



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การพัฒนานวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบ  
ปัสสาวะและเกิดภาวะในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ  
Innovative design of ultra clean, pathogen-free, wastewater-free urinal with no foul odor and urine splash for  
food industry, healthcare and nursing home of Thailand's aging society

ดร.อาณัติ ดีพัฒนา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 59805 (330CFC94)

สัญญาเลขที่ 22.2/2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การพัฒนานวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบ

ปัสสาวะและเกิดการะคายน้ำเสียสำหรับ โรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

Innovative design of ultra clean, pathogen-free, wastewater-free urinal with no foul odor and urine splash for

food industry, healthcare and nursing home of Thailand's aging society

ดร.อาณัติ ดีพัฒนา

คณะวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 22.2/2562

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

### (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ดร.อาณัติ ศีพัฒนา ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพาประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนานวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาวะในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ (ภาษาอังกฤษ) Innovative design of ultra clean, pathogen-free, wastewater-free urinal with no foul odor and urine splash for food industry, healthcare and nursing home of Thailand's aging society รหัสโครงการ 59805 (330CFC94) สัญญาเลขที่ 22.2/2562 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 2,507,500 บาท (สองล้านห้าแสนเจ็ดพันห้าร้อยบาทถ้วน) ระยะเวลาการดำเนินงาน 2 ปี (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2561 – วันที่ 30 กันยายน 2563) คณะผู้ประดิษฐ์ได้สังเกตเห็นปัญหาว่าห้องน้ำชายเกือบทุกแห่งส่งกลิ่นเหม็นจากการที่มีปัสสาวะแล้วไม่ยอมชำระล้างปัสสาวะหลังการใช้ และมีคราบสกปรกเนื่องจากบางครั้งผู้เข้ามาใช้บริการไม่กดน้ำ จึงยังคงส่งกลิ่นเหม็น มีความสกปรก และทำให้เกิดการปนเปื้อนของเชื้อโรคได้ง่ายกับผู้ที่มาใช้บริการต่อ รวมถึงการฟลัชน้ำในการทำความสะอาดเป็นการใช้ทรัพยากรน้ำที่ค่อนข้างเปลือง เนื่องจากในแต่ละครั้งหลังจากทำธุระ ใช้น้ำไม่น้อยกว่า 1 ลิตรในการทำความสะอาดโถปัสสาวะ ซึ่งบางครั้งการฟลัชก็ไม่สามารถที่จะชำระล้างคราบเปรอะเปื้อนของปัสสาวะที่กระเด็นขณะทำธุระได้หมด หากคราบปัสสาวะไม่ได้รับการทำความสะอาดและถูกหมักหมมเป็นเวลานาน ทำให้เกิดคราบฝังลึกและมีอัตราการโตของเชื้อโรคเพิ่มสูงขึ้น จนกลายเป็นเชื้อโรคคือยา ที่ทนต่อการฆ่าหรือการทำความสะอาดจากยาหรือสารฆ่าเชื้อ และหากติดไปกับผู้ที่มาใช้บริการ เชื้อโรคเหล่านี้ก็สามารถแพร่กระจายไปสู่คนทั่วไปได้โดยการสัมผัสผ่านมือ โดยโถปัสสาวะที่ได้มีการพัฒนามีประสิทธิภาพสูงสำหรับชำระล้างคราบ และลดการใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงจากการฟลัชปัสสาวะทิ้ง ให้น้ำไหลออกมาชำระล้างโถปัสสาวะในปริมาณที่เหมาะสม ประหยัดน้ำ ลดการหมักหมมของกลิ่นปัสสาวะ รวมถึงฆ่าเชื้อโรคที่อาจจะเกิดจากฉี่ในห้องน้ำสาธารณะที่เกิดจากการติดเชื้อจากผู้ใช้งานหลาย ๆ คน เพื่อลดโอกาสในการติดเชื้อหรือติดโรคติดต่อทางปัสสาวะและลดการใช้น้ำ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation technology) ในการสร้างอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมาก โดยใช้สารละลายที่มีสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (< 1.5%) ซึ่งไม่เป็นอันตราย

ต่อสิ่งมีชีวิตตามบัญชียาหลักแห่งชาติ และในปริมาณที่น้อยกว่า 1.5% ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากเกินไป ในการทำให้อุปกรณ์โลหะต่างๆ ถูกกัดกร่อนหรือถูกทำลาย โดยนวัตกรรมโอบีสสภาวะที่ทางคณะได้จัดทำนี้มีกลไกทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกกับโอโซนภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ตไว้ด้านหลังโอบีสสภาวะ จนเกิดเป็นอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง และทำให้อยู่ในรูปแบบของละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (1 nm -100  $\mu$ m) แขนงลอยอยู่ในอากาศได้นานและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่สูง (1-3 MHz) เพื่อทำให้อนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะไปออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ รวมไปถึงสารที่มีความเป็นพิษย่อยสลายได้ยาก เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds) หรือสารอินทรีย์ไม่พึงประสงค์อื่นๆ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนเปลี่ยนรูปเป็นออกซิเจนและน้ำในที่สุด ด้วยวิธีการนี้สามารถกำจัดเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ตามซอกหลืบหรือมุมอับต่าง ๆ ของโอบีสสภาวะชาย หลังจากทำธุระเสร็จได้ทันที โดยปล่อยสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแทนการฟลัชน้ำ ซึ่งเป็นการทำความสะอาดรูปแบบใหม่ ยังเป็นการทำความสะอาด โอบีสสภาวะ สามารถทำลายและฆ่าเชื้อโรครวมถึงเป็นการทำความสะอาดโดยใช้ละอองลอยของอนุมูลอิสระเพื่อทดแทนการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้สถานพยาบาล สถานพักฟื้นผู้สูงอายุ ห้องน้ำสาธารณะ หรือสถานที่ที่มีข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรน้ำ เป็นการฆ่าเชื้อโรคในห้องน้ำสาธารณะ ที่สามารถทดแทนวิธีฆ่าเชื้อในปัจจุบัน ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการฆ่าเชื้อและการทำความสะอาดที่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้หมด สามารถใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันทดแทนการฟลัชน้ำได้ ทำให้ลดการใช้ทรัพยากรน้ำลงไปได้มาก

### บทคัดย่อ

นวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดการระคายเคืองบาดน้ำเสียเป็นนวัตกรรมที่ประกอบไปด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่มีพลังงานคลื่น สร้างโดยตัวแปลงสัญญาณ piezoelectric ใช้ในการผลิตหมอกหรือละอองลอยที่เต็มไปด้วยอนุภาคลิเธียมต่างๆ เพื่อใช้ในการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในหลายรูปแบบสามารถสร้างอนุภาคลิเธียมได้ โดยการกระจายตัวของละอองลอยอนุภาคนาโนเล็กมีฤทธิ์ในการออกซิไดส์สูงนี้ การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของโถปัสสาวะใช้ตัวแทนเชื้อแบคทีเรียที่เป็น *Escherichia coli* / coliform และเชื้อราที่เป็น *Aspergillus niger* ที่มีการเติบโตหรือเกิดขึ้นบนผิวหนังของอาหารเลี้ยงเชื้อได้ดี โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้ ประกอบด้วย สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สารละลายโอโซน (เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 7 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตร/นาที) และหลอดยูวี (4 หลอด แต่ละหลอดมีขนาด 15 วัตต์ ด้วยความเข้มแสง 2.88 กิโลจูล/ตารางเมตร) ผลลัพธ์ที่เกิดจากการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของโถปัสสาวะพบว่า เงื่อนไขดังกล่าวไม่แตกต่างจากการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว หรือทำงานร่วมกันกับสารละลายโอโซนและแสงยูวี เป็นต้น สามารถก่อให้เกิดอนุภาคลิเธียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้จำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ลดลงหรือทำลายได้จากเริ่มต้น แต่การทดลองด้วยสารละลายโอโซนและแสงยูวีเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถลดความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ได้จากความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้น การพ่นละอองลอยในโถปัสสาวะด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว สามารถลดจำนวนของ *E. coli*/coliform ได้จากเริ่มต้น และทำให้เชื้อ *A. niger* ลดลงด้วย โดยได้ผลดีกว่า *E. coli*/coliform ปฏิกริยาโฟโตแคทาไลติกด้วยการใช้แสงยูวีไม่ได้ช่วยเพิ่มการทำลายเชื้อ *E. coli*/coliform อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีก่อนหน้า อย่างไรก็ตามสามารถยับยั้งเชื้อ *A. niger* ได้ด้วยการพ่นละอองลอยของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ใน 10 นาที สามารถทำลายได้หมด งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดอนุภาคลิเธียมไฮดรอกไซด์เรดิคัลโดยการกระตุ้นของแสงยูวีร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำความสะอาดฆ่าเชื้อโถปัสสาวะชาย การทำงานของสารละลายโอโซนร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเพิ่มความสามารถในการทำลายเชื้อ *E. coli*/coliform ได้ดีกว่าวิธีอื่น สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับสารละลายโอโซนสามารถทำลายเชื้อ *E. coli*/coliform ภายใน 8 นาทีและเพิ่มฤทธิ์การทำลายเชื้อ *A. niger* ได้ดีเช่นกัน การ

ทำงานร่วมกัน 3 ชนิด ทั้งสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายโอโซน และแสงยูวี ยิ่งเร่งเวลาในการทำลายของเชื้อ *E. coli/coliform* ในโถปัสสาวะโดยการทำงานของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ สารละลายโอโซนและแสงยูวีร่วมกัน เชื้อหมดลงภายใน 2 นาที ถ้าเทียบกับการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นเดียวกัน การพ่นละอองลอยด้วยความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 1 เปอร์เซ็นต์ประยุกต์ใช้ร่วมกับอีก 2 วิธี ดังนั้นเป็นไปได้ชัดเจนว่าเพียงแต่ใช้ความสามารถของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงชนิดเดียว เพื่อลดการตกค้างของสารเคมีและลดความเป็นพิษ เพราะอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียรสามารถแตกตัวและหายไปได้อย่างรวดเร็ว

**คำสำคัญ:** โถปัสสาวะ/ อนุมูลอิสระ / อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล / การพ่นหมอกด้วยอัลตราโซนิค / แบคทีเรียและรา / กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง / สารฆ่าเชื้อ

### Abstract

The wastewater-free urinal consist of high-energy ultrasonic waves generated by piezoelectric transducers that have been used to produce a fog containing hydroxyl radicals. Different AOP techniques have generated the radicals. The dispersal of this highly oxidizing mist of micron-size droplets destroyed *Escherichia coli*/coliform and *Aspergillus niger* colonies that have been artificially spiked on surfaces. The wastewater-free urinal was tested the efficiency by using the AOPs employed include H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1, 3, and 5% w/w), O<sub>3</sub> (7 g/h ozone tube at 2 L/min of O<sub>2</sub> flowrate) and UV (4 units at 15 W each with the total fluence of 2.88 kJ/m<sup>2</sup>). The individual and combined effects of these AOPs set the hydroxyl radicals generated and consequently the degree of microbial destruction. Both ozonated water and UV alone were ineffective. The H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mist produced some *E. coli*/coliform inactivation graded with concentration. *A. niger* was more susceptible to H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mist than *E. coli*/coliform. Photocatalyzing with UV light did not significantly improve the *E. coli*/coliform inactivation with the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mist. However, substantial inactivation of *A. niger* was achieved with 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration; total annihilation of *A. niger* with a 10-min fumigation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> only, but with addition of UV photocatalysis a 2-min fumigation was adequate. This result illustrates that UV activation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mists generates powerful oxidation of hydroxyl free radicals. Ozonation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mists most improved its efficacy for *E. coli*/coliform inactivation compared to the other methods. Ozonated 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mists applied for 8 min was able to completely destroy *E. coli*/coliform. Ozonation also enhanced the destruction of *A. niger*. When hydroxyl radical UV and ozonation activations were combined, the reduction of *E. coli*/coliform was accelerated at all concentrations of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. A 4-fold reduction in fumigation time was still effective for bacterial disinfection (the more difficult situation between the two). At 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment, the fumigation time was reduced from 8 to less than 2 min. The application of combined O<sub>3</sub> and UV treatment totally disinfected both bacteria and mold with just 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mist. Hence, it is possible to use a minimal H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration making residual chemical from this combined scheme minimally toxic due to rapid disappearance of the highly unstable free radicals.

Keywords: Wastewater-free urinal/ Free radicals / Hydroxyl radicals / Ultrasonic fumigation / Bacteria and molds / Advance oxidation processes / Disinfection



## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	II
บทคัดย่อภาษาไทย	IX
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	VI
สารบัญเรื่อง	VII
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่	
1 บทนำ	1
2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา	5
3 วัตถุประสงค์และการดำเนินงานวิจัย	29
4 ผลการทดลองและวิจารณ์	34
5 สรุปผลการทดลอง	55
เอกสารอ้างอิง	57
ผลผลิต (output)	63
ประวัติคณะผู้วิจัย	64

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potentials) ของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ	11
2.2	ปริมาณรังสี UV ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคต่างๆ	14
4.1	ผลของการยับยั้งด้วยละออง H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น 4 log CFU / cm <sup>2</sup> ของ a) <i>E. coli</i> และ b) <i>A. niger</i> ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซนในการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อภายในโถปัสสาวะ	46
4.2	ผลของการยับยั้งด้วย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น 4 log CFU / cm <sup>2</sup> ของ a) <i>E. coli</i> / coliform และ b) <i>A. niger</i> ที่ความเข้มข้นต่างๆของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซน (ต่อ)	47
4.3	อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ <i>E. coli</i> ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ	51
4.4	อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ <i>E. coli</i> / coliform ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านข้างของโถปัสสาวะ	52
4.5	อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ <i>A. niger</i> ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ	53

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	9
2.2	กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (ADVANCED OXIDATION TECHNOLOGY) ของอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระ (FREE RADICALS DERIVATIVES)	10
2.3	ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์	12
2.4	ปฏิกิริยาในการเกิดโอโซน	17
2.5	การสลายตัวของโอโซน	19
2.6	ภาพถ่าย Transmission electron microscope (TEM) แสดงระดับการเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย <i>E. coli</i> จากผลของ O <sub>3</sub> (c) เปรียบเทียบกับสารเคมี chlorine (b), chlorine dioxide (d), UV irradiation (e), และกลุ่มควบคุม (a)	24
2.7	แผนภาพแสดงกระบวนการสร้าง O <sub>3</sub> ด้วยวิธี Corona Discharge	27
3.1	ลักษณะภายในโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะที่ติดระบบ OH• aerosolization	30
4.1	กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระ	36
4.2	นวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรคพร้อมระบบผลิตปุ๋ย	37
4.3	นวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะ	39
4.4	การยับยั้ง a) <i>E. coli</i> / coliform และ b) <i>A. niger</i> (การปนเปื้อนเริ่มต้นที่ 4 log CFU / cm <sup>2</sup> ) บนพื้นผิวที่จำลองการเพาะเชื้อไว้ในห้องทดสอบ (34x34x34 cm <sup>3</sup> ) หลังจากการทดลองโดยใช้ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์)	42
4.5	การยับยั้งการเจริญ a) <i>E. coli</i> / coliform และ b) <i>A. niger</i> (ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 4 log CFU / cm <sup>2</sup> ) บนพื้นผิวที่จำลองการเพาะเชื้อไว้ในห้องทดสอบ (34x34x34 cm <sup>3</sup> ) หลังจากรวมควันด้วยวิธีการต่างๆ (1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว, 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV, 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> และ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV / O <sub>3</sub> ) (เส้นของ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV, 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> และ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV / O <sub>3</sub> จะทับซ้อนกัน)	44
4.6	แผนภาพสมการทางเคมีการเกิดปฏิกิริยา photocatalytic กับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV-C / O <sub>3</sub>	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบัน โครงสร้างประชากรของสังคมไทยมีผู้สูงอายุเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อย ๆ จากข้อมูลประชากรของประเทศไทยปี 2556 ประชากรไทยมีจำนวน 64.6 ล้านคน เป็นผู้สูงอายุมากถึง 9.6 ล้านคน คาดว่าในปี 2573 จะมีจำนวนผู้สูงอายุ 17.6 ล้านคน (ร้อยละ 26.3) และปี 2583 จะมีจำนวนถึง 20.5 ล้านคน (ร้อยละ 32.1) การเปลี่ยนแปลงของมนุษย์เมื่อมีอายุมากขึ้นร่างกายจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในวัยเด็กจะมีความเจริญมากกว่าความเสื่อม กล่าวคือร่างกายจะขยายขนาดทั้งความสูงและน้ำหนักตัว ส่วนผู้สูงอายุความเสื่อมของร่างกายจะมีมากกว่าความเจริญ ทำให้อวัยวะต่างๆ ของร่างกายทั่วไปและระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอติดเชื้อ โรคหรือเสียชีวิตได้ง่าย การลดโอกาสการติดเชื้อโรคในผู้สูงอายุจึงมีความจำเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดเชื้อ HAIs (Healthcare infected diseases) จากสถานพยาบาลที่ผู้สูงอายุมักมีความถี่สูงในการใช้บริการ รวมไปถึงสถานพักฟื้นผู้สูงอายุที่ต้องการความสะอาดและสุขอนามัยในการใช้บริการที่ดีเพื่อลดการแพร่กระจายของเชื้อโรคในกลุ่มผู้สูงอายุ

จากการรายงานของ รศ.นพ.วิรัชศักดิ์ เมืองไพศาล ภาควิชาเวชศาสตร์ป้องกันและสังคม คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล ร.พ.ศิริราช กล่าวว่า ผู้สูงอายุมีความต้องการบริการด้านสาธารณสุขเพิ่มขึ้น โดย ร.พ.ศิริราชมีคลินิก ผู้สูงอายุ เพื่อดูแลผู้สูงอายุครบทุกด้าน ปัจจุบันพบว่ากลุ่มผู้สูงอายุมักมีโรคเรื้อรัง โรคจากความเสื่อมของร่างกายจะพบมากขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสื่อมของร่างกายเร็วขึ้น คือการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคอ้วน เป็นต้น จากความเสื่อมของร่างกายที่เร็วขึ้นก่อให้เกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง ร่วมกับภูมิคุ้มกันในร่างกายที่ต่ำลง ทำให้ผู้สูงอายุมีความเสี่ยงในการติดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่ามีโอกาสติดเชื้อดื้อยาได้สูง จากสถิติพบว่าในผู้สูงอายุมีโอกาสติดเชื้อจุลินทรีย์ได้บ่อย โดยเฉพาะที่ปอด ทางเดินปัสสาวะ หรือติดเชื้อในกระแสเลือด ซึ่งกลุ่มที่ติดเชื้อมักจะเป็นกลุ่มแบคทีเรีย การที่ต้องใช้ยาหลายชนิดเป็นประจำในการรักษาโรค และสภาพความเสื่อมร่างกาย ทำให้การตอบสนองยาได้ไม่ดีเท่าในวัยหนุ่มสาว จึงทำให้เกิดความเสี่ยงในการติดเชื้อดื้อยาสูงขึ้น ทำให้ต้องใช้ยาชนิดใหม่ๆ ในการรักษาโรคติดเชื้อซึ่งในปัจจุบัน พบเชื้อจุลินทรีย์ดื้อยาที่ไม่สามารถใช้ยามาเชื้อที่มีในปัจจุบันในการรักษาได้ ทาง

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาจึงนำเทคโนโลยีที่ทางกลุ่มวิจัยได้ทำงานร่วมกับบริษัท เรโนเทค จำกัด ได้รับรางวัลชนะเลิศ เหรียญทอง ในการนำผลงานการประกวดและจัดแสดงผลงานระดับนานาชาติ ในงาน “45<sup>th</sup> International Exhibition of Inventions of Geneva” ณ กรุงเจนีวา สหพันธรัฐสวิส ภายใต้ผลงานเรื่อง “Environmental-friendly, hydroxyl free radical fumigation for fast and complete surface disinfection” โดยเทคโนโลยีนี้สามารถสร้างละอองลอย hydroxyl free radicals ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์กลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้เป็นอย่างดี ทำให้กลิ่นปัสสาวะในห้องน้ำถูกทำลายด้วย free radicals อีกทั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นพาหะของโรคต่างๆ ที่มากับปัสสาวะก็ถูกทำลายด้วย oxidizing potential ของ hydroxyl free radicals ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กำลังเผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ (“Effective microbial disinfection in healthcare settings with hydroxyl radical fumigation”, Journal of Hospital Infection) และยังได้รับความสนใจในเวทีประชุมระดับนานาชาติ (“Hydrogen Peroxide-Based Wet Oxidation to Eliminate Contraceptive Hormone Residues from Pharmaceutical Wastewater”, World Environmental and Water Resources Congress 2011, “Application of Hydroxyl Radical Aerosolization on *E.coli*/coliform Reduction for Rapid Surface Disinfection in Food Processing”, International Food Research Conference 2017) อีกทั้งจดสิทธิบัตร (เลขที่คำขอ 1701000719 เรื่อง วิธีการและอุปกรณ์สำหรับฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคด้วยการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลแบบละอองลอย) การออกแบบโถปัสสาวะจะถูกปรับปรุงให้โมเมนต์ของน้ำปัสสาวะที่เข้าสู่ผนังด้านในของโถปัสสาวะถูกลดทอนด้วย wire mesh screen ทำให้มวลของน้ำปัสสาวะถูกทำให้ผ่าน screen นี้จึงไม่ทำให้เกิดการกระจายตัวของน้ำปัสสาวะ เลอะเทอะเปรอะเปื้อนในห้องน้ำ สามารถลดความถี่ของการทำความสะอาด แรงงาน น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการทำความสะอาด อีกทั้งการใช้ละอองลอย hydroxyl free radicals ในการทำความสะอาดปัสสาวะในสุขภัณฑ์ ทำให้ปัสสาวะของมนุษย์ที่เต็มไปด้วยแร่ธาตุและสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช สามารถถูกทำการบำบัดฆ่าเชื้อได้อย่างเหมาะสม ทั้งยังถูกระเหยด้วยกระบวนการทางวิศวกรรมศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชได้ในที่สุด เทคโนโลยีการใช้ปัสสาวะเป็นปุ๋ยในการทำการเกษตรได้ถูกสาธิตและใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการทำเบียร์ในปัจจุบันของประเทศเดนมาร์กเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ดังนั้นจะเห็นว่าด้วยเทคโนโลยีและองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์สามารถปรับปรุงหนึ่งในพื้นที่ส่วนรวมหรือพื้นที่สาธารณะที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับการเป็นศูนย์รวมของเชื้อโรคต่างๆ สามารถที่จะก่อให้เกิดโรคติดต่อร้ายแรงได้ เช่น กลุ่มแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคท้องร่วง เชื้ออีโคไล เชื้อโคลิฟอร์ม โรต้าไวรัส ไวรัสหวัด รวมทั้งเชื้อสแตฟิโลคอคคัสออเรียส ที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อที่ผิวหนัง และอื่นๆ เป็นจำนวนมาก เช่น ห้องน้ำสาธารณะในโรงพยาบาล ให้เป็นพื้นที่ที่ถูกสุขลักษณะ ปลอดภัย กำจัดการแพร่ระบาดของโรคมัยใช้เก็บกับกลุ่มเสี่ยง เช่น เด็ก ผู้ป่วย ผู้สูงอายุ เป็นต้น ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาโถบีสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบบีสสาวะและน้ำเสียสำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ เป็นการต่อยอดงานวิจัย ภายใต้งานเรื่อง “Environmental-friendly, hydroxyl free radical fumigation for fast and complete surface disinfection” ที่ได้รับรางวัลชนะเลิศ เหรียญทองในการนำผลงานการประกวดและจัดแสดงผลงานระดับนานาชาติ ในงาน 45<sup>th</sup> International Exhibition of Inventions of Geneva” ณ กรุงเจนีวา สหพันธรัฐสวิส
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาและสร้างเครื่องนวัตกรรมต้นแบบสำหรับโถบีสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบบีสสาวะและน้ำเสียสำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาและสร้างโถบีสสาวะนวัตกรรมรูปแบบใหม่ เพื่อตอบโจทย์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการติดเชื้อโรคจากการเข้าห้องน้ำในสถานที่สาธารณะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 บูรณาการหลักการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอาหารเพื่อสร้างกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่เหมาะสมในการพัฒนานวัตกรรมโถบีสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจาก

กลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาวะในบ่อน้ำบาดน้ำเสียสำหรับ โรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

- 1.3.2 ออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือต้นแบบในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจากปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกด้วยแสงยูวีร่วมกับก๊าซโอโซนและ/หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ของนวัตกรรมโกลด์นาโนอนุภาคเพื่อลดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาวะในบ่อน้ำบาดน้ำเสียสำหรับ โรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถในการยังยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์เมื่อนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงทดสอบในระบบโดยสร้างสภาวะจำลองต้นแบบ
- 1.3.4 ศึกษาจลพลศาสตร์ของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในรูปแบบของละอองลอย หรือ แอโรซอล (aerosol) ต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์
- 1.3.5 รวบรวม เก็บข้อมูล และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อศึกษาและนำผลงานการทดลองจริงไปพัฒนาและปรับปรุงเครื่องต้นแบบให้สมบูรณ์
- 1.3.6 เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อปรับปรุงเครื่องต้นแบบให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ปัจจุบันเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสมัยต่างๆ ได้มีวิวัฒนาการก้าวหน้าไปไกลมาก ทั้งทางด้านการคมนาคม การแพทย์ การสื่อสารและการเกษตร รวมถึงการศึกษา ซึ่งในยุคนี้วันก็ยิ่งจะทันสมัยรวดเร็ว สร้างความสบายให้แก่มนุษย์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการคิดค้นประดิษฐ์พัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวก เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่ต้องการความทันสมัย ปัจจุบันมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถช่วยให้มนุษย์ประหยัดเวลาไปได้มากในการทำกิจกรรมต่างๆ เพราะปัจจุบันเวลามีค่ายิ่งสำหรับมนุษย์ จึงต้องใช้เวลาที่มืออยู่อย่างคุ้มค่า แม้ว่าเวลาจะมีค่ามาก แต่ทรัพยากรอื่นๆ ที่มนุษย์จำเป็นต้องใช้ในชีวิตประจำวันก็จำเป็นต้องใช้ให้คุ้มค่าเช่นกัน อันได้แก่ ทรัพยากรน้ำ ป่าไม้ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้วันยังเหลือน้อยและต้องใช้ใช้อย่างจำกัด

น้ำจัดว่าเป็นทรัพยากรธรรมชาติอย่างหนึ่งที่สำคัญมากต่อสิ่งมีชีวิต ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่มากในสมัยก่อน ปัจจุบันถูกนำมาใช้ประโยชน์จำนวนมากจึงทำให้เหลือใช้ใช้อย่างจำกัด จึงต้องอาศัยพลังงานอื่นๆ มาทดแทน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานมนุษย์ ในการนำทรัพยากรน้ำขึ้นมาใช้ส่วนใหญ่จะใช้ปั๊ม ปัจจุบันเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างมาก สิ่งอำนวยความสะดวกทำให้มนุษย์มีความเป็นอยู่ที่สะดวกสบายขึ้น ปัจจุบันเป็นยุคที่มีจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้นทำให้ทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มและลดลงอย่างรวดเร็ว ในการนำทรัพยากรน้ำมาใช้นั้น ส่วนใหญ่จะใช้ปั๊มน้ำดูดน้ำขึ้นมาใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำต่างๆ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการประหยัดน้ำ ก็ถือว่าการประหยัดไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง เราจึงควรประหยัดทรัพยากรน้ำเพื่อประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันจะเห็นได้ว่าห้องน้ำชายตามสถานที่สาธารณะ ไม่ว่าจะเป็น ตามห้างสรรพสินค้า สถานพยาบาล หรือแม้แต่สถานพักผ่อนคนชรา เกือบทุกแห่ง มีกลิ่นเหม็นจากการที่มีปัสสาวะแล้วไม่ยอมชำระล้างหลังจากการใช้ และมีคราบสกปรกเนื่องจากบางครั้งผู้ใช้บริการไม่ยอมกดน้ำ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น ความสกปรก และสามารถทำให้เกิดการติดเชื้อปนเปื้อนกับผู้ที่มาใช้บริการต่อ ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงต้องการที่จะนำเทคโนโลยีกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมาทดแทนการใช้ทรัพยากรน้ำในการทำความสะดวกโดยปัสสาวะ



เนื่องจากเทคโนโลยีขั้นนี้สามารถทำความสะอาดฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่สามารถก่อโรคและปนเปื้อนคิดไปกับ ผู้ใช้บริการต่อรวมถึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้น้ำค่อนข้างน้อย ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ลด การใช้น้ำดี และทำให้ประหยัดทรัพยากรน้ำได้ค่อนข้างดีมาก

## 2.1 น้ำเสีย (wastewater)

หมายถึงน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ต่าง ๆ และมีสิ่งเจือปน อาทิเช่น การชำระร่างกาย การประกอบอาหาร การ ขับถ่ายของเสีย การล้างวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรม การล้างเครื่องจักร การหล่อเย็นเครื่องจักร ฯลฯ ทำให้คุณลักษณะของน้ำเสียเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ถ่ายเทลงมาเจือปนอยู่ในน้ำ ปริมาณสิ่งสกปรกในน้ำเสียหรือความสกปรกของน้ำเสียจึงขึ้นอยู่กับการใช้ ประโยชน์ของน้ำ (ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม) ซึ่งแหล่งที่มาของน้ำเสียแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ

- น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) หมายถึง น้ำเสียจากแหล่งชุมชนได้แก่ น้ำเสียจากบ้านพักอาศัย อาคาร โรงพยาบาล ตลาด โรงแรม เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ เช่น การชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบอาหาร
- น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial wastewater) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่ เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เช่น การระบายความร้อน การล้างวัตถุดิบ สิ่งสกปรกในน้ำ เสียเหล่านี้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำและชนิดของโรงงาน อุตสาหกรรม
- น้ำเสียจากการเกษตรกรรม (Agriculture wastewater) น้ำเสียจากการเกษตรกรรมเกิดจากกิจกรรมทาง การเกษตร การปศุสัตว์ มีสารพิษตกค้างจากสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร เช่น ยาปราบศัตรูพืชตลอดจน ซากมูลสัตว์และกากของเสียจากปศุสัตว์ ซึ่งกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้างยากต่อการรวบรวม การ ป้องกันและการกำจัด (กรมควบคุมมลพิษ) น้ำจากกระบวนการต่าง ๆ จากโรงพยาบาลเป็นแหล่งผลิตน้ำ เสียขนาดใหญ่ที่มักจะมีการปนเปื้อนของเชื้อโรคที่เป็นอันตรายค่อนข้างมากรวมทั้งสารฆ่าเชื้อต่าง ๆ ซึ่ง แหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงพยาบาลมาจากสถานที่ตรวจคนไข้นอก สถานรับคนไข้ใน โรงซักรีดเสื้อผ้า โรงครัว โรงอาหาร ห้องผ่าตัดและห้องคลอด ห้องปฏิบัติการ ที่พักอาศัยเจ้าหน้าที่ เป็นต้น อาจส่งผล กระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเนื่องจากการตกค้างของยาและสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ใน กระบวนการต่าง ๆ ของการรักษาคนไข้รวมทั้งยังเป็นภัยคุกคามต่อความปลอดภัยของชุมชนที่อยู่รอบๆ

โรงพยาบาลเพราะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรคและเป็นพาหนะนำโรคต่างๆ กลุ่มมนุษย์สัตว์และพืชมีสี และกลิ่นที่น่ารังเกียจ

## 2.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง หรือ กระบวนการ AOPs (Advance Oxidation Processes) เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ หรือย่อยสลายได้ยาก (Recalcitrant) ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ หลักการของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้คือใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical,  $\text{OH}\cdot$ ) โดยทำหน้าที่ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดเป็นอนุผลของสารอินทรีย์

ตัวอย่างการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในงานต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดิน
- ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-Treatment) ก่อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ
- ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น ไซยาไนด์และสารประกอบของโลหะหนัก เป็นต้น
- ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นสุดท้าย (Post-Treatment) หลังจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษที่ยังหลงเหลืออยู่
- ใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ

ข้อดีของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการทั่วไป คือ เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากสิ่งแวดล้อม โดยไม่ได้เป็นการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากเฟสน้ำ (Aqueous Phase) เหมือนกระบวนการบำบัดแบบถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หรือการแยกตัวด้วยอากาศ (Air Stripping) แต่สารอินทรีย์ต่างๆจะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่ใช้กันทั่วไปจะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยา เช่นเกลือของโลหะ โอโซน หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น ซึ่งจะสามารถเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดี

กระบวนการ Advance Oxidation Processes ในปัจจุบันที่มีการใช้งานมีหลายประเภท เช่น การฉายแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO<sub>2</sub>) การฉายแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับก๊าซโอโซน (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) การฉายแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) การฉายแสงอัลตราไวโอเลตและการใช้เฟนตัน (Fe(II)/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เป็นต้น

### 2.3 การเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

การเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเกิดขึ้นเมื่อแสงอัลตราไวโอเลต และ/หรือ ก๊าซโอโซนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยแสงอัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นในช่วง 185-400 นาโนเมตร โดยแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 253.7 นาโนเมตร จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ทำให้พันธะออกซิเจนในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกสลายพันธะและแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งจะเป็นตัวหลักในการทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีที่สามารถนำไปใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนี้จะไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนกระทั่งไม่สามารถออกซิไดซ์ได้อีกต่อไปหรืออาจถึงขั้นกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ คือเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเกลือต่างๆ

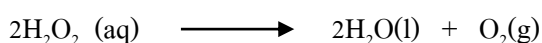
กลไกของกระบวนการอัลตราไวโอเลต ก๊าซโอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นการทำปฏิกิริยาเพื่อเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

L และ Chen (1997) ได้ศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นร่วมกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของ 2,4-D พบว่าสามารถลดความเป็นพิษของน้ำเสียได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียต่อไป (พวงรัตน์, 2548)

### 2.4 กระบวนการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีสูตรทางเคมีว่า H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (สารที่ประกอบด้วยออกซิเจนสองตัวและเชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว)

โดยทั่วไปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จะอยู่ในรูปสารละลายความเข้มข้นตั้งแต่ 3–90% มีสภาพเป็นของเหลวใส หนักกว่าน้ำเล็กน้อย มีรสขม ไม่อยู่ตัว เมื่อเจือจางจะเป็นสารละลายไม่มีสี มักใช้เป็นสารฟอกสีผสม สารทำความสะอาด น้ำยาฆ่าเชื้อ ใช้ฆ่าเชื้อโรคบนผิวหนัง ใช้ล้างภาพสีน้ำมันเก่าๆ ให้สดใสนั้น ทำน้ำยาบ้วนปาก เนื่องจากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวเป็นน้ำได้ตั้งสมการ แสงสว่างและความร้อนจะช่วยเร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น ดังนั้นจึงควรเก็บรักษาสารชนิดนี้ไว้ในภาชนะที่ทึบแสงและในที่เย็น



รูปที่ 2.1 ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

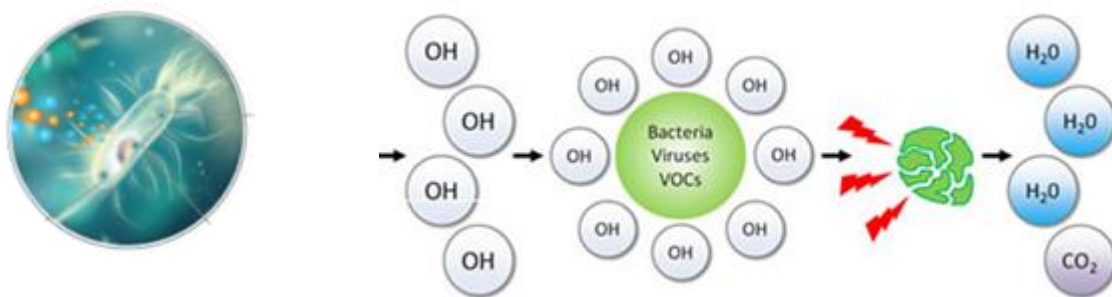
ที่มา: <http://family.fimela.com/dunia-ibu/rumah-keluarga/trik-mudah-hilangkan-noda-dengan-bahan-sehari-hari-121128d-page3.html>

นอกจากนี้แล้ว ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ยังเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์ออกซิเดชัน 1.78 โวลต์ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นสารที่ย่อยสลายง่ายและไวต่อแสงมีราคาถูกและสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ ) ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) แต่ความสามารถในการออกซิไดซ์น้อยไม่สามารถออกซิไดซ์สารที่ย่อยสลายยากได้แต่เมื่อมีการใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยา เช่น เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เฟอริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) จะส่งผลให้สามารถผลิตสารออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์ออกซิเดชันสูงโดยใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาหรือปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's reaction)

จากความสำคัญดังกล่าว ทีมงานจากมหาวิทยาลัยบูรพา จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการพัฒนานวัตกรรมโถบัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาวะในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักผ่อนผู้สูงอายุ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชัน

ขั้นสูง (advanced oxidation technology) ในการสร้างอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมาก โดยการประยุกต์ใช้ระบบละอองลอยที่ให้อนุภาคขนาดเล็ก (1 nm -100  $\mu\text{m}$ ) ด้วยระบบการสั่นด้วย Ultrasonic nebulizer ที่ความถี่สูง (1-3 MHz) เพื่อให้เกิดอนุภาคของละอองลอย ที่มีความสามารถในการแขวนลอยได้นาน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กนี้จะแพร่กระจายไปยังมุมอับต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ละอองลอย หรือ แอโรซอลที่กระจายในก๊าซ ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีแอโรซอลในการยับยั้งเชื้อก่อโรคในสภาพแวดล้อมในการผลิตเนื่องจาก สภาวะเบาเป็นละอองของแอโรซอลสามารถกระจายไปยังบริเวณที่ยากแก่การเข้าถึงหรือบริเวณที่มีข้อจำกัดในด้านพื้นที่ อีกทั้งการใช้เทคนิคแอโรซอลเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณการใช้สารเคมีที่มีราคาแพงและลดการใช้ทรัพยากรน้ำ

อนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระนี้จะไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนกระทั่งไม่สามารถออกซิไดซ์ได้อีกต่อไปหรืออาจถึงขั้นกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ คือ เปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและเกลือต่างๆ กระบวนการเกิดอนุมูลอิสระสามารถสร้างได้หลายวิธีการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและการนำไปประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.2 กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (ADVANCED OXIDATION TECHNOLOGY) ของอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระ (FREE RADICALS DERIVATIVES)

โถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปรมาจากกลืนรูปแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อสูงโดยสารอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่เครื่องผลิตขึ้นจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์ออกซิเดชันสูงถึง 2.8 V ซึ่งสูงกว่าโอโซน คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ แต่มีค่าสูงรองจากฟลูออรีน (ตาราง

2.1) อีกทั้งเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างละอองลอยแบบ Ultrasonic nebulizer ด้วยการใช้เทคโนโลยีละอองลอยทำให้สามารถนำเชื้อได้ตามจุดอับหรือซอกหลืบของโถปัสสาวะได้ดี

ตารางที่ 2.1 ศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potentials) ของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ

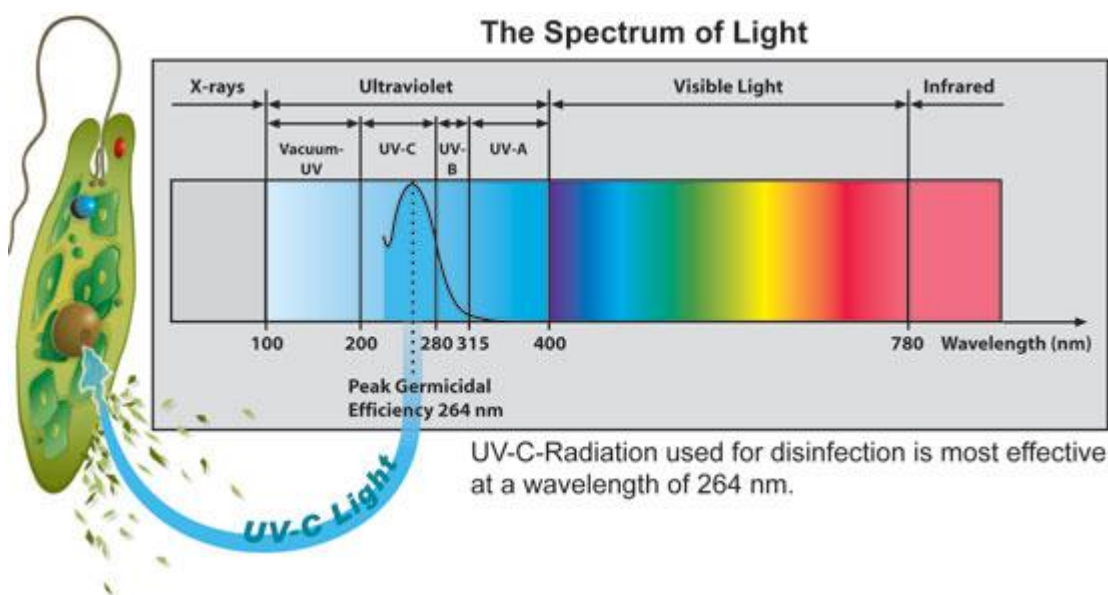
Oxidizing Agent	Oxidation Potential (V)
Fluorine	3.06
Hydroxyl radical	2.80
Oxygen (atomic)	2.42
Ozone	2.08
Hypochlorite	1.49
Chlorine	1.36
Hydrogen peroxide	1.78
Chlorine dioxide	1.27
Oxygen (molecular)	1.23

## 2.5 แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Light)

แหล่งกำเนิดของรังสี UV นั้น มีทั้งจากธรรมชาติและจากสิ่งที่มีมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น แต่แหล่งกำเนิดรังสี UV ที่สำคัญ คือ ดวงอาทิตย์ และคนส่วนใหญ่จะได้รับ UV จากแสงแดด แต่เนื่องจากชั้นของบรรยากาศได้ลดลง มนุษย์และสิ่งแวดล้อมจึงได้รับรังสี UV เพิ่มมากขึ้น สำหรับสุขภาพของมนุษย์ รังสี UV มีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ หากได้รับรังสีในขนาดต่ำจะเป็นประโยชน์ต่อการสร้างวิตามินดี แต่ถ้าได้รับมากเกินไปเป็นเวลานานจะมีผลในการทำลายระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย รวมถึง ผิวหนัง ตา และก่อให้เกิดมะเร็ง ไบโอมโมเลกุลในร่างกายซึ่งดูดซับรังสี UV จะเกิดปฏิกิริยาขั้นปฐมภูมิ คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลเล็กน้อย หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโมเลกุลโดยสิ้นเชิง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่มีผลต่อเนื่องในระยะยาว DNA เป็นโมเลกุลสำคัญที่ถูกทำลายได้ด้วย รังสี UVB (280 – 315 nm) และ UVC (100 – 280 nm) จากการเฝ้าสังเกตการณ์ พบว่า เมื่อเซลล์ prokaryotic และ eukaryotic ได้รับความรังสี UV จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ เช่น เซลล์ตาย โครโมโซมเปลี่ยนแปลง เกิดการกลายพันธุ์ และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเซลล์ นอกจากนี้ยัง พบว่า ยีนส์หลายตัว และไวรัสหลายชนิด ก็ถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยรังสี UV เช่นกัน (Bank et al., 1990; Bintsis et al., 2000)

แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นแสงสีม่วงน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 nm ถึง 390 nm ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ช่วง

1. ช่วงคลื่นยาว (3250 – 3900 angstrom) รังสีช่วงนี้มีอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคต่ำและสามารถพบได้ในแสงแดด
2. ช่วงคลื่นปานกลาง (2950 – 3250 angstrom) รังสีช่วงนี้มีอำนาจฆ่าเชื้อโรคได้ถ้าเวลาสัมผัสเพียงพอ
3. ช่วงคลื่นสั้น (2000 - 2950) รังสีช่วงนี้ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์

(แหล่งข้อมูล: <http://www.radiantuv.com/uv-edu/>)

โดยปกติแล้วหลอด UV จะมีความยาวตั้งแต่ 12 – 48 นิ้ว มักจะมีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 7,500 ชั่วโมง

### 2.5.1 หลักการทำงานของหลอดรังสียูวี

รังสียูวีถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 100-400 nm โดยทั่วไป รังสียูวีสามารถแบ่งประเภทออกได้ 4 ประเภทตาม ความยาวคลื่นคือ รังสียูวีเอ (UV-A) รังสียูวีซี (UV-C) และรังสียูวีบี (UV-B) รังสียูวีเอ (vacuum-UV) รังสียูวีเอซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผิวหนังของคน รังสียูวีบีซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 280-315 nm เป็นรังสีที่มีผลต่อการไหม้และการ

เป็นมะเร็งผิวหนังของคน ในขณะที่รังสียูวีซี ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 200-280 nm เป็นรังสีที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และรังสียูวี บี สูดูดอากาศ ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 100-200 nm เป็น รังสีที่สามารถถูกดูดซับได้ด้วยวัตถุเกือบทุกชนิด โดย รังสียูวีบี สูดูดอากาศจำเป็นต้องเคลื่อนที่ในสภาวะสุญญากาศเท่านั้น รังสียูวีจากแสงแดดจากดวงอาทิตย์ เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของชั้นโอโซนที่สามารถดูดซับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นต่ำ

### 2.5.2 กลไกการสร้างรังสียูวี (UV light generation) และ แหล่งกำเนิดรังสียูวี

อะตอมและไอออนสามารถปลดปล่อยโฟตอน (photon) จากแสงเมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก สภาวะพลังงานสูง (high energy state, E<sub>2</sub>) ไปยัง สภาวะพลังงานต่ำ (low energy state, E<sub>1</sub>) โดย โฟตอนแต่ละตัว มีพลังงาน (E) ตามสมการที่ 1  $E (J) = E_2 - E_1 = hc/\lambda$  สมการที่ 1 โดยที่ h = ค่าคงที่พลังค์ (Planck's constant)  $= 6.23 \times 10^{-34} \text{ J.s}$  c = ความเร็วแสง =  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$   $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสี (nm) ระดับพลังงานของอะตอมหรือไอออนนั้นเป็น ลักษณะเฉพาะขึ้นอยู่กับจำนวน โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอนในอะตอมหรือไอออนนั้นๆ ในธาตุบางชนิด ความแตกต่างระหว่างสภาวะพลังงาน สามารถปลดปล่อยโฟตอนที่มีความยาวคลื่นในช่วงของรังสียูวีได้ รังสีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลัก คือ รังสีชนิดก่อไอออน (ionizing radiation) และรังสีชนิดไม่ก่อไอออน (non-ionizing radiation) โดยรังสีชนิดก่อไอออน คือ รังสีใดๆ ก็ตามที่เมื่อเดินทางผ่านตัวกลาง หรืออากาศแล้วสามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เช่น รังสีแกมมา รังสีบีตา และรังสีแอลฟา เป็นต้น ในขณะที่รังสีใดๆ ก็ตามที่เมื่อผ่านตัวกลางแล้ว ไม่ทำให้ตัวกลางแตกตัว คือ รังสีชนิดไม่ก่อไอออน เช่น รังสียูวี รังสีอินฟราเรด และคลื่นวิทยุ เป็นต้น หลอดกำเนิดรังสียูวี (UV lamp) ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยทั่วไปสามารถแบ่งตามความดัน ไอของปรอทระหว่างหลอดกำเนิดรังสียูวีทำงานออกเป็น หลักๆ 3 ประเภทคือ 1. ความดันต่ำ (low pressure) 2. ความดันต่ำ; ความเข้มแสงสูง (low pressure; high output) และ 3. ความดันปานกลาง (medium pressure) หลอดกำเนิดรังสียูวีประกอบด้วยหลอดที่ทำมาจากแก้วซิลิกา ซึ่งห่อหุ้มชั้น (envelope) อีกชั้นหนึ่ง ที่บรรจุปรอทและแก๊สเฉื่อย (ปิดผนึกทั้งด้านและปลาย) มีอิเล็กโทรดบริเวณปลายของแต่ละด้านของ envelope (Figure 1) โดยแหล่งพลังงานของหลอดกำเนิดรังสียูวี โดยทั่วไปคือพลังงานจากกระแสไฟฟ้า เครื่องฉายรังสียูวี ในอุตสาหกรรมอาหารนั้นประกอบด้วยท่อที่บรรจุหลอดกำเนิดรังสียูวีโดยแยกออกจากตัวอย่างอาหารที่จะมาสัมผัสกับรังสียูวี โดยเครื่องฉายรังสียูวีส่วนใหญ่



ประกอบด้วยจอกควบคุมซึ่งจะแสดงผลของปริมาณความเข้มของรังสียูวี (UV intensity) และอัตราการไหลของอาหารเหลว (flow rate)

### 2.5.3 การวัดปริมาณของรังสีอัลตราไวโอเลต

ปริมาณการใช้รังสี UV จะวัดโดยใช้หน่วย ไมโครวัตต์-วินาที/ตร.ซม. ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างความเข้มของรังสีในหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ไมโครวัตต์/ตร.ซม.) กับเวลาสัมผัสระหว่างรังสีกับน้ำ (วินาที) การวัดอาจจะใช้หน่วย Ultrads เชื้อโรคต่างๆ มีความต้านทานต่อรังสีไม่เท่ากันดังตารางที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความแน่ใจว่าการฆ่าเชื้อโรคจะได้ผลตามที่ต้องการ ก็ไม่ควรจะน้อยกว่า 20,000 Ultrads แต่โดยทั่วไป หลอด UV มีปริมาณรังสี 30,000 Ultrads เพราะจะต้องมีการเผื่อความสูญเสียของรังสีด้วย (Koutchma et. al., 2009)

### ตารางที่ 2.2 ปริมาณรังสี UV ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคต่างๆ

ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์	สาเหตุของโรค	Ultrads*
<i>Salmonella typhosa</i>	โรคไทฟอยด์	4,100
<i>Salmonella paratyphi</i>	โรคลำไส้	6,100
<i>Shigella dysenteriae</i>	โรคบิด	4,200
<i>Shigella flexneri</i>	โรคบิด	3,400
<i>Vibrio comma</i>	โรคอหิวาตกโรค	6,500
<i>Leptospira spp.</i>	โรคฉี่หนู	6,000
<i>Poliovirus</i>	โรคสันหลังอักเสบ	6,000
Unidentified	โรคตับอักเสบ	8,000

\* Ultrads = 1 ไมโครวัตต์ - วินาที/ตารางเซนติเมตร

### 2.5.4 กลไกของรังสีต่อจุลินทรีย์ (Krishnamurthy et. al., 2008)

กลไกในการเข้าทำลายจุลินทรีย์ของรังสีแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. Target Theory รังสีจะเข้าทำลายส่วนของกรดนิวคลีอิกภายในเซลล์โดยตรงทำให้เกิดการตายและผ่า

เหล่าได้ รังสีนี้ได้แก่ แสง UV

2. Indirect Theory การทำลายเซลล์เกิดขึ้นโดยอ้อม เนื่องจากรังสีนี้จะทำให้น้ำในเซลล์แตกตัวเป็น  $H^+$  และ  $OH^-$  เพื่อรบกวนการทำงานของเอนไซม์ จนทำให้ขบวนการเมตาบอลิซึมและสารพันธุกรรมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนกระทั่งเซลล์ตาย รังสีพวกนี้ได้แก่ X-ray, Gamma Ray เป็นต้น

### 2.5.5 ผลของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อจุลินทรีย์

แสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีผลต่อโครงสร้างของเซลล์ที่สามารถดูดกลืนแสงนี้ไว้ได้ (Demirci & Ngadi, 2012) เช่น โปรตีน และ DNA โปรตีนจะดูดกลืนได้ดีที่มีความยาวคลื่น 280 nm โดยเป็นการดูดกลืนของกรดอะมิโนที่เป็น Aromatic Ring ส่วน DNA จะถูกดูดกลืนแสง UV ได้สูงสุดใกล้เคียงความยาวคลื่น 254 nm ผลกระทบของแสง UV ที่เกิดกับ DNA จะมีความสำคัญต่อเซลล์มากที่สุด เนื่องจาก DNA เป็นสารพันธุกรรมจึงมีหน้าที่ควบคุมกลไกการดำรงชีวิต และการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของเซลล์ DNA มีโครงสร้างเป็นลักษณะ 2 สายพันธุเป็นเกลียว แต่ละสายของ DNA จะประกอบไปด้วยน้ำตาลดีออกซีไรโบส (Deoxyribose), ฟอสเฟต และเบสชนิดต่างๆ มายึดเกาะกัน แล้วทั้งสองสายของ DNA จะมาเชื่อมต่อกันด้วย Hydrogen bond ของเบสแต่ละคู่ คือ Adenine จับกับ Thymine และ Guanine จับกับ Cytosine

โครงสร้างสำคัญในการดูดกลืนแสง UV ของ DNA คือเบสชนิดต่างๆ โดยที่เบส Pyrimidine (คือ Thymine และ Cytosine) จะมีความไวต่อแสง UV มากกว่าเบส Purine (คือ Adenine และ Guanine) เมื่อได้รับแสง UV จะทำให้เบส Cyclobutane Ring ในที่สุด Dimer ที่เกิดเป็นชนิดแรกได้แก่ Thymine Dimer แต่อาจจะพบว่ามี Dimer ของเบสคู่อื่นๆ เช่น Thymine – Cytosine และ Cytosine Dimer ได้อีกด้วย ในขณะที่เบสเชื่อมกันเป็น Dimer นี้ Hydrogen bond ที่ยึดระหว่างสายของ DNA จะถูกทำลายเองทำให้ลักษณะเกลียวของ DNA เปลี่ยนไป การยึดเกาะกันของเบสที่เข้าคู่กันในแต่ละสายของ DNA ไม่เกิดขึ้น ทำให้การทำงานและการแบ่งตัวของ DNA มีการสับสน ไม่สามารถจำลองตัวเองหรือจำลองเป็น RNA ขึ้นมาได้ มีผลทำให้เซลล์ไม่สามารถแบ่งตัว การหายใจและการเจริญเติบโตถูกยับยั้ง จนกระทั่งเซลล์ตายไปในที่สุด แสง UV ยังมีผลทางอ้อมต่อจุลินทรีย์อีกด้วย กล่าวคือ แสง UV ที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ จะกระตุ้นให้ออกซิเจนที่ละลายน้ำเกิดการรวมตัวกับน้ำเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ซึ่งสารที่ได้นี้คุณสมบัติทำลายจุลินทรีย์อีกด้วย

เซลล์แบคทีเรียที่ใกล้ตายด้วยอิทธิพลของแสง UV อาจฟื้นคืนชีพขึ้นมาได้ ถ้าเชื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่น 300 – 400 nm การฟื้นคืนชีพด้วยแสงนี้ เรียกว่า Photoreactivation แสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะไปกระตุ้นเอนไซม์ทำให้ Dimer ของเบสหลุดออกจากกัน ทำให้ DNA กลับคืนสู่สภาพปกติจนสามารถทำงานได้ อย่างไรก็ตามบางเซลล์ที่ได้รับความเสียหายจากแสง UV เป็นอย่างมากก็จะตาย ไม่สามารถซ่อมแซมให้ฟื้นขึ้นมาได้ด้วยขบวนการของ Photoreactivation

## 2.5.6 รังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อการทำลายจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับ

ความสามารถของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อการทำลายจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับ

2.5.6.1 ความเข้ม (dose) ของรังสีเมื่อสัมผัสเซลล์

2.5.6.2 ระยะเวลาที่รังสีสัมผัสเซลล์

2.5.6.3 ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและเซลล์

2.5.6.4 ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ เช่น ราชะทนต่อรังสี UV มากกว่าแบคทีเรีย

2.5.6.5 สถานภาพของจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสี เช่น ในช่วงระยะ lag phase, ในช่วงระยะ log phase, ระยะการสร้างสปอร์, เซลล์ (vegetative cells), ความต้องการออกซิเจน (aerobe, facultive anaerobe, anaerobe), อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญ (thermophiles, psychrophiles, mesophiles)

2.5.6.6 องค์ประกอบของอาหารที่นำมาฉายรังสีและปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายใน (intrinsic – extrinsic parameter) ของอาหาร

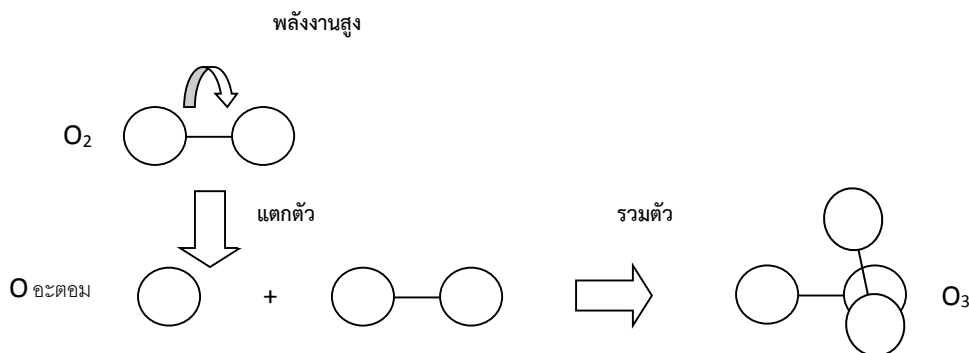
แสงยูวีใช้เป็นวิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำตั้งแต่กลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 แสงยูวีที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะทำให้แบคทีเรียไวรัสและโปรโตซัวลดลงเช่น Cryptosporidium โดยการทำลายพันธะโมเลกุลของอาร์เอ็นเอและดีเอ็นเอเพื่อให้เกิด dimers ซึ่งทำให้เชื้อโรคไม่สามารถสืบพันธุ์และเจริญเติบโตได้

ความไวของรังสียูวีต่อเชื้อจุลินทรีย์วัดจากความเข้มของรังสียูวีครั้งที่สัมผัสกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและเวลาสัมพันธ์กับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้นของคลอรีน เช่น *E. coli* และโปรโตซัว เช่น Cryptosporidium มีความไวสูงและต้องใช้รังสียูวีประมาณ 10 mJ ต่อตารางเซนติเมตรสำหรับฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว 99.99% ในทางกลับกันไวรัสส่วนใหญ่ (เช่น โปลิโอ) มีความไวต่อรังสียูวีน้อยลงโดยมีขนาด 30 มม. ต่อตารางเซนติเมตรสำหรับฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว 99.99% Adenovirus เป็นเชื้อจุลินทรีย์ชนิด

หนึ่งที่มีความสำคัญน้อยที่สุดโดยต้องใช้รังสียูวีประมาณ 180 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับการระงับการใช้งาน 99.99% ดังนั้นการรักษาด้วยรังสียูวีเพียงอย่างเดียวไม่สามารถคาดว่าจะช่วยป้องกันเชื้อโรคต่างๆได้

## 2.6 โอโซน (O<sub>3</sub>)

ก๊าซโอโซน (Ozone or Activated Oxygen) ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 3 อะตอมรวมกัน มีสูตรโมเลกุล O<sub>3</sub> ก๊าซโอโซนสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์และบนพื้นผิวโลก ลักษณะการเกิดเป็นผลมาจากการเกิดฟ้าแลบและฟ้าคะนองซึ่งจะมีประจุไฟฟ้ามากมายเกิดขึ้นและมีความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวแล้วรวมตัวกันใหม่เป็นก๊าซโอโซนได้นั่นเอง ก๊าซโอโซนที่เกิดตามธรรมชาตินี้ ทำหน้าที่กรองรังสีและแสงอาทิตย์ นอกจากนั้นมนุษย์ยังสามารถผลิตโอโซนได้ โดยเลียนแบบปฏิกิริยาการเกิดโอโซนจากธรรมชาติ (Yanco Industries, 1998) จากการให้พลังงานสูงแก่โมเลกุลออกซิเจน ทำให้โมเลกุลออกซิเจนนั้นแตกตัวออกเป็นอะตอมออกซิเจนอิสระ ซึ่งต่อมารวมตัวกับโมเลกุลอื่นของออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน (สุเมธ, 2541) การเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงดังรูปที่ 2.4



โอโซนเป็นสารอยู่ในสถานะก๊าซประกอบด้วยโมเลกุลของออกซิเจน 3 โมเลกุล ก๊าซโอโซนพบมากที่ระดับความสูงประมาณ 10-50 กิโลเมตรเหนือผิวโลกในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (Stratospheres) ช่วยลดอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ก๊าซโอโซนเกิดได้เองในธรรมชาติจากกระแสไฟฟ้าแรงสูงในอากาศเนื่องจากฟ้าผ่าหรือฟ้าแลบทำให้ก๊าซออกซิเจนซึ่งปกติประกอบด้วยออกซิเจน 2 อะตอม รวมกันเป็น 1 โมเลกุล (O<sub>2</sub>) แตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอม (O) อิสระแล้วรวมกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่น เกิดเป็น

โอโซนโมเลกุล ( $O_3$ ) นอกจากนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ก็ทำให้ออกซิเจนโมเลกุลแตกตัว เกิดก๊าซโอโซนได้เช่นกัน  $O_3$  ที่เกิดโดยวิธีนี้มีความปริมาณเพียง 0.02-0.2 ppm เท่านั้น (Horvath et al., 1985)

แม้จะเกิดจากโมเลกุลของออกซิเจนเหมือนกันแต่  $O_2$  และ  $O_3$  กลับมีคุณสมบัติต่างกันมาก กล่าวคือ  $O_2$  สามารถคงสภาพอยู่ได้ดีกว่า เนื่องจากพันธะที่ยึดอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอมไว้ด้วยกัน มีความแข็งแรง นั่นคือมีความเสถียรสูง ในขณะที่  $O_3$  มีการเติมอะตอมของออกซิเจนเพิ่มเข้ามาอีก 1 อะตอม ทำให้โมเลกุลใหม่ที่ได้ออกซิเจนสูง มีความเสถียรต่ำ ทำให้เสถียรภาพได้ง่ายจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดันและการเกิดปฏิกิริยากับสารที่มีพลังงานต่ำกว่านั่นเอง จะเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างรวดเร็ว ด้วยการให้อะตอมของออกซิเจน 1 อะตอม และได้ผลผลิตกลับเป็น  $O_2$  ที่มีพลังงานต่ำกว่านั่นเอง พบว่า  $O_3$  มีความแรงปฏิกิริยา (Oxidation potential) สูงถึง 2.07 Electron Volt (eV) ในขณะที่อนุพันธ์ของออกซิเจน (Reactive oxygen species) ที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของน้ำยาล้างแผลคือ Hydrogen peroxide มีค่า Oxidation potential เท่ากับ 1.78 eV ตลอดจนน้ำยาเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่สำคัญ ได้แก่ Sodium hypochlorite และ Chlorine dioxide มีค่าเท่ากับ 1.36 eV และ 0.95 eV ตามลำดับ (Horvath et al., 1985)

การผลิตโอโซนในโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นระบบปิด (Tap และ Rice, 2012) มีการสร้างและปล่อยโอโซนในจุดที่ต้องการใช้งาน ในปัจจุบันมีวิธีการผลิตอยู่ 2 วิธีคือ

1. วิธี Photozone หลักการคือ การแตกตัวของก๊าซออกซิเจน จากพลังงานคลื่นอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร แล้วรวมตัวกันใหม่ในรูปของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านหลอดอัลตราไวโอเล็ต กล่าวคือ ถ้าแหล่งกำเนิดออกซิเจน บั้มลม (อากาศในธรรมชาติ) ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะมีปริมาณ 66.7 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซทั้งหมด แต่ถ้าใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ในการผลิต ออกซิเจนจะเปลี่ยนเป็นก๊าซโอโซน 100 เปอร์เซ็นต์ วิธี Photozone เป็นวิธีที่ให้ความแรงของการออกซิไดซ์สูง อีกทั้งยังใช้พลังงานในการผลิตโอโซนน้อยกว่าวิธีอื่น
2. วิธี Corona Type คือการถ่ายประจุไฟฟ้าแบบ Silent Spark (corona) ความต่างศักย์ (5,000 – 10,000 โวลต์) ผ่านก๊าซออกซิเจนหรืออากาศที่มีความชื้นต่ำ การผลิตโอโซนด้วยวิธีนี้จะให้ปริมาณโอโซนสูงถึง 96.4% ซึ่งมากกว่าวิธี Photozone อีกทั้งยังให้องค์ประกอบอื่นๆ เพียง 3.6 เปอร์เซ็นต์ แต่อากาศที่ใช้ต้องปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้น อาจมีผลในการลดปริมาณโอโซนที่ควรผลิตได้และเป็น

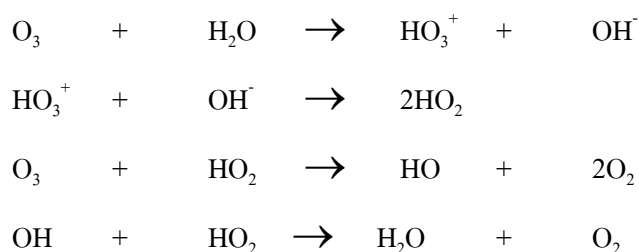
สาเหตุให้เกิดไอน้ำเกาะอยู่ภายในเครื่อง ซึ่งก่อให้เกิดสนิมได้

### 2.6.1 คุณสมบัติของก๊าซโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซสีฟ้า กลิ่นค่อนข้างฉุนคล้ายคลาวปลา น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 กรัม/โมเลกุล มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ - 111.9 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ - 192.5 องศาเซลเซียส (ที่ 1 บรรยากาศ) โอโซนมีน้ำหนักประมาณ 0.135 ปอนด์/ตารางฟุต ออกซิเดชั่นโพเทนเชียลของโอโซนมีค่าประมาณ - 2.07 โวลต์ โอโซนมีความหนาแน่นมากกว่าออกซิเจน 1.5 เท่า และละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจน 12.5 เท่า (Towles, 1998) โอโซนสามารถละลายน้ำได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอ็น-เพนเทน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ฯลฯ และละลายในน้ำได้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โอโซนสามารถละลายในน้ำได้ 0.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเสถียรต่ำ ค่าครึ่งชีวิตประมาณ 36 นาทีถึงสองชั่วโมงในสภาวะก๊าซ และประมาณ 18 – 20 นาทีเมื่อละลายในน้ำ จะเห็นได้ว่าความไม่เสถียรของก๊าซโอโซน มีสาเหตุจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วของโอโซน

### 2.6.2 การสลายตัวของโอโซน (Guzel-Seydim et al., 2004)

เมื่อโอโซนละลายน้ำ จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนของน้ำ เกิดเป็นอนุมูลอิสระต่างๆ และสุดท้ายก๊าซโอโซนจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซออกซิเจน อัตราการสลายตัวของโอโซนขึ้นอยู่กับสารประกอบตัวก่อ (Initiatore) และ/หรือตัวสนับสนุน (Promotor) ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ รวมทั้งสารยับยั้ง เช่น คาร์บอนเนต



รูปที่ 2.5 การสลายตัวของโอโซน

จากรูปที่ 2.5 มี 2 ปฏิกิริยาการที่มีผลต่อวัฏจักรดังกล่าวคือ การสนับสนุน (Promotion) และการยับยั้ง (Inhibition) โดยสารที่สนับสนุน (Promoting Agent) คือก๊าซโอโซนซึ่งเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สารยับยั้ง (Inhibiting Agent) จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{OH}^{\cdot}$  เกิดผลิตภัณฑ์อื่น สารยับยั้งนั้นรวมไปถึงคาร์บอนและไบคาร์บอน ด้วยเหตุนี้เองทำให้ระดับคาร์บอนและไบคาร์บอนที่มีอยู่ปริมาณสูง จะช่วยให้โอโซนที่เหลืออยู่ คงสภาพต่อไปอีก

### ปัจจัยของการสลายตัวมี 2 ประการ คือ

#### 2.6.2.1 การทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนในน้ำ

โอโซนทำปฏิกิริยาทันทีที่สัมผัสกับสารแขวนลอยต่างๆ ในน้ำ อาทิเช่น สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ รวมถึงความหนาแน่นของเซลล์จุลินทรีย์ในน้ำ โอโซนจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว และแตกตัวให้อนุมูลอิสระ ได้แก่ Hydroxyl radical และ  $\text{HO}_3$  ซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นปริมาณ ชนิดของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในน้ำด้วย จากสาเหตุดังกล่าว ทำให้การสลายตัวของโอโซนในน้ำธรรมชาติ มีความซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์

#### 2.6.2.2 การกระจายตัวสู่บรรยากาศ

เนื่องจากโอโซนมีความเสถียรต่ำ สลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่ละลายน้ำ ดังนั้นก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะกระจายตัวขึ้นสู่บรรยากาศเหนือสารละลายในรูปก๊าซมากกว่าทำให้การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำไม่แน่นอน ก๊าซโอโซนที่ยังคงเหลือในรูปสารละลายจะมีค่าลดลงตามเวลา

### 2.6.3 ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของโอโซน (Wickramanayake, 1984)

ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของโอโซน จะมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

#### 2.6.3.1 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโอโซนละลายลดลง เนื่องจากโอโซนสลายตัวได้เร็วขึ้น ความคงตัวของโอโซนรวมทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของโอโซน ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความสัมพันธ์อื่น

#### 2.6.3.2 ค่าความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลาย (pH)

ค่า pH มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาของโอโซนต่ออินทรีย์สารต่างๆ โดยในสถานะที่ pH น้อยกว่า 7 โอโซนจะทำปฏิกิริยากับอินทรีย์สารต่างๆ ได้ช้า แต่ในสถานะที่ pH มากกว่า 8 ปฏิกิริยาก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโอโซนสลายตัวให้ไฮดรอกซีแรดดิเคิล ( $^{\circ}\text{OH}$ ) ที่ออกซิไดส์ที่รุนแรง อย่างไรก็ตามจะไม่พบความแตกต่างของความสามารถในการละลายของโอโซนที่ pH ของน้ำเท่ากับ 5 – 9 เมื่อความเข้มข้นของโอโซนตกค้าง (ROC) อยู่ในช่วง 0.60 – 0.70 ส่วนในล้านส่วน

### 2.6.3.3 ความเค็มของน้ำ

เมื่อน้ำทะเลมีค่าความเค็มเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้โอโซนละลายลดน้อยลง ถ้าตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ อุณหภูมิ และค่า pH ของน้ำทะเลคงที่

### 2.6.3.4 คุณสมบัติของสารละลาย

ปริมาณสารประกอบและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการละลายของก๊าซโอโซน กล่าวคือถ้ามีสารประกอบและอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมาก จะทำให้ปริมาณโอโซนละลายได้ลดลง

### 2.6.3.5 ขนาดของฟองก๊าซโอโซน

จำนวนและขนาดช่องของหัวทรายที่พ่นก๊าซโอโซนมีผลต่อขนาดของฟองก๊าซ

### 2.6.3.6 วิธีการที่โอโซนสัมผัสกับสารละลาย

การเป่าพ่นก๊าซโอโซนและน้ำไปพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างก๊าซและของเหลวอย่างชัดเจน ปริมาณโอโซนละลายได้จึงมีค่าน้อย แต่การเป่าพ่นโอโซนลงไปในน้ำที่ตั้งอยู่ในคอลัมน์จะทำให้โอโซนผสมกับของเหลวได้ดีกว่า

## 2.6.4 การใช้ประโยชน์จากโอโซน

โอโซนเป็นสารออกซิไดส์อย่างแรง เนื่องจากมีค่าออกซิเดชันโพเทนเชียลสูงถึง 2.07 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังออกซิเดชันกับสารออกซิไดส์อื่นๆ ได้แก่ คลอรีน 1.36 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.77 โบรมีน 1.90 และไอโอดีน 0.54 ดังนั้นจึงทำให้โอโซนถูกนำไปใช้งานด้านการบำบัดอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สารต่างๆ อย่างแพร่หลายซึ่งพอที่จะนำมากล่าวได้ดังนี้

### 2.6.4.1 การใช้โอโซนบำบัดน้ำดื่ม น้ำในสระว่ายน้ำ บ่อน้ำแร่ และน้ำในกระบวนการผลิตในโรงงาน

อุตสาหกรรม ทำโดยการฉีดพ่นก๊าซโอโซนโดยตรงเพื่อแยกโลหะหนักและก๊าซพิษที่มีมาในน้ำดิบให้



สลายตัวก่อนเข้าระบบกรองน้ำ นอกจากนี้โอโซนที่ฉีดจะไปละลายกับน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายและเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ในน้ำดิบก่อนเข้าระบบเช่นกัน และยังใช้โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีนก่อนที่จะนำน้ำไปใช้งานอีกด้วย

2.6.4.2 การนำโอโซนมาบำบัดน้ำสำหรับการทำน้ำประปา จะใช้ก๊าซโอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำแทนคลอรีน แล้วจึงส่งเข้าสู่ในถังเก็บ (Storage tank)

2.6.4.3 การนำโอโซนมาใช้ในกิจการแพทย์ เพื่อทำลายจุลินทรีย์ในน้ำ และในอากาศชนิดต่างๆ เช่น แบคทีเรียและไวรัสที่เป็นสาเหตุของโรกระบบทางเดินอาหาร โรคหวัด เป็นต้น ทำการฉีดพ่นในห้องพยาบาลนาน 4 ชั่วโมง แทนการใช้ด่างทับทิมในสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งการใช้โอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคอย่างได้ผล หรือการใช้ ROC ความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มก./ลิตร เพื่อออกซิไดซ์เชื้อโรคต่างๆ ที่อยู่ในเลือด เช่น HIV Cytomegalo Virus และ *Staphylococcus*

2.6.4.4 การใช้โอโซนบำบัดน้ำในฟาร์มเลี้ยงปลาและกุ้งทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม โดยการใช้การผสมก๊าซโอโซนลงในน้ำ ก๊าซโอโซนจะไปทำลายก๊าซพิษที่อยู่ที่ก้นบ่อ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น และยังสามารถกำจัดเชื้อโรคต่างๆ ได้ด้วย ทั้งยังเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายให้กับแหล่งน้ำ แต่ต้องใช้กับสัตว์น้ำที่มีขนาดตั้งแต่ 1 เดือนขึ้นไป ถ้านำไปใช้กับสัตว์น้ำที่อายุน้อยกว่านี้ จะทำให้สัตว์เหล่านี้เป็นโรคขาดอาหาร ทำลายพวกสาหร่าย แพลงก์ตอน ซึ่งเป็นอาหารของสัตว์น้ำเล็กๆ (Strong et al.,1999) การติดตั้งเครื่องผลิตโอโซน เป็นที่นิยมมากในฟาร์มเพาะเลี้ยงหอยนางรมในประเทศฝรั่งเศสเพื่อกำจัดเชื้อ *Vibrio vulnificus* โดยในปี ค.ศ. 1972 มีความประสบความสำเร็จในการใช้โอโซนกำจัดเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหารของผู้บริโภค ส่งผลให้ฝรั่งเศสผลิตหอยนางรมได้ถึง 1,400 กิโลกรัม/วัน (Forchtman et al., 1977) ส่วนในประเทศเอกวาดอร์ การใช้โอโซนเป่าพ่นลงในน้ำที่มีเชื้อไวรัส Taura Syndrome Virus (TSV) ที่เป็นสาเหตุให้ผลผลิตกุ้งทั่วประเทศลดลง 80% ทำให้อัตราการรอดของกุ้งสูงขึ้นกว่า 60%

2.6.4.5 การใช้โอโซนกำจัดสาหร่ายใน Cooling Tower สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่เมื่อใช้งานไปนานๆ จะเกิดสาหร่ายบริเวณส่วนประกอบต่างๆ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนต่ำลง เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในการปรับอากาศ

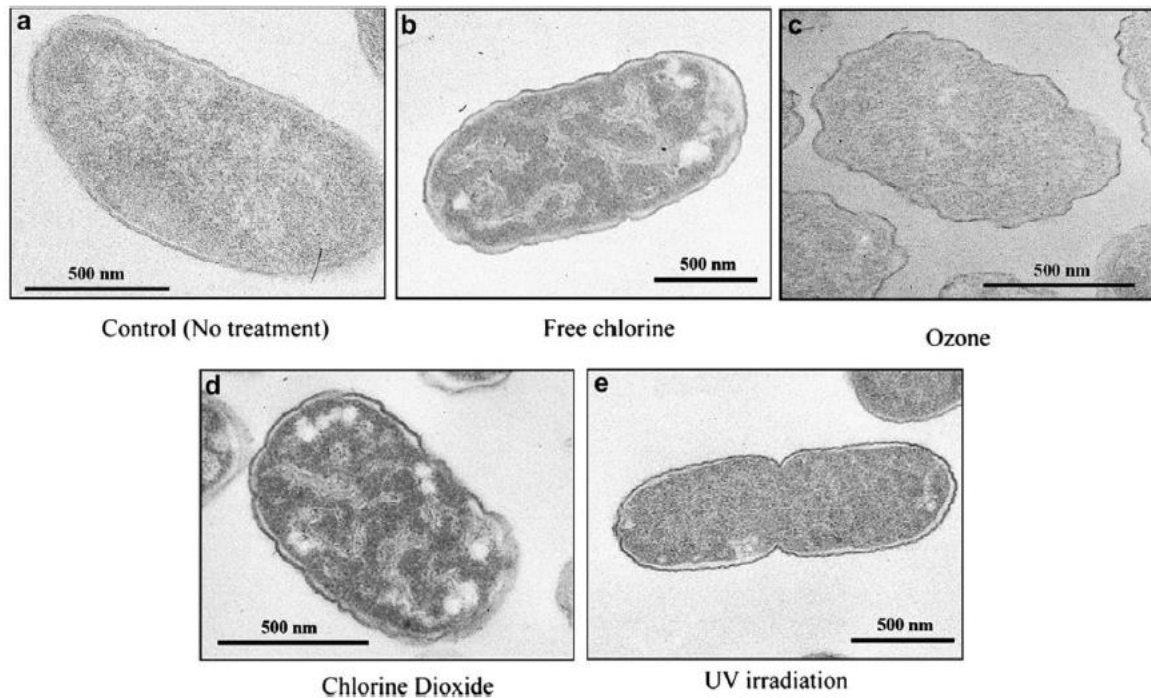
2.6.4.6 การใช้โอโซนกำจัดกลิ่น ก๊าซพิษและโลหะหนัก ที่ได้จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานผลิตสุรา โรงงานผลิตอาหารกระป๋อง และ โรงงานฟอกย้อม เป็นต้น มีวิธีการคือ ฉีดพ่นโอโซนลงไป

ในน้ำเสีย แล้วปล่อยให้ตกตะกอน หรือการขจัดสีในน้ำเสียที่มาจากสารอินทรีย์ที่สะสมในน้ำและสารแขวนลอย

## 2.6.5 กลไกในการยับยั้งจุลินทรีย์ของโอโซน

ในปี 1976 องค์กรปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency, U.S.EPA) พบว่า  $O_3$  สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Antimicrobial agent) และรับรองความปลอดภัยในการใช้  $O_3$  ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำได้ (U.S.EPA, 1999) เช่นเดียวกับองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (United states food and drug administration U.S.FDA) ยอมรับการใช้  $O_3$  ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และมีความปลอดภัยในการใช้กับอาหาร 2 อาหาร (Food additive agent) (U.S.FDA, 2001) ตลอดจนรายงานการศึกษาโดย U.S.EPA ในปี 2007 พบว่าน้ำโอโซน (Ozonated water) ที่ระดับความเข้มข้น 6-10 ppm มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus atrophaeus*, *Staphylococcus epidermidis* และเชื้อรา *Rhodotorula mucilaginosa*, *Penicillium brevicompactum* ทั้งชนิดที่สร้างสปอร์ได้และไม่สร้างสปอร์ได้ 99.99% ในเวลา 24 ชั่วโมง (U.S.EPA, 2007)

การศึกษาเปรียบเทียบผลของ  $O_3$  ต่อความอยู่รอดของแบคทีเรีย *Escherichia coli* โดยเปรียบเทียบกับสารเคมีที่มีสมบัติฆ่าเชื้อ (Disinfectant) ที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย พบว่าน้ำโอโซนทำลายเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ดีกว่าคลอรีน (Chlorine) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) ด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย มีฤทธิ์โดยซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่าน เสียสมดุลย์สารน้ำและส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียแตกในที่สุด (Osmotic bursting) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (Cho et al., 2010)



**รูปที่ 2.6** ภาพถ่าย Transmission electron microscope (TEM) แสดงระดับการเสียหายของเชื้อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย *E. coli* จากผลของ  $O_3$  (c) เปรียบเทียบกับสารเคมี chlorine (b), chlorine dioxide (d), UV irradiation (e), และกลุ่มควบคุม (a)

Murray และคณะ (2008) พบว่าน้ำโอโซนสามารถทำลายไวรัสได้หลายชนิด ทั้งชนิดที่มีถุงหุ้ม (Enveloped viruses) และชนิดที่ไม่มีถุงหุ้ม (Non-enveloped viruses) ได้แก่ herpes simplex virus type-1, vaccinia virus, adenovirus type-2, และ influenza A virus นอกจากนี้ Thabet และคณะ (2007) ยังพบว่า  $O_3$  สามารถทำลายไข่ของพยาธิ *Schistosomiasis mansoni* ในหนูได้

การใช้ประโยชน์ทางการแพทย์อื่นๆ นั้น Oizumi และคณะ (1998) ทำการศึกษาในหลอดทดลอง (In vitro) แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการใช้น้ำโอโซนทำความสะอาดฟัน Celiberti และคณะ (2006) พบว่าการใช้น้ำโอโซนทำความสะอาดฟันไม่ส่งผลใดๆ ต่อสารเคลือบฟัน (Enamel) ตลอดจนคุณภาพของชิ้นส่วน denture alloy ที่ใช้ในช่องปาก (Suzuki et al., 1999) การทดลองในห้องปฏิบัติการยังพบว่าน้ำโอโซนมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans*, methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), และ *Candida albicans* และกำจัด Biofilms ของเชื้อแบคทีเรีย *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium spp.*, *Pseudomonas*

*aeruginosa*, และ *Candida* spp. ได้ (Arita et al., 2005; Murakami et al., 2002; Estrela et al., 2006) โดยไม่ส่งผลต่อเซลล์ Epithelial ในช่องปากของมนุษย์ (Huth et al., 2006) Baysan และคณะ (2000) ใช้น้ำไอโซนในการหัตถกรรมทางทันตกรรมพบว่าสามารถยับยั้งการเจริญเพิ่มจำนวนของเชื้อแบคทีเรียบริเวณบาดแผล ทำให้เชื่อว่า ลดการติดเชื้อแบคทีเรียของเนื้อฟันภายหลังได้ (Rickard et al., 2004)

โดยกลไกการทำลายอาจเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ อย่างแรกคือ โมเลกุลของไอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารเคมีที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ (Hunt และ Marinas, 1997) และอีกลักษณะคือ อนุมูลตัวกลางอิสระ (free radical-mediated) เป็นตัวเข้าทำลาย จากงานวิจัยโดยทั่วๆ ไปพบว่า ไอโซนมีผลต่อเซลล์เมมเบรน ไซโทพลาสซึม โปรตีน และชั้นของไขมันในเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้โปรตีนในเซลล์เกิดการจับตัวเป็นก้อน เซลล์แตก บางครั้งพบว่าไอโซนจะเข้าทำลายระบบหายใจ (Respiratory system) ของเซลล์ ตลอดจนทำลายเอ็นไซม์ที่สำคัญในการดำรงชีพของเซลล์ และในบางกรณี ไอโซนจะทำลาย DNA และ RNA ของเซลล์จุลินทรีย์ด้วย ไอโซนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ (Restaino et al., 1995) รวมทั้งสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ด้วย ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของไอโซนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอโซน ระยะเวลาที่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียและสภาพ pH ที่เป็นกรดของอาหารเลี้ยงเชื้อจะช่วยให้ไอโซนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น (Kim et al., 1999a; Khadre et al., 2001)

## 2.6.6 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของไอโซน

ทั้งนี้ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ของไอโซนขึ้นอยู่กับ

### 2.6.6.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ลดลงมีผลทำให้ไอโซนละลายได้ดี ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจะสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ไอโซนจะสลายตัวได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

### 2.6.6.2 ความเป็นกรดต่าง

ไอโซนจะมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อ pH ลดลง ที่ pH เป็นค่าจะเกิดการสลายตัวของไอโซนได้ง่ายขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของไอโซนจะสูงขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรด

### 2.6.6.3 ความชื้นสัมพัทธ์

ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของไอโซนจะสูงขึ้นถ้าอาหารนั้นมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ดังนั้นอาหารที่มี

$A_w$  สูงจะมีความไวกับโอโซนมากกว่าอาหารที่มี  $A_w$  ต่ำ

#### 2.6.6.4 ความต้องการของโอโซนในอาหารเลี้ยงเชื้อ

ในสภาพที่อาหารเลี้ยงเชื้อมีอินทรีย์สารสูง ความต้องการ โอโซน (ozone demand) จะสูงตามไปด้วย ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนจะลดลง แต่ในสภาพที่ไม่มีความต้องการของโอโซน (ozone demand - free) โอโซนจะสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น

#### 2.6.6.5 ความสามารถของโอโซนในการเข้าถึงเชื้อจุลินทรีย์

ถ้าเชื้อจุลินทรีย์จับตัวเป็นกลุ่มก้อนประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อจะลดลง แต่ถ้าเชื้อจุลินทรีย์มีการกระจายตัวออกมา เช่น การทำ Ultrasonic treatment โอโซนจะฆ่าเชื้อเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น

### 2.6.7 วิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตโอโซน

เนื่องจาก  $O_3$  เสถียรจึงมีแนวโน้มที่จะสลายตัวกลับเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย มีครึ่งชีวิต (Half-life) 12 ชั่วโมง ในบรรยากาศ (Horvath et al., 1985) และเพียง 20-30 นาทีหากละลายอยู่ในน้ำ (Kim et al., 2003) หรือกล่าวได้ว่าการใช้  $O_3$  ไม่มีการตกค้างที่จะเป็นอันตรายใด ๆ เลย กระนั้นก็ตามพบว่าหากมนุษย์หายใจรับ  $O_3$  ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (>0.1 ppm) ทำให้ระบบทางเดินหายใจระคายเคือง, ปวดศีรษะ, คลื่นไส้, และอาเจียนได้ หรือหากได้รับที่ระดับความเข้มข้นสูง (> 6 ppm) จะเกิดภาวะปอดบวมน้ำ (Pulmonary edema) ได้ (Horvath et al., 1985) ส่งผลให้การสร้าง  $O_3$  และเก็บไว้จะไม่สามารถทำได้ จึงต้องสร้างขึ้น ณ แหล่งที่จะใช้งานเลย วิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตโอโซนในปัจจุบันมี 4 วิธี (Barlow, 1994)

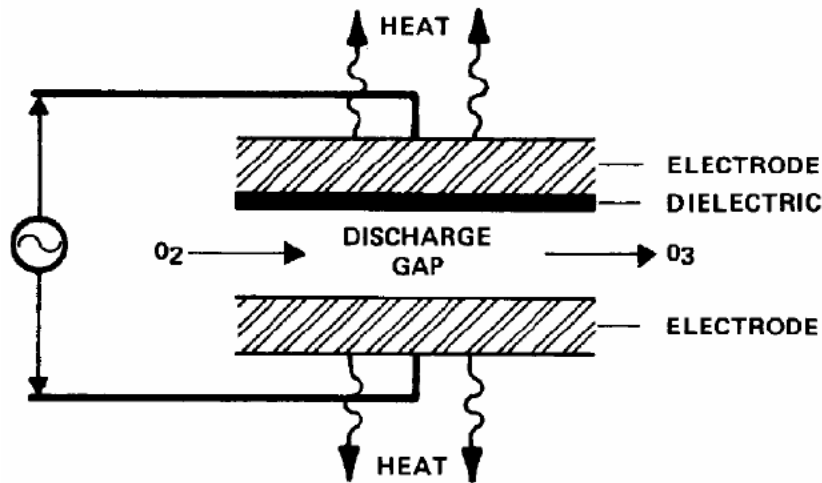
#### 2.6.7.1 Corona Discharge

เป็นวิธีจำลองการเกิด  $O_3$  ตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในธรรมชาติโดยใช้กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์สูงทำลายโมเลกุลของ  $O_2$  แล้วจึงลดพลังงานโมเลกุลลงเพื่อเอื้อให้เกิดการจับตัวกันของ โมเลกุลออกซิเจนอิสระได้เป็น  $O_3$  ในที่สุด วิธีนี้นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากต้นทุนต่ำและสร้าง  $O_3$  ได้มากพอในการใช้ประโยชน์เชิงการค้า

#### 2.6.7.2 UV radiation

เป็นวิธีจำลองการเกิด  $O_3$  ในธรรมชาติกล่าวคือใช้รังสี UV ความยาวคลื่นสั้น โดยเฉพาะที่ 254 nm ซึ่งจะมีพลังงานมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของ  $O_2$  ไม่เสถียรได้เป็นโมเลกุลออกซิเจนอิสระแล้วจึงสร้าง  $O_3$  ได้ใหม่

วิธีนี้มีต้นทุนสูงและผลิต  $O_3$  ได้น้อยกว่า



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้าง  $O_3$  ด้วยวิธี Corona Discharge

### 2.6.7.3. Electrolysis

วิธีนี้ทำโดยให้กระแสไฟฟ้าวิ่งในตัวนำไฟฟ้าที่มีสถานะเป็นของเหลว (Electrolyte) เช่น น้ำ หรือ  $H_2SO_4$  วิธีนี้ประสิทธิภาพในการผลิต  $O_3$  ไม่ดียังต้องการการพัฒนาต่อไป

### 2.6.7.4. Radiochemical

ใช้สารกัมมันตรังสี (Radioactive) เป็นแหล่งพลังงานเพื่อแยกโมเลกุล  $O_2$  เป็นวิธีที่ผลิต  $O_3$  ได้ปริมาณมาก ต้นทุนต่ำแต่ต้องมีการควบคุมความปลอดภัยที่ดีพอ

## 2.7 ข้อดีของการทำงานร่วมกันระหว่างยูวีและโอโซน

ในการทำงานร่วมกันระหว่างยูวีและโอโซนส่งผลให้เสริมประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ดังต่อไปนี้

2.7.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนการ  $O_3$  / UV ร่วมกันมักจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการกำจัดสารเติมแต่งของโอโซนและรังสียูวีเดี่ยว (Prado and Esplugas, 1999) ขนาดของผล synergistic นี้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อนที่น่าสนใจ (Prado และ Esplugas, 1999)

2.7.2 กระบวนการ  $O_3$  / UV รวมกันมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลมากกว่ากระบวนการ  $H_2O_2$  / UV ที่รวมกันเพื่อให้ความเข้มข้นของออกซิเจนเท่ากัน เนื่องจากสัมประสิทธิ์การ

ลิครอนของโมเลกุลของ  $O_3$  ที่ 254 นาโนเมตร มีค่ามากกว่าสองเท่าของ  $H_2O_2$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องมีความเข้มของรังสียูวีต่ำกว่าหรือปริมาณ  $H_2O_2$  ที่สูงกว่าเพื่อสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลเดียวกันสำหรับกระบวนการทั้งสองนี้ (Glaze et al., 1987)

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำมาสะอาดน้ำเชื้อโอบัสสภาวะ

*Escherichia coli* DMST 4609 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (กรุงเทพฯ, ประเทศไทย) และ โคลิฟอร์มถูกแยกจากสภาพแวดล้อม

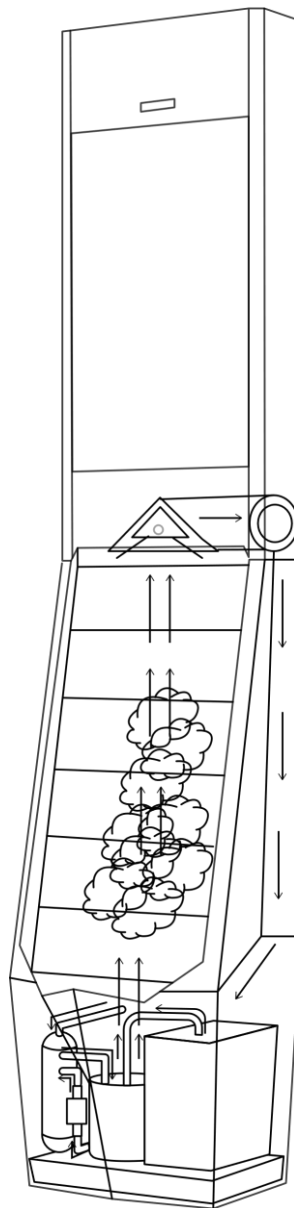
*Aspergillus niger* ATCC 44310 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (กรุงเทพฯ, ประเทศไทย)

### 3.2 Equipment and instruments

1. Hot air incubator (ตู้อบเชื้อแบบอบร้อน), Memmert Model ULM500, Japan
2. Laminar flow cabinet (ตู้ปลอดเชื้อ), DWYER Series 0325, USA
3. 6-microwell plate (ไมโครเวลเพลท 6 ช่อง), Costar, USA
4. Autoclave, BECTHAI and HIRAYAMA Model HA300D, Japan
5. Auto pipette volume 10 microliter, Autopipette, USA
6. Auto pipette volume 200 microliter, Autopipette, USA
7. Auto pipette volume 1000 microliter, Autopipette, USA
8. Balance accuracy 0.0001 grams (เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง), Metter Toledo Model AG204, Switzerland
9. Balance accuracy 0.01 grams (เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง), Metter Toledo Model GG4002-4, Switzerland
10. Digital camera, Olympus SP 570 UZ, Indonesia
11. Plastic petri dishes (จานเพาะเชื้อพลาสติกคุณภาพสูง)
12. AOPs equipment (อุปกรณ์ AOPs) (Figure 3.1)
  - Oxygen tank (ถังออกซิเจน)
  - Ozone generator (เครื่องผลิตโอโซน)
  - Ozone tube (ท่อโอโซน)
  - UV-C 4 lamps (หลอดไฟยูวี-ซี 4 หลอด)



- A model chamber with dimension of 34x34x34 cm<sup>3</sup> (ห้องจำลอง, พื้นที่ทดสอบขนาด 34x34x34 cm<sup>3</sup>)
- Ultrasonic transducers (เครื่องสร้างอัลตราโซนิก)
- Flow meter (อุปกรณ์วัดอัตราการไหล)
- Venturi mixer (เวนจูรี อุปกรณ์วัดอัตราการไหล)
- Water pump (ปั๊มน้ำ)
- Valve (วาล์ว)



รูปที่ 3.1 ลักษณะภายในโถบัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะที่ติดระบบ OH• aerosolization

### 3.3 Media and chemical reagents (อาหารเลี้ยงเชื้อและสารเคมี)

1. Non-selective media (อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Non-selective)
  - 1.1 Trypticase Soy Broth (TSB), HIMEDIA (Ref M500-011G), USA
  - 1.2 Plate Count Agar (PCA), Difco, USA
2. Selective media (อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด selective)
  - 2.1 Potato Dextrose Broth (PDB), HIMEDIA (Ref M500-403G), India
  - 2.2 Potato Dextrose Agar (PDA), HIMEDIA (Ref M500-096G), India
  - 2.3 Chromocult coliform agar (CCA)
3. Hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Merk, Germany

### 3.4 การเตรียมจุลินทรีย์

#### 3.4.1 *Escherichia coli*

สต็อกเชื้อนี้ถูกเก็บไว้ใน Tryptic Soy Broth (TSB, Lab M, UK) ที่มีกลีเซอรอล 20% และเก็บที่อุณหภูมิ -18 °C ก่อนที่จะใช้งาน ทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียใน TSB ในระยะเวลา 18-24 ชั่วโมงที่ 37 °C (Keskinen, et al., 2009)

#### 3.4.2 *Aspergillus niger*

สต็อกเชื้อราถูกนำมาเพาะเลี้ยงใน Potato Dextrose Broth (PDB, Lab M, UK) ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลาห้าวัน

### 3.5 การเตรียมอาหารแข็ง

#### 3.5.1 Tryptic Soy Broth (อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีตัวเหลือง-เคซีน)

เตรียมสารละลาย TSB ตามคำอธิบายในขั้นตอนการเตรียมของผู้ผลิต TSB 3 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ผ่าเชื้อสารละลาย TSB ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีในหม้อนึ่งความดัน (autoclave)

#### 3.5.2 Plate count agar (PCA)

เตรียมสารละลาย PCA ตามคำอธิบายในขั้นตอนการเตรียมของผู้ผลิต ผสม PCA 4.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร นำเชื้อสารละลาย PDA ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีในหม้อนึ่งความดัน

### 3.5.3 Potato dextrose agar/broth (PDA/PDB)

#### - อาหารแข็ง

เตรียมสารละลาย PDA ตามคำอธิบายในขั้นตอนการเตรียมของผู้ผลิต ผสม PDA 7.8 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร นำเชื้อสารละลาย PDA ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีในหม้อนึ่งความดัน

#### - อาหารเหลว

เตรียมสารละลาย PDB ตามคำอธิบายในขั้นตอนการเตรียมของผู้ผลิต ผสม PDB 4.8 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร นำเชื้อสารละลาย PDA ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีในหม้อนึ่งความดัน

### 3.5.4 Chromocult coliform agar (CCA)

เตรียมสารละลาย CCA ตามคำอธิบายในขั้นตอนการเตรียมของผู้ผลิต ผสม CCA 2.65 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ต้มสารละลาย CCA และกวนส่วนผสมที่อุ่นไว้ประมาณ 35 นาที ให้เป็นเนื้อเดียวกัน

## 3.6 การเตรียมสารเคมี

เตรียมสารละลายยาด้านจุลชีพจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50% (Merck) เตรียมสารละลายบัพเฟอร์จาก citric acid monohydrate 0.1 M (J.T. Baker, Phillipsburg, NJ).

## 3.7 สถานะการเจริญเติบโตและจำนวนที่คาดหวัง

การทดสอบแต่ละสายพันธุ์โดยใส่ลงบนผิวของอาหารแข็งในงานเพาะเชื้อขนาดเล็ก ใช้ Potato dextrose agar (PDA, Lab M, UK) และ Plate Count Agar (PCA, Difco, USA) เพาะเลี้ยงเชื้อ *E. coli* / coliform และ โคไลน *A. niger* ตามลำดับ อินน็อกูลูเลทตัวอย่างจุลินทรีย์ปริมาณ 30 ไมโครลิตร เกลี่ยเชื้อประมาณ  $10^4$  CFU/cm<sup>2</sup>

ให้ทั่วผิวหน้าอาหารแข็งด้วยกลาสบีท (glass beads) แล้วติดจานเพาะเชื้อภายในโถปัสสาวะ วิเคราะห์จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตหลังจากการรวมควัน โดยป่มจานเพาะเชื้อแบคทีเรียด้านบนและด้านข้างข้ามคืนที่ 37 องศาเซลเซียสและ 5-7 วัน ที่ 30 องศาเซลเซียสสำหรับเชื้อรา (Du et al., 2003)

### 3.8 Aerosolization ของอนุมลิตระไฮดรอกซิล

ควัน OH• เกิดขึ้นจากการผสมโอโซนและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) โดยใช้ venture mixer (Rano tech, Thailand) โอโซนผลิตโดยการป้อนก๊าซออกซิเจน (ปรับจาก 0 ถึง 2 ลิตร/นาที่) ผ่านหลอดโอโซน (7 g/l air-cooled ceramic ozone tube, Arinnovation, ประเทศไทย) การไหลเวียนของอนุมลิตระไฮดรอกซิลและ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> นั้นถูกโฟโตคาตาไลซ์โดยหลอด UV 4 หลอด 15 วัตต์ต่อยูนิตที่อยู่หลังจากปั๊มหมุนเวียนเพื่อกระตุ้นอนุมลิตระในระบบให้มากขึ้น ปริมาตรการทำงานโดยรวมของระบบนี้คือ 10 liter ซึ่งมี piezoelectric transducers สามตัว (อัตราการระเหย 133 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) ติดตั้งไว้ภายในเพื่อเร่งการสร้างควัน OH• ใช้พัลลวม 5W เป็นแรงพาคควันที่สร้างขึ้นผ่านให้เข้าทางท่อด้านล่างห้องทดสอบ การกระจายควันภายในห้องนั้นถูกตรวจสอบโดยการเปลี่ยนแปลง % RH โดยใช้ตัวบันทึกข้อมูลสองตัว (ตัวบันทึกข้อมูลด้านบนและด้านล่าง) ควันส่วนเกินจะผ่านออกทางช่องเปิด

### 3.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

CFU ทั้งหมดที่นับได้ต่อมิลลิลิตรถูกแปลงเป็น log<sub>10</sub> ก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติ สำหรับวิธีการรวบรวมแต่ละเพลทข้อมูลทั้งหมดถูกวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญที่  $p < 0.05$  ด้วย Full Factorial Design

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

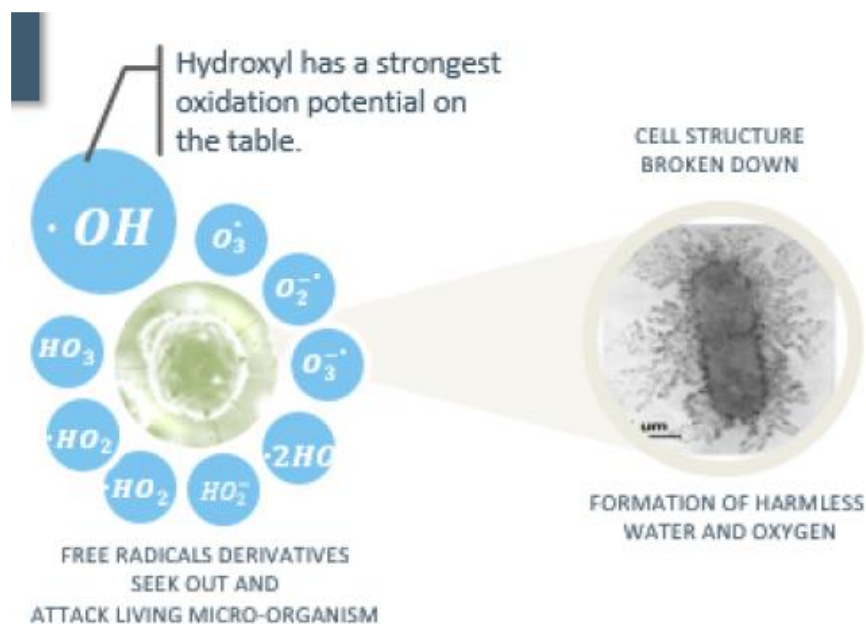
4.1 ตำรวจเอกสาร ค้นคว้าหาองค์ความรู้เทคโนโลยีทั่วไปที่ใช้ในการชำระล้างคราบ และลดการใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงจากการฟลัชปัสสาวะทิ้ง ลดการหมักหมมของกลิ่นปัสสาวะ รวมถึงฆ่าเชื้อโรคที่อาจจะเกิดจากฉี่ในห้องน้ำสาธารณะที่เกิดจากการติดเชื้อจากผู้ใช้หลายๆคน เพื่อลดโอกาสในการติดเชื้อหรือติดโรคติดต่อทางปัสสาวะและลดการใช้ น้ำ

สืบเนื่องจากปัญหาว่าห้องน้ำชายเกือบทุกแห่งส่งกลิ่นเหม็นจากการที่มีปัสสาวะแล้วไม่ยอมชำระล้างปัสสาวะหลังการใช้ และมีคราบสกปรกเนื่องจากบางครั้งผู้มาใช้บริการไม่กดน้ำ จึงยังคงส่งกลิ่นเหม็น มีความสกปรก และทำให้เกิดการปนเปื้อนของเชื้อโรคได้ง่ายกับผู้ที่มาใช้บริการต่อ รวมถึงการฟลัชน้ำในการทำความสะอาดเป็นการใช้ทรัพยากรน้ำที่ค่อนข้างเปลือง โดยในแต่ละครั้งหลังจากทำธุระ ใช้ น้ำไม่น้อยกว่า 1 ลิตรในการทำความสะอาดโถปัสสาวะ ซึ่งบางครั้งการฟลัชก็ไม่สามารถที่จะชำระล้างคราบเปรอะเปื้อนของปัสสาวะที่กระเด็นขณะทำธุระได้หมด หากคราบปัสสาวะไม่ได้รับการทำความสะอาดและถูกหมักหมมเป็นเวลานาน ทำให้เกิดคราบฝังลึกและมีอัตราการโตของเชื้อโรคเพิ่มสูงขึ้น จนกลายเป็นเชื้อโรคคือยา ที่ทนต่อการฆ่าหรือการทำความสะอาดจากยาหรือสารฆ่าเชื้อ และหากคิดไปกับผู้ที่มาใช้บริการ เชื้อโรคเหล่านี้ก็จะสามารถแพร่กระจายไปสู่คนทั่วไปได้โดยการสัมผัสผ่านมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงต้องการเทคโนโลยีการพัฒนาโถปัสสาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับชำระล้างคราบ และลดการใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงจากการฟลัชปัสสาวะทิ้ง ลดการหมักหมมของกลิ่นปัสสาวะ รวมถึงฆ่าเชื้อโรคที่อาจจะเกิดจากฉี่ในห้องน้ำสาธารณะที่เกิดจากการติดเชื้อจากผู้ใช้หลายๆคน เพื่อลดโอกาสในการติดเชื้อหรือติดโรคติดต่อทางปัสสาวะและลดการใช้ น้ำ ทั้งนี้จากการรวบรวมข้อมูลและสืบค้นเทคโนโลยีโถปัสสาวะชายที่พบส่วนใหญ่ตามสื่ออินเตอร์เน็ต บทความวิชาการต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่แล้วเป็นการพัฒนาโถปัสสาวะชายในรูปแบบเพื่อการประหยัดน้ำและการรีไซเคิลน้ำปัสสาวะสำหรับผลิตปุ๋ย ยังไม่ปรากฏนวัตกรรมเทคโนโลยีโถปัสสาวะที่มีระบบการฆ่าเชื้อโรค เพื่อป้องกันการกระจายเชื้อโรคแพร่ออกไปสู่ภายนอก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนาโพลีเอสสาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับ ชำระล้างคราบและลดการใช้ปริมาณ น้ำที่ค่อนข้างสูงจากการฟลัชปัสสาวะทิ้ง ประหยัดน้ำ ลดการหมักหมมของกลิ่นปัสสาวะ รวมถึงฆ่าเชื้อโรคที่ อาจเกิดจากฉีในห้องน้ำสาธารณะที่เกิดจากการติดเชื้อจากผู้ใช้งานหลาย ๆ คน โดยเป็นโพลีเอสสาวะที่มีการ ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation technology) ในการสร้างละอองลอยอนุพันธ์ ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมากในการฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น โดยใช้สารละลายที่มี สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (<1.5%) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตตามบัญชียาหลัก แห่งชาติ และในปริมาณที่น้อยกว่า 1.5% ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากเกินไป ในการทำให้อุปกรณ์ โโลหะต่างๆ ถูกกัดกร่อนหรือถูกทำลายและนำน้ำปัสสาวะที่ได้ไปผลิตปุ๋ย

#### 4.2 ตำรวจและทบทวนองค์ความรู้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในปัสสาวะ และการผลิตปุ๋ย

จากที่มาของปัญหา คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนานวัตกรรมโพลีเอสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาระในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation technology) ในการสร้างละอองลอยอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมากเพื่อฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น

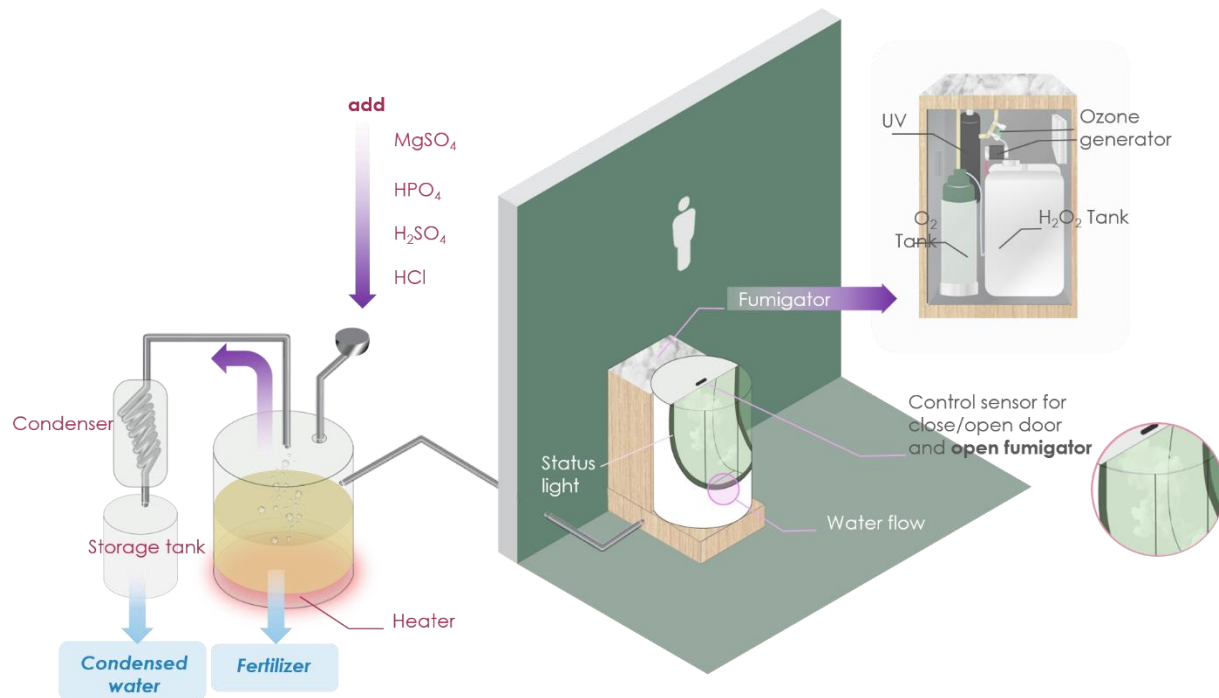


#### รูปที่ 4.1 กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระ

โดยนวัตกรรมโถปัสสาวะปลอดเชื้อที่ทางคณะได้จัดทำนี้ มีกลไกการเกิดละอองลอยจากปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกกับโอโซนภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลตจนเกิดเป็นอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่มีคาร์บอกซ์โฟเทนเชียลสูง และอยู่ในรูปแบบของละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (1 nm - 100  $\mu$ m) แขนงลอยอยู่ในอากาศได้นานและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูง (1-3 MHz) เพื่อให้อนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะไปออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (รูปที่ 4.1) รวมไปถึงสารที่มีความเป็นพิษย่อยสลายได้ยาก เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds) หรือสารอินทรีย์ไม่พึงประสงค์อื่นๆ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนเปลี่ยนรูปเป็นออกซิเจนและน้ำในที่สุด ด้วยวิธีการนี้สามารถกำจัดเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ตามซอกหลืบหรือมุมอับต่างๆ ของโถปัสสาวะชาย หลังจากทำธุระเสร็จได้ทันที โดยปล่อยสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแทนการฟลัชน้ำ ซึ่งเป็นการทำความสะอาดรูปแบบใหม่ เพื่อทดแทนการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัด สามารถทำลายและฆ่าเชื้อโรค นอกจากนี้ระบบยังได้พัฒนาในส่วนของการแยกน้ำปัสสาวะออกไปผลิตเป็นปุ๋ย โดยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมเช่น แมกนีเซียม ฟอสเฟต กรดซัลฟิวริก กรดเกลือจากนั้นทำการระเหยน้ำปัสสาวะเพื่อให้ได้ตะกอนของแข็งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา ไออน์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนน้ำปัสสาวะจะกลั่นตัวได้เป็น condensed water ซึ่งจะถูกนำไปหมุนเวียนกลับมาใช้ ส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปเป็นปุ๋ยเพื่อประโยชน์ทางการเกษตรต่อไป เพราะคุณสมบัติพิเศษของปุ๋ยจากน้ำปัสสาวะนี้คือ มีอัตราการละลายน้ำได้ช้ากว่าปุ๋ยทั่วไป ลดการสูญเสียของปุ๋ยจากการชะของน้ำได้ ทำให้ไม่ต้องใช้ปุ๋ยมาก ที่สำคัญ ยังมั่นใจได้ว่าเป็นปุ๋ยที่ปราศจากจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

#### 4.3 ออกแบบนวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะ และเกิดภาระในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับ โรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

ในงานวิจัยได้ทำการออกแบบต้นแบบนวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรคพร้อมผลิตปุ๋ยตามแนวคิดดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 นวัตกรรม โภปัสสาวะชายปลอดเชื้อ โรคพร้อมระบบผลิตปุ๋ย

โภปัสสาวะชายปลอดเชื้อพร้อมระบบผลิตปุ๋ย เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เน้นการจัดการน้ำ การฆ่าเชื้อโรค และการจัดการน้ำปัสสาวะให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ระบบการฆ่าเชื้อโถน้ำ ลดกลิ่นด้วยละอองลอยไฮดรอกซิลเรดิคอลล และการนำน้ำปัสสาวะมาผลิตปุ๋ย โดยในส่วนของระบบการฆ่าเชื้อโถน้ำ ลดกลิ่น เน้นการดำเนินการด้วยระบบอัตโนมัติ โดยมีปุ่มเปิด/ปิดละอองลอยไฮดรอกซิลเรดิคอลลอย่างอัตโนมัติหลังจากการใช้งาน โถน้ำเพื่อทำความสะอาด ลดกลิ่นและฆ่าเชื้อโรคที่อาจติดโถน้ำ สำหรับระบบการผลิตละอองลอยไฮดรอกซิลเรดิคอลลประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ เช่น ถังบรรจุไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถังออกซิเจน หลอด UV-C เครื่องกำเนิดไอโซนซึ่งได้มีการกล่าวถึงในการสร้างละอองลอยอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) เพื่อฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น

จากนั้นน้ำปัสสาวะจะถูกส่งไปยังถังเก็บ ในถังดังกล่าวจะมี level sensor แจ้งในกรณีได้ถึงระดับที่ได้ตั้งไว้เพื่อจะเตรียมการผลิตเป็นปุ๋ย โดยเมื่อน้ำปัสสาวะจำนวนหนึ่งระบบจะทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง แอมโมเนีย และวิเคราะห์หาสัดส่วนของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนีย และฟอสเฟต ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตปุ๋ยจากน้ำปัสสาวะ เมื่อทราบสัดส่วนที่แน่ชัดจึงเติมสารเคมี เช่น แมกนีเซียม ฟอสเฟต กรดซัลฟูริก กรด



เกลือจากนั้นทำการระเหยน้ำปัสสาวะด้วย heater ให้ความร้อน ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกกลั่นตัวในชุดกลั่นได้เป็นน้ำ condensed water หมุนเวียนกลับไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นเช่น เป็นส่วนประกอบน้ำในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากที่ระเหยน้ำปัสสาวะจะได้เป็นปุ๋ยเพื่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรต่อไป โดยปกติเอ็นไซม์ยูเรียเอสในน้ำปัสสาวะจะแปรสภาพยูเรียในน้ำปัสสาวะให้เป็นแอมโมเนียไอออนทันทีที่น้ำปัสสาวะมีค่าพีเอชเท่ากับ 9 ระบบก็จะส่งสัญญาณแจ้งว่า น้ำปัสสาวะที่พักไว้ มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปผลิตปุ๋ย เพียงเติมสารประกอบแมกนีเซียม และฟอสเฟตลงในน้ำปัสสาวะที่เก็บไว้ ก็จะเกิดเป็นผลึกสูตรไวท์ ซึ่งผลึกดังกล่าวสามารถนำไปใช้แทนปุ๋ยยูเรียได้

#### 4.4 การพัฒนาโครงสร้างโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะ และเกิดภาวะในบ่อบำบัดน้ำเสีย

ในงานวิจัยของโครงการผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับโครงสร้างของนวัตกรรมโถปัสสาวะให้มีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานทั้งผู้ใหญ่และเด็ก โดยโถปัสสาวะดำเนินพัฒนามีประสิทธิภาพสูงสำหรับ ชำระล้างคราบ และลดการใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงจากการฟลัชปัสสาวะทิ้ง ให้น้ำไหลออกมาชำระล้างโถปัสสาวะในปริมาณที่เหมาะสม ประหยัดน้ำ ลดการหมักหมมของกลิ่นปัสสาวะ รวมถึงฆ่าเชื้อโรคที่อาจจะเกิดจากฉี่ในห้องน้ำสาธารณะที่เกิดจากการติดเชื้อจากผู้ใช้งานหลายๆคน เพื่อลดโอกาสในการติดเชื้อหรือติดโรคติดต่อทางปัสสาวะและลดการใช้น้ำ



**รูปที่ 4.3** นวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบ  
ปัสสาวะ

โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation technology) ในการสร้างอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมาก โดยใช้สารละลายที่มีสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ <math>< 1.5\%</math> ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตตามบัญชียาหลักแห่งชาติ และในปริมาณที่ <math>< 1.5\%</math> ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากเกินไป ในการทำให้อุปกรณ์โลหะต่างๆ ถูกกัดกร่อนหรือถูกทำลาย โดยนวัตกรรมโถปัสสาวะที่ได้จัดทำนี้ มีกลไกทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกกับไอออนภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ตไว้ด้านหลังโถปัสสาวะ จนเกิดเป็นอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง และทำให้อยู่ในรูปแบบของละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (1 nm - 100  $\mu$ m) แฉวยลอยอยู่ในอากาศได้นานและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูง (1-3 MHz) เพื่อทำให้อนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะไปออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ รวมไปถึงสารที่มีความเป็นพิษย่อยสลายได้ยาก เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds) หรือสารอินทรีย์ไม่พึงประสงค์อื่นๆ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนเปลี่ยนรูปเป็นออกซิเจนและน้ำในที่สุด ด้วยวิธีการนี้สามารถกำจัดเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ตามซอกหลืบหรือมุมอับต่างๆ ของโถปัสสาวะชาย หลังจากทำธุระเสร็จได้ทันที โดยปล่อยสารอนุมูลอิสระไฮ

ครอกซิลแทนการฟลัชน้ำ ซึ่งเป็นการทำความสะอาดรูปแบบใหม่ ยังเป็นการทำความสะอาดโถปัสสาวะสามารถทำลายและฆ่าเชื้อโรค รวมถึงเป็นการทำความสะอาดโดยใช้ละอองลอยของอนุภาคนิวตรอนเพื่อทดแทนการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้สถานพยาบาล สถานพักฟื้นผู้สูงอายุ ห้องน้ำสาธารณะ หรือสถานที่ที่มีข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรน้ำ เป็นการฆ่าเชื้อโรคในห้องน้ำสาธารณะที่สามารถทดแทนวิธีฆ่าเชื้อในปัจจุบัน ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการฆ่าเชื้อและการทำความสะอาดที่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้หมด สามารถใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันทดแทนการฟลัชน้ำได้ ทำให้ลดการใช้ทรัพยากรน้ำลงไปได้มาก

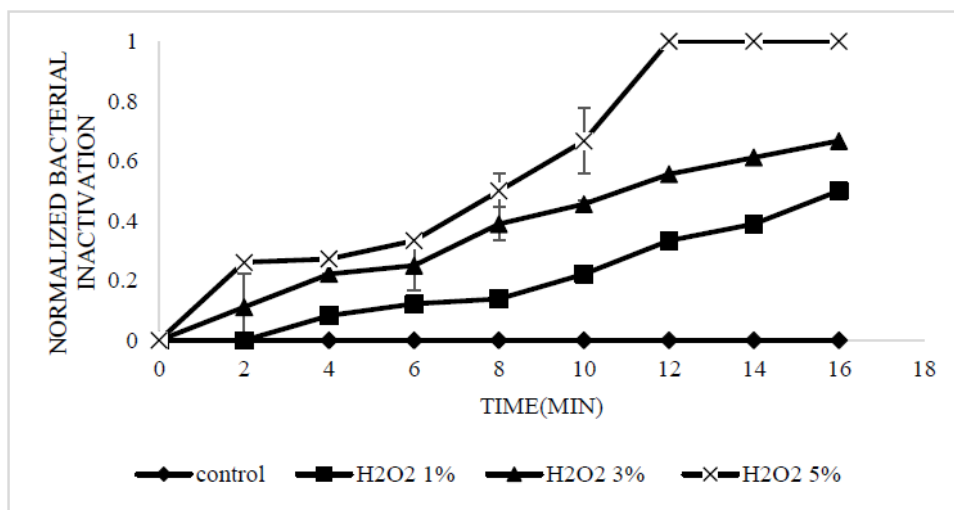
#### 4.5 ศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในการทำลายเชื้อที่โถปัสสาวะด้วยละอองลอยอนุภาคนิวตรอนครอกซิล

ในการทดสอบประสิทธิภาพความสามารถในการทำลายเชื้อที่โถปัสสาวะด้วยละอองลอยอนุภาคนิวตรอนครอกซิล จะทำการทดสอบโดย spiked เชื้อเป้าหมาย *E. coli* และ *S. aureus* บนอาหารแข็ง จากนั้นนำอาหารแข็งที่มีปริมาณเชื้อระดับต่างๆ กันไปแปะตามจุดต่างๆ ในโถปัสสาวะ แล้วเปิดระบบผลิตละอองลอยอนุภาคนิวตรอนครอกซิลเรดิคอลเพื่อฆ่าเชื้อที่เวลาต่างๆ ตามแผนการทดลองที่วางไว้ โดยมีอาหารแข็งที่มีการ spiked เชื้อที่ไม่ได้มีการฆ่าเชื้อด้วยละอองลอยอนุภาคนิวตรอนครอกซิลเรดิคอลเป็นตัวอย่างควบคุม สำหรับรายละเอียดผลการฆ่าเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* แสดงดังต่อไปนี้

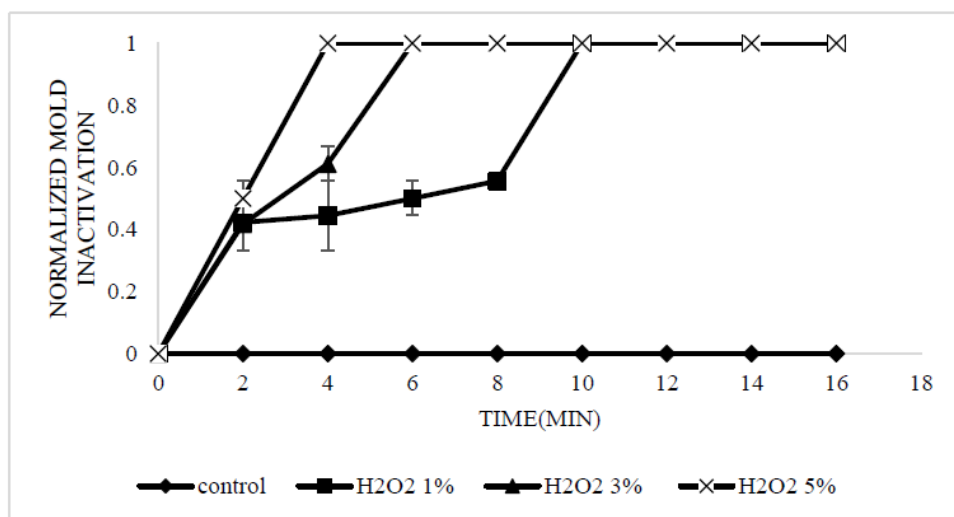
##### 4.5.1 ผลของการรมควันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อของ  $H_2O_2$  เหลวได้รับการบันทึกไว้อย่างดีเพื่อเพิ่มความเข้มข้นที่สูงขึ้น การประยุกต์ใช้การรมควันด้วย  $H_2O_2$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการรมควันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VHP) ที่กลายเป็นไอโดยใช้ความเข้มข้น  $H_2O_2$  สูง (มากกว่า 35%) โดยแสดงถึงประสิทธิภาพของการปนเปื้อนจุลินทรีย์บนพื้นผิว (Kimura, 2012) ในงานวิจัยนี้แนวคิดการเลือกการรมควัน  $H_2O_2$  (เช่น การรมควันแบบอัลตราโซนิกโดยใช้ความเข้มข้นต่ำของ  $H_2O_2$ ) ได้แสดงให้เห็นถึงการยับยั้งการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนพื้นผิวโดยใช้จุลินทรีย์ทั้งสองแบบ ได้แก่ แบคทีเรีย (*E. coli* และ coliform bacteria) และ รา (*A. niger*) หยด  $H_2O_2$  ขนาดไมครอนโดย ultrasonic transducers ด้วยกลไกทางอากาศและการกระจายตัวในห้องทดสอบ (ปล่อย  $H_2O_2$  เป็นละอองขนาดไมครอน) เชื้อแบคทีเรียและเชื้อราถูกฉีดลงบนพื้นผิวด้านบนของห้องที่ 4 log CFU /

cm<sup>2</sup> และรูปที่ 4.4 (a และ b) แสดงระดับการยับยั้งตัวอย่างแบคทีเรียและเชื้อราที่ต่างกันโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรมควัน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> โดยใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของควัน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (กล่าวคือ 1, 3, และ 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) แม้ว่าการใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นสูงผ่านกระบวนการ VHP นั้นแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพต่อการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในวงกว้าง (เช่น แบคทีเรีย, ยีสต์, เชื้อรา, ไวรัส, สปอร์ของแบคทีเรีย ฯลฯ) (Heckert, et al., 1997; Kahnert et al., 2005), ประสิทธิภาพของสารต้านจุลชีพในช่วง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vapor phase ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า ประสิทธิภาพการฆ่าจุลินทรีย์ที่เลือกใช้ยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ความถี่เสียงในการสร้างละอองขนาดเล็ก (Unger-Bimczok, et al., 2008; KaČer, et al., 2012)



a)



b)

**รูปที่ 4.4** การยับยั้ง a) *E. coli* / coliform และ b) *A. niger* (การปนเปื้อนเริ่มต้นที่ 4 log CFU / cm<sup>2</sup>) บนพื้นผิวที่จำลองการเพาะเชื้อไว้ภายในห้องทดสอบ (34x34x34 cm<sup>3</sup>) หลังจากการทดลองโดยใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์)

คลื่นเสียงอัลตราโซนิคสามารถทำให้สารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพมากขึ้นและทำให้เกิดเป็นละอองของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ได้สำเร็จ ทำให้จุลินทรีย์ลดลงอย่างมากภายใน 15 นาที เห็นได้ชัดว่าความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่สูงขึ้นส่งผลให้การยับยั้งจุลินทรีย์นั้นเร็วขึ้นและมากขึ้น (Raffellini, et al., 2008) การเพิ่มความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพจะทำให้ประสิทธิภาพของการยับยั้งจุลินทรีย์ดีขึ้น ที่การปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* / coliform ที่ 4 log CFU / cm<sup>2</sup> ละออง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 5% สามารถฆ่าเชื้อโรคบนพื้นผิวที่กำหนดทั้งหมดได้ภายใน 12 นาที ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำกว่า (กล่าวคือ 3% และ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ยังไม่สามารถฆ่าเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 4.4 a) จากผลการรอดชีวิตของ *A. niger* การรวมกัน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> นี้มีประสิทธิภาพมากกว่าในการยับยั้งเชื้อรามากกว่าแบคทีเรียสำหรับเชื้อราละออง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ต่ำที่สุดที่ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถกำจัดการปนเปื้อน *A. niger* ได้ภายใน 10 นาที ซึ่งละออง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นเดียวกันสามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* / coliform ได้เพียง 20-25% ในระดับปกติ ความเข้มข้นของละออง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่สูงขึ้น (กล่าวคือ 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ทำให้เวลาในการยับยั้งสั้นลงเป็น 4 นาที ดูเหมือนว่าเรามีความไวต่อการรวมกัน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ตั้งแต่ความเข้มข้นต่ำมากกว่าแบคทีเรีย มีการรายงานผลลัพธ์ที่คล้ายกันในระบบ VHP เชิงพาณิชย์ว่าเทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการออกซิเดชันของเชื้อราและสปอร์ของพืชอย่างรวดเร็ว แม้ว่าสปอร์ของแบคทีเรียจะมีความต้านทานสูงกว่าสปอร์ของเชื้อรา (Technical Data Monograph, 2003)

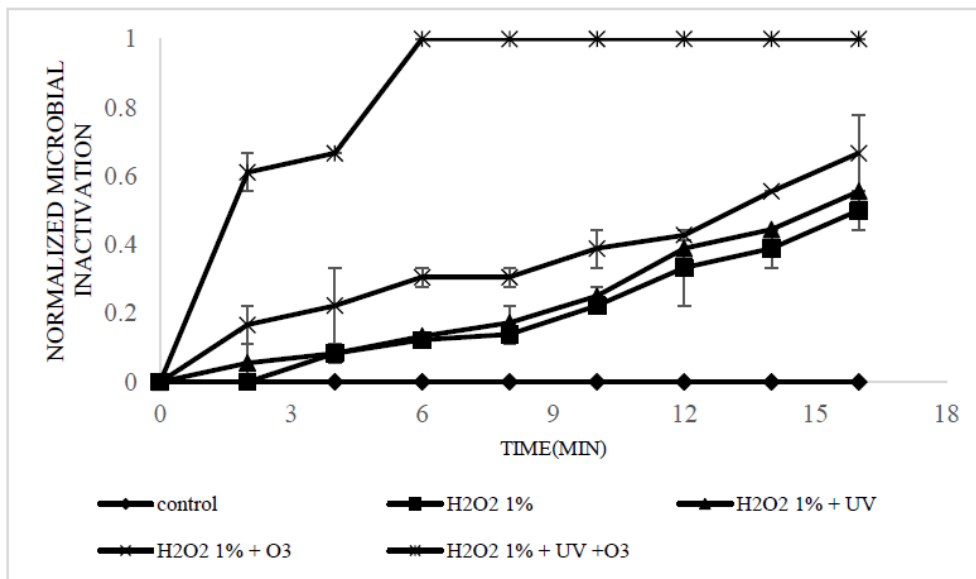
ในการทดลองนี้พบว่ามียารงานในการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> แบบเฟสที่เป็นไอ ซึ่งคล้ายกับที่เกิดขึ้นในเฟสของเหลว KaČer, et al., (2012) สรุปผลงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> แบบไอระเหยในการฆ่าเชื้อกับเชื้อจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันดังนี้: แบคทีเรียพืชและเอนโดสปอร์แบบคิเรียที่ไม่มีความทนทานสูง (Block, 1991; French, et al., 2004; Hall, et al., 2007; Johnston, et al., 2005; Kahnert, et al., 2005; Klapes and Vesley, 1990; Rogers, et al., 2005; Sapers, et al., 2003; Unger-Bimczok, et al., 2008), ไวรัส (Heckert, et al., 1997), เชื้อรา (Forney et al., 1991), ยีสต์, อะมีบา, โปรตีนติดเชื้อและจุลินทรีย์อื่น ๆ (Fichet, et al., 2004; Klapes and Vesley, 1990; Vassal, et al., 1998) สิ่งกีดขวางที่คล้ายกันในระบบ VHP เชิง

พลาสม่าสันนิษฐานว่าการยับยั้งของ  $H_2O_2$  เป็นไปตามกลไกการเกิดออกซิเดชันเดียวกัน เมื่อควัน  $H_2O_2$  สัมผัสกับจุลินทรีย์  $H_2O_2$  จะสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์ ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเยื่อหุ้มเซลล์, DNA และส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญของเซลล์ ความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  และอนุพันธ์จากอนุมูลอิสระจะต้องเอาชนะกลไกการป้องกันเซลล์ตามธรรมชาติ (เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา) เพื่อให้การออกซิเดชันทำให้ส่วนที่ควบคุมดูแลเซลล์ล้ม (Rutala และ Weber, 2010)

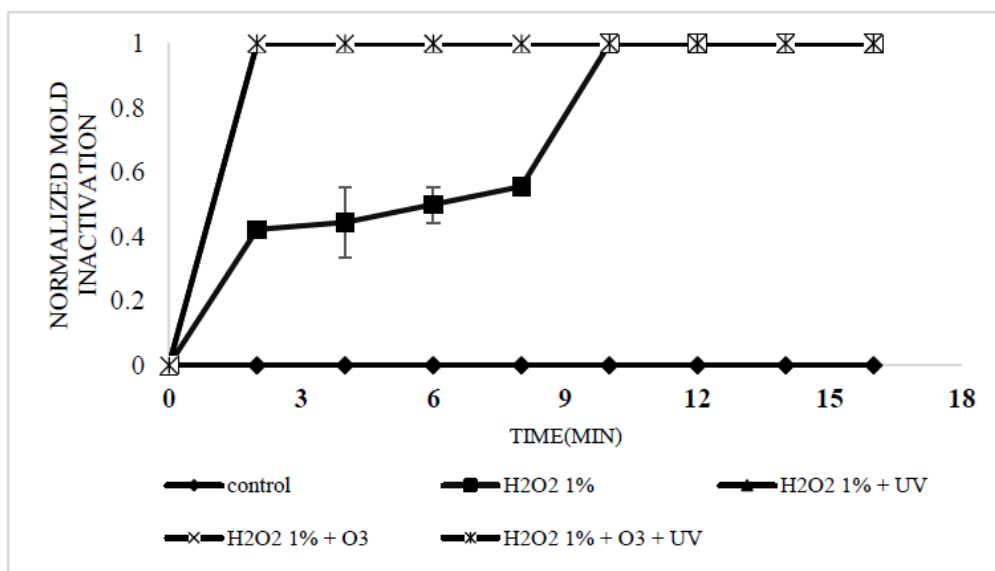
#### 4.5.2 การปรับปรุงการควัน $H_2O_2$ ในโลบีสตาวะโดยใช้รูปแบบ AOP ที่แตกต่างกัน

งานวิจัยส่วนใหญ่ในกระบวนการควัน  $H_2O_2$  ได้มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้ VHP และประสิทธิภาพของมัน โดยใช้  $H_2O_2$  ความเข้มข้นสูงเพื่อการฆ่าเชื้ออย่างปลอดภัยในบริเวณที่กำหนดและอุปกรณ์ขนาดเล็ก, ตู้ปลอดเชื้อ, isolators (ตัวแยกไฟ, ตัวส่งกำลังไฟ), ระบบปรับอากาศและการควันทั้งตัวอาคาร (Otter, et al., 2006) ในการทดลองนี้ประสิทธิภาพของการควัน  $H_2O_2$  ได้ทำการปรับปรุงโดยการใช้ UV photocatalysis และโอโซนในการกระตุ้นอนุมูลอิสระ เป็นที่ทราบกันดีว่า  $OH\cdot$  เป็นหนึ่งในปฏิกิริยาที่มีความไวสูงที่สุดในกลุ่มออกซิเจนที่ใช้งานอยู่ทั้งหมด (Nakatani, et al., 2007) และประโยชน์ของ  $OH\cdot$  คือสามารถช่วยยับยั้งจุลินทรีย์และเชื้อราได้ในการใช้การควัน  $H_2O_2$  ความเข้มข้นต่ำ (รูปที่ 4.5)

รูปที่ 4.5 เป็นการทำความเข้าใจการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราปกติเหมือนเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่เลือกการควัน 1%  $H_2O_2$  ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการยับยั้งจากทั้ง 3 ความเข้มข้นเพื่ออธิบายผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของ  $OH\cdot$  การทำงานร่วมกันของ advanced oxidation processes; AOP (เช่น UV-C และ/หรือ  $O_3$ ) ในรูปที่ 4.5 (a) เป็นรูปที่อธิบายการวิเคราะห์ผลการฆ่าแบคทีเรียได้ดีที่สุด การใช้โฟโตแคทาไลซิสหรือการเติมโอโซนเพียงอย่างเดียวทำให้สามารถปรับปรุงการฆ่าแบคทีเรียด้วยควัน  $H_2O_2$  1% ได้ แม้ว่าการฆ่าเชื้อโรคโดยสมบูรณ์นั้นไม่ประสบความสำเร็จภายในระยะเวลาการฆ่าเชื้อโรคที่เราคาดหวัง เมื่อรวมเทคนิค AOP ทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วควัน  $H_2O_2$  1% / UV-C /  $O_3$  จะให้ควันที่มีประสิทธิภาพดีกว่าและยับยั้งเร็วกว่าการยับยั้งแบคทีเรียด้วย 1%  $H_2O_2$  หรือแม้กระทั่งการควัน 5%  $H_2O_2$  (ดูรูปก่อนหน้าในรูปที่ 4.4) การควัน  $H_2O_2$  1% / UV /  $O_3$  ลดเวลาในการฆ่าเชื้ออย่างสมบูรณ์ในห้องทดสอบจาก 12 นาทีโดยใช้ 5%  $H_2O_2$  เป็น 6 นาทีโดยใช้ 1%  $H_2O_2$  พร้อมกับ photocatalysis และ โอโซน



a)



b)

รูปที่ 4.5 การยับยั้งการเจริญ a) *E. coli* / coliform และ b) *A. niger* (ความเข้มข้นเริ่มต้นที่  $4 \log \text{CFU} / \text{cm}^2$ ) บนพื้นผิวที่จำลองการเพาะเชื้อไว้ภายในห้องทดสอบ ( $34 \times 34 \times 34 \text{ cm}^3$ ) หลังจากการรมควันด้วยวิธีการต่างๆ (1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพียงอย่างเดียว, 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  / UV, 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  /  $\text{O}_3$  และ 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  / UV /  $\text{O}_3$ ) (เส้นของ 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  / UV, 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  /  $\text{O}_3$  และ 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  / UV /  $\text{O}_3$  จะทับซ้อนกัน)



















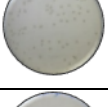





ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพการรวมควัน  $H_2O_2$  ด้วยการสร้าง  $OH\cdot$  มีผลกระทบที่ดีกว่าต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา เมื่อเปรียบเทียบกับการฆ่าเชื้อ *A. niger* ซึ่งค่อนข้างช้าด้วยควัน  $H_2O_2$  1% ในรูปที่ 4.5 การเพิ่มประสิทธิภาพ (เช่น photocatalysis หรือ ozonation) ช่วยให้ฆ่าเชื้อ *A. niger* ได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์เป็นเวลาที่น้อยที่สุด (2 นาทีโดยประมาณ) นำมาจากสิ่งที่พบในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราโดยใช้ photocatalysis ร่วมกับการปล่อยโอโซนจะถือว่าดีกว่าการใช้อย่างใดอย่างหนึ่งและทำให้เกิดการฆ่าเชื้อ *A. niger* ได้ในทันที เทคนิคการรวม AOP นี้สามารถเพิ่มความแรงของการฆ่าจุลินทรีย์โดยไม่เพิ่มความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เทคโนโลยีนี้ช่วยให้การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  ต่ำมาก เพื่อลดความเป็นพิษของ condensate residue และเสริมการเกิดออกซิเดชันของส่วนประกอบต่างๆ หรือ  $OH\cdot$  ให้มีศักยภาพมากขึ้นเพื่อการออกฤทธิ์ที่รวดเร็วและการเกิดผลกระทบเพียงระยะสั้น

#### 4.5.3 ประสิทธิภาพของการรวมละอองไฮดรอกซิล

การเพิ่มประสิทธิภาพของการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราในการรวมควัน  $H_2O_2$  ที่มีความเข้มข้นต่ำนั้นได้ทำการทดลองการทำปฏิกิริยากับ  $OH\cdot$  ที่มากขึ้น โดยใช้กระบวนการออกซิเดชัน ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงภาพถ่ายของแพลทอาหารแข็งที่ได้เพาะเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิด  $4 \log CFU / cm^2$  โดยเปรียบเทียบหลังการรวมควันกับแผ่นควบคุมในแต่ละช่วงเวลา



























ตารางที่ 4.1 ผลของการยับยั้งด้วยละออง  $H_2O_2$  ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น  $4 \log CFU / cm^2$  ของ a) *E. coli* และ b) *A. niger* ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ  $H_2O_2$  ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซนในการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อภายในโถปัสสาวะ

ที่สภาวะเงื่อนไขต่างๆ	เวลา (นาที)			
	0	5	10	15
5%				
3%				
1%				
1% + UV				
1% + O <sub>3</sub>				
1% + UV + O <sub>3</sub>				

a) *E. coli*

ตารางที่ 4.2 ผลของการยับยั้งด้วย  $H_2O_2$  ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น  $4 \log CFU / cm^2$  ของ a) *E. coli* / coliform และ b) *A. niger* ที่ความเข้มข้นต่างๆของ  $H_2O_2$  ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซน (ต่อ)

ที่สภาวะเงื่อนไขต่างๆ	เวลา (นาที)			
	0	5	10	15
5%				
3%				
1%				
1% + UV				
1% + O <sub>3</sub>				
1% + UV + O <sub>3</sub>				

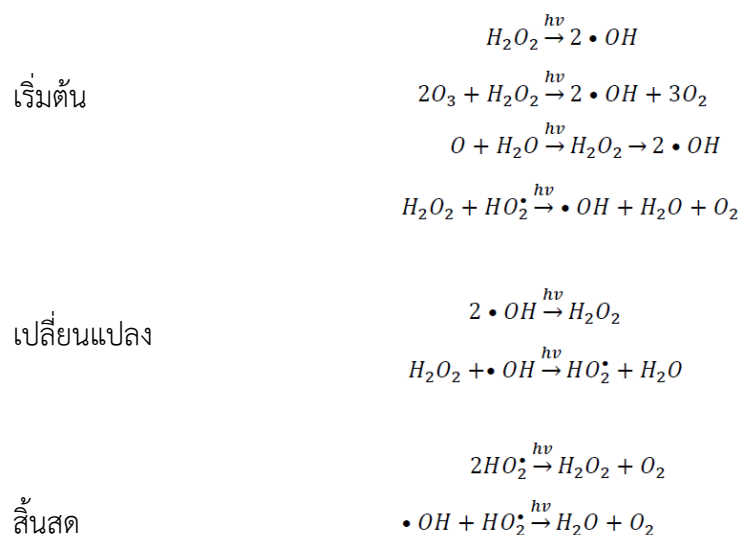
b) *A. niger*

ภาพถ่ายแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงประสิทธิภาพของการรวมกันของโฟโตคาไลซิสและโอโซนในการรมควัน  $1\% H_2O_2 / UV-C / O_3$  ในช่วงเวลา 5 นาทีภาพถ่ายจะแสดงเวลาการรักษาที่คล้ายกันเพื่อให้การฆ่าเชื้อโรคสมบูรณ์ระหว่าง  $5\% H_2O_2$  และ  $1\% H_2O_2 / UV-C / O_3$  อย่างไรก็ตามการนับซ้ำของโคโลนีที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลา 2 นาทีชี้ให้เห็นว่าหลังให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่ดีกว่า การรมควัน  $1\% H_2O_2 / UV-C / O_3$  นี้เหนือกว่าการรมควัน  $3\% H_2O_2$  ด้วยอัตราส่วนเดียวกันนี้ของอัตราการรมควันต่อการฆ่าเชื้อในพื้นที่เวลาทางทฤษฎีในการหยุดการทำงานของเซลล์ *E. coli* / coliform ที่ใช้งานอยู่นั้นน้อยกว่า 10 นาที (หรือ 6 นาทีตามผลการนับเซลล์) โดยใช้  $1\% H_2O_2 / UV-C / O_3$  การรมควัน แม้ว่า การใช้เอฟเฟกต์ AOP เดี่ยว (ทั้ง UV-C photocatlysis หรือ ozonation เพียงอย่างเดียว) ช่วยให้การปรับปรุงบางอย่างเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  มีพลังออกซิไดซ์ที่แรงกว่าการเพิ่มประสิทธิภาพโดย  $OH \cdot$  จาก AOPs รูปถ่ายของการปิดใช้งาน *A.*

*niger* แสดงให้เห็นว่าการรวมกัน 1%  $H_2O_2$  นั้นเพียงพอสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในแม่พิมพ์เล็กน้อย รวม UV-C, photocatalysis และเทคโนโลยีโอโซนสามารถให้ความปลอดภัยที่ซ้ำซ้อนสูงที่สุดกับการรวมกัน 1%  $H_2O_2$  ซึ่งคอนเดนเสทของควัน  $H_2O_2$  ต่ำนั้นเป็นพิษน้อยกว่ามาก ไอ  $H_2O_2$  ที่เหลือและคอนเดนเสทถูกเร่งปฏิกิริยาโดยธรรมชาติในน้ำและออกซิเจน (Kimura, 2012)

สันนิษฐานได้ว่าการรวมกันโดยใช้  $H_2O_2$  / UV-C /  $O_3$  ร่วมกันสามารถกระตุ้น high reactive  $OH\cdot$  ส่วนที่เหลือให้ช่วยให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่สมบูรณ์ (Andreozzi, et al., 1999) จากการค้นคว้างานวิจัยอื่นๆ เห็นได้ชัดว่าการรวมกันระหว่าง UV-C และ  $O_3$  ในการรวมกัน  $H_2O_2$  สามารถเพิ่มอัตราการสร้างอนุมูลอิสระได้ (Glaze, et al., 1987; Kommineni, et al., 2000) Ozonated water และ  $H_2O_2$  ดูดซับรังสี UV-C ที่ความยาวคลื่น 254 nm ผลิตสารมัธยันตร์หลากหลายสารรวมถึงอนุมูลของ  $H_2O_2$  (Munter, 2001) กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของ  $H_2O_2$  คือแยกโมเลกุลออกเป็น  $OH\cdot$  โมเลกุล  $Alco O_3$  สามารถรวมตัวกับสารละลาย  $H_2O_2$  เพื่อปรับปรุงการแปรสภาพ  $O_3$  และ  $H_2O_2$  ให้เป็น  $OH\cdot$  ในละออง  $OH\cdot$

ในสารละลายกรดอ่อนๆ  $H_2O_2$  จะแยกส่วนออกเป็นไฮดรอกซีเพอร์ออกไซด์ ( $HO_2^-$ ) ในขณะที่  $H_2O_2$  จะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ กับ  $O_3$  การเติมโอโซนสามารถเปลี่ยน  $HO_2^-$  ไฮดรอกซีเพอร์ออกไซด์ให้กลายเป็น  $OH\cdot$  ได้อย่างรวดเร็ว (Hoigne, 1998) ดังนั้นการทำงานร่วมกันของ UV-C photocatalysis และ ozonation ในการรวมกัน  $H_2O_2$  จะเป็นตัวแปรที่ช่วยให้เกิดการออกซิไดซ์สูง (พลังงานกระตุ้นที่สูงขึ้น) และเกี่ยวข้องกับผลผลิตของอนุมูลอิสระหลายชนิด (เช่น  $H_2O_2$ , ไฮดรอกซิล ( $OH\cdot$ ) และ Perhydroxyl ( $HO_2\cdot$ ) (Kommineni, et al., 2000 และ Munter, 2001) ดังสรุปในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพสมการทางเคมีการเกิดปฏิกิริยา photocatalytic กับ  $H_2O_2$  / UV-C /  $O_3$

การด้านเจริญเชื้อจุลินทรีย์ส่วนมากใช้การรวมกัน  $H_2O_2$  ในปริมาณน้อย ส่วนการใช้ AOPs นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารมัธยันตร์หรือที่เรียกว่าอนุมูลอิสระ ซึ่งมีปฏิกิริยาสูงเนื่องจากอิเล็กตรอนคู่ที่หายไป การทำงานร่วมกันของ UV-C photocatlysis และ ozonation ช่วยเสริมประสิทธิภาพการผลิตอนุมูลอิสระจาก  $H_2O_2$  ความเข้มข้นต่ำ กระจายละอองขนาดเล็กด้วย ultrasonic transducers พลังสูง เมื่อควัน  $H_2O_2$  ที่มีอนุมูลอิสระออกซิไดซ์สัมผัสกับทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ (หรือเซลล์จุลินทรีย์ในกรณีนี้) การเกิดออกซิเดชันที่รุนแรงจะเริ่มต้นขึ้นจนกว่าจะเกิดผลิตภัณฑ์ออกซิเดชันที่มีความเสถียรภาพสูง เป็นที่ทราบกันดีว่า  $OH\cdot$  สามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ผลการออกซิเดชันที่คล้ายกันถูกพบในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา เป็นการสนับสนุนบทบาทของ  $OH\cdot$  ว่าเป็นสารต้านจุลชีพด้วยการเกิดออกซิเดชันที่รุนแรงของส่วนประกอบของเซลล์ Rossi และคณะ ปี 2556 ยังพบว่าความเสียหายของ DNA ของเซลล์เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดที่เกิดจากออกซิเดชัน  $OH\cdot$  โดยใช้  $H_2O_2$  ความเข้มข้นต่ำกระตุ้นการสร้าง  $OH\cdot$

ในบรรดาสารออกซิไดซ์ที่เป็นที่นิยมมีศักยภาพในการออกซิเดชันสูงอย่าง ฟลูออรีน,  $OH\cdot$ ,  $O_3$  และ  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิไดซ์ที่ทรงพลังที่สุดที่มีศักยภาพในการออกซิเดชัน 2.85, 2.70, 2.07 และ 1.78 อิเล็กตรอน โวลต์ ตามลำดับ (Dorfman and Adams, 1973; Carey, 1992) Techcommentary, 1996; Zhou and Smith, 2002; Metcalf and Eddy, 1991) เมื่อเข้าสู่ช่วงการเกิด total mineralization ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการออกซิเดชัน

อย่างสมบูรณ์ สันนิษฐานว่าเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ (H<sub>2</sub>O) เช่นเดียวกับ VHP สารตกค้างที่เหลือหลังจากการรมควันได้มีการรายงานว่าปลอดภัย (McDonnell และคณะ, 2007)

#### 4.5 การเปรียบเทียบผลของการรมควัน

เมื่อรวมประสิทธิภาพของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV, และ O<sub>3</sub> เข้าด้วยกัน พื้นผิวบนแพลทอาหารแข็งแสดงให้เห็นถึงการยับยั้งที่ดีที่สุดและวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดจากการยับยั้ง ดังนั้นการทดลองการรมควัน 12 ครั้งได้ดำเนินการตามที่อธิบายไว้โดยใช้วัสดุและวิธีการที่ค่าพารามิเตอร์ต่างกัน ค่าเชิงสถิติของการทดลอง ตัวแปรการทดลอง รวมไปถึงค่าผลลัพธ์ที่วัดได้ สรุปดังในตารางที่ 2 การใช้ผลลัพธ์ response surface methodology (RSM) ใน empirical equation แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรอดชีวิตของ *E. coli* และการรมควันได้ดังนี้

อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *E. coli* ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ

$$Y = 5.680 - 1.103A - 0.048B - 1.090C - 0.229D + 0.698AB + 0.825BC + 0.068BD + 0.102CD - 0.587ABC - 0.115BCD - 0.118ACD + 0.104ABCD \quad (4.1)$$

อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *E. coli* ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านข้างของโถปัสสาวะ

$$Y = 3.078 + 0.120A + 2.166B + 1.612C - 0.269D - 0.332AB - 0.260AC - 0.004AD - 2.148BC - 0.194BD - 0.176CD + 0.248ABC + 0.175BCD + 0.004ABCD \quad (4.2)$$

อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *A. niger* ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ

$$Y = 8.549 - 1.025A - 3.386B - 3.386C - 1.021D + 0.512AB + 0.512AC + 0.101AD + 1.693BC + 0.377BD + 0.377CD - 0.256ABC - 0.050ABD - 0.188BCD - 0.050ACD + 0.025ABCD \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *E. coli* ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ

Source	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
A	32.913	2	16.457	105.768	.000
B	17.255	1	17.255	110.900	.000
C	59.063	1	59.063	379.607	.000
D	253.260	8	31.658	203.466	.000
AB	2.204	2	1.102	7.084	.001
AC	2.781	2	1.391	8.937	.000
AD	7.027	16	.439	2.823	.001
BC	16.528	1	16.528	106.228	.000
BD	5.889	8	.736	.4731	.000
CD	16.447	8	2.056	13.213	.000
ABC	3.377	2	1.689	10.852	.000
BCD	19.828	8	2.478	15.929	.000
ABCD	11.361	48	.237	1.521	.038
Error	16.804	108	.156	-	-
Total	1003.929	216	-	-	-

$$R^2 = .964$$

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *E. coli* / coliform ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านข้างของโก  
ปัสสาวะ

Source	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
A	19.865	2	9.933	70.252	.000
B	13.702	1	13.702	96.911	.000
C	30.254	1	30.254	213.980	.000
D	303.218	8	37.902	268.077	.000
AB	.726	2	.363	2.568	.001
AC	3.532	2	1.766	12.491	.081
AD	8.903	16	.556	3.936	.001
BC	2.959	1	2.959	20.930	.000
BD	10.871	8	1.359	9.611	.000
CD	18.432	8	2.304	16.296	.000
ABC	2.793	2	1.396	9.877	.000
ABD	1.788	16	.112	.790	.693
ACD	3.070	16	.192	1.357	.177
BCD	8.709	8	1.089	7.700	.000
ABCD	5.555	16	.347	2.456	.003
Error	15.270	108	.141	-	-
Total	762.519	216	-	-	-

$R^2 = .966$

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *A. niger* ของการยับยั้งทั้งหมดที่พื้นผิวด้านบนของโถปัสสาวะ

Source	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
A	.699	2	.349	70.252	.000
B	1.755	1	1.755	164.610	.000
C	1.755	1	1.755	164.610	.000
D	327.412	8	40.926	3.8390E3	.000
AB	.699	2	.349	32.759	.000
AC	.699	2	.349	32.759	.000
AD	1.227	16	.077	7.191	.000
BC	1.755	1	1.755	164.610	.000
BD	3.385	8	.423	39.686	.000
CD	3.385	8	.423	39.686	.000
ABC	.699	2	.349	32.759	.000
ABD	1.227	16	.077	7.191	.000
ACD	1.227	16	.077	7.191	.000
BCD	3.385	8	.423	39.686	.000
ABCD	1.227	16	.077	7.191	.000
Error	1.151	108	.011	-	-
Total	413.412	216	-	-	-

$R^2 = .997$



ดังนั้นการทดลองการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 12 ครั้ง ได้ดำเนินการตามที่อธิบายไว้โดยใช้วัสดุและวิธีการที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามการออกแบบ และการวัดผลลัพธ์การรอดชีวิตของ *E. coli* ในค่าเชิงสถิติของการทดลอง ตัวแปรการทดลอง รวมไปถึงค่าผลลัพธ์ที่วัดได้ แสดงเป็นอัตราส่วนการรอดชีวิตของ *E. coli* ที่สอดคล้องกันในแต่ละชุดสรุปรวมกันไว้ในตาราง 4.2, 4.3, และ 4.4 ซึ่งมีความจำเป็นต่อการทดลองที่สำคัญ และความเหมาะสมของแบบจำลอง สมการการถดถอยของการยับยั้งทั้งหมดนี้ (สมการ 4.1-4.3) แสดงถึงผลกระทบและการสร้างความเสียหายต่อ *E. coli*/coliform และเชื่อได้ว่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามได้พบวิธีการสำหรับการปฏิบัติงานขนาดใหญ่แล้ว เนื่องจากการปฏิบัติจริงของพวกเขาประสบความสำเร็จและมีความเป็นไปได้ (อัตราส่วนการยับยั้งเชิงสถิติของ *A. niger* ที่พื้นผิวด้านข้างเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ในทุกวิธีการยับยั้ง)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้สารละลาย  $H_2O_2$  ร่วมกับการใช้ระบบอัลตราโซนิกเพื่อที่จะผลิตละอองลอย สำหรับการล้างทำความสะอาดเชื้อพื้นผิวของ โถปัสสาวะรวมไปถึงพื้นที่จุดที่ยากแก่การเข้าถึงทดแทน การใช้น้ำ สำหรับการฆ่าเชื้อพื้นผิวโถปัสสาวะพบว่าระบบละอองลอยอนุภาคขนาดเล็กมีประสิทธิภาพที่ดี เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อที่จะยับยั้งเชื้อการมีชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์

สำหรับกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันรูปแบบอื่น เช่น  $O_3$  และ UV ได้ถูกคิดตั้งเพื่อที่จะกระตุ้นการ สร้างของไฮดรอกซิลเรดิคัล ระบบการใช้ร่วมกันของ  $H_2O_2/O_3$  ปรากฏการทดสอบชี้ให้เห็นเป็นส่วนใหญ่ และประยุกต์ใช้กับโปรโตคอลของ AOP ในการฆ่าเชื้อยาต้านแบคทีเรียหลายชนิดมีความสัมพันธ์กับ กระบวนการอื่นๆ การมีความรู้ความเข้าใจของสารไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ดีเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการ fumigation ของ  $H_2O_2$  ที่มีจำกัด การบำบัดฆ่าเชื้อในโถปัสสาวะแบบเดี่ยว เช่น เป็นการใช้อโซนหรือการใช้ UV เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถที่จะฆ่าเชื้อ *E. coli/coliform* หรือการลดลงของเชื้อราได้ การประยุกต์ใช้ ร่วมกันของ 2 องค์ประกอบไม่ได้ provide ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ในเพิ่มเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน สารละลายไม่สามารถเพิ่มซับซ้อนสำหรับการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลและการพัฒนาที่มีศักยภาพอย่างมี นัยสำคัญของประสิทธิภาพของการ fumigation ด้วยกระบวนการ AOP ที่มีต่อเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 และการ ยับยั้งเชื้อราที่ความเข้มข้นเดียวกัน เชื้อ *A. niger* พบว่าสามารถถูกยับยั้งทำลายด้วยละอองลอยของ  $H_2O_2$  ได้ ง่ายกว่าเชื้อ *E. coli/coliforms* การประยุกต์ใช้ร่วมกันของการใช้ UV หรือ โอโซน ที่มีต่อการ fume ด้วย  $H_2O_2$  โดยตามทฤษฎีแล้วมันจะกระตุ้นการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้เกิดการฆ่าเชื้อที่ใช้เวลาน้อยที่ด้านบน และด้านข้างของโถปัสสาวะ การประยุกต์ใช้อโซนร่วมกับการฟ้นละอองด้วย  $H_2O_2$  ทำให้สามารถฆ่าเชื้อ แบคทีเรียได้เร็ว บางทีเนื่องจากการกำเนิดไฮดรอกซิลเรดิคัลปริมาณจำนวนมาก ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ของ  $H_2O_2$  การประยุกต์ใช้ของทั้ง 3 องค์ประกอบ (i.e.,  $H_2O_2$ , โอโซน และ UV) ผลของการดำเนินงานที่การ บำบัดอื่นๆ ในการทำลายเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ดังนั้นการใช้  $H_2O_2$  และความเป็นพิษที่ยังคงอยู่ใน โถ

ปีศาจหลังจากบำบัดสามารถที่จะลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญด้วยการดำเนินการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว มีความเหมาะสมสามารถประยุกต์ใช้ได้จริง อย่างไรก็ตามในอนาคตการลดการใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงได้ 100% จะเป็นที่พึงพอใจเป็นอย่างมาก การฆ่าเชื้อโปีศาจด้วยการใช้ร่วมกันของ 3 องค์ประกอบที่เป็นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน และ การใช้ยูวี สามารถที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อราเปรียบเทียบกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวคิดเป็น 73.33% สำหรับความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1 และ 3 % และมีประสิทธิภาพ 80% สำหรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ที่บริเวณการฆ่าเชื้อที่พื้นผิวด้านข้างของโปีศาจ

### เอกสารอ้างอิง

1. สุเมธ ชวเดช, 2541, การพัฒนากระบวนการออกซิเดชัน โอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย: รายงานฉบับสมบูรณ์, กรุงเทพฯ วิทยาลัยโทยุโรปและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 44 หน้า
2. Andreatti, R., Caprio, V., Insola, A. and Marotta, R. 1999, “Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery”, *Catalysis today*, Vol. 53, pp. 51-59.
3. Arita, M., Nagayoshi, M., Fukuizumi, T., Okinaga, T., Masumi, S., Morikawa, M., 2005, Microbicidal efficacy of ozonated water against *Candida albicans* adhering to acrylic denture plates. *Oral Microbiology & Immunology*; 20:206.
4. Bank H. L., Schmehl, J. L. and Dratch, R. J., 1990, “Bacteriocidal Effectiveness of Modulated UV Light”, *Applied Environmental Microbiology*, Vol. 56, pp. 3888-3889.
5. Barlow PJ. 1994. An introduction to ozone generation.
6. Baysan, A., Whiley, RA., Lynch, E., 2000, Antimicrobial effect of a novel ozone-generating device on microorganisms associated with primary root carious lesions in vitro. *Caries Research*; 34: 498–501.
7. Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E. and Robinson, R. K., 2000, “Existing and Potential Applications of Ultraviolet light in the Food Industry ea critical review”, *Science of Food and Agriculture*, Vol. 80, No. 6, pp.637-645.
8. Carey, J.H., 1992, “An Introduction to advanced oxidation process (AOP) for Destruction of Organics in Wastewater”, *Water Pollution Research Journal of Canada*, Vol. 27, No. 4, pp. 1–21.
9. Cho, M., Kim, J., Kim, JY., Yoon, J., Kim, JH., 2010, Mechanisms of *Escherichia coli* inactivation by several disinfectants. *Water Res*;44: 3410-3418.
10. Celiberti, P., Pazera, P., Lussi, A., 2006, The impact of ozone treatment on enamel physical properties, *American Journal of Dentistry*; 19: 67–72.
11. Demirci, A. and Ngadi, M.O., 2012, *Microbial Decontamination in the Food Industry: Novel Methods and Applications*, Woodhead Publishing, Philadelphia, pp. 495-531.

12. Dorfman, L.M. and Adams, G.E., 1973, "Reactivity of the hydroxyl radical in aqueous solutions", National Standard Reference Data System, No. NSRDS-NBS-46.
13. Estrela, C., Estrela, CR., Decurcio, Dde A., Silva, JA., Bammann, LL., 2006, Antimicrobial potential of ozone in an ultrasonic cleaning system against *Staphylococcus aureus*. *Brazilian Dental Journal*; 17:134–138.
14. Fichet, G., Comoy, E., Duval, C., Antloga, K., Dehen, C., Charbonnier, A. and Deslys, J. P., 2004, "Novel methods for disinfection of prion-contaminated medical devices", *The Lancet*, Vol. 364, No. 9433, pp. 521-526.
15. Forney, C.F., Rij, R.E., Denis-Arrue, R. and Smilanick, J.L., 1991, "Vapor phase hydrogen peroxide inhibits postharvest decay of table grapes", *HortScience*, Vol. 26, No. 12, pp. 1512-1514.
16. French, G.L., Otter, J.A., Shannon, K.P., Adams, N.M.T., Watling, D. and Parks, M. J., 2004, "Tackling contamination of the hospital environment by methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA): a comparison between conventional terminal cleaning and hydrogen peroxide vapour decontamination", *Journal of Hospital Infection*, Vol. 57, pp. 31-37.
17. Glaze, W.H., 1987, "Drinking-water treatment with ozone", *Environmental science & technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 224-230.
18. Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K. and Seydim, A. C., 2004, "Use of Ozone in the Food Industry", *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 453-460.
19. Hall, L., Otter, J.A., Chewins, J. and Wengenack, N.L., 2007, "Use of hydrogen peroxide vapor for deactivation of *Mycobacterium tuberculosis* in a biological safety cabinet and a room", *Journal of clinical microbiology*, Vol .45, No. 3, pp. 810-815.
20. Heckert, R.A., Best, M., Jordan, L.T., Dulac, G.C., Eddington, D.L. and Sterritt, W.G., 1997, "Efficacy of vaporized hydrogen peroxide against exotic animal viruses", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 63, No. 10, pp. 3916-3918.
21. Horvath, M., Bilitzky, L., Huttner, J., 1985, *Ozone*. Budapest: Elsevier.

22. Hunt, N.K. and Marinas, B.J. (1997) Kinetics of *Escherichia coli* inactivation with ozone. *Res.*31 : 1355 - 1362
23. Huth, K.C., Jakob, F.M., Saugel, B., Cappello, C., Paschos, E., Hollweck, R., 2006, Effect of ozone on oral cells compared with established antimicrobials. *European Journal of Oral Sciences*; 114: 435–440.
24. Johnston, M.D., Lawson, S. and Otter, J.A., 2005, “Evaluation of hydrogen peroxide vapour as a method for the decontamination of surfaces contaminated with *Clostridium botulinum* spores”, *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 60, No. 3, pp. 403-411.
25. Kačar, P., Švrček, J., Syslová, K., Václavík, J., Pavlík, D., Červený, J. and Kuzma, M., 2012, “Vapour phase hydrogen peroxide-method for decontamination of surfaces and working areas from organic pollutants”, In *Organic Pollutants Ten Years after the Stockholm Convention-Environmental and Analytical Update*. pp. 400-30.
26. Kahnert, A., Seiler, P., Stein, M., Aze, B., McDonnell, G. and Kaufmann, S.H., 2005, “Decontamination with vaporized hydrogen peroxide is effective against *Mycobacterium tuberculosis*”, *Letters in applied microbiology*, Vol. 40, No. 6, pp. 448-452.
27. Khadre, M. A., Yousef, A. E., and Kim, J. G., 2001, “Microbiological Aspects of Ozone Applications in Food: a Review. *Journal of Food Science*, Vol. 66, No. 9, pp. 1242-1252.
28. Kim, J-G., Yousef, A.E. and Chism, G.W., 1999a, “Use of Ozone to Inactivate Microorganisms on Lettuce”, *Journal of Food Safety*, Vol.19, pp. 17-34.
29. Kim, JG., Yousef, AE., Khadre, MA., 2003, Ozone and its current and future application in the food industry, *Adv. Food Nutr, Res*; 45: 167–218.
30. Kimura, T., 2012, “Effective Decontamination of Laboratory Animal Rooms with Vapour-phase (œ Vaporizedœ) Hydrogen Peroxide and Peracetic Acid”, *Scandinavian Journal of Laboratory Animal Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 17-23.
31. Klapes, N.A. and Vesley, D.O.N.A.L.D., 1990, “Vapor-phase hydrogen peroxide as a surface decontaminant and sterilant”, *Applied and environmental microbiology*, Vol. 56, No. 2, pp. 503-506.

32. Kommineni, S., Zoekler, J., Stocking, A., Liang, P.S., Flores, A., Rodriguez, R. and Brown, A., 2000, "3.0 Advanced Oxidation Processes. Treatment Technologies for removal of Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) from drinking water: air stripping, Advanced Oxidation Process, Granular Activated carbon, Synthetic resin sorbents", Vol. 2, pp. 109-208.
33. Koutchma, T.N., Forney, L.J. and Moraru, C.I., 2009, *Ultraviolet Light in Food Technology*, CRC Press, London, pp.53-67.
34. Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J., Demirci, A. and Yang, W., 2008, *Food Processing Operations Modeling: Design and Analysis*, 2nd ed., CRC Press, NW, pp. 281-299.
35. McDonnell, G., Bonfield, P. and Hernandez, V.D., 2007, "The safe and effective fumigation of hospital areas with a new fumigation method based on vaporized hydrogen peroxide", *American Journal of Infection Control*, Vol. 35, No. 5, pp. E33-E34.
36. Metcalf, E. E. and Eddy, H., 1991, *Wastewater engineer treatment disposal, reuse*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore, pp. 3-24.
37. Munter, R., 2001, "Advanced Oxidation Processes-Current Status and Prospects", *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Chemistry*, Vol. 50, No. 2, pp. 59-80.
38. Murakami, H., Mizuguchi, M., Hattori, M., Ito, Y., Kawai, T., Hasegawa, J., 2002, Effect of denture cleaner using ozone against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *E. coli* T1 phage. *Dental Materials Journal*; 21:53–60.
39. Murray, BK., Ohmine, S., Tomer, DP., Jensen, KJ., Johnson, FB., Kirs, JJ., Robison, RA., O'Neill KL, 2008, Virion disruption by ozone-mediated reactive oxygen species. *J Virol Methods*; 153: 74-77.
40. Oizumi, M., Suzuki, T., Uchida, M., Furuya, J., Okamoto, Y., 1998, In vitro testing of a denture cleaning method using ozone. *Journal of Medical and Dental Sciences*; 45:135–139.
41. Otter, J.A., French, G.L., Adams, N.M.T., Watling, D. and Parks, M.J., 2006, "Hydrogen peroxide vapour decontamination in an overcrowded tertiary care referral centre: some practical answers", *Journal of Hospital Infection*, Vol. 62, No. 3, pp. 384-385.

42. Raffellini, S., Guerrero, S. and ALZAMORA, S., 2008, "Effect of hydrogen peroxide concentration and pH on inactivation kinetics of *Escherichia coli*", *Journal of food safety*, Vol. 28, No. 4, pp. 514-533.
43. Restainno, L., Frampton, E.W., Hemphill, J.B. and Palnikar, P., 1995, "Efficiency of ozonated water against various food – *Environ. Microbiol* 61: 3471 – 3475.
44. Rickard, G.D., Richardson, R., Johnson, T., McColl, D., Hooper, L., 2004, Ozone therapy for the treatment of dental caries. *Cochrane Database of Systematic Reviews*; CD004153.
45. Rogers, J.V., Sabourin, C.L.K., Choi, Y.W., Richter, W.R., Rudnicki, D.C., Riggs, K.B. and Chang, J., 2005, "Decontamination assessment of *Bacillus anthracis*, *Bacillus subtilis*, and *Geobacillus stearothermophilus* spores on indoor surfaces using a hydrogen peroxide gas generator", *Journal of applied microbiology*, Vol. 99, No. 4, pp. 739-748.
46. Rutala, W.A. and Weber, D.J., 2010, "Guideline for disinfection and sterilization of prion-contaminated medical instruments", *Infection Control & Hospital Epidemiology*, Vol. 31, No. 2, pp. 107-117.
47. Sapers, G.M., Walker, P.N., Sites, J.E., Annous, B.A. and Eblen, D.R., 2003, "Vapor-phase Decontamination of Apples Inoculated with *Escherichia coli*", *Journal of Food Science*, Vol. 68, No. 3, pp. 1003-1007.
48. Suzuki, T., Oizumi, M., Furuya, J., Okamoto, Y., Rosenstiel, S.F., 1999, Influence of ozone on oxidation of dental alloys. *The International Journal of Prosthodontics*; 12:179–183.
49. Tap, C. and Rice, R. G., 2012, "Generation and Control of Ozone", *Ozone in Food Processing*, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, pp. 33-54.
50. Thabet, S.S., Thabet, H.S., Atalla, S.S., 2007, Efficacy of medical ozone in attenuation of murine *Schistosomiasis mansoni* infection morbidity. *J Egypt Soc Parasitol*; 37:915-944.
51. Unger-Bimczok, B., Kottke, V., Hertel, C. and Rauschnabel, J., 2008, "The influence of humidity, hydrogen peroxide concentration, and condensation on the inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores with hydrogen peroxide vapor", *Journal of Pharmaceutical Innovation*, Vol. 3, No. 2, pp. 123-133.



52. Vassal, S., Favennec, L., Ballet, J.J. and Brasseur, P., 1998, "Hydrogen peroxide gas plasma sterilization is effective against *Cryptosporidium parvum* oocysts", *American journal of infection control*, Vol. 26, No. 2, pp. 136-138.

## ผลผลิต (Output)

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่ม เลขที่ และหน้า)

-

2. การจดสิทธิบัตร

2.1 สิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ “โถปัสสาวะ” วันที่ยื่นคำขอ 4 พฤศจิกายน 2562 เลขที่คำขอ 1902004684

2.2 อนุสิทธิบัตร “ระบบทำความสะอาดโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรคและปราศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์” วันที่ยื่นคำขอ 20 มกราคม 2563 เลขที่คำขอ 2003000115

3. ผลงานเชิงพาณิชย์ (มีการนำเสนอไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการประยุกต์ใช้โดยภาครัฐกิจ หรือบุคคลทั่วไป)

นวัตกรรมโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาระในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุเป็นผลงานที่มีการนำไปทดลองใช้ในภาครัฐกิจที่เป็น โรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ผลงานดังกล่าวช่วยในการประหยัดพลังงาน ลดการใช้น้ำ พนักงานมีความสะดวกสบายลดโอกาสการปนเปื้อนของเชื้อโรคที่เกิดจากการที่ต้องใช้มือกดน้ำที่โถปัสสาวะเพื่อทำความสะอาดชะล้างคราบต่างๆ นอกจากนี้มีการนำผลงานไปจดสิทธิบัตรและอนุสิทธิบัตรเพื่อเพิ่มโอกาสต่อยอดทางธุรกิจให้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดการกระจายพื้นที่หรือแหล่งของการนำโถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่นไปใช้งาน

4. ผลงานเชิงสาธารณะ (เน้นประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ท้องถิ่น)

โถปัสสาวะชายปลอดเชื้อโรค ปราศจากกลิ่น ไม่ทำให้เกิดการกระจายคราบปัสสาวะและเกิดภาระในบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอาหาร สถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ เป็นประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ท้องถิ่น ช่วยลดมลภาวะทางกลิ่นและการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน