

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ปัญหาเรื่องน้ำเสียมีประวัติความเป็นมาคู่กันไปกับความเจริญเติบโตของชุมชน กล่าวคือ เมื่อครั้งประชากรยังมีน้อยและกระจัดกระจาย ก็ไม่เป็นปัญหาอะไรมากนัก ต่อมาเมื่อชุมชนเจริญเติบโตประชากรเพิ่มมากขึ้น ปัญหาเรื่องน้ำเสียก็ติดตามเป็นเงาตามตัว ทั้งนี้เพราะว่าน้ำเสียเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งในการดำเนินชีวิตประจำวันของคน และนับวันน้ำเสียจะมีปริมาณมากขึ้นเป็นทวีคูณ และมีสารใหม่ๆแปลกๆของผลิตภัณฑ์สมัยใหม่เจือปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้ปัญหาที่ยุ่งยากมากขึ้นตามลำดับ (วิทยา เพียรวิจิตร, 2525)

น้ำเสียจากชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากจะโสโครกมีกลิ่นเหม็น สีดำคล้ำ และอาจมีสารเคมีที่มีพิษเจือปนอยู่ด้วย เมื่อน้ำเสียไหลลงสู่แหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ก็จะไปแปรสภาพแหล่งน้ำที่สะอาดตามธรรมชาติให้กลายเป็นแหล่งน้ำเสียไป ทำให้ไม่อาจจะใช้น้ำจากแหล่งน้ำเหล่านั้นได้ต่อไปอีก ทั้งยังอาจส่งกลิ่นเหม็นตลบไปทั่วบริเวณ ทำให้อากาศไม่บริสุทธิ์ เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและความเป็นอยู่ของประชากรอย่างร้ายแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่ในด้านอนามัยของประชาชนเท่านั้น หากยังกระทบกระเทือนถึงเศรษฐกิจของประเทศด้วย เพราะเหตุว่ากิจการที่ต้องใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ เช่น การประปา และอุตสาหกรรม ไม่อาจจะใช้น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติเหล่านี้ได้ เป็นเหตุให้ต้นทุนในการผลิตสูง

การแก้ไขปัญหาน้ำเสียจากชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมเป็นเรื่องที่ต้องอาศัยวิชาการ กำลังเงิน และความร่วมมือจากทุกฝ่าย ย่อมเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าที่ใดมีความเจริญมีการอุตสาหกรรม ที่นั่นก็จะมีผู้คนเข้าไปอาศัยอยู่กันอย่างเนืองแน่น น้ำเสียจากชุมชนก็ดี จากโรงงานอุตสาหกรรมก็ดี ในที่สุดจำเป็นต้องปล่อยลงสู่แหล่งน้ำกันทั้งสิ้น เพื่อสวัสดิภาพของประชาชนและการดำรงไว้ซึ่งทรัพยากรธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องรักษาแหล่งน้ำทั้งหลายมิให้สกปรกโสโครก โดยทางชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆต้องปฏิบัติการบางอย่างกับน้ำเสียให้สะอาดขึ้นเสียก่อนตามควรแก่กรณี ก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้เหมาะสมตามสภาพของแหล่งน้ำ หรือการดัดแปลงกระบวนการบางอย่างในการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียเป็นผลิตภัณฑ์ของชุมชน โดยที่ส่วนประกอบของน้ำเสียจะมีของแข็งอินทรีย์ทั้งหลายและสารแขวนลอย ซึ่งจะเน่าเสียและเสื่อมสภาพ จากการศึกษางานวิจัย

ที่เกี่ยวข้องบ่งชี้ว่า สารเคมีประเภทตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีในน้ำเสีย สามารถบำบัดได้ด้วยกรรมวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) โดยไม่ต้องเติมอากาศ (Anaerobic system) แต่การบำบัดด้วยกรรมวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพโดยไม่ต้องเติมอากาศ ต้องดำเนินการสลับกันกับหน่วยบำบัดแบบเติมอากาศ ซึ่งนับว่ามีความยุ่งยากอันเนื่องมาจากการควบคุมระบบจุลินทรีย์ที่ใช้ ซึ่งมีความว่องไวอย่างมีนัยสำคัญต่อสภาพของน้ำ (วิทยา เพียรวิจิตร, 2525)

ในอดีตได้มีการใช้วิธีการบำบัดที่เป็นแบบง่ายๆ เช่น เป็นบ่อคอกกริตธรรมดา ซึ่งอาจเป็นกระบวนการตกจม (Sedimentation) การเติมอากาศ (Aeration) ถังกรองหยด (Trickling filter) การฆ่าเชื้อ (Chlorination) การดักตะกอน (Screening) เป็นต้น (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2543)

นอกจากนี้ยังมีการบำบัดน้ำเสียทางเคมีซึ่งใช้ได้ดีแต่ก็มีปัญหาตะกอนเคมีเกิดตามมามากมาย โดยคุณภาพน้ำทิ้งยังมีสภาพเน่าเหม็นปรากฏอยู่ แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียทางเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งค้นพบในปี 1894 นับว่าเป็นอีกวิธีการหนึ่งซึ่งน่าจะมีผลกระทบจากสารเคมีตกค้างน้อยกว่าวิธีการบำบัดทางเคมีอื่นๆ เนื่องจากใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ตกค้างในน้ำ โดยสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ในสภาวะกรดที่มีไอออนของเหล็กอยู่ จึงได้ถูกนำมาใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันตั้งแต่ปี 1930 เป็นต้นมา การแยกเอาไอออนของเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำสภาพเป็นกรดสามารถทำได้โดยวิธีการตกตะกอน เมื่อสารละลายมีสภาวะเป็นเบส งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณของฟีนอลและ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการบำบัดสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในระดับหนึ่ง ก่อนที่จะมีการบำบัดทางชีวภาพแล้วจึงปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป หลังจากนั้นจะนำผลที่วิเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้กับน้ำทิ้งจากบริษัททักซิณปาล์ม(2521) จำกัด จ.สุราษฎร์ธานีเพื่อดูประสิทธิภาพในการบำบัดต่อไป โดยจะมุ่งเน้นการลดความเข้มข้นของสีน้ำทิ้ง ซึ่งมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มให้เจือจางลง

## การตรวจเอกสาร

### 1. ผลกระทบของฟีนอลและ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลต่อสิ่งแวดล้อม

ฟีนอล ( $C_6H_6O$ ) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ( $C_6H_4Cl_2O$ ) อยู่ในกลุ่มของสารฟีนอลิก ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลต่ออยู่เป็นหลัก และอาจจะมีหมู่แทนที่ต่างๆแทนที่ในตำแหน่งอื่นๆได้อีก สารฟีนอลิกตัวพื้นฐานที่ง่ายที่สุดคือ ฟีนอล ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ มีมวลโมเลกุล 94.11 เป็นผลึกรูปเข็ม ไม่มีสี แต่เมื่อโดนอากาศจะมีสีชมพูอ่อนๆ จุดหลอมเหลว 40.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 181.8 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 78 องศาเซลเซียส ฟีนอล 8.2 ส่วน ละลายได้ในน้ำ 100 ส่วนโดยน้ำหนักที่ 15 องศาเซลเซียส สารละลายของฟีนอลเป็นกรดอ่อน มีค่า pKa 9.9 ที่สารละลายเจือจางมากๆจะมีรสค่อนข้างหวาน นอกจากนี้ฟีนอลยังละลายได้ในกลีเซอรอล คาร์บอนไดซัลไฟด์ และละลายได้ดีในอัลกอฮอล์ อีเธอร์ และคลอโรฟอร์ม (กฤษฎณล กীরติวิทยายุต, 2528)

ฟีนอล มีกลิ่นเหม็น เป็นสารประกอบพื้นฐานของยาฆ่าวัชพืช ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อรา สารป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ ตัวอย่างของสารประกอบฟีนอลที่จัดเป็นสารมลพิษระดับอันตราย ได้แก่ ฟีนอล ออโร-ครีซอล เมตา-ครีซอล พารา-ครีซอล คาเทคอล ไฮลีนอล เป็นต้น สารเหล่านี้ปนอยู่ในของเสียจากโรงงานหลายชนิด เช่น โรงงานผลิตพลาสติก สารป้องกันเนื้อไม้ โรงงานกระดาษ โรงงานผลิตไม้ ยาฆ่าเชื้อโรค ฟีนอลิกเรซิน ยากำจัดวัชพืช ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง สี สารเคมีอินทรีย์ และโรงงานกลั่นน้ำมัน ฟีนอลจะเป็นอันตรายที่สุดสำหรับปลาโดยเฉพาะกับระบบประสาท ปลาที่อยู่ในน้ำที่มีสารมลพิษเหล่านี้ ปลาจะถูกกระตุ้นให้ระคายเคืองจนขาดการควบคุม วายน้ำไม่มั่นคง ครีบจะสั่นเทา ในที่สุดก็เสียชีวิต ทงตัว หมุนรอบๆและตายในที่สุด หรือไมก็อาจจะอยู่ในสภาพคล้ายกับไร้ความรู้สึก โดยเฉพาะฟีนอลและครีซอล จะมีผลต่อการรบกวนประสาทอย่างสูงตามด้วยการเป็นอัมพาต สารดังกล่าวยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆในน้ำและสัตว์ชั้นสูงอีกด้วย ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นสิ่งมีชีวิตในน้ำจะเป็นอัมพาต และสามารถทำให้ตายได้โดยจับปล้นในกบ ไชสันหลังจะถูกรบกวนให้ระคายเคืองมาก จนทำให้กล้ามเนื้อหดเกร็งอย่างรุนแรงในที่สุดก็เป็นอัมพาตอย่างสมบูรณ์ ในคน จะมีปฏิกิริยาต่อเยื่อในจมูกทำให้ระคายเคือง รู้สึกสับสน กล้ามเนื้อโครงกระดูกสั่นเทา ตามด้วยกล้ามเนื้อเกร็งอย่างรุนแรง และระบบหายใจล้มเหลวในที่สุด แม้ในปริมาณน้อยๆก็ทำให้คลื่นเหียน วิงเวียน เสียการทรงตัว หายใจไม่สม่ำเสมอได้ นอกจากนี้น้ำที่มีฟีนอลปนเปื้อนอยู่เพียงปริมาณน้อยมากๆ เมื่อถูกคลอรีเนต (Chlorinated) ในกระบวนการทำน้ำให้บริสุทธิ์ สะอาด หรือฆ่าเชื้อโรค ก็สามารถทำให้เกิดคลอโรฟีนอลได้เช่นกัน (กฤษฎณล กীরติวิทยายุต, 2528)

2,4-ไดคลอโรฟีนอล ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง หมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ และคลอรีน 2 อะตอม มีมวลโมเลกุล 163 ไม่มีสี เป็นผลึกรูปเข็ม 6 เหลี่ยมซึ่งเป็นลักษณะของเบนซีน จุดหลอมเหลว 45 องศาเซลเซียส จุดเดือด 210 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 114 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายน้ำ 4.5 กรัมต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส สารละลายของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลมีค่า pKa 7.8

2,4-ไดคลอโรฟีนอล มีกลิ่นเหม็นมาก เป็นสารประกอบของยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลงออกกลางคืน ยาฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไข่ของสัตว์บางชนิด สารป้องกันเนื้อไม้ ตัวอย่างของสารประกอบ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่จัดเป็นสารมลพิษระดับอันตราย ได้แก่ 2,4-Dichlorophenoxyacetate, Bifenox & Dichlorprop herbicides, 4-(2,4-Dichlorophenoxy) Butyrate herbicide สารเหล่านี้ปนอยู่ในของเสียจากโรงงานหลายชนิด เช่น โรงงานผลิตกระดาษ ในขั้นตอนการฟอกขาวเยื่อกระดาษ น้ำยารักษาไม้ ยาฆ่าเชื้อโรค ยากำจัดวัชพืช ยาปราบศัตรูพืช และยาฆ่าแมลง 2,4-ไดคลอโรฟีนอลเมื่ออยู่ในบรรยากาศจะมีค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ย 5.3 วัน และสามารถทำปฏิกิริยาเคมีโดยมีแสงเข้ามาเกี่ยวข้องหรือเป็นตัวเร่ง (Photochemical) เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ซึ่งในทางฟิสิกส์การเกิดฝน จะช่วยลดปริมาณ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลในอากาศได้ ส่วนในกรณีของดินและน้ำ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลสามารถจะอยู่ในรูปที่ไม่สามารถแตกตัวได้ (non-Dissociated) และในรูปของไอออน (Ionized form) ได้ทั้งสองกรณี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า pH นอกจากนี้ได้มีการศึกษาพบว่า 2,4-ไดคลอโรฟีนอลสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) และมีอากาศ (Aerobic)

([www.speclab.com/compound/c120832.htm](http://www.speclab.com/compound/c120832.htm))

2,4-ไดคลอโรฟีนอล จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะปลาซึ่งจะส่งผลในระยะยาว รวมไปถึงสัตว์ชั้นสูงอีกด้วย ในกรณีของคนถ้าหากสัมผัสกับสารดังกล่าวโดยตรง (ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว) ในปริมาณที่มากพอสมควรจะทำให้ตายอย่างเฉียบพลันได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถซึมลงสู่ผิวหนังได้อย่างรวดเร็วโดยจะมีผลต่อการทำงานของกระบวนการ Phosphorylation (เป็นกระบวนการสังเคราะห์ Adenosine triphosphate, ATP จากโมเลกุลของ Adenosine diphosphate, ADP ซึ่งใช้ในการขนส่งพลังงานอิสระภายในเซลล์) ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถขนถ่ายพลังงานภายในเซลล์ได้ นอกจากนี้อาการที่สังเกตเห็นได้ชัดก็คือ ตัวสั่น กล้ามเนื้อไม่มีกำลัง ชักกระตุก และ การหายใจติดขัด

([www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm4923a3.htm](http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm4923a3.htm))

ดังนั้นสารฟีนอลิก จึงถูกจัดเป็นสารมลพิษที่อันตรายที่สุดประเภทหนึ่งที่ EPA (The U.S.Environmental Protection Agency) ได้เสนอให้มีการควบคุมคุณภาพน้ำที่ใช้ตามครัวเรือน ให้มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดได้สูงสุดไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจะต้องบำบัดน้ำและทำการตรวจสอบคุณภาพของน้ำ ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

## 2. ผลกระทบของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มต่อสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อนำน้ำมันปาล์มไปใช้ทดแทน น้ำมันพืชอื่นๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันเมล็ดถั่ว และอื่นๆ ตลอดจนสามารถใช้ทดแทนไขมันสัตว์ได้เป็นอย่างดี และมีราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชอื่นๆ การผลิตน้ำมันปาล์มมี 3 แบบคือ แบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ แบบยางผลปาล์ม และแบบทอดผลปาล์ม ในบรรดากระบวนการผลิตทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบใช้น้ำก่อให้เกิดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันที่ผลิตได้ ซึ่งจะเป็นน้ำทิ้งจากหม้อหนึ่ง จากเครื่องแยกกรวดทราย จากเครื่องแยกน้ำ (Separator หรือ Decanter) และจากการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร ดังนั้นจึงทำให้มีปัญหาในเรื่องของน้ำทิ้ง ซึ่งพบว่ามีปริมาณของสารอินทรีย์รวมทั้งธาตุต่างๆสูง ทำให้ค่า COD, BOD, Suspended solids (SS) และสี สูงด้วย จึงเป็นแหล่งที่จะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ (ปรีชา มุณีศรี, 2539) โดยเฉพาะในเรื่องสีของน้ำทิ้งซึ่งเป็นปัจจัยที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เนื่องจากลักษณะของน้ำทิ้งมีสีค่อนข้างน้ำตาลเข้มถึงดำ จึงไม่สามารถที่จะนำน้ำที่ได้ไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

สีของน้ำมี 2 ประเภทคือ

1. สีที่แท้จริง (True color) เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ
2. สีที่ปรากฏ (Apparent color) เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือไม่ก็อาจเกิดจากการสะท้อนของท้องฟ้า

สิ่งที่แขวนลอยซึ่งทำให้เกิดสีที่ปรากฏ ได้แก่ พืชเล็กๆในน้ำ เช่น Phytoplankton และ Zooplankton รวมทั้งสิ่งที่ไม่ใช่ชีวิตบางประเภท เช่น เกล็ดของซากพืชและสัตว์ต่างๆ ตะกอนของดินและทราย (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2529)

โรงงานหลายแห่ง เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานทอผ้า โรงงานน้ำมันปาล์ม ฯลฯ มักทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากสีของน้ำเสีย ซึ่งค่อนข้างยากในการแยกสีออกจากน้ำเสียได้หมดหรือการเกิดสาหร่าย (Algae) มากๆในบ่อ หรือลำคลอง ก็จะเป็นสาเหตุทำให้น้ำมีสีเขียวได้ (ศิริเพ็ญ ตรีชัยยาพร, 2543)

ผลเสียของสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีดังนี้

1. กั้น หรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำ ซึ่งจะ เป็นสาเหตุให้ลดการเกิดการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis)
2. สีเป็นสิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นจะทำให้ น้ำไม่น่าดูได้
3. สีส่วนใหญ่แล้วเกิดจากสารอินทรีย์ชนิดที่สามารถละลายได้ในน้ำและพวกคอลลอยด์ (Colloid)

### 3. ปฏิกริยาเฟนตัน

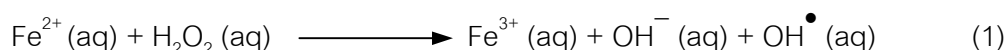
ปฏิกริยาเฟนตัน เป็นปฏิกริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 จนกระทั่งถึงปี 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกริยานี้อย่างสมบูรณ์ และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล ฟอรัลดีไฮด์ สารประกอบอะโรมาติก บี.ที.อี.เอ็กซ์ และสารเคมีต่างๆที่ได้มาจากวัสดุที่ย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสีย ตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อนโดยมีผลดังนี้ (<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

- ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction)
- ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability improvement)
- ลดค่า BOD และ COD (BOD and COD removal)
- ลดกลิ่นและสี (Odor and Color removal)

#### 3.1 กลไกของปฏิกริยาเฟนตัน

การใช้ปฏิกริยาเฟนตัน ซึ่งค้นพบเมื่อ 100 กว่าปีมาแล้ว โดย H.J.H. Fenton พบว่า ศักยภาพของปฏิกริยานี้มีมากในระดับที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ (Bigda R.J., 1995)

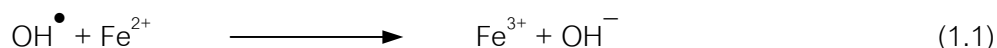
ปฏิกริยาเฟนตัน คือ ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับไอออนของเฟอร์รัสซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังนี้ (Walling C., 1975)



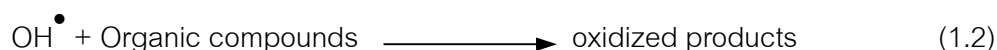
เมื่อปฏิกริยา (1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายๆประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของ

สารประกอบอินทรีย์ได้ อึ่งปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลของสารละลายในปฏิกิริยา (1) สามารถกระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้น เมื่อมีแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) หรือ ก๊าซโอโซน ( $O_3$ ) เป็นคะตะลิสต์ (Arslan I., et al., 2000; Chou S., et al., 1999)

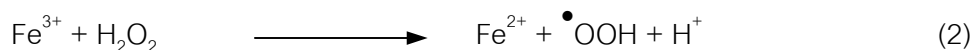
ปฏิกิริยาต่อมาก็คืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ดังนี้



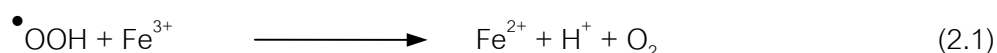
หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังนี้



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังนี้ (Walling C., 1975)



และ



อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน (ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเปอร์แมงกาเนต) แต่มีความสำคัญในกระบวนการเกิดไอออนเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นสุดท้าย ปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือการควบคุมสารเคมี (Reagents) และพีเอช (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น (Ghaly Montaser Y., et al., 2001)

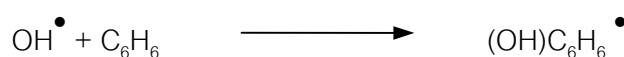
ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือคาร์บอนไดออกไซด์เพราะหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในแง่ของการตรวจสอบสมบัติของน้ำเสียก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการ

ตรวจสอบค่า COD หรือค่า TOC ถ้าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากการเกิดปฏิกิริยาคือคาร์บอนไดออกไซด์แล้วค่า COD หรือค่า TOC ที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยาจะมจะมีค่าน้อยจนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

### 3.2 ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical Reactivity) (<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

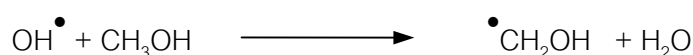
อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) เป็นอนุมูลที่รู้จักกันดีเนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงรองจากฟลูออรีน โดยปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลไฮดรอกซิลแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

#### 3.2.1 การรวมตัว (Addition)



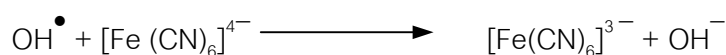
โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไม่อิ่มตัว อะลิฟาติกหรืออะโรมาติก แล้วให้อนุมูลของผลิตภัณฑ์ (เช่น Cyclohexadienyl ดังตัวอย่างในสมการข้างต้น)

#### 3.2.2 การสลัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction)



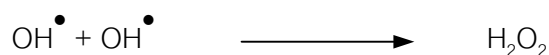
อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (Organic free radical)

#### 3.2.3 การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer)



อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์

#### 3.2.4 การทำปฏิกิริยาคู่กันของอนุมูล (Radical interaction)



โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสภาวะของปฏิกิริยาที่ถูกปรับเปลี่ยนอยู่ 2 กระบวนการคือ การสกัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) และการรวมตัว (Addition) ซึ่งมีผลมากกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ

### 3.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของไอออนเหล็ก (Effect of Iron ion Concentration)

(<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้น้อยมาก ถ้าหากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนของเหล็กเช่นการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปบนน้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มีการเติมไอออนของเหล็กลงไป แต่หากมีการเติมไอออนของเหล็กลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น จนถึงที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

1. ความเข้มข้นของไอออนเหล็กที่จุดเริ่มต้น 3-15 mg/L เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่จะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์
2. สัดส่วนคงที่ของไอออนเหล็กต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไอออนเหล็กต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
3. สารประกอบของเหล็กที่อิมตัวเป็นสมบัติของคีเลตซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรจะแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อให้ไอออนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลทั้งนี้สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1 ต่อ 5-25 (wt/wt)

### 3.4 อิทธิพลของชนิดของเหล็กเฟอร์รัสหรือเฟอร์ริก (Effect of Iron Type)

(<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

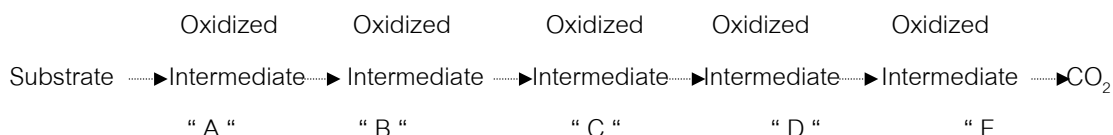
ในการนำไปประยุกต์ใช้เราไม่สามารถรู้ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริงเป็นไอออนของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) หรือไอออนของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทันทีถ้ามีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารอินทรีย์อยู่มากพอ (ตามกลไกของปฏิกิริยาที่ได้เสนอไว้ข้างต้น)

อย่างไรก็ตามถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่า 10-25 mg/L ปฏิกิริยาจะเกิดกับไอออนของเฟอร์รัสได้ดีกว่าโดยที่ไอออนของเฟอร์รัสอาจจะมาจากเกลือของคลอไรด์หรือเกลือของซัลเฟตก็ได้

### 3.5 อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Concentration) (<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

การใช้อนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญมาก ซึ่งสามารถนำมาเขียนปฏิกิริยาอย่างคร่าวๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสียในแต่ละชนิด ได้ดังต่อไปนี้



การเปลี่ยนแปลงในแต่ละลำดับที่ต่อเนื่องกันจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเอง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีของสารประกอบฟีนอลจะมีสารที่ไม่เสถียร (Intermediate) นั่นก็คือ ควิโนน (Quinones) ซึ่งเป็นสารที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณที่พอเหมาะจึงจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นเพื่อให้เลยจุดที่เกิดเป็นสารที่ไม่เสถียร ซึ่งเราจะพบได้ในการบำบัดเบื้องต้นของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนเพื่อช่วยลดความเป็นพิษ ถ้ามีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่า COD ลดลง ความเป็นพิษอาจจะลดลงได้น้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปอีกจะทำให้ความเป็นพิษลดลงอย่างรวดเร็ว

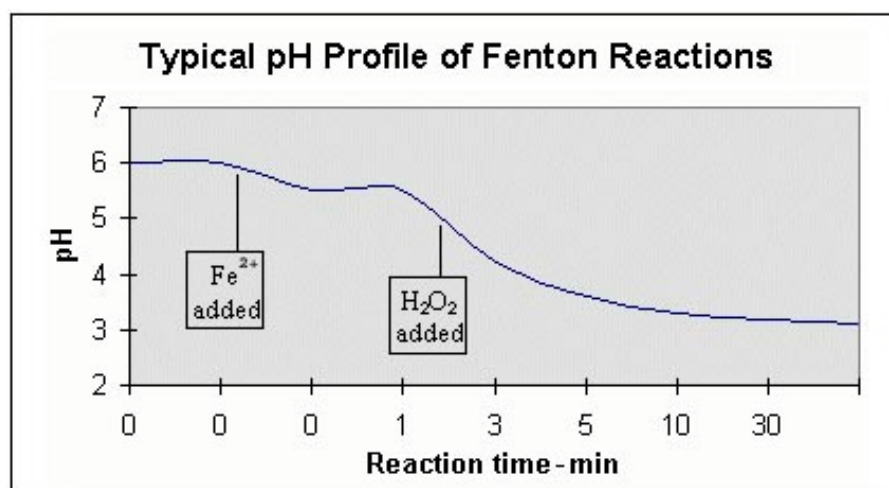
### 3.6 อิทธิพลของอุณหภูมิ (Effect of Temperature)

(<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

อัตราของการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมिन้อยกว่า 20 ° C แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 40-50 ° C ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆลดลง เนื่องจากจะมีการเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิระหว่าง 20-40 ° C

### 3.7 อิทธิพลของพีเอช (Effect of pH)

(<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)



ภาพประกอบ 1 แสดงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเฟนตัน

ที่มา : <http://www.h2O2.com/applications/industrial>

จากกราฟความสัมพันธ์ในส่วนนี้ น้ำเสียจะเริ่มต้นที่ pH 6 การเปลี่ยนแปลงของกราฟในส่วนแรกไม่ได้ระบุเวลาไว้ เพราะเป็นเฉพาะขั้นตอนการเพิ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อทำการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO<sub>4</sub>) และในส่วนที่ 2 นั้น จะเป็นการลดลงของ pH ที่เกิดขึ้น เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปซึ่งจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นการแตกตัวของสารอินทรีย์แล้วให้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอินทรีย์ ค่า pH ที่เริ่มจะคงที่หรือลดลงช้ามาก อาจหมายความว่าปฏิกิริยาได้ถูกยับยั้งหรืออาจจะมีสารผลิตภัณฑ์บางตัวที่ขัดขวางปฏิกิริยาเฟนตันได้เกิดขึ้น

### 3.8 อิทธิพลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Effect of Reaction Time)

(<http://www.h2O2.com/applications/industrial>)

เวลาที่ต้องการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันที่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนบำบัด สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลเวลาของปฏิกิริยาควรอยู่ระหว่าง 30-60 นาที ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากหรือมีสารที่มีความซับซ้อนมากในการเกิดปฏิกิริยาจึงอาจใช้เวลาหลายชั่วโมง สำหรับในกรณีนี้การเติมไอออนของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทีละขั้นๆ

จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเติมโอโซนของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณมากๆ ที่จุดเริ่มต้นของปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียว

### 3.9 หน้าที่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD

(<http://www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/bodcod.html>)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการลดค่า BOD และ COD ในอุตสาหกรรมน้ำเสียมาหลายปีแล้ว เนื่องจาก

- ช่วยย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสียเบื้องต้นก่อนที่จะไปสู่กระบวนการย่อย สลายทางชีวภาพ (เช่น ยาฆ่าแมลง สารให้ความเย็น เรซิน และพวกสีย้อม)
- ช่วยบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียมากหรือน้อยในเบื้องต้นซึ่งการบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถทำได้ ก่อนที่จะมีการปล่อยออกไป
- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ ซึ่งใช้กระบวนการลอย หรือการตกจม
- ช่วยทำให้การละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพในขณะที่ยูทิลิตี้ให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือเกิดภาวะที่ปริมาณของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมากเกินไปเกินความสามารถของระบบจะรับได้ (Overload)

ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD แบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

#### 1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยตรง (Direct Chemical Oxidation)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถที่จะใช้เพียงลำพัง หรือใช้ร่วมกับอะตอมลิสต์ซึ่งอะตอมลิสต์ที่ใช้ได้แก่ โอโซนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$  หรือ  $\text{Fe}^{3+}$ ) แสงอุลตราไวโอเล็ต (UV) โอโซน ( $\text{O}_3$ ) และพวกแอลคาไล (Alkali) ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยออกซิไดซ์สารประกอบในน้ำเสียทำให้ค่า BOD หรือ COD ในน้ำเสียลดลง

ในการทดสอบน้ำเสีย เราสามารถแบ่งชนิดของน้ำเสียออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- Type A จะมีซัลไฟด์ (Sulfide) ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) และซัลไฟท์ (Sulfite) อยู่ในน้ำเสีย
- Type B จะมีฟีนอล (Phenols) ไซยาไนด์ (Cyanides) เอมีน (Amines) อยู่ในน้ำเสีย
- Type C จะมี BTEX และ Paraffins อยู่ในน้ำเสีย

โดยมีผลการทดลองดังนี้

**ตาราง 1** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวออกซิแดนส์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียในแต่ละชนิด

Oxidation System	Chemical Oxygen Demand		
	Type A	Type B	Type C
<b>Type D</b>			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	×		
<b>Type E</b>			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / OH <sup>-</sup>	×	×	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / M <sup>+</sup>	×	×	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / H <sup>+</sup>	×	×	
<b>Type F</b>			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / Fe	×	×	×
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub>	×	×	×
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV	×	×	×

ที่มา: <http://www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/bodcod.html>

× หมายถึง การใช้ออกซิแดนส์สำหรับการกำจัดน้ำเสียในแต่ละชนิด

จากการทดลองจะเห็นว่า ถ้าใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว (ออกซิแดนส์ Type D) จะสามารถกำจัดซัลไฟด์ (Sulfide) ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) และซัลไฟท์ (Sulfite) แต่ทั้งนี้พบว่าค่า pH ของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดสารประกอบซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำเสีย แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นซัลเฟตหรือคอลลอยด์ของซัลเฟอร์ (Colloidal Sulfur) ซึ่งจะมีฤทธิ์เป็นกรดทำให้น้ำเสียมีค่า pH ต่ำ นั่นคือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลทำให้น้ำเสียมีค่า pH ของน้ำเสียลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD และ COD ลดลงด้วย

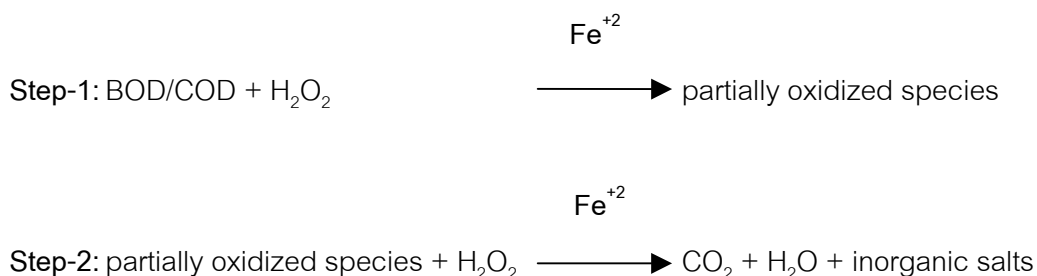
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถถูกกระตุ้นได้โดย

- 1) แอลคาไล ซึ่งจะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์เปอร์ออกไซด์ (Perhydroxyl ion, OOH<sup>-</sup>) เป็นสารที่มีความว่องไวใช้ในกระบวนการฟอกขาว

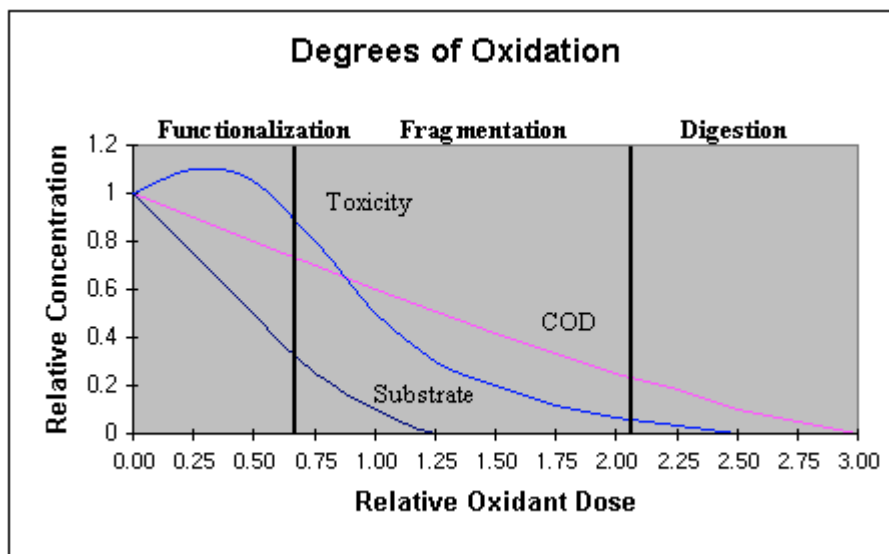
- 2) โลหะทรานซิชัน (Transition metals) เช่น ทังสเตน (Tungsten) วาเนเดียม (Vanadium) และโมลิบดีนัม (Molybdenum) เป็นต้น ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน Peroxometal
- 3) กรดแร่ (Mineral acid) เช่น ซัลฟูริก (Sulfuric) ซึ่งอยู่ในรูปอนุพันธ์ของกรดเปอร์ออกซี (Peroxyacid) เช่น Peroxymonosulfuric acid (Caro's Acid)

จากการทดลองจะเห็นว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับตัวกระตุ้นเหล่านี้ (ออกซิแดนส์ Type E) เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสียประเภท Type A และ B ส่วนในกรณีของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับคะตะลิสต์ (ออกซิแดนส์ Type F) สามารถใช้กำจัดน้ำเสียได้ทั้ง 3 ประเภท ซึ่งถ้าหากพิจารณาในเรื่องของการลดต้นทุนค่าใช้จ่าย แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดของสารแต่ละชนิดยังเหมือนเดิม ควรจะใช้ตัวออกซิแดนส์ Type D สำหรับการกำจัดน้ำเสีย Type A ออกซิแดนส์ Type E เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสีย Type B และออกซิแดนส์ Type F เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสีย Type C เป็นต้น

โดยทั่วไปการใช้สารเคมีของปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อมาช่วยลดค่า BOD/COD สามารถเขียนกลไกได้ดังต่อไปนี้



ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งตามทฤษฎีพบว่าต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Oxidant dose) ประมาณ 2.1 lbs ต่อ lb COD ที่ถูกออกซิไดซ์จึงจะทำให้ค่า COD และความเป็นพิษลดลงเกือบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในหลายๆกรณีก็ไม่จำเป็นที่ต้องย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ให้สมบูรณ์เพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เนื่องจากการใช้สารเคมีให้น้อยที่สุดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วนเพียงพอที่จะช่วยให้เกิดสารประกอบที่ไม่เสถียร (Intermediate compounds) ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษและค่า BOD/COD



ภาพประกอบ 2 แสดงระดับของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา: <http://www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/bodcod.html>

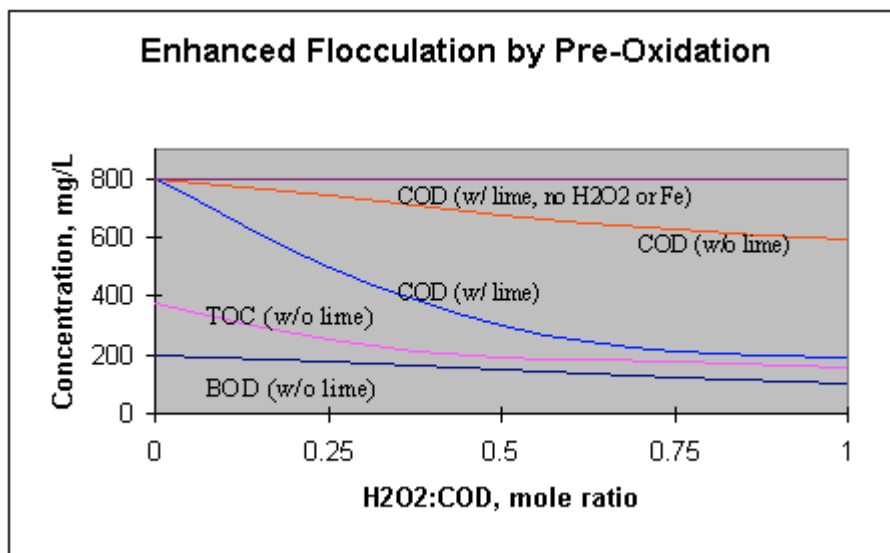
จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณออกซิแดนส์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่เริ่มต้นสารตั้งต้น จะมีความเป็นพิษและ COD เท่ากัน แต่หลังจากที่สารตั้งต้นเปลี่ยนสภาพหรือเปลี่ยนโครงสร้างไป โดยที่ไม่ได้มีการแตกพันธะไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กๆ จะทำให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นได้ และเมื่อผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และความเป็นพิษจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ปริมาณสารตั้งต้นจะหมดไปในขั้นตอนนี้ และเมื่อผ่านขั้นตอนการย่อยสลาย ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และความเป็นพิษจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

## 2. การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกทางกายภาพ (Enhanced Physical Separation)

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD/COD สามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ กรณีแรก การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นผลให้สารมีความเป็นขี้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนแล้วตกตะกอนลง และพบว่าเมื่อทำการทดลองโดยการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงไปจะทำให้สารอินทรีย์เกิดการรวมตัวกันและเกิดการตกตะกอนมากขึ้นกว่าเดิม

กรณีที่ 2 เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ละลายน้ำ จะเกิดการแตกตัวไปเป็นก๊าซออกซิเจนและน้ำ เป็นผลให้พวกไขมัน น้ำมัน และจาระบีเกิดการลอยตัวขึ้นมา และแยกชั้นกัน อย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีขี้แต่ไขมัน น้ำมัน และจาระบีเป็นสารไม่มีขี้จึงไม่

ละลายซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นของน้ำมันเบาว่าความหนาแน่นของน้ำ เพราะฉะนั้นน้ำมันจึงลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ จึงทำให้สามารถกำจัดน้ำมันเหล่านี้ได้ง่ายขึ้น



ภาพประกอบ 3 แสดงการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้เกิดฟล็อก ก่อนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา: <http://www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/bodcod.html>

### 3. การเพิ่มแหล่งผลิตออกซิเจน (Supplemental Oxygen Source)

การลดค่า BOD โดยใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะที่ต้องใช้อากาศ (Aerobic biological treatment) จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่การไหลเข้าของน้ำเสีย อัตรา F: M อุณหภูมิ ปริมาณสารอาหาร และความเข้มข้นของค่า DO การบำบัดทางชีวภาพจะง่ายขึ้นถ้ามีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อช่วยเพิ่มการละลายของออกซิเจนในน้ำซึ่งทำให้ค่า BOD ในน้ำลดลง แต่เราไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ 100 % เนื่องจากการไหลเข้าของน้ำ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล(เช่นกระบวนการที่มีการใช้ผักและผลไม้เป็นส่วนประกอบ) และอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอากาศร้อนการละลายของออกซิเจนในอากาศจะลดลง



การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะช่วยเพิ่มค่า DO ซึ่งสามารถทำการวัดได้โดยตรง ในระบบบำบัดทางชีวภาพ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

(Catalase Enzyme)



Theoretical  $\text{H}_2\text{O}_2$  requirement: 0.48 lbs  $\text{H}_2\text{O}_2$ (100%) per mg/L DO

เอนไซม์คะตะเลสเป็นเอนไซม์ตามธรรมชาติ ที่ช่วยในการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และพบในน้ำจากระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge Mixed Liquors) ซึ่งเกิดจากพวกจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ เอนไซม์นี้ทำให้การแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดได้เร็วขึ้น เป็นผลให้ก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ของพวกจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ

จากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นว่าต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 ส่วน จะได้ก๊าซออกซิเจน 1 ส่วน ดังนั้นในทางทฤษฎีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานซึ่งมีปริมาณน้ำเสีย 5 เมกกะแกลลอนต่อวันจะต้องใช้ 50%ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 17 แกลลอนต่อวันจึงจะทำให้ค่า DO เพิ่มขึ้น 1 mg/L แต่ในความเป็นจริงแล้วอาจต้องใช้ปริมาณที่สูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยานี้ให้ปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี และมีการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับสารประกอบที่สามารถออกซิไดซ์ได้

เมื่อทำการวัดค่า BOD หรือ COD ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะต้องพิจารณาถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวรบกวนการวิเคราะห์ในทั้ง 2 กรณี กรณีของการวิเคราะห์ BOD ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหลือในตัวอย่งจะทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนเป็นผลทำให้การวัดค่า BOD ผิดพลาดได้ โดยทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง (1 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.5$  mg/L DO) และสำหรับกรณีของการวิเคราะห์ COD ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมตทำให้การวัดค่า COD ผิดพลาดได้เช่นกัน โดยทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง

ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาโดยอาจจะพิสูจน์ได้จากการตกค้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์น้ำเสีย การตกค้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อาจถูกกำจัดได้โดยการเพิ่มค่า pH 7-10 หรือการทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายไบซัลไฟต์ (Bisulfite) หรือเอนไซม์คะตะเลส เมื่อสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ในสภาวะกรดในสภาพที่มีไฮออนของเหล็กอยู่ การแยกเอาไฮออนของเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำที่เป็น

กรดสามารถทำได้โดยวิธีการตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาวะเป็นเบส ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกการเพิ่มค่า pH เพื่อกำจัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือ

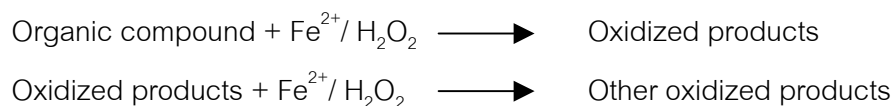
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลือพงศ์และคณะ (2545)

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟินอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับกระบวนการตกตะกอน โดยการวิเคราะห์การลดลงของค่า COD และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ปฏิกิริยาเฟนตันใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เป็นสารเข้าทำปฏิกิริยาโดยมีเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของฟินอล 0.0118 โมล/ลิตร มีค่า COD 3400 มก./ลิตร และมีค่า pH เท่ากับ 5.4 สัดส่วนฟินอลต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสัดส่วนไฮออนเหล็กต่อฟินอลมีอิทธิพลต่อการบำบัด โดยเมื่อใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของฟินอลต่อไฮออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็น 1: 0.436: 7.52 จะสามารถลดค่า COD ได้เหลือ 389 มก./ลิตร pH เท่ากับ 1.85 การใส่แคลเซียมออกไซด์ในการตกตะกอนจะช่วยในการลดปริมาณฟินอลเพิ่มขึ้นประมาณ 17 % และ pH มีประมาณ 10.7

Chamarro E., et al. (2001)

ได้ศึกษาการใช้สารที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reagent) เพื่อการปรับปรุงการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยกระบวนการทางชีวภาพของกรดฟอร์มิก (Formic acid) ฟีนอล (Phenol) 4-คลอโรฟีนอล (4-Chlorophenol) 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4- Dichlorophenol) และไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene) ในสารละลาย (Aqueous solution) พบว่าในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันจะต้องใช้ 0.5 โมลของสารประกอบอินทรีย์ต่อ 1 โมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ยกเว้นกรดฟอร์มิก (Formic acid) จะต้องใช้อัตราส่วนประมาณ 1:1 โดยที่สารประกอบส่วนใหญ่ถูกออกซิไดซ์ เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรง ตามกลไกดังต่อไปนี้



ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน คือ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของไฮออนเหล็ก โดยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสำคัญเนื่อง

จากเป็นสารออกซิแดนท์ส่วนกรณีความเข้มข้นของไฮดรอกซิลมีความสำคัญในทาง  
จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

Ghaly Montaser Y., et al. (2001)

ได้ศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบก้าวหน้าด้วยเคมีแสง (Photochemical  
Advanced Oxidation Processes, AOPs) และปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน (Photo-Fenton reaction)  
เพื่อย่อยสลาย *p*-Chlorophenol พบว่าปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน (ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ตัวเร่งเป็นไฮดรอกซิลของเฟอร์รัส/เฟอร์ริกและคลื่นแสงภายใต้สภาวะที่เป็น  
กรด) เป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพมากและช่วยให้อัตราการย่อยสลาย *p*-Chlorophenol  
เพิ่มขึ้นและยังพบว่าปฏิกิริยาเฟนตันนี้เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับ pH ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์  
ออกไซด์เริ่มต้น ปริมาณของตัวเร่งของปฏิกิริยาหรือไฮดรอกซิลของเหล็ก และชนิดของเกลือของ  
ไฮดรอกซิล เมื่อมีการเปรียบเทียบในแง่การใช้พลังงานระหว่างกระบวนการออกซิเดชันแบบก้าวหน้า  
หน้าด้วยเคมีแสง (เช่น UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน พบว่าโฟโตเฟนตันสิ้น  
เปลืองพลังงานในกระบวนการบำบัดน้อยกว่า ซึ่งช่วยลดพลังงานได้ถึง 73-83 %

จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 0.02 mol/L และ  
pH มากกว่า 4 จะทำให้อัตราการย่อยสลาย *p*-Chlorophenol ลดลง เนื่องจากที่ pH มีค่าสูงๆจะทำ  
ให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก นอกจากนี้ถ้ามีปริมาณเกลือของไฮดรอกซิลมากเกินไปจะทำให้  
มีสีน้ำตาลขุ่นได้และทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลไฮดรอกซิล (\*OH radical) ซึ่งในกรณีนี้  
อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับ Fe<sup>2+</sup> แทนการจับกับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆในน้ำ ดังนั้นจึง  
จำเป็นที่ต้องใช้อัตราส่วนระหว่าง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ต่อ Fe(II) ในปริมาณน้อย เพื่อหลีกเลี่ยงการรวมตัวกับ  
อนุมูลไฮดรอกซิลและช่วยลดการเกิดตะกอน (Sludge) จากสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก

Kang Yun Whan and Hwang Kyung-Yub (2000)

ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟนตันของน้ำใต้ดินจากแหล่งทิ้ง  
ขยะของเมืองคิมโปประเทศเกาหลี จากการวิเคราะห์ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยการ  
ออกซิเดชัน และการตกตะกอนโดยสารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent) พบว่าการลดลงของค่า  
COD โดยการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต แต่ค่า COD จะไม่มีการเปลี่ยน  
แปลงอีกเมื่อมีปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตมากกว่า 500 mg/L นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพของ  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์มีเพียง 45 %

กระบวนการออกซิเดชันสำหรับปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's oxidation) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ การปรับสภาพ pH ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การทำให้เป็นกลางร่วมกับทำให้เกิดการรวมตัวกัน และการตกตะกอน ดังนั้นในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการรวมตัวกัน สามารถช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำได้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเสถียรในช่วง pH 3-4 แต่อัตราการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ pH มากกว่า 5 ดังนั้นช่วงของ pH ที่เหมาะสมสำหรับการลดค่า COD โดยใช้วิธีการทำให้เกิดการรวมตัวกันจะอยู่ในช่วง 3-6 นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถออกซิไดซ์ไอออนไนไตรต์ (Nitrite ion) เป็นไอออนไนเตรต (Nitrate ion) ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับออกซิเจน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีกำลังความสามารถในการออกซิไดซ์ได้มากกว่าออกซิเจน

Yoon J., et al. (1998)

ได้ศึกษาลักษณะพิเศษของการตกตะกอนแบบโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เมื่อใช้ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ โดยต้องการปรับปรุงกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งพบว่ารูปแบบในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันมีลักษณะเป็นทำนองเดียวกันกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยที่ทั้งสองกระบวนการมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วและมีความสามารถในการเลือกกำจัดสารอินทรีย์ เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า 500 ได้ 59-73 % และ 18 % ในกรณีสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า 500 ส่วนในกระบวนการเกิดเฟนตันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า 500 ได้ 72-89 % และ 43 % ในกรณีสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า 500

Chen Jian, et al. (1997)

ได้ศึกษาการกำจัดฟีนอล และลดค่า COD ในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเคมีแสง (Photochemical) ซึ่งเป็นการใช้ร่วมกับแสงอุลตราไวโอเลต (UV) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และสารประกอบเฟอร์ริก พบว่าสามารถลดค่า COD ของน้ำเสียที่มีความเป็นพิษได้ประมาณ 60-70% ภายในเวลา 1-4 ชั่วโมงแต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียด้วย โดยได้ใช้คะตะลิสต์ที่แตกต่างกัน เช่น แสงอุลตราไวโอเลต เหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารประกอบของเหล็ก ( $FeCl_3$ ,  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ) ซึ่งเรียกว่า Fenton reagent) ร่วมกับแคลเซียมออกไซด์ เพื่อใช้

ในการบำบัดฟีนอลบริสุทธิ์ในสารละลาย (ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25 ppm) และบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตฟีนอลิกเรซิน การทำนํ้ามันให้บริสุทธิ์ โรงกลั่นนํ้ามัน และโรงงานผลิตกรด แนพทา นิก

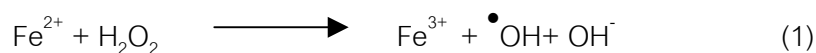
นอกจากนี้พบว่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สามารถช่วยในการกำจัดฟีนอลโดยที่แคลเซียมออกไซด์ ไปช่วยขัดขวางการลดลงของค่า pH เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จะละลายอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่ และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

Tang W.Z. and Huang C.P. (1996)

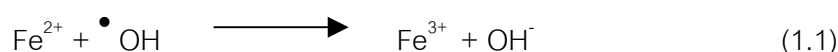
ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันทางจลนพลศาสตร์ของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยใช้สารเคมี ฟেন্টัน (Fenton's reagent) และศึกษาอิทธิพลของ pH ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นของไอออนเฟอร์ริก และความเข้มข้นของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกำจัดคลอรีนในทางจลนพลศาสตร์ พบว่า pH ที่เหมาะสมคือ 3.5 โดยที่การกำจัดคลอรีนจะเกิดได้ช้ากว่าการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เนื่องจากจะทำให้สารที่ไม่เสถียรของคลอรีน (Chlorinated intermediates) รวมตัวกันหลังจากที่ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\cdot\text{OH}$ ) และ  $\cdot\text{OH}$  นี้จะไปออกซิไดซ์สารที่ไม่เสถียรของคลอรีนให้เพิ่มมากขึ้นเพื่อรวมตัวกันเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น ไอออนคลอไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่กระบวนการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์นี้ จะต้องเกิดช้ากว่าการย่อยสลายของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อไอออนเฟอร์ริก ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ) ที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล มีค่าประมาณ 11

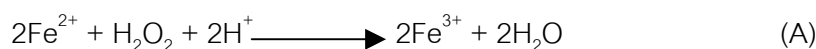
ออกซิเดชันของปฏิกิริยาฟেন্টัน (Fenton oxidation) เป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับค่า pH โดยที่  $\text{Fe}^{2+}$  จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัว ดังกลไกต่อไปนี้



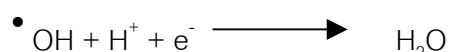
ในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ไอออนเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ที่มีปริมาณมากเกินไป จะรวมตัวกับ  $\cdot\text{OH}$  ดังกลไกต่อไปนี้



ถ้าพิจารณาการเกิดน้ำร่วมด้วย สมการของ Fenton's reagent สามารถสรุปได้ดังนี้



ซึ่งจากสมการนี้จะเห็นไฮดรอนไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) มีความสำคัญต่อการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นจึงได้มีการคาดการณ์ล่วงหน้าว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดออกซิเดชันของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลอยู่ในช่วงของความเป็นกรด แต่อย่างไรก็ตามถ้าความเข้มข้นของ  $\text{H}^+$  สูงเกินไป  $\text{H}^+$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับ  $\cdot\text{OH}$  ได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการต่อไปนี้



Bigda R.J.(1995)

ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดน้ำเสีย พบว่าปฏิกิริยาเฟนตันเกิดขึ้นในสารละลายที่มีความเป็นกรด และมีตัวเร่งที่ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารอินทรีย์ โดยที่ความเข้มข้นของไฮดรอนเหล็กและอนุมูลเริ่มต้นจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจึงควรเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างช้าๆ

นอกจากนี้พบว่า ก่อนการเติมเฟอรัสซัลเฟตในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ต้องปรับค่า pH ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางก่อน เพราะไฮดรอนไฮดรอกไซด์ (Iron hydroxide) จะเกิดที่ pH ประมาณ 6 และกรดจะช่วยชะลอการตกตะกอนของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเฟนตันสามารถออกซิไดซ์สารเคมีได้หลายชนิด ดังแสดงในตาราง 2 แต่ก็มีบางชนิดที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 2 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

<b>Acids:</b> Formic Gluconic Lactic Malic Propionic Tartaric	<b>Aromatics:</b> Hydroquinone (con't) <i>para</i> -Nitrophenol Phenol Toluene Trichlorophenol Xylene Trinitrotoluene
<b>Alcohols:</b> Benzyl <i>tert</i> -Butyl Ethanol Ethylene Glycol Glycerol Isopropanol Methanol Propenediol	<b>Amines:</b> Aniline Cyclic Amines Diethylamine Dimethylformamide Ethylenediaminetetraacetic Acid(EDTA) Propanediamine <i>n</i> -Propylamine Explosives(RDX, or cyclonite)
<b>Aldehydes:</b> Acetaldehyde Benzaldehyde Formaldehyde Glyoxal Isobutyraldehyde Trichloroacetaldehyde	<b>Dyes:</b> Anthraquinone Diazo Monoazo
<b>Aromatics:</b> Benzene Chlorobenzene Chlorophenol Creosote Dichlorophenol	<b>Ethers:</b> Tetrahydrofuran <b>Ketones:</b> Dihydroxyacetone Methyl Ethyl Ketone

### ตาราง 3 สารเคมีที่ปฏิกิริยาเฟนตันไม่สามารถออกซิไดซ์ได้

<ul style="list-style-type: none"> <li>● Acetic Acid</li> <li>● Acetone</li> <li>● Carbon Tetrachloride</li> <li>● Chloroform</li> <li>● Maleic Acid</li> <li>● Malonic Acid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Methylene Chloride</li> <li>● Oxalic Acid</li> <li>● <i>n</i>-Paraffins</li> <li>● Tetrachlorethane</li> <li>● Trichlorethane</li> </ul>
---	---

Talinli I. and Anderson G.K. (1992)

ได้ศึกษาการรบกวนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการวิเคราะห์ค่า COD สารเคมีในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการบำบัด ถ้าหากมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่จะเป็นตัวรบกวนในการวิเคราะห์ค่า COD โดยทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง

สารอนินทรีย์บางชนิดที่ประกอบด้วยไนไตรต์ (Nitrites) และคลอไรด์ (Chlorides) สามารถทำให้โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ลดลงและเป็นตัวรบกวนในการวิเคราะห์ได้ ตัวรบกวนที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบสามารถป้องกันได้โดยการเติมเมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate) ส่วนตัวรบกวนที่มีไนไตรต์ (Nitrite) เป็นองค์ประกอบสามารถป้องกันได้โดยการเติมกรดซัลฟามิก (Sulphamic acid)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลที่วิเคราะห์ได้ คือคุณสมบัติของตัวทำละลาย ปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในสารละลาย ความบริสุทธิ์ของคะตะลิสต์ จำนวนตัวอย่าง และอุณหภูมิ ถ้าตัวอย่างน้ำหรือน้ำเสียมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ด้วย จะทำให้การวิเคราะห์ COD ผิดพลาดเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะไปลดการใช้โพแทสเซียมไดโครเมตและทำให้เกิดจุดยุติยากขึ้น



## วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น และวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีตกค้างที่เหลืออยู่ในน้ำและมีอยู่ในตะกอน
2. ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากบริษัททักซิณปาล์ม(2521) จำกัด จ.สุราษฎร์ธานีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน และวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีตกค้างที่เหลืออยู่ในน้ำและมีอยู่ในตะกอน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอวิธีการบำบัดน้ำเสียในขั้นต้น (Pre-treatment) ทางด้านเคมี ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของแหล่งอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เพื่อช่วยบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพราะน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะกับแหล่งน้ำสำหรับใช้ในการประปา อาบ พักผ่อนหย่อนใจ ใช้ในการอุตสาหกรรมและการเกษตร และเป็นแหล่งที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นช่องทางสู่การวิจัยเพื่อการคิดค้นหากระบวนการที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ร่วมกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มคุณภาพของน้ำให้ดีขึ้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ