดร่วมกันอีกด้วย เช่น การชะล้างที่ผิวหน้าซึ่งเกิดตอนเริ่มต้นของการชะละลาย แต่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากเมื่อเทียบกับอายุการใช้งานซึ่งกระบวนการที่ควบคุมการแพร่นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับธรรมชาติของวัสดุ (Schiessl และ Hohberg, 1997)

สำหรับชนิดของวัสดุ และกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุมีอิทธิพลต่อกลไกการชะละลายที่ปรากฏเมื่อเกิดสภาพการชะละลาย อาทิ วัสดุที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้สูงอาจสามารถจำแนกอยู่ในวัสดุประเภทเม็ดเล็กๆ (Granular material) สำหรับวัสดุที่มีความพรุนการแพร่ของอนุภาคที่สนใจออกจากวัสดุก้อนแข็ง (Monolithic material) นั้นอาจเป็นกระบวนการที่ควบคุมอัตราการชะละลาย โดยความสัมพันธ์ที่ดังกล่าวสามารถพิสูจน์ได้จาก กฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's diffusion laws) (Crank, 1975 และ Coté, 1987 อ้างถึงใน Schiessl และ Hohberg, 1997)

ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ -1/2 ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอกาลิทึมของกระแสความหนาแน่นของไอออนที่พิจารณา กับลอกาลิทึมของเวลานั้นแสดงค่าที่เป็นจริงก็ต่อเมื่อ สภาวะภายในของวัสดุยังคงไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาที่พิจารณาซึ่งอาจกินเวลาถึงหลายร้อยปี ความสัมพันธ์นี้อาจสามารถใช้สมมุติสำหรับคอนกรีตที่มีคุณภาพดีซึ่งสัมผัสกับดินหรือน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ดีสภาวะภายในของตัวอย่างของเสียที่ผ่านการปรับเสถียร

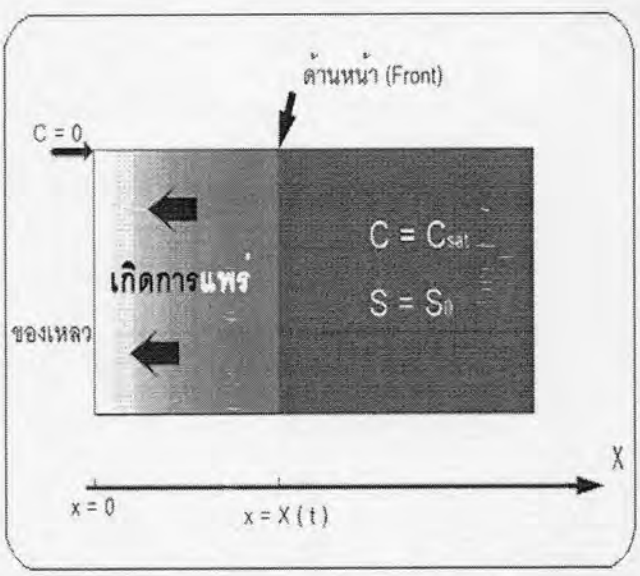
อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องมาจากการเกิดคาร์บอเนชันหรือการชะละลายของด่าง ซึ่งมีผลจากการลดลงของพีเอช นอกจากนี้แล้วโครงสร้างรูพรุนอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของวัสดุก้อนแข็งกับธรรมชาติ ผลที่ได้ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับพฤติกรรมการชะละลายนั้นอาจแตกต่างออกไป สำหรับองค์ประกอบบางชนิดการลดลงของพีเอชนั้นอาจเพิ่มความสามารถในการละลายเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการชะละลาย ในขณะที่องค์ประกอบบางชนิดอาจเกิดการตกตะกอนของเกลือขึ้น (เช่น การเกิดคาร์บอเนชันที่ผิวด้านนอก) (Schiessl และ Hohberg, 1997)

กระบวนการคาร์บอเนทิเซชัน (Carbonatization) เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงอายุการใช้งานเกิดจากพีเอชที่สูงของสารละลายในโครงสร้างรูพรุนในคอนกรีตกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคอนกรีตจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศซึ่งเป็นผลให้พีเอชของสารละลายในรูพรุนลดลงอย่างช้าๆและแคลเซียม (Ca) จะละลายออกจากซีเมนต์เพสต์ที่แข็ง (ส่วนใหญ่จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ : $Ca(OH)_2$) แคลเซียมที่ละลายออกมาจะตกตะกอนเป็นคัลไซต์ (calcite : $CaCO_3$) อยู่ในปริมาตรรูพรุน อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนทิเซชันขึ้นกับรูพรุนและความเปียกของพื้นผิวเริ่มต้นในช่วงเวลา 20 ปีอาจเกิดได้ถึง 10 มิลลิเมตร การลดลงของพีเอชที่ใกล้กับผิวหน้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะมากขึ้น โลหะหลายชนิด อาธิ สารหนู (As) ดีบุก (Sn) ซิลิเนียม (Se) แทลเลียม (Tl) และปรอท (Hg) นั้นเคลื่อนที่ได้ที่พีเอชสูง (ประมาณ 11) หลังจากที่ใช้บัฟเฟอร์ของซีเมนต์จนหมดต่อจากนั้นระบบจะทำการสร้างบัฟเฟอร์ขึ้นมาจาก CSH ที่พีเอชระหว่าง 9 และ 11 ซึ่งจะช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของ วานาเดียม (V) แคดเมียม (Cd) นิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ดังนั้นการเคลื่อนที่ของสารเหล่านี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่บัฟเฟอร์ของ CSH มีประสิทธิภาพ ตะกั่ว (Pb) และโคบอลต์ (Co) ไม่เคลื่อนที่ในบัฟเฟอร์ของคาร์บอเนต ซึ่งทั้ง 2 นี้จะละลายได้ที่พีเอชที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามค่าที่ได้นี้อาจพบได้ตามธรรมชาติทั่วไปภายหลังจากการสลายของคาร์บอเนตและ AF_m (โมโนซัลเฟต: Monosulphate) ในทางตรงกันข้าม โครเมียม (Cr) แบเรียม (Ba) และดีบุก (Sn)นั้นแทบไม่ละลายเลย ผลที่ได้โดยยึดถือพฤติกรรมการชะละลายนั้นอาจแตกต่างกันออกไป ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นว่าองค์ประกอบบางชนิดจะมีความสามารถในการละลายสูงขึ้นเมื่อลดพีเอช อีกกรณีหนึ่งการลดลงของพีเอชอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของเกลือได้ (การเกิดคาร์บอเนชันที่ผิวด้านนอก)

ถึงแม้นักวิจัยส่วนมากจะพิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของมวลสารในขณะเกิดการชะละลายนั้นสามารถอธิบายได้จากกลไกการแพร่ที่ปรากฏแต่อันที่จริงแล้ว Barna และคณะ (Barna และคณะ, 1997) แสดงให้เห็นว่ากลไกการแพร่นั้น ไม่สามารถอธิบายถึงการชะละลายของธาตุทุกธาตุได้ ซึ่งสรุปไว้ว่าลักษณะเฉพาะทางเคมีของธาตุที่สนใจนั้นแสดงบทบาทที่สำคัญต่อการพิจารณารูปแบบของการชะละลาย และยังแสดงให้เห็นว่ากลไกการชะละลายนี้เป็นตัวแทนที่ดีใกล้เคียงความเป็นจริง ในกรณีที่สารสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำที่อยู่ในรูพรุน (เช่นในกรณีของโซเดียม) ซึ่ง

ความสามารถในการละลายนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางเคมี-ฟิสิกส์ของการชะละลาย อย่างไรก็ดีสำหรับอนุภาคที่ละลายได้และความสามารถในการละลายไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพทางเคมี–ฟิสิกส์ของการชะละลายซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งที่จุดเริ่มต้นของการชะละลาย (เช่นในกรณีของแคลเซียม) หรืออนุภาคที่ความสามารถในการชะละลายเปลี่ยนแปลงไปตามเคมี-ฟิสิกส์ของสภาวะการชะละลาย เช่นโลหะที่สามารถละลายได้ทั้งในกรดและเบส (Amphoteric metal) กลไกการแพร่พื้นฐานนี้ยังไม่อาจให้ผลที่ดีที่สุดได้

จากผลการศึกษาของ Barna และคณะ สำหรับองค์ประกอบที่ละลายได้ซึ่งความสามารถในการละลายไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการชะละลายทางเคมี-ฟิสิกส์ และอยู่ในโครงสร้างในรูปของแข็งในขั้นตอนแรก การประยุกต์ใช้แบบจำลอง Shirinking front ให้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นซึ่งประกอบด้วย 2 กรณีคือ กรณีขององค์ประกอบที่สามารถละลายได้เพียงองค์ประกอบเดียวโดยปราศจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และอีกกรณีคือมีองค์ประกอบ 2 ตัวและสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น กรณีแรกเหมาะสำหรับใช้อธิบายการชะละลายของแคลเซียมโดยปราศจากการจับคู่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคอื่น ในทางทฤษฎีแบบจำลอง shrinking core ลำดับแรก (ชนิดพิจารณาองค์ประกอบเดียว) นั้นแยกให้เห็นความแตกต่างของก้อนของแข็งที่นำมาชะละลายออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งแยกตามการสลายตัวดังแสดงในรูป 2.1 ส่วนนอก (outer zone) อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งของแข็งจะสร้างรูปที่ละลายได้ (ความเข้มข้น S_0) และสลายตัวออกจากโครงสร้างรูพรุนโดยซึมผ่านออกมายังสารละลายโดยอาศัยการแพร่ (สัมประสิทธิ์การแพร่ D_e) ในทางตรงกันข้ามส่วนที่ 2 ซึ่งอยู่ใกล้กับแก่นของของแข็งมากกว่าจะไม่มีการไหลซึมหรือการเคลื่อนที่ของมวลสาร (ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารละลายชั้นรูพรุนเกิดการอิ่มตัว) โดยสมมุติว่าการละลายนั้นเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน



พลสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

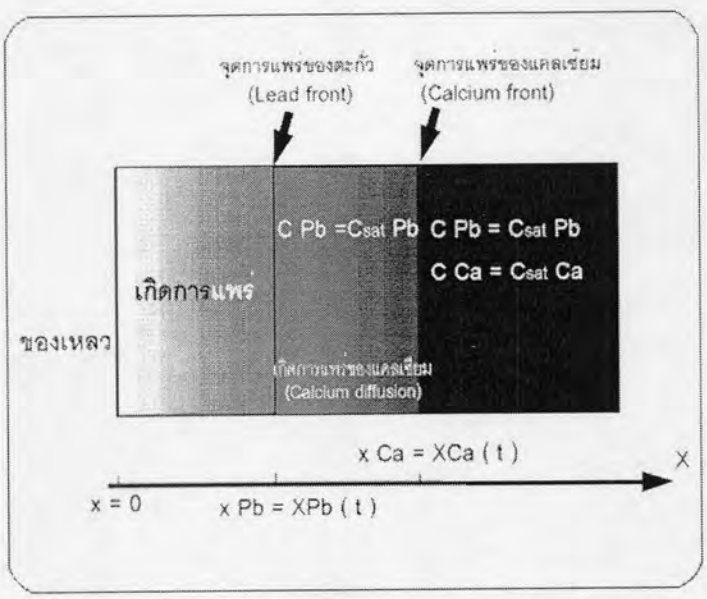
รูปที่ 2.1 แผนภาพของแบบจำลอง Shrink front (ชนิดที่มีอนุภาคที่สนใจ 1 ชนิด)

ในกรณีที่สองของการใช้งานนั้นเหมาะสำหรับการชะละลายอนุภาคที่ละลายได้ 2 ชนิดซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ตัวอย่างเช่น การชะละลายของตะกั่วออกมาจากมอร์ตา ซึ่งมี $Ca(OH)_2$อยู่ซึ่งการนำไปใช้นี้เหมาะสมสำหรับการอธิบายเกี่ยวกับการชะละลายของอนุภาคที่ความสามารถในการละลายนั้นขึ้นอยู่กับ สภาวะทางเคมี ฟิสิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พีเอช (เช่น พวกโลหะที่สามารถละลายได้ทั้งสภาวะกรดและเบส) โดยความสามารถในการละลายของอนุภาคที่อยู่ในรูพรุนและพีเอชในโครงสร้างเป็นตัวกำหนดกลไกการชะละลายของอนุภาคเหล่านี้ในกรณีดังกล่าว จะต้องนำส่วนที่จะกล่าวต่อจากนี้เข้าไปรวมอยู่ในการพิจารณาด้วย

1. อนุภาคที่ละลายได้เกิดปฏิกิริยาในชั้นของเหลว ซึ่งปฏิกิริยานั้นมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น (เช่น ในชั้นรูพรุน)

2. ตัวอย่างที่นำมาทดสอบการชะละลายมีขนาดจำกัดแต่ไม่เป็นศูนย์

3. ความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งมีค่าคงที่เป็นศูนย์



รูปที่ 2.2 แผนภาพของแบบจำลอง Shrink front (ชนิดที่มีอนุภาคที่สนใจ 2 ชนิด)

สำหรับการนำแบบจำลองนี้ไปใช้งาน มีการกำหนดขอบเขตอยู่ 3 ส่วนซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นภาพได้ใน รูปที่ 2.2 โดยเป็นแสดงการชะละลายของตัวอย่างเพียงด้านเดียว

1.ส่วนที่อยู่ในของแข็งซึ่งอยู่ใกล้กับผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งที่ซึ่งแคลเซียม และตะกั่วได้เกิดการละลายออกไปแล้ว ปริมาณของแคลเซียมและตะกั่วในน้ำชั้นรูพรุนในส่วนนี้เกิดการเคลื่อนที่โดยการแพร่ผ่านออกไปยังผิวของของเหลว

2.ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ใกล้แก่นของของแข็งมากขึ้นซึ่ง $Ca(OH)_2$ สามารถสลายได้ สารประกอบไฮดรอกไซด์ของตะกั่วในรูปของแข็งยังปรากฏให้เห็นอยู่ ดังนั้นในรูพรุนจะอิ่มตัวด้วยตะกั่ว ในส่วนนี้แคลเซียมเคลื่อนย้ายโดยการแพร่ความเข้มข้นของตะกั่วนั้นอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ในสารละลายหรืออยู่ในของแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในรูพรุน

3.ส่วนที่สามของแข็งทั้งสองปรากฏและไม่มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายของมวลสาร

ความเข้มข้นของอนุภาคซึ่งสมดุลในสถานะของเหลวนั้นสามารถประเมินได้จาก

1. สมดุลระหว่างของแข็ง และสารละลายที่สัมผัส
2. ความเป็นกลางทางไฟฟ้า
3. ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างอนุภาคที่ปรากฏอยู่ในสารละลาย

อย่างไรก็ดี การเคลื่อนที่ขององค์ประกอบที่มีปริมาณน้อย ๆ ออกจากคอนกรีต ยังคงขึ้นกับลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของคอนกรีตเอง (latter's physical properties) ตัวแปรที่สำคัญคือโครงสร้างรูพรุนเริ่มแรกของคอนกรีต ซึ่งมีอิทธิพลมากต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต คุณสมบัติในการรวมเป็นเนื้อเดียวหรือการบดอัดและสูตรของคอนกรีต

2.5 การชะละลายและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย (Todorovic และ Ecke, 2004)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายสามารถแบ่งออกได้เป็น ทางฟิสิกส์และทางเคมี

2.5.1 ปัจจัยทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย

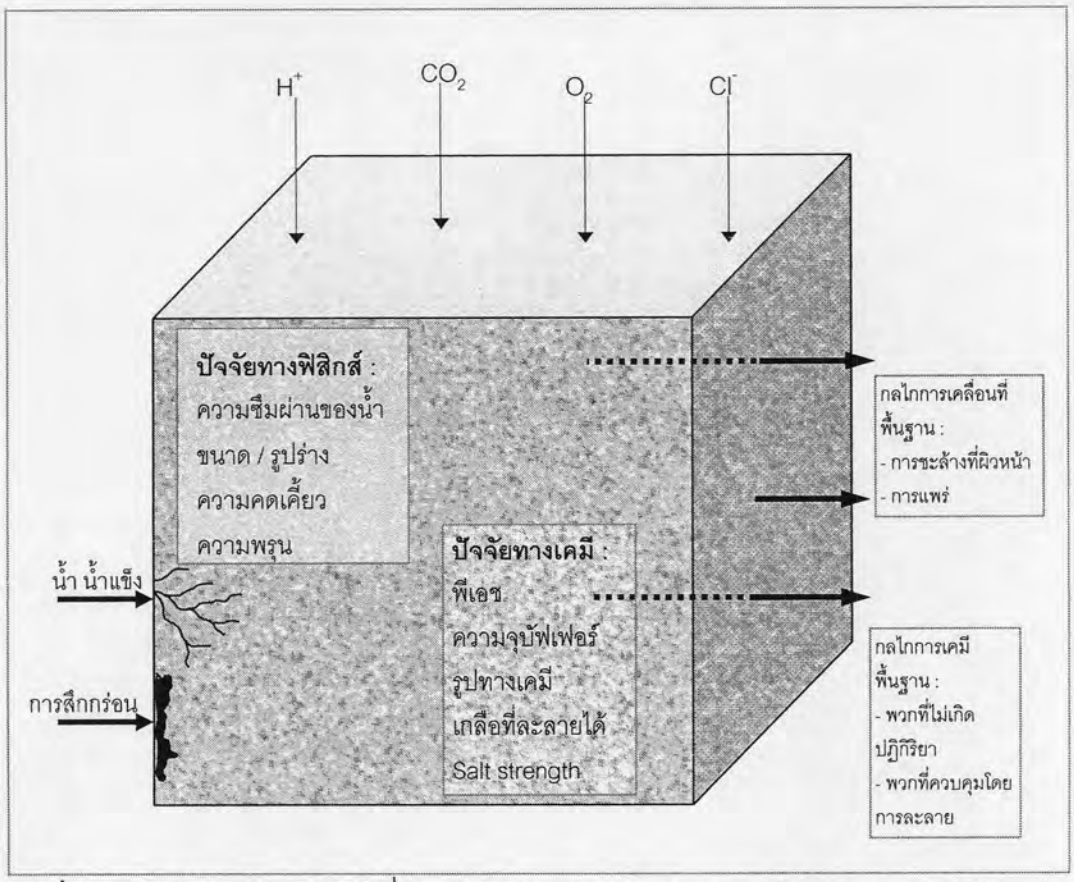
2.5.1.1 ลักษณะสมบัติของอนุภาค (Particle properties)

2.5.1.2 โครงสร้างรูพรุนภายในโครงสร้างของแข็ง (Internal pore structure of the solids matrix)

2.5.1.3 อุณหภูมิ (Temperature)

2.5.1.4 เวลาสัมผัส (Time of contact between phases)

2.5.1.5 อัตราส่วนระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-to-solid ratio)



รูปที่ 2.3 ปัจจัยทางฟิสิกส์-เคมี ที่มีผลต่อการชะละลายของสารมลพิษ ออกจากวัตถุก้อนแข็ง (van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

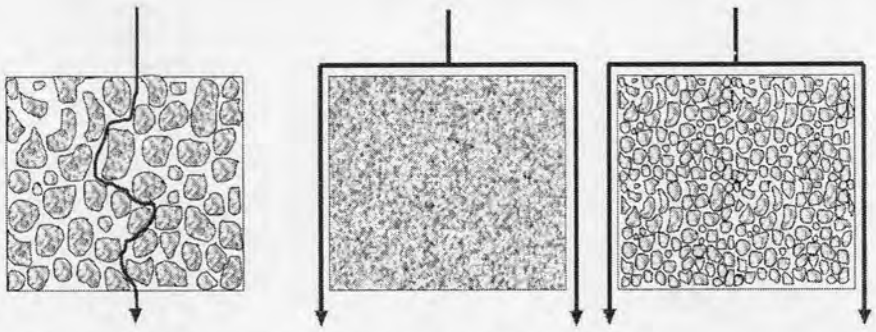
ลักษณะสมบัติของอนุภาค (Particle properties) เช่น ขนาดของอนุภาค และโครงสร้างรูพรุนมีอิทธิพลต่อการชะละลายจากผิวหน้าที่สัมผัสกับสารชะละลาย ค่าที่ใช้อธิบายถึงโครงสร้าง รูพรุนภายในของวัตถุก้อนแข็ง และวัสดุเป็นเม็ดที่ผ่านการบดอัดมาแล้ว คือ

1. ความสามารถที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (permeability) คืออัตราที่ของเหลวสามารถไหลซึม(percolate) ผ่านชั้นของวัสดุ

2. รูพรุน (porosity) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่าง และ ปริมาตรของวัสดุ

3. ความคดเคี้ยว (tortuosity) คืออัตราส่วนระหว่างความยาวของเส้นทางจริง และเส้นทางที่ปรากฏของการแพร่ผ่านวัสดุ

อย่างไรก็ดีไม่ว่าของเหลวจะไหลซึมผ่านวัสดุหรือไหลรอบวัสดุ โดยทั่วไปจะพิจารณาเป็นความสามารถในการยอมให้ของเหลวซึมผ่านวัสดุและกลไกการชะละลายนั้นคล้ายกันระหว่างของวัสดุก้อนแข็ง (Monolithic) และวัสดุที่ผ่านการบดอัดให้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ



รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลผ่านของสารชะละลายผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ

อัตราส่วนระหว่างของเหลวและของแข็ง (L/S ratio) มีความสัมพันธ์ต่อเวลาที่สัมผัสในการชะละลาย โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งในห้องปฏิบัตินั้นการสามารถสร้างการทำนายความสามารถในการชะละลายในระยะยาวให้เป็นไปได้ โดยอัตราส่วนนั้นยังเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการชะละลายที่แตกต่างกัน (Kylefors, Andreas และ Lagerkvist, 2003)

2.5.2 ปัจจัยทางเคมีที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย

2.5.2.1 พีเอช (pH)

2.5.2.2 ความสามารถในการรับ-จ่ายอิเล็กตรอน (Redox potential)

2.5.2.3 การมีอยู่ของอนุภาคที่สามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อน(Availability of complex formers)

2.5.2.4 การมีอยู่ของพื้นผิวที่มีการดูดซับ (Availability of sorption surfaces)

พีเอชมีอิทธิพลต่อความสามารถในการชะละลายของอนุภาคหลากหลายชนิด การเคลื่อนที่ของโลหะส่วนใหญ่มากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด อาจเนื่องจากโลหะจะสร้างรูปที่เคลื่อนที่ได้ที่พีเอชต่ำและโลหะเชิงซ้อนจะสร้างรูปร่างที่เล็กลงในสภาวะกรด องค์ประกอบบางชนิดจับตัวเป็นออกไซด์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งกรดและเบส ซึ่งเรียกองค์ประกอบจำพวกนี้ว่าแอมโฟเทอริก (Amphoteric) โดยความสามารถในการชะละลายขององค์ประกอบจำพวกนี้จะต่ำในช่วงพีเอชที่เป็นกลางและจะสูงขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลง องค์ประกอบที่สร้างรูปเป็นออกไซด์ประจุลบของโลหะ (Oxianions) เช่น สารหนู โครเมียม เซเลเนียม จะแสดงความสามารถในการชะละลายออกมาได้สูงที่สุดที่สภาวะเป็นกลาง (van der Sloot, Heasman และ Quevauviller, 1997) อย่างไรก็ดีความสามารถในการชะละลายของ โซเดียมและคลอไรด์นั้นไม่ขึ้นกับพีเอช ทั้งนี้พีเอชไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการชะละลาย แต่ส่งผลต่อการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนและกระบวนการดูดซับ

ศักยภาพในการรับ-จ่ายอิเล็กตรอน (Redox potential) ของระบบนั้นค่อนข้างสำคัญสำหรับการชะละลายเนื่องจากหากการสร้างรูปทางเคมีนั้นเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนอาจมีความสามารถในการชะละลายแตกต่างกันไปจากการสร้างรูปภายใต้สภาวะรีดิวซิง (Reducing conditions) การมีอยู่ของแร่ธาตุชนิดออกซิไดซิง (Oxidizing) หรือรีดิวซิง (Reducing) หรือ ออกซิเจนอาจส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของโลหะ

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) กับลิแกน (Ligand) ที่เป็นสารอินทรีย์หรือ สารอนินทรีย์ อาจนำไปสู่การเคลื่อนที่ขององค์ประกอบออกจากของแข็ง ถ้าไม่เช่นนั้นก็อาจจะไม่สามารถละลายออกมา ความสามารถในการชะละลายของแคดเมียมมีอิทธิพลอย่างมากจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ (van der Sloot และคณะ, 1997) ปฏิกิริยาการดูดซับ (Sorption reactions) นำไปสู่การสร้างพันธะขององค์ประกอบที่ละลายลงบนผิวหน้าของของแข็ง (Meima และคณะ, 2002)

2.6 การปลดปล่อยของอนุภาคจำแนกตามคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของสาร (Release of species)

พฤติกรรมการชะละลายของอนุภาค หรือสารหลากหลายชนิดสามารถแยกให้เห็นความแตกต่างได้ออกเป็น 2 กรณี ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของสารนั้นเองอันได้แก่

2.6.1 ชนิดที่สามารถละลายได้ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางเคมีฟิสิกส์ เช่น คลอไรด์ โซเดียม โพแทสเซียม

2.6.2 ชนิดที่ความสามารถในการละละลายขึ้นอยู่กับสภาวะทางเคมีฟิสิกส์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พีเอช

ในส่วนที่จะกล่าวต่อไปเป็นการศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบชนิดต่าง ๆ กับการละลาย

1. ธาตุฮาโลเจน และ โลหะอัลคาไลน์ (Halogens and alkali metals)

ความสามารถในการละลายของสารประกอบจากธาตุฮาโลเจนและธาตุอัลคาไลน์ (ยกเว้นที่มาจาก ฟลูโอรีน : F) ไม่ขึ้นกับพีเอช (van der Sloot และคณะ, 1997) ขีดความสามารถในการละลายไม่ได้จำกัดพฤติกรรมการชะละลายของสารเหล่านี้และสารเหล่านี้พร้อมที่จะชะละลายละลายออกมาอย่างรวดเร็ว การบำบัดโดยทำให้เป็นของแข็ง (Solidification) ไม่ได้ช่วยทำให้สารเหล่านี้หยุดนิ่งไม่เคลื่อนที่เนื่องจากสารเหล่านี้ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโครงสร้างแข็ง (Solid matrix) จากพฤติกรรมการชะละลายที่กล่าวมาบางครั้งเรียกสารประเภทนี้ว่า สารเฉื่อย (Inert)

2. โลหะ (Metals)

ความสามารถในการชะละลายของอลูมิเนียมส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ซึ่งความสามารถในการละลายต่ำสุดที่พีเอช 5 (van der Sloot และคณะ, 1997)

ความสามารถในการละลายของแคดเมียมจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งต่ำสุดที่พีเอชมีค่าเท่ากับ 11 (Moszkowicz และคณะ, 1998) อย่างไรก็ดี การชะละลายของแคดเมียมมีผลกระทบอย่างมากจากการมีอยู่ของคลอไรด์ ความแตกต่างของความสามารถในการชะละลายเป็นฟังก์ชันกับพีเอช อาจเนื่องจากการสร้างรูปที่ละลายได้ของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม-คลอไรด์ (Cadmium-Chloro complexes) นั้นมีผลต่อเส้นความสามารถในการชะละลายของแคดเมียมโดยเปลี่ยนไปที่พีเอชที่สูงขึ้น (van der Sloot, Comans และ Hjelmar, 1996)

มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเข้าใจเกี่ยวกับเคมีของแคลเซียมเนื่องจากสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของระบบแคลเซียมมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากกับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ของระบบ แคลเซียมยังมีความจำเป็นต่อการสร้างรูปของ C-S-H (Calcium Silicate Hydrogel) ในช่วงขณะของกระบวนการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็ง (Stabilization/ solidification processes) และยังส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายขององค์ประกอบอื่นๆ ผ่านทางการปรับเสถียรภาพทางฟิสิกส์ของส่วนที่เหลือ

การละลายของทองแดง (Cu) ต่ำเมื่อพีเอชมากกว่า 7 แต่อย่างไรก็ดีในวัสดุที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบความสามารถในการชะละลายของทองแดงจะมากขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวอาจมีความสัมพันธ์ต่อการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC)

ตะกั่ว (Pb) เป็นตัวที่สามารถละลายได้ทั้งที่พีเอชสูงและต่ำ ซึ่งความสามารถในการชะละลายต่ำสุดจะอยู่ที่พีเอช 9 -10 (van der Sloot และคณะ, 1997) การเกิดคาร์บอเนชันอาจทำให้ความสามารถในการชะละลายของตะกั่วลดต่ำลง ผ่านการลดลงของพีเอชจากสภาพที่เป็นด่างสูงไปสู่สภาพที่เป็นด่างอ่อน (พีเอช ประมาณ 8.3) ที่พีเอช 6-9 ความสามารถในการชะละลายของตะกั่วนั้นน้อยอันเป็นสาเหตุมาจากการสร้างรูปที่ละลายได้น้อยของคาร์บอเนต (CO_3)

ความสามารถในการชะละลายของนิเกิล (Ni) นั้นคล้ายกับของตะกั่วแต่มีความไวต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (DOC) มากกว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ (van der Sloot และคณะ, 1997)

สังกะสี (Zn) มีความสามารถในการละลายได้ทั้งสภาพที่เป็นกรดและเบส ซึ่งที่พีเอช 9 (Cohen และ Petrie, 1997 อ้างถึงใน Todolovic และ Ecke, 2004) จะมีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดที่ช่วงพีเอชกลางๆสังกะสีจะอยู่ในรูปของซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ซึ่งเป็นรูปที่ละลายได้น้อยทำให้สังกะสีไม่เกิดการเคลื่อนที่นอกจากนี้ความสามารถในการชะละลายที่เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอช มากกว่า 10 นั้นอาจเป็นเพราะการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนในรูปที่ละลายได้ของสังกะสีกับไฮดรอกไซด์ (OH^-)

2. ธาตุที่สามารถเกิดสารประกอบกับออกซิเจนและมีประจุเป็นลบ (Oxyanions)

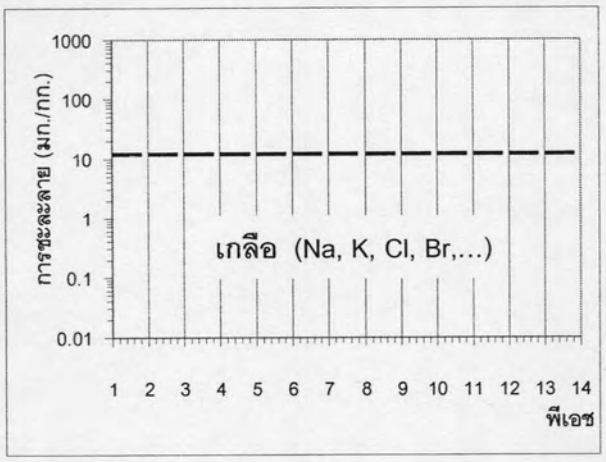
สารหนู โมลิบดินัม พลวง และซีลีเนียม แสดงความสามารถในการชะละลายที่มากที่สุดในสภาพที่เป็นกลาง (van der Sloot และคณะ, 1997) นอกจากนี้ Duntre และ Vandecasteele (1997) ยังแสดงให้เห็นว่าในการเติมซีเมนต์ลงในของเสียที่มีการปนเปื้อนสารหนูนั้นแคลเซียมจะแสดงบทบาทที่สำคัญต่อการหยุดการเคลื่อนที่ของสารหนูมากไปกว่านั้นการเติมปูนขาวลงในส่วนผสมทำให้ความเข้มข้นของสารหนู ในน้ำที่ผ่านการชะละลายอาจลดลงมากถึง 100 เท่า สาเหตุเนื่องมาจากมีพีเอชสูงกว่า 12 และการสร้างรูปที่ไม่ละลายน้ำของ $CaHAsO_3$ โดยกลไกที่สำคัญในการสร้างพันธะของโมลิบดินัมที่พีเอชต่ำๆคือกลไกการดูดซับของโมลิบดินัม(VI)ออกไซด์ (MoO_4^{2-}) บนผิวหน้าของเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) (Comans, Meima และ Geelhoed, 2000)

การมีอยู่ของโครเมียมในระบบธรรมชาตินั้นมีทั้งที่เป็นประจุ + 3 (โครเมียม (III): Cr^{+3}) หรือ +6 (โครเมียม (VI): Cr^{+6}) Cr^{+3} เป็นรูปที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและมีพิษน้อยกว่า ในขณะที่รูป Cr^{+6} เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงและมีพิษมาก (Rinehart และคณะ, 1997) Cr^{+3} มีคุณสมบัติในการละลายได้ทั้งในสภาพกรดและเบส ในขณะที่ Cr^{+6} สามารถละลายได้มากในช่วงที่เลยค่าพีเอชไปแล้ว (Cohen และ Petrie, 1997 อ้างถึงใน Todolovic และ Ecke, 2004) การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์สามารถทำให้หยุดการเคลื่อนที่ของ Cr^{+3} ได้โดยการแทนที่ซิลิกา Cr^{+3} สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์จากไฮเดรชันของซีเมนต์ (cement hydration product) ได้ นอกจากนี้ยังสามารถอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ในสารละลายในรูพรุน การเกิดผลิตภัณฑ์จากไฮเดรชันของซีเมนต์ไม่ต้องการที่จะให้มี Cr^{+6} เกิดขึ้นซึ่งมีการศึกษาของ Cohen และ Petrie (1997 อ้างถึงใน Todolovic และ Ecke, 2004) พบว่าประมาณร้อยละ 75 ของโครเมียมที่ชะละลายออกมาจากของเสียที่หล่อเป็นก้อนแข็งอยู่ในรูปของ Cr^{+6} ส่วนที่เหลือเป็น Cr^{+3}

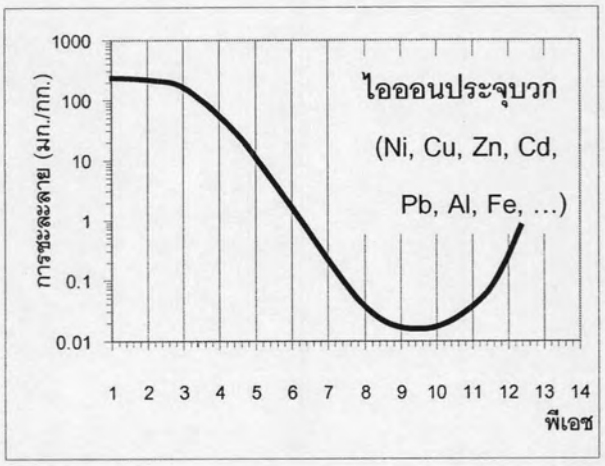
4. สารอโลหะ

ในของเหลือที่เหลือจากการเผา ซัลเฟต (SO_4) มักจะอยู่ในรูปของเกลือที่สามารถละลายได้ซึ่งสามารถชะละลายได้สูง มีการศึกษาพบว่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 4 -11 ไม่ส่งผลต่อการชะละลายของ ซัลเฟต

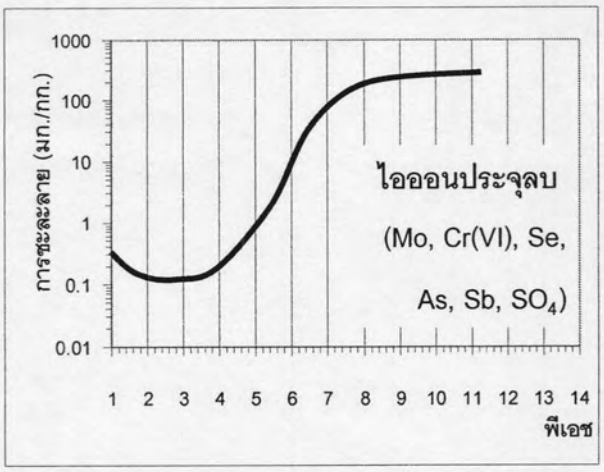
รูปที่ 2.5-2.7 แสดงพฤติกรรมการชะละลายทั่วไปของอนุภาค 3 กลุ่มที่เป็นฟังก์ชันกับพีเอช คือกลุ่มที่มีประจุบวก ประจุลบ และเกลือที่สามารถละลายได้ ซึ่งมีรูปแบบการชะละลายที่ต่างกันอย่างเด่นชัดโดยมีสาเหตุการรูปแบบทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงตามพีเอช รูปที่ 2.8 แสดงปริมาณการชะละลายสุดท้ายที่แตกต่างกันเนื่องจากผลของรีดอกซ์ และคาร์บอนอินทรีย์ละลาย และปัจจัยอื่นๆ รูปแบบการชะละลายของธาตุที่กลุ่มต่างกันสำหรับวัสดุทุกประเภทนั้นเป็นระบบมากจะต่างกันเพียงปริมาณการชะละลายสุดท้าย (ซึ่งนำไปสู่ "ลายนิ้วมือทางเคมี" ของวัสดุ)



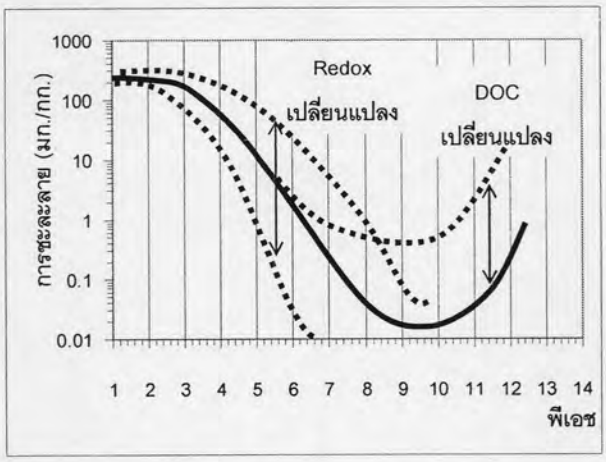
รูปที่ 2.5 รูปแบบการชะละลายของเกลือซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (van der Sloot และ Dijkstra, 2004)



รูปที่ 2.6 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุบวกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (van der Sloot และ Dijkstra, 2004)



รูปที่ 2.7 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุลบซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (van der Sloot และ Dijkstra, 2004)



รูปที่ 2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการชะละลาย (van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

2.7 การเกิดคาร์บอนเนชัน

ในระบบเปิดที่มีสิ่งแวดล้อมสัมผัสกับอากาศ CO_2 สามารถละลายลงในน้ำได้ตามกฎของเฮนรี โดยเริ่มต้นจากการที่ CO_2 ละลายจากสถานะก๊าซ กลายเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) สำหรับในระบบที่มีพีเอชสูงๆ อาทิ การชะละลายของซีเมนต์เพต์ซึ่งมีพีเอชสูงประมาณ 12-13 H_2CO_3 จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $CO_3^{2-}{}_{(aq)}$ ดังสมการที่ 2.7 – 2.9

$$CO_{2(g)} + H_2O_{(aq)} \leftrightarrow H_2CO_{3(aq)} \qquad H = 30.2 \quad (2.7)$$

$$H_2CO_{3(aq)} \leftrightarrow H^+_{(aq)} + HCO_3^-{}_{(aq)} \qquad K_{a1} = 6.35 \quad (2.8)$$

$$HCO_3^-{}_{(aq)} \leftrightarrow H^+_{(aq)} + CO_3^{2-}{}_{(aq)} \qquad K_{a2} = 10.33 \quad (2.9)$$

โดย $CO_3^{2-}{}_{(aq)}$ จะสามารถจับกับ $Ca^{2+}{}_{(aq)}$ ที่ชะละลายออกมาจากซีเมนต์เพสต์และตกตะกอนเกิดเป็นหินปูน ($CaCO_{3(s)}$) ได้ดังสมการที่ 2.10 ซึ่งมีผลให้พีเอชของระบบลดลง

$$Ca^{2+}{}_{(aq)} + CO_3^{2-}{}_{(aq)} \leftrightarrow CaCO_{3(s)} \qquad (2.10)$$

2.8 การทดสอบการชะละลาย

ในการเลือกใช้มาตรฐานเพื่อทดสอบการชะละลายนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้มีความสัมพันธ์กับการใช้งานหรือสภาวะจริงที่เกิดขึ้น ซึ่งในการใช้งานของภาชนะบรรจุน้ำดื่มที่ทำจากปูนซีเมนต์นั้นเปรียบเสมือนเป็นการชะละลายของโลหะหนักจากวัตถุก้อนแข็ง (Monolithic) ออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการชะละลายเกิดขึ้นเพียงด้านเดียวคือด้านที่สัมผัสกับน้ำที่บรรจุ ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการจำลองสภาพการใช้งานจริงที่เกิดขึ้นและประยุกต์มาตรฐานการชะละลายเพื่อมาอธิบายการชะละลายที่เกิดขึ้น

2.8.1 **ภาพรวมการทดสอบการชะละลาย** (Hartwell **และ** Calovini, 1999)

การทดสอบการชะละลายนั้นได้รับการเสนอหรือประกาศให้ใช้ไม่เพียงแต่ในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น แต่ยังมีประเทศอื่นๆอีก อาทิ ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ เยอรมนี สวีเดน เดนมาร์ก สหภาพยุโรป และแคนาดา ซึ่งทั้งภาครัฐและเอกชนได้พัฒนาและมีส่วนร่วมในการนำการทดสอบการชะละลายเข้าสู่โปรแกรมของตน ซึ่งแต่ละวิธีการทดสอบนั้นไม่ได้เป็นเพียงการทดสอบแบบ single-batch เหมือนในการทดสอบ TCLP และกล่าวได้ว่าเป็นการจัดการด้านของเสีย เกิดการแบ่งลักษณะการชะละลาย และชนิดของของเสีย การทดสอบได้รับการพัฒนาเพื่อสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างสารชะละลายและของเสีย องค์ประกอบทางเคมีของสารชะละลาย การทดสอบของวัตถุก้อนแข็ง (monolithic) และของเสียที่เป็นเม็ดเล็ก (granular) รวมไปถึงของเสียที่ผ่านการทำก้อนแข็งและปรับเสถียรแล้วและเพื่อระบุของเสียที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสี มาตรฐานการทดสอบการะชะละลายในประเทศสหรัฐอเมริกานั้นประกาศโดย ASTM (the American Society for Testing and Materials), IAEA (the International Atomic Energy Agency), กองทัพบกสหรัฐ (the US Army), ANSI/ANS และ ISO

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการทดสอบการชะละลายได้ออกเป็น 2 กลุ่มคือ Static extraction tests และ Dynamic extraction tests โดยการทดสอบแบบ Static extraction นั้นการทดสอบจะใช้สารชะละลายเดี่ยวที่กำหนดปริมาตร ส่วนการทดสอบแบบ Dynamic extraction นั้นสารชะละลายที่ใช้มีการเปลี่ยนใหม่ตลอดช่วงการทดสอบ

1.การทดสอบแบบ Static extraction

ทดสอบโดยใช้สารชะละลายที่กำหนดปริมาตรแน่นอนสัมผัสกับของเสียที่มีปริมาณตามที่กำหนดตลอดช่วงเวลาการทดสอบที่ระบุไว้โดยไม่มีการเปลี่ยนสารชะละลาย โดยทั่วไปคือที่สิ้นสุดการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป การทดสอบแบบ Static extraction นั้นมีสมมุติฐานว่าสภาวะคงตัว (Steady state condition) เกิดขึ้นที่จุดสิ้นสุดของการทดลอง ชนิดของการทดสอบรวมมีทั้ง การทดสอบแบบที่มีการเขย่า (Agitated) ไม่เขย่า (Non-agitated) การสกัดแยก (Sequential chemical extraction tests) และการทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Buildup tests)

1.1 การทดสอบแบบเขย่า

ในการทดสอบแบบเขย่านั้นของเสียและสารชะละลายผสมเข้าด้วยกันและเกิดการเขย่า ดังนั้นการทดสอบนี้จะถึงสภาวะคงตัวได้เร็วเท่าที่จะเป็นไปได้ ในการทดสอบโดยมากมากจะต้องมีขั้นตอนการลดขนาดของของเสียเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสดังนั้นจึงทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการเข้าถึงสภาวะคงที่ การทดสอบแบบเขย่าจะวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของระบบของเสีย/สารชะละลายมากกว่าทางฟิสิกส์และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย ด้วยเหตุผลนี้การ

ทดสอบประเภทนี้จึงให้ผลที่เกินความเป็นจริงในการประเมินการปลดปล่อยของสารองค์ประกอบในช่วงสั้น ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบเขย่านั้นรวมถึง TCLP, EP Tox, California's WET, SPLP และ CEN 292

1.2 การทดสอบแบบไม่เขย่า

การทดสอบแบบไม่เขย่านั้นของเสียและสารชะละลายได้รับการผสมกันแต่ไม่เขย่า โดยการทดสอบแบบดังกล่าวนี้เป็นการวิเคราะห์ทางด้านฟิสิกส์ และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย มากกว่าสมบัติทางเคมีของระบบของเสีย/สารชะละลาย ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่าความสมบูรณ์ของโครงสร้างของของเสียส่งผลกระทบต่อปริมาณขององค์ประกอบที่จะชะละลายออกมาจากโครงสร้าง การทดสอบแบบไม่เขย่านั้นใช้เวลายาวนานกว่าในการเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบเขย่า ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ Strategic Leach test (MCC-1) และ High Temperature Static Leach test (MCC-2) ทั้งสองจากประเทศแคนาดา

1.3 การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมี

การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมีเป็นการทดสอบแบบอนุกรมของการสกัดด้วยการเขย่าด้วยการใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีการทดสอบ 2 แบบ แบบแรกเตรียมการทดสอบหลายครั้งแต่ละการทดสอบนั้นจะใช้สารสกัดต่างกันไปโดยสมมุติว่าสารสกัดแต่ละชนิดนั้นสามารถสกัดองค์ประกอบที่สารสกัดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าสกัดออกมาได้รวมกับสิ่งปนเปื้อนที่เพิ่มออกมาอีกปริมาณหนึ่งหรือจำนวนมาก อีกวิธีหนึ่งคือของเสียที่มีปริมาณเดียวกันสามารถนำมาใส่ในสารชะละลายแต่ละลำดับโดยสมมุติว่าสารชะละลายในลำดับถัดมานั้นจะสกัดบางอย่างที่สารสกัดลำดับก่อนหน้านี้สกัดออกมาไม่ได้ ในแต่ละกรณีอยู่ในสมมุติฐานที่ว่าการเพิ่มความรุนแรงของสารสกัดจะส่งผลให้สามารถสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาได้เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างของการทดสอบด้วยการสกัดทางเคมีคือ ASTM's Sequential Batch Extraction of Wastes with Acidic Extraction Fluid ส่วนการทดสอบอื่นๆ ยังอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนา

1.4 การทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น

วิธีการสำหรับ การทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Concentration build-up tests) กระทำได้โดยการนำของเสียที่มีปริมาณเท่ากันไปสัมผัสกับสารสกัดชนิดเดิมซ้ำๆ ที่อัตราสารชะละลายต่อของแข็งที่ต่ำ การทดสอบประเภทนี้จำลองของเหลวปริมาณหนึ่งที่ไหลผ่านเนื้อของของเสียด้วยความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นในสารสกัด การทดสอบนี้อาจเป็นการจำลองที่ดีของรูพรุนซึ่งเป็นองค์ประกอบของของเสีย ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ Wisconsin's Standard Leach Test ขั้นตอน C

2.**การทดสอบแบบ** Dynamic

สารชะละลายจะได้รับการเปลี่ยนใหม่ แบบชนิดต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่องอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อรักษาแรงขับในกระบวนการชะละลาย เนื่องจากความมั่นคงทางกายภายของของเสีย โดยทั่วไปยังคงรักษาไว้ได้ในช่วงระหว่างการทดสอบ และข้อมูลที่ได้ แปรผันตามกับเวลา การสกัดแบบ Dynamic ให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าทางจลนศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อน โดยทั่วไปการทดสอบแบบ Dynamic นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น Serial batch tests, Flow-around tests, Flow-through tests และ Soxhlet tests.

2.1 **การทดสอบแบบ** Serial batch test

ในการทดสอบแบบ Serial batch test นั้นก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำนวนหนึ่งจะถูกทำให้แตกเป็นก้อนเล็กๆและนำไปผสมกับสารชะละลายก่อนทำการเขย่าตามเวลาที่กำหนดไว้ ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา สารชะละลายจะถูกแยกออกและเปลี่ยนสารชะละลายใหม่กลับเข้าไป การทดสอบเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกว่าจะครบตามจำนวนของช่วงการทดสอบที่กำหนดไว้ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่วัดได้ในสารชะละลายแบบอนุกรมให้ข้อมูลทางจลนศาสตร์เกี่ยวกับการละลายของสารปนเปื้อน ตัวอย่างของการทดสอบ อาทิ Multiple Extraction Procedure (SW-846 Method 1320), NEN 7341 Availability Test (เนเธอร์แลนด์), NEN 7349 Serial Batch Test (เนเธอร์แลนด์) และ Graded Serial Batch test (US Army)

2.2 **การทดสอบแบบ** Flow-around

การทดสอบแบบไหลรอบ (Flow-around) ปกติใช้ทดสอบกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) โดยวางก้อนตัวอย่างลงในหลอดทดสอบซึ่งมีพื้นที่ว่างอยู่โดยรอบก้อนตัวอย่าง และเติมสารชะละลายซึ่งจะไหลรอบก้อนตัวอย่าง สารชะละลายดังกล่าวอาจทำการเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องในกรณีที่ศึกษาเป็นช่วงเวลา หรืออาจเปลี่ยนสารชะละลายเป็นครั้งคราว ในแต่ละกรณีนั้นอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวของก้อนตัวอย่าง ตัวอย่างของการทดสอบแบบไหลรอบได้แก่ the ISO Leach Test 6961, ANSI 16-1, NEN 7345 Monolithic Diffusion Test (เนเธอร์แลนด์) และ ASTM C 1220-92 (Static Leaching of Monolithic Waste Forms for disposal of Radioactive Wastes)

2.3 **การทดสอบแบบ** Flow-through

การทดสอบแบบไหลผ่าน (Flow-through) มีความแตกต่างกับการทดสอบแบบไหลรอบ (Flow-around) ตรงที่สารชะละลายนั้นจะไหลผ่านก้อนตัวอย่างซึ่งแปลว่าก้อนตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบนั้นจะต้องมีความพรุนมากกว่าตัวอย่างที่เป็นก้อนแข็ง (Monolithic) พอสมควร นอกเหนือจากนั้นการทดสอบกระทำคล้ายกับในการทดสอบแบบไหลรอบ โดยทั่วไป

1931025๐๐

แล้วการทดสอบแบบไหลผ่านนิยมติดตั้งในรูปของคอลัมน์ (columns) โดยมีช่องทางให้สารชะละลายไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงของการไหลอาจเกิดขึ้นได้จากความนำไฟฟ้าของสารชะละลายหรือการอุดตันของระบบเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กรวมไปถึงการเจริญเติบโตทางชีววิทยา (biological growth) แต่กระนั้นการทดสอบแบบไหลผ่านสามารถติดตั้งเลียนแบบสภาวะจริงที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างการทดสอบแบบไหลผ่านได้แก่ Waste Interface Leach test (แคนนาดา), NVN 7344 Column Test และ ASTM's Column Test

2.4 **การทดสอบแบบ** Soxhlet

การทดสอบแบบ Soxhlet สามารถใช้ในการชะละลายของเสียโดยการให้ของเสียสัมผัสกับสารชะละลายอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบประเภทนี้ สารชะละลายจะถูกเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องด้วยสารชะละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle leachant) จากสารชะละลายก่อนหน้าที่นำสิ่งปนเปื้อนออกไปแล้ว การทดสอบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาให้ได้ปริมาณมากที่สุดและเร็วเท่าที่จะทำได้ การทดสอบ Soxhlet Test (MCC-5s) ของประเทศแคนาดาเป็นตัวอย่างที่ดีของการทดสอบประเภทนี้

2.8.2 **การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ** NEN 7375 (EA NEN 7375, 2004)

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ NEN 7375 นั้นเป็นการทดสอบลักษณะการชะละลายของสิ่งปลูกสร้างและกากของเสียที่ได้รับการขึ้นรูป (Moulded) หรือเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) โดยทั่วไปเรียกว่า การทดสอบแบบแท็งก์ (The Tank Test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบแพร่นี้เพื่อพิจารณาการชะละลายของสารอนินทรีย์จากวัสดุที่ได้รับการขึ้นรูปหรือเป็นก้อนแข็งภายใต้สภาวะที่มีอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาตลอดช่วง 64 วัน การทดสอบพิจารณาธรรมชาติและสมบัติของวัสดุภายใต้การทดลองโดยวางตัวอย่างในสารชะละลายและเปลี่ยนสารชะละลายใหม่ตามเวลาที่กำหนด ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่สนใจที่ชะละลายออกมาถูกนำไปวิเคราะห์ในแต่ละช่วงการทดสอบ ส่วนพีเอชที่การชะละลายเกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัสดุนั้นๆ โดยพื้นฐานของผลการทดสอบแบบแพร่ ปริมาณที่ชะละลายออกมาต่อหน่วยพื้นที่สามารถคำนวณได้สำหรับองค์ประกอบแต่ละชนิด ปัจจัยอื่นๆ สามารถอนุมานได้จากการทดลองรวมทั้งการประเมินการชะล้างที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการชะละลายซึ่งสามารถใช้ในการประเมินการชะละลายในช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าได้ การทดสอบการชะละลายนั้นไม่เหมาะสมสำหรับสารที่สามารถละลายได้ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ มาตรฐานนี้มีพื้นฐานมาจากมาตรฐานลักษณะการชะละลายของประเทศเนเธอร์แลนด์ NEN 7345 โดยรายละเอียดของการทดสอบ EA NEN 7375 แสดงอยู่ในภาคผนวก ฉ

2.9 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม

ปัจจุบันมีการกำหนดมาตรฐานน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภคจากหลายหน่วยงาน อาทิ ของ U.S.EPA (U.S. Environmental Protection Agency) WHO (World Health Organization) และ EU (Europe Union) เป็นต้น ซึ่งเป็นประเทศต่างๆได้รับเอามาตรฐานเหล่านี้ไปบังคับใช้เพื่อกำหนดคุณภาพน้ำดื่มในประเทศ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกเอามาตรฐานน้ำประปาของไทยดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2.8 ซึ่งได้รับเอามาตรฐานของ WHO มาปรับใช้ เพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการชะละลายที่ได้

สำหรับระดับความเสี่ยงต่ำสุด (Minimal Risk Levels : MRLs) ในตารางที่ 2.8 นั้นเป็นค่าที่ประเมินไว้สำหรับสารอันตรายซึ่งมนุษย์สามารถสัมผัสได้ในแต่ละวันโดยที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ โดยค่า MRLs นั้นไม่ได้ตั้งขึ้นเพื่อการประกาศใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับ ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) หรือองค์กรอื่นแต่อย่างใด โดยค่า MRLs สำหรับสารอันตรายแต่ละชนิดนั้นจะแบ่งออกตามระยะเวลาที่สัมผัสได้แก่ เฉียบพลัน (1-14วัน) ระยะกลาง (14 – 364 วัน) และระยะยาว (365 วันขึ้นไป) และเส้นทางของการรับสารอันตรายเหล่านั้นเช่น ทางปาก จากการสูดดม สำหรับการรับสารอันตรายทางผิวหนังนั้นยังไม่มีการระบุ โดยค่า MRLs นั้นมีพื้นฐานมาจากกลุ่มสารที่มีความไวสูง และกลุ่มเป้าหมายที่มีความสัมพันธ์กับมนุษย์ โดย ADSTR ไม่ได้นำค่าที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพมาเป็นพื้นฐานในการกำหนดซึ่งหมายความว่าการสัมผัสสารอันตรายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าค่า MRLs ที่กำหนดไว้ก็ไม่จำเป็นจะต้องมีผลต่อสุขภาพเสมอไป สำหรับค่า MRLs ที่นำมาแสดงเป็นการได้รับโลหะหนักจากการรับประทานเท่านั้น

จากมาตรฐานน้ำดื่มที่ให้ไว้จะเห็นได้ว่าค่ากำหนดของโลหะบางชนิดนั้นมีค่าที่ต่ำมาก เนื่องจากความเป็นพิษต่อผู้บริโภคที่สูง โดยในส่วนต่อไปจะยกตัวอย่างอันตรายจากพิษของโลหะ แหล่งที่มา รวมถึงอาการหากได้รับโลหะนั้นแบบเฉียบพลันและแบบสะสม ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งในการหลีกเลี่ยงแหล่งที่ก่อให้เกิดโลหะหนัก รวมถึงเพิ่มความระมัดระวังหากต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสที่จะสัมผัสกับโลหะหนักเหล่านั้น

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม

สาร		มาตรฐานน้ำประปาการประปานครหลวง [1]	ATSDR Minimal Risk Levels (MRLs) [2]			
		มก./ล.	ระยะสัมผัส (การกิน)	MRL มก./กก./วัน	กลุ่มเป้าหมาย	ปีที่กำหนด
อะลูมิเนียม	Al	0.1	กลาง	1.0	ระบบประสาท	2006
			ยาว	1.0	ระบบประสาท	2006
อาร์เซนิค	As	0.01	เฉียบพลัน	0.005 [5]	ทางเดินอาหาร	2005
			ยาว	0.0003	ผิวหนัง	2005
แบเรียม	Ba	(3)	กลาง	0.7 [6]	ไต	2005
			ยาว	0.6 [6]	ไต	
เบอริลเลียม	Be	(3)	ยาว	0.002	ทางเดินอาหาร	2002
โบรอน	B	(3)	กลาง	0.01	พัฒนาการ	1992
แคดเมียม	Cd	0.003	ยาว	0.0002	ไต	1999
โครเมียม	Cr	0.05	(4)	(4)	(4)	(4)
ทองแดง	Cu	2	เฉียบพลัน	0.01	ทางเดินอาหาร	2004
			กลาง	0.01	ทางเดินอาหาร	2004
เหล็ก	Fe	0.3	(4)	(4)	(4)	(4)
ปรอท	Hg	0.001	(4)	(4)	(4)	(4)
แมงกานีส	Mn	0.4	(4)	(4)	(4)	(4)
นิเกิล	Ni	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)
ตะกั่ว	Pb	0.01	(4)	(4)	(4)	(4)
เซเลเนียม	Se	0.01	ยาว	0.005	ผิวหนัง	2003
สตรอนเทียม	Sr	(3)	กลาง	2	กล้ามเนื้อ	2004
วานาเดียม	V	(3)	กลาง	0.003	ไต	1992
สังกะสี	Zn	3	กลาง	0.3	เลือด	2005
			ยาว	0.3	เลือด	2005

หมายเหตุ: (1) ที่มาจากเวปไซด์ของการประปานครหลวง

(2) ที่มาจากเวปไซด์ของ ATSDR

(3) ไม่ได้ระบุ

(4) ไม่ได้ระบุสำหรับการสัมผัสทางปาก

(5) ประกาศใช้ชั่วคราว

(6) สำหรับรูปเกลือที่ละลายได้ของแบเรียม

2.10 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

โลหะในปัจจุบันแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ อาหาร น้ำ และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งที่มีพิษและไม่มีพิษ โดยพิษจากการสัมผัสโลหะเหล่านี้มีความแตกต่างออกไป ซึ่งเกิดขึ้นทั้งมีผลเล็กน้อยต่อสุขภาพไปจนถึงแก่ชีวิต การดูแลป้องกันเพื่อมิให้ได้รับโลหะเหล่านั้นเข้าสู่ร่างกายเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับพิษของโลหะชนิดต่างๆ โดยพิษของโลหะสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. อะลูมิเนียม (ATSDR, 2006)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากบนโลก โดยมากพบอยู่รวมกับธาตุอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ซิลิกอน และ ฟลูออรีน โลหะอะลูมิเนียมสามารถสกัดได้จากแร่ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ และในน้ำสามารถพบอะลูมิเนียมละลายอยู่ในปริมาณเล็กน้อย อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ลักษณะสีเงินค่อนข้างขาว โดยมากใช้ในอุตสาหกรรมกระป๋องเครื่องดื่ม หม้อ กระทะ เครื่องบิน ผนัง และ ฟอยล์ บางครั้งอะลูมิเนียมผสมกับโลหะชนิดอื่นได้เป็น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งมีความแข็งแรง และหนักกว่า สารประกอบอะลูมิเนียมสามารถใช้ได้ในหลายลักษณะ เช่น ใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และยังสามารถพบได้ในเครื่องโภคภัณฑ์ เช่น ยาลดกรด ยาบรรเทาปวด ใส่ในอาหาร และเป็นส่วนผสมของยาลดการขับเหงื่อ

โดยทั่วไปแล้วการได้รับอะลูมิเนียมนั้นไม่เป็นอันตราย เว้นแต่ว่าจะเป็นปริมาณที่สูง คนงานที่สูดเอาฝุ่นอะลูมิเนียมเข้าไปจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับปอด เช่น อาการไอ ผลเอกซ์-เรย์หน้าอกที่ผิดปกติ นอกจากนี้อาจทำให้เกิดการทำงานที่แย่ลงของระบบประสาท ผู้ป่วยโรคไตจะสะสมอะลูมิเนียมไว้ในร่างกาย และอาจพัฒนาให้เป็นโรคเกี่ยวกับกระดูกหรือสมองซึ่งเป็นผลมาจากการมีอะลูมิเนียมที่สูงเกินไป การศึกษาบางกรณีบ่งชี้ว่าบุคคลที่ได้รับอะลูมิเนียมในปริมาณที่สูงมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer disease: AD) แต่ก็ยังมีข้อโต้แย้งจากการศึกษาอื่นๆ ที่ไม่ปรากฏว่าข้อสันนิษฐานนี้จะเป็นจริง ซึ่งทำให้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าการได้รับอะลูมิเนียมสามารถส่งผลให้เกิดโรคอัลไซเมอร์ได้หรือไม่ นอกจากนี้สารประกอบของอะลูมิเนียมในยาลดการขับเหงื่ออาจทำให้เกิดอาการคันบริเวณใต้วงแขนอีกด้วย

สำหรับผลต่อการสืบพันธุ์ของมนุษย์นั้นยังไม่ทราบเป็นที่แน่ชัด แต่อะลูมิเนียมไม่ปรากฏว่ามีผลต่อการแพร่พันธุ์ของสัตว์ นอกจากนี้ The Department of Health and Human Services (DHHS) และ The Environmental Protection Agency (EPA) ยังไม่ประเมินว่าอะลูมิเนียมมีศักยภาพในการก่อให้เกิดเซลล์มะเร็งในคนหรือไม่ แต่อะลูมิเนียมไม่ทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์

ผลของอะลูมิเนียมที่มีต่อเด็กนั้น สำหรับผู้ป่วยโรคไตในเด็กที่ได้รับอะลูมิเนียมจากการบำบัดด้วยยาทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับกระดูก อะลูมิเนียมในปริมาณสูงเป็นอันตรายต่อตัวอ่อนและสัตว์ที่กำลังพัฒนาเนื่องจากสามารถส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของกระดูกและการพัฒนาของ

ระบบประสาทที่ช้าลง แต่ไม่ปรากฏว่าเด็กจะมีความไวต่ออะลูมิเนียมมากกว่าผู้ใหญ่ อีกทั้งยังไม่ปรากฏว่ามีความแตกต่างระหว่างเด็กและผู้ใหญ่ในแง่ของปริมาณอะลูมิเนียมที่สามารถเข้าสู่ร่างกาย และแหล่งที่สะสมอะลูมิเนียม รวมไปถึงระยะเวลาในการกำจัดออกจากร่างกาย อย่างไรก็ดี อะลูมิเนียมจากมารดาสามารถถ่ายทอดสู่ตัวอ่อนได้ผ่านทางรก และอะลูมิเนียมยังสามารถตรวจพบได้ในน้ำนมมารดาแต่มีเพียงส่วนน้อยที่เด็กทารกจะได้รับ

EPA ได้แนะนำระดับความปนเปื้อนเข้มข้นสูงสุดลำดับที่2 (Secondary Maximum Contaminant Level: SMCL) ไว้ที่ 0.05-0.2 มก./ล. สำหรับอะลูมิเนียมในน้ำดื่ม โดยที่ค่า SMCL นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อมนุษย์และสัตว์หากแต่ขึ้นอยู่กับ รูป รส กลิ่น และ สี The Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ได้พิจารณาว่าปริมาณอะลูมิเนียมในฝุ่นที่คนงานสูดเข้าไปไม่ควรเกิน 15 มก./ลบม. ของอากาศ และ The Food and Drug Administration (FDA) ได้อธิบายไว้ว่าอะลูมิเนียมที่อยู่ในภาชนะทำอาหาร แผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม ยาลดการขับเหงื่อ ยาลดกรด หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอะลูมิเนียมอื่นๆ นั้นโดยทั่วไปแล้วมีความปลอดภัย

2. **อาร์เซนิค** (ATSDR, 2005)

อาร์เซนิคเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติกระจายอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก ในธรรมชาติอาร์เซนิคจะรวมตัวกับออกซิเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ เพื่อสร้างรูปสารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์ อาร์เซนิคในสัตว์และพืชจะรวมตัวกับคาร์บอน และไฮโดรเจนเพื่อสร้างรูปสารประกอบอาร์เซนิคอินทรีย์ สารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์โดยมากแล้วมักใช้ในงานรักษาเนื้อไม้ สารประกอบระหว่าง อาร์เซนิค โครเมต และทองแดง (CCA) นั้นใช้ในการผลิตไม้อัด ซึ่งสาร CCA นั้นในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ประกาศยกเลิกสำหรับการใช้งานเพื่อที่อยู่อาศัย แต่ยังคงใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม ส่วนสารประกอบอาร์เซนิคอินทรีย์ใช้ทำเป็นยาฆ่าแมลง

อาร์เซนิคถูกจัดให้เป็นสารที่มีพิษเป็นลำดับที่ 1 ของ ATSDR จาก 20 อันดับ ซึ่งผลจากการสูดดมสารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์ในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดอาการเจ็บคอและระคายเคืองต่อปอด การรับประทานอาร์เซนิคในปริมาณมากส่งผลถึงแก่ชีวิตได้ สำหรับการได้รับอาร์เซนิคในปริมาณที่ต่ำกว่าทำให้เกิดการอาเจียน และคลื่นไส้ ลดการผลิตเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว หัวใจเต้นผิดจังหวะ เกิดความเสียหายต่อหลอดเลือด และอาจทำให้เกิดความรู้สึกเจ็บปวดเหมือนโดนเข็มทิ่มแทงที่มือและเท้า การรับประทานหรือสูดดมอาร์เซนิคอนินทรีย์ในปริมาณต่ำเป็นเวลานานอาจทำให้ผิวมีสีคล้ำขึ้น และเกิดตาปลาหรือหูดขึ้นที่ผ่ามือ ผ่าเท้าและตามร่างกาย การสัมผัสโดยตรงกับสารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์อาจทำให้เกิดอาการบวม

และแดงได้ ส่วนสารประกอบอาร์เซนิคอินทรีย์นั้นมีความเป็นพิษน้อยกว่า แต่การรับในปริมาณมากก็ส่งผลเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาหลายกรณีแสดงให้เห็นว่าการรับประทานอาร์เซนิคอนินทรีย์เข้าไปทำให้เกิดความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งผิวหนัง และเป็นมะเร็งที่ ปอด กระเพาะปัสสาวะ ตับ ไต และต่อมลูกหมาก การหายใจเอาอาร์เซนิคอนินทรีย์เข้าไปสามารถทำให้เสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งที่ปอดได้ The Department of Health and Human Services (DHHS) ได้พิจารณาให้อาร์เซนิคอนินทรีย์เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ EPA พิจารณาว่าสารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์

สำหรับผลที่มีต่อเด็กนั้นมีผลการศึกษาซึ่งพบว่าเด็กที่ได้รับอาร์เซนิคเป็นเวลานานทำให้ผลการทดสอบไอคิว (IQ) มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ระบุว่าเด็กมีความสามารถน้อยกว่าผู้ใหญ่ในการเปลี่ยนรูปสารประกอบอาร์เซนิคอนินทรีย์ให้อยู่ในรูปของอาร์เซนิคอินทรีย์ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า ด้วยเหตุผลนี้เด็กจึงมีความไวต่อพิษของอาร์เซนิคอนินทรีย์มากกว่าผู้ใหญ่ ยังมีงานวิจัยที่กล่าวว่าการหายใจหรือการกินอาร์เซนิคเข้าไปสามารถทำอันตรายต่อผู้หญิงที่กำลังตั้งครรภ์ และตัวอ่อนในครรภ์ ถึงแม้ว่างานวิจัยหลายงานจะไม่น่าเชื่อถือ แต่งานวิจัยในสัตว์พบว่าการได้รับอาร์เซนิคในปริมาณสูงสามารถทำให้เกิดการป่วยในตัวเมียที่กำลังตั้งครรภ์และทำให้ลูกที่คลอดออกมามีน้ำหนักต่ำ ตัวอ่อนในครรภ์ผิดรูป พิกลพิการ และอาจถึงตายได้ อาร์เซนิคสามารถเดินทางผ่านรกและตรวจพบในเนื้อเยื่อของตัวอ่อนแต่พบน้อยมากในน้ำนม

EPA ได้กำหนดปริมาณอาร์เซนิคที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ และเพิ่มความเข้มงวดรวมไปถึงการประกาศยกเลิกการใช้อาร์เซนิคในยาฆ่าแมลงหลายชนิด สำหรับอาร์เซนิคในน้ำดื่ม EPA กำหนดค่าไว้ที่ 0.01 มก./ล.

3. **แบเรียม** (ATSDR, 2005)

แบเรียมเป็นโลหะที่มีสีเงินค่อนข้างขาว ซึ่งโดยธรรมชาติจะพบแบเรียมอยู่ในสินแร่ปะปนกับองค์ประกอบอื่นๆเท่านั้น โดยจะรวมอยู่กับ ซัลเฟอร์ ออกซิเจน หรือ คาร์บอน ในรูปของสารประกอบแบเรียม สารประกอบแบเรียมใช้มากในอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซ และยังใช้ในการทำสี อิฐ เซรามิก แก้ว และ ยาง สารประกอบแบเรียมซัลเฟตถูกนำมาใช้ในวงการแพทย์เพื่อแสดงการทดสอบทางยา และใช้ในการเอกซ์-เรย์เส้นทางเดินอาหาร

ผลกระทบต่อสุขภาพจากการได้รับสารประกอบแบเรียมชนิดต่างๆนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายในน้ำหรือในกระเพาะของสารประกอบนั้นๆ สารประกอบแบเรียมที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แบเรียมซัลเฟต โดยปกติแล้วไม่มีอันตราย

เมื่อคนได้รับแบเรียมในระดับที่สูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้โดย EPA ในช่วงเวลาเพียงสั้นๆ แบเรียมทำให้เกิดการรบกวนในทางเดินอาหาร และทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรง บางคนที่รับประทานหรือดื่มอาหารที่มีปริมาณแบเรียมสูงกว่าค่าที่พบได้ในทั่วไปในช่วงเวลาสั้นๆ อาจทำให้เกิดการอาเจียน เป็นตะคริวในช่องท้อง ท้องเสีย หายใจลำบาก เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความดันเลือด ใบหน้าชา และกล้ามเนื้ออ่อนแรง การรับประทานหรือดื่มสารประกอบแบเรียมที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในปริมาณมากๆ ส่งผลให้จังหวะการเต้นของหัวใจเปลี่ยนแปลง หรือเป็นอัมพาตหรืออาจถึงตายได้ สัตว์ที่ดื่มแบเรียมเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ไตเกิดความเสียหาย น้ำหนักตัวลดลง และบางตัวเสียชีวิต

The Department of Health and Human Services (DHHS) และ The International Agency for Research on Cancer (IARC) ยังไม่ระบุว่าแบเรียมเป็นสารก่อมะเร็ง EPA ก็เช่นเดียวกัน

ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าเด็กมีความไวต่อพิษของแบเรียมมากหรือน้อยกว่าผู้ใหญ่ ผลการศึกษาหนึ่งในหนูที่กลืนกินแบเรียมพบว่ารุ่นที่เกิดใหม่มีน้ำหนักน้อยลง ซึ่งยังไม่ทราบแน่ชัดว่าผลในมนุษย์จะใกล้เคียงกันหรือไม่

EPA ได้จำกัดค่าความเข้มข้นของแบเรียมในน้ำดื่มไว้ที่ 2 มก./ล. สำหรับในพื้นที่ทำงาน The Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ได้ตั้งค่าจำกัดที่อนุญาตให้มีได้ (Permissible Exposure Limits :PELs) ไว้ที่ 0.5 มก. ของสารประกอบแบเรียมที่ละลายได้ ต่อ ลบม. ของอากาศในสถานที่ทำงาน สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

4. **เบอริลเลียม** (ATSDR, 2002)

เบอริลเลียมเป็นโลหะแข็งสีเทาโดยทั่วไปพบอยู่ในหิน ถ่านหิน ดิน และฝุ่นภูเขาไฟ สินแร่เบอริลเลียมถูกเจาะขึ้นมาทำให้บริสุทธิ์เพื่อใช้ในอาวุธนิวเคลียร์และถังปฏิกรณ์ ผลิตโครงสร้างของอากาศยานและอวกาศยาน เครื่องมือต่างๆ เครื่องเอกซ์-เรย์ และกระจก ออกไซด์ของเบอริลเลียมนำมาใช้ทำเซรามิกที่มีความเฉพาะตัวสำหรับใช้ในงานไฟฟ้าและงานเทคโนโลยีสูง อัลลอยด์ที่ทำจากเบอริลเลียมถูกนำมาใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของยานยนต์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์กีฬา (ไม้กอล์ฟ) และงานทันตกรรม

เบอริลเลียมสามารถเป็นอันตรายได้ถ้าสูดดมเข้าไป ผลที่ได้รับขึ้นอยู่กับปริมาณที่สัมผัส ระยะเวลา รวมไปถึงความไวต่อพิษของแต่ละบุคคล ถ้าปริมาณของเบอริลเลียมในอากาศมีมากพอ (มากกว่า 1,000 มคก./ลบ.ม.) สามารถทำให้เกิดผลฉับพลันได้ ซึ่งมีอาการคล้ายคลึงกับโรคปอดอักเสบ โดยเรียกว่าโรคเบอริลเลียมเฉียบพลัน (acute beryllium disease)

คนงานบางกลุ่ม (ร้อยละ 1-15) มีแนวโน้มที่จะมีความไวต่อเบอริลเลียมมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดอาการบวมพองในระบบทางเดินหายใจได้ สภาวะนี้เรียกว่าโรคจากพิษสะสมของเบอริลเลียม (chronic beryllium disease: CBD) และอาจเกิดขึ้นหลังจากได้รับเบอริลเลียมในอากาศที่สูงกว่ามาตรฐานหลายปี (มากกว่า 0.2 มคก./ลบ.ม.) และผู้ที่มีอาการนี้จะรู้สึกว่าร่างกายอ่อนแอ และเหนื่อย หายใจลำบาก เบื่ออาหาร น้ำหนักลด และอาจมีผลทำให้หัวใจห้องขวามีขนาดใหญ่ขึ้น และอาจเกิดโรคหัวใจได้ ผู้ที่มีความไวต่อเบอริลเลียมบางรายอาจไม่แสดงอาการดังที่กล่าวมาเลย โดยทั่วไปแล้วประชาชนแทบจะไม่มีโอกาสเป็นโรคจากพิษสะสมของเบอริลเลียมได้เนื่องจากในสภาพอากาศทั่วไปมี เบอริลเลียมอยู่น้อยมาก (0.00003-0.0002 มคก./ลบ.ม.)ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับผลต่อสุขภาพของมนุษย์จากการกลืนเบอริลเลียมเนื่องกระเพาะและลำไส้สามารถดูดซึมเบอริลเลียมได้น้อยมาก

การสัมผัสกับเบอริลเลียมเป็นระยะเวลานานสามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอดในคนได้ DHHS และ IARC ได้ลงความเห็นว่าเบอริลเลียมเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ EPA ประเมินความเสี่ยงในการสัมผัสกับเบอริลเลียมด้วยความเข้มข้น 0.04 มคก./ลบ.ม. ตลอดช่วงชีวิตสามารถทำให้มีโอกาสเป็นมะเร็งได้ 1 ใน 1000

EPA ห้ามไม่ให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยเบอริลเลียมปริมาณเฉลี่ย 30 วันที่ความเข้มข้น 0.01 มคก./ลบ.ม. ออกสู่สิ่งแวดล้อม OSHA กำหนดค่าไว้ที่ 2 มคก./ลบ.ม. สำหรับการทำงานวันละ 8 ชั่วโมง

5. **โบรอน** (ATSDR, 1995)

โบรอนเป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่พบในธรรมชาติ โดยมากพบอยู่ร่วมกับสารอื่นเพื่อสร้างเป็นสารประกอบซึ่งเรียกว่า บอเรต สารประกอบของบอเรตรวมไปถึง กรดบอริก เกลือของบอเรตและโบรอนออกไซด์ บริษัทหลายแห่งในสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตส่วนใหญ่ของโลกจากสารประกอบโบรอน บอเรตส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว และยังใช้ในน้ำยาดับเพลิง อุตสาหกรรมฟอกหนัง เครื่องสำอาง วัสดุเกี่ยวกับการถ่ายภาพ สบู่และสารทำความสะอาด เชื้อเพลิงพลังงานสูง นอกจากนี้ยาฆ่าแมลงบางประเภทซึ่งใช้ควบคุมแมลงสาบ และงานรักษาเนื้อไม้ก็มีบอเรตเป็นส่วนผสมด้วย

ปัจจุบันยังมีข้อมูลเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับผลต่อสุขภาพจากการได้รับโบรอนเป็นเวลานานๆ เนื่องจากการศึกษาเกือบทั้งหมดมุ่งประเด็นไปที่การได้รับในระยะสั้น การหายใจเอาโบรอนในความเข้มข้นระดับปานกลางอาจทำให้เกิดการระคายเคืองที่จมูก คอ และดวงตา มีผลต่อระบบสืบพันธุ์ เช่น จำนวนของอสุจิลดลง ซึ่งพบในผู้ชายที่สัมผัสกับโบรอนเป็นเวลานานๆ การศึกษาด้วยสัตว์แสดงผลกระทบต่อปอดจากการหายใจเอาโบรอนความเข้มข้นสูงเข้าสู่ร่างกาย

การรับประทานโบรอนปริมาณมากในช่วงสั้นๆ สามารถทำอันตรายต่อ กระเพาะอาหาร ลำไส้ ตับ ไต และสมอง จากการศึกษาด้วยสัตว์พบผลจากการรับประทานโบรอนต่อลูกอัณฑะของสัตว์ตัวผู้ การเกิดที่ผิดปกติของลูกสัตว์เนื่องจากแม่ได้รับโบรอนในขณะตั้งครรภ์

DHHS, IARC และ EPA ยังไม่ระบุว่าโบรอนเป็นสารก่อมะเร็ง การศึกษากับสัตว์กรณีหนึ่งไม่พบหลักฐานในการเกิดมะเร็งหลังจากที่ได้รับกรดบอริกในอาหารตลอดช่วงชีวิต ซึ่งยังไม่ปรากฏการศึกษาในมนุษย์

EPA อนุญาตให้มีโบรอนใน น้ำมันฝ้ายได้ไม่เกิน 300 มก./ล. ในผลไม้จำพวกส้มและมะนาวไม่เกิน 8 มก./ล. นอกจากนี้หากต้องการทิ้ง โบรอนไตรคลอไรด์ หรือโบรอนไตรฟลูออไรด์สู่สาธารณะมากกว่า 100 ปอนด์ จะต้องทำรายงาน OSHA กำหนดการสัมผัสโบรอนจากการทำงานไว้ที่ไม่เกิน 15 มก./ลบ.ม. สำหรับฝุ่นโบรอนออกไซด์ ในสถานที่ทำงาน 8 ชม./วัน 40 ชม./สัปดาห์

6. แคดเมียม (ATSDR, 1999)

แคดเมียมเป็นธาตุตามธรรมชาติที่พบได้ที่เปลือกโลก โดยทั่วไปอยู่ในรูปแร่ที่รวมตัวกับธาตุอื่น เช่น ออกซิเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ แคดเมียมเกือบทั้งหมดที่ใช้ในสหรัฐถูกสกัดมาจากการผลิตโลหะชนิดอื่น เช่น สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง แคดเมียมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมทั้ง แบตเตอรี่ เม็ดสี เคลือบโลหะ และพลาสติก

แคดเมียมถูกจัดให้เป็นสารที่มีพิษเป็นลำดับที่ 8 ของ ATSDR จาก 20 อันดับ การหายใจเอาแคดเมียมที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่ร่างกายโดยทั่วไปแล้วจะทำความเสียหายแก่ปอด และอาจทำให้เสียชีวิตได้ การรับประทานหรือดื่มน้ำที่มีระดับแคดเมียมสูงจะทำให้เกิดการระคายเคืองที่กระเพาะอาหาร ซึ่งนำไปสู่การอาเจียน และท้องเสีย การได้รับแคดเมียมจากอากาศในระดับต่ำกว่าเป็นเวลานานๆ อาจทำให้เกิดการสะสมของแคดเมียมในไตและอาจก่อให้เกิดโรคไตได้ ผลระยะยาวอื่นๆ คือ เกิดความเสียหายในปอด กระดูกเปราะ สัตว์ที่ได้รับแคดเมียมจากอาหารหรือน้ำ จะทำให้ความดันเลือดสูง เกิดภาวะเลือดขาดธาตุเหล็ก และระบบประสาทหรือสมองได้รับความเสียหาย ส่วนผลที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์จากการดื่มน้ำหรือกินอาหารที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าจะเกิดโรคดังกล่าวหรือไม่ การสัมผัสกับแคดเมียมทางผิวหนังยังไม่ทราบผลต่อสุขภาพทั้งต่อคนและสัตว์

DHHS พิจารณาว่า แคดเมียม และสารประกอบของแคดเมียมอาจมีเหตุผลสมควรให้คาดว่าเป็นสารก่อการมะเร็ง

ผลต่อสุขภาพในเด็กคล้ายกับที่เกิดในผู้ใหญ่ (เกิดความเสียหายกับ ไต ปอด และลำไส้) ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าแคดเมียมจะมีผลต่อความไม่สมประกอบในมนุษย์หรือไม่ แคดเมียมจะไม่

เคลื่อนที่จากแม่สู่ลูกที่กำลังพัฒนาในครรภ์อย่างฉับพลัน แต่บางส่วนสามารถเดินทางผ่านรกได้ นอกจากนี้ยังสามารถพบแคดเมียมได้ในน้ำนมแม่ ลูกสัตว์ที่ได้รับแคดเมียมในปริมาณมากขณะที่อยู่ในครรภ์เกิดการเปลี่ยนแปลงในพฤติกรรม และความสามารถในการเรียนรู้ แคดเมียมยังมีผลต่อน้ำหนักแรกเกิด และกระดูกของสัตว์ที่กำลังพัฒนาอีกด้วย การศึกษาในสัตว์พบว่าเกิดการสะสมของแคดเมียมในร่างกายเพิ่มขึ้นหากอาหารมีปริมาณแคลเซียม โปรตีน หรือ ธาตุเหล็กต่ำ หรืออาหารไขมันสูง

EPA กำหนดปริมาณแคดเมียมในน้ำดื่มไม่เกิน 5 มคก./ล. และไม่อนุญาตให้ใช้แคดเมียมในยาฆ่าแมลง FDA กำหนดปริมาณแคดเมียมในอาหารที่มีสีต้องไม่เกิน 15 ส่วนในล้านส่วน OSHA จำกัดอากาศในพื้นที่ทำงานปริมาตร 1 ลบ.ม.ต้องมีความเข้มข้นของแคดเมียมที่เป็นก๊าซเจือปนไม่เกิน 100 มคก. และความเข้มข้นของแคดเมียมที่เป็นฝุ่นไม่เกิน 200 มคก./ลบม.

7. **โครเมียม** (ATSDR, 2000)

โครเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติพบมากในหิน สัตว์ ต้นไม้ ดิน จากฝุ่นและก๊าซของภูเขาไฟ โครเมียมที่ปรากฏในธรรมชาติมีอยู่หลายรูปที่พบมากได้แก่ โครเมียม(0) โครเมียม (III) และ โครเมียม (IV) โดยโครเมียม (III) เกิดขึ้นตามธรรมชาติและเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายเพื่อสนับสนุนการทำงานของอินซูลินในเนื้อเยื่อของร่างกายซึ่งทำให้สามารถนำน้ำตาล โปรตีน และไขมันไปใช้ประโยชน์ได้ โครเมียม (0) และโครเมียม (IV) เกิดโดยกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรม ซึ่งยังไม่ทราบเกี่ยวกับรสชาติและกลิ่นของมัน โครเมียม (0) ปกติเป็นโลหะแข็งสีเทามีจุดหลอมเหลวสูง การใช้งานหลักสำหรับใช้ทำเหล็กกล้าและทำอัลลอยด์ชนิดอื่น สำหรับโครเมียม (III) ใช้ทำเป็นยาแนวอิฐในเตาเผาที่มีความร้อนสูง ใช้ทำโลหะและอัลลอยด์ นอกจากนี้ยังใช้ทำสารประกอบเคมี สารประกอบโครเมียม เกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของ โครเมียม (III) และโครเมียม (IV) ผลิตโดยโรงงานเคมีและใช้ในงานชุบโครเมียม อุตสาหกรรมผลิตเม็ดสีและสีย้อม อุตสาหกรรมฟอกหนัง งานรักษาเนื้อไม้ ปริมาณที่น้อยลงมาถูกใช้ในงานขุดเจาะ ตัวป้องกันสนิมและการกัดกร่อน สิ่งทอ และเป็นโทนเนอร์ในเครื่องถ่ายเอกสาร

โครเมียม (III) เป็นสารอาหารที่สำคัญที่ช่วยให้ร่างกายใช้ น้ำตาล โปรตีน และไขมัน สำหรับปริมาณที่แนะนำให้รับประทานในแต่ละวันสำหรับผู้ใหญ่คือ 50 - 200 มคก. จากข้อมูลเฉลี่ยในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าผู้ใหญ่ได้รับโครเมียมจากอาหารประมาณวันละ 60 – 80 มคก. ซึ่งแสดงว่ามีผู้ที่ยังได้รับโครเมียม (III) ไม่เพียงพอจากอาหาร ซึ่งอาจส่งผลทำให้ร่างกายเสียความสามารถในการใช้น้ำตาล โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักตัวลด การเจริญเติบโตลดลง การทำงานของระบบประสาทแย่ลง เกิดภาวะคล้ายเป็นโรคเบาหวาน ดังนั้นโครเมียม (III) จึงถูกใช้เป็นอาหารเสริมและมีประโยชน์หากได้รับในปริมาณที่เพียงพอในแต่ละวัน สำหรับ

โครเมียม (IV) นั้นมีความเป็นพิษมากกว่าโครเมียม (III) โดยโครเมียม (IV) ถูกจัดให้เป็นสารที่มีพิษเป็นลำดับที่ 18 ของ ATSDR จาก 20 อันดับ การหายใจเอาสารประกอบโครเมียม (IV) เช่น กรดโครมิก หรือ โครเมียมไตรออกไซด์ เข้าไปในปริมาณสูง (มากกว่า 2 มคก./ลบ.ม.) ทำให้เกิดอาการระคายเคืองจมูก น้ำมูกไหล จาม คัน เลือดกำเดาไหล เป็นแผลพุพอง ผลเหล่านี้จะเกิดขึ้นในคนงานที่ผลิตหรือใช้ โครเมียม (IV) ในช่วงหลายเดือนหรือหลายปี การได้รับโครเมียม (IV) เป็นเวลายาวนานอาจก่อให้เกิดมะเร็งปอด ในคนงานที่ได้รับโครเมียม (IV) ในอากาศที่มีปริมาณสูงกว่าที่พบในธรรมชาติ 100 ถึง 1,000 เท่า โดยมะเร็งปอดอาจเกิดขึ้นมาภายหลังแม้การรับโครเมียม (IV) จะสิ้นสุดลงแล้ว การสูดดมโครเมียม (IV) ปริมาณเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นหรือยาวนานไม่ส่งผลต่อสุขภาพของในประชาชนส่วนใหญ่ อย่างไรก็ดีการมีโครเมียมในที่ทำงานเป็นปริมาณมากส่งผลให้เกิดอาการหืดหอบต่อคนที่แพ้โครเมียม สำหรับการสูดดมโครเมียม (III) นั้นไม่ส่งผลให้เกิดการระคายเคืองในคนส่วนใหญ่ คล้ายกับการสูดดม

การรับประทานโครเมียม (IV) นั้นไม่เป็นอันตราย อย่างไรก็ดีการกินโครเมียม (IV) ในปริมาณมากโดยเจตนาหรือโดยอุบัติเหตุทำให้รู้สึกผิดปกติที่กระเพาะ เป็นแผลพุพอง เกิดอาการสั่นอย่างรุนแรง เกิดความเสียหายต่อไตและตับ หรืออาจทำให้เสียชีวิตได้ สำหรับปริมาณของโครเมียม (IV) ที่ทำให้เกิดอาการเหล่านี้แตกต่างจากปริมาณที่พบในอาหารหรือน้ำอยู่มาก ถึงแม้ว่าโครเมียม (III) จะเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายแต่การได้รับในปริมาณก็ส่งผลเสียได้เช่นเดียวกัน คนงานที่ทำงานกับของเหลวหรือของแข็งที่มีโครเมียม (IV) ผสมอยู่อาจเกิดแผลพุพอง สำหรับคนที่มีการแพ้โครเมียมจะเกิดอาการการบวมแดงอย่างรุนแรง สำหรับโครเมียม (0) ซึ่งไม่เกิดขึ้นเองในธรรมชาตินั้นยังไม่ทราบผลที่มีต่อสุขภาพ แต่มีข้อสันนิษฐานว่าจะไม่ส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังไม่รายงานที่น่าเชื่อถือเกี่ยวผลของโครเมียมกับการสืบพันธุ์ของมนุษย์รวมไปถึงกำเนิดที่ไม่สมประกอบ

เนื่องจากสารประกอบบางประเภทของโครเมียม (IV) มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดมะเร็งที่ปอดดังนั้น DHHS จึงพิจารณาว่า สารประกอบโครเมียม (IV) (แคลเซียมโครเมต โครเมียมไตร-ออกไซด์ ลีดโครเมต สตรอนเทียมโครเมต และ ซิงค์โครเมต) เป็นสารก่อมะเร็งในคน เช่นเดียวกันกับ IARC ซึ่งพิจารณาว่าโครเมียม (IV) นั้นเป็นสารก่อมะเร็งในคน สำหรับ EPA ระบุว่าโครเมียม (IV) ในอากาศเป็นสารก่อมะเร็งและระบุว่า สำหรับโครเมียม (IV) และ โครเมียม (III) ในอาหารและน้ำนั้นยังมีข้อมูลไม่เพียงพอในการพิจารณาว่าเป็นสารก่อมะเร็งหรือไม่

EPA กำหนดค่าสูงสุดของโครเมียม (III) และ โครเมียม (IV) ที่อนุญาตให้มีในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 100มคก./ล. สำหรับปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดโรคนั้น EPA กำหนดค่าไว้ที่ 1,400 มคก./ล. สำหรับการได้รับเป็นเวลา 10 วันในเด็ก 240 มคก./ล.สำหรับการได้รับในระยะที่ยาวขึ้นในเด็ก 840 มคก./ล. สำหรับผู้ใหญ่ และ 120 มคก./ล.สำหรับการได้รับตลอดชีวิตของผู้ใหญ่

8. **ทองแดง** (ATSDR, 2004)

ทองแดงเป็นโลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีมากมายในสิ่งแวดล้อม ในหิน ดิน น้ำ และอากาศ ทองแดงเป็นธาตุที่สำคัญทั้งกับพืชและสัตว์ (รวมถึงมนุษย์ด้วย) ซึ่งหมายความว่าทองแดงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิต ดังนั้น พืชและสัตว์จะต้องดูดซับทองแดงจากการกิน การดื่ม และการหายใจ ทองแดงถูกใช้ในทำเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สายไฟ ท่อน้ำ และแผ่นโลหะเหรียญเพนนีของสหรัฐที่ผลิตก่อนปี 1982 ทำมาจากทองแดงล้วน ในขณะที่เหรียญที่ผลิตหลังปี 1982 จะเคลือบทองแดงไว้ที่ผิวนอกเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถนำทองแดงมาผสมกับโลหะอื่นเพื่อทำเป็นทองเหลือง ท่อทองแดง และ ก๊อกน้ำ สารประกอบทองแดงโดยทั่วไปใช้ในการเกษตรเพื่อรักษาโรคเชื้อราในพืช การปรับปรุงคุณภาพน้ำ งานรักษาเนื้อไม้ งานเครื่องหนัง และ สิ่งทอ

ทุกคนจำเป็นต้องได้รับทองแดงปริมาณเล็กน้อยในแต่ละวัน เนื่องจากทองแดงเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย แต่ทองแดงปริมาณสูงสามารถก่อให้เกิดอันตรายได้ การสูดดมทองแดงที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดการระคายเคืองที่จมูกและลำคอ ส่วนการรับประทานทองแดงในปริมาณมากทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง ความเข้มข้นที่สูงมากๆ สามารถทำอันตรายต่อไต ตับ และอาจถึงแก่ชีวิตได้

ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าทองแดงสามารถทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้หรือไม่ โดย EPA พิจารณาว่าทองแดงไม่สามารถถูกจัดให้อยู่ในประเภทของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์

การได้รับทองแดงความเข้มข้นสูงในเด็กส่งผลที่คล้ายคลึงกับในผู้ใหญ่ ซึ่งยังไม่ทราบว่าปริมาณของทองแดงที่ก่อให้เกิดโรคในเด็กจะเทียบเท่าในผู้ใหญ่หรือไม่ สำหรับการศึกษาในสัตว์ผลที่มีต่อสุขภาพในลูกสัตว์จะรุนแรงกว่าในสัตว์ที่โตแล้วแต่ยังไม่ทราบว่าจะเป็นจริงในมนุษย์หรือไม่ สำหรับทารก และ เด็กที่มีความไวต่อพิษของทองแดงนั้นมีจำนวนน้อยมาก นอกจากนี้ยังไม่ทราบว่าทองแดงสามารถทำให้เกิดการคลอดที่ไม่สมประกอบ หรือผลต่อการพัฒนาด้านอื่นๆในมนุษย์หรือไม่ โดยผลการจากทดลองในสัตว์พบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่สูงส่งผลให้การเจริญเติบโตของตัวอ่อนในครรภ์ลดลง

EPA กำหนดมาตรฐานสำหรับน้ำดื่มว่าจะต้องมีปริมาณทองแดงเข้มข้นไม่เกิน 1.3 มก./ล. The U.S. Department of Agricultural ให้คำแนะนำเกี่ยวกับปริมาณทองแดงที่อนุญาตให้ได้รับในแต่ละวันไม่ควรเกิน 900 มคก.ของทองแดงต่อวัน สำหรับคนที่มีอายุมากกว่า 8 ปีขึ้นไป ส่วน OSHA กำหนดปริมาณทองแดงในอากาศในที่ทำงานต้องไม่มากเกิน 1.0 มก./ลบ.ม. สำหรับฝุ่นทองแดง

9. **ตะกั่ว** (ATSDR, 2005)

ตะกั่วเป็นโลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีสีออกฟ้าอมเทาสามารถพบได้ที่ผิวโลกในปริมาณน้อย ตะกั่วพบได้ในทุกส่วนของสิ่งแวดล้อมโดยมากมาจากกิจกรรมของมนุษย์รวมถึงการเผาเชื้อเพลิง เหมืองแร่ และอุตสาหกรรม ตะกั่วมีการใช้งานในหลายรูปแบบ เช่นในกระบวนผลิตแบตเตอรี กระสุน ผลิตภัณฑ์จากโลหะ (โลหะสำหรับบัดกรี และท่อ) เนื่องจากความเป็นห่วงเกี่ยวกับสุขภาพ ตะกั่วจากก๊าซโซลีน สี ผลิตภัณฑ์เซรามิค วัสดุสำหรับอุดรูเรือ และวัสดุสำหรับเชื่อมท่อจึงมีปริมาณลดลงอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา

ตะกั่วถูกจัดให้เป็นสารที่มีพิษเป็นลำดับที่ 2 ของ ATSDR จาก 20 อันดับ ผลกระทบจากตะกั่วต่อสุขภาพจากการรับประทานหรือจากการหายใจนั้นเหมือนกัน โดยตะกั่วมีผลต่ออวัยวะและระบบเกือบทั้งหมดในร่างกาย สำหรับกลุ่มเป้าหมายหลักของพิษจากตะกั่วคือระบบประสาททั้งในเด็กและผู้ใหญ่ การได้รับตะกั่วเป็นเวลานานในผู้ใหญ่มีผลทำให้ความสามารถจากการทดสอบบางอย่างที่ใช้วัดการทำงานของระบบประสาทลดลง อาจทำให้เกิดอาการอ่อนแรงในนิ้วมือ ข้อมือ และข้อเท้า การได้รับสารตะกั่วยังส่งผลให้ความดันในเลือดสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัยกลางคนและผู้สูงอายุ และอาจทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง การได้รับสารตะกั่วในปริมาณมากสามารถทำให้สมองและไตได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ และสุดท้ายอาจทำให้เสียชีวิตได้ ในผู้หญิงที่กำลังตั้งครรภ์การได้รับตะกั่วปริมาณมากอาจทำให้เกิดการแท้งบุตร นอกจากนี้ในผู้ชายที่รับสารตะกั่วปริมาณมากจะสามารถทำความเสียหายต่ออวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการสร้างตัวอสุจิ

ยังไม่มีข้อสรุปที่พิสูจน์ได้ว่าตะกั่วก่อให้เกิดมะเร็งในคน ส่วนการทดลองในหนูพบว่ามีเนื้องอกในไตเกิดขึ้นจากการได้รับสารประกอบของตะกั่วปริมาณมาก DHHS ได้พิจารณาว่ามีเหตุผลที่จะคาดว่าตะกั่วและสารประกอบตะกั่วนั้นเป็นสารก่อมะเร็งในคน ส่วน EPA นั้นพิจารณาว่ามีความเป็นไปได้ที่ตะกั่วจะเป็นสารก่อมะเร็งในคน สำหรับ IARC ก็พิจารณาว่าตะกั่วมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นสารก่อมะเร็งในคนเช่นกันแต่ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอในการตัดสินใจว่าสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วจะเป็นสารก่อมะเร็งในคนหรือไม่

เด็กมีความอ่อนแอต่อพิษของตะกั่วมากกว่าผู้ใหญ่ เด็กที่กลืนตะกั่วปริมาณมากเข้าไปส่งผลให้เกิดภาวะโลหิตจาง ปวดท้องอย่างรุนแรง กล้ามเนื้ออ่อนแรง และเกิดความเสียต่อสมอง สำหรับเด็กที่กลืนตะกั่วในปริมาณที่น้อยลงมาผลที่เกิดขึ้นต่อการทำงานของสมองและเลือดจะมีน้อยลงมาก แต่ถึงอย่างไรการรับตะกั่วในปริมาณที่น้อยมากก็ยังส่งผลต่อจิตใจและการเจริญเติบโตทางกายภาพของเด็ก สำหรับเด็กที่ยังไม่คลอดสามารถได้รับสารตะกั่วผ่านทางมารดาซึ่งทำให้เกิดการคลอดก่อนกำหนด ทารกมีขนาดเล็ก ความสามารถทางจิตใจของทารกลดลง

เรียนรู้ยาก การเจริญเติบโตลดลงของเด็ก ซึ่งผลเหล่านี้จะมากขึ้นหากได้รับสารตะกั่วปริมาณมากขึ้น ผลบางอย่างอาจจะแสดงตลอดช่วงวัยเด็ก

The Centers for Disease Control and Prevention (CDC) แนะนำให้มีการตรวจหาสารตะกั่วสำหรับเด็กที่มีอายุ 1 และ 2 ปี และในเด็กที่มีอายุระหว่าง 3-6 ปี หากไม่เคยได้รับการตรวจมาก่อน หากอาศัยอยู่ในบ้านหรือไปบ้านที่สร้างก่อนปี 1950 บ่อยๆ หากไปเยี่ยมบ้านที่สร้างก่อนปี 1978 ที่เพิ่งมีการปรับปรุงใหม่ หากมีพี่น้องหรือเพื่อนเล่นที่ได้รับพิษจากสารตะกั่ว โดย CDC กำหนดระดับตะกั่วที่น่าเป็นห่วงสำหรับเด็กอยู่ที่ 10 มก./มล. สำหรับ EPA จำกัดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่มอยู่ที่ 15 มคก./ล.

10. แมงกานีส (ATSDR, 2001)

แมงกานีสเป็นโลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบมากในหินหลายชนิด แมงกานีสบริสุทธิ์มีสีเงินแต่ไม่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยทั่วไปจะรวมตัวกับสารอื่นเพื่อสร้างสารประกอบได้แก่ ออกซิเจน ซัลเฟอร์ หรือ คลอรีน แมงกานีสยังสามารถรวมกับคาร์บอนเพื่อสร้างสารประกอบแมงกานีสอินทรีย์ แมงกานีสเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย สามารถพบได้ในอาหารหลายประเภท เช่นในเมล็ดพืช และ ชา

ในการได้รับแมงกานีสปริมาณมากเป็นเวลานานจากที่ทำงานทำให้เกิดการรบกวนทางสภาวะทางจิตใจและอารมณ์ และทำให้การเคลื่อนไหวร่างกายช้าลงและซุ่มซ่าม อาการเหล่านี้รวมเรียกว่าโรคแมงกานีสซึม (Manganism) คนงานโดยปกติแล้วจะยังไม่เป็นโรคดังกล่าวจนกว่าจะได้รับแมงกานีสเป็นเวลาหลายเดือนหรือเป็นปี โรคแมงกานีสซึม เกิดขึ้นเนื่องจากแมงกานีสเข้าไปทำลายสมองส่วนที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของร่างกาย การได้รับแมงกานีสปริมาณสูงที่ลอยมาตามอากาศ เช่นในโรงหลอมแมงกานีส โรงงานแบตเตอรี มีผลต่อความสามารถบางอย่างเช่น การทำมือนิ่ง การเคลื่อนไหวมืออย่างรวดเร็ว และการรักษาสมดุล นอกจากนี้ยังส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ และความผิดปกติของการทำงานของอวัยวะเพศ

สำหรับผลของแมงกานีสต่อการเกิดมะเร็งในคนนั้นยังไม่มีข้อมูล ส่วนการได้รับแมงกานีสปริมาณมากจากอาหารมีผลให้เพิ่มโอกาสการเกิดเนื้องอกในตับอ่อนของหนูตัวผู้ และเนื้องอกในไทรอยด์ทั้งหนูตัวผู้และตัวเมีย EPA พิจารณาว่าแมงกานีสไม่สามารถจัดประเภทให้เป็นสารก่อมะเร็งในคนได้

การได้รับแมงกานีสที่พอเหมาะในแต่ละวันจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและสุขภาพที่ดีของเด็ก ในมารดาที่กำลังตั้งครรภ์จะมีแมงกานีสเพื่อการพัฒนาของตัวอ่อนในครรภ์ นอกจากนี้แมงกานีสยังสามารถถ่ายทอดผ่านน้ำนมแม่สู่ลูกในระดับที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโตที่สมบูรณ์

เด็กหรือแม้กระทั่งผู้ใหญ่ที่สูญเสียความสามารถในการกำจัดแมงกานีสส่วนเกินในร่างกายอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบประสาท เนื่องจากในช่วงเด็กจะได้รับแมงกานีสสูงกว่าผู้ใหญ่ดังนั้นจึงมีความกังวลว่าเด็กจะมีไวต่อพิษของแมงกานีสที่มากเกินไปได้

ผลการศึกษาในสัตว์บ่งชี้ว่า การได้รับแมงกานีสในปริมาณสูงสามารถทำให้ตัวอ่อนไม่สมประกอบ สำหรับมารดาที่ได้รับแมงกานีสที่มากเกินไปยังไม่มีข้อมูลว่าแมงกานีสที่สูงเกินไปนั้นสามารถส่งไปยังตัวอ่อนในครรภ์หรือในน้ำนมได้หรือไม่

EPA กำหนดมาตรฐานที่ไม่ได้บังคับใช้ในน้ำดื่มไว้ที่ 0.05 มก./ล. The National Research Council ได้แนะนำว่าปริมาณของแมงกานีสที่เพียงพอและปลอดภัยในแต่ละวันอยู่ในช่วง 0.3-1 มก./วัน สำหรับเด็กอายุไม่เกิน 1 ปี 1-2 มก./วัน สำหรับเด็กอายุไม่เกิน 10 ปี และ 2-5 มก./วัน สำหรับเด็กตั้งแต่อายุ 10 ปีขึ้นไป

11. ปรอท (ATSDR, 1999)

ปรอทเกิดในธรรมชาติจากการปล่อยก๊าซของเปลือกโลกในการปะทุของภูเขาไฟ ปกติแล้วปรอทอยู่ใน 3 รูปแบบคือ ปรอทที่เป็นธาตุ เป็นสารประกอบอินทรีย์ และ อนินทรีย์ ปรอทมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญจากการทำเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมกระดาษ ปรอทในบรรยากาศจะกระจายไปทั่วโลกโดยอาศัยลม และกลับสู่พื้นโลกโดยฝนเกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำและ ปลาในทะเลสาบ สารประกอบของปรอทใช้เติมไปในสีเพื่อเป็นสารกำจัดราตั้งแต่ปี 1990 แม้ว่าปัจจุบันสารประกอบตัวนี้จะถูกห้ามใช้ แต่สีเก่าๆ และสีที่ทาไปแล้วก็ยังคงอยู่ นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้ปรอทในเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมสตัด และ อมัลกัมซึ่งใช้ในงานทันตกรรม (มีนักวิจัยหลายคนสงสัยว่า อมัลกัมเหล่านี้มีโอกาสที่จะเป็นแหล่งของพิษปรอท แม้แต่ในยา เช่น mercurochrome และmerthiolate ก็มีปรอทเป็นองค์ประกอบ ยาฆ่าสาหร่าย และวัคซีนสำหรับเด็กล้วนแต่สามารถที่จะมีปรอทแฝงอยู่ได้ทั้งสิ้น

ปรอทถูกจัดให้เป็นสารที่มีพิษเป็นลำดับที่ 3 ของ ATSDR จาก 20 อันดับ โดยส่วนใหญ่เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเข้าไป ปรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์พร้อมที่จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยกระเพาะและลำไส้ (ร้อยละ90-100) ส่วนปรอทในรูปของสารอนินทรีย์แม้จะถูกดูดซึมในปริมาณที่น้อยกว่าแต่ก็มีความสำคัญ (ร้อยละ7-15) อวัยวะเป้าหมายคือ สมอง และไต พิษเฉียบพลันของปรอทอาจเกิดขึ้นได้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และ การผลิตยาฆ่าราเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมสตัด ปรอทเหลวเป็นสิ่งที่ดึงดูดใจต่อเด็กๆ เพราะความที่เป็นสีเงิน และ มีพฤติกรรมเฉพาะเวลาที่หก เด็กๆ มักจะได้รับพิษเฉียบพลันจากการกลืนกินปรอทในเทอร์โมมิเตอร์ที่แตกหรือดื่มยาที่มีปรอทเป็นองค์ประกอบเข้าไป และ เพราะว่าไอปรอทจะเข้มข้นที่ระดับพื้น เด็กที่คลานจึงเป็นอันตรายมากในขณะที่มีปรอทกระจายในช่วงพิธีกรรมทางศาสนา หรือในขณะที่มีการรั่วไหลของ

ปรอท ปรอทที่รั่วไหลออกมายากต่อการทำความสะอาดมาก รวมทั้งส่วนที่ยังเหลือติดพรมก็ยากต่อการตรวจพบด้วย อาการของพิษปรอทเฉียบพลัน ได้แก่ ไอ เจ็บคอ หายใจติดขัด รู้สึกเหมือนมีรสซาติโลหะในปาก ปวดท้อง คลื่นเหียน อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย การมองเห็นไม่ชัดเจน หัวใจเต้นเร็วผิดปกติ และ ความดันโลหิตสูง

พิษปรอทเรื้อรังอาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างถาวรต่อระบบประสาทส่วนกลาง และ ไตปรอทสามารถส่งผ่านในรกจากมารดาสู่ทารกในครรภ์ (และระดับปรอทในทารกมักจะเป็นสองเท่าของที่มีในมารดาด้วย) และ สะสมได้ ซึ่งส่งผลให้สมองทำงานช้า หรือ ถูกทำลาย สมองเป็นอัมพาต ตาบอด เป็นลม และ พูดไม่ได้

อมัลกัมที่ใช้ในทันตกรรมก็ถูกสงสัยว่าจะอาจจะเป็นไปได้ที่เป็นแหล่งของพิษปรอทแบบเรื้อรัง แพทย์บางคนกล่าวว่าอมัลกัมที่ใช้อุดฟันน่าจะเป็นส่วนหนึ่งของคำอธิบายถึงปัญหาเด็กออทิสติกตั้งแต่ช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการนำเอาปรอทอมัลกัมเข้ามาใช้อย่างกว้างขวาง ในการศึกษาทั้งกับสัตว์ และ คนยืนยันว่าพบปรอทจากอมัลกัมในเนื้อเยื่อสัตว์ทดลอง เลือด น้ำคร่ำ หรือ ในปัสสาวะ อย่างไรก็ตาม Dr. Robert M. Anderton แห่งสมาคมทันตแพทย์อเมริกากล่าวว่า ไม่มีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ยืนยันเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการใช้อมัลกัมและอาการหรือความเจ็บป่วยเรื้อรังที่เกิดขึ้น

12. **เซเลเนียม** (ATSDR, 2003)

เซเลเนียมเป็นแร่ธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและแพร่กระจายอย่างแพร่หลายในสิ่งแวดล้อมส่วนมากพบในหินและดิน ในรูปบริสุทธิ์ เซเลเนียมเป็นโลหะที่มีสีเทาไปจนถึงสีดำมีรูปผลึกเป็นทรง 6 เหลี่ยม แต่โดยทั่วไปมักรวมตัวอยู่กับ ซัลไฟด์ เงิน ทองแดง ตะกั่ว หรือ นิเกิล เซเลเนียมเกือบทั้งหมดถูกใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนั้นยังสามารถนำเซเลเนียมมาใช้เป็นอาหารเสริม ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว ทำเป็นเม็ดสีในพลาสติก สี งานเคบือบ หมึก ยาง ในกระบวนการเตรียมการปรุงยา เป็นอาหารเสริมของสัตว์ปีกและปศุสัตว์ การสร้างรูปของยาฆ่าแมลง เป็นส่วนผสมในแชมพูกำจัดรังแค เป็นส่วนผสมในยาฆ่าเชื้อรา สำหรับสารกัมมันตภาพรังสีเซเลเนียมถูกใช้ในวินิจฉัยทางการแพทย์

เซเลเนียมมีทั้งผลดีและผลเสียต่อสุขภาพ โดยร่างกายคนเราต้องการเซเลเนียมในปริมาณต่ำๆ เพื่อการรักษาสุขภาพที่ดี อย่างไรก็ตามการได้รับเซเลเนียมในปริมาณมากสามารถส่งผลเสียต่อสุขภาพได้เช่นกัน การรับประทานเซเลเนียมปริมาณมากเป็นเวลาสั้นๆ อาจทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง การได้รับสารประกอบเซเลเนียมปริมาณมากเป็นเวลายาวนาน สามารถก่อให้เกิดโรคที่เรียกว่า เซเลโนซีส (Selenosis) สัญญาณหลักที่บ่งชี้ของโรคดังกล่าวคือ ผลร่วง เล็บเปราะหักง่าย ระบบประสาทผิดปกติ (เช่น เกิดอาการชา มึนงง

เกิดความรู้สึกแปลกอื่นๆ ที่ปลายแขน) การได้รับเซเลเนียม หรือ เซเลเนียมไดออกไซด์ ชั่วครู่ในอากาศ มีผลทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเส้นทางเดินหายใจ หลอดลมอักเสบ หายใจลำบาก และมีอาการเจ็บท้อง การได้รับสารดังกล่างอย่างใดอย่างหนึ่งในอากาศนานขึ้น สามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ เกิดตะคริวที่หลอดลม ไอ ซึ่งปริมาณของเซเลเนียมที่ก่อให้เกิดอาการเหล่านี้โดยทั่วไปแล้วไม่พบนอกบริเวณทำงาน

ผลการศึกษาในสัตว์แสดงให้เห็นว่า เซเลเนียมปริมาณสูงมีผลต่อการผลิตอสุจิในสัตว์ตัวผู้ และมีผลต่อวงจรสืบพันธุ์ของสัตว์เพศเมีย แต่ยังไม่ทราบว่าในคนจะเกิดโรคเช่นเดียวกันนี้หรือไม่

การศึกษาในห้องปฏิบัติการทั้งของคนและสัตว์พบว่าสารประกอบของเซเลเนียมเกือบทั้งหมดไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง อันที่จริงแล้วการศึกษาในคนมีข้อเสนอแนะว่าการได้รับเซเลเนียมในปริมาณที่ต่ำกว่าที่มีปกติในอาหารอาจทำให้เพิ่มความเสี่ยงที่จะเกิดมะเร็ง IARC ได้พิจารณาว่า เซเลเนียม และสารประกอบเซเลเนียมไม่ถูกจัดอยู่ในประเภทสารที่ก่อมะเร็งในมนุษย์ ส่วน EPA พิจารณาว่ามีสารประกอบเซเลเนียมอยู่ชนิดหนึ่งที่อาจเป็นสารก่อมะเร็งอยู่นั่นคือ เซเลเนียมซัลไฟด์ แต่อย่างไรก็ดีสารประกอบเซเลเนียมซัลไฟด์นี้ไม่พบในอาหารและเป็นสารเคมีที่มีความแตกต่างจากสารประกอบเซเลเนียมที่พบในอาหารและในสิ่งแวดล้อมมาก

ผลต่อร่างกายในเด็กมีความคล้ายคลึงกับในผู้ใหญ่ อย่างไรก้ตามมีการศึกษาหนึ่งพบว่าเด็กอาจมีความไวต่อพิษของเซเลเนียมน้อยกว่าผู้ใหญ่ สารประกอบเซเลเนียมไม่ปรากฏผลต่อการเกิดที่ไม่สมประกอบทั้งในคนและในสัตว์

EPA ห้ามไม่ให้มีเซเลเนียมในระบบจ่ายน้ำสาธารณะเกิน 50 มคก./ล. ATSDR และ EPA พิจารณาว่า การได้รับเซเลเนียมปริมาณ 5 มคก.ต่อน้ำหนักตัว 1 กก. ต่อวัน ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายตลอดช่วงชีวิต

13. สตรอนเทียม (ATSDR, 2004)

สตรอนเทียมเป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติพบได้ในหิน ดิน ฝุ่น ถ่านหินและน้ำมัน สตรอนเทียมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะไม่ใช่สารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งสามารถเรียกว่าเป็นสตรอนเทียม หรือ สตรอนเทียมที่คงตัว สตรอนเทียมในสิ่งแวดล้อมมีสภาวะคงตัวอยู่ 4 ไอโซโทป ^{84}Sr (อ่านว่า สตรอนเทียม แปดสิบ – สี่) ^{86}Sr ^{87}Sr และ ^{88}Sr สารประกอบสตรอนเทียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเซรามิกส์และผลิตภัณฑ์จากแก้ว เม็ดสี หลอดไฟฟลูออเรสเซ็นท์ และยา

สตรอนเทียมสามารถอยู่ในรูปของสารกัมมันตภาพรังสีได้หลายชนิดโดยทั่วไปคือ ^{90}Sr ซึ่งจะเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือในระหว่างที่เกิดการระเบิดของอาวุธนิวเคลียร์ โดย ^{90}Sr มีครึ่งชีวิตอยู่ที่ 29 ปี

การได้รับสตรอนเทียมคงตัวในระดับต่ำไม่แสดงผลกระทบต่อสุขภาพ แต่อาจส่งผลต่อเด็กได้ (ดังจะกล่าวต่อไป) การหายใจหรือรับประทานกัมมันตภาพสตรอนเทียมเข้าไปในระดับต่ำไม่แสดงผลกระทบต่อสุขภาพ ถ้าระดับความเข้มข้นสูงอาจส่งผลต่อไขกระดูก เกิดภาวะโลหิตจาง และ ขัดขวางการจับตัวของเลือด

มีสารประกอบของสตรอนเทียมคงตัวเพียงชนิดเดียวที่อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งได้แก่ สตรอนเทียมโครเมต แต่ทั้งนี้เนื่องจากตัวโครเมต ไม่ใช่สตรอนเทียม การได้รับกัมมันตภาพสตรอนเทียมระดับสูงอาจทำให้เกิดมะเร็ง ซึ่งโรคลูคีเมียได้เคยตรวจพบในคนที่สัมผัสกับกัมมันภาพสตรอนเทียมปริมาณมาก สำหรับการทดลองในสัตว์พบโรคลูคิเมีย มะเร็งในกระดูก จมูก ปอด และ ผิวหนัง IARC ได้ระบุว่า สารกัมมันตภาพสตรอนเทียมเป็นสารก่อมะเร็ง

ยังไม่ปรากฏหลักฐานว่าการสัมผัสกับสตรอนเทียมจะส่งผลต่อการเกิดที่ไม่สมประกอบหรือผลที่เกี่ยวกับพัฒนาการในมนุษย์ สำหรับการเกิดที่ไม่สมประกอบพบได้ในการศึกษาด้วยสัตว์ที่ได้รับสารกัมมันตภาพสตรอนเทียม การได้รับสตรอนเทียมคงตัวในปริมาณสูงในเด็กสามารถทำให้กระดูกมีการเจริญเติบโตลดลง เด็กอาจมีความไวต่อพิษของสารกัมตภาพสตรอนเทียมมากกว่าผู้ใหญ่

EPA กำหนดค่าในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 4,000 มคก./ล. และมี ^{90}Sr ไม่เกิน 8 พิโกคูลี

14. วาเนเดียม (ATSDR, 1995)

วานาเดียมเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เป็นโลหะที่มีสีขาว-เทา และสามารถพบได้บ่อยๆ ในรูปผลึก วานาเดียมบริสุทธิ์จะไม่มีกลิ่น โดยทั่วไปรวมตัวกับธาตุอื่นเช่น ออกซิเจน โซเดียม ซัลเฟอร์ และคลอไรด์ วานาเดียมและสารประกอบของวานาเดียมพบได้ในเปลือกโลก ในหิน แร่เหล็ก และ แหล่งน้ำมันดิบ วานาเดียมสามารถรวมตัวกับโลหะชนิดอื่นเพื่อผลิตเป็นอัลลอยด์ สำหรับวานาเดียมในรูปของวานาเดียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบในโลหะชนิดพิเศษซึ่งใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์ สปริง ลูกปืน (ball bearing) วานาเดียมเกือบทั้งมหดที่ใช้ในสหรัฐถูกนำไปผลิตเป็นเหล็กกล้า ออกไซด์ของวานาเดียมนั้นจะเป็นผงสีเหลืองส้ม หรือเป็นแผ่นสีเทาเข้ม หรือผลึกสีเหลือง นอกจากนี้วานาเดียมยังถูกใช้ผสมกับเหล็กเพื่อผลิตชิ้นส่วนสำคัญในเครื่องยนต์ของอากาศยาน

การได้รับวานาเดียมในปริมาณสูงอาจส่งเสียต่อสุขภาพ ผลกระทบหลักจากการสูดดมคือที่ ปอด คอ และ ดวงตา คนงานที่หายใจเอาวานาเดียมเข้าไปทั้งช่วงเวลาสั้นและยาวบางครั้งจะเกิดอาการ ระคายเคืองที่ปอด ไอ หายใจหอบ เจ็บหน้าอก น้ำมูกไหล และเจ็บคอ ผลกระทบเหล่านี้จะหมดไปภายหลังจากที่หยุดการหายใจในอากาศที่มีการปนเปื้อน ผลที่เกิดขึ้นในสัตว์ใกล้เคียงกับในมนุษย์ นอกจากที่กล่าวมาแล้วยังไม่พบผลกระทบต่อสุขภาพอื่นๆจากวานาเดียมที่พบใน

มนุษย์ สำหรับการรับประทานวานาเดียมเข้าไปนั้นยังไม่ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อสุขภาพในมนุษย์ สำหรับสัตว์การรับประทานวานาเดียมเข้าไปเป็นจำนวนมากทำให้เสียชีวิต สำหรับปริมาณที่ต่ำลงแต่ยังมีความเข้มข้นของวานาเดียมค่อนข้างมากซึ่งสัตว์ได้รับในขณะตั้งครรภ์ให้ผลการคลอดที่ไม่สมประกอบเล็กน้อย สำหรับสัตว์ที่สูดดมหรือรับประทานวานาเดียมเป็นเวลานาน ๆ มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ไต และ ตับ โดยปริมาณของวานาเดียมที่นำมาทดสอบกับสัตว์ที่แสดงผลกระทบต่อสุขภาพมีค่ามากกว่าที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมมากกว่ามาก

DHHS IARC และ EPA ยังไม่ได้จัดให้วานาเดียมเป็นสารก่อมะเร็งต่อมนุษย์ และยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นสารก่อมะเร็งของวานาเดียมในมนุษย์ ไม่มีการเพิ่มขึ้นของเนื้องอกในสัตว์ที่ได้รับวานาเดียมจากน้ำดื่มเป็นเวลานาน

EPA ระบุไว้ว่าหากผู้ใดต้องการทิ้งวานาเดียมออกสู่สิ่งแวดล้อมที่มีปริมาตรตั้งแต่ 1,000 ปอนด์ขึ้นไปจะต้องทำรายงาน OSHA ได้กำหนดค่าจำกัดปริมาณฝุ่นของวานาเดียมเพนโทไซด์ (vanadium pentoxide)ในอากาศไว้ที่ 0.05 มก./ลบ.ม. สำหรับก๊าซที่ 0.1 มก./ลบ.ม. สำหรับอากาศในที่ทำงาน 8 ชม./วัน 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

15. **สังกะสี** (ATSDR, 2005)

สังกะสีเป็นหนึ่งในธาตุพื้นฐานที่พบได้มากบนโลกทั้งใน อากาศ ดิน และในน้ำ และยังมีอยู่ในอาหารแทบทุกชนิด สังกะสีบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีความเงาสีขาวออกฟ้า สังกะสีใช้มากในงานเคลือบเพื่อป้องกันสนิท ในแบตเตอรีแห้ง และผสมกับโลหะชนิดอื่นเพื่อทำเป็นอัลลอยด์ เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ อัลลอยด์จากสังกะสีและทองแดงนั้นเคยใช้ทำเป็นเหรียญเพนนีของสหรัฐด้วย สังกะสีสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นเพื่อสร้างรูปสารประกอบ โดยทั่วไปสารประกอบของสังกะสีจะสามารถพบได้ในพื้นที่เป็นของเสียอันตราย เช่น คลอไรด์ของสังกะสี ออกไซด์ของสังกะสี ซัลเฟตของสังกะสี และ สังกะสีซัลไฟด์ สารประกอบสังกะสีใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตสี ยาง สีย้อม งานรักษาเนื้อไม้ และ ขี้ผึ้ง

สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในอาหาร สังกะสีที่น้อยเกินไปสามารถทำให้เกิดปัญหาในขณะเดียวกัน สังกะสีที่มากเกินไปก็ทำอันตรายได้ อันตรายที่เกินขึ้นโดยทั่วไปแล้วจะเริ่มต้นที่ 10 – 15 เท่า ของที่มนุษย์ต้องการสาหรับการมีสุขภาพที่ดี การกินสังกะสีในปริมาณมากถึงแม้จะเป็นช่วงสั้นๆ แต่ก็สามารถทำให้เกิดอาการตะคริวที่ท้อง คลื่นไส้ และอาเจียน หากได้รับนานขึ้นทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง ระดับคอเรสเตอรอลที่ดีลดลง ยังไม่ทราบผลต่อการสืบพันธุ์ของมนุษย์จากการได้รับสังกะสีปริมาณมาก หนูที่ถูกเลี้ยงด้วยสังกะสีปริมาณมากทำให้เกิดการเป็นหมัน การหายใจเอาฝุ่นหรือควันของสังกะสีเข้าสู่ร่างกายสามารถทำให้เกิดโรคเฉพาะที่เกิดขึ้นระยะสั้น

เรียกว่า "ไข้จากควันของโลหะ" สำหรับผลในระยะยาวจากการหายใจเอาสังกะสีเป็นเวลานานๆ นั้นยังไม่มีข้อมูล

DHHS EPA และ IARC ยังไม่จัดประเภทให้สังกะสีเป็นสารก่อมะเร็ง จากข้อมูลที่ยังไม่สมบูรณ์ในการศึกษาด้วยคนและสัตว์

EPA แนะนำปริมาณของสังกะสีในน้ำดื่มว่าไม่ควรเกิน 5 มก./ล. จากสาเหตุเรื่องรสชาติ และระบุว่าในการทิ้งสังกะสีปริมาณ 1,000 ปอนด์ (หรือ 5,000 ปอนด์ในบางกรณี) จะต้องทำรายงาน