

บทที่ 4

บทวิจารณ์

4.1 ความว่องไวของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส

ความว่องไวของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล จากข้อมูลปริมาณเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในใบยางพาราที่สกัดได้ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ในตาราง 5 จะเห็นว่า ในช่วงฤดูร้อน (เมษายน – พฤษภาคม) ปริมาณเปอร์ออกซิเดสในใบยางพารามีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาอื่น ดังนั้นเป็นไปได้ว่าปริมาณเปอร์ออกซิเดสในใบยางพารามีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Baier *et al.*, 1993) และสภาพแวดล้อม เปอร์ออกซิเดสที่เตรียมได้จากใบยางพารามีความว่องไวอยู่ในช่วง 0.11-0.62 หน่วยต่อมิลลิลิตร

นอกจากนี้เปอร์ออกซิเดสยังพบได้ในส่วนต่าง ๆ ของต้นยางพารา เช่น เปลือก ใบ และในน้ำยางส่วน C-serum (วัลลี สุวจิตตานนท์ และ คงพัฒน์ พงศ์ไพบูลย์, 2535)

4.2 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสแบบไม่ต่อเนื่อง

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอล 1.508 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร คือ การเติมเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส 0.04 หน่วยต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร (เอนไซม์ 0.08 หน่วย ต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร) กวนผสมด้วยอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลร้อยละ 95 (ตาราง 13 ภาคผนวก ข) ความเข้มข้นของสีและพีเอชหลังการบำบัดไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนปริมาณซีโอดีลดลงเล็กน้อย (2%) ในขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 24% ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเพิ่มขึ้น 14% ส่งผลให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น 17% อาจเนื่องจากเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสที่เติมลงในน้ำเสีย และไม่ได้วิเคราะห์ส่วนใสของตัวอย่างน้ำภายหลังกระบวนการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในการบำบัด ซึ่งในการวิเคราะห์ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างน้ำทั้งส่วนใสและตะกอนโดยเขย่าตัวอย่างแล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อให้เป็นตัวแทนของตัวอย่างเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงควรวิเคราะห์เฉพาะส่วนใสเท่านั้น ดังนั้น ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในเอนไซม์จึงถูกรวมกับปริมาณของแข็งที่มีอยู่เดิมในน้ำเสียด้วย

4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย

การเจือจางน้ำเสียทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลต่ำ กลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเมื่อเทียบกับ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ตาราง 13 ภาคผนวก ข) ทั้งนี้เนื่องจากการเจือจางน้ำเสียทำให้องค์ประกอบของน้ำเสียเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้มีอนุภาคบางอย่างที่สามารถจับตัวกันหรือตกตะกอนได้น้อยลง (น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นรวม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ทำการทดลองเตรียมจากผสมน้ำเสีย 10 ลิตร ฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร 165 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 7.835 ลิตร ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำเสียต่อน้ำประมาณ 1:1)

นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์มีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย ซึ่งเป็นคอลลอยด์ของ alkaline lignin มีองค์ประกอบหลัก คือ สารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำและไม่ชอบน้ำที่มีมวลโมเลกุลสูงเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Wu *et al.*, 1999, quoting Forss *et al.*, 1989) และลิกนินยังสามารถจับกับ phenoxy radical ได้เมื่อมีเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสอยู่ด้วย (Bugg, 1997)

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสีย

การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสนั้น พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมไม่ได้ช่วยในการกำจัดสารประกอบฟีนอลมากนัก โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3% ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 5 % แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง อัตราส่วนโมลที่เหมาะสมในการกำจัดสารประกอบฟีนอลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อฟีนอล มีค่าประมาณ 1.0 (Masuda *et al.*, 2001) แต่จากการทดลองปริมาณฟีนอลในน้ำที่เริ่มต้น เท่ากับ 1.508 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.016 mM) ในขณะที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3, 15 และ 30% คิดเป็นความเข้มข้น 0.98, 4.9 และ 9.79 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราส่วนโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อฟีนอลดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.0

นอกจากนี้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Masuda *et al.*, 2001, quoting Vasudevan, 1996) โดยจะมีผลทำให้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสถูกออกซิไดส์ไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปกลับไปอยู่ในรูปที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ เรียกว่า p-verdohemoprotein (Wu *et al.*, 1994 ; Nicell *et al.*, 1995 quoting Armao *et al.*, 1990) และกลไกหนึ่งที่ทำให้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ intermediates (Masuda *et al.*, 2001)

4.2.3 ผลของปริมาณเปอร์ออกซิเดสในการบำบัดน้ำเสีย

เมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในการบำบัดแล้วกลับทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากโดยทั่วไปไม่มีสารประกอบฟีนอลอยู่แล้ว ในใบยางพาราที่เช่นกัน จากการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลในสารสกัดหยาบเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสที่สกัดได้จากใบยางพาราซึ่งใช้ใน ช่วงที่ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่า มีปริมาณฟีนอล 4.879 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลยังขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของเอนไซม์ และ pH ในกรณีที่มีความว่องไวของเปอร์ออกซิเดสน้อย pH ที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลมีค่าประมาณ 9 แต่กรณีที่มีความว่องไวของเปอร์ออกซิเดสมาก pH ที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลมีค่าอยู่ในช่วง 5-9 (Masuda *et al.*, 2001) ซึ่งเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากใบยางพารามีความว่องไวสูงสุดที่ pH 5.5 โดยทั่วไประดับ pH ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพอยู่ในช่วง 6-8 (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2545) และจากการทดลองไม่ได้ทำการปรับ pH ก่อนเติมเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส โดย pH ของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการบำบัดมีค่าเท่ากับ 8.35 นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลสามารถถูกกำจัดได้มากในช่วง pH 5-7 และประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบฟีนอลจะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งฟีนอลจะไม่แตกตัวให้ H^+

4.3 การใช้โอโซนร่วมกับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ต่อเนื่อง

การเติมโอโซนในน้ำเสียเพียงอย่างเดียวเป็นเวลา 10-30 นาที สามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลได้หมด น้ำที่ผ่านการบำบัดยังมีลักษณะไม่ใสมาก แต่ลดความเข้มของสีในน้ำเสียลงได้ประมาณ 1.69 เท่า ของปริมาณความเข้มของสีตั้งต้นในน้ำเสีย ส่วนค่า pH ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Preis และคณะ ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งได้ทำการทดลองกำจัดสารฟีนอลโดยใช้โอโซน พบว่า เมื่อ pH เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้โอโซนจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารฟีนอลได้โดยตรง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนจะสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆด้วย ซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างสลับซับซ้อนไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยโอโซน (อานอบ คันทะชา, 2544)

ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนจะค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่าง โดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 30 นาที (อานอบ คันทะชา, 2544) จากการทดลองเมื่อบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซนร่วมกับเปอร์ออกซิเดส น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่า pH เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือร้อยละ 89 เนื่องจาก hydroxyl radical และสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเป็นทั้งตัวก่อและตัวชักนำของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย

นอกจากนี้เปอร้ออกซิเดสอาจถูกออกซิไดส์จากโอโซนไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง ซึ่งเป็นอันตรายต่อเอนไซม์เช่นเดียวกับกรณีการใช้ไฮโดรเจนเปอร้ออกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไป ส่วนความเข้มข้นของสีในน้ำเสียที่ลดลงหลังการบำบัดด้วยโอโซนเป็นผลจากโมเลกุลโอโซนทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี

4.4 ต้นทุนในการบำบัด

ต้นทุนการบำบัดโดยการเติมโอโซนในการทดลองครั้งนี้ (ดูในหัวข้อที่ 3 ในภาคผนวก ค) พบว่า มีต้นทุนการบำบัด 14 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการบำบัดโดยใช้เปอร้ออกซิเดสในระบบ CSTR แล้วถูกกว่า 10.32 เท่า อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า แต่หลังการบำบัดโดยการเติมโอโซนจะมีกลิ่นคล้ายกลิ่นคาวปลาเกิดขึ้น ซึ่งการรับโอโซนเข้าสู่ร่างกายอาจจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ เนื่องจากก๊าซโอโซนทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และทำให้ปวดศีรษะ หากได้รับในระดับความเข้มข้นที่สูงอาจทำให้เสียชีวิตได้เนื่องจากเกิดภาวะเลือดคั่งในปอด ชัดจำกัดในการรับสัมผัส คือ ความเข้มข้น 0.1 ppm (0.2 mg/m^3) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 0.3 ppm (0.59 mg/m^3) เป็นเวลา 15 นาที (Armour, 1991)

แต่ในความเป็นจริงเปอร้ออกซิเดสที่ใช้ในการบำบัดแบบต่อเนื่องมีความว่องไวของเอนไซม์ (ปริมาณ) คิดเป็น 10 เท่าของเอนไซม์ที่ใช้ในการบำบัดแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นต้นทุนการบำบัดแบบต่อเนื่องจึงเท่ากับ 14.45 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับการบำบัดโดยการเติมโอโซน

4.5 ผลของการบำบัดน้ำทิ้งแบบต่อเนื่องด้วยระบบ CSTR

การบำบัดน้ำทิ้งแบบต่อเนื่องด้วยระบบ CSTR โดยใช้ น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอล 1.065 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านถึงปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง มีความเร็วในการกวนผสม 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ และ หยดเปอร้ออกซิเดสในถังปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และปล่อยให้ตกตะกอนด้วยถังตกตะกอนสามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ร้อยละ 57-90 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (1 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ภายหลังการบำบัดปริมาณซีโอดีมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับปริมาณฟีนอลที่ลดลง เนื่องจากซีโอดีเป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งฟีนอลก็เป็นสารอินทรีย์เช่นกัน แต่เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น

แล้ว ค่าซีไอดีหลังการบำบัดมีค่าสูงกว่า อาจจะเป็นเนื่องมาจากเปอร์ออกซิเดสที่หยดลงในน้ำเสียซึ่งเป็นสารอินทรีย์เช่นกัน และข้อเสียประการหนึ่งของซีไอดี คือ ไม่สามารถที่จะใช้แยกค่าสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ทางชีวะ หรือ ไม่ถูกออกซิไดซ์ทางชีวะออกจากกันได้ (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า ค่าซีไอดีที่สูงกว่าค่าเริ่มต้นเป็นผลจากผลรวมของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทั้งสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ และไม่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งในที่นี้ คือ สารประกอบฟีนอล และเปอร์ออกซิเดส ตามลำดับ

ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณเริ่มต้น ในขณะที่ปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลง แต่เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 31 จะเห็นว่าปริมาณของแข็งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและไม่เปลี่ยนแปลงจากปริมาณเริ่มต้นมากนัก อาจจะเป็นเนื่องมาจากตะกอนแขวนลอยที่มีอยู่ในสารสกัดหยาบเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสที่เติมในการบำบัด ซึ่งไม่ได้ทำการกรองก่อนนำมาใช้ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำคั่งที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.2

นอกจากนี้เปอร์ออกซิเดสที่ใช้ในการบำบัดไม่สามารถลดค่าความขุ่นของสีในน้ำได้ และสีที่เกิดขึ้นในน้ำมีความสัมพันธ์กับพีเอช โดยทั่วไปความขุ่นของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544) จากผลการบำบัดความขุ่นของสีมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าว

เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีสีแตกต่างไปจากสีของน้ำตามธรรมชาติ จึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานของแพลทตินัมโคบอลต์ได้ ในกรณีนี้อาจวัดโดยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แล้วรายงานผลลักษณะของสี ในรูปของความยาวคลื่นที่เด่นชัด (เป็น nm) สีของตัวอย่างน้ำ (hue) เช่น ฟ้ำ ฟ้ำเขียว ความจ้า (luminous เป็นเปอร์เซ็นต์) และความบริสุทธิ์ของสี (purity เป็นเปอร์เซ็นต์) หรือวัดโดยหน่วยโลวิบอนด์ (ใช้ Lovibond Tintometer) หรือหน่วย ADMI วิธีการดังกล่าวใช้เครื่องมือซับซ้อนและราคาแพง อีกประการหนึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของประเทศต่าง ๆ รวมทั้งประเทศไทยไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสีไว้ เพียงแต่กำหนดไว้ว่าไม่เป็นที่น่ารังเกียจเท่านั้น ดังนั้น ความขุ่นของสีในน้ำทิ้งน่าจะวัดในรูปของความยาวคลื่น และสังเกตสีด้วยสายตา