



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องฟ่นละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเชิงพานิชย์เพื่อขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทยโดยนำเอาเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลเหรียญทองสิ่งประดิษฐ์จากเวทีประกวดนานาชาติ ในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

Prototype fabrication of hydroxyl free radical fumigation developed from award-winning invention in preventing HAIs in healthcare facilities and nursing homes and filing this medical equipment in Thai invention database

ดร.อาณัติ ดีพัฒนา

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

รหัสโครงการ 59810 (363D0963)

สัญญาเลขที่ 22.4/2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องพ่นละอองลอยอนุภาคอิสระไฮดรอกซิลเชิงพาณิชย์เพื่อขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทยโดยนำเอาเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลเหรียญทองสิ่งประดิษฐ์จากเวทีประกวดนานาชาติ ในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

Prototype fabrication of hydroxyl free radical fumigation developed from award-winning invention in preventing HAIs in healthcare facilities and nursing homes and filing this medical equipment in Thai invention database

ดร.อานัติ ดีพัฒนา

คณะวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 22.4/2562

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ดร.อาณัติ ศีพัฒนา ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพาประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาเครื่องฟ่นละอองลอยอนุโมลอิสระไฮดรอกซิลเชิงพานิชย์เพื่อขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทย โดยนำเอาเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลเหรียญทองสิ่งประดิษฐ์จากเวทีประกวดนานาชาติ ในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ (ภาษาอังกฤษ) Prototype fabrication of hydroxyl free radical fumigation developed from award-winning invention in preventing HAIs in healthcare facilities and nursing homes and filing this medical equipment in Thai invention database รหัสโครงการ 59810 (363D0963) สัญญาเลขที่ 22.4/2562 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 2,855,200 บาท (สองล้านแปดแสนห้าหมื่นห้าพันสองร้อยยี่สิบบาทถ้วน) ระยะเวลาการดำเนินงาน 2 ปี (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2561 – วันที่ 30 กันยายน 2563) เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอาหารที่เป็นอุตสาหกรรมสำคัญในโครงสร้างเศรษฐกิจของไทย โดยการผลักดันของภาครัฐบาลในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรมตามนโยบาย Thailand 4.0 ส่งผลให้แนวโน้มการส่งออกของสินค้าในกลุ่มอุตสาหกรรมอาหารของไทยมีมูลค่าส่งออกในปี 2560 ที่ประมาณ 27.4 พันล้านดอลลาร์สหรัฐฯ แต่จากข้อมูลที่ได้ทำการสำรวจจากผู้บริหารอุตสาหกรรมอาหารส่งออกขนาดใหญ่ พบว่าในแต่ละปีมีผลิตภัณฑ์จำนวนมากตรวจพบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทำลายสินค้า ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ของประเทศไทย ในกระบวนการผลิตของทางโรงงาน ในแต่ละวันที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากและหลากหลายชนิด อีกทั้งยังใช้แรงงานในการผลิตสินค้าเป็นจำนวนมาก สุ่มเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ (foodborne pathogens) เช่น อีโคไล (*E. coli*) เซลโมเนลล่า (*Salmonella* spp.) ลิสทีเรีย (*Listeria* spp.) ฯลฯ หากการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อพื้นที่ผลิต กระบวนการผลิต เครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้มีโอกาสนปนเปื้อนข้ามจากเชื้อจุลินทรีย์ทั้งก่อโรคและไม่ก่อโรคสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไปยังผู้บริโภค

กลยุทธ์การปรับปรุงสุขอนามัยการผลิต (Food processing hygiene) ที่มีประสิทธิภาพจะส่งผลให้เกิดการใช้วัตถุดิบ ทรัพยากรการผลิต สารเคมี พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต และที่สำคัญลดสารเคมีตกค้างในผลิตภัณฑ์ ในการยกระดับสุขอนามัยการผลิตโดยอาศัยเทคโนโลยีและวิธีการผลิตแบบเดิม ๆ มักทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและเกิดสารเคมีตกค้าง เช่น ในการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตมีการใช้น้ำสะอาดผสมสารเคมีที่ช่วยในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาจากวัตถุดิบอาหารต่างๆ เช่น คลอรีน หรือสารที่สามารถออกซิไดซ์แบบอื่น ๆ ซึ่งเมื่อสารเคมีเหล่านี้ตกค้างปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตย่อมส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค แทนที่จะทำให้อาหารปลอดภัยกลับทำให้เกิดปัญหาสารเคมีตกค้างในอาหาร เป็นการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งทำให้เกิดปัญหาในรูปแบบอื่นตามมา ปัจจุบันแนวทางการแก้ไขปัญหасุขอนามัยการผลิตครบวงจรโดยมุ่งเน้นหาแนวทางป้องกันต้นกำเนิดของการปนเปื้อนและเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีสารเคมีตกค้างก่อให้เกิดความเป็นพิษในมนุษย์และยังคงประสิทธิภาพในการชำระทำลายสิ่งปนเปื้อนทั้งทางกายภาพ เคมี และเชื้อจุลินทรีย์ องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงกับอุตสาหกรรมอาหารนั้นมีจำกัด เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตโอโซนขนาดใหญ่และอุปกรณ์ผลิตแสงยูวีความเข้มข้นสูงสำหรับอุตสาหกรรมนั้นในอดีตมีราคาสูง นอกจากอุตสาหกรรมยาหรือสารสกัดราคาสูงแล้วโรงงานประเภทอื่น ๆ ไม่สามารถจัดหา หรือประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ได้ แต่ปัจจุบันอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีเหล่านี้มีราคาเหมาะสมกับผลกระทบในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่จะทำให้อุตสาหกรรมอาหารสามารถนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งานได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่มีเกษตรอุตสาหกรรมเป็นแหล่งทำเงินรายได้หลักเข้าประเทศระดับล้านล้านบาทต่อปีและในแต่ละปีรายได้จากการส่งออกมีแนวโน้มที่จะมีมูลค่าสูงขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยและผลิตเทคโนโลยีกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงขึ้นใช้เองและนำมาใช้กับอุตสาหกรรมอาหารของประเทศ “เครื่องฟั่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตอาหารด้วยเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงปลอดสารพิษตกค้างในการยกระดับคุณภาพอาหารปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร” โดยอาศัยการบูรณาการของปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกด้วยแสงยูวีร่วมกับก๊าซโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (< 1.5%) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตตามบัญชียาหลักแห่งชาติ และในปริมาณที่น้อยกว่า 1.5% ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากเกินไปในการทำให้อุปกรณ์โลหะต่างๆ ถูกกัดกร่อนหรือถูกทำลาย เพื่อทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ที่มีอาหารเป็นพาหะ โดยการประยุกต์ใช้ในการผลิตสินค้า การใช้งานร่วมกับกระบวนการทำความสะอาดพื้นที่ผลิตและอุปกรณ์เพื่อประกันความปลอดภัยปลอดเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค

ในกระบวนการผลิต ซึ่งการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์เพื่อให้การใช้วัตถุดิบ พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพโดยให้เปลี่ยนเป็นของเสียน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย เป็นการลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด ทั้งนี้รวมถึงการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบ การใช้ซ้ำและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการผลิตไปพร้อมกัน โดยเป็นหลักการเช่นเดียวกับการผลิตที่สะอาด (Cleaner Production) การป้องกันมลพิษ (Pollution Prevention) การลดของเสียให้น้อยที่สุด (Waste Minimization) หรือการผลิตเพื่อรักษาสีสิ่งแวดล้อม (Green Productivity) เป็นการประยุกต์ใช้ได้กับหลักการ เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (Clean Technology) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่ง ทำให้มีความมั่นใจในคุณภาพของสินค้าที่ผลิต ไม่มีสารตกค้างที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของลูกค้าและเป็นการยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของไทยสู่สากล อีกทั้งการเลือกใช้น้ำยาทำความสะอาดมาเชื่อมร่วมกับกรรมวิธีการทำความสะอาดที่ถูกต้องยังสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องจักรอุปกรณ์การผลิตที่มีราคาสูงของทางโรงงาน ซึ่งถือได้ว่าเป็นยุทธศาสตร์ในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันส่งออกผลิตภัณฑ์ของทางโรงงานที่มีมูลค่าหลายร้อยล้านบาทต่อปี รวมถึงเป็นการลดต้นทุนและลดค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากสินค้าถูกตีกลับเนื่องจากการตรวจพบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และสารเคมีตกค้างจากสายการผลิต

บทคัดย่อ

การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอาหารที่เป็นอุตสาหกรรมสำคัญในโครงสร้างเศรษฐกิจของไทย โดยการผลักดันของภาครัฐบาลในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรมตามนโยบาย Thailand 4.0 ทำให้อุตสาหกรรมอาหารมีการขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จากข้อมูลที่ได้ทำการสำรวจจากผู้บริหารอุตสาหกรรมอาหารส่งออกขนาดใหญ่ พบว่าในแต่ละปีมีผลิตภัณฑ์จำนวนมากตรวจพบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทำลายสินค้า ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ของประเทศไทย การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ภาพรวมในผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นเรื่องที่ยาก สารเคมีที่ใช้ส่งผลให้เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์เป็นอย่างมาก เครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตอาหารด้วยเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงปลอดสารพิษตกค้างในการยกระดับคุณภาพอาหารปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร เป็นการผลิตละอองลอยของอนุพันธ์ไฮดรอกซิล (จากแสงยูวี โอโซน และสารละลายตั้งต้นสำหรับผลิตอนุพันธ์ไฮดรอกซิล) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ทำให้สามารถฆ่าเชื้อได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็วโดยหลังจากการทำปฏิกิริยา เหลือแต่เพียงน้ำกับออกซิเจนเป็นสารตกค้างที่ไม่เป็นพิษและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง / อนุพันธ์อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล / เครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อน / อาหารปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

Thai food industry has been the one of the key strategies for the success of Thailand 4.0 policy. The growth of Thai food export has been expanded constantly and the revenue of this sector is essential for the growth of Thailand's economy. One of the pain points of this industry is the contamination of foodborne pathogens in the finished products which destroys the whole value chain by increasing the production cost and delaying of shipment. This situation directly affects the consumers' trust on the export products from Thailand. Our prototype equipment of hydroxyl radical disinfection was innovated to sanitize the surfaces in the food processing lines. This invention utilizes the disinfectant aerosolization of hydroxyl free radicals generated from combined UV, ozone, and a hydroxyl radical precursor to effectively and rapidly inactivate all microbes on surfaces of fumigated areas. The only remaining residues are water and oxygen; in contrary, most available processing disinfecting techniques employs toxic and harsh chemicals which produce toxic residues to both human and environment and generates a lot of wastewater. This hydroxyl radical fumigation is a great idea for startup business and the equipment prototype can help upgrade food processing sanitation for food industry.

Keywords: advanced oxidation process / hydroxyl free radicals / aerosolization / food safety / environmentally friendly

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	II
บทคัดย่อภาษาไทย	V
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	VI
สารบัญเรื่อง	VII
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่	
1 บทนำ	1
2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา	6
3 วัตถุประสงค์และการดำเนินงานวิจัย	21
4 ผลการทดลองและวิจารณ์	26
5 สรุปผลการทดลอง	56
เอกสารอ้างอิง	58
ผลผลิต (output)	68
ประวัติคณะผู้วิจัย	70

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	Relative oxidation activity ของสารออกซิไดซ์บางชนิด	6
2.2	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสำหรับสารประกอบอินทรีย์	7
2.3	ประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบของการฆ่าเชื้อด้วย UV (254 nm) สำหรับการปนเปื้อนของผักกาดหอม	11
4.1	แสดงความสามารถในการลดปริมาณเชื้อด้วยละอองลอยไฮดรอกซิล	33
4.2	ผลการยับยั้งของ H ₂ O ₂ ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น 3, 5, และ 7 log ₁₀ CFU / cm ² โดยเปรียบเทียบผลการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> บนพื้นผิวตัวแปรควบคุมกับพื้นผิวหลังการรมควัน H ₂ O ₂ เป็นเวลา 20 นาที	36
4.3	ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B	52
4.4	ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>S. aureus</i> บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator A และ Fumigator B	53
4.5	ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>A. fumigatus</i> บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator A และ Fumigator B	54

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ภาพจำลองเครื่องดันเครื่องฟ่นละอองลอยอนุภาคลิวติสระไฮดรอกซิลเชิงพาณิชย์เพื่อขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทยโดยนำเอาเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลเหรียญทองสิ่งประดิษฐ์จากเวทีประกวดนานาชาติ ในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ	3
2.1	การก่อตัวของโอโซน	12
2.2	การเปรียบเทียบรูปแบบการฆ่าเชื้อโรค	13
3.1	แบบจำลองห้องสำหรับการ fumigation และการวาง set อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อในห้องแบบจำลอง	24
3.2	เพลท 6-microwell สำหรับการตรวจวิเคราะห์หับโคโลนิของเชื้อ	25
4.1	การฆ่าเชื้อโรคในโรงพยาบาลด้วยการฉายรังสี UV-C	27
4.2	การฆ่าเชื้อโรคห้องด้วยการ fume ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์	28
4.3	กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของอนุพันธ์ของสารอนุภาคลิวติสระ	30
4.4	ต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอยอนุภาคลิวติสระไฮดรอกซิล	31
4.5	ภาพถ่ายเชื้อ <i>E. coli</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6.7 log CFU/mL ก่อนทำการฟ่นละอองลอย และ (ก) หลังทำการฟ่นละอองลอย (ข) เป็นเวลา 60 วินาทีด้วยเครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนด้วย เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง	32
4.6	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตของ <i>S. aureus</i> และ <i>E. coli</i> ที่ถูกยับยั้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่กลายเป็นไอที่ความเข้มข้นต่างกัน	35
4.7	ผลของ H ₂ O ₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ร่วมกับโฟโตคะทาไลซิส UV-C และ โอโซน ที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น 3, 5, และ 7 log ₁₀ CFU / cm ² ของ <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i>	38
4.8	ผลของการยับยั้ง <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> ที่จำนวนเซลล์เริ่มต้น 3, 5, และ 7 log ₁₀ CFU / cm ² ด้วย UV-C, โอโซน, และ UV-C / Ozonation	40
4.9	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นอาหารแข็งที่มีการปนเปื้อนเริ่มต้นที่ 3, 5, และ 7 log ₁₀ CFU / cm ² ละอองลอยฆ่าเชื้อสร้างขึ้นจาก H ₂ O ₂ (hydrogen peroxide), H ₂ O ₂ ร่วมกับ โอโซนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต, ClO ₂ (Chlorine dioxide), BKC (Benzalkonium chloride) และ NaOCl (Sodium hypochlorite) และใช้ในตู้ปิดล้อมเป็น	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
	เวลา 20 นาที
4.10	45
	เครื่องต้นแบบเครื่องพ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี ออกซิเจนชั้นสูงปลอดสารพิษตกค้าง
4.11	47
	บริเวณที่ทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของแบคทีเรียบริษัท ก และ ข
4.12	48
	การวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียบริเวณกระบวนการผลิตของบริษัท ข
4.13	49
	การพัฒนาเครื่องพ่นละอองลอยอนุภาคไฮดรอกซิล
4.14	49
	แสดงห้องขนาด 3*3*2.7 เมตรที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator และตำแหน่งการวางเพลมที่ได้มีการ spread เชื้อที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
4.15	50
	เครื่อง Fumigator ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ
4.16	50
	ลักษณะละอองลอยเพื่อการฆ่าเชื้อที่สามารถมองเห็นด้วยเครื่อง Fumigator A
4.17	51
	ลักษณะละอองลอยเพื่อการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator B
4.18	51
	ลักษณะละอองลอยเครื่อง Fumigator A โดยส่วนใหญ่จะกระจายอยู่บริเวณพื้นในระหว่าง ทำการฆ่า

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โรคติดเชื้อจากสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นคนชรา คร่าชีวิตผู้สูงอายุและผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่องเป็นจำนวนมากในแต่ละปีทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างแพร่หลายและขาดการควบคุมทำให้เชื้อโรคต่างๆ คือยา และในหลายกรณีไม่มียารักษา ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทั้งทางด้านสังคม เศรษฐกิจ รวมถึงงบประมาณในระบบบริการสุขภาพโดยรวมของประเทศ ซึ่งนับเป็นมูลค่ามหาศาล ดังนั้น การควบคุมโรคติดเชื้อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายจึงเป็นมาตรการสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสถานพยาบาลหรือสถานพักฟื้นของผู้สูงอายุที่จะต้องมีเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือเทคโนโลยีในการทำความสะอาดพื้นที่ให้ปลอดโรคและไม่เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษต่อสุขภาพของผู้สูงอายุที่ใช้บริการหรือใช้ประโยชน์ในพื้นที่เหล่านั้นในชีวิตประจำวัน การรมควันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ใช้ในการฆ่าเชื้ออย่างแพร่หลายทั้งในโรงพยาบาล สถานีอนามัย และสถานพักฟื้นคนชรา ที่ประสบปัญหาการแพร่ระบาดของเชื้อโรคที่มีความรุนแรงและติดต่อกันง่ายในอดีต แต่งานวิจัยที่เผยแพร่ในปัจจุบันต่างชี้ให้เห็นถึงความเป็นพิษในรูปแบบที่เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง มีกลิ่นฉุนรุนแรงทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และทำให้ได้รับความนิยมน้อยลงในปัจจุบัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ผู้ประกอบการทุกระดับและทุกแห่ง ยังคงนำมาปฏิบัติเพื่อลดอัตราการติดเชื้อหรือปนเปื้อนเชื้อโรคแขวนลอยที่อยู่ในอากาศ

ประเทศไทยหนึ่งในผู้นำด้านการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารและมีการพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางทางการแพทย์ครบวงจรซึ่งมีส่วนช่วยในการสนับสนุนอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวในอีกรูปแบบหนึ่ง แต่หากประเทศยังขาดเทคโนโลยีที่ช่วยส่งเสริมความก้าวหน้าทางการแพทย์และการรักษาพยาบาล ปัจจุบันยังคงใช้เทคโนโลยีในการพ่นฆ่าเชื้อเพื่อเตรียมพื้นที่ก่อนและหลังปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่ใช้ทั่วไปไม่มีประสิทธิภาพ และยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ล้าสมัย เช่น การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตฆ่าเชื้อ (UVGI - Ultraviolet Germicidal Irradiation) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการศึกษาและใช้กันมานานตั้งแต่ในช่วงทศวรรษ 1930 โดยมีการติดตั้งในท่อลม และการติดตั้งอยู่ส่วนบนของห้อง (Upper room) ซึ่งวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดการฆ่าเชื้อที่อยู่ในมุมอับหรือซอกหลืบ ทำให้มีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อไม่ดี หรือแม้แต่การพ่นฆ่าเชื้อโดยการใช้ formaldehyde

หรือ formalin มาทำให้ร้อน หรือผสมกับด่างทับทิมเพื่อนำมาใช้ในการอบห้องฆ่าเชื้อในอากาศ ซึ่งหากสัมผัสจะเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อมาก จึงต้องทิ้งระยะเวลาหลังการอบฆ่าเชื้อเป็นเวลานาน รวมไปถึงระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมพื้นที่นาน (ใช้เวลาฆ่าเชือนาน) ดังนั้น การเลือกใช้เทคโนโลยีที่ไม่เหมาะสมจะทำให้มีสารตกค้าง หรือสารเคมีอันตรายตกค้างหลังการใช้งาน จะส่งผลให้เกิดการติดเชื้อซ้ำในระหว่างกระบวนการทำงานหรือกระบวนการผลิตได้

จากความสำคัญดังกล่าวคณะผู้จัดทำ จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องฆ่าเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและยา โรงพยาบาล สถานือนามัย สถานพักฟื้นผู้ป่วยและผู้สูงอายุ ตลอดจนอุตสาหกรรมอื่นที่มีความจำเป็นต้องใช้ห้องคลีนรูมหรือห้องที่มีความสะอาดเป็นพิเศษในการทำงาน โดยการผลิตละอองลอยฆ่าเชื้อ ด้วยวิธีการนี้สามารถกำจัดเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ตามซอกหลืบหรือมุมอับซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการฆ่าเชื้อในปัจจุบันที่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation technology) เพื่อสร้างให้เกิดอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมากจากสารละลายตั้งต้น ซึ่งเป็นสารละลายที่มีสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก ทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกกับโอโซนภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต จนเกิดเป็นอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง และทำให้อยู่ในรูปแบบของละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (1 nm -100 μ m) แขนงลอยอยู่ในอากาศได้นานและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูง (1-3 MHz) ซึ่งอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะไปออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ รวมไปถึงสารที่มีความเป็นพิษย่อยสลายได้ยาก เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds) หรือสารอินทรีย์ไม่พึงประสงค์อื่นๆ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด (ดังรูปที่ 1) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลชนะเลิศ เหรียญทอง (ดังรูปที่ 2) ในการนำผลงานการประกวดและจัดแสดงผลงานระดับนานาชาติ ในงาน “45th International Exhibition of Inventions of Geneva” ณ กรุงเจนีวา สหพันธรัฐสวิส ภายใต้ผลงานเรื่อง “Environmental-friendly, hydroxyl free radical fumigation for fast and complete surface disinfection”



รูปที่ 1.1ภาพจำลองเครื่องต้นเครื่องฟ่นละอองลอยอนุมลอิสระไฮดรอกซิลเชิงพาณิชย์เพื่อขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทยโดยนำเอาเทคโนโลยีที่ได้รับรางวัลเหรียญทองสิ่งประดิษฐ์จากเวทีประกวดนานาชาติ ในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

และยังได้รับความสนใจในเวทีประชุมระดับนานาชาติ (“Hydrogen Peroxide-Based Wet Oxidation to Eliminate Contraceptive Hormone Residues from Pharmaceutical Wastewater”, World Environmental and Water Resources Congress 2017, “Application of Hydroxyl Radical Aerosolization on *E.coli*/coliform Reduction for Rapid Surface Disinfection in Food Processing”, International Food Research Conference 2017) กำลังเผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติ (“Effective microbial disinfection in healthcare settings with hydroxyl radical fumigation”, Journal of Hospital Infection) อีก ทั้ง จด ส ท ธิ บั ต ร (เลขที่ คำ ข อ 1701000719 เรื่อง วิธีการและอุปกรณ์สำหรับฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคด้วยการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลแบบละอองลอย)

จากข้อมูลกระทรวงสาธารณสุข พบว่าในแต่ละปีมีผู้ป่วยจำนวนมากที่เกิดการติดเชื้อขึ้นจากเชื้อโรคแขวนลอยในอากาศเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทั้งชีวิตของผู้ป่วย ครอบครัว รวมถึงงบประมาณในระบบบริการสุขภาพโดยรวมของประเทศ ซึ่งนับเป็นมูลค่ามหาศาล ดังนั้น การควบคุมหรือการลดโอกาสในการติดเชื้อจึงเป็นมาตรการสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสถานพยาบาลหรือสถานประกอบการทุกระดับและทุกแห่ง ที่จะนำมาปฏิบัติเพื่อลดอัตราการติดเชื้อหรือปนเปื้อนเชื้อโรคแขวนลอยที่อยู่ในอากาศ คณะผู้ประดิษฐ์มีความประสงค์ที่จะพัฒนาวิธีการฆ่าเชื้อรูปแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ นอกจากจะมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อเมื่อเทียบกับวิธีการฆ่าเชื้อรูปแบบอื่นแล้ว ยังใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื่อน้อยกว่า รวมทั้งไม่มี

สารเคมีตกค้างและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (ดังรูปที่ 3) จึงนับได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

จากการรายงานของ American Industrial Hygiene Association Position Statement (AIHA) พบว่ามีการใช้สารเคมีในการพ่นฆ่าเชื้อในอากาศบริเวณพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงภายในโรงพยาบาลตั้งแต่ปี 1960 อย่างไรก็ตามพบว่าเทคโนโลยีและสารเคมีที่ใช้ในสมัยก่อนมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน จนกระทั่งปี 2001 เกิดการตรวจพบการระบาดของโรคแอนแทรกซ์ (Anthrax) ในรัฐ Washington D.C. และ New Jersey ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยโรคแอนแทรกซ์เป็นโรคติดเชื้อแบคทีเรียแบบเฉียบพลันเกิดจากเชื้อ *Bacillus anthracis* ซึ่งสามารถติดได้ทั้งในคนและในสัตว์ (สมาคมโรคติดเชื้อในเด็กแห่งประเทศไทย) หลังจากการตรวจพบเชื้อนี้จึงได้มีการตระหนักถึงวิธีการและเทคโนโลยีปัจจุบันที่ใช้ในการฆ่าเชื้อหรือลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียในอากาศถึงความไม่เหมาะสมและไม่มีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันโรคระบาดที่เกิดขึ้นมีความหลากหลายมากขึ้นทุกวัน ดังจะเห็นได้จากการระบาดของโรคต่าง ๆ ได้แก่ โรคมือ เท้า ปากในเด็ก (Hand Foot Mouth Disease) ในปี 2012 (กระทรวงสาธารณสุข, 2012) โรคติดเชื้อไวรัสอีโบลา-มาร์บูร์ก (Ebola-marburg viral diseases), โรคติดเชื้อโคโรนาไวรัส (Coronavirus infection), โรคซาร์ส (SARS), โรคไวรัส RSV (Respiratory Syncytial Virus) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการแพร่กระจายของโรคที่ได้อีกกล่าวมาข้างต้นมีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว โดยการแพร่กระจายของโรคซึ่งมีอากาศเป็นตัวกลางไม่ว่าจะเป็นการแพร่กระจายแบบ Droplet transmission และ/ หรือ Air-borne transmission ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการสูญเสียมากมายจากการได้รับเชื้อ ดังนั้นเทคโนโลยีที่สามารถพ่นฆ่าเชื้อโรค และสลายไอสารระเหยอินทรีย์ โดยไม่ทิ้งสารตกค้าง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสีเขียวที่จะช่วยตัดช่องทางการแพร่กระจายของเชื้อโรคต่างๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตละอองลอยที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อราและแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์จากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่ไม่มีสารพิษตกค้างส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม

- 1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการยกระดับสุขอนามัยและความสะอาดในกระบวนการอุตสาหกรรมให้ปลอดภัยจากเชื้อแบคทีเรียก่อโรค
- 1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพและจลพลศาสตร์ของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในรูปแบบของละอองลอยหรือแอโรซอล (aerosol) ต่อการทำลายเชื้อราและแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ดำรงและทบทวนองค์ความรู้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการยกระดับคุณภาพชีวิตเพื่อส่งเสริมสุขภาพและสุขอนามัยสำหรับการดำรงชีวิตเพื่อป้องกันการติดเชื้อโรค
- 1.3.2 พัฒนากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการยกระดับคุณภาพอาหารปลอดภัยเพื่อส่งเสริมสุขภาพและสุขอนามัยสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร
- 1.3.3 บูรณาการหลักการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอาหารเพื่อสร้างกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่เหมาะสมในการยกระดับคุณภาพอาหารปลอดภัยเพื่อส่งเสริมสุขภาพและสุขอนามัยสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร
- 1.3.4 ออกแบบและสร้างเครื่องจักรและอุปกรณ์ต้นแบบในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจากปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกด้วยแสงยูวีร่วมกับก๊าซโอโซนและ/หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์เมื่อนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงทดสอบในระบบโดยสร้างสภาวะจำลองต้นแบบ
- 1.3.6 ประยุกต์ใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในสภาพแวดล้อมจริงและทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์
- 1.3.7 ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ก่อให้เกิดโรคและความพึงพอใจในการใช้งานจริงเพื่อใช้ในการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบให้เหมาะกับการใช้งาน
- 1.3.8 ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

บทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม (รายงานการวิจัย) ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้ รวมถึงกระบวนการแอดวานส์ออกซิเดชัน การฉายรังสียูวี โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.1 กระบวนการแอดวานส์ออกซิเดชัน (Advanced oxidation processes)

เมื่อทำการเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำทิ้งที่มีลักษณะเฉพาะ ต้องมีการพิจารณาทั้งความเป็นไปได้ของการบำบัดและด้านเศรษฐศาสตร์ (ค่าใช้จ่าย) ของกระบวนการด้วยเช่นเดียวกัน เทคนิคที่ใช้มีหลากหลายชนิด เช่น การบำบัดน้ำเสียทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ กระบวนการแอดวานส์ออกซิเดชัน (AOPs) เป็นการบำบัดทางเคมีและใช้ในการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ที่พบในน้ำเสียซึ่งยากต่อการจัดการทางชีวภาพ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่กำจัดได้ง่ายขึ้น กระบวนการแอดวานส์ออกซิเดชันเกี่ยวข้องกับการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO^\cdot), สารออกซิแดนซ์ที่ทรงพลังและไม่มีความจำเพาะ (ตารางที่ 2.1) (Munter,2001)

ตารางที่ 2.1 Relative oxidation activity ของสารออกซิไดซ์บางชนิด (Munter, 2001)

Oxidizing agent	Relative oxidation activity
Positively charged hole on titanium dioxide, TiO_2^+	2.35
Hydroxyl radical	2.05
Atomic oxygen	1.78
Ozone	1.52
Hydrogen peroxide	1.31
Permanganate	1.24
Hypochlorous acid	1.10
Chlorine	1.00

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสำหรับสารประกอบอินทรีย์ (Munter, 2001)

Organic compound	Rate constant [M ⁻¹ s ⁻¹]	
	O ₃	HO
Alcohols	10 ⁻² -1	10 ⁸ -10 ⁹
Aromatics	1-10 ²	10 ⁸ -10 ¹⁰
Chlorinated alkenes	10 ³ -10 ⁴	10 ⁹ -10 ¹¹
Ketones	1	10 ⁹ -10 ¹⁰
N-containing organics	10-10 ²	10 ⁸ -10 ¹⁰
Phenols	10 ³	10 ⁹ -10 ¹⁰

เป็นที่ทราบกันดีว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นหนึ่งในตัวออกซิไดซ์ที่มีการใช้งานมากที่สุด ทำงานได้อย่างรวดเร็วกับ โมเลกุลอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ค่าคงที่อัตรา $10^8 - 10^{11} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (ตารางที่ 2.2) (Munter, 2001) ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารอินทรีย์แต่ละชนิด ไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นสามารถโจมตีอนุมูลสารอินทรีย์ได้โดยการเติมอนุมูลอิสระ การกำจัดไฮโดรเจน การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการรวมตัวของอนุมูลอิสระ

Radical addition ปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิลและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัวหรืออะลิฟาติกทำให้เกิดอนุมูลของสารอินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์ต่อไปด้วยออกซิเจนหรือเหล็กเพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความเสถียร



Hydrogen abstraction อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้เพื่อกำจัดไฮโดรเจนออกจากสารประกอบอินทรีย์ก่อนอนุมูลอิสระอินทรีย์และเริ่มปฏิกิริยาลูกโซ่ที่การทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระกับออกซิเจน สิ่งนี้ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระเพอร์ออกซิลซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์อื่นและอื่นๆ



Electron transfer ผลการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในรูปแบบของไอออนที่มีความจุสูง การออกซิเดชันของอะตอมเดี่ยวไอออนลบจะส่งผลให้เกิดการก่อตัวของอะตอมหรืออนุมูลอิสระ



Radical combination อนุมูลอิสระสองตัวก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสถียร



โดยทั่วไปปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและสารประกอบอินทรีย์จะผลิตน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือ อย่างไรก็ตามการโจมตีของอนุมูลอิสระ HO^\cdot ในออกซิเจน สร้างอนุกรมปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ซับซ้อน ซึ่งเส้นทางที่แน่นอนของปฏิกิริยาเหล่านี้ต่อการมีเนอรัลไลเซชันที่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ยังไม่ชัดเจนนัก ตัวอย่าง เช่น คลอรีนที่มีสารประกอบอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์เป็นอันดับแรกสำหรับตัวกลาง เช่น อัลดีไฮด์และกรดคาร์บอกซิลิก และสุดท้ายก็คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเป็นคลอรีนไอออน (Munter, 2001)

จุดสำคัญมากซึ่งต้องพิจารณาในกรณีของน้ำธรรมชาติ คือ การปรากฏตัวของคาร์บอนเนต การดักจับของอนุมูลอิสระ HO^\cdot ที่มีประสิทธิภาพโดยไปคาร์บอนเนต (สมการ 5) และคาร์บอนเนต (สมการ 6) อนุมูลดักจับอิสระสามารถลดประสิทธิภาพของการลดมลพิษ



อย่างไรก็ตามประจุลบคาร์บอนเนตที่สร้างขึ้นก็เป็นตัวออกซิเดนต์ตัวมันเอง แต่พลังการออกซิเดชันนั้นมีค่าอนุมูลอิสระเป็นบวกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอนุมูลอิสระ HO^\cdot (Legrimi et al, 1993) อัตราการทำลายของสารปนเปื้อนนั้นแปรผันตามอัตราส่วนคงที่ของสารมลพิษที่มีค่าความเป็นพิษต่อเซลล์ ดังที่เราเห็นได้จากตารางที่ 2.2

อัลคิลคลอรีนจะสลายตัวเร็วที่สุดเนื่องจากพันธะคูมีแนวโน้มที่จะถูกโจมตีด้วยไฮดรอกซิลสูง โมเลกุลที่อิมตัวเช่นแอลเคนยากต่อการออกซิไดซ์มากกว่าเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นช้ากว่า (ตารางที่ 2.2) พลัง

อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนั้นให้กระบวนการแคว้นออกซิเดชันซึ่งมีความสามารถในการทำลายออกซิเดชันของสารประกอบทอไฟกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ธรรมชาติหรือออกซิเดชันของโอโซน AOP ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การทำลายสารกำจัดศัตรูพืชโดยการย่อยสลายด้วยแสง (photochemical degradation) (UV / O₃ และ UV / H₂O₂) (Andreozzi et al., 2003) การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) (TiO₂ / UV, Fenton และ photo-Fenton) (Legrini et al., 2536) และกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (O₃, O₃ / H₂O₂ และ H₂O₂ / Fe²⁺) การสลายตัวของสารอินทรีย์จากน้ำเสียสิ่งทอ เช่น สารลดแรงตึงผิวและสีย้อมบำบัดด้วยโฟโตเฟนตัน (photo-Fenton) และ H₂O₂/UV-C การทำลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำทิ้งจากโรงกระดาษโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) ละลายหลุมฝังกลบด้วยกระบวนการเฟนตัน น้ำเสียโรงสีมะกอกโดยการออกซิเดชันด้วยอากาศขึ้น (Gomes et al., 2007) ฯลฯ วิธีการแคว้นออกซิเดชันสามารถแบ่งออกเป็นออกซิเดชันเย็นและร้อน วิธีการออกซิเดชันเย็นทำงานที่อุณหภูมิและความดันใกล้เคียงกับโดยรอบเมื่อเทียบกับการเกิดออกซิเดชันร้อนที่มีอุณหภูมิและความดันสูง การใช้งานวิธีการออกซิเดชันเย็นจะเหมาะสมกับน้ำทิ้งที่มีซีโอดีในปริมาณค่อนข้างน้อย (≤ 5.0 g L⁻¹) ส่วนที่มีซีโอดีที่สูงขึ้นจะต้องใช้สารตั้งต้นที่มีราคาแพงจำนวนมาก เช่น O₃ และ H₂O₂ (Andreozzi et al., 1999) สำหรับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูงกว่า (≥ 5.0 g L⁻¹) เทคนิคการออกซิเดชันแบบร้อนจะสะดวกกว่า (หรือ เหมาะสมกว่า)

2.2 การบำบัดด้วยอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet (UV) treatment)

แสง UV-C ที่ความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตรแสดงถึงคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคต่อแบคทีเรียและไวรัสด้วยเหตุนี้ UV จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตน้ำผลไม้เพื่อลดเชื้อก่อโรคลง 5 log ตามแนวทางมาตรฐานระบบการการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤตที่ต้องควบคุมในการผลิตอาหาร (Hazard Analysis Critical Control Point ; HACCP) สำหรับการแปรรูปน้ำผลไม้ นอกจากนี้การฉายรังสียูวีได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการลดแอโรบิกแบคทีเรียและ *Salmonella typhimurium* บนเปลือกไข่ (Kuo et al., 1997) และยับยั้ง *Salmonella spp.* หรือ *Escherichia coli* O157: H7 ที่ได้ทำการเติมเชื้อลงบนแอปเปิ้ล ใบบักกาดหอม และมะเขือเทศ (Yaun et al., 2004) อ้างอิงจาก Munter (2001), AOPs อาศัยการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระพลังงานสูง เช่น โอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีหรือไม่มี UV เพื่อสร้างตัวกลางปฏิกิริยาที่มีพลังสูงมากคืออนุมูลอิสระไฮดรอกซิล พลังงานออกซิเดชันที่ออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระของ AOPs ได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารปนเปื้อนในน้ำ

เถีย (Pignatello, 1992; Ormad et al., 1994; Doong and Chang, 1998 และ Hwang et al., 2002) เนื่องจากศักยภาพในการเกิดการออกซิเดชันในหมู่สารออกซิเดนต์หลายชนิด AOPs อาจพิสูจน์ได้ว่ามีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์และความปลอดภัยของกระบวนการแปรรูปสินค้าการเกษตรขนาดย่อม อีกวิธีหนึ่งคือ การดูแลรักษาอาหารด้วยการฉายรังสียูวี สเปกตรัมรังสียูวีแบ่งออกเป็น 3 ประเภทขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น UV-A มีความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดจาก 315 ถึง 400 นาโนเมตร UV-B ขยายจาก 280 เป็น 315 นาโนเมตรและ UV-C (100 ถึง 280 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าฆ่าเชื้อโรคได้ รังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดการสลับขั้วของเชื้อหุ้มเซลล์และเกิดการไหลของไอออนิกที่ผิดปกติในระดับเซลล์ นำไปสู่การก่อตัวของ pyrimidine dimers ในสายดีเอ็นเอ เนื่องด้วยการกลายพันธุ์ของดีเอ็นเอ การถอดรหัสและการจำลองของเซลล์จะถูกปิดกั้นทำให้เซลล์ตาย (Allende and Artes, 2003 และ Allende et al., 2007) การดูดซับของดีเอ็นเอมีมากที่สุด ใน UV-C ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นที่สุด แต่มีพลังงานสูงสุดดังนั้นจึงใช้ในการแปรรูปอาหารเพื่อจุดประสงค์ในการฆ่าเชื้อ โดยที่ไม่มีการใช้ความร้อนและไม่มีการปนเปื้อนบนพื้นผิวของอาหาร (Koutchma et al., 2009) องค์การอาหารและยาอนุมัติการฆ่าเชื้อด้วย UV เป็นทางเลือกแทนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนกับผลิตภัณฑ์จำพวกน้ำผลไม้ ในระเบียบดังกล่าวจะชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแสง (photochemical) ที่เกิดจากการฆ่าเชื้อด้วย UV ไม่มีนัยสำคัญใดๆ ทางพิษวิทยา ในทางกลับกัน แสง UV ถูกพิจารณาโดยสหภาพยุโรป (EU) ว่าเป็นเทคโนโลยีการฉายรังสี กระบวนการฉายรังสีสำหรับอาหารยังไม่ได้ได้รับความเห็นชอบและยังอยู่ในระหว่างการอภิปรายว่าอาหารประเภทใดที่ได้รับอนุญาตให้ใช้รังสีได้ (Koutchma et al., 2009) การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยการฆ่าเชื้อด้วยแสง UV ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของจุลินทรีย์ที่อาจมีความทนทานแตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างผนังเซลล์และองค์ประกอบของเซลล์ที่ต่างกัน แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วรังสียูวีจะมีประสิทธิภาพมากกว่าในขนาดที่สูงกว่า แต่ก็มียางานว่าทำให้เกิดความเครียด (สภาวะไม่เหมาะสม) ด้านการหายใจในพืชผักและยังเกิดมากขึ้นเมื่อได้รับในปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นอันตรายการหายใจของผักกาดหอม (Allende and Artes, 2003 และ Allende et al., 2007) มีรายงานว่าที่ขนาด $7.11 \text{ kJ} / \text{m}^2$ (ขนาดสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง) นำไปใช้กับส่วนต่าง ๆ ของผักกาดหอมเรด โอ๊กลิฟทำให้เกิดการอ่อนตัวและเพิ่มสีน้ำตาลของผลผลิต (Allende et al., 2007) อย่างไรก็ตามควรประเมินกลยุทธ์การประยุกต์ใช้สำหรับอาหารบางประเภทเนื่องจากพารามิเตอร์คุณภาพที่ได้นั้นแตกต่างกันไปตามอาหารและระดับปริมาณขนาด (Dose level) (Allende and Artes, 2003) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระดับยีสต์และรา อายุการเก็บรักษาอย่างน้อยที่สุดของผักกาด โอ๊กลิฟแดงที่ผ่านการแปรรูปคือ 1 วัน ที่ขนาด $1.18 \text{ kJ} / \text{m}^2$ และนานขึ้น

3 วันเมื่อใช้ที่ขนาด $7.11 \text{ kJ} / \text{m}^2$ (Allende et al., 2007) นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแบคทีเรียกรดแลคติกที่ขนาดสูงขึ้น ($2.37 \text{ kJ} / \text{m}^2$, $7.11 \text{ kJ} / \text{m}^2$) อย่างไรก็ตามมีการระบุว่า การฆ่าเชื้อด้วย UV-C ดูเหมือนว่าจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกรดแลคติกบนผักสลัดแดงโลโลโรสซ่า (lollorosso lettuce) ที่ปริมาณสูงสุด ($8.14 \text{ kJ} / \text{m}^2$) (Allende and Artes, 2003)

ข้อเสียของการใช้ UV-C คือ มีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่จำกัดเกี่ยวกับประสิทธิภาพด้านจุลินทรีย์และความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใช้ แต่การใช้ต้นทุนต่ำ ไม่มีสารตกค้างและใช้เวลาน้อยแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบ (Yaun et. al., 2004).

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบของการฆ่าเชื้อด้วย UV (254 nm) สำหรับการปนเปื้อนของผักกาดหอม

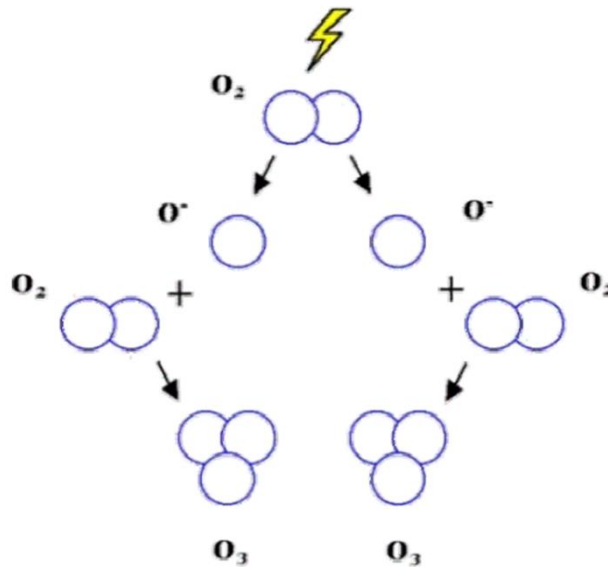
Type of microorganism	Application dose (kJ/m ²)	Fresh produce type	Log 10 CFU/g reduction	Reference
Psychrotrophic bacteria	8.14	Whole lettuce (lollorosso)	~ 1.0*	(Allende et al., 2003)
Coliforms			~ 0.6*	
Yeast count			~ 0.8*	
Enterobacteriaceae	1.18	Shredded lettuce (Red oak)	~0.5*	(Allende et al., 2007)
	7.11		~ 0.8*	
Total aerobic count	7.11		~ 1.1*	
	2.37			

* การลดลงของจุลินทรีย์เมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่ไม่ได้รับการฆ่าเชื้อหลังจากการเก็บรักษา 9-10 วันที่ 5 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการตัดแปลง

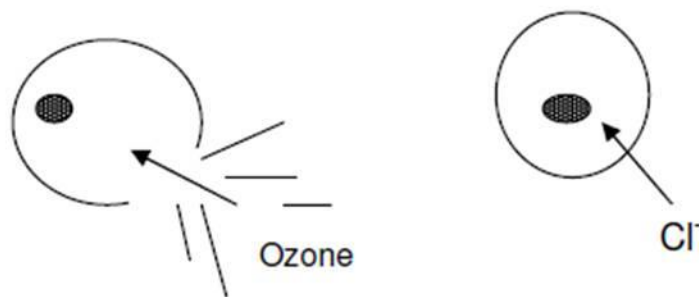
2.3 การฆ่าเชื้อด้วยโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซสีน้ำเงินอ่อนสามารถละลายในน้ำได้และถูกนำมาใช้ในการทำให้น้ำดื่มสะอาดบริสุทธิ์ตั้งแต่ปลายศตวรรษที่สิบเก้า (Graham, 1997) โอโซนพบได้ตามธรรมชาติในชั้นบรรยากาศของโลกเกิดจากการที่

แสงหรือแสงอัลตราไวโอเล็ตพลังงานสูงทำลายโมเลกุลออกซิเจน เกิดออกซิเจน โมเลกุลเดี่ยวสร้างพันธะกับโมเลกุลออกซิเจน 2 อะตอมฟอรั่มตัวเป็นออกซิเจน 3 อะตอม (O_3) หรือ โอโซน (รูปที่ 2.1) โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อโรค โอโซนส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์โดยการออกซิไดซ์โมเลกุลอินทรีย์ที่มีอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายและแตกในที่สุด (รูปที่ 2.2) แตกต่างจากสารฆ่าเชื้ออื่นๆ ที่ใช้กันทั่วไป เช่น คลอรีนหรือกรดอินทรีย์ โอโซนจะเข้าสู่เซลล์โดยตรงไม่จำเป็นต้องใช้ไบโอไซด์เพื่อขนส่งข้ามเยื่อหุ้มเซลล์และเข้าไปในเซลล์ (Rice, 1999) โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความเชื่อกันว่าโอโซนทำปฏิกิริยากับไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้สำหรับจุลินทรีย์แกรมลบทั้งชั้นลิโปโปรตีนและชั้นลิโปพอลิแซ็กคาไรด์จะถูกทำลายซึ่งส่งผลให้เกิดการซึมผ่านของเซลล์เพิ่มขึ้น (Das et al., 2006)



รูปที่ 2.1 การก่อตัวของโอโซน



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบรูปแบบการฆ่าเชื้อโรค

2.3.1 โหมมการยับยั้งจุลินทรีย์ด้วยโอโซน

โอโซนมีสเปกตรัมการดูดซับที่กว้างขวาง ประสิทธิภาพของมันได้รับการพิสูจน์กับแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ (Ingram and Haines, 1949; Guzel-Seydim *et al.*, 2004), สปอร์ของแบคทีเรีย (Ishizaki *et al.*, 1986; Khadre and Yousef, 2001), เชื้อรา (Palou *et al.*, 2001; Allen *et al.*, 2003; Oztekin *et al.*, 2006), ไวรัส (Kim *et al.*, 1980; Roy *et al.*, 1981; Ohmine, 2005) และ โปรโตซัว (Khalifa *et al.*, 2001) ดังนั้นจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีความอ่อนไหวต่อโอโซนซึ่งแสดงว่าเซลล์มีหลายจุดสำคัญที่เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับจุดเหล่านี้แล้วจะนำไปสู่การตายของเซลล์ หนึ่งในจุดที่แสดงให้เห็นการทำงานของโอโซนคือ ที่ไขมันไม่อิ่มตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ (Victorin 1992; Thanomsub *et al.*, 2002) จากการศึกษาของ Scott and Lesher (1963) พบว่าโอโซนทำปฏิกิริยากับไขมันไม่อิ่มตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ *E. coli* ในที่สุดทำให้เกิดการรั่วไหลของเซลล์และตายนักวิจัยคนอื่นๆ วิจัยเกี่ยวกับการเสียหายของดีเอ็นเอโดยโอโซนและการกลายพันธุ์ในแบคทีเรีย (Ishizaki *et al.*, 1986) การรักษาไวรัสด้วยโอโซนได้แสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่เกิดจากการทำลายโปรตีนชั้นนอกสุดของไวรัส (capsid protein) ทำลายความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มไขมัน (lipid envelopes) รวมทั้งทำให้เกิดความเสียหายของ RNA หรือ DNA (Kim *et al.*, 1980; Roy *et al.*, 1981; Ohmine, 2005) การยับยั้งสปอร์เกี่ยวข้องกับ ความเสียหายของส่วนที่เคลือบสปอร์ซึ่งอาจทำให้โอโซนแทรกซึมเข้าไปในแกนกลางของสปอร์ (Khadre and Yousef, 2001) ออกซิเจนชนิดที่เกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน โดยเฉพาะอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลอนุมูลนั้นมีความเกี่ยวข้องกับยาฆ่าเชื้อ โดยอนุมูลนี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงที่สุดและสามารถสร้างความเสียหายให้กับองค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ ในการศึกษาเกี่ยวกับสปอร์ของ *Bacillus*

subtilis พบว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีหน้าที่หลักในการยับยั้งแบคทีเรีย (Cho et al., 2002) ในทางกลับกัน Hunt and Marininas (1997) รายงานว่าการเติมอนุมูลอิสระย่อยสลายเพื่อฆ่าเชื้อไม่ทำให้การยับยั้ง *E. coli* ลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงการมีส่วนในการยับยั้งจุลินทรีย์ของโมเลกุลโอโซน

2.3.2 ความหมายของโอโซน

โอโซน (O_3) เป็นรูปแบบของก๊าซออกซิเจนที่มีออกซิเจน 3 อะตอมในโมเลกุลของมัน Bablon et al. (1991) รายงานว่าโอโซนสลายตัวได้เองตามธรรมชาติและถือได้ว่าเป็นสารเคมีไม่ถาวร โอโซนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทรงพลังกว่าออกซิเจน มันทำปฏิกิริยากับสารส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิแวดล้อม แต่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ไม่มีสารตกค้างที่เป็นอันตราย นอกจากนี้โอโซนจะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าและทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าสารออกซิไดซ์อื่น ๆ เช่น คลอรีน เนื่องจากอะตอมออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นมา 1 อะตอมซึ่งสามารถแบ่งอะตอมออกซิเจนกับสารอื่นๆ เพื่อออกซิไดซ์ทำให้อะตอมโอโซนที่เหลืออยู่ 2 ตัวกลายเป็นออกซิเจนปกติที่พบในอากาศ โอโซนสามารถอยู่ได้นานถึง 12 ชั่วโมงในอากาศและประมาณ 20 นาทีในสารละลายก๊าซ ในทางกลับกันเมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหารมันจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว ก๊าซโอโซนเป็นที่ทราบกันว่ามีสีฟ้าที่สังเกตเห็นได้จึงทำให้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของโอโซนได้โดยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ผลกระทบของโอโซนจะเกิดจากการฆ่าโดยตรงและการเกิดออกซิเดชันของสารชีวภาพ สำหรับแบคทีเรียโอโซนจะเข้าไปใกล้และจับกับสารประกอบอินทรีย์ในผนังเซลล์ของแบคทีเรีย สำหรับสารที่มีพันธะคู่อนุมูลอิสระของโอโซนจะสลายพันธะคู่ในผนังเซลล์และทำลายโครงสร้างการเลือกผ่านของเซลล์ ในสารละลายจะเกิดการสลายตัวของโอโซนขึ้นและผลิตหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำลายเกือบทุกสาร ดังนั้นการใช้โอโซนจะเป็นประโยชน์ในการทดแทนตัวทำลายและทำลายสารพิษที่ไม่พึงประสงค์

2.3.3 การนำไปใช้งานของโอโซน

ในยุโรปการใช้โอโซนเป็นที่รู้จักกันดีในการฆ่าเชื้อโรคน้ำที่ปนเปื้อน (Rogers et al., 1992) การกำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในกระบวนการอุตสาหกรรม การกำจัดคราบสกปรก กลิ่น และสี และการทำความสะอาดน้ำเสียต่างๆ (Bablon et al., 1991) Verostko et al., 1992 และ Hitchens et al., 1994 เนื่องจากการฆ่าเชื้อของโอโซนอาจถูกนำมาใช้เพื่อลดจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายและสารประกอบที่เป็นพิษ เมื่อเปรียบเทียบกับคลอรีนนั่น โอโซนได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นสารต้านจุลชีพที่แข็งแกร่งและรวดเร็วกว่าสำหรับการฆ่าเชื้อสปอร์ เชื้อจากอูจจาระ

และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและไวรัส (Da Silva et al., 1998) ความสามารถของโอโซนในการฆ่าเชื้อนั้นถูกค้นพบในปี 1886 และประสิทธิภาพในการต่อต้านจุลินทรีย์นั้นถูกค้นพบในปี 1891 ที่ Whiting, Indiana ในปี 1940 โอโซนถูกใช้ครั้งแรกสำหรับการบำบัดน้ำ นอกจากนี้โอโซนยังถูกนำมาใช้ในการผลิตอาหารตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 สำหรับการเก็บรักษาอาหารและส่วนผสมอาหาร เช่น นม ผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เคซีน และอัลบูมิน (Graham, 1997; Kim et al., 1999) งานวิจัยด้านอาหารส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับโอโซนนั้นส่วนใหญ่เน้นไปที่การควบคุมทางจุลชีววิทยาหรือการสุขาภิบาล โอโซนได้ถูกนำไปใช้ในการล้างพิษของหอยนางรม (Blogoslawski et al., 1979) เพื่อบำบัดน้ำเย็นที่ใช้แล้วในกระบวนการผลิตสัตว์ปีก (Chang and Sheldon, 1989) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เพื่อควบคุมจุลินทรีย์ในสัตว์ปีก เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการสลายสารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง การทำลายจุลินทรีย์และการสุขาภิบาลปลาสดหรือสำหรับการฟอกสีขี้มูลโอโซนถูกนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์ขี้มูลหรือแป้ง พบว่าบะหมี่ดิบญี่ปุ่นแบบแพ็คมีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น 2-5 เท่าเมื่อใช้โอโซน 0.5-50 ppm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Naito et al., 1989) อาจจะใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพแป้งสาลีซึ่งเกี่ยวข้องกับการฟอกสีและการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงรีโอโลยีของอาหารเหลวเพื่อให้ยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นการใช้กระบวนการโอโซนเข้มข้นกับแป้งสาลีอาจมีผลให้เกิดการฟอกสีได้อย่างรวดเร็ว ปรับปรุงการทำงานและลดปริมาณจุลินทรีย์ นอกจากนี้ Voraputhaporn (1996) ยังได้ทำการทดสอบแป้งข้าวสาลีที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นและรายงานถึงค่าความหนืดสูงสุดที่เพิ่มขึ้น (PV) อุณหภูมิที่เกิดเจลลิตินในเซชันสูงสุดมีค่าสูงขึ้น แต่เอนทัลปีและอุณหภูมิของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมันน้อยกว่าอันตาร์ซออกซิไดส์ (แป้งที่ไม่ได้ดัดแปร) อย่างไรก็ตาม ยังมีรายงานด้วยว่าเอนทัลปีของปฏิกิริยาคูลความร้อนขึ้นที่สองจากแป้งที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นเมื่อเทียบกับตัวควบคุม อาจเกี่ยวข้องกับการเกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้งซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

2.3.4 วิธีการผลิตโอโซน

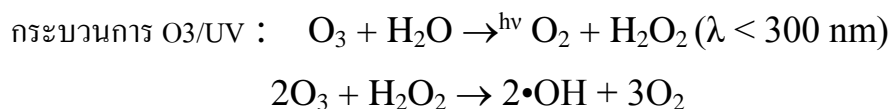
มี 3 วิธีในการสร้างโอโซน ได้แก่ การปล่อยประจุแบบโคโรนา การแฟรงคีสยิว และการผลิตโอโซนด้วยไฟฟ้าเคมี ในการปล่อยประจุแบบโคโรนา อากาศจะถูกแปลงเป็นโอโซนด้วยกระบวนการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงสูง กระแสไฟฟ้ากระตุ้นอิเล็กตรอนของออกซิเจนส่งผลให้เกิดการแยกโมเลกุลของออกซิเจน และอะตอมที่แยกออกมาจะรวมกับโมเลกุลของออกซิเจนอื่นๆ เกิดการฟอร์มตัวเป็นโอโซน (Kim et al., 1999)

อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้มีข้อเสียบางประการ เช่น ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง สามารถเกิดการปนเปื้อนสารพิษได้โดยวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และความเข้มข้นของโอโซนต่ำเพียง 2.5 ถึง 7.5 wt% (Nebil, 1981) การปล่อยประจุแบบโคโรนานั้นคล้ายกับการลดน้ำหนักให้โอโซนในธรรมชาติและการแผ่รังสียูวีนั้นคล้ายคลึงกับการที่รังสียูวีจากดวงอาทิตย์ผลิตโอโซนในธรรมชาติ การผลิตโอโซนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีทางเลือกสำหรับการผลิตโอโซนซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้น้ำในเซลล์อิเล็กโทรไลติก ซึ่งออกซิเจนในน้ำจะถูกแปลงเป็นโอโซนโดยผ่านน้ำสู่พื้นผิวที่มีประจุบวกและพื้นผิวที่มีประจุลบ (Murphy et al., 1994 และ Hitchens et al., 1994) ข้อดีของวิธีนี้คืออุปกรณ์ที่จำเป็นนั้นไม่ซับซ้อนมืออยู่ทั่วไป ใช้สารตั้งต้นและได้ผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัย และผลิตโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงประมาณ 20 wt%

2.4 การฆ่าเชื้อด้วยโอโซน/ยูวี (O₃ / UV)

2.4.1 คำอธิบายกระบวนการ

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของโอโซนค่อนข้างสูงจึงสามารถนำรังสี LP-UV หรือ MP-UV ไปใช้กับน้ำโอโซนเพื่อสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ การใช้รังสี UV ไม่ว่าจะเป็น MP-UV, LP-UV หรือ P-UV เพื่อผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วยโอโซน เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่อไปนี้:



ดังที่แสดงให้เห็นข้างต้นว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของโอโซนสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และดังนั้น O₃ / UV เกี่ยวข้องกับกลไกการทำลายสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ใน H₂O₂ / O₃ และ H₂O₂ / UV กลไกเหล่านี้รวมถึงการทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโอโซน โฟโตไลซิสโดยตรง โดยการฉายรังสียูวีหรือทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล ในการใช้งานส่วนใหญ่ที่ผ่านมา O₃ / UV, หลอด LP-UV ได้ถูกนำมาใช้งานแล้ว อย่างไรก็ตาม MP-UV และ P-UV ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถในการฆ่าเชื้อและประโยชน์จากการสลายด้วยแสงโดยตรง

2.4.2 ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดีและข้อเสียของระบบ O₃ / UV

สรุปข้อดีของการใช้ระบบ O_3/UV โดยย่อคือ

- ประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนการ O_3/UV รวมกันนั้นมักจะสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารเติมแต่งของโอโซนและ UV เพียงอย่างเดียว (Prado และ Esplugas, 1999) ขนาดของผลเสริมฤทธิ์นี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อนที่สนใจ (Prado และ Esplugas, 1999)
- กระบวนการที่ใช้ O_3/UV รวมกันมีประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมากกว่ากระบวนการที่ใช้ H_2O_2/UV รวมกันสำหรับความเข้มข้นของสารออกซิแดนท์ที่เท่ากัน โดยใช้ LP-UV เป็นเพราะสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ O_3 ที่ 254 นาโนเมตร เป็น 2 เท่ามากกว่าของ H_2O_2 ซึ่งบ่งชี้ว่าจำเป็นต้องมีความเข้มของรังสียูวีที่ต่ำกว่าหรือปริมาณ H_2O_2 ที่สูงขึ้นเพื่อสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจำนวนที่เท่ากันสำหรับกระบวนการทั้ง 2 นี้ (Glaze et al., 1987) อย่างไรก็ตามสำหรับหลอด MP-UV, กระบวนการ H_2O_2/UV จะสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้มากกว่ากระบวนการ O_3/UV โดยสมมติว่าเปอร์ออกไซด์ดูดซับมากกว่า 17 เปอร์เซ็นต์ของแสงที่ฉาย (200 nm ถึง 300 nm)

ข้อเสียของระบบ O_3/UV คือ:

- ดังที่กล่าวมาก่อนหน้า การใช้โอโซนกับแหล่งน้ำที่มีความเข้มข้นของโบรไมด์สูง ($> 0.1 \text{ mg/L}$) อาจส่งผลให้เกิดการก่อตัวของโบรเมต
- โดยทั่วไปกระบวนการ O_3/UV ต้องได้รับใบอนุญาตสำหรับการปล่อยโอโซนนอกเหนือไปจากระบบบำบัดก๊าซนอกระบบเพื่อลดโอโซน การควบคุมเหล่านี้จะเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานและต้นทุนของระบบ
- แม้ว่า O_3/UV จะมีประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมากกว่า H_2O_2/UV หรือ H_2O_2/O_3 แต่กระบวนการ O_3/UV นั้นมีประสิทธิภาพน้อยกว่า H_2O_2/UV หรือ H_2O_2/O_3 ในการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในปริมาณมาก กับความสามารถในการละลายในน้ำต่ำของ O_3 เมื่อเทียบกับ H_2O_2 ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานจึงคาดว่าจะสูงกว่ามาก ผลผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสามารถลดลงได้อีกหากมีพารามิเตอร์ที่รบกวน (เช่น ไนเตรต, ความขุ่น, หรือเหล็ก) ในแหล่งน้ำ
- ก๊าซ O_3 จะต้องใช้การแพร่กระจายไปในน้ำ จึงอาจส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับ H_2O_2 ซึ่งถูกป้อนเป็นสารละลายของเหลว
- แสงยูวีส่องลงในแหล่งน้ำและดังนั้นประสิทธิภาพของกระบวนการอาจได้รับผลกระทบจากความขุ่น (Prado และ Esplugas, 1999)

- ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้มีสารประกอบที่רבกวนจำนวนมากซึ่งดูดซับแสงยูวี (เช่น ไนเตรตและเหล็ก) และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ
- หลอดไฟยูวีและหลอดที่ชำรุดเสียหายอาจทำให้สารปรอทปนเปื้อนน้ำที่ผ่านการบำบัด แม้ว่าความผิดพลาดของหลอดไฟทั้งหมดจนถึงปัจจุบันส่งผลให้ระดับค่าความเข้มข้น Hg ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่ม
- การวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ยูวีร่วมกับขั้นตอนก่อนและ/หรือ ขั้นตอนหลังใช้คลอรีนอาจทำให้เกิดการก่อตัวของ THM และ HAA9 ที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณรังสียูวี > 100 mJ / cm²

2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เป็นน้ำยาฆ่าเชื้อ (เปรียบเสมือนสารกันบูด) เนื่องจากมันทำหน้าที่ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อย่างรวดเร็วและไม่มีผลในระยะยาวหรือผลข้างเคียง การทำงานที่ใช้เวลาไม่นานนี้เกิดจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนและน้ำเมื่อสัมผัสกับสารอินทรีย์ การต้านจุลชีพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น ไม่ได้เกิดจากคุณสมบัติออกซิเดชันโมเลกุล แต่ส่วนใหญ่เกิดจากการผลิตสารออกซิแดนซ์ที่ทรงพลังอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนแบบเดี่ยว, อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์, อนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิล ปฏิกริยาของออกซิเจนเหล่านี้ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างถาวรกับส่วนประกอบของเซลล์ เช่น เอนไซม์ ส่วนประกอบของเมมเบรน และ DNA ในความเป็นจริงสารละลาย H₂O₂ ค้ำยันน้ำเพียงอย่างเดียวไม่มีอนุมูลอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโปรตีนไขมัน หรือกรดนิวคลีอิก H₂O₂ นั้นผลิตขึ้นตามธรรมชาติโดยระบบของเอนไซม์และถูกใช้โดยฟาโกไซท์ (phagocytes) ในการทำลายแบคทีเรียภายในฟาโกไลโซโซม

จากอนุมูลอิสระที่กล่าวถึงข้างต้น การผลิตไฮดรอกซิล (HO) ดูเหมือนจะมีบทบาทมากที่สุดในการเป็นพิษของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อผลิตใกล้กับ DNA อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลจะมีลักษณะพิเศษคือสามารถเติมตัวมันเองไปยังเบสดีเอ็นเอและไฮโดรเจนอะตอมจากเกลียวดีเอ็นเอ (DNA helix) ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลอาจทำลายเชื้อหุ้มเซลล์ได้ ในการศึกษาแบบเชื้อหุ้มแบบจำลอง อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (ที่สร้างจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ Cu(en)₂) เพิ่มการเกิด lipid peroxidation ตลอดจนการซึมผ่านระบบเชื้อหุ้มแบบจำลองของไอออน แม้ว่าจะผ่านกลไกอิสระก็ตาม นอกจากนี้หลังจากการสัมผัสไฮดรอกซิล 17 นาทีจะทำให้เกิดการสลายของเชื้อหุ้มอย่างสมบูรณ์

มีรายงานว่าการผลิต HO จาก H₂O₂ นั้นผลิตได้หลายวิธี ตัวอย่างที่มีการกล่าวถึงโดยทั่วไปคือปฏิกิริยาเฟนต์ัน (Fenton reaction) โดยสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์จะรีดิวซ์ Fe³⁺ เป็น Fe²⁺ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ H₂O₂ เพื่อสร้างไฮดรอกซิลแอนไอออน อนุมูลไฮดรอกซิลและ Fe³⁺ สอดคล้องกับการเจริญเติบโตของ *Staphylococcus aureus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กเพิ่มขึ้น พบว่า H₂O₂ ฆ่าเชื้อได้เพิ่มมากขึ้น โดยการเติมตัวดักจับ HO ที่มีผลป้องกันการฆ่าเช่นนี้ ในการศึกษาเปรียบเทียบนั้นระบุว่าอนุมูลเฟอร์ริลเป็นชนิดที่สร้างความเสียหายให้กับ DNA ใน *E. coli* ไม่ใช่อนุมูลไฮดรอกซิล

ไฮสค์ของการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ทำการวิจัยกับแบคทีเรียต่างๆ รา และยีสต์ ซึ่งการทำงานของมันจะดีที่สุดต่อแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนและแบคทีเรียแกรมลบ นอกจากนี้ยังพบว่า Enterobacteriaceae นั้นไวกว่าสิ่งมีชีวิตอื่นที่ทดสอบ *E. coli* แสดงค่า D 0.57 นาทีเมื่อสัมผัสกับ 3% H₂O₂ เทียบกับ 2.35 นาทีสำหรับ *Staphylococcus aureus*, 8.55 สำหรับ *Aspergillus niger* และ 18.3 สำหรับ *Candida parapsilosis* การฆ่าเชื้อสปอร์ที่สำคัญของ H₂O₂ บนสปอร์ของ *Bacillus subtilis* พบได้ทั้งในเฟสของเหลวและเฟสไอ (Klapes and Vesley, 1990) ในฐานะความเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลในระดับปานกลางต่อ *E. coli* แต่มีผลทันทีต่อ *S. typhi*

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้เป็นตัวเลือกในการดำนจุลชีพตั้งแต่ต้นปี 1800 และเป็นที่ยอมรับกันดีในการใช้เป็นยาทาผิวหนังเฉพาะที่ความเข้มข้น 3% ในอาหารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในน้ำนมมาตั้งแต่ก่อนปี 1904 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสถานะ GRAS และได้รับการอนุมัติจาก FDA สำหรับบรรจุภัณฑ์และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวในอุตสาหกรรมอาหาร การอนุญาตให้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเติมแต่งโดยตรงกับอาหารมีจำกัด สำหรับวัตถุประสงค์ในการดำนจุลชีพ H₂O₂ ได้รับความอนุญาตให้ใช้ได้ในการรักษานมที่ใช้ในการผลิตเนยแข็ง การผลิตแป้งโดยไม่ใช้ความร้อนและการเตรียมหางนมคัดแปลงที่ 0.05, 0.15, และ 0.4% ตามลำดับ มันถูกใช้เป็นตัวออกซิไดซ์และรีดิวซ์ในไวน์, ไข่แห้ง, และน้ำเชื่อมข้าวโพด, และเป็นสารฟอกสีผ้าจิ้งจิว, เท้าวัว, ซาผงสำเร็จรูป, หางนมชีส และอิมัลซิฟายเออร์ เปอร์ออกไซด์ที่เหลือจะต้องถูกกำจัดออกโดยวิธีการที่เหมาะสมโดยทั่วไปแล้วจะเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้ในรูปแบบไอ, การได้รับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นาน 60 นาทีช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาแคนตาลูปและลดจำนวนราบนลูกเกิดลงอย่างมาก ในทำนองเดียวกันในอุ้งน 2 สายพันธุ์มีการใช้ H₂O₂ ในรูปแบบ

ไอนาน 10 นาทีที่ 40°C เพื่อลดสปอร์ของ *Botrytis cinera* และเพิ่มอายุการเก็บรักษาโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสีขององุ่น การใช้ในรูปแบบไอกับเห็ดมีการเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นไป แต่การล้างด้วย 5% H₂O₂ นาน 30 วินาที และแช่ Erythorbate (สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล) เป็นลำดับต่อไป ให้การควบคุมแบคทีเรียที่ยอมรับได้โดยไม่ทำให้สีอ่อนลง บนแผ่นแอปเปิ้ลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 6% ให้การลดลงของ *Salmonella Chester* มากกว่าไตรโซเดียมฟอสเฟต แคลเซียมไฮโปคลอไรต์หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ เช่น บวบและพริกหวานแสดงให้เห็นถึงการใช้ H₂O₂ เป็นตัวควบคุมโรคเน่าอื่นๆ เช่น สตรอเบอร์รี่และราสเบอร์รี่แสดงความไวต่อการฟอกสีแอนโทไซยานินในระดับการฆ่าเชื้อของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างอุณหภูมิและประสิทธิภาพของยาต้านจุลชีพ Sheldon และคณะ (1991) พบว่าการฆ่าเชื้อของ H₂O₂ เพิ่มขึ้นอย่างน่าทึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิห้อง การใช้ 1% H₂O₂ ในไข่ทั้งฟองที่ยังเป็นของเหลว (whole liquid egg) การลดอัตราการรอดชีวิตของ *Salmonella typhimurium* ใน 24 ชั่วโมงที่ 20°C มีประสิทธิภาพมากขึ้น (~ 1 log) เมื่อเทียบกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นเดียวกันที่ 5°C (Unluturk et al., 2010) Koutchma (2009) ยังคงตั้งข้อสังเกตถึงผลเสริมฤทธิ์ (การฆ่า *E. coli* K-12 และ *P. aeruginosa* 102 ระหว่างความร้อนจากไมโครเวฟและ H₂O₂ ที่ความเข้มข้นต่ำ โดยมีอัตราการตายสูงสุดที่ 50°C และ 0.08% H₂O₂

แม้ว่าจะมีงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้ H₂O₂ ในน้ำผลไม้เพียงเล็กน้อย แต่การสังเกตที่สำคัญคือ ประสิทธิภาพของ H₂O₂ จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง การใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 µmol พบว่าเป็นสารออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียต่อเชื้อ *Pseudomonas aeruginosa* ที่ pH 5.0 แต่ต้องใช้ 1.5 mmol ที่ pH 8.0 นอกจากนี้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3% ยังเป็นสารฆ่าเชื้อและทำลายสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ได้ใน 3 ชั่วโมงที่ pH 5.0 แต่เพื่อให้ได้ผลเช่นเดียวกันที่ pH 6.5 และ 8.0 ต้องใช้เวลา 6 ชั่วโมง ดังนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อรวมกับกรดเช่นกรดอินทรีย์

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย

3.1 สายพันธุ์แบคทีเรีย

Escherichia coli (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์; DMST, ประเทศไทย)

Aspergillus niger (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์; DMST, ประเทศไทย)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 Biohazard class II cabinet, DWYER Series 0325, USA

3.2.2 Hot air incubator, Memmert Model ULM500, Japan

3.2.3 96-microwell plate, Costar, USA.

3.2.4 Aluminum pot

3.2.5 Autoclave, BECTHAI and HIRAYAMA Model HA300D, Japan

3.2.6 Auto pipette volume 10 microlitter, Autopipette, USA

3.2.7 Auto pipette volume 200 microlitter, Autopipette, USA

3.2.8 Auto pipette volume 1000 microlitter, Autopipette, USA

3.2.9 Auto pipette volume 5 milliliter, Autopipette, USA

3.2.10 Balance accuracy 0.0001 grams, Metter Toledo Model AG204, Switzerland

3.2.11 Balance accuracy 0.01 grams, Metter Toledo Model GG4002-S, Switzerland

3.3 อาหารเลี้ยงเชื้อและสารเคมี

3.3.1 Non-selective media

3.3.1.1 Plate count agar (PCA), Didco, USA

3.3.1.2 Trypticase soy agar (TSA), Difco, USA

3.3.1.3 Trypticase soy broth (TSB), Difco, USA

3.3.1.4 Potato dextrose agar (PDA), Difco, USA

3.3.1.5 Potato dextrose broth (PDB), Difco, USA

3.3.2 Selective media

3.3.2.1 Chromocult® coliform agar (CCA), Difco, USA

3.3.3 Sodium chloride (NaCl), Merck, Germany

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 การเตรียมเชื้อ *E. coli* และรา

เชื้อ *E. coli* ที่เก็บในรูปแบบเชื้อแช่แข็ง สายพันธุ์ DMST 4609 ซึ่งได้มาจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยนำเชื้อมาตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ละลาย จากนั้นทำการปั่นตัวเซลล์ในอาหารเหลว Tryptone Soy Broth (TSB) ปริมาตร 100 mL นาน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จนได้ปริมาณเซลล์ประมาณ 7 log CFU/mL เชื้อ *E. coli* ที่ใช้ถูกทดสอบเพื่อยืนยันและนับในอาหาร Chromocult® Coliform Agar (CCA) โดยการใช้เทคนิคการเพาะเชื้อขนาดเล็ก (Khueankhanchaen et al., 2010; Saeung and Boonyaprapasorn, 2010 และ Supanivatin et al., 2010) สำหรับโคโลนีเดี่ยวของรากถูกเพิ่มจำนวนใน TSB ปริมาตร 100 mL และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ความเร็วรอบ 150 rpm, 48 ชั่วโมง) (Adrian Tsang et al., 2009)

3.4.2 การเตรียมเชื้อ *E. coli*, ยีสต์และรา เพื่อใช้ในการทดลอง

เชื้อ *E. coli* ถูกเตรียมโดยการเขย่าในขวดที่มีอาหาร TSB สำหรับเชื้อราใช้อาหาร PDB และบ่มจนได้ปริมาณเซลล์สุดท้ายที่ 10^9 CFU/mL โดยเชื้อ *E. coli* ที่ใช้ถูกทดสอบเพื่อยืนยันและนับในอาหาร Chromocult® Coliform Agar (CCA) โดยการใช้เทคนิคการเพาะเชื้อขนาดเล็ก (Khueankhanchaen et al., 2010; Saeung and Boonyaprapasorn, 2010 และ Supanivatin et al., 2010)

3.4.3 Chromocult® Coliform Agar Preparation

ผง CCA ถูกผสมกับน้ำกลั่นเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้ผงละลายด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 2 นาที โดยในระหว่างการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจัดได้ว่าเป็นการฆ่าเชื้อระดับพาสเจอร์ไรส์ อาหารที่ได้หลังจากให้ความร้อนจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.4 การเตรียม Potato Dextrose Agar

อาหาร PDA ถูกเตรียมตามขั้นตอนที่ปรากฏในฉลากข้างขวด ด้วยการชั่งสารตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นเติมน้ำกลั่น ละลายผงตัวอย่างด้วยความร้อน แล้วนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (ความดัน 15 lbs) เป็นเวลา 15 นาที

3.5 เทคโนโลยี AOP

3.5.1 การทดลองฆ่าเชื้อด้วย Ozone

แก๊สโอโซนถูกผลิตจากเครื่องกำเนิด โอโซนที่มีการผลิตก๊าซโอโซนจากออกซิเจนที่อัตรา 16-34 g/h อัตราการไหลของโอโซนถูกเซ็ทที่ 2 ลิตร/นาที และก๊าซโอโซนถูกละลายในของเหลวโดยใช้เครื่องผสมวนจูลี่ ความเข้มข้นของโอโซนสุดท้ายที่ละลายถูกตรวจสอบที่ 4-15 ppm

3.5.2 การทดลองฆ่าเชื้อด้วย ozone/UV

ต้นแบบระบบ ozone/UV เป็นระบบปิดที่มีการหมุนเวียนตัวอย่างของเหลวจาก reservoir โดยการใช้ปั๊มแบบ centrifugal sanitary ผ่านเครื่องผสมวนจูลี่ ตามด้วยการฆ่าเชื้อด้วย UV sterilizers ปริมาตรในระบบต่อถูกประมาณที่ 5 ลิตร อัตราการไหลของมวลสามารถถูกปรับโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ระบบอุปกรณ์นี้สามารถถูกปรับแต่ง เพื่อดำเนินการทดลองด้วยการฆ่าเชื้อด้วย ozone และ UV หรือเป็นการทำงานร่วมกันของ ozone/UV

3.6 การนับ *E. coli* และ รา

3.6.1 การนับปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ยังมีชีวิต

การนับเชื้อ *E. coli* ดำเนินการโดยการสุ่มตัวอย่างมา 1 mL และเตรียม serial dilution ที่ระดับต่างๆ ตัวอย่างที่ได้ dilution แล้วถูกหาปริมาณเชื้อบนอาหาร Chromocult® Coliform agar (CCA, Merk, Germany) และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Maria et. al., 2008) ปริมาณโคโลนีที่นับได้ถูกดำเนินการ โดยการใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงขนาดเล็ก

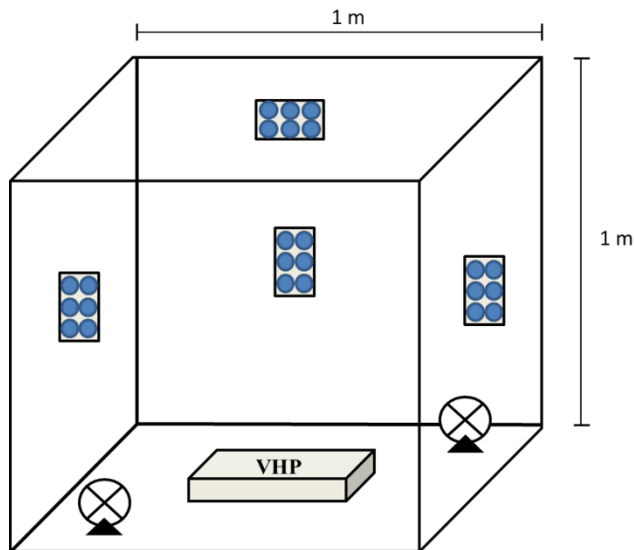
3.6.2 เทคนิคการเพาะเชื้อขนาดเล็ก

ปริมาตรตัวอย่างที่ทำการเพาะเชื้อถูกคงไว้ที่ 10 μL บนผิวอาหาร PCA และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาการบ่ม 12 – 15 ชั่วโมงจะสามารถตรวจพบโคโลนีและทำการเก็บผลด้วยการถ่ายรูปด้วยระบบ light microscope equipped with a 1.5 megapixel โดยโครงสร้างของระบบต้นแบบ digital image analysis ถูกนำมาใช้ในการประเมินพื้นที่ในแต่ละโคโลนีที่ปรากฏเจริญเติบโตบนอาหารแข็ง การทดลองตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าโคโลนีจะมีการขยายในแนวนอนและพื้นที่ที่มีการขยายสัมพันธ์สอดคล้องกับการเจริญเติบโตของเชื้อก่อโรคที่อยู่บนอาหารแข็ง

3.7 การ fumigation ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.7.1 แบบจำลองของห้องที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องพ่นละอองลอยอนุภาคน้ำไฮดรอกซิล

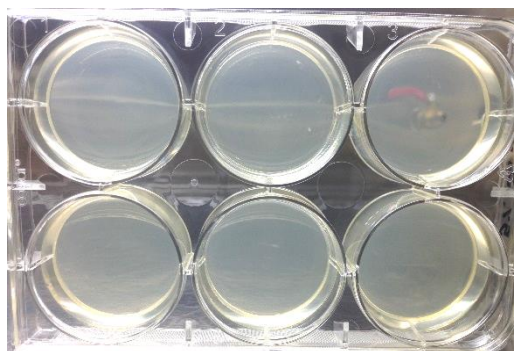
การทดลองถูกดำเนินการใน chamber ขนาด $1 \times 1 \text{ m}^3$ (รูปที่ 3.1) ที่บรรจุหัว ultrasonic atomizer ขนาด 250 วัตต์ จำนวน 10 หัว โดยถูกติดตั้งอยู่ตรงกลางของห้อง chamber ขนาด 1 cubic ฟุตลมจะถูกวางอยู่ภายในห้อง chamber เพื่อให้เกิดการกระจายของละอองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 3.1 แบบจำลองห้องสำหรับการ fumigation และการวาง set อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อในห้องแบบจำลอง

3.7.2 การเตรียมตัวอย่างและการนับโคโลนี

เชื้อ *E. coli* ถูกเตรียมในอาหาร TSB สำหรับ *A. niger* ใช้อาหาร PDB และทำการบ่มจนได้ปริมาณเชื้อที่ 10^9 และ 10^7 CFU/mL ตามลำดับ ตัวอย่างที่ serial dilution ถูกดำเนินการจนได้ปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ต้องการจากความเข้มข้น 10^9 CFU/mL เป็น 10^5 CFU/mL เชื้อ *E. coli* ถูกยีสันและนับด้วยอาหาร Chromocult® Coliform Agar (CCA) โดยการใช้เทคนิคการเพาะเชื้อขนาดเล็ก (Khueankhancharoen et. al., 2010; Saeung and Boonyaprapasorn, 2010 และ Supanivatn et. al., 2010) สำหรับเชื้อ *A. niger* ถูกนับด้วยอาหาร Potatao Dextrose Agar (PDA) และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง การทดลองถูกดำเนินการโดยการใช้ 6-microwell เพลท (รูปที่ 3.2) การนับโคโลนีถูกวิเคราะห์ด้วยการใช้เทคนิคการเพาะเชื้อขนาดเล็ก



รูปที่ 3.2 เพลท 6-microwell สำหรับการตรวจวิเคราะห์นับโคโลนีของเชื้อ

3.7.3 เทคนิคการ fumigation

เพลทอาหารแข็งจะถูก inoculation เชื้อที่ปริมาณ 10^7 CFU/mL แล้วนำเพลทมาติดตั้งที่ด้านข้างของผนัง chamber พื้นที่ด้านข้าง ด้านบน 3 ลิตร/ชั่วโมง ของการพ่นเป็นละอองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วย ultrasonic atomizer ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกศึกษาที่ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, และ 20 นาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุในปัจจุบัน

โรคติดเชื้อจากสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นคนชรา คร่าชีวิตผู้สูงอายุและผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่องเป็นจำนวนมากในแต่ละปีทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างแพร่หลายและขาดการควบคุม ทำให้เชื้อโรคต่างๆ คือยา และในหลายกรณีไม่มียารักษา ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทั้งทางด้านสังคม เศรษฐกิจ รวมถึงงบประมาณในระบบบริการสุขภาพโดยรวมของประเทศ ซึ่งนับเป็นมูลค่ามหาศาล ดังนั้น การควบคุมโรคติดเชื้อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายจึงเป็นมาตรการสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสถานพยาบาลหรือสถานพักฟื้นของผู้สูงอายุที่จะต้องมีการมีเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือเทคโนโลยีในการทำความสะอาดพื้นที่ให้ปลอดโรคและไม่เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษต่อสุขภาพของผู้สูงอายุที่ใช้บริการหรือใช้ประโยชน์ในพื้นที่เหล่านั้นในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้เมื่อสำรวจเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อและการป้องกันโรคติดต่อที่มีใช้กันในปัจจุบันเช่น

4.1.1 การฆ่าเชื้อด้วย UV-C

UV (Ultraviolet) แสงยูวี หรือที่เรา รู้จักว่า แสง UV นั้นมาจากแสงของดวงอาทิตย์ เป็นช่วงแสงที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จุดเด่นคือ มีคุณสมบัติพิเศษ ที่มีความยาวคลื่นยาวกว่ารังสี X-Rays ทำให้มีพลังงานสูง สามารถส่องทะลุผ่านผิวหนังได้เร็วกว่าแสงที่เราเห็นทั่วไป แสงยูวี สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ UVA, UVB, และ UVC แสงยูวีประเภท UVC : มีความยาวคลื่นสั้นที่สุด (200-280 nm) แต่มีพลังงานสูงสุด มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อมากที่สุด รังสี UVC ถูกนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการฆ่าเชื้อโรคในอากาศ พื้นผิวและน้ำ แต่แสงยูวีประเภทนี้มีอันตรายต่อผิวหนังและตามากที่สุดจึงไม่ควรได้รับแสงโดยตรง

UV แสงยูวีที่นำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคนั้น เกิดมาจากการสังเคราะห์ UVC ขึ้นเอง นั่นก็คือระบบ “UVGI” (Ultraviolet Germicidal Irradiation) หรือ ระบบการใช้แสงยูวีที่มีความเข้มข้นสูงพิเศษ (Germicidal Range) เพื่อฆ่าและทำลายเชื้อโรคต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ไวรัส แบคทีเรีย ฟังไจ ยีสต์และรา ที่อยู่บนพื้นผิวและในอากาศ

หากเชื้อโรคต่างๆ ได้รับปริมาณแสง UVC ในระยะเวลาที่เพียงพอ แสงยูวีจะทะลุเข้าไปใน DNA ของเชื้อโรค ทำให้ DNA เปลี่ยนไปจากปกติ เชื้อโรคไม่สามารถสืบพันธุ์ต่อได้ ก็จะตายในที่สุด ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีการทำลายเชื้อโรคชนิดรุนแรง



รูปที่ 4.1 การฆ่าเชื้อโรคในโรงพยาบาลด้วยการฉายรังสี UV-C

โดยเทคนิคการฉายแสง แสงที่ทำการฉายไปยังวัตถุเป้าหมายจะมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อเมื่อแสงโดนกับวัตถุโดยตรง หากมีเงาหรือมุมอับ ก็จะไม่สามารถฆ่าเชื้อได้ และเทคนิคการพ่นฆ่าเชื้อจะมีคุณสมบัติในการแขวนลอยต่ำเนื่องจากมีอนุภาคของสารที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถกระจายเข้าสู่ซอกหลืบที่ต้องการได้

ข้อจำกัดในการใช้ UV

1. ความลึกในการแทรกซึม (Depth of Penetration) ของรังสี UV-C ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก เนื่องจากรังสี UV มีขีดจำกัดในการแทรกซึมผ่านวัตถุ เพราะผิวชั้นนอกของวัตถุ (ยกเว้นน้ำและของเหลวบางชนิด) จะดูดซับรังสีเอาไว้
2. อันตรายจากรังสีต่างๆ (Possible Hazardous Effects of Such Radiation) ผู้ที่รับการฉายรังสีไม่ควรได้รับรังสีมากเกินไป แต่อย่างไรก็ดี การใช้รังสี UV-C ซึ่งได้จากหลอดฆ่าเชื้อโรคนั้น ก็มีข้อควรสังเกต ดังนี้ :
 - UV-C ต้องถูกเชื้อโรคโดยตรงเท่านั้น ถ้าเชื้อโรคซ่อนอยู่ในเงาของวัตถุ เชื้อโรคนั้นจะไม่ตาย
 - UV-C จะต้องถูกเชื้อโรคเป็นเวลานานพอ (นานแค่ไหนขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรค) สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ซึ่งเชื้อโรคบางชนิดทนต่อรังสี UV-C ได้นานมาก
 - UV-C ถูกดูดซึมได้ง่าย จึงควรใช้ในที่อากาศแห้ง เพราะจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด และใช้ขนาด Dose

น้อยที่สุด ถ้าใช้ในอากาศชื้นมากๆ ต้องใช้ขนาด Dose เป็นสองเท่า ถ้าใช้น้ำดื่มธรรมดาจากน้ำก๊อก อาจต้องใช้ขนาดมากถึงสิบเท่า

- การใช้หลอด UV-C ควรระวังไม่ให้ถูกตาและผิวหนังของคนโดยตรง) ถ้าสะท้อนจากผนัง ก็ต้องคอยระวังไม่ให้นานเกินไป

4.1.2 การฆ่าเชื้อด้วยการ fume ด้วยสารฟอร์มาลดีไฮด์

ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นสารประกอบอินทรีย์ กลุ่มอัลดีไฮด์ มีสูตรเคมี คือ CH_2O หรือ HCHO ฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความดันปกติจะมีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ติดไฟได้ ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อรวมตัวกับอากาศ และออกซิเจนสามารถเกิดการระเบิดได้ มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ การรมควันด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ใช้ในการฆ่าเชื้ออย่างแพร่หลายทั้งในโรงพยาบาล สถานีอนามัย และสถานพักฟื้นคนชรา ที่ประสบปัญหาการแพร่ระบาดของเชื้อโรคที่มีความรุนแรงและติดต่อย่างง่ายดายในอดีต



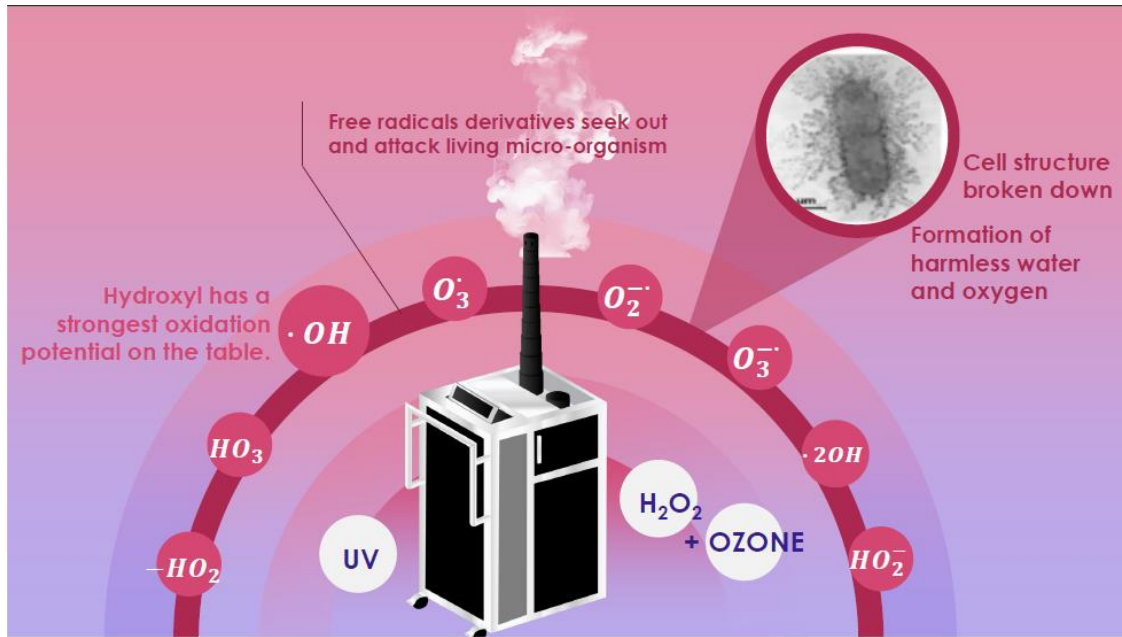
รูปที่ 4.2 การฆ่าเชื้อโรคห้องด้วยการ fume ด้วยฟอร์มาลดีไฮด์

ทั้งนี้งานวิจัยที่เผยแพร่ในปัจจุบันต่างชี้ให้เห็นถึงความเป็นพิษในรูปแบบที่เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง มีกลิ่นฉุนรุนแรงทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และทำให้ได้รับความนิยมน้อยลงในปัจจุบัน ซึ่งหากสัมผัสจะเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อมาก จึงต้องทิ้งระยะเวลาหลังการอบฆ่าเชื้อเป็นเวลานาน รวมไปถึงระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมพื้นที่นาน (ใช้เวลาฆ่าเชื่อนาน)

ดังนั้น การเลือกใช้เทคโนโลยีที่ไม่เหมาะสมจะทำให้มีสารตกค้าง หรือสารเคมีอันตรายตกค้างหลังการใช้งาน จะส่งผลให้เกิดการติดเชื้อซ้ำในระหว่างกระบวนการทำงานหรือกระบวนการผลิตได้ จากความสำคัญดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องฆ่าเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร และยา โรงพยาบาล สถานเอนามัย สถานพักฟื้นผู้ป่วยและผู้สูงอายุ ตลอดจนอุตสาหกรรมอื่นที่มีความจำเป็นต้องใช้ห้องคลีนรูมหรือห้องที่มีความสะอาดเป็นพิเศษในการทำงานโดยการผลิตละอองลอยฆ่าเชื้อ

4.2 ศึกษาหลักการเครื่องฟ่นละอองลอยอนุมลอิสระไฮดรอกซิลในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

เครื่องฟ่นละอองลอยอนุมลอิสระไฮดรอกซิลสามารถกำจัดเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ตามซอก หลืบหรือมุมอับซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการฆ่าเชื้อในปัจจุบันที่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation technology) เพื่อสร้างให้เกิดอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระ (free radicals derivatives) จำนวนมากจากสารละลายตั้งต้น ซึ่งเป็นสารละลายที่มีสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก ทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกกับโอโซนภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต จนเกิดเป็นอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระที่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง และทำให้อยู่ในรูปแบบของละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก 1 nm – 100 μm แขนงลอยอยู่ในอากาศได้นานและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่สูง 1-3 MHz ซึ่งอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะไปออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบ รวมไปถึงสารที่มีความเป็นพิษย่อยสลายได้ยาก เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds) หรือสารอินทรีย์ไม่พึงประสงค์อื่นๆ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่จนเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุดดังรูปที่ 4.3

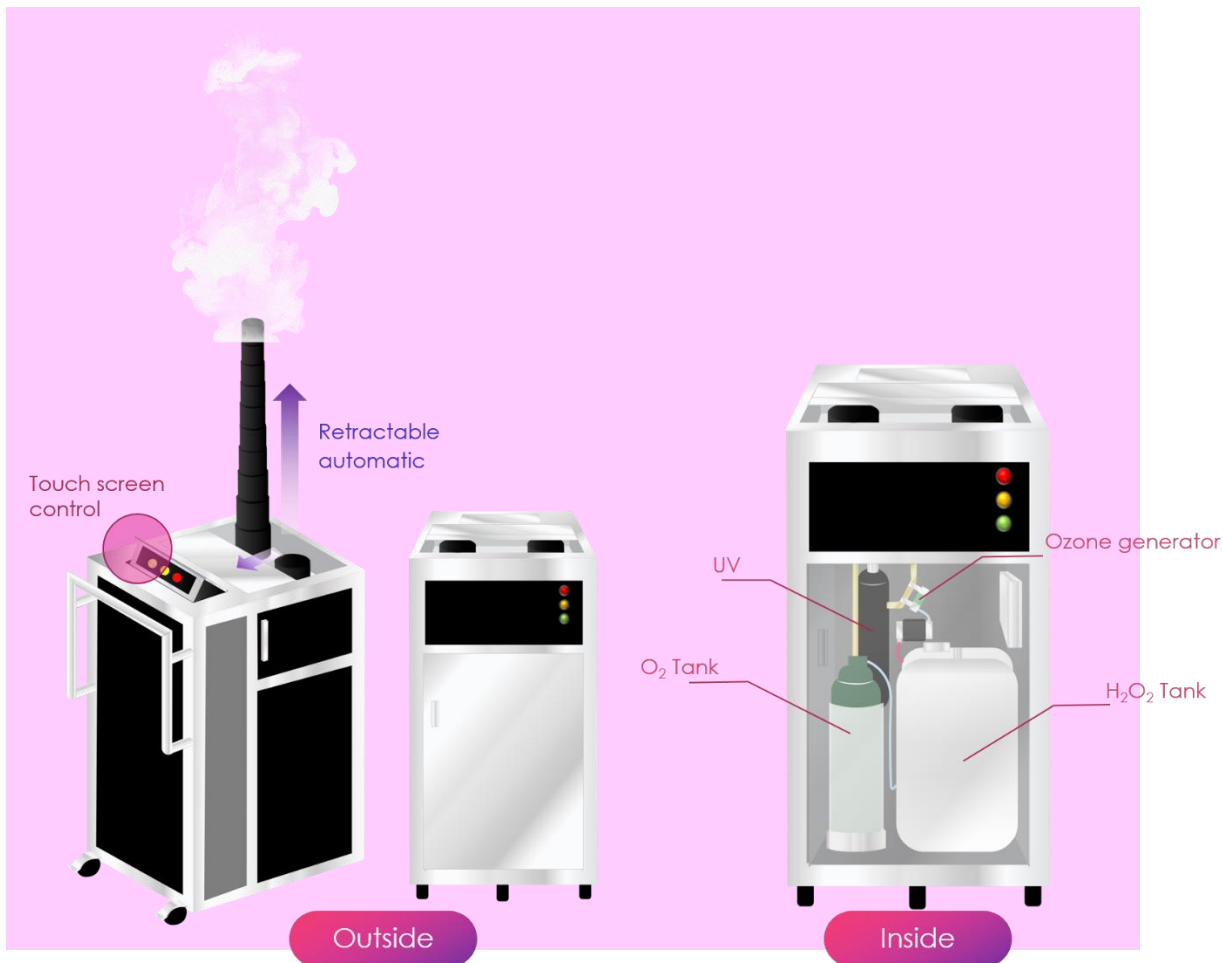


รูปที่ 4.3 กลไกการทำลายเชื้อโรคและไอสารระเหยอินทรีย์ โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของอนุพันธ์ของสารอนุมูลอิสระ

4.3 ออกแบบเครื่องฟ่นละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

เครื่องฟ่นละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ หลอด UV-C, เครื่องกำเนิดไอโอโซน, ถังออกซิเจน, ถังบรรจุไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยหลักการผลิตละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล เกิดจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกกระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกจากแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยการปรับความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามความต้องการใช้งาน โดยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกทำให้ไหลผ่านระบบเครื่องกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ติดตั้งในระบบหมุนวนสารละลายในท่อที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200 ถึง 400 นาโนเมตร มีความเข้มแสงต่อพื้นที่ (UV fluence) มากกว่า 10 จูลต่อตารางเมตร โดยระบบเครื่องกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจะติดตั้งที่ใดที่หนึ่งหรือทั้งสองที่ก็ได้ ในการหมุนวนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบท่อหมุนวนอาจจะมีการติดตั้งระบบการผสมแบบสถิตย์ เพื่อทำให้อนุมูลอิสระที่ผลิตขึ้นกระจายตัวเข้ากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างสม่ำเสมอไหลวนกลับไปสู่ถังปฏิกรณ์ การที่สารละลายไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยจำนวนรอบที่หมุนวนมากหรือใช้ปริมาณหมุนวนสารละลายที่อัตราการไหลสูง จะทำให้เกิดอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระจำนวนมากซึ่งส่งผลดีต่อความสามารถในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์รวมและ/หรือจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในมนุษย์ โดยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกไซด์และอนุพันธ์ของอนุมูลอิสระที่สร้างจะถูกส่งต่อไปยังระบบที่จะถูกฆ่าเชื้อจุลินทรีย์



รูปที่ 4.4 ต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

เครื่องฆ่าเชื้อดังแสดงในรูปที่ 4 จะถูกออกแบบให้ใช้งานได้ง่าย เคลื่อนย้ายสะดวกเหมาะกับการทำงาน มีหน้าจอแบบสัมผัสที่สามารถสั่งการทำงานของระบบท่ให้มีการยืด/หด เพื่อ fume ละอองลอยอนุมูล

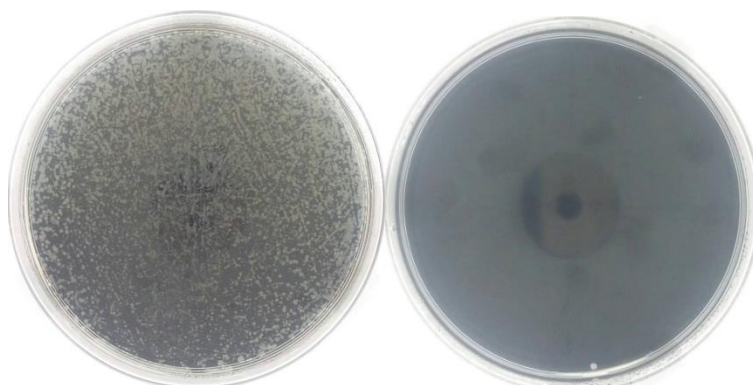
อิสระไฮดรอกซิลในการฆ่าเชื้อโรคที่ระดับความสูงต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมขณะใช้งาน สามารถใช้ในการฆ่าเชื้อได้ทั้งในการเตรียมผลิตภัณฑ์ และสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิตอาหาร

4.4 สร้างสถานะจำลองต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคและหาสถานะที่เหมาะสมในการในการฆ่าเชื้อโรคด้วยละอองลอยอนุภาคอิสระไฮดรอกซิล

ในการศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคทางผู้วิจัยจะออกแบบกล่องขนาด 2 ลูกบาศก์เมตรเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลในการฆ่าเชื้อโรค *Escherichia coli* และ *Aspergillus niger* โดยปัจจัยที่ศึกษาเช่น

- ความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 1, 3, และ 5%
- ความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 1% + UV, H_2O_2 ที่ 1% + O_3 , H_2O_2 ที่ 1% + UV+ O_3

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโดยการใช้เชื้อ *E. coli* เป็นเชื้อแบคทีเรียต้นแบบพบว่า ที่สถานะจำลองในชุดควบคุมมีปริมาณเชื้อ *E. coli* เริ่มต้น $6.7 \log \text{CFU/mL}$ เมื่อทำการลดการปนเปื้อนของเชื้อด้วยละอองลอยอนุภาคอิสระไฮดรอกซิลเป็นกลไกหลักในการฆ่าเชื้อ เป็นเวลา 60 วินาที จะสามารถลดปริมาณเชื้อลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



(ก) ก่อนทำการฟ่นละอองลอย (ข) หลังทำการฟ่นละอองลอย

รูปที่ 4.5ภาพถ่ายเชื้อ *E. coli* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $6.7 \log \text{CFU/mL}$ ก่อนทำการฟ่นละอองลอย และ (ก) หลังทำการฟ่นละอองลอย (ข) เป็นเวลา 60 วินาทีด้วยเครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนด้วยเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง

จากการทดลองเบื้องต้นในการลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ด้วยละอองลอยไฮดรอกซิลเรดิคอลลจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีเครื่องพ่นละอองลอยอนุภาคนิวตรอนไฮดรอกซิลเพื่อการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนิวตรอนไฮดรอกซิลเรดิคอลล

ผลทดสอบประสิทธิภาพในสภาวะจำลองพบว่าความสามารถในการทำลายเชื้ออีโคไล/โคลิฟอร์มด้วยละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ร่วมกับโอโซนเนชั่น ที่ถูกทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกจากแสงอัลตราไวโอเล็ตกระตุ้นการสร้างอนุภาคนิวตรอนไฮดรอกซิลเรดิคอลลจากปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10^7 CFU/mL เป็นสภาวะที่ 0 CFU/mL

ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการลดปริมาณเชื้อด้วยละอองลอยไฮดรอกซิล

สภาวะที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ	เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (นาที)
สภาวะควบคุม (ไม่มีการฆ่าเชื้อ)	-
H ₂ O ₂ 0.5%	35
H ₂ O ₂ 1%	30
H ₂ O ₂ 3%	20
H ₂ O ₂ 5%	10
H ₂ O ₂ 0.5% + O ₃ + UV	5
H ₂ O ₂ 1% + O ₃ + UV	
H ₂ O ₂ 3% + O ₃ + UV	
H ₂ O ₂ 5% + O ₃ + UV	

การใช้ละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับโอโซนเนชั่นที่ถูกแคทาไลซ์จากแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความสามารถในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้มีความเป็นพิษต่ำและ/หรือลดความสามารถในการกัดกร่อนของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแม้มีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้างก็ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับ

วัสดุที่ต้องการทำการฆ่าเชื้อ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณต่ำ แต่มีการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล มีความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์และสัตว์ได้ดีกว่าละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงลำพังโดยไม่ถูกทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอโซนเนชั่นที่มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานที่ที่ต้องการลดเชื้อหรือกำจัดปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น โรงพยาบาล ห้องผ่าตัด ห้องคลีนรูม โรงอาหารและยา โรงเรียนอนุบาล พื้นที่สาธารณะต่างๆ เป็นต้น โดยเทคโนโลยีนี้ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือความเป็นพิษตกค้าง และที่สำคัญเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

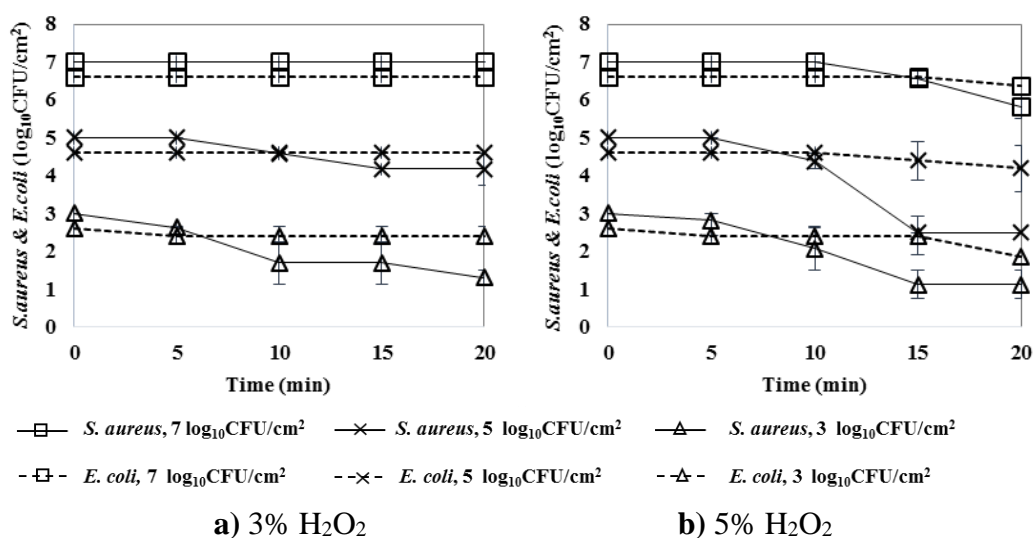
4.6 การทดสอบประสิทธิภาพของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบได้รวบรวมการใช้ H_2O_2 รวมไปถึงยาฆ่าเชื้ออื่นๆ ที่นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์และระบบฟ่นละอองลอยด้วยอัลตราโซนิกเพื่อสร้างและกระจายละอองสเปรย์ฆ่าเชื้อสำหรับการฆ่าเชื้อพื้นผิว แนวคิดเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้ฆ่าเชื้อพื้นผิวกระบวนการแปรรูปอาหารและในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก โดยเฉพาะระบบระบายอากาศและปรับอากาศ รอยแตกและรอยแยกของอุปกรณ์อาหารและอื่น ๆ

4.6.1 การฟ่นละอองลอยของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพของการฟ่นละอองลอยของสารละลาย H_2O_2 ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ต้นแบบบนพื้นผิวที่ปนเปื้อนด้วย *S. aureus* และ *E. coli* ที่เซลล์เริ่มต้น 3, 5 และ 7 log₁₀ CFU / cm² เป็นเวลา 20 นาที การยับยั้งด้วยละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5% ให้ผลการฆ่าแบคทีเรียที่ดื้อขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการยับยั้งด้วย 3% H_2O_2 ที่ความรุนแรงระดับเดียวกันของ H_2O_2 การยับยั้งที่นานขึ้นช่วยลดแบคทีเรียที่มีอยู่บนผิวอาหารแข็งที่ปนเปื้อน และโดยทั่วไป *S. aureus* มีอ่อนแอกว่า *E. coli* ที่การปนเปื้อนเริ่มต้นสูงสุด (กล่าวคือ 7 log₁₀ CFU / cm²) มีเพียง 5% H_2O_2 ที่ทำให้ลดลงได้ 1 log หลังเวลาการยับยั้งผ่านไป 20 นาที ที่ความหนาแน่นของเซลล์ต่ำกว่า (กล่าวคือ 3 log 10 CFU / cm²) ยับยั้งได้สูงสุดถึง 3 log สามารถสังเกตได้จากงานเพาะเชื้อที่มีการปนเปื้อนของ *S. aureus*



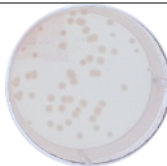


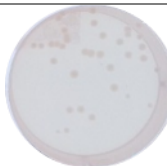
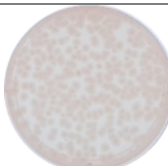

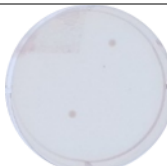


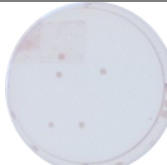


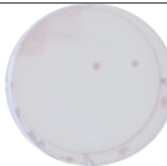
โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมียุทธศาสตร์ด้านจุลชีพแบคทีเรียแกรมลบที่ดีมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก (Buck, 2001) ซึ่งแตกต่างจากสารฆ่าเชื้อส่วนใหญ่ การเติมสารอินทรีย์และเกลืออื่น ๆ ไม่มีผลต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไม่มีสารเคมีตกค้าง แบคทีเรียแกรมลบมักจะไวต่อสารชีวภาพน้อยกว่าเนื่องจากมีผนังเซลล์ที่ซับซ้อน (Sheldon, 2005) เยื่อหุ้มผนังเซลล์ด้านนอกประกอบด้วย peptidoglycan, lipoproteins และ lipopolysaccharides ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการแพร่ผ่านในการจำกัดหรือป้องกันสารเคมีต่างๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าสู่เซลล์ประเภทแบคทีเรีย (Russell et al., 1998; Sheldon, 2005; Al-Jubory และคณะ, 2012) โดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียแกรมบวกที่พบ สิ่งเหล่านี้ (ผนังเซลล์) ดูเหมือนจะไม่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการทำลายเชื้อแบคทีเรียและฆ่าเชื้อ ดังนั้นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจึงสามารถผ่านเข้าไปใน *S. aureus* และ *Bacillus spp.* ได้

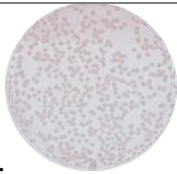
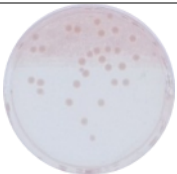
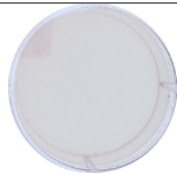


รูปที่ 4.6 จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตของ *S. aureus* และ *E. coli* ที่ถูกยับยั้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่กลายเป็นไอที่ความเข้มข้นต่างกัน

การประเมินผลการฆ่าเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิวที่ได้รับเชื้อแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 เมื่อส่วนสำคัญของแบคทีเรียถูกทำลายโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการควบคุมพื้นผิวที่เป็นตัวแปรบวกสำหรับการฆ่าเชื้อ

ตารางที่ 4.2 ผลการยับยั้งของ H_2O_2 ต่อปริมาณเซลล์เริ่มต้น 3, 5, และ $7 \log_{10}$ CFU / cm^2 โดยเปรียบเทียบผลการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* บนพื้นผิวตัวแปรควบคุมกับพื้นผิวหลังการรมควัน H_2O_2 เป็นเวลา 20 นาที

Microorganisms	Concentration inoculated	Control treatment	Fumigation results (after 20 min)	
		(0 min)	Negative	Positive
<i>E. coli</i>	$7 \log_{10}$ CFU/ cm^2			
	$5 \log_{10}$ CFU/ cm^2			
	$3 \log_{10}$ CFU/ cm^2			
<i>S. aureus</i>	$7 \log_{10}$ CFU/ cm^2			
	$5 \log_{10}$ CFU/ cm^2			

Microorganisms	Concentration inoculated	Control	Fumigation results	
		treatment	(after 20 min)	
		(0 min)	Negative	Positive
	3 log ₁₀ CFU/cm ²			

โดยทั่วไปการเพิ่มความเข้มข้นของยาต้านจุลชีพและ/หรือเพิ่มเวลาในการยับยั้งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการยับยั้ง Huang, Ye และ Chen (2012) ใช้ H₂O₂ 3% ในการล้างและกำจัดสิ่งปนเปื้อนผักโขมอ่อนเป็นเวลา 5 นาทีและผลคือ *E. coli* O157: H7 ลดลง 1.6 log₁₀ CFU/g Huang และ Chen (2011) ทำการทดสอบที่คล้ายกันโดยล้างใบผักโขมด้วย H₂O₂ และทำให้ค่า logCFU ของ *E. coli* O157: H7 ลดลงได้สำเร็จในค่าที่ใกล้เคียงกัน (1.5 logCFU/g) โดยใช้ 2% H₂O₂

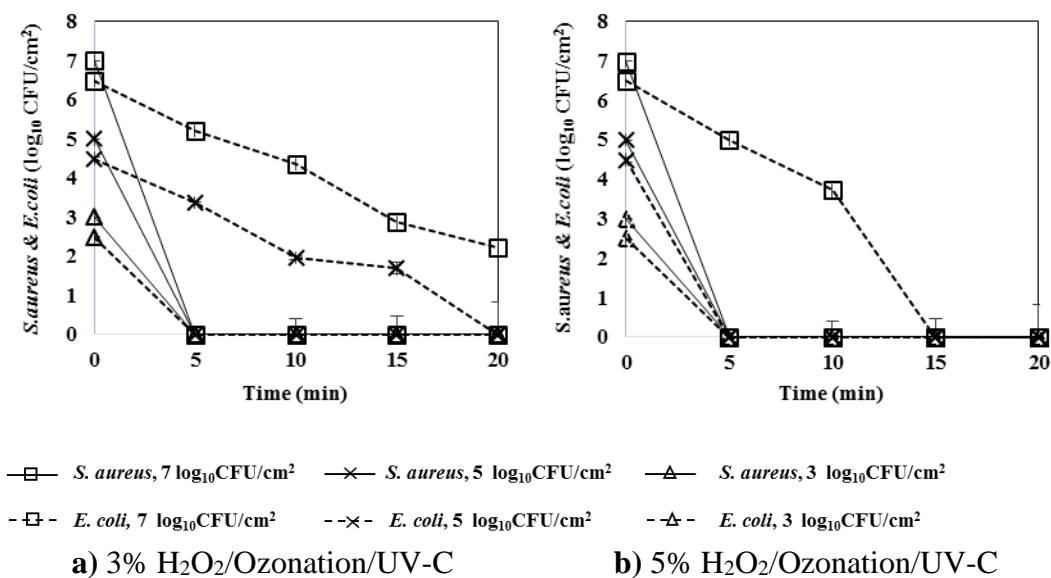
Ukuku และ Fett (2002) ใช้สารละลาย H₂O₂ 5% ในการฆ่าเชื้อผิวแดงโมเป็นเวลา 2 นาทีและได้ผลการลดลงของ *L. monocytogenes* 2.0–3.5 logCFU/cm² ในรูปของคว้นการยับยั้งด้วยคว้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 นาทีที่ 1, 3 และ 5% สามารถลดการปนเปื้อนแบคทีเรีย *S. Typhimurium* (1.48, 2.09 และ 2.63 log₁₀CFU/g ตามลำดับ) และ *E coli* O157: H7 (1.62, 2.14 และ 2.94 log₁₀ CFU/g) บนใบผักกาดหอม (Back et al., 2014) ในทำนองเดียวกันการทดลองของเราแสดงให้เห็นว่าการลดลง 2-3log ที่การปนเปื้อนของเซลล์ต่ำบนอาหารแข็ง แต่การรมคว้น H₂O₂ นั้นมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเมื่อการปนเปื้อนเริ่มต้นสูง (เช่น 7 log₁₀CFU/cm²)

4.6.2 การปรับปรุง H₂O₂ treatment โดย AOPs

ในการทดลองนี้ ใช้โอโซนและโฟโตคะทาไลซิสร่วมกับการรมคว้นด้วย H₂O₂ เพื่อสร้างคว้น •OH สำหรับการลดการปนเปื้อนแบคทีเรีย ในกระบวนการ AOPs สารละลาย H₂O₂ ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตอนุพันธ์ของออกซิเจน (เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล, ไอออนแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์) ซึ่งสามารถโจมตี

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ เช่น DNA, ไขมัน, และโปรตีน (Kahnert et al., 2548) รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่สำคัญของเทคโนโลยีที่รอกการจดสิทธิบัตรเครื่องรมควัน OH• ของเรา ในการเปรียบเทียบกับกรรมควัน H₂O₂ เข้มข้นในรูปแบบ AOPs เดียวกันที่ 3% H₂O₂ ดังรูปที่ 4.6a การแปลง H₂O₂ เป็น OH• สามารถทำให้ทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ลดลงอย่างมากดังรูปที่ 4.7a; ถึงอย่างนั้นเชื้อ *E. coli* ก็ทนทานมากกว่า *S. aureus*

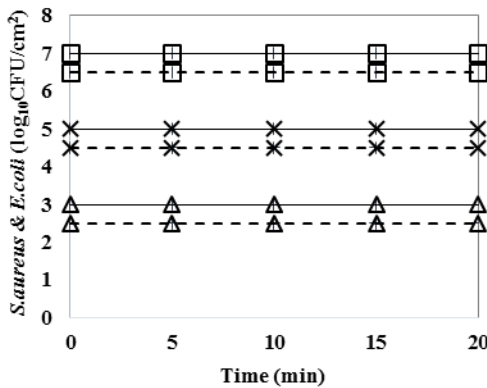
ระดับการปนเปื้อน *S. aureus* ทั้งหมดถูกนำมาฆ่าเชื้ออย่างสมบูรณ์ภายใน 5 นาทีของเวลาในการยับยั้ง แต่การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ที่สูงกว่า 5 log₁₀ CFU/cm² ต้องใช้เวลามากกว่า 20 นาที อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ H₂O₂ ที่มีความเข้มข้นสูง (เช่น 5% H₂O₂ ในรูปที่ 4.7b) สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ได้สูงถึง 7 log₁₀ CFU/cm² ภายใน 15 นาที



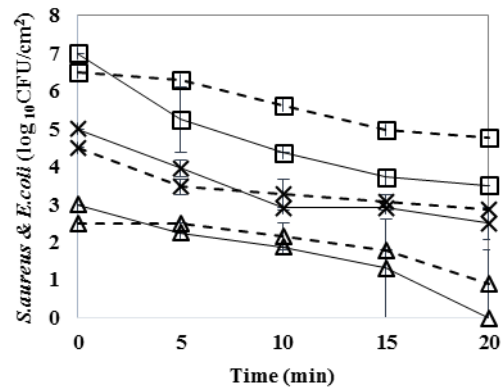
รูปที่ 4.7 ผลของ H₂O₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ร่วมกับโฟโตคะทาไลซิส UV-C และโอโซน ที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น 3, 5 และ 7 log₁₀ CFU / cm² ของ *E. coli* และ *S. aureus*

การปรับปรุงการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ photocatalysis UV-C และการเติมโอโซนร่วมกัน สามารถแสดงให้เห็นผลกระทบของแต่ละอย่างได้ด้วยน้ำบริสุทธิ์ รูปที่ 4.8a ไม่แสดงผลการตกค้างของ UV-C ในน้ำที่ปน

ละอองลงบนพื้นผิวที่ปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* และไม่หลงเหลือสิ่งบ่งชี้ถึงการมาแบคทีเรีย เมื่อทำการประยุกต์ใช้โอโซนโดยไม่ใช่ UV-C ในน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วสามารถลดได้ทั้ง *E. coli* และ *S. aureus* (รูปภาพ 4.8b) การทำงานร่วมกันระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำโอโซนทำให้สันนิษฐานได้ว่า การลดลงของจุลินทรีย์เกิดจากการสร้าง $\cdot\text{OH}$ และผลกระทบจากโอโซน ในขณะที่น้ำบริสุทธิ์ที่มีการใช้ UV-C photocatalysis และโอโซนก็สามารถทำให้เกิด $\cdot\text{OH}$ ได้อย่างเพียงพอโดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองโอโซนเล็กน้อย (รูปภาพ 4.8c) จากนั้นได้เติม H_2O_2 0.5% เข้ามาเพื่อเพิ่มการสร้าง $\cdot\text{OH}$ และการปรับปรุงประสิทธิภาพของการลดแบคทีเรียได้อย่างมีคุณภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นต่ำ (รูปที่ 4.8d)

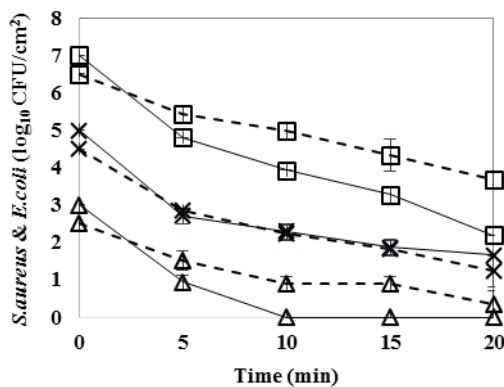


a) UV-C

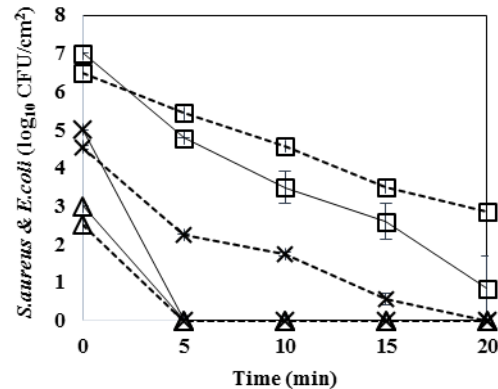


b) Ozonated water

—□— *S. aureus*, 7 \log_{10} CFU/cm² -×- *S. aureus*, 5 \log_{10} CFU/cm² -△- *S. aureus*, 3 \log_{10} CFU/cm²
 -□- *E. coli*, 7 \log_{10} CFU/cm² -×- *E. coli*, 5 \log_{10} CFU/cm² -△- *E. coli*, 3 \log_{10} CFU/cm²



c) UV-C/Ozonation

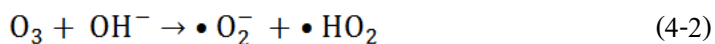
d) 0.5% H_2O_2 /Ozonation/UV-C

รูปที่ 4.8 ผลของการยับยั้ง *E. coli* และ *S. aureus* ที่จำนวนเซลล์เริ่มต้น 3, 5, และ 7 log₁₀ CFU / cm² ด้วย UV-C, โอโซน, และ UV-C / Ozonation

Koller (1965) รายงานการผลิต •OH โดยใช้ UV-C treatment ความยาวคลื่นระหว่าง 4 ถึง 400 นาโนเมตร และสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ photocatalyzation UV-C ในน้ำเกิดขึ้นในช่วง UV-C (200-280 นาโนเมตร) ในการทดลองไม่มีการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยใช้การฟ่นละอองของน้ำที่ผ่าน UV การใช้ UV-C เพียงอย่างเดียวสามารถลดสารประกอบอินทรีย์ได้ แต่มันไม่ได้มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและการสร้าง •OH (Jing & Cao, 2012) อย่างไรก็ตามนักวิจัยหลายคนพบว่า UV-C สามารถเพิ่มศักยภาพในการออกซิเดชันของกระบวนการออกซิเดชันอื่นๆได้



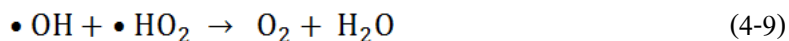
อย่างไรก็ตามการลดของเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* นั้นประสบความสำเร็จและสันนิษฐานว่ามาจากการเกิดออกซิเดชันด้วย •OH เมื่อโอโซนถูกละลายในน้ำ ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและโอโซนจะสร้าง •O₂⁻ ไอออนและอนุมูล a•HO₂ (Gunten, 2003) อนุมูล •HO₂ นี้มีประมาณ 4.8 และเกิด •O₂⁻ เป็นอนุมูลอิสระที่ค่า pH สูงกว่าค่า pKa นี้



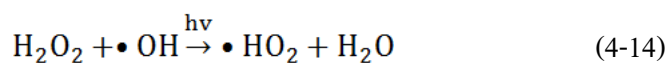
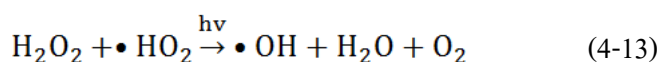
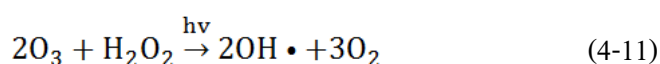
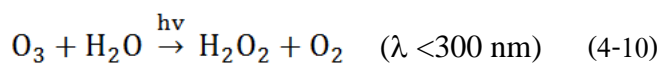
ชุดของปฏิกิริยาถูกโซ่อนุมูลอิสระเกิดขึ้นเมื่อ •OH เกิดขึ้น



ในตอนท้ายอนุมูลที่แตกตัวต่อต้านปฏิกิริยาถูกโซ่ข้างต้นและยับยั้งการสลายตัวของโอโซน



เมื่อรวม UV-C และโอโซนเข้าด้วยกันแสดงให้เห็นว่าโอโซนที่เกิดการละลายสามารถดูดซับโฟโตแคตาไลซิสยูวีเพื่อผลิต H_2O_2 ซึ่ง H_2O_2 นี้จะเกิด photocatalyze ต่อไปเป็น $\bullet\text{OH}$ ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง (Kommineni et al., 2000; Munter, 2001; Krishnan et al., 2017) อนุมูลอิสระเหล่านี้อาจมีส่วนในการทำลายสารอินทรีย์ แต่เชื่อว่า OH เป็นสารออกซิไดซ์ที่เหนือกว่า



การเพิ่ม H_2O_2 เพื่อเตรียม substrate ส่วนที่เหลือย้ายปฏิกิริยาไปทางขวาและเพิ่มการผลิต $\bullet\text{OH}$ สันนิษฐานได้ว่าการรวมประสิทธิภาพของน้ำ H_2O_2 / Ozonation / UV-C จะรักษาระดับของ reactive $\bullet\text{OH}$ ในควันทวีได้สูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ทันทีและเกิดการยับยั้งจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว เป็นส่วนที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Glaze et al., 1987; Andreozzi et al., 1999; Kommineni et al., 2000) น้ำ Ozonated และ H_2O_2 ดูดซับแสง UV-C ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากมายรวมถึงอนุมูล H_2O_2 (Munter, 2001) ดังนั้นการรวมกันของ UV-C photocatalysis และ ozonation ในการฟ้นละอองของ H_2O_2 ช่วยให้มีสถานะออกซิไดซ์สูง (พลังงานกระตุ้นที่สูงขึ้น) และยังเกี่ยวข้องกับการสร้างอนุมูลอิสระหลายชนิด รวมถึง H_2O_2 , อนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet\text{OH}$) Peroxy radical ($\bullet\text{HO}_2$) เป็นต้น (Kommineni et al., 2000; Munter, 2001) ดังที่สรุปไว้ในสมการที่ 4-15

4.6.3 เปรียบเทียบกับสารฆ่าเชื้อทางเลือกอื่นๆ

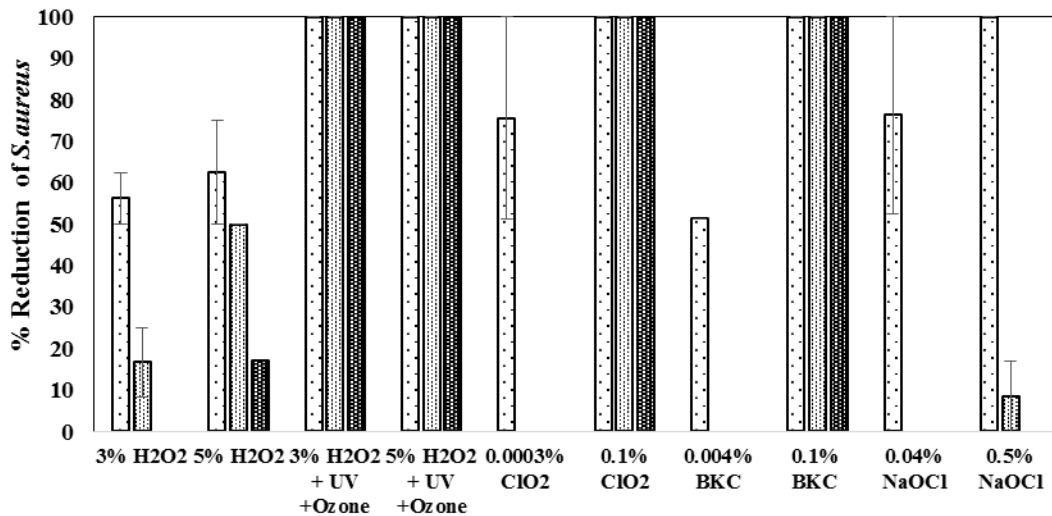
ในการใช้แนวคิดการฟ่นละอองลอยสำหรับการฆ่าเชื้อที่พื้นผิว จะทำการสำรวจสารฆ่าเชื้อที่มีวางจำหน่ายทั่วไป การศึกษานี้ได้รวมสารที่มีศักยภาพ 3 ชนิด (กล่าวคือ NaOCl, ClO₂ และ BKC) เพื่อสร้างละอองยาฆ่าเชื้อโดยการรมควันด้วยคลื่นเสียงที่ความเข้มข้นต่ำสุดและสูงสุดสำหรับการใช้งานดังกล่าว รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคมีแต่ละชนิดในการลดจำนวนแบคทีเรียบนผิวอาหารแข็งที่ปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* มีเพียงควัน 0.1% ClO₂ และ 5% H₂O₂ / ozonation / UV-C เท่านั้นที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้อย่างสมบูรณ์ที่จำนวนเซลล์เริ่มต้นต่างๆ ซึ่งมีรายงานว่า ClO₂ มีประสิทธิภาพในการลดแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวกหรือแบคทีเรียที่ไวต่อกรด (Toda et al. 2006; Morino et al., 2011)

LeChevallier และ Au, (2004) ได้หาเหตุผลของการอยู่รอดของแกรมบวกหลังจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน อาจเป็นเพราะแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ในขณะที่เดียวกันการบำบัดด้วย ClO₂ และ H₂O₂ จะมีกลิ่นเฉพาะของแต่ละชนิด ซึ่งเมื่อใช้ ClO₂ 0.1% จะเกิดควันขึ้นอย่างหนาแน่นและก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตาและจมูก อาจจะไม่เหมาะกับการนำไปใช้โดยที่มีการสัมผัสกับมนุษย์โดยตรง

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียแกรมบวกมีความอ่อนไหวต่อ BKC มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Marple et al., 2004; Khajavi et al., 2007; Fazlara & Ekhtelat, 2012) ตัวอย่างเช่น 0.1% BKC มีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อ *S. aureus* (ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก) ในทุกระดับของการปนเปื้อน แต่มีประสิทธิภพน้อยกว่ากับ *E. coli* (ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ) โดยผู้วิจัยสังเกตเห็นว่าแบคทีเรียแกรมลบที่มีผนัง lipopolysaccharide ด้านนอกช่วยจำกัดการเข้าถึงเซลล์ มีความต้านทานต่อยาฆ่าเชื้อ และทำให้ฆ่าเชื้อได้ไม่สมบูรณ์มากเท่าแบคทีเรียแกรมบวก (Helander et al., 1997; Brula & Cooteb, 1999; McDonnell & Russell, 1999; Fazlara & Ekhtelat, 2012) Morrissey และคณะ (2014) รายงานความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (MIC) สำหรับ BKC ของแบคทีเรียแกรมบวกส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 4-16 mg/L (เทียบกับ 32-128 mg/L ในแบคทีเรียแกรมลบ)

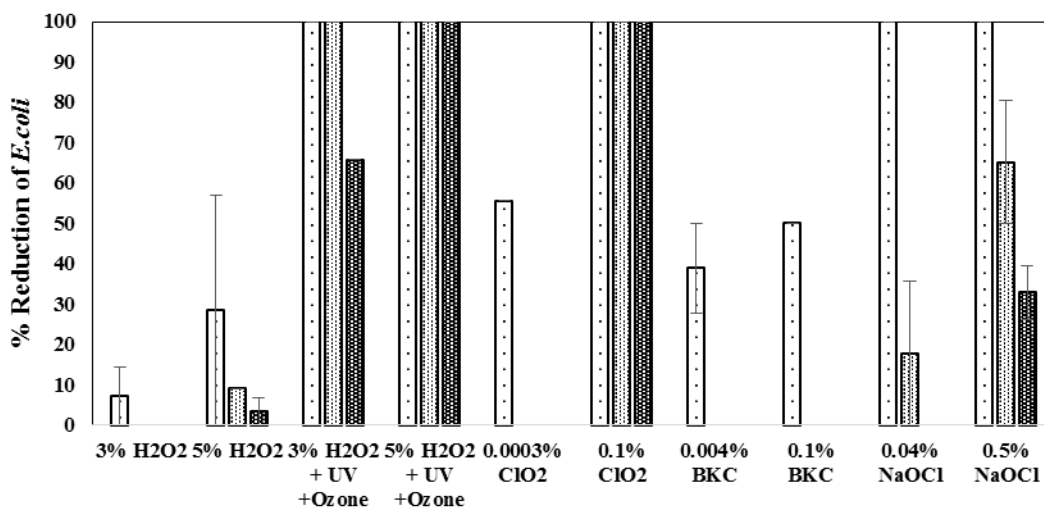
NaOCl ความเข้มข้น 0.5% มีประสิทธิภาพต่อ *E. coli* มากกว่า *S. aureus* อย่างไรก็ตามการใช้ NaOCl ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 0.05%) จะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงกับโลหะและผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาของ chlorine และ hypochlorite ที่มีผลภาวะเป็นพิษอาจก่อให้เกิดมะเร็งและการกลายพันธุ์ (Zajic, 1999) ส่วน NaOCl ที่ความเข้มข้นต่ำประสิทธิภาพค่อนข้างจำกัด จึงถูกจำกัดการใช้เป็นยาฆ่าเชื้อพื้นผิวทั่วไปเนื่องจากปล่อยก๊าซคลอรีนซึ่งเป็นพิษหากผสมกับแอมโมเนียหรือกรด (Mrvos et al., 1993; Reisz & Gammon, 1986; Gapany et al., 1982)

ในรูปที่ 4.9 H₂O₂ / Ozonation / UV-C treatment แสดงให้เห็นถึงลักษณะการฆ่าเชื้ออย่างไม่ได้เจาะจง ชนิดของแบคทีเรียที่ใช้ที่ 5% H₂O₂ H₂O₂ / Ozonation / UV-C สามารถฆ่าเชื้อได้ทั้ง *E. coli* และ *S. aureus* ที่ปนเปื้อนบนบนผิวหนังแข็ง ภายใน 20 นาที โดย H₂O₂ / Ozonation / UV-C treatment คือการบำบัดร่วมกันของ UV-C และ ozonation เข้ากับ H₂O₂ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่ยับยั้งด้วย H₂O₂ เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นของ H₂O₂ มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ที่สูงขึ้น สันนิษฐานว่าสารออกซิไดซ์ที่สำคัญในการยับยั้งคือ H₂O₂ / Ozonation / UV-C เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์โดยไม่จำเพาะเจาะจงในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงถึง 10⁹ M⁻¹sec⁻¹ โดยอะตอมไฮโดรเจนหรือโดยการเติมอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Munter, 2001) H₂O₂ / Ozonation / UV มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในการสุขาภิบาลและไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม



Alternative method

a) *S. aureus*



Alternative method

□ *E. coli*, 3 log CFU/cm² ▨ *E. coli*, 5 log CFU/cm² ▩ *E. coli*, 7 log CFU/cm²

b) *E. coli*

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นอาหารแข็งที่มีการปนเปื้อนเริ่มต้นที่ 3, 5, และ 7 log₁₀ CFU / cm² ละอองลอยฆ่าเชื้อสร้างขึ้นจาก H₂O₂ (hydrogen peroxide), H₂O₂ ร่วมกับ โอโซนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต, ClO₂ (Chlorine dioxide), BKC (Benzalkonium chloride) และ NaOCl (Sodium hypochlorite) และใช้ในตู้ปิดล้อมเป็นเวลา 20 นาที

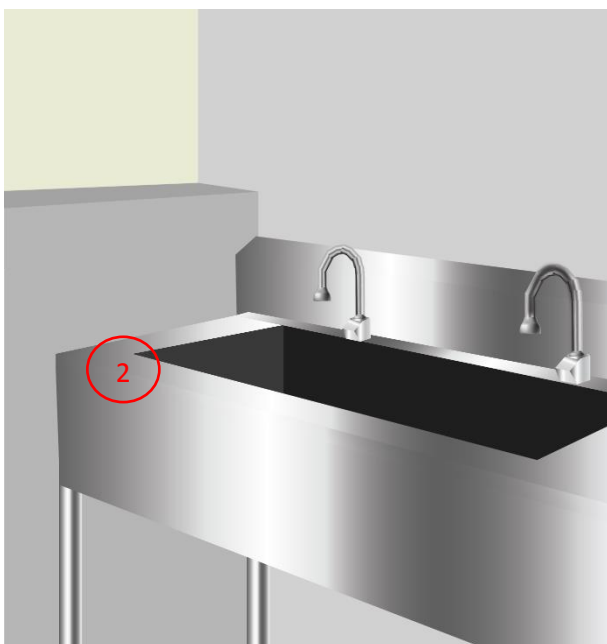
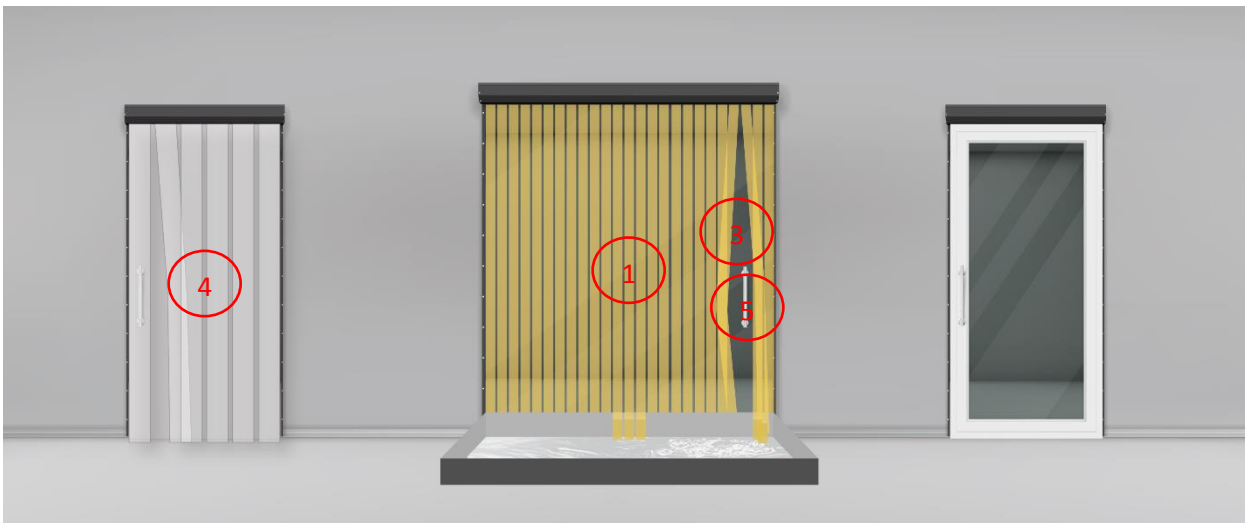
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฟ่นละอองลอยอนุภาคลิสะไฮดรอกซิลเชิงพาณิชย์

ในงานวิจัยได้มีการนำเครื่องต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตไปทำการสาธิตและทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่สายการผลิตอาหาร ภายใต้ความร่วมมือจาก บริษัท วาทิน จำกัด และบริษัทอื่น ๆ ที่ให้ความสนใจในเครื่องต้นแบบนี้



รูปที่ 4.10 เครื่องต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง
ปลอดสารพิษตกค้าง

การลดโอกาสการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งก่อโรคและไม่ก่อโรคในสายการผลิตนับเป็นการลดความเสี่ยงที่จะลดการปนเปื้อนทางด้านจุลชีววิทยาสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย การเลือกบริเวณที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโดยเริ่มต้นจากพื้นที่เตรียมความพร้อมของพนักงานก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตจึงเป็นบริเวณที่มีความสำคัญและต้องระวังเป็นพิเศษ กล่าวคือ พื้นที่เตรียมความพร้อมก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นพื้นที่ที่พนักงานจะต้องเดินผ่านเข้ามาเป็นจุดแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต หากมีการปนเปื้อนจากบริเวณนี้จะเป็นการปนเปื้อนเบื้องต้นที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนในกระบวนการผลิตได้



จุดที่ทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียรวม
ในพื้นที่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ม่านพลาสติกสีเหลือง (C)
2. ขอบอ่างล้างมือ (E,C)
3. ประตูกระจกหลังม่านเหลือง (C)
4. ม่านพลาสติกเข้าห้องคาร์ตัน (E,C)
5. ประตูที่จับ (C)
6. ม่านพลาสติกก่อนเข้าไลน์ (C)
7. ประตูก่อนเข้าไลน์ (C)

รูปที่ ก บริเวณทางเข้าสู่กระบวนการผลิตบริษัท ก



จุดที่ทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียรวมในพื้นที่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- | | | |
|---------------------------|--------------------|------------------------|
| 1. กล่องสบู่ล้างมือ (C,E) | 2. ขอบอ่าง (C,E) | 3. ถังขยะ (C,E) |
| 4. ฝักล้าง (C,E) | 6. ถังดับเพลิง (C) | 7. ปลั๊กจากเพดาน (C,E) |
| 8. มือพนักงาน (C) | 9. ฝักล้าง (C) | |

รูปที่ ข บริเวณทางเข้าสู่กระบวนการผลิตบริษัท ก

รูปที่ 4.11 บริเวณที่ทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของแบคทีเรียบริษัท ก และ ข

หมายเหตุ : C หมายถึง พบการปนเปื้อนของคอลลีฟอร์ม และ E หมายถึง พบการปนเปื้อนของอีโคไล

เมื่อทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียรวมในพื้นที่เตรียมความพร้อมของพนักงาน ได้แก่ ม้านพลาสติกในจุดต่าง ๆ ขอบอ่างล้างมือ ประตูกระจก ที่จับประตู เป็นต้น จะพบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียทั้งอีโคไล/คอลลีฟอร์ม ดังรูปที่ 4.11 พบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณนี้เนื่องจากในปัจจุบันวิธีการทำความสะอาดยังไม่มีประสิทธิภาพ ขาดต่อการทำความสะอาดในบริเวณที่เป็นมุมอับ ทำให้เกิดเชื้อจุลินทรีย์สะสมในบริเวณดังกล่าว หลังจากทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยเครื่องฟ่นละอองลอยฯ (รูปที่ 4.11) เป็นเวลา 30 ถึง 60 วินาที ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียอีโคไล/คอลลีฟอร์ม

เมื่อทำการประยุกต์ใช้เครื่องต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอย ฯ ในบริเวณกระบวนการผลิตอาหารของบริษัท ข (รูปที่ 4.12) พบว่าสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในพื้นที่การผลิตอาหารได้ โดยหมอกละอองลอย ที่มีลักษณะเล็กและเบาสามารถกระจายเข้าไปยังพื้นที่มุมอับได้เป็นอย่างดี ด้วยการออกแบบระบบการทำงาน ให้สามารถส่งงานผ่านสัญญาณไวไฟทำให้ง่ายต่อการใช้งาน สามารถควบคุมการทำงานจากภายนอกห้องได้



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียบริเวณกระบวนการผลิตของบริษัท ข

ในการถ่ายทอดเทคโนโลยีเครื่องต้นแบบเครื่องฟ่นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี ออกซิเจนชั้นสูงแก่ภาคอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยได้รับการตอบรับเป็นที่พึงพอใจจากภาคอุตสาหกรรม

4.8 การพัฒนาระบบต้นแบบและผลการทดสอบประสิทธิภาพ

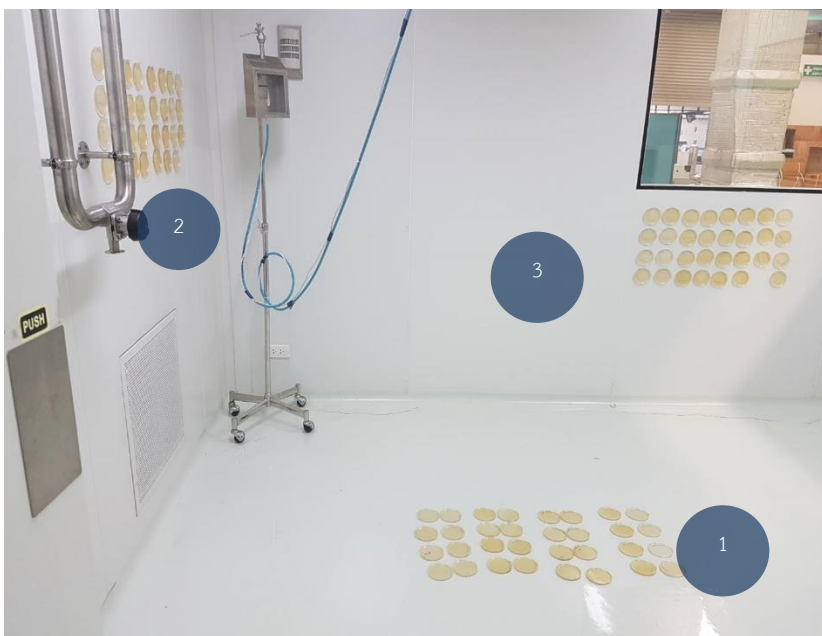
การพัฒนาระบบต้นแบบและโมเดลต้นแบบในการเก็บข้อมูลเพื่อที่จะลดโอกาสผิดพลาดสำหรับการพัฒนา เป็นระบบสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การพัฒนาเครื่องฟ่นละอองลอยอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกซิด

4.8.1 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องฟ่นละอองลอยอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกซิด (Fumigor) เปรียบเทียบกับเครื่องฟ่นละอองลอยที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง

โดยในการทดลองเชื้อที่ใช้ในการทดสอบคือ เชื้อแบคทีเรีย (*E. coli*, *S. aureus*) และเชื้อรา (*A. fumigatus*) ปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษาคือ 10^1 , 10^3 , 10^4 , และ 10^5 CFU/mL เพลทอาหารที่มีการ spread เชื้อที่ความเข้มข้นต่างๆ จะถูกนำไปวางในห้องขนาด $3 \times 3 \times 2.7$ เมตรที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14

แสดงห้องขนาด $3 \times 3 \times 2.7$ เมตรที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigor และตำแหน่งการวางเพลทที่ได้มีการ spread เชื้อที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 เครื่อง Fumigator ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ

เครื่อง Fumigator A

เครื่อง Fumigator B

4.8.1.1 วิธีการทดลอง

เมื่อวางเพลทที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ เชื้อ *S. aureus* เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก และเชื้อรา *A. fumigatus* โดยมีปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ 10^1 , 10^3 , 10^4 , และ 10^5 CFU/mL ที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากนั้นจะทำการเปิดเครื่อง Fumigator A และ B เป็นเวลาประมาณ 7 นาที โดยการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องทั้ง 2 จะแยกทำการทดสอบ หลังจากทำการฆ่าเชื้อเสร็จเรียบร้อยแล้ว เก็บเพลทไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงสำหรับเชื้อแบคทีเรีย และอุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 - 72 ชั่วโมงสำหรับเชื้อรา (เพลทควบคุมจะเป็นเพลทที่มีเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ความเข้มข้นเช่นเดียวกับเพลทที่ใช้ในการทดลอง แต่ไม่ถูกนำไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator)



รูปที่ 4.16 ลักษณะละอองลอย
เพื่อการฆ่าเชื้อที่สามารถมองเห็น
ด้วยเครื่อง Fumigator A



รูปที่ 4.17 ลักษณะละอองลอย
เพื่อการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง
Fumigator B

ระบบเครื่องฟ่นละอองลอย เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีออกซิเดชั่นขั้นสูง ในการเก็บ
ข้อมูลและพัฒนาเป็นระบบสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.18 ลักษณะละอองลอยเครื่อง Fumigator A โดยส่วนใหญ่จะกระจายอยู่บริเวณพื้นในระหว่างทำการฆ่า

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E. coli*, *S. aureus*, และ *A. fumigatus* ที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B แสดงดังต่อไปนี้

➤ การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E. coli*

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B

ปริมาณเชื้อเริ่มต้นก่อน Fume (CFU/mL)	จุดที่ 1 (ที่พื้นห้อง)		จุดที่ 2 (ที่ผนังด้านซ้าย)		จุดที่ 3 (ที่ผนังด้านขวา)	
	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B
log 2.77±0.10	ND	log 2.58±0.16	log 2.00±0.10	log 2.00±0.08	log 2.30±0.08	log 2.00±0.10
log 6.05±0.18	ND	log 6.05±0.04	log 6.09±0.04	log 5.97±0.04	log 6.18±0.06	log 6.07±0.03
TNTC	ND	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC
TNTC	ND	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC

TNTC= Too numerous too count

ND = Not detect

จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B จะเห็นได้ว่าเพลทจุดที่ 1 ซึ่งวางอยู่ที่พื้น การฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator A สามารถลดปริมาณเชื้อเห็นผลได้อย่างชัดเจน ในขณะที่เครื่อง Fumigator B ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อได้ โดยปริมาณเชื้อหลังจาก fume ยังคงใกล้เคียงกับปริมาณเชื้อเริ่มต้นก่อนการ fume ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการฆ่าเชื้อเพลทที่วางจุดที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังด้านซ้ายและด้านขวาพบว่าทั้งเครื่อง Fumigator A และ B ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ลงได้

➤ การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S. aureus*

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *S. aureus* บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator A และ Fumigator B

ปริมาณเชื้อ เริ่มต้นก่อน Fume (CFU/mL)	จุดที่ 1 (ที่พื้นห้อง)		จุดที่ 2 (ที่ผนังด้านซ้าย)		จุดที่ 3 (ที่ผนังด้านขวา)	
	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B
log 2.00±0.18	ND	log 2.62±0.21	log 2.58±0.16	log 2.00±0.10	log 2.65±0.06	log 2.00±0.10
log 5.98±0.26	log 4±0.10	log 5.75±0.03	log 5.91±0.07	log 5.61±0.25	log 5.87±0.01	log 5.61±0.25
TNTC	log 7.18±0.26	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC
TNTC	log 7.18±0.26	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC	TNTC

การทดสอบการฆ่าเชื้อ *S. aureus* ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B (ตารางที่ 4.4) พบว่าเครื่อง Fumigator A มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อ *S. aureus* น้อย โดยเพลทที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ log 2.00±0.18 สามารถลดปริมาณเชื้อในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบเชื้อ (ND) แต่ในขณะที่เพลทที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นสูง เช่น log 5.98±0.26 หลังจาก fume ฆ่าเชื้อ สามารถลดปริมาณเชื้อลงเป็น log 4±0.10 ส่วนเพลทเริ่มต้นที่มีปริมาณเชื้อมาก (TNTC) หลังจาก fume พบว่าปริมาณเชื้อลดลงในระดับที่สามารถนับได้ที่ log 7.18±0.26 แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบเชื้อ (ND) แสดงว่าปริมาณเชื้อที่มากที่สุดที่สามารถลดได้จนอยู่ในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบเจออยู่ที่ log 2.00±0.18 ถ้าปริมาณเชื้อเริ่มต้นมากกว่านั้น เครื่อง Fumigator สามารถลดปริมาณเชื้อได้เพียงระดับหนึ่ง ในขณะที่เครื่อง Fumigator B ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อ *S. aureus* ได้ โดยปริมาณเชื้อหลังจาก fume ยังคงใกล้เคียงกับปริมาณเชื้อเริ่มต้นก่อนการ fume และผลการฆ่าเชื้อเพลทที่วางจุดที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังด้านซ้ายและด้านขวาพบว่า ทั้งเครื่อง Fumigator A และ B ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อ *S. aureus* ลงได้เช่นเดียวกับผล *E. coli* ก่อนหน้านี้

➤ การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *A. fumigatus*

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *A. fumigatus* บนเพลทที่วางจุดที่ 1, 2, และ 3 ด้วยเครื่อง Fumigator

A และ Fumigator B

ปริมาณเชื้อเริ่มต้น ก่อน Fume (CFU/mL)	จุดที่ 1 (ที่พื้นห้อง)		จุดที่ 2 (ที่ผนังด้านซ้าย)		จุดที่ 3 (ที่ผนังด้านขวา)	
	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B	Fumigator A	Fumigator B
log 3.00±0.42	ND	log 2.15±0.21	log 2.63±0.21	-	log 2.54±0.09	log 2.60±0.08
log 6.20±0.20	ND	log 4.60±0.42	TNTC	log 4.95±0.12	log 6.22±0.07	log 4.69±0.10
TNTC	ND	TNTC	TNTC	log 5.00±0.20	TNTC	log 5.77±0.12
TNTC	ND	TNTC	TNTC	log 7.01±0.08	TNTC	log 7.44±0.16

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อรา *A. fumigatus* พบว่าเพลทจุดที่ 1 ซึ่งวางที่พื้น การฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator A สามารถลดปริมาณเชื้อเห็นผลได้อย่างชัดเจน ในขณะที่เครื่อง Fumigator B สามารถลดปริมาณเชื้อได้ปริมาณน้อย เช่น ที่ปริมาณเชื้อเริ่มต้น log 3.00±0.42 และ log 6.20±0.20 สามารถลดปริมาณเชื้อลงเหลือ log 2.15±0.21 และ log 4.60±0.42 ในขณะที่เพลทที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นสูง (TNTC) หลังจากที่ใช้ fume ฆ่าเชื้อไปแล้ว ปริมาณเชื้อหลัง fume ก็ยังคงมีปริมาณสูง แต่เมื่อพิจารณาเพลทที่วางจุดที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังด้านซ้ายและด้านขวาพบว่าทั้งเครื่อง Fumigator B สามารถลดปริมาณเชื้อราได้ดีกว่าเครื่อง Fumigator A

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E. coli*, *S. aureus*, และ *A. fumigatus* ด้วยเครื่อง Fumigator A และ B จะเห็นได้ว่าเพลทที่วางที่พื้นจุดที่ 1 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Fumigator A ให้ผลการลดปริมาณเชื้อเห็นได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากละอองลอยที่ออกมาจากเครื่องจะสะสมอยู่บริเวณพื้นห้องจึงสัมผัสกับเพลทโดยตรง และมี contact time ที่นานประมาณ 7 นาที ดังนั้นจึงให้ผลประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อที่ดี ในขณะที่เครื่อง Fumigator B ไม่สามารถสังเกตทิศทางการปนกระจายของสารฆ่าเชื้อได้อย่างชัดเจน

สำหรับเพลทที่อยู่ที่ผนังจุดที่ 2 และ 3 พบว่าทั้งเครื่อง Fumigator A และ B ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากละอองลอยและสารฆ่าเชื้อจากเครื่อง Fumigator A และ B ไม่ได้สัมผัสกับเพลท จึงทำให้ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อลงได้ โดยเครื่อง Fumigator A การกระจายของละอองลอยจำกัดอยู่บริเวณที่พื้น ไม่ได้กระจายไปทั่วห้องที่จะส่งผลการฆ่าเชื้อเพลทที่ผนัง ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของเครื่อง Fumigator A จำเป็นต้องเปลี่ยน pump เพื่อเพิ่มแรงดันให้หมอกละอองลอยมีการกระจายอย่างทั่วทั้งห้อง ในขณะที่เครื่อง Fumigator B สารฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อรา *A. fumigatus* ได้ดีกว่าเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* โดยผลการฆ่าเชื้อเพลทจุดที่ 2 ผนังด้านซ้ายและจุดที่ 3 ผนังด้านขวา การฆ่าเชื้อสามารถลดปริมาณเชื้อจากปริมาณเริ่มต้นได้ดี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอโปรโตคอลรูปแบบใหม่เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราด้วยการใช้เทคโนโลยีแอดวานซ์ออกซิเดชันผ่านเครื่องฟ่นละอองลอยอนุโมลิสระไฮดรอกซิลในการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันโรคติดต่อ (HAIs) สำหรับสถานพยาบาลและสถานพักฟื้นผู้สูงอายุ โดยเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นการสร้างอนุโมลิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ปริมาณสูงในระบบละอองลอยที่มีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เป็นส่วนประกอบ โดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก (Photocatalytic process) จากแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ร่วมกับ โอโซนเนชั่น (Ozonation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการออกซิเดชันของละอองลอยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) คลื่นอัลตราโซนิคพลังงานสูงซึ่งผลิตจากตัวแปลงสัญญาณ piezoelectric ถูกนำมาใช้ในการผลิตหมอกหรือละอองลอยที่ประกอบไปด้วยอนุโมลิสระต่างๆ ทั้งนี้ใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่แตกต่างกันในหลายรูปแบบในการสร้างอนุโมลิสระ โดยการกระจายตัวของละอองให้ฤทธิ์ในการเกิดออกซิเดชันสูง สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* / coliform และเชื้อรา *Aspergillus niger* ที่เจริญบนผิวหนังหรือฆ่าเชื้อจุดที่ยากแก่การเข้าถึง หรือจุกรอยแตกแยก กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สารละลายโอโซน โดยใช้ (เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 7 กรัม/ชั่วโมงที่อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 2 ลิตร/นาที) และหลอดยูวี (4 หลอด แต่ละหลอดมีขนาด 15 วัตต์ ความเข้มแสงรวม 2.88 กิโลจูล/ตารางเมตร) จากผลการทดลองพบว่า การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว และการทำงานร่วมกันกับสารละลายโอโซนและแสงยูวีสามารถก่อให้เกิดอนุโมลิสระไฮดรอกซิลที่ทำให้จำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ลดลง แต่การใช้สารละลายโอโซนหรือยูวีเพียงอย่างเดียวไม่มีประสิทธิภาพ การฟ่นละอองด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวสามารถลดจำนวนของ *E. coli*/coliform ได้จากปริมาณเริ่มต้น และทำให้จำนวนเชื้อ *A. niger* ลดลงด้วย โดยได้ให้ผลดีกว่ากรณีของ *E. coli*/coliform ปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกด้วยการใช้แสงยูวีไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ *E. coli*/coliform อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับละอองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อย่างไรก็ตามสามารถยับยั้งเชื้อ *A. niger* ได้ด้วยการฟ่นละอองของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 1 เปอร์เซ็นต์

ในเวลา 10 นาที แต่เวลา 2 นาทีไม่เพียงพอในการยับยั้งเชื้อ *A. niger* งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยแสงยูวีร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่มีศักยภาพออกซิเดชันสูง โดยการทำงานของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ *E. coli/coliform* ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ *E. coli/coliform* ได้ภายในเวลา 30 วินาที และสามารถทำลายเชื้อ *A. niger* ได้ดีเช่นกัน เมื่อใช้ทั้งสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแสงยูวีร่วมกัน ยังสามารถลดเวลาในการทำลายเชื้อ *E. coli/coliform* ที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแม้ว่าเวลาในการฟ่นละลอมจะลดลง ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก็ยังคงอยู่ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำเพื่อลดการตกค้างของสารเคมีและลดความเป็นพิษ เพราะอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียรสามารถแตกตัวและสลายหายไปได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้แล้วในงานวิจัยยังได้นำเครื่องต้นแบบไปทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อที่พื้นผิวในโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าเครื่องต้นแบบ สามารถที่จะฆ่าเชื้อที่พื้นผิวได้ดีกว่าเครื่องฆ่าเชื้อที่นำเข้าจากต่างประเทศ สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา โดยทั้งนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถที่จะระเหยได้ง่ายหรือถูกทำลายได้หลังจากการใช้ (มีการสลายเป็นน้ำและออกซิเจนอย่างรวดเร็ว) ไม่มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และไม่ปรากฏปัญหาความปลอดภัยสำหรับบุคคลทำงานถ้ามีการใช้ด้วยความเหมาะสม การศึกษาเพิ่มเติมของ VHP ถูกมีความจำเป็นเพื่อให้เป็นที่ยอมรับในสถานการณ์ซึ่งเป็นการใช้เทคโนโลยีที่แตกต่างโดยเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และด้วยราคาที่เหมาะสมคุ้มค่า

เอกสารอ้างอิง

1. Acra, A., Jurdi, M., Muallem, H., Karahagopian, Y. and Raffoul, Z. 1990. Water Disinfection by Solar Radiation – Assessment and Application, Ottawa, IDRC.
2. Aguiar, A., Bainbridge, D., Bond, M., Gupta, C., Matthews, K., Plante, J., Rantanen, E., Turner, C., Yang, D., Zhang, W. and Drew, D. 1996. **Modeling UV-damage to *E. coli* bacteria**, Mathematical modeling for instructors', 1422–7, University of Minnesota, Minneapolis, MN, [online], Available: <http://www.ima.umn.edu/preprints/Sept96/1422g.pdf> [2011, February 20].
3. Allen, B., Wu, J. and Doan, H., 2003, “Inactivation of fungi associated with barley grain by gaseous ozone”, **J. Environ. Sci. Health**, Vol. 35, pp. 617–630.
4. Allende, A., Tomás-Barberán, F. A. and Gil, M.I., 2006, “Minimal processing for healthy traditional foods”, **Trends in Food Science and Technology**, Vol. 17, pp. 513-519.
5. Alexandre, E.M.C., Brandlo, T.R.S. and Silva, C.L.M., 2011, “Modelling microbial load reduction in foods due to ozone impact”, **Procedia Food Science Protection**, Vol. 56, No. 1, pp. 836–841.
6. Beltran, F.J., Ovejero, G. and Rivas, J., 1996, “Oxidation of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Water UV Radiation Combined with Hydrogen Peroxide”, **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 35, pp. 883-890.
7. Beltran, F.J., Encinar, J.M. and Alonso, M.A., 1998, “Nitroaromatic hydrocarbon ozonation in water. 2. Combined ozonation with hydrogen peroxide or UV radiation”, **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 37, pp. 32-40.
8. Byun, M., Kwon, O., Yook, H. and Kim, K., 1998, “Gamma irradiation and ozone treatment for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in culture media”, **Journal of Food Protection**, Vol. 61, pp. 728–730.
9. Byun, M., Kwon, O., Yook, H. and Kim, K., 1998, “Gamma irradiation and ozone treatment for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in culture media”, **Journal of Food Protection**, Vol. 61, pp. 728–730.

10. Cho, M., Chung, H. and Yoon, J., 2002, "Effect of pH and importance of ozone initiated radical reactions in inactivating *bacillus subtilis* spore", **Ozone Sci. Eng.**, Vol. 24, pp. 145–150.
11. Cho, M. and Yoon, J., 2006, "Enhanced bacterial effect of O₃/H₂O₂ followed by Cl₂", **Ozone Sci. Eng.**, Vol. 28, pp. 335–340.
12. Doong, R. and Chang, W., 1998, "Photo assisted iron compound catalytic degradation of organophosphorus pesticides with hydrogen peroxide", **Chemosphere**, Vol. 37, pp. 2563–2572.
13. Glaze, W.H., Kang, J.W. and Chapin, D.H., 1987, "The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation", **Ozone Sci. Eng.**, Vol. 9, pp. 335–42.
14. Guittoneau, S., De Laat, J., Duguet, J.P., Bonnel, C. and Dorle, M., 1990, "Oxidation of parachloronitrobenzene in dilute aqueous solution by O₃+UV and H₂O₂+UV: a comparative study", **Ozone Sci. Eng.**, Vol. 12, pp.73–94.
15. Guzel-Seydim, Z.B., Greene, A.K. and Seydim, A.C., 2004, "Use of ozone in the food industry", **Lebensm.-Wiss. U. – Technol.**, Vol. 37, pp. 453–460.
16. Guzel-seydim, Z., Bever, P.I. and Greene, A.K., 2004, "Efficacy of ozone to reduce bacterial populations in the presence of food components", **Food Microbiol.**, Vol. 21, pp.475–479.
17. Hakguder, B., 2009, "UV Disinfection of Some of the Fruit Juices, Decontamination of Berries with Ozone and Pulsed UV-light. Izmir", Turkey: İzmir Institute of Technology, **Department of Food Engineering**, MSc thesis.
18. Hanes, D.E., Worobo, R.W., Orlandi, P.A., Burr, D.H., Miliotis, M.D., Robl, M.G., Bier, J.W., Arrowood, M.J., Churey, J.J. and Jackson, G.J., 2002, "Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in fresh apple cider by UV irradiation", **Applied Environ. Microbiol.**, Vol. 68, No. 8, pp. 4168-4172.
19. Hoffman, R., 1971, "Inhibition and Destruction of the Microbial Cell", **Ozone. (Eds). Academic Press**, Chapter 4, pp. 251-253.

20. Hunt, N.K. and Marinnas, B.J. 1997. "Kinetics of *Escherichia coli* inactivation with ozone", **Water Research**, Vol. 31, pp. 1355-1362.
21. Hwang, E., Cash, J.N. and Zabik, M.J., 2002, "Chlorine and chlorine dioxide treatment to reduce or remove EBDCs and ETU residues in solution", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 50, pp. 4734-4742.
22. Ingram, M. and Haines, R.B., 1949, "Inhibition of bacterial growth by pure ozone in the presence of nutrients", **J. Hyg.**, Vol. 47, pp. 146–158.
23. Ishizaki, K., Shinriki, N. and Matsuyama, H., 1986, "Inactivation of *Bacillus* spores by gaseous ozone", **J. Appl. Bacteriol.**, Vol. 60, pp. 67–72.
24. Khadre, M.A. and Yousef, A.E., 2001, "Decontamination of multilaminated aseptic food packaging material and stainless steel by ozone", **J. Food Saf.**, Vol. 21, pp. 1–13.
25. Khalifa, A.M., Temsahy, M.M., Abou, E.L. and Naga, I.F., 2001, "Effect of ozone on the viability of some protozoa in drinking water", **J. Egypt Soc. Parasitol.**, Vol. 31, pp. 603-616.
26. Khueankhancharoen, J., Supanivatin, P., Saeung, W., Boonyaprapasorn, A. and Thipayarat, A., 2010, "Evaluation of Practical Analyses of Coliforms and *Escherichia coli* Detection and Enumeration for Industrial Food Samples", **Proceedings of International Conference for a Sustainable Greater Mekong Subregion**, pp. 210-214.
27. Kim, C.K., Gentile, D.M. and Sproul, O.J., 1980, "Mechanism of ozone inactivation of bacteriophage $\phi 2$ ", **Appl. Environ. Microbiol.**, Vol. 39, pp. 210–218.
28. Kim, J.G., Yousef, A.E. and Chism, G.M., 1999, "Use of ozone to inactivate microorganisms on lettuce" [Cited by: Xu, L., 1999, "Use of ozone to improve the safety of fresh fruits and vegetables" **Food Technology**, Vol. 33, No. 10, pp. 58-61, 63.]

29. Kim, J.G., Yousef, A.E. and Dave, S., 1999, "Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review", **Journal of Food Protection**, Vol. 62, pp. 1071-1087.
30. Kim, J.G., Yousef, A.E. and Khadre, M.A., 2003, "Ozone and its current and future application in the food industry", **Advances in Food and Nutrition Research**, Vol. 45, pp. 167-218.
31. Koutchma, T., Parisi, B. and Unluturk, S., 2006, "Evaluation of UV dose in flow-through reactors for fresh apple juice and cider", **Chem. Eng. Commun.**, Vol. 193, No. 6, pp. 715-728.
32. Kuo, F., Carey, J.B. and Ricke, S.C., 1997, "UV irradiation of shell eggs: effect on populations of aerobes, molds, and inoculated *Salmonella typhimurium*", **Journal of Food Protection**, Vol. 60, pp. 639-643.
33. Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M.L., Blatchley, E.R., Pommepuy, M., 1999, "Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives", **Water Sci. Technol.**, Vol. 40, pp. 203-213.
34. Li, M., Luo, L.J., Zhu, K.X., Guo, X.N., Peng, W. and Zhou, H.M., 2012, "Effect of vacuum mixing on the quality characteristics of fresh noodles", **Journal of Food Engineering**, Vol. 110, No. 4, pp. 525-531.
35. Liao, C. and Sapers, G.M., 2000, "Attachment and growth of *Salmonella* Chester on apple fruits and in vivo response of attached bacteria to sanitizer treatments", **Journal of Food Protection**, Vol. 63, pp. 876-883.
36. Matak, K.E., Churey, J.J., Worobo, R.W., Sumner, S.S., Hovingh, E., Hackney, C.R. and Pierson, M.D., 2005, "Efficacy of UV light for the reduction of *Listeria monocytogenes* in goat's milk", **J. Food Prot.**, Vol. 68, No. 10, pp. 2212-2216.
37. McDonough, M.X., Mason, L.J. and Woloshuk, C.P., 2011, "Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals", **Journal of Stored Products Research Protection**, Vol. 47, No. 4, pp. 306-310.

38. Merck, Darmstadt, **Germany, Chromocult® Coliform Agar for detection of coliforms in drinking water and processed food samples** [Online], Available:
http://www.amcoinstruments.com/index_files/pdf/chromocult-coliform.pdf [2010, September 15].
39. Meunier, L., Canonica, S., Von Gunten, U., 2006, “Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality”, **Water Research**, Vol. 40, No.9, pp. 1864–1876.
40. Milner, M. and Geddes, W.F., 1946, “Grain Storage Studies: III the Relation between Moisture Content, Mold Growth, and Respiration of Soybeans”, **Cereal Chem.**, Vol. 28, pp. 225-247.
41. Munter, R., 2001, “Advanced oxidation processes – current status and prospects” **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, Vol. 50, pp. 59–80.
42. Nagel, C.M. and Seminiuk, G., 1947, “Some Mold-Induced Changes in Shelled Corn”, **Plant Physiol.**, Vol. 22, pp. 20-38.
43. Ohmine, S., 2005, “Investigation of the mechanisms of ozone-mediated viral inactivation”, MS thesis, Utah State University.
44. Ormad, P., Puig, A., Sarasa, J., Roche, P., Mutuberria, S. and Ovelleiro, J.L., 1994, “Ozonation of wastewater resulting from the production of organochloride plaguicides derived from DDT and trichlorobenzene”, **Ozone Science and Engineering**, Vol. 16, pp. 487–503.
45. Otto, C., Zahn, S., Rost, F., Zahn, P., Jaros, D. and Rohm, H., 2011, “Physical methods for cleaning and disinfection of surfaces”, **Food Engineering Reviews**, Vol. 3, pp. 171-188.
46. Oztekin, S., Zorlugenc, B. and Zorlugenc, F.K., 2006, “Effects of ozone treatment on microflora of dried figs”, **J. Food Eng.**, Vol. 75, pp. 396–399.
47. Palou, L., Smilanick, J.L., Crisoto, C.H. and Mansour, M., 2001, “Effect of gaseous ozone exposure on development of green and blue molds on cold stored citrus fruit”, **Plant Dis.**, Vol. 85, pp. 632–638.
48. Pignatello, J.J., 1992, “Dark and photo-assisted Fe³⁺-catalyzed mineralization of chlorophenoxy herbicides by hydrogen peroxide”, **Environmental Science and Technology**, Vol. 26, pp. 944–951.

49. Peyton, G.R. and Glaze, W.H., 1988, "Destruction of pollutants in water with ozone in combination with ultraviolet radiation. 3. Photolysis of aqueous ozone", **Environ. Sci. Technol.**, Vol. 22, pp. 761–769.
50. Prado, J. and Esplugas, S., 1999, "Comparison of Different AOPs involving Ozone to Eliminate Atrazine", **Ozone Science and Engineering**, Vol. 21, No. 1, pp. 39-52.
51. Rachtanapun, P. and Tangnonthaphat, T., 2011, "Effect of Packaging Types and Storage Temperatures on the Shelf Life of Fresh Rice Noodle under Vacuum Conditions", **Chiang Mai J. Sci.**, Vol. 38, No. 4, pp. 579-589.
52. Rice, R.G., Farquhar, J.W. and Bollyky, L.J., 1982, "Review of the applications of ozone for increasing storage times of perishable foods", **Ozone Sci. Eng.**, Vol. 4, pp. 147–163.
53. Roy, D., Wong, P.K.Y., Engelbrecht, R.S. and Chian, E.S.K., 1981, "Mechanism of enteroviral inactivation by ozone", *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 41, pp. 718–723.
54. Saeung, W. and Boonyaprapasorn, A., 2010, "Comparison of mathematical models to describe nutrient limitation of *E. coli* colony expansion on TSA agar", **Proceedings of International Conference for a Sustainable Greater Mekong Sub region**, pp. 199 – 202.
55. Sapers, G.M. and Sites, J.E., 2003, "Efficacy of 1% hydrogen peroxide wash in decontaminating apples and cantaloupe melons", **Journal of Food Science**, Vol. 68, pp. 1793–1797.
56. Scott, D.B.M. and Leshner, E.C., 1963, "Effect of ozone on survival and permeability of *Escherichia coli*", **J. Bacteriol.**, Vol. 5, pp. 67–76.
57. Selma, M.V., Allende, A., López-Gálvez, F., Conesa, M.A. and Gil, M.I., 2008a, "Disinfection potential of ozone, ultraviolet-C and their combination in wash water for the fresh-cut vegetable industry", **Food Microbiology**, Vol. 25, pp. 809-814.

58. Selma, M.V., Allende, A., Lopez-Galvez, F., Conesa, M.A. and Gil, M.I., 2008b, "Heterogeneous photocatalytic disinfection of wash water from the fresh-cut vegetable industry", **J. Food Prot.**, Vol. 71, pp. 286–292.
59. Singh, N., Singh, R.K., Bhunia, A.K. and Stroschine, R.L., 2002, "Efficacy of chlorine dioxide, ozone, and thyme essential oil or a sequential washing in killing *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce and baby carrots", **Lebensm Wissensch Technol.**, Vol. 35, pp. 720-729.
60. Sharma, R.R., Demirci, A., Beuchat, L.R. and Fett, W.F., 2002, "Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with ozonated water and heat treatment", **Journal of Food Protection**, Vol. 65, pp. 447–451.
61. Supanivatin, P., Khueankhanchaoen, J., Saeaug, W., Boonyaprapasorn, A. and Thipayarat, A., 2010, "Industrial implementation of fast Total Plate Count analysis applying Micro Inoculation Culture on frozen ready-to-eat food Products", **Proceedings of International Conference for a Sustainable Greater Mekong Subregion**, pp. 139-144.
62. Thanomsub, B., Anupunpisit, V., Chanphetch, S., Watcharachaipong, T., Poonkhum, R. and Srisukonth, C., 2002, "Effects of ozone treatment on cell growth and ultrastructural changes in bacteria", **J. Gen. Appl. Microbiol.**, Vol. 48, pp. 193–199.
63. Unluturk, S., Atilgan, M.R., Baysal, A.H., and Unluturk, M.S., 2010, "Modeling inactivation kinetics of liquid egg white exposed to UV-C irradiation", **International Journal of Food Microbiology**, Vol. 142, pp. 341–347.
64. Venosa, A.D., Perasek, A.C., Brown, D., Sparks, H.L. and Allen, D.M., 1984, "Disinfection of secondary effluent with ozone/UV", **Journal of Water Pollutant Control Fed.**, Vol. 56, No. 2, pp. 137–142.
65. Victorin, K., 1992, "Review of the genotoxicity of ozone", **Mutat. Res.**, Vol. 277, pp. 221-238.

66. Von Sonntag, C., 1986, "Disinfection by free radicals and UV-radiation", **Journal International Water Supply Assoc.**, Vol. 4, No. 3, pp. 11–18.
67. Wade, W.N., Scouten, A.J., McWatters, K.H., Wick, R.L., Demirci, A., Fett, W.F. and Beuchat, L.R., 2003, "Efficacy of ozone in killing *Listeria monocytogenes* on alfalfa seeds and sprouts and effects on sensory quality of sprouts", **Journal of Food Protection**, Vol. 66, pp. 44–51.
68. Ward, H.S. and Diener, U.L., 1961, "Biochemical Changes in Shelled Peanuts Caused by Storage Fungi", **Phytopath.**, Vol. 51, pp. 244-250.
69. Xu, L., 1999, "Use of ozone to improve the safety of fresh fruits and vegetables", **Food Technology**, Vol. 33, No. 10, pp. 58–61, 63.
70. Yaun, B.R., Sumner, S.S., Eifert, J.D. and Marcy, J.E., 2004, "Inhibition of pathogens on fresh produce by ultraviolet energy", **International Journal of Food Microbiology**, Vol. 90, pp. 1–8.
71. Imlay, J.A. and S. Linn, 1987. Mutagenesis and stress responses induced in *Escherichia coli* by hydrogen peroxide. *J. Bacteriol.*, 169(7): 2967-2976.
72. Barbut, F., D. Menuet, M. Verachten and E. Girou, 2009. Comparison of the efficacy of a hydrogen peroxide dry-mist disinfection system and sodium hypochlorite solution for eradication of *Clostridium difficile* spores. *Infect Control Hosp Epidemiol.*, 30(6): 507-514.
73. Klapes, N.A. and D. Vesley, 1990. Vapor-phase hydrogen peroxide as a surface decontaminant and sterilant. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(2): 503-506.
74. Grare, M., M. Dailloux, L. Simon, P. Dimajo and C. Laurain, 2008. Efficacy of dry mist of hydrogen peroxide (DMHP) against *Mycobacterium tuberculosis* and use of DMHP for routine decontamination of biosafety level 3 laboratories. *J. Clin Microbiol.*, 46(9): 2955-2958.

75. Hall, L., J.A. Otter, J. Chewins and N.L. Wengenack, 2007. Use of hydrogen peroxide vapor for deactivation of *Mycobacterium tuberculosis* in a biological safety cabinet and a room. *J. Clin Microbiol.*, 45(3): 810-815.
76. Krause, J., G. McDonnell, and H. Riedesel: Biodecontamination of animal rooms and heat-sensitive equipment with vaporized hydrogen peroxide. *Contemp. Top. Lab Anim Sci.* 40(6):18–21 (2001).
77. SHELDON B.W. & BRAKE I (1991). - Hydrogen peroxide as a hatching egg disinfectant. *Poult. Sci.*, 70,1092-1098.
78. SPAULDING E.H., CUNDY K.R. & TURNER F.J. (1977). - Chemical disinfection of medical and surgical materials. In *Disinfection, sterilization, and preservation*, 2nd Ed. (S.S. Block, ed.). Lea & Febiger, Philadelphia, 654-684.
79. Klapes NA & D Vesley: Vapor-phase hydrogen peroxide as a surface decontaminant and sterilant. *Appl Environ Microbiol* 1990, 56, 503-506.
80. McDonnell, G., & Russell, A. D. (1999). Antiseptics and disinfectants: Activity, action, and resistance. *Clinical Microbiology Reviews*, 12, 147-179.
81. Rutala WA. Selection and use of disinfectants in healthcare. In: Mayhall CG, editor. *Hospital epidemiology and infection control*. 2nd ed. London: William and Wilkins; 1999. p. 1161—1187.
82. Weber DJ, Rutala WA. The emerging nosocomial pathogens *Cryptosporidium*, *Escherichia coli* O157:H7, *Helicobacter pylori*, and hepatitis C: epidemiology, environmental survival, efficacy of disinfection, and control measures. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2001; 22:306—315.
83. Russel AD, Furr JR, Maillard J-Y. Microbial susceptibility and resistance to biocides. *AMS News* 1997;63:481—487.

84. Rincón, A.G., C. Pulgarin, N. Adler and P. Peringer, 2001. Interaction between E. coli inactivation and DBP-precursors--dihydroxybenzene isomers--in the photocatalytic process of drinking-water disinfection with TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental.*, 139(25): 233-241.
85. Heckert RA, M Best, LT Jordan, GC Dulac, DL Eddington & WG Sterritt: Efficacy of vaporized hydrogen peroxide against exotic animal viruses. *Appl Environ Microbiol* 1997, 63, 3916- 3918.
86. Kahnert A, P Seiler, M Stein, B Aze, G McDonnell & SHE Kaufmann: Decontamination with vaporized hydrogen peroxide is effective against Mycobacterium tuberculosis. *Letters Appl Microbiol* 2005, 40, 448-452.
87. James R Rickloff. Resistance of various micro-organisms to vaporized hydrogen peroxide in prototype tabletop sterilizer. Paula A Oreliski, 89th Annual Meeting of the ASM May 1989, New Orleans.
88. Health Protection Agency (HPV) (formerly CAMR). Cabinet bio-decontamination trial. Porton Down. March 1995.
89. Finnegan M, Denyer SP, McDonnell G, et al. Mode of action of hydrogen peroxide and other oxidizing agents: differences between liquid and gas forms. *J Antimicrob Chemother.* 2010;65(10):2108–15.

ผลผลิต (Output)

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่ม เลขที่ และหน้า)
-
2. การจดสิทธิบัตร
2.2 อนุสิทธิบัตร “เครื่องฟ้นละอองลอยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ในการฆ่า เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และป้องกันการติดเชื้อในโรงพยาบาล (Health care-Associated Infections: HAIs)”
วันที่ยื่นคำขอ 12 พฤศจิกายน 2562 เลขที่คำขอ 1903002981
3. ผลงานเชิงพาณิชย์ (มีการนำเสนอไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการประยุกต์ใช้โดยภาครัฐกิจ หรือบุคคลทั่วไป)
ได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีเครื่องต้นแบบเครื่องฟ้นละอองลอยฆ่าเชื้อปนเปื้อนในพื้นที่ผลิตอาหาร ด้วยเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงปลอดสารพิษตกค้างในการยกระดับคุณภาพอาหารปลอดภัยสำหรับ อุตสาหกรรมอาหาร แก่ภาคอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยได้รับการตอบรับเป็นที่พึงพอใจจากภาคอุตสาหกรรม
4. ผลงานเชิงสาธารณะ (เน้นประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ท้องถิ่น)
การลดปัญหาการติดเชื้อด้วยเทคโนโลยีที่ประสิทธิภาพและมีต้นทุนที่เหมาะสมสามารถจับต้องได้ จะ เป็นการช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์โดยรวมของอุตสาหกรรมอาหารของประเทศ อีกทั้งยังเป็นการลดการ นำเข้าสารเคมีและอุปกรณ์ที่มีราคาแพงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตอาหารที่สามารถเข้าถึงได้ เฉพาะอุตสาหกรรมขนาดใหญ่
 - ประสิทธิภาพและความสมบูรณ์ในการฆ่าเชื้อด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ มีความแรงของ สารฆ่าเชื้อที่ผลิตได้จากเครื่องฯ มีค่าสูงกว่าสารอื่นที่มีใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน
 - ไร้สารตกค้างและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่การฆ่าเชื้อโรคในปัจจุบันจะมีสารตกค้าง ในสิ่งแวดล้อมและมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นการใช้งานด้วยสารอื่นๆต้องระวังความเป็นพิษต่อ

สุขภาพ และอาจเกิดการระเบิดได้หากเก็บรักษาไม่ถูกวิธี

- เคลื่อนย้ายสะดวกเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบให้สามารถใช้งานในพื้นที่แคบและเพื่อการเคลื่อนย้ายไปใช้ในจุดต่างๆของสถานที่ไว้โดยเฉพาะ แก้ปัญหาเครื่องที่ใช้กับเทคโนโลยีอื่นที่มีขนาดใหญ่ จึงสามารถใช้ประโยชน์จากเครื่องพ่นหมอกฆ่าเชื้อได้อย่างสะดวกและเต็มพื้นที่ในทุกพื้นที่ที่ต้องการฆ่าเชื้อทำความสะอาด อีกทั้งยังเหมาะสำหรับกลุ่มธุรกิจ SMEs