

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 ดินเบา (diatomaceous earth)

Diatomaceous earth หรือที่รู้จักกันในชื่อต่างๆ เช่น Diatomite, Kieselguhr, Tripolite, Fossil flour เป็นต้น เรียกชื่อภาษาไทยว่า “ดินเบา” ทั้งนี้เนื่องจากแร่มีน้ำหนักเบามาก แร่ดินเบาเป็นหินพวก siliceous ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยซากของ diatoms เป็นส่วนใหญ่ พวกนี้เป็นจุลชีพล่าเหยี่ยวพวก Bacillaria แขนงตัวอยู่ในน้ำจืดหรือน้ำเค็ม diatomaceous sites, shales หรือ mudstone

Diatomite มีอายุอยู่ระหว่างยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) ถึง Recent โครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยฟอสซิล ขนาดละเอียดของพืชเซลล์เดียวในอดีตกาลที่เรียกว่า ไดอะตอม โครงสร้างของไดอะตอมเหล่านี้ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาไร้ผลึกชนิดบริสุทธิ์ โดยที่ไดอะตอมแต่ละ species จะมีโครงสร้างซับซ้อนและมีคุณสมบัติเด่นเฉพาะตัว คือความบริสุทธิ์ การมีความพรุนตัวสูง และมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นผลที่เกิดขึ้นโดยตรงจากรูปร่าง โครงสร้าง และส่วนประกอบภายในของไดอะตอมแต่ละชนิดนั้น คุณสมบัติเหล่านี้ เมื่อรวมกับความคงทนทางด้านเคมีและเป็นตัวนำความร้อน จึงเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำ diatomite ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ

##### 2.1.1.1 การกำเนิดดินเบา

ต้นกำเนิดใหญ่ของแร่ดินเบาคือ diatoms ที่ยังมีชีวิตอยู่ สามารถกำเนิดได้ทั้งในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด เพราะตัวไดอะตอมสามารถอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ ขณะที่มีชีวิตอยู่ตัวไดอะตอมจะสกัดตั้งซิลิกาจากน้ำรอบๆตัว และคายออกมาในรูปเปลือกหอยห่อหุ้มตัวมันเอง

ภายหลังที่ตาย โครงสร้างแบบเปลือกหอยเหล่านี้จะค่อยๆตกตะกอนสู่พื้นของแอ่ง (basin) ทับถมรวมกับตะกอนชนิดอื่นๆ แอ่ง diatomite เกิดขึ้นจากการจับตัวแน่นของตะกอนเหล่านี้ ภายใต้ความร้อนและความกดดัน โดยมักมีทราย ดิน สารคาร์บอนเนต และแร่ภูเขาไฟแทรกเจือปนอยู่ด้วย ส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุจะสลายตัวไปหมด หรือคงเหลืออยู่บ้าง ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อการสะสมตัว ซากเหล่านี้ก็จะสะสมจนมีความหนาแน่นมาก และค่อยๆจับตัวกันแน่นจนกลายเป็นแหล่งดินเบา เมื่อแหล่งสะสมนี้ถูกยกตัวขึ้นพื้นระดับน้ำก็จะเป็นแหล่งแร่ที่มีความสำคัญต่อด้านเศรษฐกิจ แหล่งสะสมใหญ่ๆมักเกี่ยวข้องกับหินภูเขาไฟหนึ่งชนิดหรือมากกว่าสรุปได้ว่า สารละลายซิลิกาจากแหล่งดังกล่าวจำเป็นต้องให้ซิลิกาเป็นเวลานานเพื่อให้ได้ชั้นหินชนิดนี้ในบริเวณความลึกมากๆ

ดินเบาสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ ไดอะตอมไมท์ เป็นหินตะกอนที่มีลักษณะการเกิดเป็นชั้นๆ มีสีเทา ขาว นวล ถึงน้ำตาลอ่อน โครงสร้างประกอบไปด้วยฟอสซิลขนาดเล็กละเอียดของพืชเซลล์เดียวในอดีตกาลที่เรียกว่า ไดอะตอม (Diatom) โครงสร้างของไดอะตอมเหล่านี้ประกอบด้วยซิลิกาไร้ผลึกชนิดบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ ไดอะตอมแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างซับซ้อนและมีคุณสมบัติเด่นเฉพาะตัว เช่น การมีความพรุนตัวสูง การมีพื้นที่ผิวมาก มีความคงทนด้านเคมี และเป็นตัวนำความร้อนต่ำ เหล่านี้เป็นเหตุให้มีการดินเบาไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่ใช้เป็นสารช่วยกรอง (Filter-aids) สารตัวเติม (Functional fillers) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของสี กระดาษ ยาง พลาสติก และวัสดุภัณฑ์ต่างๆ ใช้เป็นสารดูดกลิ่น (Absorbents) สารทำผงขัด สารทำวัตถุฉนวน ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมผลิตกรดกำมะถัน และอื่นๆ

แหล่ง diatomite ที่สำคัญในประเทศไทยพบที่ จ. ลำปาง ในเขต อ.เมือง อ. แม่ทะ และ อ. เกาะคา ผลจากการเจาะสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีครอบคลุมพื้นที่ 120 ตารางกิโลเมตร ที่ความลึก 6 - 450 เมตร มีกว่า 243 ล้านตัน สภาพแหล่งที่พบมีกำเนิดมาจากน้ำจืด ในช่วงยุค Miocene ถึง Recent ฟอสซิลส่วนใหญ่เป็นตัวไดอะตอมชนิด Melosira granulata (HER.) RALFS สำหรับ Melosira granulata เป็นแพลงตอนที่อาศัยอยู่ในน้ำจืดที่มีความอุ่นตามทะเลสาบตื้นๆ มีอายุอยู่ในช่วงไมโอซีนถึงรีเซนต์ (Recent) โดยปกติมีความยาว 10-20 ไมครอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-30 ไมครอน อัตราส่วน ความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4-2.3

### 2.1.1.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ดินเบาบริสุทธิ์ ประกอบด้วย opaline หรือ hydro silica กับสารอนินทรีย์อื่นๆ เล็กน้อย เช่น alumina, เหล็ก, alkaline earth, alkaline metals เป็นต้น ดินเบาดีบอาจมีอินทรีย์สารและพวกเกลือละลาย ขึ้นส่วนของแร่ประกอบหิน หวาย ดิน หรือคาร์บอนเนตในปริมาณต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

### 2.1.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

ดินเบา มักมีสีค่อนข้างอ่อน ขาวหรือ สีครีม คล้ายพวกชอล์ก โดยแหล่งดินเบาที่เกิดในแหล่งน้ำจืดมักจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ด้วย สารที่ปรากฏจะทำให้สีแตกต่างออกไปจากน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาล เขียว หรือเกือบดำ ซึ่งยากแก่การแยกจากสารพวกที่คล้ายถ่านหิน (Peatlike material) โครงสร้างอาจจะเป็นแบบเนื้อแน่นหรือเป็นลาย ความแข็งของอนุภาคดินเบาตามสเกลความแข็งมาตรฐานโมลส์ อยู่ระหว่าง 4.5 - 6.0 แต่ความแข็งปรากฏของแร่ดินเบาเนื้อแน่นประมาณ 1.5 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นปรากฏน้อย และความร่วนของเนื้อดินที่มีรูพรุน ความถ่วงจำเพาะ 2.1-2.2 เมื่อบริสุทธิ์และแห้งมีความถ่วงจำเพาะปรากฏน้อยกว่า 1 ดังนั้นแร่ดินเบาจะลอยน้ำได้จนกว่าจะจมน้ำจืดอิมิตัว ความหนาแน่นปรากฏ 5-16 ปอนด์/ลบ.ฟุต ความหนาแน่นเมื่อเปียก 10-20 ปอนด์/ลบ.ฟุต ดัชนีหักเห 1.42-1.48 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของดินเบา

	Pink	White
pH	6 - 7	8 - 9
True density , g/cm <sup>3</sup>	2.26	2.20
Free fall density , g/cm <sup>3</sup>	0.41	0.21
Packed density , g/cm <sup>3</sup>	0.47	0.24
Void space	0.80	0.90
Surface area , m <sup>2</sup> /g	4.00	1.00

ที่มา : Ottenstein (1963)

ตารางที่ 2.2 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินเบา จากแหล่งแร่ต่างๆ

1. Hollywood, California
2. Dragowistiza near Sofia, Bulgaria
3. TheGurmen deposit, Blagoevgrad, bulgaria

Composition in %	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	73.71	83.50	68.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.25	10.56	13.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.63	2.04	5.30
MgO	1.47	0.67	0.90
CaO	1.72	1.18	1.10
Na <sub>2</sub> O	1.19	2.05	1.80
K <sub>2</sub> O	1.00	2.05	1.80
Loss on ignition	6.94	8.52	-

ที่มา : 1. Pettijohn (1957)

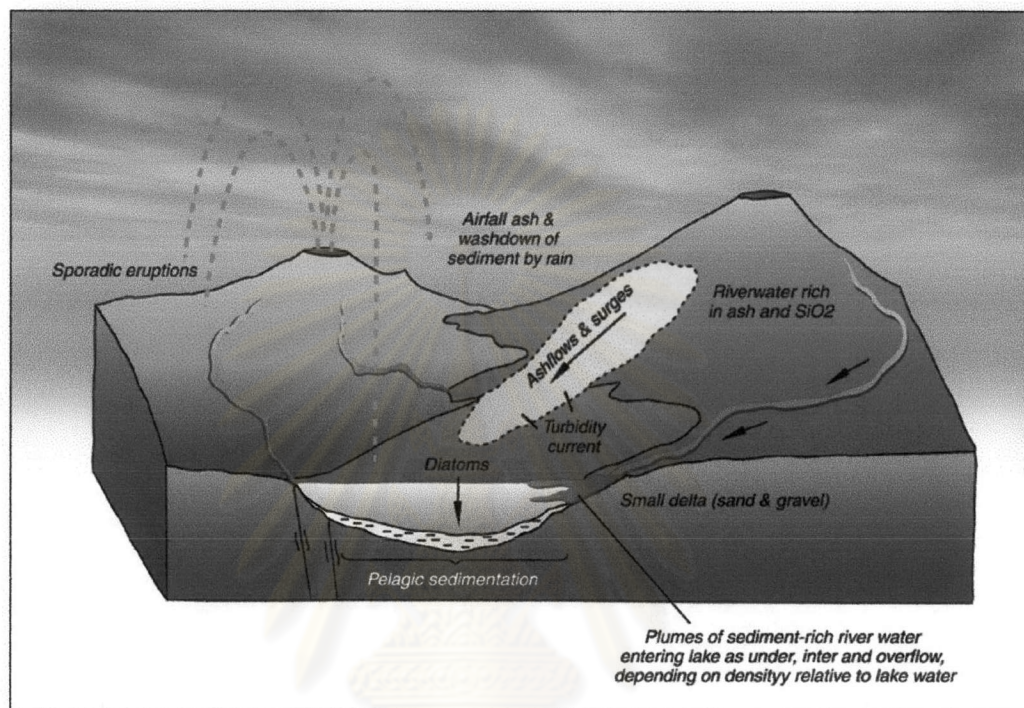
2. Atanasov (1972)

3. Atanasov (1974)

#### 2.1.1.4 การกำเนิดทางธรณีวิทยา

ตอนจบชีวิตโครงสร้างของไดอะตอมที่เป็นโอปอจะตกและสะสมกันเป็นเลนพื้นท้องทะเล (Ooze) กระบวนการนี้เรียกว่า การตกตะกอนก้นสมุทร (Pelagic Sedimentation) จากรายงานโดยเจเลียจะมีอัตราการตกตะกอน 1-4 มิลลิเมตรต่อปี (Kadey and Frederic, 1983) ดินเบาที่เป็นหินตะกอนจะเกิดจากน้ำได้ถูกขับออกไปและมีการอัดกันของเลน แหล่งดินเบา มักเกี่ยวข้องกับภูเขาไฟ การตกของเถ้าธุลีทางอากาศ และน้ำพุ ซึ่งให้สารละลายซิลิกาที่ไดอะตอมสกัดออกมาได้ (Talliaferro, 1933) ความบริสุทธิ์ของดินเบาส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยการทับถมของตะกอนเศษหินหรือวัสดุของภูเขาไฟระหว่างการสะสมตัว สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเนื้อปูนผสม (Calcareous microorganisms) ที่เกิดร่วมกับไดอะตอมในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณเส้นศูนย์สูตรก็มีผลต่อความบริสุทธิ์

ในปัจจุบันตะกอนทางทะเลที่มีไดอะตอมมากจะสะสมในแอ่งทะเลบริเวณที่มีสารอาหารสมบูรณ์ เช่น เขตมหาสมุทรที่มีกระแสน้ำแตกต่างกัน แถบกึ่งแอนตาร์กติก บริเวณพื้นทะเลระดับลึกไม่มีการเคลื่อนไหวของน้ำอย่างแรง ทำให้มีการสะสมตัวของตะกอนจากพื้นทวีป และที่ระดับนี้ไม่ปรากฏสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเนื้อปูนผสม มีรายงานว่าดินเบาเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมทะเลน้ำตื้น ส่วนที่เกิดในน้ำจืด มีการสะสมตัวในทะเลสาบ บึงภูเขาหรือจากปล่องภูเขาไฟ มีการสะสมตัวอย่างอิสระที่มีกระแสน้ำหรือแม่น้ำมาเกี่ยวข้อง น้ำจะไหลเข้ามาโดยการซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แหล่งแร่ในโลกส่วนมากมีการกำเนิดแบบในทะเลสาบ การสะสมตัวที่ละเอียดที่ละเอียดอย่างยาวนานในทะเลสาบทำให้เกิดชั้นหนาของดินเบา ผลจากกระบวนการหลังการสะสมตัวของแหล่งดินเบา มีอิทธิพลต่อความพรุน และระดับชั้นของการประสานตัว ซึ่งมีการแยกตัว การเคลื่อนไหว และการตกตะกอนใหม่ของซิลิกาในไดอะตอม ในที่สุดดินเบาจะเปลี่ยนเป็นเชิร์ต (Chert) (Mathers, 1989) มีรายงานว่าโคลนไดอะตอมมีสัดส่วนของสารอินทรีย์มากมาย ซึ่งแปรสภาพจากรูปร่างที่อ่อนนุ่มของไดอะตอม และอาจจะเป็นหินกำเนิดของแหล่งปิโตรเลียมได้ (Talliaferro, 1933) การยกตัวของแหล่งดินเบา ภายใต้เงื่อนไขการระบายน้ำที่ดี สามารถช่วยขจัดมลพิษพวกอินทรีย์ โดยการเติมออกซิเจน (Oxidation) และการชะละลาย (Congar, 1942)



รูปที่ 2.1 แบบจำลองแสดงการสะสมตัวของดินเบาในทะเลสาบ  
ที่มา : Mathers (1989)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.1.5 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ของดินเบา

#### 1) Filter aids

ประมาณครึ่งหนึ่งของดินเบาที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะถูกนำไปใช้เป็น ตัวช่วยกรองในการผลิตเบียร์ วิสกี้ ไวน์ น้ำอ้อย กรองน้ำในสระว่ายน้ำ น้ำยาซักแห้ง น้ำผักและน้ำผลไม้ต่างๆ

#### 2) Functional fillers

ดินเบาที่ใช้เป็นตัวเติมมีการใช้มากเป็นอันดับสอง โดยใช้เติมเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี พลาสติก ยาง แก๊สซกันท์ ยาสีฟัน ผงขัด และเคมีภัณฑ์ ต่างๆ ในกรณีสีทาบ้าน diatomite ที่ผ่านการแต่งแร่จนมีอนุภาคสม่ำเสมอใช้เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสภาพผิวและสมบัติการทา ซิลิกาไร้ผลึกที่มีอยู่ใน diatomite อยู่ในรูปของโครงสร้างที่กรอบเปราะ เมื่อใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขัดผิวมันจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดแทนที่จะเป็นตัวขูด

#### 3) Adsorption

เนื่องจากมีผิวมากและเบา ผงดินเบาสามารถดูดน้ำได้เป็น 2.5 เท่าของน้ำหนักตัวเอง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ทำวัสดุรองกรองสัตว์ ตัวผสมในยาฆ่าแมลง และในอุตสาหกรรมกระดาษ

#### 4) Miscellaneous

ดินเบาประกอบด้วยซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ และมีความละเอียด จึงเหมาะที่จะนำมาผสมกับปูนขาว เพื่อใช้ทำแผ่นฉนวนชนิด lime-silicate การมีความบริสุทธิ์ คงทนต่อการกัดกร่อนทางเคมี และมีจุดหลอมตัวสูงทำให้ดินเบาเหมาะสำหรับทำอิฐฉนวน และใช้เป็นตัว catalyst carrier ในกระบวนการ hydrogenation และการผลิตกรดกำมะถัน

นอกจากนี้ยังเป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับสังเคราะห์แร่ wollastonite เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกอีกด้วย

## 2.1.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการ ออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยให้สารละลายดังกล่าวสัมผัสกับ ตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ตัวดูดซับชนิดหนึ่งๆมีความสามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆในสารละลายได้แตกต่างกัน จึงสามารถแยกองค์ประกอบต่างๆออกจากกันได้ การจะแยกองค์ประกอบใดออกจากสารละลาย ต้องเลือกชนิดตัวดูดซับให้เหมาะสม

เมื่อพิจารณาถึงสถานะของสารละลายและสถานะตัวดูดซับที่สัมผัสกันแล้วสามารถจำแนกการดูดซับได้เป็น

- การดูดซับของเหลวโดยของเหลว (liquid-liquid adsorption)
- การดูดซับก๊าซโดยของเหลว (gas-liquid adsorption)
- การดูดซับของเหลวโดยของแข็ง (liquid-solid adsorption)
- การดูดซับก๊าซโดยของแข็ง (gas-solid adsorption)

ในส่วนด้านสิ่งแวดล้อมนั้น การดูดซับถูกนำมาใช้ในการบำบัดหรือจัดสารมลพิษทั้งรูปของเหลวและก๊าซอย่างมากมาย ซึ่งกระบวนการนั้นขึ้นกับระบบของการบำบัดว่าจะได้ประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด และโดยทั่วไปกระบวนการดูดซับนี้จะถูกใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในระบบบำบัด

### 2.1.2.1 วัฏภาคตัวถูกดูดซับ (Adsorbate phase)

ลักษณะอย่างหนึ่งของอนุภาคตัวถูกดูดซับ คือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของตัวถูกดูดซับ ลักษณะและความสามารถในการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างลักษณะที่มีสภาวะคล้ายกับของเหลวกับลักษณะที่มีสภาวะคล้ายกับของแข็ง ซึ่งสามารถแยกประเภทของวัฏภาคตัวถูกดูดซับได้เป็น 2 ประเภท คือ วัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase หรือ non-localized phase) และวัฏภาคไม่เคลื่อนที่ (immobile phase หรือ localized phase) ภายในวัฏภาคเคลื่อนที่ ตัวถูกดูดซับจะประพุดิตัวคล้ายของเหลวและโมเลกุลของมันสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ แต่ความสามารถในการเคลื่อนที่นี้ จะถูกจำกัดโดยแรงดึงดูดของของแข็งที่มีต่อโมเลกุลที่ถูกดูดซับ



อันเนื่องมาจากอิทธิพลของสนามศักย์ภาพ (potential field) ของพื้นผิวของแข็ง โดยทั่วไปแล้วการดูดซับทางฟิสิกส์จะเกิดวิฏภาคประเภทนี้ สำหรับกรณีของวิฏภาคไม่เคลื่อนที่ อนุภาคตัวถูกดูดซับจะติดแน่นกับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ แต่ว่ามีโมเลกุลยังคงมีการสั่นไหว (vibration) อยู่ วิฏภาคประเภทหลังนี้เกิดขึ้นเสมอ สำหรับการดูดซับทางเคมี ส่วนในการดูดซับทางฟิสิกส์นั้น จะเกิดวิฏภาคประเภทนี้ได้ก็ต่อเมื่อสนามศักย์ภาพมีความแข็งแรงมากพอเท่านั้น

### 2.1.2.2 การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (Physical and chemical adsorption)

การที่มีโมเลกุลก๊าซถูกดูดซับหรือยึดเกาะบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ ก็เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลก๊าซกับโมเลกุลหรืออะตอมของแข็งหรือตัวดูดซับ พิจารณาจากแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกการดูดซับได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ประเภทที่สอง คือ การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) แรงดึงดูดที่เกี่ยวข้องจะเกิดจากพันธะเคมี ระหว่างโมเลกุลก๊าซกับอะตอมของของแข็ง

### 2.1.2.3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพไม่ได้รวมถึงการถ่ายเทหรือการใช้เลกตรอนร่วมกันและมักจะเกิดพันธะหรือการสัมผัสกันเฉพาะตัว (Individuality of interacting species) จากคุณสมบัตินี้ทำให้การผันกลับ (Reversible interaction) และในการขจัดหรือทำให้ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากพื้นผิวตัวดูดซับที่เรียกว่า การคายสาร (Desorption) นั้นสามารถที่จะย้อนกลับในสภาวะอุณหภูมิเดียวกันได้ ถึงแม้ว่าขบวนการนั้นจะเกิดอย่างช้าๆเนื่องจากอิทธิพลของการแพร่ก็ตาม (Diffusion effects) แต่การดูดซับทางเคมี รวมถึงการเกิดพันธะทางเคมีจะไม่สามารถผันกลับได้

การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วๆ บนพื้นผิวของตัวดูดซับนั้น คือ ไม่มีบริเวณจำเพาะในการเกิดกระบวนการดูดซับ (Site specific) และภายใต้สภาวะความดัน อุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ ในทางตรงข้ามการดูดซับทางเคมีจะเกิดเฉพาะส่วนโมเลกุลที่ถูกดูดซับอย่างพอเหมาะ ในพื้นที่ที่เหมาะสมเท่านั้น และจะเกิดการดูดซับชั้นเดียวเสมอ

แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพส่วนใหญ่เป็นแรง แวนเดอร์วาลส์ความร้อนที่ได้จะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากพันธะเคมี อย่างไรก็ตามความร้อนนี้มักไม่ใช้เป็นข้อเปรียบเทียบความแตกต่างเท่าไรนัก โดยทั่วไปค่าสูงสุดของค่าความร้อน (Upper limit) ของตัวดูดซับมีค่ามากกว่า 20 kcal/mol ขึ้นไป ส่วนค่าความร้อนของการดูดซับทางเคมีมีช่วงต่ำกว่า 20 kcal/mol ถึงมากกว่า 100 kcal/mol ดังนั้นจะเห็นว่า ถ้าใช้ค่าความร้อนบอกลักษณะแตกต่างของทั้งสองกระบวนการแล้ว ต้องใช้ค่าความร้อนที่มีค่าสูงหรือต่ำเท่านั้นจึงจะใช้ได้

#### 2.1.2.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption force)

สำหรับการดูดซับทางกายภาพแล้ว โมเลกุลก๊าซจะเกาะบนผิวพื้นของของแข็งได้ก็ด้วยผลของแรงชนิดต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

แรงแพร่กระจาย (Dispersion force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากการกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณต่างๆ ภายในอะตอมขณะใดขณะหนึ่งไม่เท่ากัน ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีขั้วชั่วขณะหนึ่ง เกิดไดโพล (dipole) ขึ้น สามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลข้างเคียงเกิดมีไดโพลตาม เป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

แรงผลักระยะสั้น (Short-range repulsive force) เป็นแรงผลักระยะสั้นที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลทั้งสองอยู่ใกล้ชิดกันมาก ระยะของแรงผลักระยะสั้นจะมีอยู่ระยะหนึ่งเมื่อพันธะดังกล่าวจะไม่เกิดแรงผลักระยะสั้น อะตอมหรือโมเลกุลสามารถเกิดแรงดึงดูดกันได้ แรงผลักระยะสั้นมีการซ้อนทับกันของหมอกอิเล็กตรอน (Electron clouds) แรงชนิดนี้จะมีผลต่อการดูดซับเมื่อปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับมีค่าสูง เพราะที่สภาวะเช่นนี้โมเลกุลก๊าซจะอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น

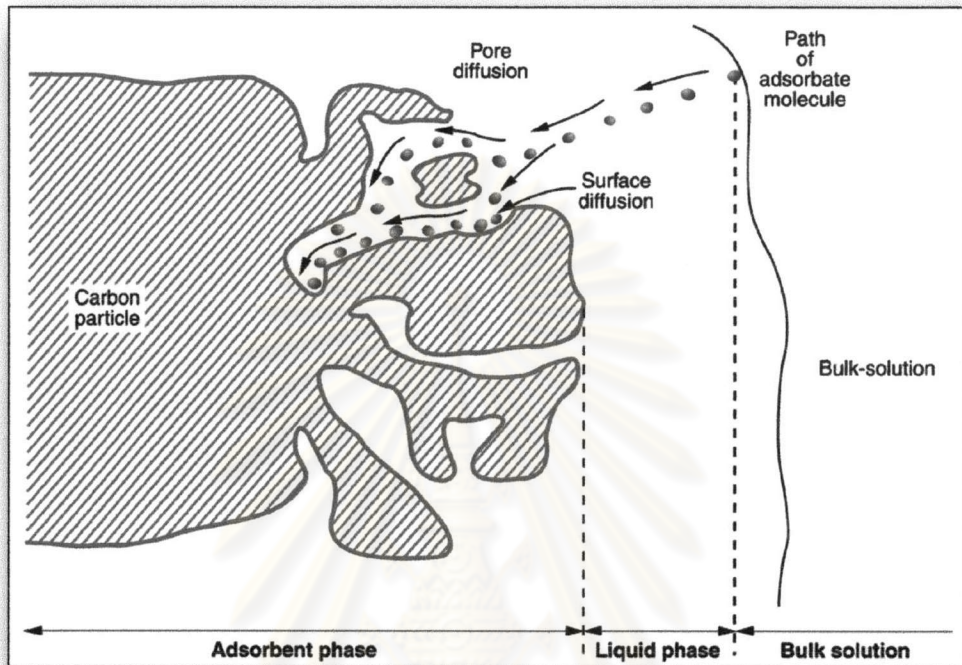
แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงที่มีผลจากการที่อะตอมของของแข็งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอน หรืออะตอมมีขั้ว ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลก๊าซเกิดไดโพล ได้ นอกจากนั้นยังเป็นผลจากการที่โมเลกุลเองมีไดโพลถาวร (Permanent dipole) แรงเหล่านี้จะทำให้เกิดการดูดซับดียิ่งขึ้น

แรงเหล่านี้ต่างก็มีผลต่อการดูดซับ แรงประเภท 1 และ 2 จะเกิดขึ้นเสมอในการดูดซับ ส่วนแรงประเภทที่ 3 จะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ หรือชนิดของก๊าซและของแข็ง ในการคำนวณค่าของแรงแต่ละประเภทนั้นทำไม่ได้ เนื่องจากพื้นผิวของของแข็งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงสามารถอธิบายถึงลักษณะของมันเท่านั้น

#### 2.1.2.5 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมีความสำคัญต่อการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) คือ

- 1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ
- 2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวชั้นตอนหนึ่ง
- 3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน  
ที่มา : Montgomery (1985)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และ อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ โดยกลไกของการดูดซับภายนอกของตัวดูดซับที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวดูดซับ สำหรับตัวดูดซับที่มีโพรง อัตราของการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Transport ดังนั้นอัตราการดูดซับจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวดูดซับ Mathews และ Zayas (1989) กล่าวว่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายของมวลภายนอก จะประมาณได้ว่าคงที่สำหรับขนาดอนุภาคคาร์บอนที่อยู่ในช่วง 300-900 (50/70 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน ถึง 20/25 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน) และจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

#### 2) ลักษณะของตัวดูดซับ

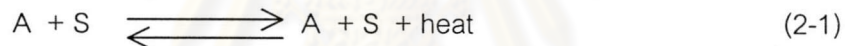
ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้ คือ น้ำ โดยตัวถูกละลายที่ละลายน้ำได้ดี หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย

### 3) พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดติดอย่างค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้ พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ อีกด้วย

### 4) อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermal) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น แสดงดังสมการ 2-1



ที่ซึ่ง A คือสารถูกดูดซับ และ S คือ พื้นผิว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา นอกจากนี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่ออุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

### 5) ความดันป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนา และ เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกจึงเป็นปัจจัยการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความดันป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

## 6) เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว Lee, Crittenden, Snoeying และ Ari (1983) กล่าวว่า เวลาสัมผัสถึงเปล่าของสารดูดซับ และความเข้มข้นของน้ำเข้าของสารชีวมีคเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของชั้นคาร์บอน โดยถ้าเวลาสัมผัสถึงเปล่าเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของน้ำลดลงแล้ว อายุการใช้งานของถังคาร์บอนจะนานขึ้น เวลาสัมผัสที่ใช้ในการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น พื้นที่ผิวในการดูดซับ ลักษณะขนาดของโพรง ชนิดและขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับในสารละลาย และชนิดของคาร์บอน

### 2.1.2.7 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกกำจัดอย่างหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลานาน ดังที่ทราบได้จากการใช้ถ่านเพื่อกำจัดกลิ่นและรสของน้ำซึ่งมีการบันทึกไว้เป็นภาษาสันสกฤตมานานกว่า 2,000 ปี การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่เริ่มจากที่มีผู้ค้นพบว่าถ่านสามารถกำจัดสีของสารละลายได้ จึงมีการพัฒนาคุณสมบัติของถ่านเรื่อยมาจนกระทั่งได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษ การดูดซับจึงจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม

ประโยชน์จากการดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น

- การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากน้ำดื่ม
- การกำจัดกลิ่น รส และสีออกจากน้ำดื่ม
- การกำจัดสีออกจากน้ำมันพืช
- การบำบัดน้ำเสียหรือของเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งในการะบวนการทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical process) หรือในกระบวนการบำบัดขั้นที่ 3 (Tertiary treatment)
- แยกพาร์ฟีนและไอโซพาร์ฟีนออกจากกัน

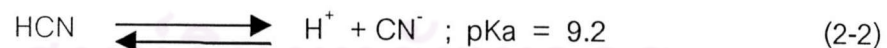
### 2.1.3 ไชยาไนต์

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์

#### 2.1.3.1 คุณสมบัติทางเคมีของไชยาไนต์

ไชยาไนต์ (Cyanide) หมายถึง ไชยาไนต์ไอออนทั้งหมด ในสารประกอบ ไชยาไนต์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในรูปของไชยาไนต์ไอออน (CN<sup>-</sup>) ในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไป และในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ จะพบไชยาไนต์ทั้งในรูปของไชยาไนต์ไอออนและสารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์ ประเภทของไชยาไนต์ที่สำคัญด้านการจัดการน้ำเสีย ได้แก่

1) ไชยาไนต์อิสระ (Simple cyanide) หมายถึง ไชยาไนต์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไชยาไนต์ (HCN) หรือกรดไฮโดรไชยานิก (Hydrocyanic acid) และไชยาไนต์ไอออน (CN<sup>-</sup>) ไฮโดรเจนไชยาไนต์เป็นกรดอ่อนที่ระเหยได้ง่าย สัดส่วนของไชยาไนต์ไอออนต่อโมเลกุลของไฮโดรเจนไชยาไนต์นั้น จะขึ้นอยู่กับค่า pH และค่าคงตัวของการแตกตัวเป็นไอออน (Ka) ของโมเลกุลไฮโดรเจนไชยาไนต์ (Ka=4.6×10<sup>-10</sup> ที่ 20-25 องศาเซลเซียส) ตามสมการ 2-2 ดังนั้นในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไป ส่วนใหญ่จะพบไชยาไนต์ในรูปของไฮโดรเจนไชยาไนต์



2) สารประกอบของไชยาไนต์กับโลหะอัลคาไล ได้แก่ โพตัสเซียมไชยาไนต์ (KCN) และโซเดียมไชยาไนต์ (NaCN) เป็นต้น สูตรทั่วไปคือ A (CN)<sub>x</sub>

เมื่อ A หมายถึง โลหะอัลคาไล หรือ แอมโมเนียม (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

X หมายถึง วาเลนซ์ของโลหะอัลคาไล (A) หรือ จำนวนของไชยาไนต์ไอออน

โพตัสเซียมไชยาไนต์และโซเดียมไชยาไนต์ เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร ระเหยได้ง่าย มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีกลิ่นเหม็นละลายน้ำได้ดี ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นกลางความเข้มข้นจะลดลงร้อยละ 80 ในระยะเวลา 3 วัน มีความเป็นพิษสูงมากเมื่อสูดดมเข้าไปจะระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ และระคายเคืองต่อผิวหนัง



3) สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะหนัก ได้แก่ คอปเปอร์(II)ไซยาไนด์  $\text{Cu}(\text{CN})_2$  ซิลเวอร์ไซยาไนด์ ( $\text{AgCN}$ ) และซิงค์ไซยาไนด์ ( $\text{Zn}(\text{CN})_2$ ) เป็นต้น เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมาก แต่จะละลายได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของไซยาไนด์ของโลหะอัลคาไลน์ ประกอบอยู่ด้วย

4) สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ ได้แก่ โปตัสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ ( $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) และโปตัสเซียมโคบอลโตไซยาไนด์ ( $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$ ) เป็นต้น สูตรทั่วไปคือ  $\text{A}_y\text{M}(\text{CN})_x$

เมื่อ A หมายถึง โลหะอัลคาไลน์

M หมายถึง โลหะหนัก (ได้แก่ Fe, Cd, Cu, Ni, Ag, และ Zn)

X หมายถึง จำนวนไซยาไนด์ไอออน

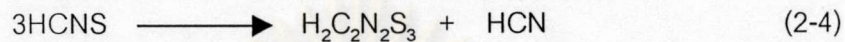
Y หมายถึง จำนวนอะตอมโลหะอัลคาไลน์

สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสีหรือกับแคดเมียมสามารถแตกตัวได้เกือบสมบูรณ์ ในสารละลายเจือจาง และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ pH เป็นกลาง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิลหรือกับทองแดง (Copper (I)) หรือกับเงิน (Silver) จะมีความเสถียรภาพสูง แต่มีความเป็นพิษน้อยกว่ากรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเฟอริก (Ferric) หรือ โคบอลท์ (Cobalt) จะมีความเสถียรภาพสูงมาก มีความเป็นพิษสูง และสามารถถูกสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและได้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ออกมา

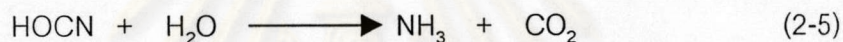
5) ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride,  $\text{CNCl}$ ) เป็นสารประกอบที่ระเหยได้ง่าย ละลายน้ำได้เล็กน้อยและมีความเป็นพิษสูงมาก เกิดจากการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียด้วยวิธี ออกซิเดชันด้วยคลอรีน



นอกจากไซยาไนด์ทั้ง 5 ประเภทแล้ว ยังสามารถพบสารประกอบของไซยาไนด์ประเภทอื่นที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ไธโอไซยาเนต (Thiocyanate) และไซยาเนต (Cyanate) สารประกอบไธโอไซยาเนตสามารถสลายตัวให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ดังสมการ 2-4



สารประกอบไซยาเนต เป็นผลมาจากปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ของการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการออกซิไดส์ด้วยคลอรีน จะสลายตัวในน้ำที่พีเอชต่ำหรือที่มีสภาพเป็นกลาง ตามสมการ 2-5



### 2.1.3.2 พิษวิทยาของไซยาไนด์

ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้หลายทาง ได้แก่ การดูดซึมโดยตรงจากดินหรือแหล่งน้ำ หรือได้รับโดยตรงจากการรับประทาน หายใจ หรือซึมเข้าทางผิวหนัง ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะ การสกัดทองและเงิน การล้างรูปถ่าย การกลั่นปิโตรเลียมและการผลิตเชื้อเพลิง เป็นต้น โดยทั่วไปมักจะพบไซยาไนด์ปนอยู่ในสินแร่และหัวมันสำปะหลังในปริมาณเล็กน้อย ไซยาไนด์มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะสัตว์น้ำ ความเป็นพิษของไซยาไนด์มีทั้งแบบฉับพลันและเรื้อรัง ความเป็นพิษแบบฉับพลันมีผลมาจากการกิน และหายใจรับไซยาไนด์เข้าไปในปริมาณมาก ผลค่อนข้างรุนแรงและอาจถึงตายได้ ความเป็นพิษของไซยาไนด์จะแปรผันตามระดับความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่ได้รับ ความเป็นพิษแบบเรื้อรังเกิดจากการได้รับไซยาไนด์ปริมาณเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจส่งผลให้เกิดเป็นมะเร็งได้

1) ความเป็นพิษของไซยาไนด์อิสระ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

- พีเอช สัดส่วนโดยโมลของอนุมูลไซยาไนด์ต่อโมเลกุลไฮโดรเจนไซยาไนด์จะขึ้นอยู่กับพีเอช โดยพิจารณาจากค่าคงที่การแตกตัวของสมดุล (Ionization Constant) ตามสมการ 2-6

$$K_a = \frac{[H^+][CN^-]}{[HCN]} \quad (2-6)$$

ค่าคงที่การแตกตัวของสมดุล ( $K_a$ ) ของไฮโดรเจนไซยาไนด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโดยมีค่าประมาณ  $4 \times 10^{-10}$  -  $6 \times 10^{-10}$  ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 8.3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชของน้ำผิวดินทั่วไป เมื่ออุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส พบว่าไซยาไนด์จะอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออนประมาณร้อยละ 9 หรือไม่เกินร้อยละ 11 และลดลงอย่างมากเมื่อค่าพีเอชลดลง โดยที่พีเอช 7 จะอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออน ( $CN^-$ ) เพียงประมาณร้อยละ 0.5 ความเป็นพิษของไซยาไนด์อิสระทั้งสองรูปจะใกล้เคียงกัน แต่ปัญหาพิษทางน้ำส่วนใหญ่จะเกิดจากการปนเปื้อนด้วยโมเลกุลไฮโดรเจนไซยาไนด์ ความเป็นพิษฉับพลันของไซยาไนด์อิสระ พบว่า จะมีค่าลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า โมเลกุลไฮโดรเจนไซยาไนด์ ( $HCN$ ) จะมีความเป็นพิษมากกว่าไซยาไนด์ไอออน Wuhrman และ Worker (1948) ได้ศึกษา พบว่า ปลา Chub (Cyprinid) *Squalius cephalus* สามารถทนต่อโซเดียมไซยาไนด์ซึ่งมีความเข้มข้น 0.66 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไซยาไนด์ไอออน โดยเฉลี่ย 52 นาที ที่พีเอช 7.6-7.7 และ 70 นาที ที่พีเอช 8.2 และ 90 นาที ที่พีเอช 8.84 ตามลำดับ Bridges (1958) ได้ศึกษาพบว่า ปลา Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) และปลา Green Sunfish (*Lepomis cyanellus*) ที่ความเข้มข้นโซเดียมไซยาไนด์ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของไซยาไนด์ไอออน ที่พีเอช 8.4 และ 8.9 ในอ่างเลี้ยงทดลอง และที่พีเอช 9.7 ในบ่อเลี้ยงซึ่งผ่านการบำบัดด้วยสารเคมีแล้ว สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานกว่าเมื่ออยู่ในสภาวะที่พีเอชต่ำกว่า โดยปลา Largemouth Bass จะอยู่ได้นานประมาณ 80 นาทีที่พีเอช 8.9 และที่พีเอช 7.0-7.3 อยู่ได้นาน 50 นาที แต่ที่พีเอช 9.7 จะอยู่ได้นาน 30 นาที เนื่องจากที่พีเอชสูงมาก ความเป็นพิษกลับเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเฉพาะตัวของไซยาไนด์ เนื่องจากโมเลกุลไฮโดรเจนไซยาไนด์ไม่มีประจุ สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์เลือดและเซลล์เนื้อเยื่อต่างๆของสิ่งมีชีวิต

ชีวิตได้ง่าย แต่เซลล์เนื้อเยื่อดังกล่าวจะไม่ยอมหรือให้ผ่านได้น้อยสำหรับไอออนที่มีประจุ ดังนั้น ไชยาไนต์ไอออนจึงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์เนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตได้เล็กน้อยเท่านั้น

- **อุณหภูมิ** อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาความเป็นพิษของไชยาไนต์ต่อปลา Wuhrman และ Worher (1948) , Sumner และ Doudouroff (1938) พบว่าความเป็นพิษของ ไชยาไนต์อิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้น 2-3 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส Great Britain, Department of scientific and Industrial Research (1953) ได้ศึกษาปลา Young Rainbow Trout ที่สัมผัสต่อไชยาไนต์เข้มข้น 0.125-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไชยาไนต์ไอออน ที่อุณหภูมิ 12-22 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเข้มข้น 0.3-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไชยาไนต์ไอออน มีชีวิตอยู่ได้นาน 7 นาที และจะตายทันทีที่อุณหภูมิสูง แต่ที่ความเข้มข้นของไชยาไนต์ 0.175-0.25 มิลลิกรัมต่อ ลิตร พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อการมีชีวิตรอดของปลา โดยมีชีวิตอยู่ได้น้อยกว่า 1 นาทีและที่ความเข้มข้นของไชยาไนต์ 0.15 และ 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปลา Trout จะมีชีวิตอยู่ได้นานที่สุดที่ค่าอุณหภูมิ สูงสุดในการทดลอง และตายทันทีที่อุณหภูมิต่ำสุดของการทดลอง

- **ออกซิเจนละลาย** (Dissolved Oxygen, DO) ปลาจะมีความไวต่อไชยาไนต์เมื่อ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง Downing (1954) ได้ทดลองและพบว่า ผลของ ออกซิเจนละลายต่อการมีชีวิตของปลา Yearling Rainbow Trout (อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส และ พีเอช 7.8-8.2) จะเห็นได้ชัดเจน เมื่อทดลองที่ความเข้มข้นของไชยาไนต์เท่ากับ 0.105 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ซึ่งพบว่า ปลาสามารถมีชีวิตอยู่ได้นานเพิ่มขึ้นเป็น 100 เท่า เมื่อค่าออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 9 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของไชยาไนต์เท่ากับ 0.116 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปลาสามารถมีชีวิตอยู่ได้นานเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่า เมื่อค่าออกซิเจนละลายเพิ่ม ขึ้นจาก 3 เป็น 9 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของไชยาไนต์เท่ากับ 0.155 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า แม้จะเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนละลายให้สูงมากขึ้นเท่าไรก็ตาม ปลา ก็ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นของไชยาไนต์ต่ำ ผลของ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่อระยะเวลาการมีชีวิตของปลา จะชัดเจนมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นของไชยาไนต์สูง

- *ความเค็มและความกระด้างของน้ำ* Broderius (1973) ได้ศึกษาพบว่า ปลา Threespine Sticklebacks ซึ่งสัมผัสต่อสารละลายไฮเดียมโซเดียมไนด์ ที่เตรียมจากน้ำทะเล (ค่าครอโรนิตี (Chlorinity) 16-17 ส่วนในพันส่วน(ppt)และพีเอช 7.7) ระยะเวลาการมีชีวิตอยู่ของปลาจะน้อยกว่าเมื่อสัมผัสต่อสารละลายชนิดเดียวกันแต่เตรียมจากน้ำทะเลเจือจางหรือน้ำจืด ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองคือ ที่ความเข้มข้นของไฮเดียมไนด์เท่ากับ 0.27 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไฮเดียมไนด์ไอออน พบว่า ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการมีชีวิตของปลา (ที่ 20 องศาเซลเซียส) เท่ากับ 412 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำจืด) 371 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำทะเลเจือจางร้อยละ 50) และ 198 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำทะเล) และเมื่อทำการทดลองที่ระดับความเข้มข้นของไฮเดียมไนด์เท่ากับ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของไฮเดียมไนด์ไอออน พบว่าค่าเฉลี่ยของการมีชีวิตของปลา เท่ากับ 642 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำจืด) 582 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำทะเลเจือจางร้อยละ 50) และ 350 นาที (เมื่อเตรียมด้วยน้ำทะเล) จะผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สารละลายไฮเดียมโซเดียมไนด์ซึ่งเตรียมด้วยน้ำทะเลเจือจางร้อยละ 50 และที่เตรียมด้วยน้ำจืด ระยะเวลาการมีชีวิตของปลา จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะแตกต่างกันอย่างมากจากค่าที่ได้เมื่อเตรียมด้วยน้ำทะเล ดังนั้นความเป็นพิษของไฮเดียมไนด์ในน้ำทะเลจะไม่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮเดียมไนด์กับเกลือในน้ำทะเล สรุปได้ว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างความเค็มของน้ำและไฮเดียมไนด์ที่ละลายในน้ำ Great Britain, Ministry of Technology (1968) ได้ทดลองกับปลา Juvenile Rainbow Trout ซึ่งมีความยาว 4-5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 11-12 องศาเซลเซียส พบว่าความเป็นพิษของไฮเดียมไนด์ไม่มีความสัมพันธ์กับความเค็มของน้ำ Henderson, Pickering และ Lemke (1961) พบว่า มีความแตกต่างอย่างมากของค่า Median Tolerance Limit 96 ชั่วโมงของไฮเดียมโซเดียมไนด์ของปลา Fat Head Minnow ในน้ำอ่อนและน้ำกระด้างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อทดลองโดยไม่มีการถ่ายเทน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.23 และ 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของอนุมูลไฮเดียมไนด์ ตามลำดับในการทดลองนี้ค่าความเป็นต่าง (Alkalinity) และความกระด้าง (Hardness) ของน้ำอ่อน (พีเอช 7.4) เท่ากับ 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต,  $\text{CaCO}_3$ ) ตามลำดับส่วนน้ำกระด้าง (พีเอช 8.2) มีค่าเท่ากับ 320 และ 38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สรุปได้ว่าความกระด้างและความเป็นต่างของน้ำมีผลต่อความเป็นพิษของไฮเดียมไนด์

## 2) ความเป็นพิษของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ

สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก เช่น เมอร์คิวรี (II) ไซยาไนด์ ( $\text{Hg}(\text{CN})_2$ ) และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลด์เอิร์ธ สามารถละลายน้ำได้ดีแต่สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักส่วนใหญ่ จะไม่ละลายน้ำ ยกเว้น แคดเมียมไซยาไนด์ ( $\text{Cd}(\text{CN})_2$ ) ซิลเวอร์ไซยาไนด์ ( $\text{AgCN}$ ) และนิกเกิลไซยาไนด์ ( $\text{Ni}(\text{CN})_2$ ) ซึ่งจะละลายน้ำได้ดีเมื่อเกลือของโลหะหนักบางตัว ได้แก่ ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) และนิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ) รวมตัวกับสารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลด์ ได้แก่ โพตัสเซียมไซยาไนด์ ( $\text{KCN}$ ) และโซเดียมไซยาไนด์ ( $\text{NaCN}$ ) แต่จะเกิดขึ้นได้เฉพาะเมื่อจำนวนอะตอมโลหะหนักมีมากเกินไป เนื่องจากต้องทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลด์ก่อนแล้วจึงรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะที่สามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ โพตัสเซียมซิลเวอร์ไซยาไนด์ ( $\text{KAg}(\text{CN})_2$ ) และโซเดียมนิกเกิลไซยาไนด์ ( $\text{Na}_2\text{Ni}(\text{CN})_4$ ) ซึ่งสามารถสลายตัวให้อนุมูลบวกของโลหะอัลคาไลด์และอนุมูลลบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก ได้แก่ อนุมูลลบของซิลเวอร์ไซยาไนด์ ( $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ ) และไอออนของนิกเกิลไซยาไนด์ ( $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ ) ซึ่งสามารถสลายตัวให้ไซยาไนด์ Ellis (1937) กล่าวว่า เมื่อไซยาไนด์รวมตัวกับโลหะหนัก เกิดเป็นสารเชิงซ้อนจะมีความเสถียรมากขึ้น และไม่เป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์อิสระมาก เช่น โพตัสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ ( $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) พบว่าไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ Stumm, Worker และ Fischer (1954) ได้ศึกษาพบว่า ความเป็นพิษของไซยาไนด์ต่อปลา Minnows (*Phoxinus laevis*) จะลดลงอย่างมากเมื่อรวมตัวเชิงซ้อนกับ นิกเกิล ทองแดง หรือเหล็ก แต่จะคงความเป็นพิษเมื่อรวมตัวกับสังกะสีหรือแคดเมียม เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสีหรือแคดเมียม มีเสถียรภาพต่ำ Doudoroff (1956) ได้ทดลองกับปลา Fathead Minnows (*Pimephales promelas*) พบว่า ความเป็นพิษของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสีหรือแคดเมียมมีค่าสูง เนื่องจากไซยาไนด์อิสระที่เกิดจากการสลายตัวของสารเชิงซ้อนทั้งสองเสถียรภาพต่ำ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล ทองแดง และเหล็ก จะลดความเป็นพิษลงแต่กรณีของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล จะมีความผันแปรอย่างมากตามพีเอช ของสารละลายโดยเฉพาะที่พีเอช 6.5-6.6 พบว่า พีเอชมีอิทธิพลต่อความเป็นพิษของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิลอย่างมาก

3) ความเป็นพิษของสารประกอบซึ่งสัมพันธ์กับไซยาไนด์  
(Cyanide Related Compound)

- ไนไตรล (Nitriles) เป็นสารประกอบไซยาไนด์อินทรีย์ (Organic Cyanide) ซึ่งความเป็นพิษต่อปลาจะแปรผันอย่างมาก สารประกอบไนไตรลตัวที่สำคัญ ได้แก่ อะซิทาลดีไฮด์ไซยาไนด์ไฮดริล ( $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CN}$ ) หรือ แลคโตไนไตรลซึ่งเป็นสารที่มักจะนำมาศึกษา เนื่องจากมีโครงสร้างชัดเจนและคุณสมบัติทางพิษวิทยาที่สำคัญมาก สามารถถูกย่อยสลายหรือเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้ไซยาไนด์อิสระ

- ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride,  $\text{CNCl}$ ) เป็นผลมาจากการเติมคลอรีนอิสระในสารละลายไซยาไนด์หรือไฮโอไซยาเนต ความเป็นพิษต่อปลาจะใกล้เคียงกับไซยาไนด์อิสระ Allen, Blezard และ Wheatland (1948) ได้ศึกษาพบว่าค่า Lethal Threshold Concentration ของไซยาโนเจนคลอไรด์ซึ่งทดลองกับปลา Rainbow Trout ที่อุณหภูมิ 17-20 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประมาณ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของอนุมูลไซยาไนด์) โดยทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากน้ำประปาและทดลองในภาชนะเปิดที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำ

- ไฮโอไซยาเนต (Thiocyanate,  $\text{CNS}^-$ ) โดยตัวของมันเองมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์อิสระและไซยาโนเจนคลอไรด์ Schaut (1939) ได้ศึกษาพบว่า โปตัสเซียมไฮโอไซยาเนต ( $\text{KCNS}$ ) เข้มข้น 171 มิลลิกรัมต่อลิตร (102 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไฮโอไซยาเนต) สามารถทำให้ปลา Minnows ตายภายใน 9-10 วัน Demyaneko (1931) พบว่าแอมโมเนียไฮโอไซยาเนต ( $\text{NH}_4\text{CNS}$ ) เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (153 มิลลิกรัมต่อลิตรของอนุมูลไฮโอไซยาเนต หรือ 68 มิลลิกรัมต่อลิตรของอนุมูลไซยาไนด์) สามารถทำให้ปลา Bleak (*Alburnus alburnus*) ตายในเวลา 50 ชั่วโมง Wallen, Green และ Lasater (1957) ได้ศึกษาพบว่าค่า Median Tolerance Limit 96 ชั่วโมงของแอมโมเนียไฮโอไซยาเนต ( $\text{NH}_4\text{CNS}$ ) เมื่อทดลองกับปลา Mosquito Fish (*Gambusia affinis*) ในน้ำที่อุณหภูมิ 16-23 องศาเซลเซียส มีค่า 114 มิลลิกรัมต่อลิตร (87 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไฮโอไซยาเนต หรือ 39 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไซยาไนด์ไอออน)

- **ไซยาเนต (Cyanate, CNO)** เป็นผลที่ได้จากการออกซิไดส์ไซยาไนด์โดยคลอรีน มีความเป็นพิษน้อยมาก อนุมูลไซยาเนตอาจจะคงสภาพในน้ำ หรืออาจสลายตัวในน้ำได้ ก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และคาร์บอนเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) Washburn (1948) ได้ศึกษาพบว่าค่า Tolerance Limit ของไซเดียมไซยาเนต เมื่อทดลองกับปลา greek Chub (*Semotilus atromaculatus*) มีค่าประมาณ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร (48.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไซยาเนต หรือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไซยาไนด์ไอออน) Bucksteeg และ Thiele (1957) พบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายโปตัสเซียมไซยาเนต (KCNO) ที่สามารถทำให้ปลาตายได้ มีค่า 75 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของไซยาไนด์ไอออน

### 2.1.3.3 การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดโรคของไซยาไนด์

ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการหายใจ การกินและการเปื้อนผิวหนัง ก๊าซไซยาไนด์สามารถดูดซึมผ่านระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดภาวะเป็นพิษได้อย่างรวดเร็ว ก๊าซไซยาไนด์อาจเกิดจากการเผาไหม้ของวัตถุสังเคราะห์หลายชนิด เช่น พลาสติก พรม ไนลอน โพลียูรีเทน (polyurethane) และสารอครีลิก (acrylic) ทางการกินเป็นสาเหตุหลักของการเกิดเป็นพิษจากไซยาไนด์ สารละลายเกลือไซยาไนด์ สามารถดูดซึมผ่านทางระบบทางเดินอาหารได้ดีและรวดเร็ว โดยอาชีพต่างๆก็มผลต่อการได้รับไซยาไนด์ได้ ตามตารางที่ 2.3

#### 1) กลไกการออกฤทธิ์

##### การเป็นพิษเฉพาะที่ (Local reaction)

ก๊าซไซยาไนด์มีฤทธิ์กัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับเยื่อทางเดินหายใจหรือทางเดินอาหาร ทำให้เกิดอาการไอ แน่นหน้าอก คลื่นไส้ อาเจียน การตรวจร่างกายอาจได้ยินเสียง wheez ในปอด ในรายที่รุนแรงอาจมีภาวะน้ำคั่งในปอดชนิดไม่ได้เกิดจากหัวใจ (noncardiogenic pulmonary edema) หรือมีแผลติบตันของหลอดอาหารได้หากกลืนเข้าไป



---

ตารางที่ 2.3 อาชีพและงานที่เสี่ยงต่อการได้รับพิษไซยาไนด์

---

- อุตสาหกรรมชุบ และเคลือบโลหะ (electroplating)
  - เหมืองแยกแร่เงินและทอง
  - อุตสาหกรรมสี บางชนิด ซึ่งใช้สารประกอบของโลหะไซยาไนด์ (metal cyanide)
  - อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
  - เกษตรกร
  - พนักงานดับเพลิงหรือผจญเพลิง
  - พนักงานห้องปฏิบัติการเคมี
  - ช่างแต่งเล็บ
- 

ที่มา : Vogel SN (1981)

การเป็นพิษทั่วร่างกาย (Systemic toxicity)

ในกระบวนการหายใจระดับเซลล์โดยใช้ออกซิเจนที่ไม่โตคอนเดรีย (mitochondria) ซึ่งเป็น oxidative phosphorylation ใน Kleb's cycles (tricarboxylic acid cycles) เพื่อให้ได้ ATP 38 โมล/กลูโคสหนึ่งโมลนั้น ต้องอาศัยเอนไซม์ cytochrome oxidase ซึ่งโมเลกุลของ cytochrome เหล่านี้มีอนุภาคของเหล็กในรูปเฟอร์ริกอยู่ (ferric ion,  $Fe^{+++}$ ) ไซยาไนด์มีคุณสมบัติในการจับเฟอร์ริกได้ดี เมื่อไซยาไนด์เข้าสู่เซลล์จึงจับกับ cytochrome  $aa_3$  ในไมโตคอนเดรียทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ จึงมีสภาพเสมือนขาดออกซิเจนในระดับเซลล์ (histotoxic hypoxia) เมื่อร่างกายไม่สามารถสร้างพลังงานด้วยการใช้ออกซิเจนได้อย่างปกติ จึงต้องไปใช้ในกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจนแทน และทำให้มีกรดแลคติกขึ้น ร่างกายจึงมีภาวะเป็นกรด (lactic acidosis)

การตรวจวัดระดับไซยาไนด์ในเลือด (whole blood) มักช่วยยืนยันการวินิจฉัยได้ ในคนปกติที่ไม่สูบบุหรี่มักพบมีระดับไซยาไนด์ 0.004 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ส่วนในคนสูบบุหรี่มักมีระดับเท่ากับ 0.006 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร อย่างไรก็ตามถึงแม้ระดับไซยาไนด์ในเลือดอาจช่วยบอกความรุนแรงของโรค (ตารางที่ 2.4) แต่ก็ไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กันเสมอไปเพราะพยาธิหลักอยู่ในเนื้อเยื่อมากกว่าในเลือด

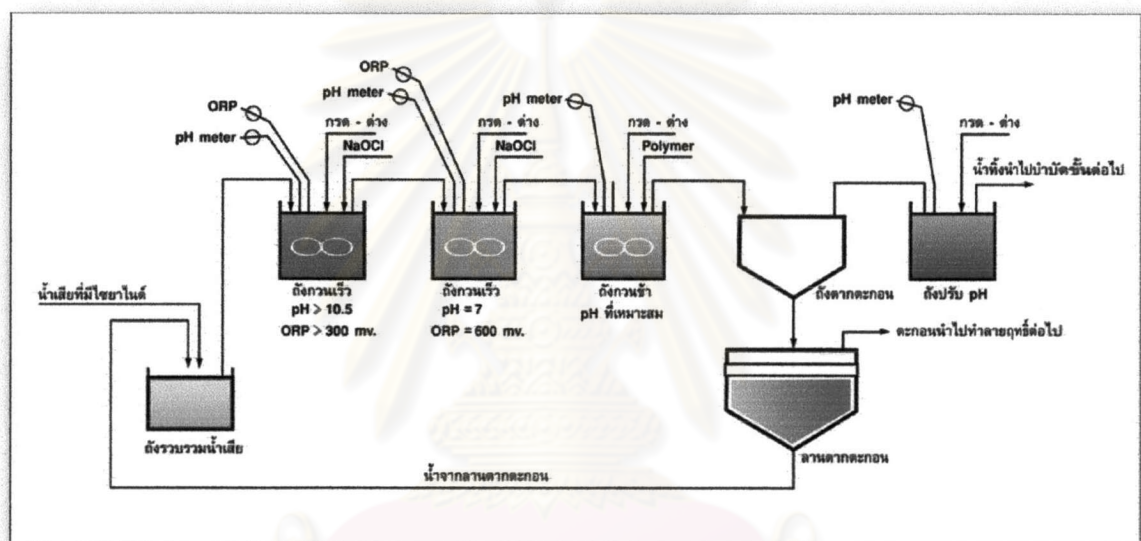
#### ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับทางไซยาไนด์ในเลือดกับภาวะเป็นพิษเฉียบพลัน

ระดับไซยาไนด์ในเลือด (mcg/mL) (Whole blood cyanide level)	อาการและอาการแสดง (Symptoms)
0.2 - 0.5	None
0.5 - 1.0	Flushing, tachycardia
1.0 - 2.5	Alteration of consciousness
2.5 - 3.0	Coma, respiratory depression
> 3.0	Death

ที่มา : Smith RP. (1996)

### 2.1.3.4 การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียมีอยู่หลายวิธี ส่วนใหญ่เป็นการบำบัดทางเคมีและทางฟิสิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



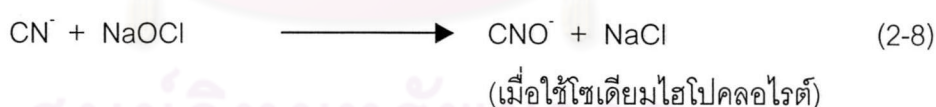
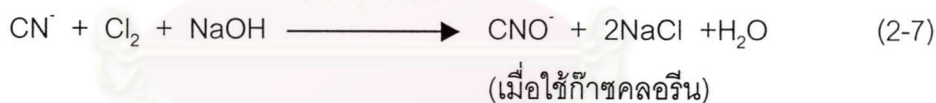
รูปที่ 2.3 แผนผังแบบบำบัดน้ำทิ้งที่มีไซยาไนด์  
ที่มา : มงคล (2542)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

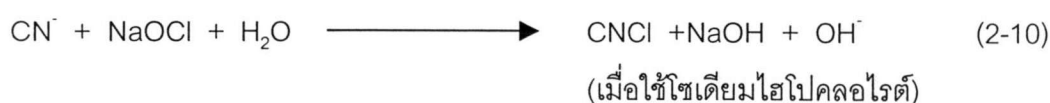
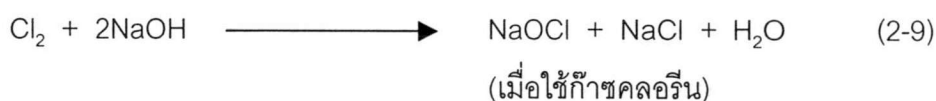
วิธีการต่างๆ ในการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย สรุปได้ดังนี้

1) การออกซิเดชันด้วยคลอรีนหรืออัลคาไลนคลอรีเนชัน (Alkali Chlorination) เป็นการสลายไซยาไนด์โดยการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือก๊าซคลอรีนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคลอรีนได้โซเดียมไฮโปคลอไรต์) เมื่อลงไปใต้น้ำเสียจะสามารถออกซิไดส์ไซยาไนด์เป็นอนุมูลไซยาเนต ที่พีเอช 10-12.5 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดส์ต่อด้วยคลอรีนที่เหลือเกินพอ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ที่พีเอชตั้งแต่ 10 ขึ้นไป ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานหลายชั่วโมง แต่หากน้ำเสียมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 1 ชั่วโมง กลไกของปฏิกิริยาดังกล่าวสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกซิไดส์ไซยาไนด์ให้เป็นอนุมูลไซยาเนต ที่พีเอชตั้งแต่ 10 ขึ้นไป เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซพิษ ได้แก่ ไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) เมื่อใช้ก๊าซคลอรีนหรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตามสมการ (2-7) – (2-8)

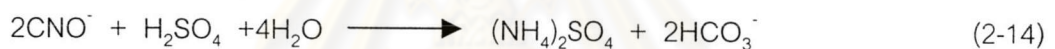
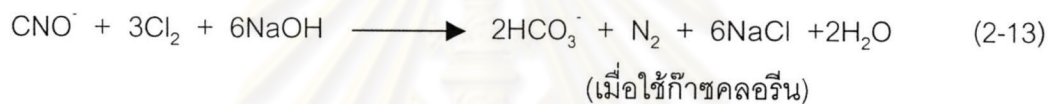


หากน้ำเสียมีค่าพีเอชต่ำกว่า 10 เมื่อเติมคลอรีนลงไปก๊าซไซยาโนเจนคลอไรต์ซึ่งมีความเป็นพิษสูงมาก จะเกิดขึ้นทันที แต่เมื่อพีเอชของน้ำเสียมากกว่า 10 ไซยาโนเจนคลอไรต์จะถูกสลายทันที กลไกของปฏิกิริยา ตามสมการที่ (2-9) – (2-11)





ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการเปลี่ยนไซยาเนต (CNO<sup>-</sup>) ซึ่งยังเป็นพิษอยู่แต่จะมีระดับความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์มาก สามารถถูกออกซิไดส์ต่อก๊าซคลอรีนหรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ที่มากเกินไปที่พีเอชประมาณ 8.5 กลไกของปฏิกิริยา ตามสมการ (2-12) ถึง (2-13) หรือถูกสลายด้วยกรดที่พีเอชน้อยกว่า 2.5 ตามสมการ (2-14)



2) การออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต (Permanganate Oxidation) เป็นการสลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการออกซิไดส์ด้วย โปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต (KMnO<sub>4</sub>) ที่พีเอช 12-14 แต่ที่พีเอช 6-9 จะเกิดก๊าซไซยาโนเจน ((CN)<sub>2</sub>) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง และที่พีเอชต่ำกว่า 6 ปฏิกิริยาจะไม่เกิดขึ้น กลไกของปฏิกิริยาที่พีเอช 6-12 ตามสมการ (2-15) ถึง (2-17)



ที่พีเอช 12-14 เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชกลไกของปฏิกิริยา ตามสมการ (2-18) ถึง (2-19)



ที่พีเอช 12-14 แต่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปรับพีเอช จะเกิดมังกานีสออกไซด์ขึ้นและสามารถตกตะกอน ตามสมการ (2-20)



3) การสลายตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolytic Decomposition) เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูง และบำบัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก เช่น นิกเกิล ทองแดง และเหล็ก โดยไซยาไนด์จะทำหน้าที่เป็นอานอด (Anodic Electrolysis) ที่อุณหภูมิประมาณ 125-200 องศาฟาเรนไฮต์ และใช้เวลาในการสลายตัวเป็นเวลานานหลายวัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำเสีย ไซยาไนด์จะเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุมูลไซยาเนต และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และแอมโมเนีย สำหรับน้ำเสียที่มีซัลเฟตเจือปนอยู่จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยวิธีนี้ลดลง แต่เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ลงไปในน้ำที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์เพิ่มขึ้น

4) โอโซนเนชัน (Ozonation) เป็นการสลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการเติมก๊าซโอโซน ( $\text{O}_3$ ) ลงไป โอโซนทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ โดยเปลี่ยนไซยาไนด์ให้เป็นอนุมูลไซยาเนต ที่พีเอช 9.0-12.0 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10-15 นาที การเติมทองแดงปริมาณเล็กน้อยลงไปจะสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น วิธีนี้สามารถย่อยสลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล สังกะสี หรือทองแดง แต่จะสลายได้ยากสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโคบอลต์ แม้ว่าเติมสารเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก ทองแดง หรือมังกานีส ลงไปก็ตาม แต่ข้อดีของวิธีนี้คือ ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids) จะไม่เพิ่มขึ้น

5) วิธีของคาสโตน (Kastone Process) เป็นการสลายไซยาไนต์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ร่วมกับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่อุณหภูมิ 120-130 องศาฟาเรนไฮต์ ผลจากปฏิกิริยาจะได้อนุมูลไซยาเนต ก๊าซแอมโมเนีย และกรดอนินทรีย์หลายชนิด การบำบัดโดยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อความเข้มข้นของไซยาไนต์อยู่ในช่วง 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถตกตะกอนสังกะสี และแคดเมียม ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้อีกในขบวนการชุบโลหะ แต่มีข้อเสียคือ สามารถเปลี่ยนไซยาไนต์ให้เป็นอนุมูลไซยาเนตได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถเปลี่ยนไซยาเนตให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนได้

6) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) โดยใช้เรซินประจุลบซึ่งมีสภาพเป็นด่างอ่อน เพื่อกำจัดเฟอร์ไรต์และเฟอโรไซยาไนต์ วิธีนี้มีข้อควรระวังคือ การล้างเรซินเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่นั้น จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนต์ซึ่งมีพิษรุนแรงมาก

7) การระเหยเป็นไอ (Evaporation) เป็นวิธีการระเหยน้ำบางส่วนให้กลายเป็นไอน้ำ และให้ส่วนที่เป็นไอน้ำผ่านเครื่องควบแน่น เพื่อเปลี่ยนไอน้ำให้เป็นหยดน้ำ แล้วนำกลับไปใช้ล้างโลหะชิ้นงาน ส่วนน้ำเสียที่เหลือหลังจากระเหยน้ำออกไปบางส่วน จะมีความเข้มข้นของไซยาไนต์สูงสามารถนำกลับไปเติมน้ำยาชุบโลหะได้

8) การกรองย้อนกลับผ่านเยื่อที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตต และโพลีไมด์ (Cellulose Acetate and Polyimide Reverse Osmosis Membrane) เป็นวิธีการบำบัดไซยาไนต์ด้วยการกรองย้อนกลับผ่านเยื่อบางๆ (Reverse Osmosis) เพื่อกรองอนุมูลไซยาไนต์และปล่อยให้ผ่านเยื่อบางๆออกไป ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดไลซิสที่ภาวะเป็นด่าง (Alkali Hydrolysis) ส่งผลให้พีเอชของน้ำเสียลดลง ทำให้โลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำทิ้งตกตะกอน และอุดตันรูของเยื่อกรอง วิธีนี้สามารถบำบัดไซยาไนต์ได้เพียงประมาณร้อยละ 28 เท่านั้น

9) การตกตะกอน (Precipitation) เป็นวิธีการลดความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยเฟอร์รึคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2$ ) และเฟอริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) ในสภาวะที่เป็นต่าง พบว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ 5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเติมสารละลายเฟอร์รึคลอไรด์ เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป แล้วกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับพีเอชให้เป็น 8.4 แล้วกวนอย่างรวดเร็ว 2 นาที แล้วจึงเติมสารละลายเฟอริกคลอไรด์ เข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป กวนอย่างรวดเร็วอีกครั้งแล้วปล่อยให้ตกตะกอน (Floc) พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว จะมีความเข้มข้นของไซยาไนด์ 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

10) การดูดซับ (Adsorption) โดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดูดซับอนุมูลของไซยาไนด์ สำหรับการดูดซับของอนุมูลไซยาไนด์ด้วยถ่านกัมมันต์ เมื่อมีทองแดงเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยา น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

Inove, Toshisuke, et al., (1937) ได้ศึกษาการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์โดยปรับพีเอช ของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 12-14 แล้วเติมสารละลายไฮโปคลอไรต์ลงไป จากนั้นเติมสารละลายดังกล่าวให้อุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า เมื่อใช้น้ำเสีย 10 ลิตร ที่มีเฟอร์โรไซยาไนด์ ( $K_3Fe(CN)_6$ ) และเฟอโรไซยาไนด์ ( $K_4Fe(CN)_6$ ) เข้มข้น 18 กรัมต่อลิตรเมื่อนำมาปรับพีเอชเป็น 13 แล้วเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 13 ลงไป 5 ลิตร จากนั้นเติมสารละลายที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีไซยาไนด์น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และคลอรีน

Honda, Atsuhire et al.,(1973) ได้ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากขบวนการชุบแคดเมียม โดยการเติมคลอรีนแล้วกวน จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำน้ำใสส่วนบนมาผสมกับผงเหล็ก แล้วแยกตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยการตกตะกอนหรือการปั่นสามารถ พบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้มากกว่าร้อยละ 99

Hendrickson และ Daignault (1973) ได้ศึกษาการบำบัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์เพื่อการกำจัดหรือนำกลับมาใช้โดยวิธีต่างๆในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การสลายด้วยกระแสไฟฟ้า โอโซนชัน การออกซิเดชันด้วยคลอรีน และการตกตะกอนโลหะหนัก เป็นต้น โดยได้ทดลองบำบัดสารประกอบ เฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferri – Cyanide) และเฟอโรไซยาไนด์ (Ferro – Cyanide) ในน้ำเสียจากการล้างรูปถ่าย พบว่าเฟอโรไซยาไนด์สามารถถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์โรไซยาไนด์โดยวิธีสลายด้วยกระแสไฟฟ้า และวิธีโอโซนชัน ส่วนน้ำยาล้างรูปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สารละลายเฟอร์โรไซยาไนด์เจือจางสามารถกำจัดได้โดยใช้ก๊าซโอโซน หรือ ก๊าซคลอรีน ภายใต้ อุณหภูมิ พีเอช และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

Kato, Isamu (1973) ได้ศึกษาการสลายตัว สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ด้วยคลอรีน ร่วมกับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าเมื่อเติมไฮโปคลอไรต์ 83 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในรูปของคลอรีน) ลงในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ 20.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในรูปของอนุมูลไซยาไนด์) แล้วฉายแสงด้วยหลอดไฟปรอทกำลัง 2-3 วัตต์ นาน 6 นาที พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของไซยาไนด์น้อยกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าใช้คลอรีนบำบัดไซยาไนด์เพียงอย่างเดียว น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจะมีไซยาไนด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 30 นาที

Iseng, Szu-Kung (1974) ได้ศึกษาการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีความเข้มข้นของไซยาไนด์ 4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยโปตัสเซียมเปอร์มันังกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) แคลเซียมคลอโรไฮโปคลอไรต์ ( $\text{CaCl}(\text{ClO}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) โปตัสเซียมโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_2$ ) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ( $\text{NaClO}$ ) โดยได้ทดลองใช้ปริมาณสาร เวลาในการทำปฏิกิริยา พีเอช และความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่ระดับต่างๆ พบว่า โซเดียมไฮโปคลอไรต์มีการบำบัดไซยาไนด์สูงสุด

Edmonds (1974) ได้ศึกษาพบว่าไซยาไนด์ในน้ำเสียจากเหมืองทองจะสามารถถูกสลายโดยวิธีออกซิเดชันด้วยคลอรีนซึ่งไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนตแล้วสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนที่พีเอชมากกว่า 10

Yoshitomi, Kenichiro (1985) ได้ศึกษาการสลายตัวของไซยาไนด์ในห้องทดลอง พบว่า พีเอช มีผลต่อการสลายตัวของไซยาไนด์มาก กล่าวคือ ที่พีเอช 11 สารละลายไซยาไนด์เข้มข้นร้อยละ 0.04 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องจะสลายตัวไปประมาณร้อยละ 50 และหากเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 12 จำนวน 25 มิลลิลิตรลงไป จะสามารถสลายตัวได้หมดในเวลา 2 ชั่วโมง

Ganczarczyk, Takaoka และ Ohashi (1985) ได้ทดลองใช้โพลีซัลไฟด์ (Polysulfide) เพื่อบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะปนอยู่ด้วย โดยศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง ไซยาไนด์กับโพลีซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ (Polysulfide-Sulfur) ซึ่งจะได้ไอออนไธโอไซยาเนต (Thiocyanate, CNS) และตะกอนของโลหะหนัก ซึ่งไธโอไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยมาก สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ โพลีซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ ที่ใช้ศึกษาเตรียมจากไลม์ซัลเฟอร์ (Limesulfur) ซึ่งเป็นสารฆ่าเชื้อราและแมลง โดยได้กำหนดความเข้มข้นของโพลีซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ในการทดลอง เท่ากับ 238.5 กรัมต่อลิตร ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ทำด้วยแก้วที่ปิดสนิทที่มีดี อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส ตัวอย่างน้ำเสียมีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงมาก ทั้งในรูปไซยาไนด์อิสระและสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ โดยทุกๆวันจะเก็บน้ำตัวอย่างในถังปฏิกรณ์ไปวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์รวม ไอออนไธโอไซยาเนต และโลหะบางชนิด ใช้เวลาทดลอง 6 วัน สรุปผลได้ว่า การบำบัดไซยาไนด์โดยวิธีนี้ จะมีประสิทธิภาพสูงในช่วง 2-3 วันแรกของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ และตกตะกอนโลหะหนักให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และสามารถปล่อยลงสู่ท่อระบายน้ำเสียสาธารณะ ปริมาณของโพลีซัลไฟด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์จะมากกว่าปริมาณที่คำนวณได้จากสมการเคมี (Stoichiometric Requirement) ประมาณร้อยละ 20 และยิ่งความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียสูงขึ้นก็ต้องใช้ โพลีซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ ในปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย ปฏิกิริยาระหว่างไซยาไนด์กับโพลีซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ จะเกิดได้ดีเมื่อมีสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะปนอยู่ด้วยในน้ำเสีย และปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ไอออนไธโอไซยาเนตที่เกิดขึ้นจะสูญหายไปบางส่วนในระหว่างการดำเนินของปฏิกิริยา สรุปได้ว่า การบำบัดไซยาไนด์โดยใช้โพลีซัลไฟด์ เป็นวิธีที่สะดวก ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงมาก และเหมาะสำหรับโรงงานชุมชนขนาดเล็ก

Lancy, et al., (1986) ได้ศึกษาการสลายตัวของไอออนของเฟอริไซยาไนด์ ( $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}$ ) ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีออกซิไดส์ด้วยคลอรีน และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 30-60 นาที พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่ำกว่า 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

Guo , et al., (1993) ศึกษาการดูดซับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่ำที่ระดับน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วย granular activated carbon (GAC) โดยใช้กระบวนการในการดูดซับผสมกัน อย่างช้าๆที่เวลามากกว่า 30 ชั่วโมง โดยในช่วงต้นอัตราในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคของ GAC เล็กลง pH ที่ใช้อยู่ในช่วง 8-9 เมื่อจะเพิ่ม linearly ทำได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของตัวดูดซับ จนกระทั่งความเข้มข้นของไซยาไนด์อยู่ที่ระดับต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัม/ลิตรถึง 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอธิบายโดยใช้ Freundlich isotherm กับจำนวนการดูดซับต่อน้ำหนักของ GAC กลไกในการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนของไซยาไนด์ไอออน

Sexsana , et al., (2001) ศึกษาการดูดซับของสารละลายไซยาไนด์ที่พื้นผิวของแร่ไพโรฟิลไรท์ พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของไซยาไนด์ pH และอุณหภูมิของสารละลาย ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงถึง 99% เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเจือจาง และจะลดลงถึง 40% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซยาไนด์ถึง 10 ppm มีค่าการดูดซับสูงสุดที่สารละลายเป็นกลางและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบ endothermic ที่อุณหภูมิในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส ทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับด้วย Langmuir และ Freundlich

เพชรจิตต์ (2527) ได้ศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียและสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณไซยาไนด์ในน้ำเสียจากขบวนการชุบโลหะด้วยทองแดงโดยวิธีออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์ และทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในแบบจำลอง พบว่า น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 22 แห่งในเขตกรุงเทพมหานคร มีปริมาณไม่มากนักสามารถกำจัดแบบครั้งคราว (Batch) ได้ พีเอชของน้ำเสียที่มีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบจะมีสภาพเป็นด่าง ความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียของโรงงานแต่ละแห่งจะแตกต่างกันโดยอยู่ในช่วง 4.40-1667.45 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้ง (ร้อยละ 99.67 การกำจัด) คือใช้อัตราส่วนโดยโมลของไซยาไนด์ต่อโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 1 ต่อ 4 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที เมื่อนำค่าสภาวะที่เหมาะสมนี้ไปใช้กับแบบจำลองพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ ร้อยละ 98.98 และเมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่างๆกันในช่วง 200-1044 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์

ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับด้วยดินชนิดต่างๆ

Bittell และ Miller (1974) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของ ตะกั่ว แคดเมียมและ แคลเซียมในดิน 3 ชนิด คือ montmorillonite, illite และ kaolinite โดยศึกษาในช่วงกว้างของความเข้มข้นของพื้นผิว ได้ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการเลือกจับโดยดูการกระจายของไอออน การแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับในดินทั้ง 3 ชนิดตามลำดับคือ montmorillonite, illite และ kaolinite ระหว่าง Pb-Ca ได้ดังนี้ 0.60, 0.44 และ 0.34 ตามลำดับ ระหว่าง Cd-Ca ได้ 1.04, 1.01 และ 0.89 ตามลำดับ และระหว่าง Pb-Cd ได้ 0.58, 0.56 และ 0.31 ตามลำดับ

Orumwense (1995) ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำโดยการดูดซับด้วยดินเหนียวประเภทเคโอลิไนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็น  $\text{SiO}_2$  44.14 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  41.42 % และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.87 % ทดลองโดยใช้ดินเหนียวขนาด 200 mesh (75 ไมโครเมตร) น้ำหนัก 1 กรัม เป็นสารดูดซับตะกั่วจากสารละลาย  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยมีการแปรผันค่าต่างๆ ได้แก่ พีเอชของสารละลายให้มีค่าในช่วง 3-9.5 อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาสัมผัส 20-160 นาที พบว่าการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัส จากนั้นจะดูดซับได้คงที่ในแต่ละค่าความเข้มข้นเมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 120 นาที และประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ อุณหภูมิสูงและพีเอชเป็นกรด

Chakravarty, Prasad และ Raupainwar (1998) ได้ศึกษาการกำจัดทองแดงด้วยฮีมาไทต์ ขนาดอนุภาค 200 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้สารละลายทองแดงซึ่งเตรียมจาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ที่ความเข้มข้นต่างๆกันซึ่งเท่ากับน้ำเสียจากโรงงานโดยมีการแปรค่า pH ในช่วง 3-9 เขย่าเป็นเวลานาน 15-135 นาที พบว่าฮีมาไทต์สามารถดูดซับทองแดงได้ตั้งแต่ pH 3 โดยเริ่มมีจุดอิ่มตัว ซึ่งการดูดซับจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 75 นาทีในทุกๆค่าความเข้มข้นและค่า pH ของสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วง pH 7.8-9 จะไม่มีความแตกต่างของปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับ

Srimurali, Pragathi และ Karthikeyan (1998) ได้ศึกษาเรื่องการนำวัสดุราคาต่ำ มาใช้ในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม ได้แก่ kaolinite, bentonite, charfines, lignite และ nirmali seed โดยเลือกมาทำการศึกษาดูดซับแบบ batch adsorption ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ เวลาที่สัมผัส pH ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับ ผลการศึกษาได้ว่า nirmali seed และ lignite ไม่มีประสิทธิภาพพอในการกำจัดฟลูออไรด์ คือกำจัดฟลูออไรด์ได้เพียง 6 เปรอร์เซ็นต์ และ 8 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ดิน kaolinite มีประสิทธิภาพถึง 18.2 เปรอร์เซ็นต์ สำหรับ charfine และ bentonite มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 38 เปรอร์เซ็นต์ และ 46 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Aytas และคณะ (1999) ศึกษาการกำจัดยูเรเนียมในสารละลายด้วยไดอะตอมไมต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับที่ดี โดยใช้การศึกษาแบบโครมาโทกราฟี การศึกษาใช้ตัวแปรในการทดลอง 4 ด้าน คือ ความเข้มข้นของสารละลายยูเรเนียม pH เวลาที่สัมผัสและอุณหภูมิ และใช้ Langmuir-type isotherm ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับ

Agdi และคณะ (2000) ศึกษาการกำจัดสาร Atrazine และ Chlorpyrifos จากสารละลาย โดยการดูดซับด้วยดินเบา พาราเมเตอร์ในการศึกษา คือ ปริมาณดินเบา พีเอช เวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร และอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ดินเบาเป็นตัวดูดซับที่ดีมาก สำหรับ Atrazine และ Chlorpyrifos พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับคือ ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับลดลงสำหรับเวลาในการสัมผัสจะเป็นอิสระต่อการดูดซับ เวลาสัมผัสมาก การดูดซับก็จะมากตาม ปริมาณดินเบา ที่ 20 มิลลิกรัม ให้ค่าการดูดซับสูงสุด ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทั้งสองชนิดพบว่า Atrazine และ Chlorpyrifos ที่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เป็นจุดที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด และ อุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับ