

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยการเติมคลอรีน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี และกระบวนการไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ในที่นี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำกลั่นแบบที่ละเท การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบที่ละเท และการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบไหลต่อเนื่อง ดังผลที่จะอภิปรายดังต่อไปนี้

4.1 การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยการเติมคลอรีน

4.1.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำกลั่นด้วยการเติมคลอรีนแบบที่ละเท

เมื่อใช้คลอรีนความเข้มข้น 0.5-1 พีพีเอ็ม ตามข้อกำหนดคลอรีนหลงเหลือของการประปานครหลวง (2552) ในการกำจัดเชื้อ *E. coli* จำนวน 6,800-65,000 โคโลนี ในน้ำ 600 มิลลิลิตร หรือความเข้มข้นเริ่มต้น 11-108 โคโลนี/มิลลิลิตร และสปอร์ของ *B. subtilis* จำนวน 650-3,900 โคโลนี ในน้ำ 600 มิลลิลิตร หรือความเข้มข้นเริ่มต้น 1-7 โคโลนี/มิลลิลิตร พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นคลอรีนหลงเหลือ 0.7 พีพีเอ็ม คลอรีนสามารถกำจัดได้เฉพาะ *E. coli* แต่ไม่สามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้เลย โดยประสิทธิภาพการกำจัด *E. coli* จะลดลงเมื่อปริมาณเชื้อเริ่มต้นสูงขึ้นจาก 6,800 โคโลนี ไปเป็น 65,000 โคโลนี (ตารางที่ 4.1) โดยที่คลอรีนสามารถกำจัดเชื้อเริ่มต้น 6,800 โคโลนี ได้หมดในเวลา 90 นาที ขณะที่เชื้อเริ่มต้น 34,000 โคโลนี และ 65,000 โคโลนี การกำจัด *E. coli* จนหมดต้องใช้เวลา 120 นาที และ 150 นาที ตามลำดับ ซึ่งการที่ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างนาน ทำให้การนำไปใช้ในระบบบำบัดอาจทำได้ยาก เพราะจะมีการปล่อยน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา

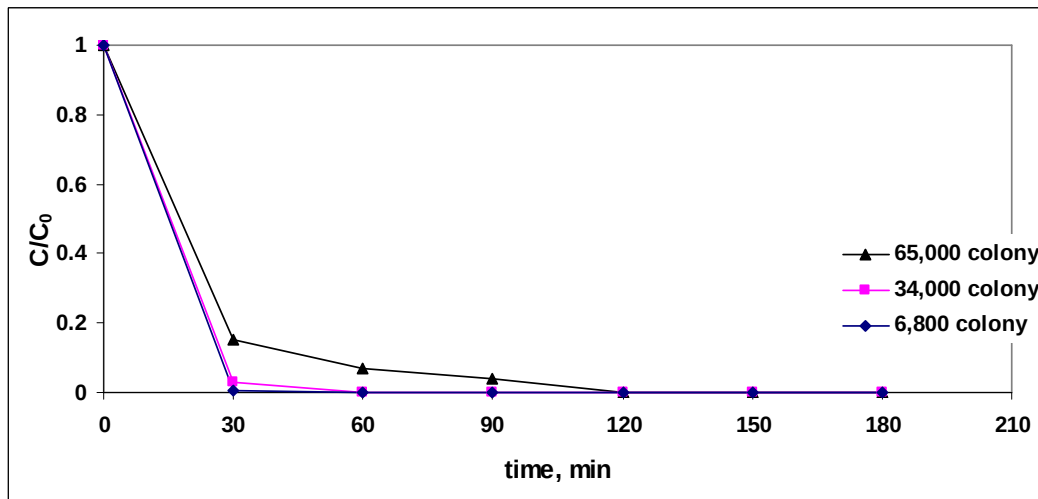
ตารางที่ 4.1 จำนวน *E. coli* ที่เวลาต่างๆ ในน้ำกลั่น จากการเติมคลอรีนแบบทีละเท

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนีที่พบ		
0	6,800	34,000	65,000
30	23	950	9800
60	2	30	5000
90	0	10	2930
120	0	0	60
150	0	0	0
180	0	0	0

ทั้งนี้จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นในตารางที่ 4.1 ที่เวลา 0 นาทีนั้นไม่เท่ากัน เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ภาพที่ 4.1 จึงแสดงการลดลงของ *E. coli* ในช่วงเวลาต่างๆ ในรูปของ C/C_0 ซึ่งเป็นสัดส่วนของความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่เวลาใดๆ (C) กับความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่เวลาเริ่มต้น (C_0) ดังสมการที่ 17 ซึ่งค่า k คือค่าคงที่ของการกำจัดจุลินทรีย์ (Metcalf & Eddy, 2004)

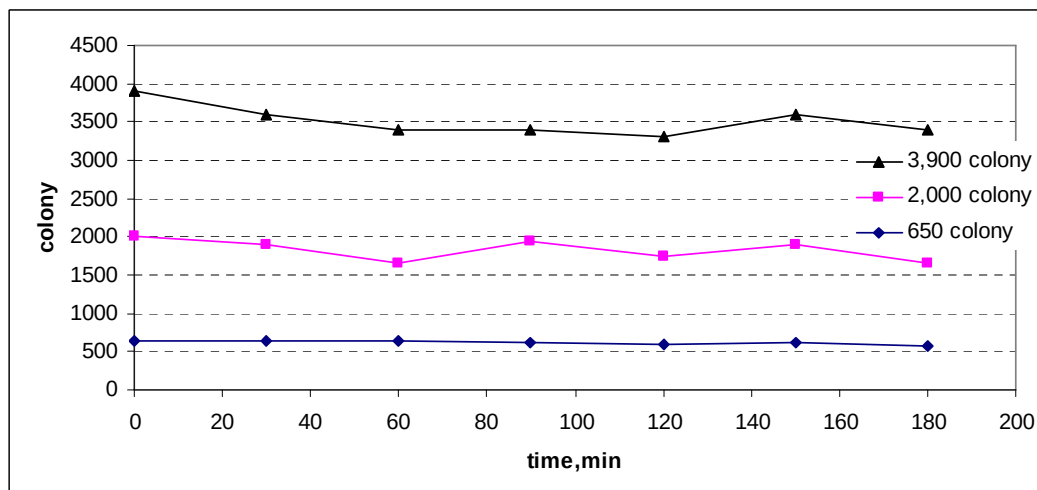
$$\frac{C}{C_0} = e^{-kt} \quad (17)$$

จากการศึกษาพบว่าที่เวลา 30 นาที คลอรีนสามารถกำจัด *E. coli* ที่ความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้น 68,00 โคโลนี, 34,000 โคโลนี และ 65,000 โคโลนี ได้ 99.67%, 97.21% และ 84.92% ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Junli et al. (1997) ที่ใช้คลอรีน 1.1 พีพีเอ็ม สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 95% ในเวลา 20 นาที



ภาพที่ 4.1 การกำจัด *E. coli* ในน้ำกลั่นที่เชื้อเริ่มต้นต่างๆ ด้วยวิธีการเติมคลอรีนแบบทีละเท

ในส่วนสปอร์ของ *B. subtilis* คลอรีนไม่สามารถกำจัดได้ไม่ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสปอร์ *B. subtilis* จะต่ำหรือสูงก็ตาม (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากสปอร์ของ *B. subtilis* มีผนังเซลล์ที่แข็ง และทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี และคลอรีนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้น้อยกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล (Lysett et al., 1994) ดังนั้นวิธีการเติมคลอรีนจึงไม่น่าจะเหมาะสมต่อการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis*

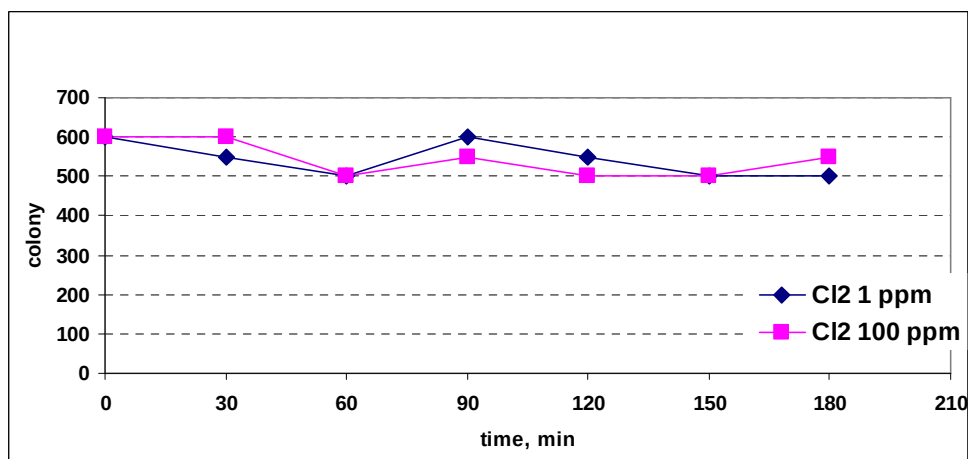


ภาพที่ 4.2 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นที่เชื้อเริ่มต้นต่างๆ ด้วยวิธีการเติมคลอรีนแบบทีละเท

4.1.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยการเติมคลอรีนแบบทีละเท

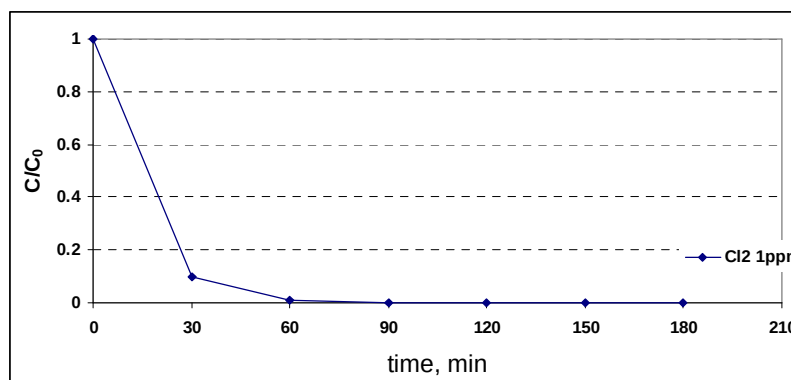
น้ำเสียในที่นี้มาจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานีที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แล้ว แต่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรค น้ำเสียมีความขุ่น 1.36-1.62 เอ็นทียู, บีโอดี = 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 62-92 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 12-16 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7.2-7.9

การเติมคลอรีนลงในน้ำเสียที่มีสปอร์ของ *B. subtilis* อยู่ด้วยนั้น พบว่าคลอรีน 1 พีพีเอ็ม ไม่สามารถกำจัดสปอร์ของแบคทีเรียได้เลย และแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนสูงถึง 100 พีพีเอ็ม แล้วก็ตาม คลอรีนก็ยังไม่มีความสามารถในการกำจัดสปอร์ของแบคทีเรียได้ (ภาพที่ 4.3) เช่นเดียวกับการทดสอบในน้ำกลั่น



ภาพที่ 4.3 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยการเติมคลอรีนแบบทีละเท

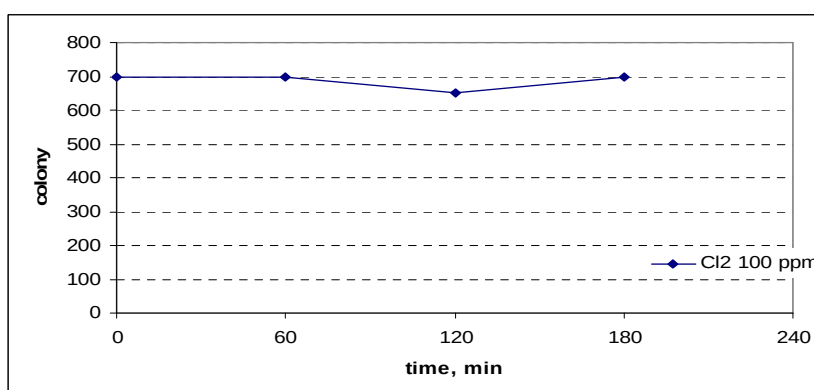
ในขณะที่คลอรีนความเข้มข้น 1 พีพีเอ็ม สามารถลดจำนวน *E. coli* จาก 195 โคโลนี ให้เหลือเพียง 20 โคโลนี ได้ในเวลา 30 นาที (ประสิทธิภาพ 89.74%) และสามารถกำจัดได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 90 นาที (ภาพที่ 4.4)



ภาพที่ 4.4 การกำจัด *E. coli* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีการเติมคลอรีนแบบทีละเท

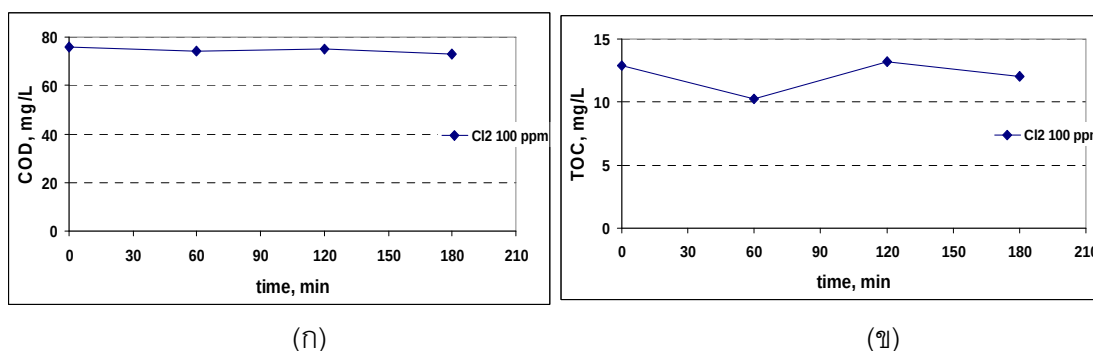
4.1.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยการเติมคลอรีนแบบไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ทั้งในน้ำกลั่น และในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบทีละเท พบว่าการเติมคลอรีนไม่สามารถกำจัดสปอร์ของแบคทีเรียได้ถึงแม้ใช้ความเข้มข้นของคลอรีนสูงถึง 100 พีพีเอ็ม ก็ตาม แต่เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง จึงได้มีการทดสอบการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบไหลต่อเนื่องอีกครั้ง โดยน้ำเสียที่ใช้มีความขุ่น 1.12 เอ็นทียู, บีโอดี = 8 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 80 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 6.2 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7.40 พบว่าคลอรีนไม่สามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้เช่นเดิม (ภาพที่ 4.5) สอดคล้องกับการรายงานของกองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ (2549) ที่ระบุว่าคลอรีนไม่สามารถกำจัดสปอร์ของแบคทีเรียได้



ภาพที่ 4.5 การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาล ด้วยวิธีการเติมคลอรีนแบบไหลต่อเนื่อง

ในแง่ของปริมาณซีโอดีและทีโอซี จากการเติมคลอรีน การศึกษานี้ได้วิเคราะห์หาค่าซีโอดีและทีโอซีที่เวลาผ่านไป พบว่าปริมาณซีโอดีและทีโอซีในน้ำเสียโรงพยาบาลไม่ได้ลดลงไปจากค่าเริ่มต้น (ภาพที่ 4.6)



ภาพที่ 4.6 ปริมาณซีโอดี (ก) และทีโอซี (ข) ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้การเติมคลอรีนแบบไหลต่อเนื่อง

4.2 การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี

4.2.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำกลั่นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีแบบที่ละเท

การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี กระทำที่ความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยตารางที่ 4.2 แสดงจำนวน *E. coli* ที่เวลาต่างๆ เมื่อฉายด้วยแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี พบว่าที่ความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร รังสีสามารถกำจัด *E. coli* ความเข้มข้นเริ่มต้น 8,000 โคโลนี, 37,000 โคโลนี และ 72,000 โคโลนี ได้ 99.95%, 99.94% และ 99.93% ตามลำดับ ภายในเวลา 30 นาที และสามารถกำจัด *E. coli* ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 60 นาที ขณะที่ความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัด *E. coli* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1,100 โคโลนี, 2,400 โคโลนี และ 3,500 โคโลนี ได้ 99.27%, 99.4% และ 99.94% ตามลำดับ ภายในเวลา 30 นาที และสามารถกำจัด *E. coli* ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 90 นาที โดยใช้เวลาในการกำจัด *E. coli* มากกว่าที่ความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งๆ ที่จำนวน *E. coli* ที่ใช้นั้นมีปริมาณน้อยกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Labas et al. (2005) ที่สามารถกำจัด *E. coli* ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น 10^4 - 10^8 โคโลนี/มิลลิลิตร ได้ 99.99% ในเวลา 10 นาที เมื่อใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี 3.5 วัตต์ (ไม่ได้ระบุความเข้มแสง)

ตารางที่ 4.2 จำนวน *E. coli* ในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี แบบที่ละเท

เวลา (นาที่)	จำนวนโคโลนีที่พบ					
	ความเข้มแสง 2.1 mW/cm ²			ความเข้มแสง 4.55 mW/cm ²		
0	1,100	2,400	3,500	8,000	37,000	72,000
15	20	50	70	*	*	*
30	8	14.5	2	3.5	20	50
45	1	2	1	*	*	*
60	0.5	1	1	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0

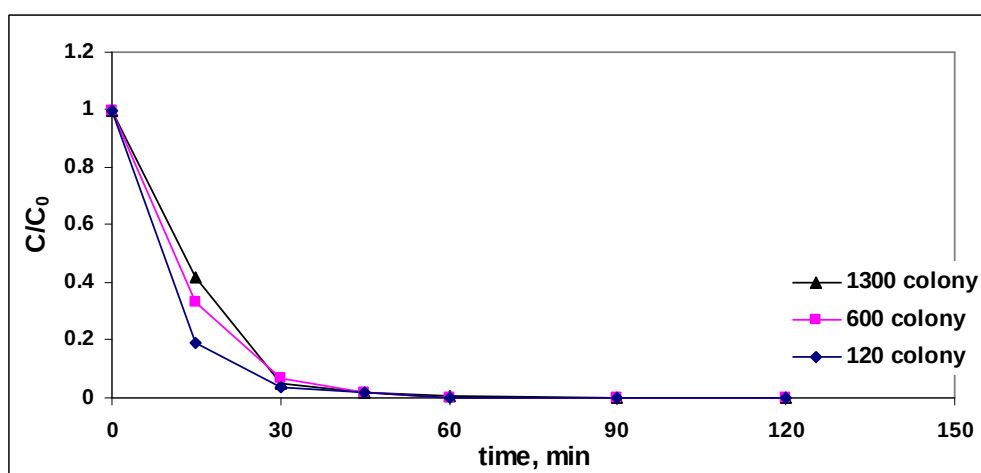
* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

ในส่วนของการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ตารางที่ 4.3) พบว่าที่ความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ที่ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น 120 โคโลนี, 600 โคโลนี และ 1,300 โคโลนี ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ (ภาพที่ 4.7) ขณะที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้เวลาในการกำจัดน้อยกว่าแม้ว่าจะมีความเข้มข้นสปอร์ของ *B. subtilis* เริ่มต้นสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น คือที่เวลา 30 นาที จำนวน *B. subtilis* ลดจาก 710 โคโลนี เหลือเพียง 2 โคโลนี และสามารถกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ที่มีจำนวนเริ่มต้น 710-4,300 โคโลนี ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 60 นาที หรืออาจจะน้อยกว่านั้นก็เป็นได้

ตารางที่ 4.3 จำนวน *B. subtilis* ในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี แบบที่ละเท

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนีที่พบ					
	ความเข้มแสง 2.1 mW/cm ²			ความเข้มแสง 4.55 mW/cm ²		
0	120	600	1,300	710	1,500	4,300
15	20	200	550	*	*	*
30	4	40	70	2	10	40
45	1	11	30	*	*	*
60	0	1	5	0	0	0
90	0	0	0.5	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น



ภาพที่ 4.7 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสปอร์ *B. subtilis* ต่างๆ ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบที่ละเท

จากการทดสอบการกำจัดเชื้อ *E. coli* และสปอร์ของ *B. subtilis* พบว่าความเข้มแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wright & Cairns (2009) ที่รายงานการกำจัด *E. coli* และสปอร์ของ *B. subtilis* ได้ 90% ที่ความเข้มแสง 3 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 12 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แต่ถ้านำมาใช้ในการให้มีประสิทธิภาพ 99% การศึกษาดังกล่าวต้องเพิ่มความเข้มแสงเป็น 6.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 22 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีที่ความเข้มแสงสูงขึ้นก็จะมีพลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้สามารถทำลายดีเอ็นเอของจุลินทรีย์ได้ดีจนไม่สามารถขยายพันธุ์ต่อไปได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดด้วยวิธีการฉายแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำ โดยถ้าน้ำมีความขุ่นมาก รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีอาจจะไม่ได้สัมผัสกับจุลินทรีย์โดยตรง จุลินทรีย์ก็อาจไม่ถูกทำลายได้เนื่องจากรังสีต้องทำอันตรรกกับดีเอ็นเอของเซลล์โดยตรงรวมถึงเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะต้องมากพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ ทั้งนี้การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี นั้นต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี เป็นอันตรายต่อดวงตาซึ่งจะไปทำลายเยื่อตาได้ (บริษัท เฟอร์ส แอนด์ เฟอร์ม, 2553)

4.2.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีแบบที่ละเท

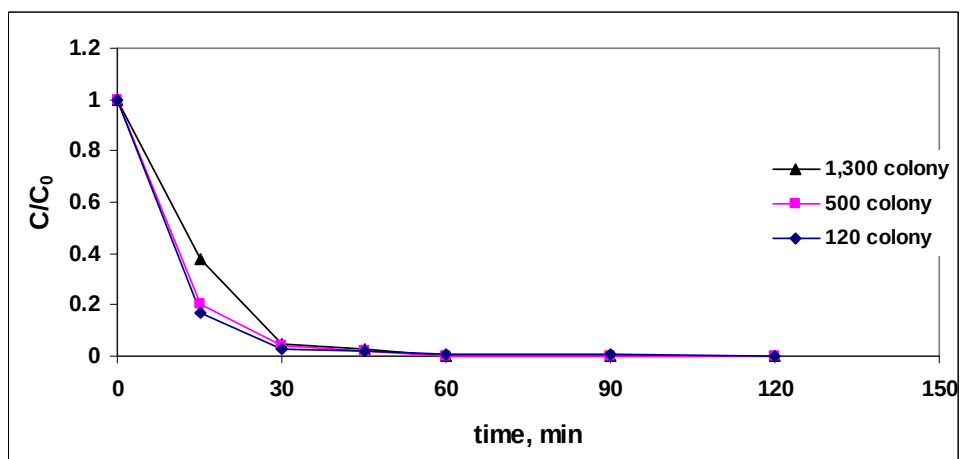
น้ำเสียที่ใช้มีความขุ่น 1.36-1.62 เอ็นทียู, ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (ความยาวคลื่นหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี) = 0.034, บีโอดี = 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 62-92 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7-8 ใช้รังสีรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ที่จำนวนเชื้อเริ่มต้น 0.2-2 โคโลนี (120-1,300 โคโลนี/น้ำเสีย 600 มิลลิลิตร) และความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในการกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ที่จำนวนเชื้อเริ่มต้น 1 โคโลนี/มิลลิลิตร (หรือ 600 โคโลนี/600 มิลลิลิตร) เปรียบเทียบกับ 0.33 โคโลนี/มิลลิลิตร (หรือ 195 โคโลนี/600 มิลลิลิตร) ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวน *B. subtilis* เมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ในช่วงเวลาต่างๆ พบว่าที่เวลา 30 นาที รังสีรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ที่ความเข้มขึ้นเชื้อเริ่มต้น 120 โคโลนี, 500 โคโลนี และ 1,300 โคโลนี ได้ 96.67%, 96% และ 95.38% ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8) ขณะที่เมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดสปอร์ *B. subtilis* จาก 195 โคโลนี ให้เหลือเพียง 5 โคโลนี ได้

(ประสิทธิภาพการกำจัด 97%) และสามารถกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ได้จนหมดสิ้น เมื่อฉายแสงครบ 90 นาที ส่วนที่ความเข้มข้นสปอร์ *B. subtilis* เริ่มต้น 600 โคโลนี รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีสามารถกำจัดสปอร์ให้เหลือเพียง 20 โคโลนี ได้ (ประสิทธิภาพการกำจัด 97%) ในเวลา 30 นาที เช่นเดียวกัน และที่เวลา 1 ชั่วโมง (หรืออาจจะน้อยกว่านั้น) สามารถกำจัดได้หมดทั้งสิ้น (ภาพที่ 4.9) โดยในการศึกษาที่เกี่ยวข้องพบว่า Selma et al. (2007) ใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี 15 วัตต์ (ไม่ทราบความเข้มแสง) สามารถกำจัด Total Coliforms ได้ 99% ในเวลา 40 นาที และการศึกษาของ Paleologou et al. (2007) สามารถกำจัด Total coliforms ที่ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น 10^3 - 10^4 โคโลนี/มิลลิลิตร ได้ 99.99% เมื่อฉายแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ไม่ทราบความเข้มแสง) เป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้ coliforms นั้นเป็นแบคทีเรียที่มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแบคทีเรียที่สร้างสปอร์อย่าง *B. subtilis* มาก

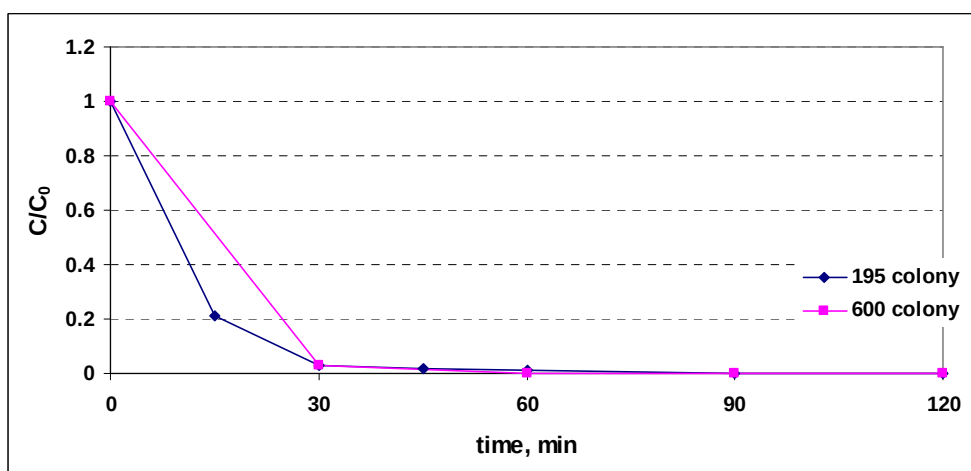
ตารางที่ 4.4 จำนวน *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีแบบที่ละเท

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนีที่พบ				
	ความเข้มแสง 2.1 mW/cm ²			ความเข้มแสง 4.55 mW/cm ²	
0	120	500	1300	195	600
15	20	100	500	40	*
30	4	20	60	5	20
45	2	8	40	3.5	*
60	1	1	4	2	0
90	0.5	1	2	0	0
120	0	0	0.5	0	0

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น



ภาพที่ 4.8 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสปอร์ *B. subtilis* ต่างๆ ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบที่ละเท



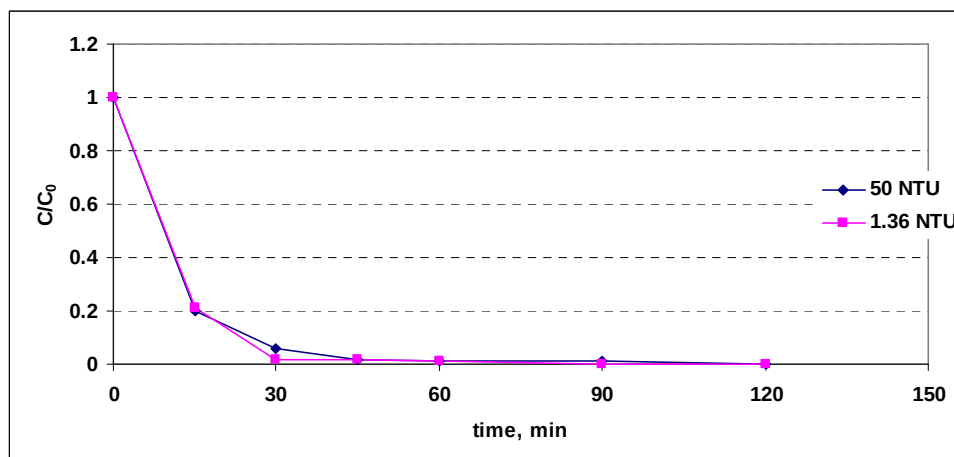
ภาพที่ 4.9 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสปอร์ *B. subtilis* ต่างๆ ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบที่ละเท

เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยวิธีรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี นั้นขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำด้วย ซึ่งถ้ามีความขุ่นมากๆ ทำให้แสงไม่สามารถสัมผัสจุลินทรีย์ได้โดยตรง โดยน้ำเสียโรงพยาบาลที่นำมาทดลองมีความขุ่นค่อนข้างต่ำ (1.36-1.62 เอ็นทียู) การศึกษาจึงได้มีการทดสอบกับน้ำผิวดินที่มีความขุ่นสูงกว่านี้ โดยใช้น้ำที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตซี สามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* จาก 150 โคโลนี ให้เหลือเพียง 10 โคโลนีได้ (ประสิทธิภาพ 93.33%) ภายในเวลา 30 นาที ดังตารางที่ 4.5 ขณะที่น้ำเสียโรงพยาบาลที่มีความขุ่น 1.36 เอ็นทียู มีประสิทธิภาพการกำจัด 97%

ตารางที่ 4.5 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำที่มีความขุ่นต่างกัน ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนี ที่พบ	
	ความขุ่น 1.36 NTU (น้ำเสียโรงพยาบาล)	ความขุ่น 50 NTU (น้ำผิวดิน)
0	195	150
15	40	30
30	5	10
45	3.5	3
60	2	2
90	0	1.5
120	0	0

เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนขึ้น ภาพที่ 4.10 จึงแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำที่มีความขุ่น 1.36 เอ็นทียู กับน้ำที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู พบว่ารูปแบบการกำจัดจุลินทรีย์นั้นใกล้เคียงกัน แต่น้ำที่มีความขุ่น 1.36 เอ็นทียู รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี สามารถกำจัดสปอร์ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 90 นาที ขณะที่น้ำที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ต้องใช้เวลา 120 นาที แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบในเชิงสถิติ พบว่าความแตกต่างนั้นไม่นัยสำคัญ ($p = 0.386$) แสดงให้เห็นว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตซี สามารถกำจัดสปอร์ของแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความขุ่นตั้งแต่ 1.36-50 เอ็นทียู



ภาพที่ 4.10 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำที่มีความขุ่นต่างกัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบที่ละเท

4.2.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบไหลต่อเนื่อง

การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบไหลต่อเนื่อง ในที่นี้ใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง 1.97 ± 0.11 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากกระบอกทดลองมีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร x ยาว 89 เซนติเมตร ถึงแม้จะใช้จำนวนหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สูงสุดเท่าที่มีแล้วก็ตาม ความเข้มแสงสูงสุดที่วัดได้มีค่าเพียง 1.97 ± 0.11 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เท่านั้น น้ำเสียที่ใช้มีความขุ่น 2.05-2.23 เอ็นทียู, ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร = 0.035, บีโอดี = 7.24-8.13 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 56-58 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 13-21 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7.10-7.64 พบว่าที่เวลา 30 นาที จำนวน *B. subtilis* ลดจาก 550 โคโลนี เหลือเพียง 2 โคโลนี (ตารางที่ 4.6) และสามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ที่จำนวนเชื้อเริ่มต้น 550-650 โคโลนี ได้หมดทั้งสิ้นภายในเวลา 90 นาที ในส่วนการกำจัด *E. coli* สามารถกำจัด 99.92% ในเวลา 10 นาที (ตารางที่ 4.7) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบแบบที่ละเท

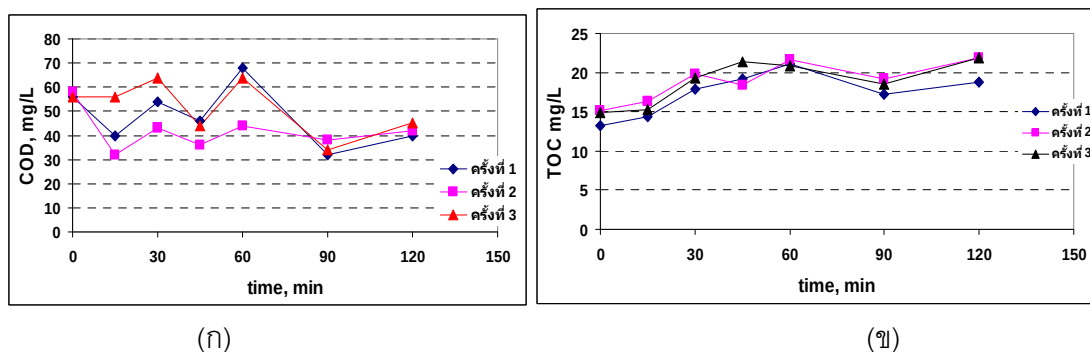
ตารางที่ 4.6 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี แบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	จำนวนโคโลนีที่พบ		
0	550	600	650
15	20	40	15
30	2	20	4
45	1	1	1
60	0	1	0.5
90	0	0	0

ตารางที่ 4.7 จำนวน *E. coli* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี แบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	จำนวนโคโลนีที่พบ		
0	3,700	2,000	2,200
10	3	2	1
20	0	0	0

เมื่อตรวจสอบปริมาณซีโอดีและทีโอซีในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ หลังจากฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ภาพที่ 4.11 แสดงปริมาณซีโอดีที่เวลาต่างๆ พบว่าปริมาณซีโอดีและทีโอซีนั้นไม่ได้ลดลงแต่อย่างใด



ภาพที่ 4.11 ปริมาณซีไอดี (ก) และทีไอซี (ข) ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี แบบไหลต่อเนื่อง

4.3 การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิส

4.3.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำกลั่นด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสแบบที่ละเท

การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ในที่นี้ใช้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอจากหลอดไฟแบล็คไลท์ พบว่าเมื่อใช้ความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ปฏิกริยาสามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้ 81% ในเวลา 3 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.9 : ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 0 มิลลิโมลาร์) สอดคล้องกับการศึกษาของ Xu et al. (2006) ที่สามารถกำจัด *B. subtilis* ได้ 75% ในเวลา 70-80 นาที โดย Xu et al. นั้นใช้ฟิล์มเอ็น-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล เคลือบบนตะแกรง และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ความเข้มแสง 1.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งคาดว่าวิธีดังกล่าวทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกริยาเพิ่มขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการกำจัด *B. subtilis* ได้สั้นลง ขณะที่ Deng et al. (2007) กำจัด *B. subtilis* ได้ 88.9% ในเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนผ้าฝ้ายฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ (ไม่ทราบความเข้มแสง) ทั้งนี้การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* เกิดขึ้นได้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ และเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถไปรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งช่วยลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ได้ดังสมการที่ (14) และยังสามารถทำปฏิกริยากับซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลได้อีก ดังสมการที่ (15) ในบทที่ 2 (Goswami et al., 2000)

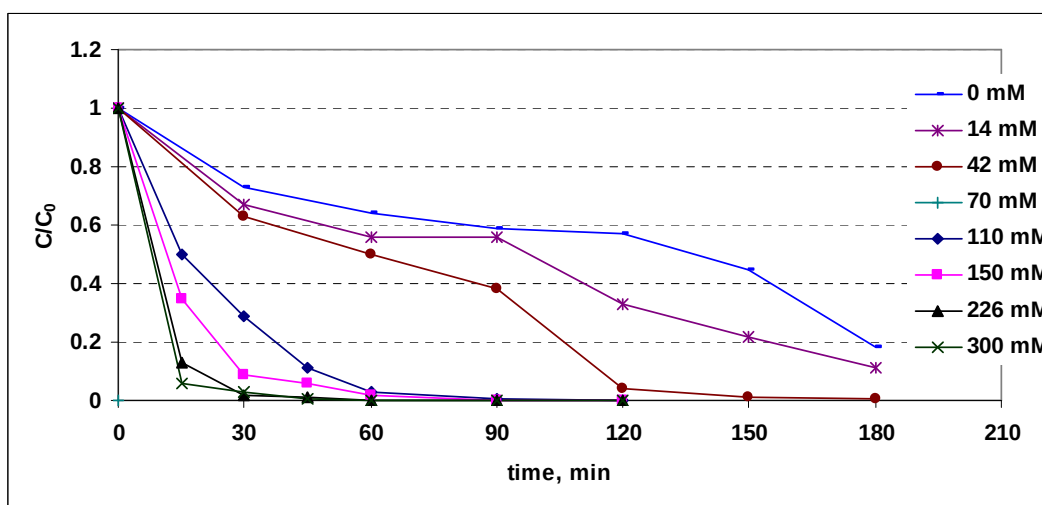
โดยในการศึกษานี้พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นที่มากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ยิ่งเพิ่มตามไปด้วย (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 จำนวนสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่างๆ

เวลา(นาที่) H ₂ O ₂	จำนวนโคโลนีที่พบ							
	0 mM	14 mM	42 mM	70 mM	110 mM	150 mM	226 mM	300 mM
0	1,100	900	800	900	700	800	900	700
15	*	*	*	*	350	280	120	40
30	800	600	500	400	200	70	20	20
45	*	*	*	*	80	50	12	2
60	700	500	400	200	18.5	14	1	0
90	650	500	300	50	2.5	0.5	0	0
120	630	300	30	20	0.5	0	0	0
150	500	200	10	1	0	0	0	0
180	200	100	3.5	0.5	0	0	0	0

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

จากตารางจะเห็นได้ว่าจำนวนโคโลนีเริ่มต้นนั้นมีไม่เท่ากัน ภาพที่ 4.12 จึงแสดง การเปรียบเทียบการลดลงของ *B. subtilis* ที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0 มิลลิโมลาร์) กับที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นตั้งแต่ 14-300 มิลลิโมลาร์ ในรูปของ C/C₀ กับเวลา ที่ทำการฉายแสง

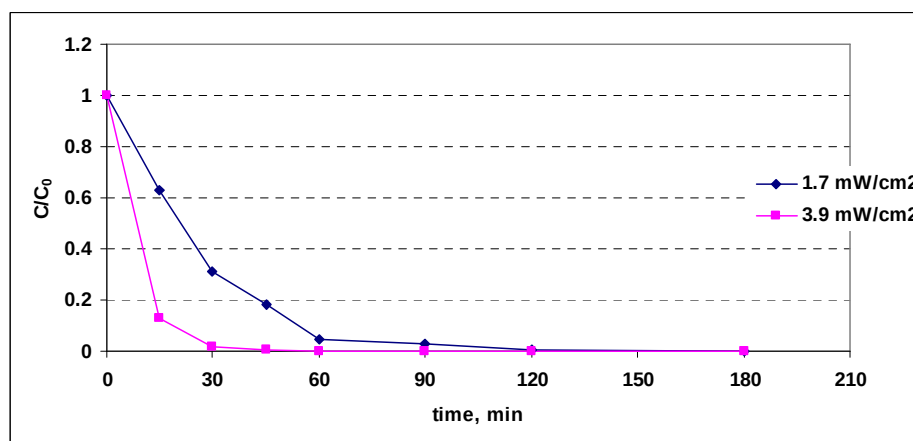


ภาพที่ 4.12 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นด้วยฟิโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อเซนติเมตร

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาในการกำจัด *B. subtilis* นั้นจะสั้นลง อันเนื่องมาจากจำนวนไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความเข้มข้นระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 226 มิลลิโมลาร์ กับ 300 มิลลิโมลาร์ ให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.283$) ในการศึกษาครั้งนี้จึงถือว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ 226 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุดที่จะช่วยกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ให้หมดลงไปได้ โดยจากตารางที่ 4.8 ที่เวลา 60 นาที เห็นได้ชัดเจนว่าความสามารถในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ระหว่างการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 226 มิลลิโมลาร์ กับ 300 มิลลิโมลาร์ นั้นแทบไม่แตกต่างกัน จึงไม่มีความจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มากไปกว่านี้

เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นต่อการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* โดยลดความเข้มข้นอัลตราไวโอเล็ตเอให้เหลือเพียง 1.72 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดลดลงตามไปด้วย (ภาพที่ 4.13) คือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 226 มิลลิโมลาร์ ปฏิกริยาสามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้เพียง 69% ในเวลา 30 นาที ขณะที่ความเข้มข้น 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดได้ 98% เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น (Ollis et al., 1991; Tseng &

Haung, 1991 กล่าวถึงใน ชวิศร์ กรณ์ย์เมธากุล, 2550) ทั้งนี้ในการศึกษานี้ไม่สามารถเพิ่มความเข้มแสงให้มากไปกว่านี้ได้ เนื่องจากพื้นที่ของกระบอกทดลองมีจำกัด (89 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร = 1,335 ตารางเซนติเมตร) การทดลองได้วางหลอดไฟชิดกันจำนวน 7 หลอดจนเต็มพื้นที่แล้ว จึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนหลอดไฟให้มากไปกว่านี้ได้



ภาพที่ 4.13 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นด้วยโฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (226 มิลลิโมลาร์) ที่ความเข้มแสงต่างกัน

ในส่วนการกำจัด *E. coli* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* คือ กำจัดได้ 99.73% ในเวลา 3 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.9 : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 0 มิลลิโมลาร์) สอดคล้องกับการศึกษาของ Robertson et al. (2005) ที่สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 99.997% ในเวลา 2 ชั่วโมง จากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ 480 วัตต์ และ Bekbölet & Araz (1996) ที่สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 90% ในเวลา 30 นาที โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 5.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งความเข้มแสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และเมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดก็ยิ่งเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.9) คือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 14-42 มิลลิโมลาร์ สามารถกำจัด *E. coli* ได้เกือบ 100% ภายในเวลา 30 นาที และตั้งแต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 70-300 มิลลิโมลาร์ สามารถกำจัด *E. coli* ได้หมดภายในเวลาที่น้อยกว่า 15 นาที

ตารางที่ 4.9 จำนวน *E. coli* ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ

เวลา(นาทีย) H ₂ O ₂	จำนวน โคโลนี ที่พบ							
	0 mM	14 mM	42 mM	70 mM	110 mM	150 mM	226 mM	300 mM
0	3,000	28,300	26,400	28,900	29,000	3,000	3,350	2,850
15	1500	*	*	*	0	0	0	0
30	700	5	1	0	0	0	0	0
45	400	0	0	0	0			
60	350							
90	200							
120	50							
180	8							

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

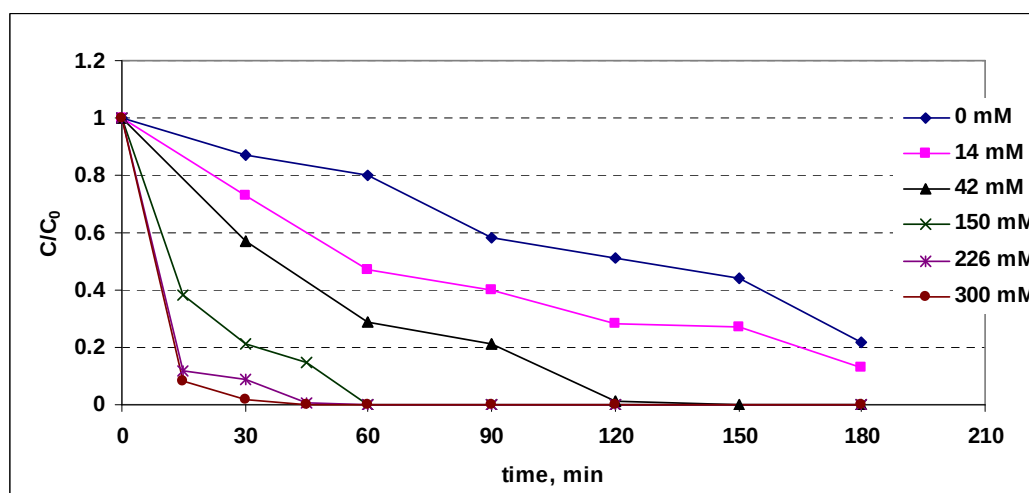
4.3.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสแบบที่ละเท

หลังจากเสร็จสิ้นการศึกษาในน้ำกลั่นแล้วได้เปลี่ยนเป็นน้ำเสียจากโรงพยาบาลที่มีความขุ่น 1.30-1.62 เอ็นทียู, ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (ความยาวคลื่นหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ) = 0.031, บีโอดี = 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 60-92 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 11-16 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7.2-7.9 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสคล้ายกับการทดสอบในน้ำกลั่น คือ ถ้าไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ร่วมด้วย ปฏิกริยาสามารถกำจัด *B. subtilis* ได้ 78% ในเวลา 3 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.10 : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 0 มิลลิโมลาร์) แต่เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาในการกำจัด *B. subtilis* นั้นจะสั้นลง (ตารางที่ 4.10) ประสิทธิภาพในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพเริ่มใกล้เคียงกันตั้งแต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ขึ้นไป (ภาพที่ 4.14) ซึ่งความเข้มข้นตั้งแต่ 150 มิลลิโมลาร์ จนถึง 300 มิลลิโมลาร์ ให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.054$)

ตารางที่ 4.10 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยโฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา(นาที) H ₂ O ₂	จำนวนโคโลนีที่พบ					
	0 mM	14 mM	42 mM	150 mM	226 mM	300 mM
0	550	600	700	800	900	900
15	*	*	*	300	110	75
30	480	440	400	170	85	20
45	*	*	*	120	4	2
60	440	280	200	2	1	1
90	320	240	150	1	0.5	0
120	280	170	10	0	0	0
150	240	160	1	0	0	0
180	120	76	0	0	0	0

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

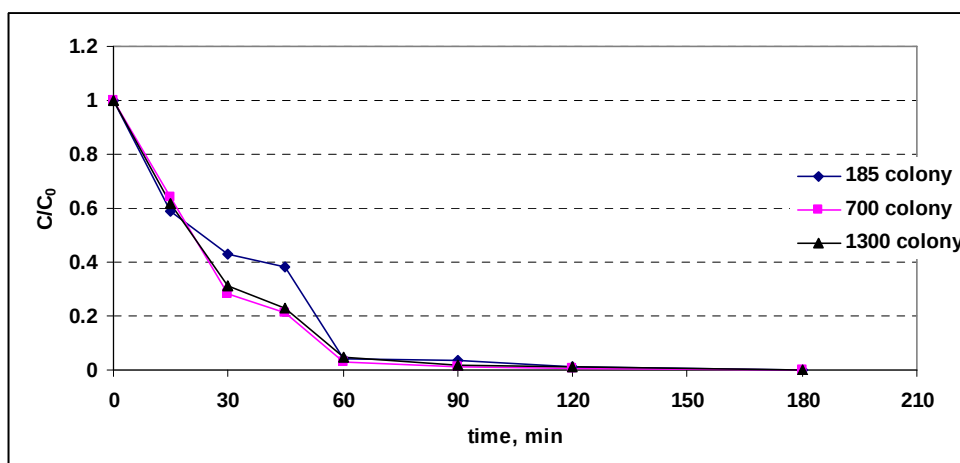


ภาพที่ 4.14 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาล ด้วยโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบที่ละเท

นอกจากนี้การศึกษายังได้เปรียบเทียบปฏิกิริยาไฟโตคะตะไลสิส เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 1.72 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร อีกด้วย โดยจำนวนสปอร์เริ่มต้นของ *B. subtilis* นั้นมีตั้งแต่ 185-1,300 โคโลนี (ตารางที่ 4.11) พบว่าที่จำนวนสปอร์เริ่มต้น 185 โคโลนี ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัด 57% ที่เวลา 30 นาที ส่วนจำนวนสปอร์ *B. subtilis* เริ่มต้น 700 โคโลนี และ 1,300 โคโลนี ปฏิกิริยาไฟโตคะตะไลสิสมีประสิทธิภาพการกำจัด 71% และ 69% ที่เวลาเดียวกันตามลำดับ และสามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้หมดทั้งสิ้นหลังจากเวลาผ่านไป 120 นาที ซึ่งใช้เวลานานกว่าการใช้อัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพที่ 4.15)

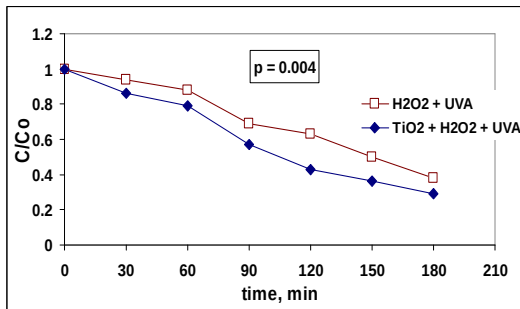
ตารางที่ 4.11 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ จากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ไฟโตคะตะไลสิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 1.72 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนีที่พบ		
0	185	700	1,300
15	110	450	800
30	80	200	400
45	70	150	300
60	8	20	60
90	7	10	30
120	2	5	15
180	0	0	0

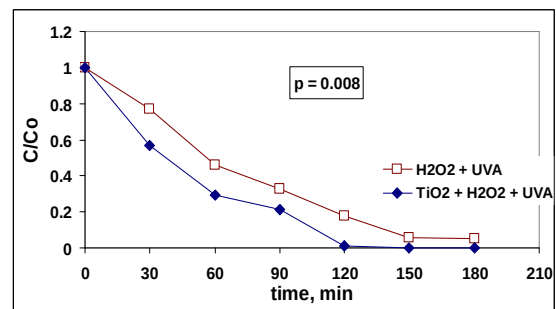


ภาพที่ 4.15 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาล ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (226 มิลลิโมลาร์) ที่ความเข้มแสง 1.72 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบทีละเท

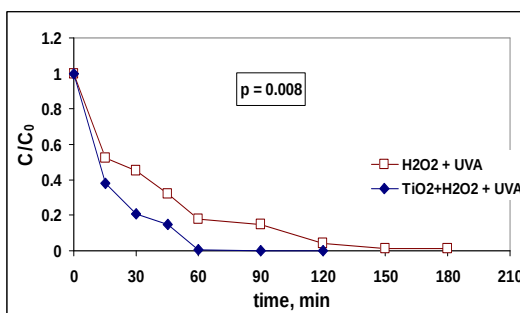
จากการทดลองการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิส ทั้งในน้ำกลั่นและน้ำเสียจากโรงพยาบาล พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดนั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งไม่ชัดเจนว่าประสิทธิภาพนั้นมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่เพียงอย่างเดียว การศึกษาขั้นต่อไปจึงได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยทดลองแบบทีละเทในน้ำเสียจากโรงพยาบาล ซึ่งก็พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 14-150 มิลลิโมลาร์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* แตกต่างจากการใช้ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4.16) โดยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ผลในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* เหนือกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว (ตารางที่ 4.12) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเรื่อยๆ จนถึง 226 มิลลิโมลาร์ และ 300 มิลลิโมลาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดด้วยวิธีทั้งสองให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเกิดขึ้น



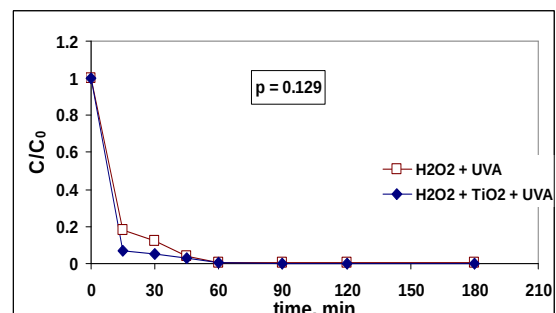
(ก) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 14 มิลลิโมลาร์



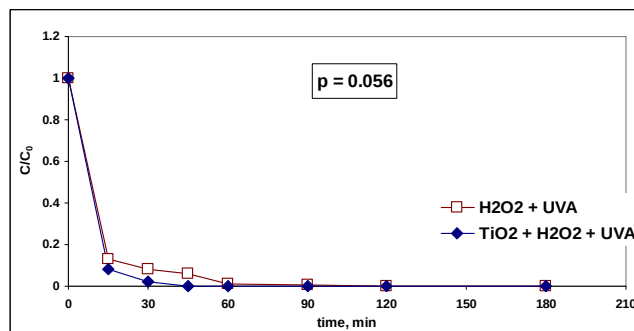
(ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 42 มิลลิโมลาร์



(ค) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์



(ง) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์



(จ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 300 มิลลิโมลาร์

ภาพที่ 4.16 การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ความเข้มแสง 3.94 ± 0.03 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.12 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว แบบที่ละเท

เวลา (นาท)	จำนวนโคโลนี ที่พบ									
	TiO ₂ + H ₂ O ₂ (mM)					H ₂ O ₂ (mM)				
	14	42	150	226	300	14	42	150	226	300
0	700	700	800	400	900	800	1,300	1,550	400	900
15	*	*	300	29	75	*	*	800	60	120
30	600	400	170	18	20	750	1000	700	50	70
45	*	*	120	13	2	*	*	500	17.5	52
60	550	200	2	1	1	700	600	285	2	10
90	400	15	1	0	0	550	425	200	1	3
120	300	10	0	0	0	500	235	61	1	1
150	250	1	0	*	*	400	72	20	*	*
180	200	0	0	0	0	300	59	14	1	0

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

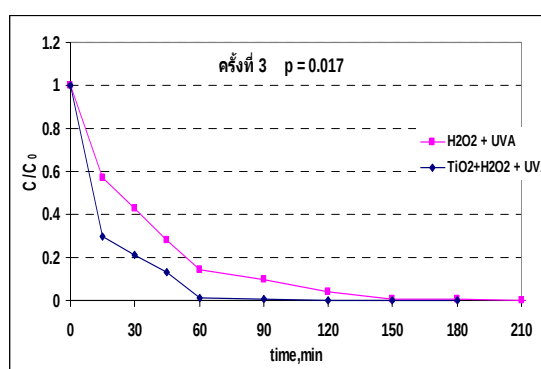
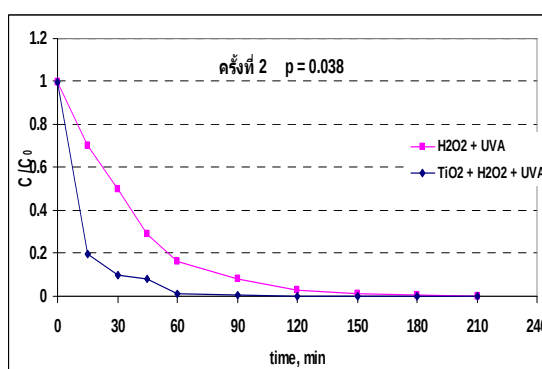
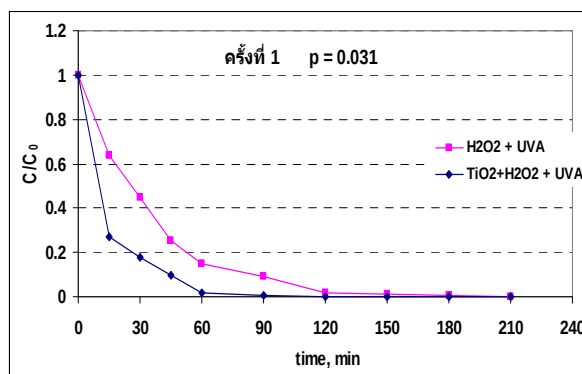
ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์ ไม่ใช่ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งถึงแม้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ และ 300 มิลลิโมลาร์ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* สูงที่สุดก็ตาม แต่ที่ความเข้มข้นดังกล่าวไม่ชัดเจนว่าการกำจัดจุลินทรีย์นั้นมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเดียวก็นั่นเอง อีกทั้งจากการทดสอบในน้ำกลั่น และน้ำเสียจากโรงพยาบาลแบบที่ละเท ยังพบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ กับ 226 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการทดลองแบบไหลต่อเนื่องในส่วนต่อไป จึงเลือกใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส เพื่อลดความสิ้นเปลืองในการใช้สารเคมี แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันผลให้มั่นใจอีกครั้ง ในการศึกษาแบบไหลต่อเนื่องในส่วนต่อไปได้ทดสอบการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ อีก 1 ชุดด้วยเช่นกัน

4.3.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสแบบไหลต่อเนื่อง

การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยวิธี โทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับการกำจัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์/อัลตราไวโอเล็ตเอ แต่เพียงอย่างเดียวในลักษณะของการไหลแบบต่อเนื่องจำนวน 3 ครั้ง ในที่นี้ใช้น้ำเสียที่มีความขุ่น 1.12-2.04 เอ็นทียู, ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร = 0.031, บีโอดี = 6-9 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี = 41-88 มิลลิกรัมต่อลิตร, สารแขวนลอย = 6.2-13 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช = 7-7.5 ความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์/อัลตราไวโอเล็ตเอ มีประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ *B. subtilis* น้อยกว่าวิธีโทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ (ตารางที่ 4.13) ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดด้วยวิธีทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแสดงในภาพที่ 4.17

ตารางที่ 4.13 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้โทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว แบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนี ที่พบ					
	TiO ₂ + H ₂ O ₂ 150 mM			H ₂ O ₂ 150 mM		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	550	500	1,000	550	500	350
15	150	100	300	350	350	200
30	100	50	205	250	250	150
45	55	40	125	140	145	100
60	10	6	12	80	80	50
90	2.5	2	4	50	40	35
120	1	0.5	2	10	15	14
150	0	0	0	6	7	2
180	0	0	0	2	3	1
210	0	0	0	0	0	0

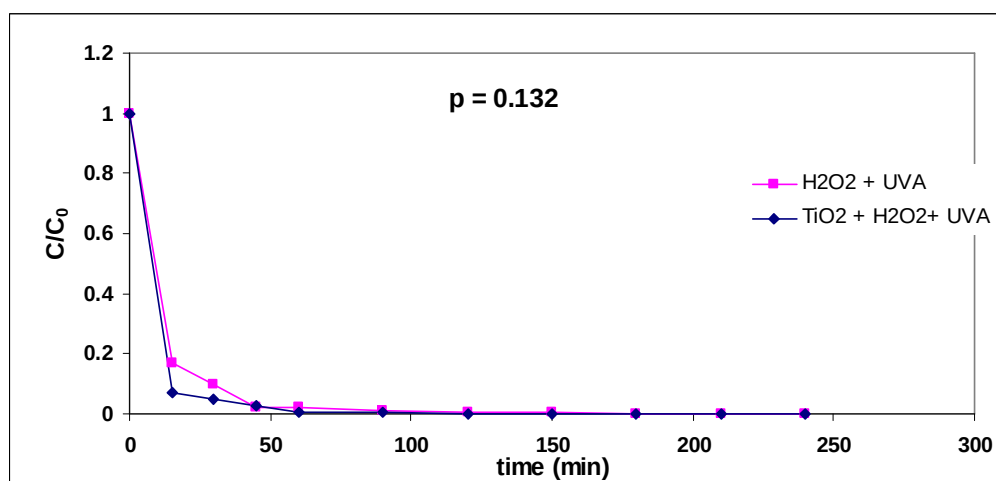


ภาพที่ 4.17 การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ เพียงอย่างเดียว ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบไหลต่อเนื่อง

นอกจากนี้การทดลองแบบไหลต่อเนื่องนี้ ยังได้ทดสอบความแตกต่างระหว่างการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 226 มิลลิโมลาร์ แต่เพียงอย่างเดียวอีกครั้ง โดยตารางที่ 4.14 แสดงจำนวนสปอร์ของ *B. subtilis* ที่ลดลงตามเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ เพียงอย่างเดียวมีความแตกต่างกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.132$) เช่นเดียวกับที่พบในการทดลองแบบที่ละเท (ภาพที่ 4.18)

ตารางที่ 4.14 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ เพียงอย่างเดียวแบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาที)	จำนวนโคโลนี ที่พบ	
	TiO ₂ + H ₂ O ₂ 226 mM	H ₂ O 226 mM
0	800	300
15	58	50
30	37	30
45	25	7
60	4.5	6
90	3	4
120	0	2
150	0	1
180	0	0

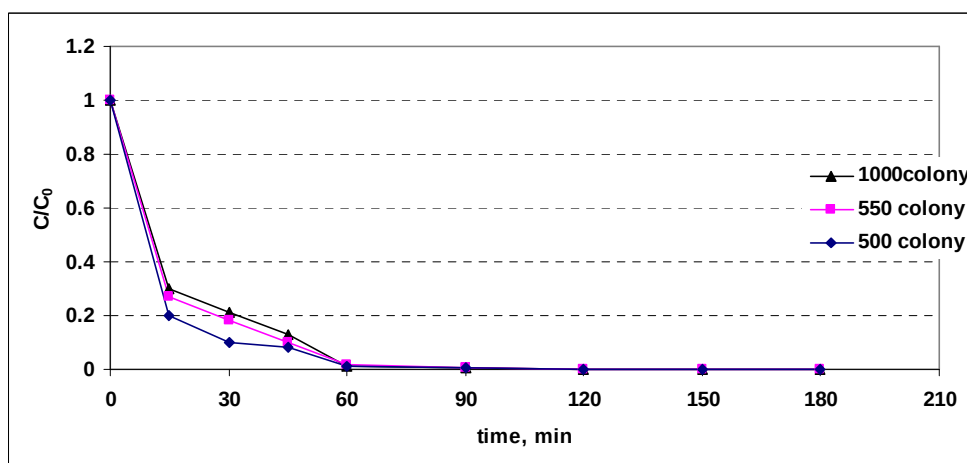


ภาพที่ 4.18 การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 226 มิลลิโมลาร์ เพียงอย่างเดียว ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แบบไหลต่อเนื่อง

ทั้งนี้เพื่อยืนยันผลว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส สามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้แน่นอนไม่ว่าจำนวนตั้งต้นของสปอร์นั้นจะมีมากหรือน้อยเพียงใด การศึกษานี้จึงใช้สปอร์ของ *B. subtilis* จำนวนตั้งต้นตั้งแต่ 500 โคโลนี จนถึง 1,000 โคโลนี ในน้ำเสียโรงพยาบาล ปริมาตร 20,000 มิลลิลิตร (0.025-0.05 โคโลนี/มิลลิลิตร) โดยใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ ซึ่งแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.15 โดยพบว่าปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 โคโลนี ได้ 99.6% ที่เวลา 90 นาที และหลังจากครบ 150 นาที ก็ไม่พบสปอร์ของ *B. subtilis* อีกต่อไป (ภาพที่ 4.19) ขณะที่การศึกษาของ Yan et al. (2009) ที่ใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแก้ว ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 มิลลิโมลาร์ ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ขนาด 6 วัตต์ มีการเติมอากาศที่อัตรา 10 ลิตรต่อนาที พบว่าสามารถกำจัด *B. subtilis* ได้ 99.99% ที่เวลา 40 นาที ซึ่งไวกว่าการศึกษานี้ โดยเป็นไปได้ว่าออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับ e^-_{cb} เกิดเป็น O_2^- ซึ่งไปทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มขึ้น ดังสมการ 8 และ 15 ในบทที่ 2 (Goswami et al., 2000)

ตารางที่ 4.15 จำนวนสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ แบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาที)	จำนวน โคโลนี ที่พบ		
0	500	550	1000
15	100	150	300
30	50	100	205
45	40	55	125
60	6	10	12
90	2	2.5	4
120	0.5	1	2
150	0	0	0
180	0	0	0



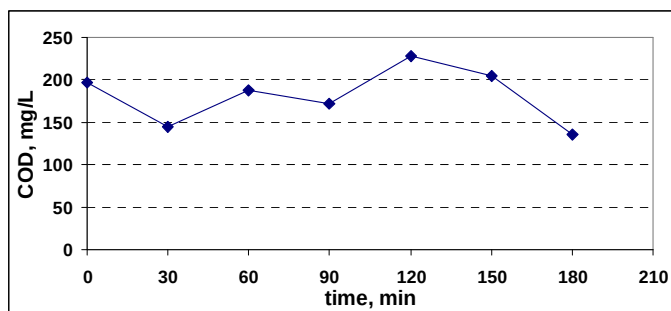
ภาพที่ 4.19 การกำจัดสปอร์ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธี ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ แบบไหลต่อเนื่อง ความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ ทดสอบกับ *E. coli* จำนวนตั้งต้น 2,500-3,200 โคโลนี (ตารางที่ 4.16) ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถกำจัด *E. coli* ได้ 99.9% ภายในเวลา 10 นาที และสามารถกำจัดได้หมดทั้งสิ้นภายในเวลา 20 นาที สอดคล้องกับการศึกษาของ Paleologou et al. (2007) ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.74 มิลลิโมลาร์ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ = 9 วัตต์ สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 99.999% ในเวลา 20 นาที ขณะที่ Mamane et al. (2007) ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.74 มิลลิโมลาร์ เพียงอย่างเดียว ร่วมกับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 295 นาโนเมตร ความเข้มแสง 0.78 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 99.999 ที่เวลา 7.5 นาที

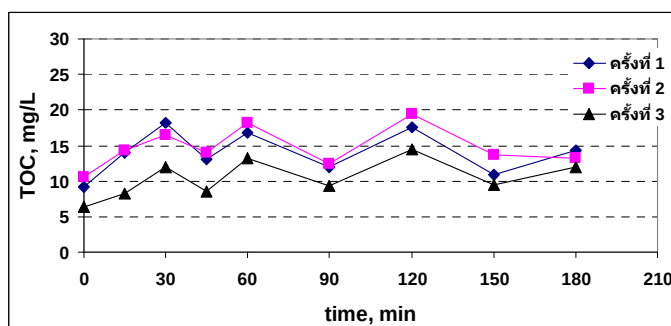
ตารางที่ 4.16 จำนวน *E. coli* ในน้ำเสียโรงพยาบาลที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ แบบไหลต่อเนื่อง ความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที่)	จำนวนโคโลนีที่พบ		
0	2500	2700	3200
10	2	2.5	4
20	0	0	0

ในส่วนของการวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีและทีโอซี ที่เวลาต่างๆ พบว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีผลทำให้ปริมาณซีโอดี ลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.20 ก) ขณะที่ปริมาณทีโอซี ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ภาพที่ 4.20 ข) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Rincón & Pulgarin (2004) ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพการลดปริมาณซีโอดีได้ 10% ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาของ Yetilmezsoy & Sakar (2008) ที่สามารถลดปริมาณซีโอดีได้ 88.7% ในเวลา 30 นาที โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (400 มิลลิกรัม/ Fe^{2+} และ 200 มิลลิกรัมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์/ลิตร) รวมถึงการศึกษาของ Lee & Shoda (2008) ที่ให้ประสิทธิภาพการลดปริมาณซีโอดี 87% ในเวลา 30 นาที เมื่อใช้ Fe^{2+} ความเข้มข้น 6,554 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 7,980 มิลลิกรัมต่อลิตร



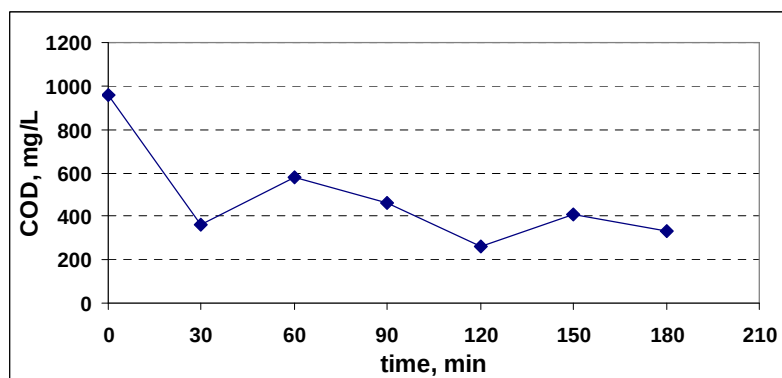
(ก)



(ข)

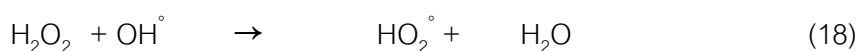
ภาพที่ 4.20 ปริมาณซีไอดี (ก) และทีโอซี (ข) ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ แบบไหลต่อเนื่อง ความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

โดยผู้วิจัยสันนิษฐานว่า ปริมาณซีไอดีเริ่มต้นนั้นอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากน้ำเสียจากโรงพยาบาลในที่นี้ค่าซีไอดีเพียง 41-92 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่การศึกษาอื่นๆ มีซีไอดีอยู่ในช่วง 1,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผู้วิจัยจึงนำน้ำเสียที่มีปริมาณซีไอดีสูงๆ (960 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาทำการศึกษาแบบที่ละเท ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยพบว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส สามารถลดปริมาณซีไอดีได้ 65% (ภาพที่ 4.21) ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Deng (2007) ที่สามารถลดปริมาณซีไอดีได้ 61% โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 240 มิลลิโมลาร์)



ภาพที่ 4.21 ปริมาณซีโอดีที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 มิลลิโมลาร์ แบบที่ละเท ความเข้มแสง 3.89 ± 0.48 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

อย่างไรก็ตามการศึกษาของ ณัฐพล สุนทรวิภาต (2547) ได้วิเคราะห์ว่า ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณซีโอดี คือ จะต้องมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่น้อยเกินไป ทำให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการลดซีโอดี แต่ถ้าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการลดซีโอดี น้อยลงเช่นกัน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แย่งทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลเกิดเป็นน้ำได้ ดังสมการ 18



ซึ่งการศึกษาที่ให้รายละเอียดในเรื่องของการกำจัดซีโอดี ให้มากกว่านี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

จากการทดลองการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยวิธีการเติมคลอรีน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี และกระบวนการไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส ในน้ำกลั่นแบบที่ละเท ในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบที่ละเท และในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบไหลต่อเนื่อง สามารถสรุปประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้ดังตารางที่ 4.17-4.19 ดังนี้

ตารางที่ 4.17 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นด้วยวิธีต่างๆ แบบที่ละเท

เวลา (นาที่) วิธี	การกำจัดสปอร์ของ <i>B. subtilis</i> (%)				
	คลอรีน	UV-C		TiO ₂ /UV-A	TiO ₂ + H ₂ O ₂ / UV-A
		2.1 mW/cm ²	4.55 mW/cm ²		
15	*	66.67	*	*	65
30	3.67	93.33	99.72	27.27	91.25
45	*	98.17	*	*	93.75
60	1.54	99.83	100	36.36	98.25
90	4.62	100	100	40.91	99.94
120	9.23	100	100	42.73	100
150	4.62			54.55	100
180	10.77			81.82	100

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

จากตารางพบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 4.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุดในการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำกลั่นได้หมดทั้งสิ้น รองลงมาคือความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตซี 2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และการใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามทั้งสามวิธีให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.298$) ส่วนการศึกษาในน้ำเสียโรงพยาบาลแบบที่ละเท แสดงได้ในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีต่างๆ แบบที่ละเท

เวลา (นาที) วิธี	การกำจัดสปอร์ของ <i>B. subtilis</i> (%)				
	คลอรีน	UV-C		TiO ₂ /UV-A	TiO ₂ +H ₂ O ₂ /UV-A
		2.1 mW/cm ²	4.55 mW/cm ²		
15	*	80	*	*	62.5
30	8.33	96	99.67	12.73	78.75
45	*	98.4	*	*	85
60	16.67	99.8	100	20	99.75
90	0	99.8	100	41.82	99.88
120	8.33	100	100	49.9	100
150	16.67			56.36	100
180	16.67			78.18	100

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

จากตารางพบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีความเข้มแสง 4.55 ± 0.02 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด รองลงมาคือความเข้มแสง 2.1 ± 0.01 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และการใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดลองในน้ำกลั่น และเมื่อนำมาเปรียบเทียบในเชิงสถิติ พบว่าทั้งสามวิธีให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.412$) เช่นเดิม และเมื่อนำมาศึกษาแบบไหลต่อเนื่องการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 การกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยวิธีต่างๆ แบบไหลต่อเนื่อง

เวลา (นาทีก) วิธี	การกำจัดสปอร์ของ <i>B. subtilis</i> (%)		
	คลอรีน	UV-C 2.1 mW/cm ²	TiO ₂ + H ₂ O ₂ / UV-A
15	*	97.69	72.73
30	*	99.38	81.82
45	*	99.84	90
60	0	99.92	98.18
90	*	100	99.55
120	7.14	100	99.82
150	*		100
180	0		100

* ไม่ได้ศึกษาในช่วงเวลานั้น

จากตารางพบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด คือสามารถกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ได้หมดทั้งสิ้นในเวลา 90 นาที ขณะที่การใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ใช้เวลานาน 150 นาที แต่เมื่อเปรียบเทียบในเชิงสถิติ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยวิธีทั้งสองให้ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.082$)