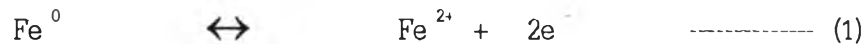


บทที่ 2

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิริยาการกำจัดคลอรีน (Dechlorination)

ในสภาวะที่ผงเหล็กเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน จึงสามารถนำผงเหล็กมาใช้กำจัดคลอรีนออกจากสารประกอบคลอรีนเตตราฟีนอลได้ โลหะเหล็ก (Fe^0) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังสมการที่ 1



คู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดจาก Fe^0 ที่เป็นตัวออกซิไดซ์ และ Fe^{2+} (aq) ที่ละลายอยู่มีค่า standard reduction potential เท่ากับ -0.440 v. จึงทำให้ Fe^0 เป็นตัวรีดิวซ์ ที่มีความเกี่ยวข้องกับ redox-labile substance จำนวนมาก ได้แก่ H^+ , carbonate, sulfate, nitrate และ oxygen ดังนั้นจึงสามารถนำโลหะเหล็ก (Fe^0) มาใช้กำจัดสารประกอบประเภท alkyl chloride (RCl) ได้ ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 2



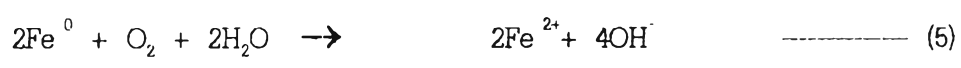
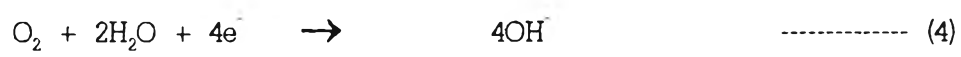
การประมาณค่า standard reduction potentials ของครึ่งปฏิกิริยา สำหรับ alkyl chloride (RCl) ประเภทต่าง ๆ อยู่ในช่วง $+0.5$ ถึง $+1.5$ v. ที่ระดับพีเอช 7 ซึ่งสมการที่ 1 และ 2 นี้มีความเกี่ยวข้องกับความร้อน (thermodynamically) และปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ 3



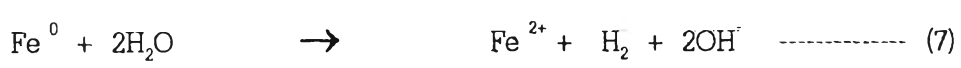
ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่แสดงในสมการที่ 3 เป็นสมาชิกของกลุ่มปฏิกิริยารู้งักกันดีในชื่อ dissolving metal reductions

สมการรีดอกซ์ของการกำจัดสารประกอบคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก (สมการที่ 3) มีความสมมูลย์กับ การสึกกร่อนของเหล็ก (corrosive) โดยมี alkyl chloride (RCl) เป็นตัวออกซิไดซ์

ลักษณะการสึกกร่อนของเหล็ก (corrosive) ในสมการที่ 1 เป็นผลมาจาก oxidative dissolution ของโลหะที่ระดับพีเอชเป็นกลาง ถ้าปราศจากตัวออกซิไดซ์อย่างแรงละลายอยู่ จะมีครึ่งปฏิกิริยารีดักชันที่สามารถจับคู่กับสมการที่ 1 ที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาการสึกกร่อนได้เองทันทีในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) จะเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) เป็นผลให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว แสดงได้ดังสมการที่ 4 และ 5

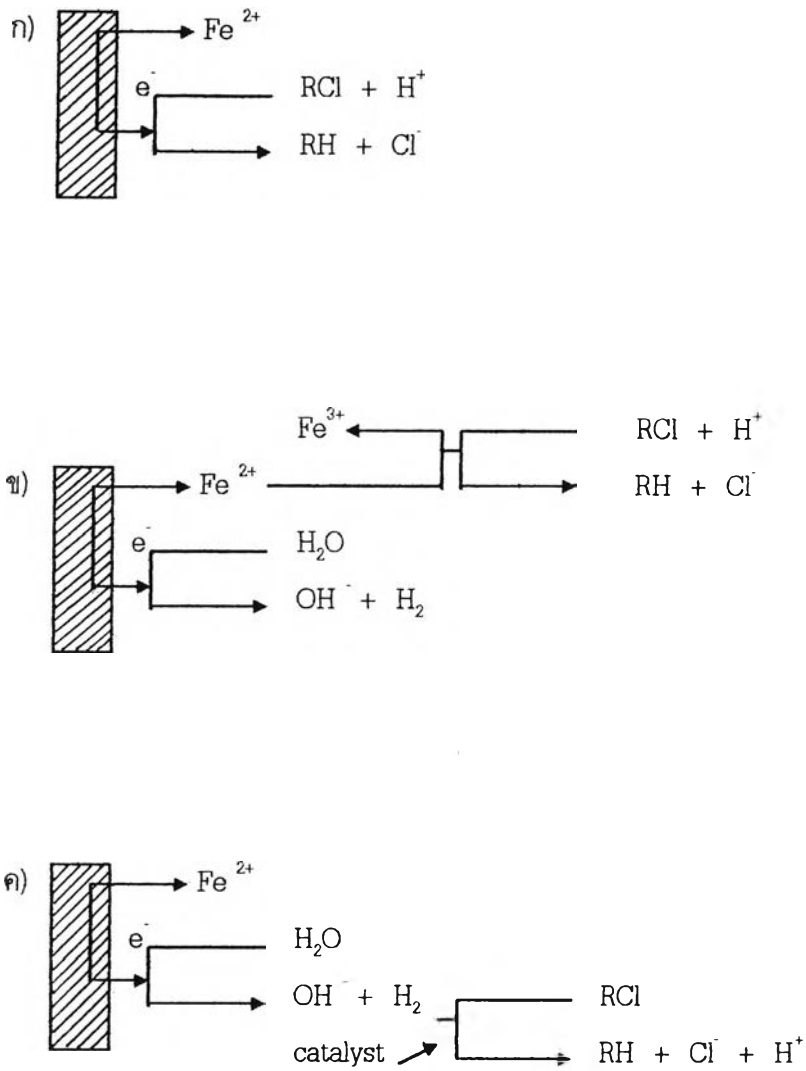


การออกซิเดชันของ Fe^{2+} โดยออกซิเจน (O_2) จะทำให้เกิด ferric hydroxides (สนิมเหล็ก) มีน้ำเพียงอย่างเดียวที่สามารถเป็นตัวออกซิแดนท์ (สมการที่ 6) ดังนั้นสนิมเหล็กอาจเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) ดังสมการที่ 7



ทั้ง 2 ปฏิกิริยา (สมการที่ 5 และ 7) จะทำให้ระดับพีเอชสูงขึ้น แต่จะเกิดผลกระทบเพียงเล็กน้อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) เพราะผลที่ได้มีมากพอที่จะทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็วได้ ระดับพีเอชที่เพิ่มขึ้นจะมีส่วนทำให้เกิดการตกตะกอนของ iron hydroxide โดยในที่สุดจะรวมตัวอยู่ที่ระดับพื้นผิวของโลหะซึ่งจะขัดขวางการละลายต่อไป

พบว่า มี 3 major reductant ในระบบ Fe^0-H_2O ได้แก่ iron metal, ferrous iron และ hydrogen ซึ่งเป็นผลจากการเป็นสนิมของโลหะ และสามารถนำมาใช้อธิบายปฏิกิริยาการกำจัดฮาไลเจนออกจาก alkyl halide ได้โดย 3 เส้นทาง แสดงดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

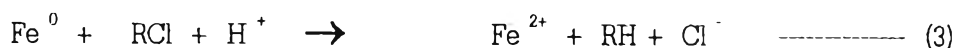


ที่มา : Matheson and Tratnyek, 1994

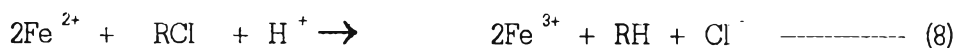
รูปที่ 2.1 แสดงเส้นทางในการกำจัดสารประกอบฮาโลเจนในสภาวะไร้ออกซิเจน

- ก) เป็นการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนโดยตรงกับโลหะ (เหล็ก) ที่พื้นผิวของโลหะ
- ข) เป็นการเกิดการรีดักชันโดย Fe^{2+} ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสนิมที่พื้นผิวโลหะ
- ค) เป็นการเกิด catalyzed hydrogenolysis โดย H_2 ซึ่งเกิดจากการรีดักชันของน้ำระหว่างเกิด anaerobic corrosion

เส้นทางแรก แสดงดังรูป 2.1 ก เกี่ยวข้องกับโลหะเหล็กโดยตรง ซึ่งถือได้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน เกิดโดยการถ่ายหอดิเล็กตรอนจากพื้นผิวของโลหะเหล็กเพื่อดูดซับ (adsorbed) สารประกอบพวก alkyl chloride (RCl) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบคลอรีน (dechlorination) โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) อัลเคน (RH) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) สามารถใช้สมการที่ 3 เพียงสมการเดียวอธิบายเส้นทางของการเกิดปฏิกิริยาได้

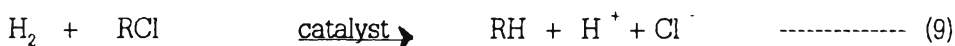
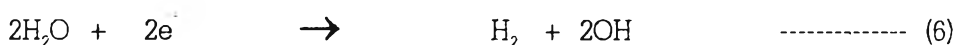


เส้นทางที่ 2 แสดงดังรูป 2.1 ข เกี่ยวข้องกับโลหะที่เป็น intermediate product ของการสีกกร่อนของโลหะเหล็กในสารละลาย ดังสมการที่ 8



Fe^{2+} ที่ละลายอยู่จะเป็นตัวรีดักแทนท์ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบคลอรีน (dechlorination) ออกจาก alkyl chloride (RCl) โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), อัลเคน และคลอไรด์ไอออน ปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยอัตราการเกิดกระบวนการนี้ขึ้นกับ ligand ที่เกาะอยู่ที่พื้นผิวโลหะ

เส้นทางที่ 3 แสดงดังรูป 2.1 ค ในปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบสารประกอบคลอรีนออกจาก alkyl chloride เนื่องจากน้ำจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสีกกร่อน คือ ไฮโดรเจน ดังสมการที่ 6 เมื่อ alkyl chloride ทำปฏิกิริยากับ H_2 ที่ได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ อัลเคน, ไฮโดรเจนไอออน และคลอไรด์ไอออน แสดงดังสมการที่ 9



ถ้าขาดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ จะมีส่วนทำให้การกำจัดสารประกอบคลอรีนในเส้นทางนี้เกิดได้ยากมาก รวมทั้งเมื่อมีไฮโดรเจนไอออนสะสมที่พื้นผิวโลหะมากเกินไปจะเกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยานี้อย่างต่อเนื่องและสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ได้เช่นกัน

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ คือ เซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ได้จากพืช ส่วนใหญ่ได้จากไม้ยืนต้น ได้แก่ ต้นสน ยูคาลิปตัส และได้จากพืชชนิดอื่นๆ ได้แก่ ไม้ ชานอ้อย ฝ้าย พงข้าว และปอ เป็นต้น พืชทุกชนิดที่มีเส้นใยสามารถนำมาทำกระดาษได้ แต่ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมจะใช้ชนิดของเส้นใยที่เหมาะสมกับการผลิตเท่านั้น องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ เซลลูโลส (cellulose), เฮมิเซลลูโลส (hemi-cellulose) และลิกนิน (lignin) โดยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภท polysaccharide มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กันของ β -D-glucopyranose ต่อกันเป็นโพลิเมอร์ มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ตัวทำละลายสารอินทรีย์ทั่วไปและสารละลายต่าง สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับกรดได้ และที่สำคัญคือ โครงสร้างเป็นได้ทั้งเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline) และไม่เป็นระเบียบ (amorphous) รวมกันในสัดส่วนต่าง ๆ กัน ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการดูดซึม (absorbtion) ยืดหยุ่น (stress-strain) และพองตัว (swelling) เป็นต้น

2. เฮมิเซลลูโลส (hemi-cellulose) เป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่มีโครงสร้างส่วนใหญ่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นจึงดูดซึมน้ำได้ดี ซึ่งมีผลช่วยทำให้เส้นใยพองตัวได้รวดเร็ว ง่ายต่อการตีเยื่อ และยังช่วยทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารละลายต่าง

3. ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic) เกิดจาก enzyme-catalyzed dehydrogenative polymerization ของสาร 3 ตัว คือ coniferyl sinapyl และ p-coumaryl alcohols มีกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น methoxyl aliphatic และ phenolic hydroxyl เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดให้เส้นใยในเนื้อไม้เกาะติดกัน มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ทั่ว ๆ ไป แต่ละลายได้บางส่วนในสารละลายต่างหรือ oxidizing agent สามารถเกิดปฏิกิริยา condensation ได้กับสารละลายกรดเข้มข้น ลิกนินสามารถทำลายพันธะระหว่างไฟเบอร์กับไฟเบอร์ ทำให้ความเหนียวของกระดาษลดลงและเป็นตัวการที่ทำให้กระดาษมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีครีม

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

| องค์ประกอบทางเคมี ของเส้นใย | ปริมาณ (%) | |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | ไม้เนื้ออ่อน (softwood) | ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) |
| cellulose | 45 | 43 |
| hemicellulose | 5-20 | 15-30 |
| lignin | 24-32 | 17-25 |

2.3 การฟอกเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อ มี 2 วิธี คือ การผลิตเยื่อโดยใช้เครื่องจักร และการผลิตเยื่อโดยใช้ขบวนการทางเคมี ในที่นี้จะขอกกล่าวถึง การผลิตเยื่อโดยใช้ขบวนการทางเคมี (chemical pulping) ซึ่งการผลิตเยื่อโดยวิธีนี้จะต้องใช้วิธีการฟอกเยื่อกระดาษโดยใช้คลอรีน และสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาสารประกอบคลอรีนปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งยากต่อการบำบัด และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ

การผลิตเยื่อทางเคมีทำโดยผสม เศษไม้ ผุนจากโรงเลื่อย ในสารเคมี โดยสารเคมีจะละลายลิกนิน (lignin) ออกมาเพื่อให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งนำมาทำเยื่อกระดาษ การมีลิกนินอยู่ในเนื้อเยื่อจะทำให้เยื่อเป็นสีน้ำตาลยากต่อการฟอก และมีผลกระทบต่อความเหนียวของกระดาษอีกด้วย เยื่อที่ได้จากขบวนการนี้จะมีลักษณะนุ่ม เหนียว สีขาวสะอาด เพราะผ่านกรรมวิธีฟอกขาว และล้างสิ่งสกปรกออกมาแล้ว อาจมีสารลิกนินและสารอินทรีย์ปนอยู่บ้าง ขบวนการนี้นิยมใช้ทำกระดาษที่ต้องการคุณภาพดี มีความเหนียว ความทนทานสูง แต่มีข้อเสียที่ได้ปริมาณเยื่อน้อยจากการผลิต เพราะมีการสูญเสียเยื่อไปในระหว่างการต้ม การร่อน การบด การฟอก จนกระทั่งถึงขั้นตอนการผลิตกระดาษ

การผลิตเยื่อทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 ขบวนการ คือ ขบวนการกรด (sulfite process) และขบวนการด่าง (alkaline process) แต่ขบวนการด่างเป็นวิธีที่ปัจจุบันนิยมใช้กันมากที่สุดในการผลิตเยื่อ เพราะสามารถใช้ได้กับไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน การต้มเยื่อด้วยขบวนการที่สำคัญ คือ ขบวนการซัลเฟต หรือควาฟ (sulfate or kraft process) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า alkaline process

การฟอกเยื่อ (pulp bleaching) เป็นการทำให้เยื่อมีสีขาวเหมาะกับการใช้ทำกระดาษ เพื่อการสื่อสารต่าง ๆ การฟอกเยื่อมี 2 วิธี คือ วิธีฟอกเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (bleaching lignin) และวิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออกไป (removing lignin)

ก. วิธีฟอกเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (bleaching lignin)

การฟอกลิกนิน คือ การเปลี่ยนสีของลิกนินให้เป็นสีขาวขึ้นกว่าเดิม โดยไม่ได้เอาลิกนินออกจากเยื่อ จุดมุ่งหมายของการฟอกแบบนี้เพื่อให้ได้ปริมาณเยื่อมาก ๆ เสียค่าใช้จ่ายต่ำ โดยให้เยื่อมีความขาวพอใช้ได้เท่านั้น การฟอกแบบนี้ไม่ทำให้ผลผลิตเยื่อลดลงและเป็นการฟอกแบบขั้นตอนเดียว เยื่อฟอกมีความขาวสว่างปานกลาง และไม่คงทน ยิ่งไปกว่านี้คือเยื่อสามารถกลับสีได้ง่ายเมื่อเก็บไว้นาน ๆ โดยความขาวสว่างจะลดลงและกระดาษจะมีสีเหลือง สารเคมีที่ใช้ได้แก่ โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ข. วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออกไป (removing lignin)

เยื่อเคมีจะฟอกโดยใช้วิธีกำจัดลิกนินออกไป ส่วนใหญ่จะใช้สารคลอรีน (chlorine) ทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วกำจัดลิกนินออกไปเพื่อทำให้เยื่อขาวขึ้น อาจเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ลงไปด้วย โดยใส่ลงในเยื่อหลังจากที่ล้างเยื่อด้วยโซดาไฟแล้วเพื่อต้องการให้เยื่อมีความขาวเพิ่มขึ้นการฟอกแบบนี้มีหลายขั้นตอนการฟอก ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ในการฟอกและขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียกขั้นตอนและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปจะมีตั้งแต่ 3-6 ขั้นตอน เช่น การฟอกเยื่อแบบ CEH หมายถึง ขั้นตอนการฟอกที่เริ่มจากการใช้ด้วยคลอรีน (C) ตามด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (E) ขั้นสุดท้ายคือ การใช้ดัลเซียมไฮโปคลอไรท์ (H) โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษแต่ละชนิดจะมีหน้าที่ ข้อดี และข้อเสียต่างกัน สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในขบวนการฟอกเยื่อกระดาษ

| bleaching chemical | approximate % of mills | chemical fomular | code letter |
|--------------------|------------------------|------------------------------------|-------------|
| sodium hydroxide | 100% | NaOH | E |
| elemental chlorine | 99% | Cl ₂ | C |
| chlorine dioxide | 89% | ClO ₂ | D |
| hypochlorite | 69% | HClO, NaOCl, Ca(OCl ₂) | H |
| oxygen | 64% | O ₂ | O |
| hydrogen peroxide | 43% | H ₂ O ₂ | P |
| sulfur dioxide | 10% | SO ₂ | S |
| sulfuric acid | 9% | H ₂ SO ₄ | A |

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิด หน้าที่ ข้อดี และข้อเสีย ของสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ

| oxidants | หน้าที่ | ข้อดี | ข้อเสีย |
|-------------------------------|---|---|-------------------------------------|
| chlorine and extraction (C+E) | oxidize and chlorinate lignin | effective, economical delignification. Good particle removal. | organochlorine formation |
| hypochlorite(H) | oxidize, brighten and solubilize lignin | easy to make and use | chloroform formation |
| chlorine dioxide (D) | 1.oxidize, brighten and solubilize lignin 2.in small amounts with Cl ₂ protects against degradation of pulp | achieves high brightness without pulp degradation. good particle removal | some organochlorine formation |
| oxygen (O) | oxidize and solubilize lignin | low chemical cost. Provides chloride free effluent for recovery | can cause loss of pulp strength |
| hydrogen peroxide (P) | oxidize and brighten lignin in chemical and high yield pulp | easy to use. low capital cost. | expensive, poor particle bleaching. |

2.4 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมี ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ พบว่ามีลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน สาเหตุที่ทำให้ลักษณะน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษของแต่ละโรงงานแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ ปริมาณการผลิต ขบวนการที่ใช้ในการฟอกเยื่อ รวมทั้งชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ตัวอย่างลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษแสดงในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 แสดงมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ แบบคราฟท์

ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

| Parameter | Mill A (C _D /E) | Mill A (C _D /E) | Mill A (C _D /E) | Mill A (C _D /E) |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Flow (m ³ /adt) | 14.2 / 9.9 | 27.2 / 11.9 | 9.7 / 6.6 | 32.3 / 29.0 |
| pH | 1.8 / 11.8 | 1.2 / 9.0 | 2.0 / 10.2 | 1.8 / 8.8 |
| AOX (mg/l) | 245 / 182 | 209 / 177 | 125 / 83 | 83 / 204 |
| Cl ⁻ (mg/l) | 2,481 / 2,068 | 2,600 / 660 | 1,680 / 1,086 | - |
| BOD (mg/l) | 632 / 715 | - | 675 / 867 | 141 / 344 |
| COD (mg/l) | 2,441 / 3,849 | 1,160 / 1,640 | 1,269 / 2,480 | 552 / 2537 |
| Color (CU) | 7,250 / 15,270 | 2,080 / 11,680 | 1,245 / 4,560 | 810 / 10,590 |
| TSS (mg/l) | - | 36 / 16 | 121 / 96 | 47 / 27 |

- หมายเหตุ : 1.Mill A, softwood mill, ลำดับการฟอกเยื่อ C_D E_O DED, 30%ClO₂
 2.Mill B, softwood mill, ลำดับการฟอกเยื่อ CEH
 3.Mill C, hardwood mill, ลำดับการฟอกเยื่อ C_D E_H DE_HD, 50%ClO₂
 4.Mill D, softwood mill, ลำดับการฟอกเยื่อ C_DEH, 6%ClO₂

ที่มา : Dorica, 1992

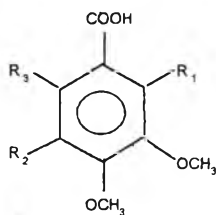
ตารางที่ 2.5 แสดงมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ แบบกราฟท์

| ขั้นตอน | วัสดุที่ใช้ | มลพิษที่เกิดขึ้น |
|---------------------------------|--|--|
| fiber furnish preparation | ท่อนซุง, เศษไม้, ขี้เลื่อย | BOD, TSS |
| chemical pulping kraft process | furnish chips | resins, fatty acids, color, BOD, COD, AOX, VOCs (terpenes, alcohols, phenols, methanol, acetone, chloroform) |
| bleaching | chemical pulp | dissolved lignin and carbohydrates, color, COD, AOX, inorganic-chlorine compounds (e.g., chlorate (ClO ₂)) |
| | elemental chlorine (Cl ₂), chlorine containing compounds | organochlorine-chlorine compounds (e.g. dioxins, furan, chlorophenols) |
| papermaking | additives, bleached/unbleached pulp | particulate wastes, organic compounds, inorganic dyes, COD, acetone |
| wastewater treatment facilities | process wastewaters | BOD, TSS, COD, color, chlorophenolics, carbon disulfide, VOCs (terpenes, alcohols, phenols, methanol, acetone, chloroform) |

2.5 สารประกอบคลอรีเนตเตดฟีนอล (chlorinated phenolic compounds)

เนื่องจากในขบวนการผลิตกระดาษต้องใช้สารเคมีแต่ละชนิดในปริมาณสูง ทำให้ปัจจุบันอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษก่อให้เกิดปัญหามลภาวะด้านน้ำเสียเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจัยสำคัญเกิดจากสารประกอบคลอรีน (chlorinated compounds) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยคลอรีน โดยเฉพาะสารประกอบคลอรีเนตเตดฟีนอล (chlorinated phenolic compounds) ซึ่งการใช้คลอรีนในปริมาณสูงนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้อุตสาหกรรมประเภทนี้ประสบปัญหาอย่างมากในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย และการควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงาน โดยสารประกอบคลอรีนส่วนหนึ่งเท่าที่ตรวจพบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษแล้ว คือ isomers of chlorocymens and chlorocymenenes, chlorinated monoterpenes, isomer of chlorothiophenes, 2,5-dichloro-3-dihydroxybenzo-1,4-quinone (chloranilic acid) and the corresponding hydroquinone, 2,3,4,4-tetrachloro-3-hydroxybutanoic acid, dichloroacetonitrile and trichloromethanesulphonylchloride, chlororetenes, isomers of polychlorodibenzo-p-dioxin and polychlorodibenzofuran, 2,3,7,8- and 3,4,6,7-tetrachlorodibenzothiophene, chlorinatedfuranones, additional isomers of chlorophenols, aldehydes andketone, chlorinated veratroles, 4-chloro-3-hydroxy-2H-pyran-2-one, trichlorodibenzothiophenes, tri-and tetrachlorothianthrenes, chlorofluorenes, and hexadienedioic acid monomethyl ester. แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงสารประกอบ phenols และoligomer-derivatived phenols

| Phenols | Oligomer-Derivatived Phenols |
|---------------------------------|--|
| 1. dichlorophenol | 1. $R_1 = R_2 = H$; $R_3 = Cl$ |
| 2. 2,4,6-trichlorophenol | 2. $R_1 = R_3 = H$; $R_2 = Cl$ |
| 3. dichloroguaiacol (3 isomer) | 3. $R_1 = H$; $R_2 = R_3 = Cl$ |
| 4. trichloroguaiacol (3 isomer) | 4. $R_1 = R_2 = R_3 = Cl$ |
| 5. tetrachloroguaiacol | 5. $R_1 = R_2 = H$; $R_3 = -COOH$ |
| 6. monochlorodehydroabiatic | 6. $R_1 = R_3 = H$; $R_2 = -COOH$ |
| 7. dichlorodehydroabiatic | 7. $R_1 = H$; $R_2 = -COOH$; $R_3 = Cl$ |
| 8. dichlorocatechol |  |
| 9. trichlorocatechol (2 isomer) | |
| 10. tetrachlorocatechol | |
| 11. monochloropropioguiaiacone | |

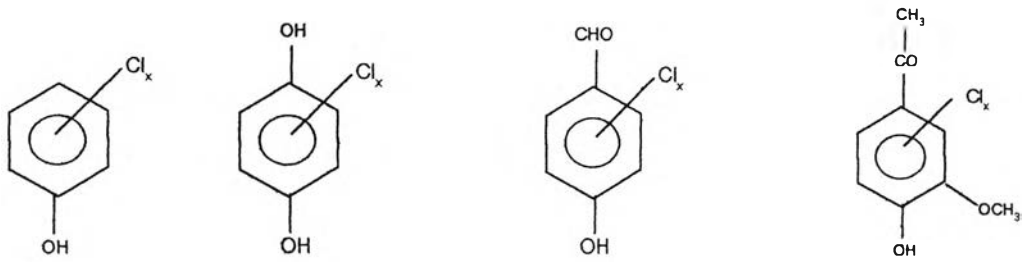
ที่มา :Dence and Annergren,1979

เนื่องจากมีจำนวนสารประกอบที่ตรวจพบจำนวนมากจึงมีการจัดแบ่งได้ 456 ประเภท เป็นสารประกอบคลอรีน 330 ประเภทและสารประกอบที่ไม่มีคลอรีน 126 ประเภท โดยประเภทของสารประกอบคลอรีนได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.7 และแสดงโครงสร้างสารประกอบคลอรีนที่สำคัญไว้ในรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.7 แสดงชนิดของสารประกอบคลอรีนที่พบในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

| ชนิดของสารประกอบคลอรีน | จำนวนที่ได้รับรายงาน (ชนิด) |
|---|-----------------------------|
| Acids, ester, anhydries, furanones, pyrones | 77 |
| Phenols and phenol esters | 52 |
| Aldehydes and ketones | 66 |
| Hydrocarbons | 75 |
| Alcohols | 25 |
| Dioxin and furans | 20 |
| Miscellaneous | 15 |
| รวม | 330 |

ที่มา : McKague and Carlberg, 1996

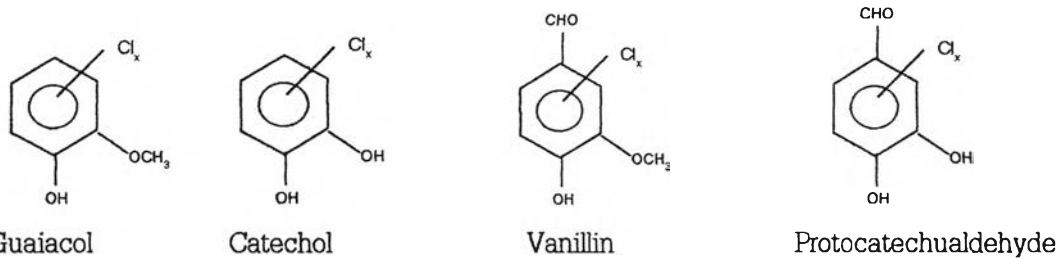


Phenol

Hydroquinone

p-Hydroxybenzaldehyde

Acetovanillone

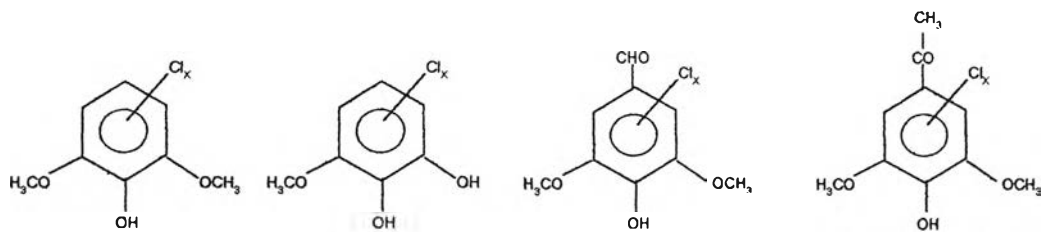


Guaiacol

Catechol

Vanillin

Protocatechualdehyde



Syringol

3-Methoxycatechol

Syringaldehyde

Acetosyringone

รูปที่ 2.2 แสดงสารประกอบคลอรีนเตตฟีนอลที่พบในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

ความเข้มข้นของสารประกอบคลอโรอินเตดฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ แต่ละแห่งจะมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ และขบวนการผลิต Williams และคณะ (1996) ศึกษาความเข้มข้นของสารประกอบคลอโรฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ (ug/l) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นของสารประกอบคลอโรฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสีย (ug/l)

| chlorophenols | whole effluent | | | | |
|-----------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | Mill A | Mill B | Mill C | Mill D | Mill E |
| tetrachlorocatechol | 1.44 | 1.51 | 1.51 | 1.63 | 0.01 |
| 5,6-dichlorovanillin | 12.6 | 1.51 | 3.75 | 5.86 | 1.23 |
| 4,5,6-trichloroguaiacol | 3.53 | 1.58 | 5.27 | 4.30 | 0.01 |
| 3,4,5-trichlorocatechol | 9.03 | 1.65 | 3.70 | 2.37 | 0.01 |
| total chlorinated phenolics | 81.3 | 18.0 | 34.9 | 126 | 6.24 |
| 6-monochlorovanillin | 21 | 1.47 | 9.59 | 7.73 | 0.03 |
| 3,4,5-trichlorosyringol | 0.26 | 0.93 | 0.19 | 0.32 | 0.01 |
| 3,4,5-trichloroguaiacol | 4.51 | 0.64 | 4.83 | 19.9 | 1.65 |
| tetrachloroguaiacol | 0.66 | 1.99 | 0.24 | 0.61 | 0.01 |
| 4,5-dichloroguaiacol | 24.9 | 0.65 | 1.05 | 3.69 | 0.01 |
| 4,6-dichloroguaiacol | 0.91 | 5.32 | 1.94 | 2.28 | 3.36 |
| 4,5-dichlorocatechol | 2.44 | 0.80 | 2.79 | 77.6 | 0.01 |

หมายเหตุ :

- 1.Mill A, softwood, กำลังผลิต 1,300 ตัน/วัน, ขบวนการฟอกเยื่อ 50%ClO₂
- 2.Mill B, softwood/hardwood,กำลังผลิต 1,200 ตัน/วัน, ขบวนการฟอกเยื่อ ClO₂,O₂ delignification
- 3.Mill C, softwood/hardwood,กำลังผลิต 1,200 ตัน/วัน, ขบวนการฟอกเยื่อ 50%ClO₂
- 4.Mill D, softwood, กำลังผลิต 1,500 ตัน/วัน, ขบวนการฟอกเยื่อ 100%ClO₂, O₂ delignification
- 5.Mill E, softwood, กำลังผลิต 400 ตัน/วัน

ที่มา : Williams et al.,1996

ผลกระทบของสารประกอบคลอรีเนเตดฟีนอล (chlorinated phenolic compounds) ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ และเกิดการสะสมในดินตะกอนบริเวณแหล่งน้ำนั้น ๆ Voss และYunker, 1983 ศึกษาความเข้มข้นสารประกอบคลอโรฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำทิ้ง, แหล่งน้ำ และในตะกอน แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.9 ต่อมา Owens และReeve, 1996 ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบคลอรีเนเตดฟีนอลในปลา แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 แสดงความเข้มข้นสารประกอบคลอโรฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำทิ้ง, แหล่งน้ำ และในตะกอน

| chlorophenols | effluent (ug/l) | freshwater (ug/l) | sediment (mg/g) |
|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| dichlorocatechol | 12-90 | - | 0.04 |
| dichloroguaiacols | 22-100 | 0.08 | 0.006 |
| 2,4-dichlorophenol | 9-15 | 0.1 | - |
| tetrachlorocatechol | 22-420 | 0.8 | 0.35 |
| tetrachloroguaiacol | <10-620 | 0.3 | 0.05 |
| 3,4,5-trichlorocatechol | 120-270 | - | 0.002 |
| trichloroguaiacols | <10-340 | 1.0 | 0.04 |
| 2,4,6-trichlorophenol | <1-51 | 0.09 | 0.03 |

ที่มา : Voss and Yunker, 1983

เนื่องจากสารประกอบคลอรีนก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยสารประกอบคลอรีนแต่ละชนิดก่อให้เกิดผลกระทบแตกต่างกันแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.11 โดยสารประกอบคลอโรฟีนอลทุกชนิดก่อให้เกิดผลกระทบเฉียบพลันและผลกระทบเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิต พบว่า pentachlorophenol และ 2,4,6-trichlorophenol เป็นสารก่อมะเร็ง เกณฑ์การได้รับปริมาณสารประกอบคลอรีนที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (chronic toxicity criteria) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.12 โดยเมื่อได้รับ chloroform 1240 (ug/l), 2,4-dichlorophenol 365 (ug/l), hexachlorobenzene 3.68 (ug/l) และ 2,4,6-trichlorophenol 970(ug/l) จะก่อให้เกิดผลกระทบเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิต จึงควรให้ความสำคัญในการศึกษาหาวิธีการกำจัดและการควบคุมปริมาณสารประกอบคลอรีนที่ปนเปื้อนออกมาจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

ตารางที่ 2.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบคลอรีเนเตดฟีนอลในปลา

| สารที่ตรวจพบ | พันธุ์ปลา (fish species) | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|
| | Perch | Mountain whitefish |
| เนื้อปลา (Fillet) | | |
| 2,3,7,8-TCDD (ppt) | 2-19 | 2-110 |
| 2,3,7,8-TCDF (ppt) | 2-9 | 10-430 |
| EOCl (ppm) | 130-330 | 15-105 |
| น้ำดี (Bile) | | |
| EOCl (ppm) | - | 75-520 |
| chlorophenol (ppb) | - | - |
| 2,4-dichlorophenol | - | 700-12,000 |
| 2,4,6-trichlorophenol | 8,050-19,700 | 400-14,000 |
| 2,3,4,6-tetrachlorophenol | 2,460-4,140 | ND-800 |
| 3,4-dichloroguaiacol | - | ND-4,100 |
| 4,5-dichloroguaiacol | - | 290-7,000 |
| 4,6-dichloroguaiacol | - | ND-4,800 |
| 3,4,6-trichloroguaiacol | - | ND-2,000 |
| 4,5,6-trichloroguaiacol | 7,740-20,100 | ND-26,000 |
| 3,4,5-trichloroguaiacol | 50,500-97,000 | 480-23,000 |
| tetrachloroguaiacol | 23,700-59,900 | 400-9,100 |
| 4,5-dichlorocatechol | - | ND-200 |
| 3,4,5-trichlorocatechol | - | ND-1,000 |
| tetrachlorocatechol | - | ND-93,000 |
| 6-chlorovanillin | - | ND-200 |

หมายเหตุ : ND = not detected

ที่มา : Owens and Reeve, 1996

ตารางที่ 2.11 แสดงผลกระทบของสารประกอบคลอรีเนตที่พบบ่อยต่อสิ่งมีชีวิต

| compound | acute aquatic | chronic aquatic | human non-cancer | human cancer |
|----------------------------|---------------|-----------------|------------------|--------------|
| 4-chlorocatechol | ● | ● | | |
| 4-chlorophenol | ● | ● | ● | |
| 6-chlorovanillin | ● | ● | | |
| 4,5-dichlorocatechol | ● | ● | | |
| 2,4-dichlorophenol | ● | ● | ● | |
| 2,6-dichlorophenol | ● | ● | ● | |
| 2,6-dichlorosyringaldehyde | ● | ● | | |
| 5,6-dichlorovanillin | ● | ● | | |
| pentachlorophenol | ● | ● | | ● |
| tetrachlorocatechol | ● | ● | | |
| tetrachloroguaiacol | ● | ● | | |
| 2,3,4,6-tetrachlorophenol | ● | ● | ● | |
| 3,4,5-trichlorocatechol | ● | ● | | |
| 3,4,6-trichlorocatechol | ● | ● | | |
| 3,4,5-trichloroguaiacol | ● | ● | | |
| 3,4,6-trichloroguaiacol | ● | ● | | |
| 4,5,6-trichloroguaiacol | ● | ● | | |
| 2,4,5-trichlorophenol | ● | ● | ● | |
| 2,4,6-trichlorophenol | ● | ● | | ● |
| trichlorosyringol | ● | ● | | |

Noted : ● indicates water quality value available

ที่มา : Fisher, Barton and Wiegand, 1996

ตารางที่ 2.12 แสดงเกณฑ์การได้รับปริมาณสารประกอบคลอรีนที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ

| chemical | fresh water chronic toxicity criteria (µg/l) | human health criteria-based upon consumption of fish and water (µg/l) |
|-----------------------|--|---|
| chloroform | 1240 | 5.7 |
| 2-chlorophenol | - | 180 |
| 2,4-dichlorophenol | 365 | 93 |
| 2,3,7,8-TCDD | $< 1 \times 10^{-5}$ | 1.3×10^{-8} |
| Hexachlorobenzene | 3.68 | 7.2×10^{-4} |
| 2,4,6-trichlorophenol | 970 | 1.2 |

ที่มา : U.S. bleached pulp mill discharge permits

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และZhang (1997) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขนาดอนุภาคผงเหล็กระหว่างขนาดนาโนสเกล และผงเหล็กทั่วไปในการกำจัดสารประกอบคลอรีน โดยใช้สารประกอบคลอรีนประเภท chlorinated aliphatics compounds 2 ชนิด ได้แก่ trichloroethylene (TCE) และ polychlorinated biphenyl (PCBs) ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคผงเหล็ก ขนาดนาโนสเกล (nanoscale iron) ที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิว $33.5 \text{ m}^2/\text{g}$ มีประสิทธิภาพสูงกว่าผงเหล็กทั่วไปที่มีพื้นที่ผิว $0.9 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้เพราะอนุภาคผงเหล็กขนาดนาโนสเกล (nanoscale iron) ที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงกว่า และได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ผงเหล็กขนาดนาโนสเกลที่เคลือบผิวด้วยพัลลาเดียม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบคลอรีนสูงกว่าผงเหล็กทั่วไป และผงเหล็กขนาดนาโนสเกลที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยพัลลาเดียม ทั้งนี้เพราะพัลลาเดียมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถส่งเสริมปฏิกิริยาในการกำจัดสารประกอบคลอรีน โดยสามารถขัดขวางการรวมตัวของเหล็กออกไซด์ได้

Matheson และ Tratnyek (1994) ศึกษาประสิทธิภาพของผงเหล็กในการกำจัดสารประกอบฮาโลเจนออกจากสารประกอบประเภท chlorinated methanes โดยใช้ chlorinated solvents 4 ชนิด ได้แก่ carbon tetrachloride, chloroform, methylene chloride และ trichloroethylene ระบบที่ใช้ คือ well-mixed batch system ผลการศึกษาพบว่า สามารถใช้ผงเหล็กกำจัดสารประกอบคลอรีนออกจาก carbon tetrachloride, chloroform และ trichloroethylene ได้ ส่วนใน methylene chloride เกิดปฏิกิริยาช้า และปริมาณสารประกอบคลอรีนลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญภายในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่ใช้ไม่เหมาะสมกับสารชนิดนี้ พบว่าถ้า pH ที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาช้าลง และถ้ามีการทำความสะอาดผิวเหล็กก่อนใช้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น

Sayles และคณะ (1997) ศึกษาความสามารถของผงเหล็ก (powdered zero-valent iron) ในการกำจัดสารประกอบคลอรีนออกจาก DDT และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง โดยเมื่อใช้ผงเหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ DDT, DDD [1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethene] และ DDE [2,2-bis(p-chlorophenyl)-1,1-dichloroethene] ในสภาวะ buffered anaerobic aqueous solution ที่อุณหภูมิ 20 °C อัตราการกำจัดคลอรีนออกจาก DDT, DDD และ DDE ไม่ขึ้นกับปริมาณผงเหล็กที่ใช้ แต่ขึ้นกับสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ใช้ คือ Trion x-114

Orth และ Gillham (1996) ศึกษาการกำจัดคลอรีนออกจาก trichloroethylene (TCE) โดยใช้ผงเหล็ก ทดลองโดยการผ่านสารละลาย TCE ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุผงเหล็ก ที่มีอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบ pseudo-first-order สามารถกำจัดคลอรีนออกจาก TCE ได้ในช่วงความเข้มข้นประมาณ 1.3 - 61 mg/l. และ 3.0 - 3.5 % ของ TCE เริ่มต้นจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย dichloroethene 3 ไอโซเมอร์ คือ cis-1,2-DCE, trans-1,2-DCE, 1,1-DCE และ vinyl chloride การพบผลิตภัณฑ์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ ทั้งนี้เพราะ TCE ส่วนใหญ่ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวเหล็ก นอกจากนี้ยังตรวจพบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ethene, ethane, methane, propane, propene, 1-butene และ butane โดย ethene เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยตรงจากกระบวนการที่เกิดขึ้น และตรวจพบว่าเกิดการแตกตัวของผงเหล็กภายในคอลัมน์

Sintar และคณะ (1996) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผงเหล็กเมื่อใช้และไม่ใช้ H_2/Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการบำบัด 1,2-dibromo-3-chloropropane (DBCP) และน้ำที่ปนเปื้อนไนเตรด ผลการศึกษาพบว่า ทั้งผงเหล็กที่ใช้และไม่ใช้ H_2/Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถกำจัดคลอรีนออกจาก DBCP ได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถเปลี่ยนรูป DBCP ให้กลายเป็น propane ได้ในช่วง pH 7.0 - 8.7 ที่อุณหภูมิ 22°C พบว่า ชนิดของบัฟเฟอร์ กรดที่ใช้รับพีเอช และสารประกอบอื่น ๆ ในน้ำใต้ดิน มี

ผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยถ้าปรับพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและคุมพีเอชด้วยบัฟเฟอร์ HEPES อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะสูงกว่าไม่ใช้ บัฟเฟอร์ถึง 7 เท่า ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen, DO) และ NO^{3-} มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย แต่ NO^{2-} และ SO^{4-} ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาสามารถกำจัดไนเตรด 60 mg/l. ได้ภายใน 14 นาที และถ้าใช้ 1% Pd-Alumina เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

Ozdemir และ Tuffkci (1996) ศึกษาการกำจัดคลอรีนตกค้างในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยใช้ metallic iron พบว่า เมื่อนำ granular metallic iron มาใช้ลด chlorine sp. จะเกิดการเปลี่ยนรูป chlorine ไปเป็น chloride ในสารละลายคลอรีน สภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษา คือ ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ขนาดอนุภาค (particle size) และช่วงระยะเวลาสัมผัส (contact period) สรุปได้ว่า sp. ของ OCl^- และ HOCl ถูกกำจัดได้ 100% ระหว่าง pH 4 และ 7 ภายในระยะเวลา 25 นาที วิธีการที่ใช้หาปริมาณคลอไรด์ไอออนคือ Standard Iodometric Methods I และ DPD colorimetric Method (APHA, 1995)

Grittini และคณะ (1995) ศึกษาการกำจัดสารประกอบคลอรีนพวก polychlorinated biphenyls (PCBs) โดยใช้ระบบโลหะ 2 ชนิด คือ เหล็ก และพัลลาเดียม โดยใช้พัลลาเดียมเคลือบผิวเหล็ก (bimetallic system) PCBs เป็นสารประกอบในกลุ่ม aromatics compounds สารที่ใช้คือ aroclor 1260 และ 1254 ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาการกำจัดคลอรีนใน PCBs จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ภายใน 5 - 10 นาที โดยปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วที่ผิวของระบบโลหะ 2 ชนิดมากกว่าใช้โลหะเพียงชนิดเดียว โดยอะตอมของคลอรีนถูกแทนที่โดยอะตอมของไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ biphenyl และ chloride ion โดย biphenyl จะถูก adsorbed อยู่บนพื้นที่ผิว และ/หรือละลายอยู่ในสารละลาย ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณผงเหล็กที่ใช้

Grittini และคณะ (1995) ศึกษาการใช้ผงเหล็ก (zero-valent iron) ในการกำจัดสารประกอบฮาโลเจน 14 ชนิด ประกอบด้วย halogenated methanes 4 ชนิด ได้แก่ tetrachloromethane, trichloromethane, dichloromethane และ tribromomethane Chlorinated ethanes 4 ชนิด ได้แก่ hexachloroethane, 1,1,2,2- และ 1,1,1,2-tetrachloroethane และ 1,1,1-trichloroethane chlorinated ethenes 6 ชนิด ได้แก่ tetrachloroethane, trichloroethane, trans 1,2-dichloroethene, cis 1,2-dichloroethene, 1,1-dichloroethene และ vinyl chloride โดยใช้ batch test และ column test ผลการศึกษาพบว่าสามารถย่อยสลายสารประกอบฮาโลเจนได้ 13 ชนิด ยกเว้น dichloromethane โดยอัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวเหล็กต่อปริมาตรสารละลายเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นเป็นแบบ logarithmically.