

### บทที่ 3

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 โครเมียม (Chromium)

โครเมียมเป็นธาตุในหมู่ VI B เป็นโลหะสีชาวจึง เป็นมันวาวและแข็งมาก มีความสามารถในการต้านทานการผุกร่อนได้ดี คงความเป็นมันเงาได้นานในอากาศ จึงใช้ทั้งในรูปโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม ในธรรมชาติแร่สำคัญของโครเมียมคือ โครไมต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_4$ ) ซึ่งเป็นแร่ออกไซด์ผสม ถ้าทำการรีดิวซ์แร่นี้ด้วยคาร์บอนจะได้โลหะเจือ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม สำหรับคุณสมบัติของธาตุโครเมียมได้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติของโครเมียม (ัญชลิ, 2535)

เลขอะตอม	24
น้ำหนักอะตอม	51.996
การจัดระดับอิเล็กตรอนรอบนอก	$3d^5 4s^1$
จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)	1890
จุดเดือด(องศาเซลเซียส)	2480
ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )	7.2
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.56
ออกซิเดชันสเตท	2, 3, 6
ค่าความต่างศักย์ (V) : $\text{Cr}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.91

โครเมียมมีการใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมฟอกหนัง ย้อมผ้า ฆนสัตว์ และไหม อุตสาหกรรมผลิตแก้ว อุตสาหกรรมพิมพ์ การผลิตโลหะทนการกัดกร่อน รักษาเนื้อไม้ ใช้ผลิตสีทาอาคาร และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี โดยตัวอย่างการนำโครเมียมไปใช้งานได้แสดงในตารางที่ 3.2

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต โครเมียม (VI) ออกไซด์	ตัวเร่งปฏิกิริยา, ออกซิไดซ์เซอร์ สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต (VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต โครเมียม (VI) ออกไซด์	ป้องกันเชื้อรา และแมลง
อุตสาหกรรมการฟอกหนัง	โครเมียม (III) ออกไซด์	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียม(III) อะซิเตท โครเมียม	ย้อมสีผ้า

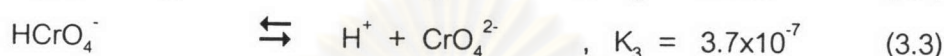
โครเมียมมีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) คือ 0 +2 +3 และ+6 โดยสารประกอบโครเมียมที่พบทั่วไปคือ ไตรวาเลนทโครเมียม (Trivalent Chromium) และเฮกซะวาเลนทโครเมียม (Hexavalent Chromium) ซึ่งในสถานะที่มีออกซิเจน เฮกซะวาเลนทโครเมียมจะมีเสถียรภาพเคลื่อนที่ได้ดีและคงอยู่ได้นาน (Carl และ Robert, 1994; David และคณะ, 1997; Francoise และ Alain, 1991)

### 3.1.1 เฮกซะวาเลนทโครเมียม (Hexavalent Chromium)

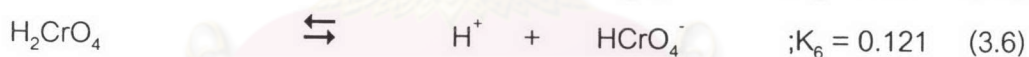
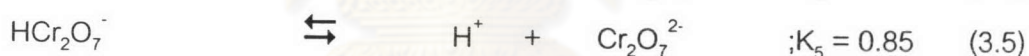
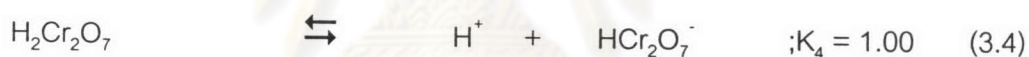
เฮกซะวาเลนทโครเมียมส่วนใหญ่จะเกิดเป็นสารประกอบของออกซิเจน (Oxospecies) คือ โครเมตไอออน ( $CrO_4^{2-}$ ) และไดโครเมตไอออน ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) (Reger; Goode; และ Mecer, 1997) โดยเฮกซะวาเลนทโครเมียมมีแนวโน้มที่จะปรากฏเป็นไดโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกรด และปรากฏเป็นโครเมตไอออนในสารละลายที่มีค่าพีเอชเป็นกลางหรือด่าง (Bruce และ Richmond, 1983) สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมต และโครเมตไอออน เป็นดังสมการที่ 3.1



สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน ไบโครเมตไอออน และโครเมตไอออนเป็นดังสมการ 3.2 และ 3.3



ภายใต้สภาวะที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม จะอยู่ในรูปไบโครเมตไอออน แต่เมื่อพีเอชมากกว่า 6 สารประกอบโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโครเมตไอออน (Eary และ Dhanpat, 1991) สมการเคมีแสดงการแตกตัวให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ไอออน เมื่อสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมละลายน้ำแสดงดังในสมการ 3.1 ถึง 3.6 (จินตนา สายวรรณ, 2544)



### 3.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมเป็นธาตุอาหารหนึ่งที่สำคัญต่อพืชและสัตว์ โดยจะใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและการสังเคราะห์กรดอะมิโนและกรดนิวคลีอิก แต่โครเมียม(VI) และโครเมียม(III) ต่างก็มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยโครเมียม(VI) จะมีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม(III) และมีความเสถียรในการเคลื่อนที่สูงกว่าในสภาวะปกติ ซึ่งองค์การอนามัยโลกได้กำหนดกำหนดค่าทั่วไปคือ คนในวัยเจริญพันธุ์จะสามารถรับโครเมียมเข้าสู่ร่างกายได้ไม่เกิน 50-70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว โดยถ้าได้รับมากๆ พิษของโครเมียม(VI) จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อน และสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ผิวหนังและทางเดินหายใจ ส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสหรือได้รับโครเมียม(VI) ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการทำลายเนื้อเยื่อ และเกิดมะเร็ง ลำไส้ ปอด ตับและไตเสียหาย เลือดเป็นพิษ ผิวหนังระคายเคือง พุพอง และการเกิดการเปลี่ยนแปลงทาง



พันธุกรรม (Mutagenic) ส่วนโครเมียม(III) ถึงแม้ว่าจะไม่มีผลรุนแรงแต่ก็มีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (Mutagenic) โดยทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอาร์เอ็นเอ (RNA) ในเซลล์

### 3.1.3 มาตรฐานการปนเปื้อน

เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงมีการกำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนของโครเมียมในดิน มาตรฐานการปนเปื้อนของโครเมียมในแหล่งน้ำ มาตรฐานการปนเปื้อนของโครเมียมจากน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดต่างๆ และมาตรฐานการปนเปื้อนของโครเมียมในดิน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการปนเปื้อนในน้ำของโครเมียม

สารปนเปื้อน	กฎหมายที่บังคับใช้	ค่ามาตรฐาน	หน่วย
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในน้ำผิวดิน	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)	$\leq 0.05$	มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในน้ำใต้ดิน	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)	$\leq 0.05$	มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521)	$\leq 2.0$	มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในน้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรม	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)	$\leq 0.25$	มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในดินเพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547)	$\leq 300$	มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ที่มา: พระราชบัญญัติ ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

: พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95

ตอนที่ 66 ลงวันที่ 27 มิถุนายน 2521

### 3.2 คุณสมบัติของตัวอย่างดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง

ดินตัวอย่างจากบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ทำการวิเคราะห์ดินตัวอย่างด้วยการร่อนผ่านตะแกรง เพื่อที่จะทำการจำแนกประเภทดิน พบว่าเป็นเนื้อดินประเภทดินตะกอนทราย (Silty Sand) (จุฬาทฤษฎี, 2546) ตามมาตรฐานการจำแนกดินตามขนาดเม็ดดินของกรมช่างสหรัฐอเมริกา (มณฑลเชียร, 2533) ซึ่งสอดคล้องกับผู้ที่เคยทำการศึกษาดินในเขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ที่พบว่าดินบริเวณดังกล่าวเป็นดินประเภท SM แล SM-SC (นริศ, 2536) สำหรับคุณสมบัติอื่นๆของดินตัวอย่าง ได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ทำการศึกษา (จุฬาทฤษฎี, 2546)

คุณสมบัติของดินตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
1. ค่าความชื้น (Moisture Content)	0.8%
2. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon Content)	0.2%
3. ความหนาแน่น (Bulk Density)	2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
4. ค่าความพรุน (Porosity)	0.38
5. พีเอช (pH)	7.4
6. แร่ธาตุหลักในดิน (วิธีวิเคราะห์ : X – Ray Diffraction)	1. Quartz 14.1 % 2. Microcline 43 % 3. Muscovite 29% 4. Kaolinite 13.9 %

### 3.3 ไอออนประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำ

ในน้ำทั่วไปตามธรรมชาติจะมีองค์ประกอบอยู่มากมายไม่ว่าจะเป็น สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบโลหะ และสารประกอบอโลหะ การละลายในน้ำของสารประกอบมักจะละลายไปอยู่ในรูปของไอออน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงไอออนประจุลบที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (David และ Paul, 1997; Joan และ Bert, 1992) ดังนี้

**คลอไรด์ (Cl<sup>-</sup>)** คลอไรด์ในรูปของคลอไรด์ไอออน (Cl<sup>-</sup>) เป็นไอออนอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำดีและน้ำเสียในธรรมชาติ โดยคลอไรด์จะทำให้เกิดรสเค็มในน้ำโดยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของไอออนประจุบวกหลักในน้ำ เช่น ให้รสเค็มที่ความเข้มข้นของคลอไรด์ 250 มิลลิกรัม



ต่อลิตร เมื่อมีไอออนประจุบวกหลักคือ โซเดียมคลอไรด์ พบในน้ำทั่วไปในน้ำเสียชุมชนมากกว่า น้ำเสียธรรมชาติ เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ คลอไรด์ ไอออนในแหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดิน และในดิน พบได้มากในบริเวณที่มีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเล หรือมีองค์ประกอบของดินมีสารประกอบคลอไรด์อยู่มาก

**ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ )** เป็นสารประกอบอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ โดยแหล่งกำเนิดอาจมาจากไนโตรเจนในอากาศ โซเดียมไนเตรต และจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตโดยไนเตรตจะเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่มาก และมีไนโตรเจนออกซิเดชันสเตทอื่น ๆ อีกเช่น ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) แอมโมเนียม แอมโมเนีย ( $\text{NH}_4^+$ ) เป็นต้น โดยไนเตรตเป็นออกซิเดชันที่พบมากที่สุดแหล่งน้ำ โดยมาตรฐานน้ำดื่มของ US EPA กำหนดให้มีปริมาณไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมีผลต่อการเกิดของทารก

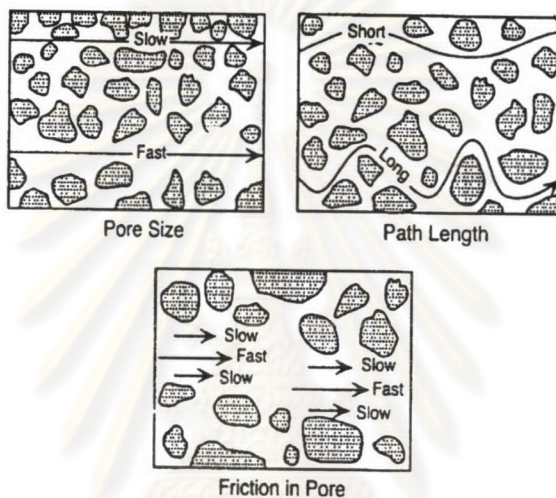
**ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ )** ฟอสฟอรัสโดยทั่วไปส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบประจุลบที่พบโดยทั่วไปในน้ำ โดยส่วนใหญ่ฟอสเฟตในแหล่งน้ำมาจากการชักล้าง การขับถ่ายของสิ่งมีชีวิต น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากภาคเกษตรกรรม ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ตามแต่แหล่งที่ปล่อยฟอสเฟต

**ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ )** ซัลเฟตเป็นสารประกอบอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ โดยพบตั้งแต่ปริมาณน้อยมากไปจนถึงหลายพันมิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะในน้ำทิ้งจากกิจกรรมหรืออุตสาหกรรมที่ใช้ซัลเฟต เช่น การใช้ซัลเฟตในการถลุงเหล็ก

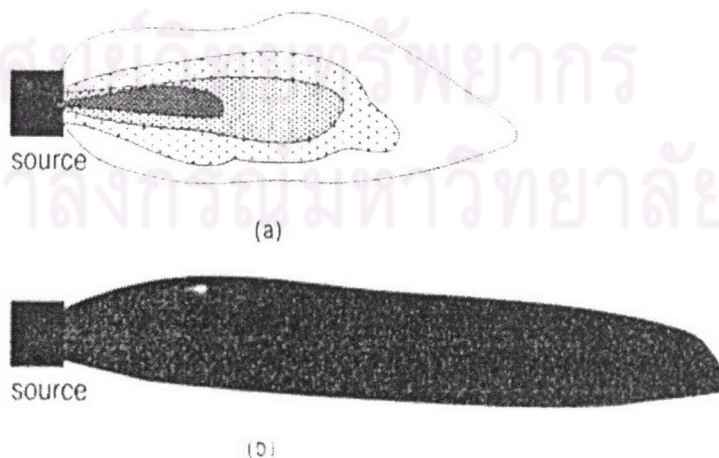
### 3.4 กระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน (Contaminant Transport Mechanisms )

กระบวนการหลักในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินประกอบด้วย การพา, การแพร่, การกระจายตัว, การดูดติดผิว, และการย่อยสลายทางชีวภาพ โดย การพา (Advection) คือ การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนตามการไหลของน้ำใต้ดินด้วยความเร็วการไหลของน้ำใต้ดิน การแพร่ (Diffusion) คือการถ่ายเทมวลในระดับโมเลกุล ซึ่งสารละลายจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ การกระจายตัว (Dispersion) คือกระบวนการของการผสมที่เกิดจากความแปรปรวนของการไหลในตัวกลางที่มีรูพรุน การดูดติดผิว (Adsorption) คือ การที่โมเลกุลสารปนเปื้อนจากสถานะของเหลวในรูปสารละลายไปติดอยู่บนผิวของเม็ดดิน การย่อยสลายทางชีววิทยา (Biodegradation) เป็นกระบวนการการเปลี่ยนรูปจากสารปนเปื้อนไปเป็นอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ในดิน (Philip, Hanadi และ Charles, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ถึง 3.4

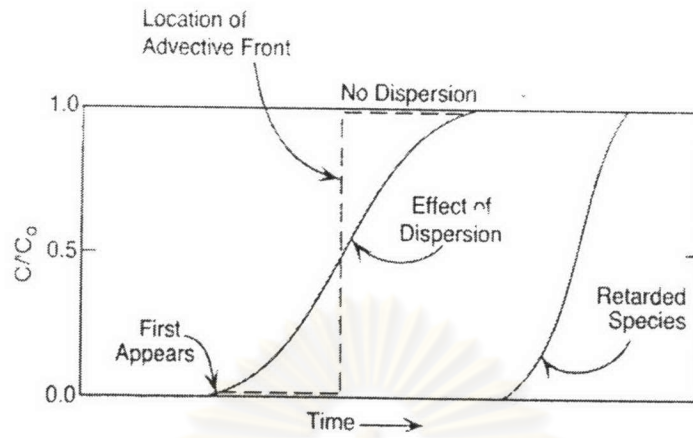
กระบวนการการเคลื่อนที่เหล่านี้ สามารถวิเคราะห์รายละเอียดต่างๆ ทั้งใน ห้องปฏิบัติการและภาคสนาม โดยการใช้การจำลองลักษณะทางกายภาพในรูปของคอลัมน์ขึ้น โดยบรรจุตัวอย่างดินและองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับที่มีในพื้นที่จริง เพื่อใช้ในการหาค่า สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) อัตราการดูดติดผิว และการย่อยสลายทาง ชีวภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ โดยการป้อนสารตามรอยที่ทำด้านหนึ่ง และทำการเก็บข้อมูลที่ทางน้ำออก ในรูปของฟังก์ชันของเวลา และทำเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ Breakthrough Curve ของคอลัมน์ดิน



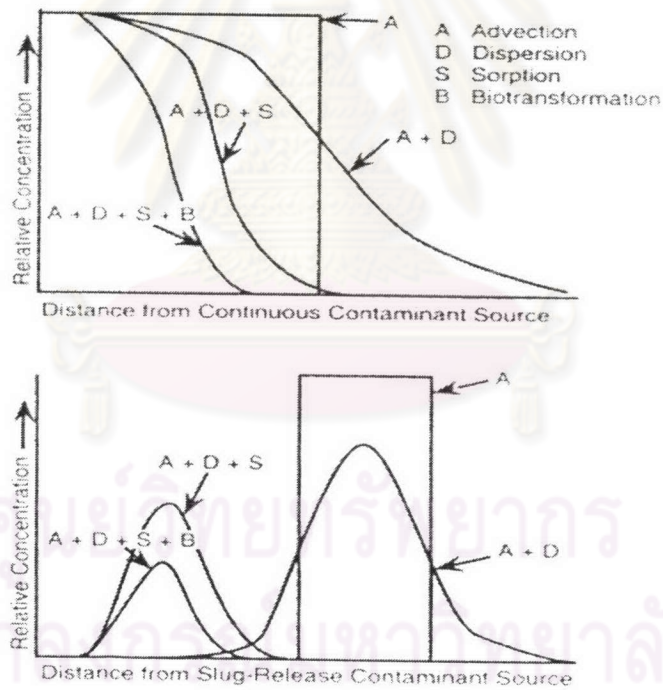
รูปที่ 3.1 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการกระจายตามแนวทิศทางการไหล (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)



รูปที่ 3.2 Plume ของสารปนเปื้อน (Philip, Hanadi และ Charles, 1999) a) การพาร่วมกับการกระจาย b) การพาเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.3 ผลของการกระจายและการหน่วงต่อการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ ของสารปนเปื้อน (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)



รูปที่ 3.4 ผลของการกระจาย การพา และการหน่วง ต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)



### 3.4.1 กระบวนการพา (Advective Process)

การพา คือการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนตามการไหลของน้ำใต้ดิน ด้วยความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความชันของการไหล ( $dh/dL$ ) และค่าความพรุนประสิทธิผล ( $n$ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Darcy ดังสมการ 3.7 และ 3.8 (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)

$$\text{Darcy's Velocity} = q = -K \frac{dh}{dl} \quad (3.7)$$

$$\text{Seepage Velocity} = v_x = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl} \quad (3.8)$$

โดยที่  $n$  คือ ค่าความพรุนประสิทธิผล (Effective porosity)

$\frac{dh}{dl}$  คือ ค่าความชันของการไหล

$K$  คือ ค่าคงที่

ค่า Mass Flux ( $F_x$ ) ของการพาเท่ากับผลคูณของความเร็วในการไหล กับค่าความเข้มข้นของสารละลาย ดังสมการ 3.9 (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)

$$\text{Mass Flux} = f_x = v_x n C \quad (3.9)$$

โดยที่  $C$  คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย

สำหรับบางกรณี แบบจำลองของการพามีประโยชน์ต่อการประเมินการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

### 3.4.2 การแพร่และการกระจายตัว (Diffusion and Dispersion Process)

การแพร่ เป็นกระบวนการระดับโมเลกุล ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (Concentration Gradient) และการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Motion) การแพร่เกิดจากการที่สารละลายในน้ำเดินทางจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่สามารถเกิดขึ้นได้ในที่ที่ไม่มีความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของมวล (Mass Transport) ของการแพร่ได้ผิวดินในรูป 1 มิติ (One Dimension) สามารถอธิบายด้วยกฎการแพร่ข้อแรกของ Fick (Fick's first Law of Diffusion) (Philip, Hanadi และ Charles, 1999)

$$f_x = -D_d \left( \frac{dC}{dx} \right) \quad (3.10)$$

โดยที่  $f_x$  = mass flux ( $M/L^2T$ )  
 $D_d$  = Diffusion Coefficient ( $L^2/T$ )  
 $\frac{dC}{dx}$  = Concentration gradient ( $M/L^3-L$ )

การแพร่มักจะมีผลแคในกรณีที่มีความเร็วในการไหลต่ำ เช่น ในชั้นดินแน่น หรือชั้นดินเหนียว หรือในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของมวลใช้เวลายาวนาน

การกระจายตัว (Dispersion) เป็นการเคลื่อนที่ลักษณะเดียวกันกับการแพร่ แต่เป็นระดับที่สูงกว่า โดยการกระจายตัวเกิดขึ้นจากการแปรปรวนเนื่องจากแรงเสียดทานในช่องทางการไหล ความแตกต่างของความเร็วการไหลระหว่างช่องทาง หรือความยาวของช่องทางในการไหล

จากการศึกษาทดลองแบบคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้เห็นว่าการกระจายตัวเป็นฟังก์ชันของความเร็วในการไหล และค่าคงที่การกระจายตัว (Dispersivity,  $\alpha$ )

### 3.4.3 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของอนุภาค ที่ผิวหน้าหรือช่องระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของ ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งตัวกลางที่มีพื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

สารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำใต้ดินหลายชนิดจะถูกแยกออกจากสารละลายโดยกระบวนการดูดติดผิว ระหว่างที่สารปนเปื้อนเคลื่อนผ่านช่องว่างรูพรุนของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ (Aquifer) ซึ่งจากกระบวนการนี้สารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำใต้ดิน บางส่วนจะถูกแยกออกจากสารละลาย ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนถูกหน่วง (Retardation) ทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนลดลง

#### 3.4.3.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

กระบวนการการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงตามธรรมชาติของที่เกี่ยวข้อง



การดูดติดผิวทางกายภาพบนผิวของตัวกลางเชื่อว่าเป็นคุณสมบัติของแรงระหว่างผิวหน้าของตัวกลางกับโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว ซึ่งเรียกว่า แรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของระบบ ซึ่งได้แก่แรงระหว่างประจุไฟฟ้า (Electrostatic Force) และแรงกระจาย (Dispersion Forces) แรงกระจายมีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดและเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลที่อยู่ก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มมากขึ้น

การดูดติดผิว กระบวนการที่มีเกิดจากหลายกลไกซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวกลางในการดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิว

การดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีระหว่างสารถูกดูดติดผิวกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีจึงมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และมีความสัมพันธ์กับ พลังงานการกระตุ้น (Activation Energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ และไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้บนพื้นผิวตัวกลางได้ จึงอาจกล่าวได้ว่า การดูดติดผิวทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับและเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer)

การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) สามารถจำแนกออกจากการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) ได้เมื่อมีสภาวะเป็นไปได้ตามข้อใดข้อหนึ่ง ดังต่อไปนี้

1. การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นแรงที่เกี่ยวกับสารชนิดเดียวที่สามารถเกิดย้อนกลับได้ คือ สามารถเกิดการคายสารที่ถูกดูดติดผิว (Desorption) ได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างช้าๆเนื่องมาจากกระบวนการแพร่ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการแบ่งถ่ายหรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งการดูดติดผิวทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีและไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Irreversible)

2. การดูดติดผิวทางกายภาพไม่เจาะจงบริเวณที่จะเกิดการดูดติดผิว โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายได้ตลอดทั้งพื้นผิว สามารถวัดพื้นที่ของของแข็งของสารดูดติดผิวได้ในทางตรงกันข้าม การดูดติดผิวทางเคมีเป็นการดูดติดผิวเฉพาะที่ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวทางเคมีจะติดอยู่กับบริเวณที่เจาะจงให้เกิดการดูดติดผิวเท่านั้น

3. ความร้อนที่เกิดขึ้นของการดูดติดผิวทางกายภาพจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจากการดูดติดผิวทางเคมีซึ่งขีดจำกัดบนสุดของการดูดติดผิวทางกายภาพอาจสูงกว่า 20 kcal/mol ของ



สารดูดซับที่มีรูพรุนเล็กมาก ๆ ส่วนความร้อนการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วงค่าที่สูงกว่า 100 kcal/mol และต่ำกว่า 20 kcal/mol (Slejko, 1985)

### 3.4.3.2 การเคลื่อนที่ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

การดูดซับเกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer) ซึ่งมีความสำคัญของการดูดซับ การดูดซับสารละลายโดยการดูดซับที่มีรูพรุน สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การดูดซับขั้นแรก เป็นการขนส่งสารดูดซับทั้งหมด (Bulk Transport) โดยวิธีการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของตัวกลางการดูดซับ เรียกว่า การแพร่ภายนอก (External or film diffusion)
2. การดูดซับขั้นที่สอง เป็นการแพร่ภายใน (Internal diffusion) เกี่ยวข้องกับการขนส่งสารดูดซับจากชั้นฟิล์มผิวหน้าของอนุภาคเข้าสู่พื้นผิวภายใน (Film Transport) โดยวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนที่เต็มไปด้วยของเหลวเข้าถึงช่องว่างของตัวกลางการดูดซับ และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวรูพรุนของตัวกลางนั้น (Surface Diffusion)
3. การดูดซับขั้นที่สาม เป็นการดูดซับของสารดูดซับที่อยู่ในพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งมีการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวกลางการดูดซับ (Pore Diffusion) กล่าวว่าได้เป็นการขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) การดูดซับในขั้นนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่โดยรวม

อัตราการดูดซับทั้งหมดถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งจากกลไกขั้นแรก (External or film diffusion) และขั้นที่สอง (Internal diffusion) อย่างไรก็ตามการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในบางระบบอาจเกิดระหว่างกลไกขั้นที่สาม (Intraparticle Transport) และกลไกขั้นแรก (External or film diffusion)

### 3.4.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 1. ธรรมชาติของการดูดซับ (Nature of the adsorbent)

1.1 พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับผิวของสารดูดซับโดยการดูดซับสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

1.2 ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวของสารดูดติดผิวไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นหารเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับสารดูดติดผิวที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ที่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดติดผิวจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (Zachara และคณะ, 1989)

1.3 สภาพทางเคมีของพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของของสารดูดติดผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุบนผิวหน้าระหว่างการดูดติดผิวทางเคมีจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดติดผิวสารละลายหลายชนิด (Scott และคณะ, 1997)

## 2. ธรรมชาติของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นหากคุณสมบัติของการดูดติดผิวได้แก่ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีการไม่ชอบน้ำมากขึ้นและมีความสามารถละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารดูดติดผิวใหญ่ขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว

## 3. ผลของไฮโดรเจนไอออน

อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าพีเอช เนื่องจากพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ โดยความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายลดลง และจะเพิ่มมากขึ้นถึงขีดสุดเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ pKa

## 4. ผลของไอออนตัวอื่นๆในน้ำ

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในน้ำ เช่น  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  สามารถส่งผลกระทบต่อสำคัญต่อการดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำได้ เช่น การมีแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำจะเพิ่มเนื้อที่ในการดูดติดผิวของกรดซัลฟิวริก เป็นต้น

## 5. ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้น

### 3.4.3.4 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิวของสารละลายเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดติดผิว เมื่อกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวจะมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง ตัวถูกละลายจะเกิดการถูกดูดติดผิวและหลุดออกมาใน

จำนวนเท่าๆกันที่เวลาเดียวกัน จนกว่าจะเกิดสภาวะสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป

กระบวนการดูดติดผิวของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ มักสมมติในเงื่อนไขที่สภาวะสมดุล เพื่อให้สามารถนำไปใช้ออกแบบระบบได้ โดยการแสดงปริมาณสารถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของปริมาณตัวกลางการดูดติดผิวในแง่ของความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ดังนี้

### 1. Linear Adsorption Isotherm

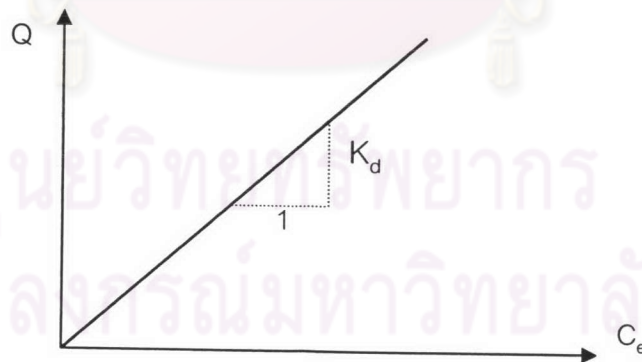
Linear Isotherm เป็นการอธิบายสมดุลของการดูดติดผิวที่ง่ายที่สุดโดย ความปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดติดผิว เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความเข้มข้นของสารที่ละลาย โดยส่วนมากจะอธิบายการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เป็นส่วนมาก โดยสามารถแสดงโดยสมการได้ดังนี้

$$Q = K_d C_e \tag{3.11}$$

โดย  $Q = x/m$  หรือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว ( $x$ ) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว ( $m$ ), (mg/kg)

$K_d$  คือ ค่าคงที่ของการดูดติดผิว (l/kg)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mg/l)



รูปที่ 3.5 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Linear (David และ Paul, 1997)

### 2. Langmuir Adsorption Isotherm

สมการของ Langmuir เป็นสมการที่อธิบายการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว ที่มีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลจะถูกดูดติดผิวบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของการดูดติดผิว
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดติดผิวจะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว



3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวด้วยสภาพทางเรขาคณิตของพื้นผิวนั้นๆ

4. พลังงานในการดูดติดผิวจะมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณพื้นผิวของสารดูดติดผิวนอกจากนี้โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวของสารดูดติดผิวหรือข้ามไปยังโมเลกุลอื่นได้

สมการการดูดติดผิวของ Langmuir แสดงได้ ดังนี้

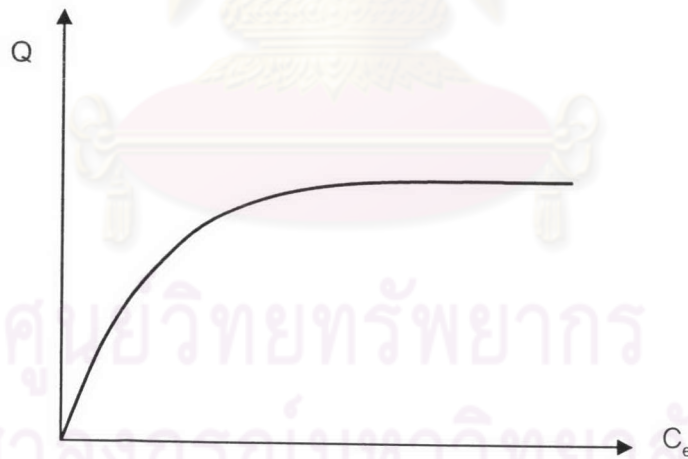
$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.12)$$

โดยที่  $Q = x/m$  หรือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว ( $x$ ) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว ( $m$ ), (mg/kg)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

$a = Q^\circ =$  ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิวที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer (mg/kg)

$b =$  ค่าคงที่ของระบบ



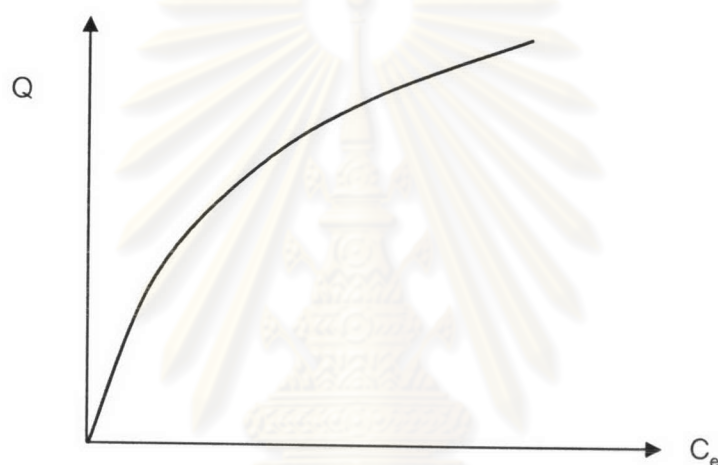
รูปที่ 3.6 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir (David และ Paul, 1997)

### 3. Freundlich Adsorption Isotherm

สมการของ Freundlich เป็นสมการการดูดติดผิวทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงได้ดังนี้

$$Q = \frac{x}{m} = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3.13)$$

โดยที่  $Q$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดบนตัวกลาง (mg/kg)  
 $x$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว (mg)  
 $m$  = น้ำหนักของสารดูดติดผิว (kg)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของตัวถูกละลาย (mg/L)  
 $K_F, \text{ and } \frac{1}{n}$  = ค่าคงที่ของระบบ



รูปที่ 3.7 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich (David และ Paul, 1997)

#### 3.4.3.5 การดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium or Slow or Kinetic Adsorption)

ในหลายๆกรณีที่เราไม่สามารถสมมติให้กระบวนการดูดติดผิวหรือการคายตัวเป็นกระบวนการแบบสมดุลได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ชั้นดินอุ้มน้ำไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Aquifer) เมื่อน้ำและสารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่เร็วมาก ๆ ในส่วนชั้นที่น้ำซึมผ่านได้ดีกว่า หรือช้ามาก ๆ เช่น ในลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำที่เป็นชั้นดินเหนียว อย่างไรก็ตามการแพร่ (Diffusion) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่ในชั้นดินอุ้มน้ำที่ซึมผ่านได้ยาก ดังนั้นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ นี้เป็นลักษณะที่ไม่เป็นสมดุล กล่าวคือ การดูดติดผิวหรือการคายตัวจะเป็นในลักษณะที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent) เช่น ในกรณีเมื่อพอลูเมอร์ปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินอุ้มน้ำที่มีความสามารถซึมผ่านของน้ำที่มากกว่า สารปนเปื้อนจะถูกดูดติดผิวมาก ทำให้สารปนเปื้อนละลายเริ่มน้อยลง โดยในสภาวะนี้การคายตัวอย่างช้า ๆ (Slow Kinetic

Desorption) เริ่มเกิดขึ้นโดยจะเคลื่อนสารปนเปื้อนจากชั้นดินอุ้มน้ำที่ซึมผ่านน้ำได้น้อยไปสู่ชั้นที่ซึมผ่านน้ำได้มากกว่า นี่เป็นตัวอย่างหนึ่งในการล้มเหลวของการฟื้นฟูบำบัด ด้วยระบบ Pump and Treat ซึ่งถึงแม้ว่าจะชะล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง การคายตัวของสารปนเปื้อนก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้การคำนวณระยะเวลาผิดพลาดได้ โดยสามารถแสดงการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium or Slow or Kinetic Adsorption) ได้ดังสมการ ดังนี้

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = k_d [(1 - F)K_d C - S_2] \tag{3.14}$$

การดูดติดผิวทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่ได้ช้าลงและเมื่อความเร็วเฉลี่ยของสารปนเปื้อนละลายน้อยกว่าความเร็วของน้ำในช่องว่างรูพรุน (Pore Water Velocity) ของน้ำใต้ดิน นั่นคือ สารปนเปื้อนละลายจะถูกหน่วงให้การเคลื่อนที่ช้าลง โดยพิจารณาจากค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (Retardation Factor; R) ซึ่งสามารถหาได้สมการการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น โดยการรวมการพา การกระจายตัว การดูดติดผิว ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) \tag{3.15}$$

- S = Q = ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิว (mg/Kg)
- C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนละลาย (mg/L)
- $\rho_b$  = ความหนาแน่นแห้งของดิน (kg/m<sup>3</sup>)
- n = ความพรุนของดิน

### 3.4.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ 1 มิติ (One Dimensional Contaminant Transport Model)

แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิตินี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. สารตามรอยมีความหนาแน่น และความหนืดคงที่
2. ของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อมีการอัดตัว
3. ตัวกลางมีคุณสมบัติเหมือนกันและมีเนื้อเดียวกัน



4. แบบจำลองนี้จะใช้ได้ในการไหลผ่านตัวกลางอิมมิตัวเท่านั้น  
ซึ่งแบบจำลองนี้จะแสดงได้ตามสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} - K_b \quad (3.16)$$

- โดย  $S = Q$  คือ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิว (mg/kg)  
 $C$  คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนละลาย (mg/L)  
 $\rho_b$  คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน (Bulk dry density, kg/m<sup>3</sup>)  
 $n$  คือ ความพรุนของดิน (Porosity)  
 $v$  คือ ความเร็วเฉลี่ยในการไหล (Pore water velocity, cm/hr)  
 $D$  คือ ค่าคงที่การกระจาย (Dispersion coefficient, cm<sup>2</sup>/hr)  
 $K_b$  คือ ค่าคงที่ของการย่อยสลายในระบบ (Decay coefficient, hr<sup>-1</sup>)

ในระบบที่ไม่มีการสร้างหรือย่อยสลายจะได้ว่า

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.17)$$

ในระบบเมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น จะสามารถนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น

Langmuir Adsorption Isotherm

$$S = \frac{abC}{(1 + bC)} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} = K_d \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{ab}{(1 + bC)^2} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{ab}{(1 + bC)^2} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.19)$$

จัดรูปประยุกต์ใหม่ได้เป็น

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.20)$$

โดยที่

$$R = \left[ 1 + \frac{\rho_b}{n} \frac{ab}{(1 + bC)^2} \right] \quad (3.21)$$

ซึ่ง  $R$  คือ ค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (Retardation Factor,-)

### 3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Karel และWilliam (1992) ศึกษาการดูดติดผิวแบบแข่งขันของโครเมตและออกซาเลตบนแร่เหล็กฮีโอไทต์ และนำแบบจำลองการเกาะติดผิวมาเปรียบเทียบ จากการทดลองพบว่า การดูดติดผิวของโครเมตและออกซาเลตเป็นฟังก์ชันกับค่าความเป็นกรด-ด่าง และพื้นที่ผิวแท้จริงในการดูดติดผิวของตัวกลาง (ฮีโอไทต์) โดยโครเมตจะถูกดูดติดผิวบนตัวกลางได้ดีกว่าออกซาเลต เนื่องจากโครเมตแย่งพื้นที่ผิวของออกซาเลต ในการนำแบบจำลองการดูดติดผิวแบบ 2 ชั้นและแบบ 3 ชั้น มาเปรียบเทียบ พบว่าแบบจำลองให้ผลทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดลอง

2. Zachara และคณะ (1987) ศึกษาการดูดติดผิวของโครเมตบนแร่เหล็กอะมอร์ฟัสออกซีไฮดรอกไซด์ เมื่อมีไอออนประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำใต้ดินเจือปนอยู่ โดยทำการศึกษาผลของคาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิเกต โพลแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตบนแร่เหล็กอะมอร์ฟัสออกซีไฮดรอกไซด์ พบว่าไอออนประจุลบมีผลโดยตรงต่อการดูดติดผิวของโครเมต ในขณะที่ไอออนประจุบวกที่ไม่ใช่โลหะหนักจะมีผลน้อยมากต่อการดูดติดผิวของโครเมตบนแร่เหล็กอะมอร์ฟัสออกซีไฮดรอกไซด์

3. Zachara และคณะ (1989) ได้ศึกษาการดูดติดผิวของโครเมตบนดินชั้นบน โดยเลือกใช้ดินตัวอย่างจาก 4 แหล่ง ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งในด้านภูมิประเทศ องค์ประกอบแร่ธาตุ และค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ในการทดลองการดูดติดผิวของโครเมต โดยในการทดลองได้มีการทำไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว การดูดติดผิวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆของดินตัวอย่างทั้ง

4 ชนิด พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟตไอออนและสารประกอบคาร์บอนอนินทรีย์เพิ่มขึ้น โครเมตจะถูกดูดติดผิวลดลง แต่เมื่อมีปริมาณสารประกอบโลหะออกไซด์และพื้นที่ผิวของเม็ดดินเพิ่มขึ้น โครเมตจะถูกดูดติดผิวมากขึ้น

4. Stollenwerk และGrove (1985) ศึกษาพฤติกรรมการดูดติดผิวและการคายตัวของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์บนชั้นดินอุ้มน้ำอะลูเวียล ซึ่งผ่านการสกัดธาตุที่รบกวนผลการทดลอง เช่น แร่เหล็กอะมอร์ฟัส เหล็ก เหล็กออกไซด์ และเหล็กไฮดรอกไซด์ ทำการทดลองหาค่าคงที่ของการกระจายจากการทดลองแบบแบตช์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของโครเมตไอออนในการทดลอง ให้ค่า  $k_d = 52$  ลิตรต่อกิโลกรัม ที่ 0.4 ไมโครโมลของโครเมตต่อลิตร และ ค่า  $k_d = 1.7$  ลิตรต่อกิโลกรัม ที่ 1400 ไมโครโมลของโครเมตต่อลิตร จากผลการทดลองยังพบอีกว่าปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกดูดติดผิวมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น และปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกดูดติดผิวนอะลูเวียลจะถูกทำให้หลุดออกโดยง่ายด้วยน้ำที่ไม่มีโครเมียมปนเปื้อน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย