



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
The Thailand Research Fund

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิต
น้ำประปาของการประปานครหลวง”
(Microbial Risk Analysis of MWA Water Treatment Process)

รศ.น.สพ.ดร. ศุภชัย เนื่อนवलสุวรรณ และคณะ

สิงหาคม 2558

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

The Thailand Research Fund

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิต
น้ำประปาของการประปานครหลวง”

(Microbial Risk Analysis of MWA Water Treatment Process)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. รศ.น.สพ.ดร.ศุภชัย เนื่อนวลสุวรรณ	คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. นายปริญญา แนนหนา	ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง
3. น.ส.นงนรา อิตนวานิช	ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง
4. นายพิพัฒน์ ไชยกุลวัฒนา	ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง
5. นายกิตติภัทร ลิ้มประเสริฐ	ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง
6. น.ส.ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล	ฝ่ายบริหารความเสี่ยง การประปานครหลวง
7. นางโสภิน รัชตะวานิชย์	ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง
8. รศ.สพ.ญ.ดร.ธิดารัตน์ บุญมาศ	คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
9. น.สพ.ชัยวัฒน์ พูลศรีกาญจน์	กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข

ชุดโครงการ “ความมั่นคงอาหาร”

สนับสนุนโดย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

(Executive Summary)

การวิเคราะห์ความเสี่ยง (risk analysis) ประกอบด้วย ประเมินความเสี่ยง (risk assessment) การจัดการความเสี่ยง (risk management) และการสื่อสารความเสี่ยง (risk communication) ในบริบทของความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยการประปานครหลวงทั้งเพื่อการอุปโภคและบริโภค หมายถึง การประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์ก่อโรคทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัวในการใช้น้ำประปาทั้งเพื่อการอุปโภคและบริโภคที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน ในรูปของอัตราป่วยของผู้ใช้น้ำประปาต่อแสนคนต่อปี (ตามแนวทางของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข) หรือ ในรูปของ Disability-adjusted life years (DALY) ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก

การรายงานในรูปของอัตราป่วย/ประชากรผู้ใช้น้ำ/แสนคน/ปี ของกระทรวงสาธารณสุข มีจุดเด่น คือ ค่าความเสี่ยงที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับอัตราป่วย/ประชากร/แสนคน/ปี อันเนื่องมาจากสาเหตุของจุลินทรีย์ก่อโรคอื่นๆ จากสาเหตุอื่นๆ เช่น อาหาร ได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม กระทรวงสาธารณสุขได้มีการกำหนดเกณฑ์อัตราป่วยที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยหรือแม้แต่การเปรียบเทียบกับอัตราป่วยของประเทศอื่นๆ ดังนั้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการประเมินความเสี่ยงในการศึกษาครั้งนี้กับเกณฑ์ความปลอดภัยในการใช้น้ำประปา จึงได้ปรับวิเคราะห์คำนวณความเสี่ยงในรูปของ DALY ซึ่งเป็นเป้าหมายสุขภาพ (health target) รูปแบบหนึ่ง ตามคำแนะนำล่าสุดขององค์การอนามัยโลก คือ การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในรูปของ “เป้าหมายสุขภาพ” หรือ Health-based target ที่สอดคล้องกับ “แนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) โดยกำหนดเป็น 10^{-6} DALY/คน/ปี (WHO, 2011) ซึ่งจัดว่าเป็นเป้าหมายที่เหมาะสมสำหรับการประปานครหลวงในการดำเนินมุ่งสู่การยกระดับความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำประปาให้ได้มาตรฐานระดับนานาชาติ

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาความปลอดภัยน้ำดื่มโดยนำการประเมินความเสี่ยง (risk assessment) และการจัดการความเสี่ยง (risk management) มาเป็นแนวทางในการสร้างแผนความปลอดภัยน้ำ (water safety plan) อันเป็นส่วนหนึ่งของแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 ในปี ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาและกำกับความปลอดภัยน้ำประปา นอกเหนือจากการดำเนินงานหลักของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority : MWA) ในการทำหน้าที่จัดหาและควบคุมคุณภาพน้ำประปาสำหรับประชาชน

การประปานครหลวงสามารถนำการประเมินความเสี่ยงมาใช้ประเมินความปลอดภัยและระบุปัจจัยรวมถึงขั้นตอนตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มีผลต่อความปลอดภัยได้โดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็น (probabilistic model) และการจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo simulation) ของการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ (waterborne pathogens) ตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้การประปานครหลวงสามารถพิจารณามาตรการจัดการความเสี่ยงต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา เพื่อยกระดับความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงที่เหมาะสมต่อไปได้

วัตถุประสงค์ของการดำเนินการโครงการวิจัยนี้ คือ การระบุปัจจัยหรือขั้นตอนที่มีผลต่อมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา การศึกษามาตรการจัดการความเสี่ยงระดับมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา และการประปานครหลวงสามารถประเมินความเสี่ยงเพื่อพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) โดยองค์การ

อนามัยโลก โดยประโยชน์ที่มุ่งหวังจากโครงการวิจัย คือ การเฝ้าระวังระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำประปา (Surveillance) ค่าประมาณความเสี่ยงจุลินทรีย์ของน้ำประปา (Risk estimate) ก่อนและหลังการจัดการความเสี่ยง การได้ Model ต้นแบบที่เป็น platform ในการจัดการความเสี่ยงที่สามารถนำไปใช้ได้ ในวงกว้างและในหลายระดับ เช่น สามารถนำไปปรับใช้กับการประปาส่วนภูมิภาค เป็นต้น และการประปานครหลวงสามารถจัดทำระบบการประเมินความเสี่ยงเชิงจุลินทรีย์ได้

แนวคิดที่สำคัญของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) คือ การเน้นกระบวนการผลักดันผลงานดังกล่าวออกสู่การใช้ประโยชน์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับขั้นตอนการสื่อสารความเสี่ยง (risk communication) โดยผู้ที่ได้รับประโยชน์โดยตรงจากโครงการวิจัยนี้ คือ การประปานครหลวง และ โดยที่การประปานครหลวงก็ได้เข้าร่วมในโครงการวิจัยอยู่แล้ว ดังนั้นกระบวนการผลักดันผลงาน คือ การนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอโดยตรงต่อ “ผู้บริหารของการประปานครหลวง” ผ่านทีมคณะวิจัยจากการประปานครหลวง เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายและการผลักดันความปลอดภัยของน้ำประปาสู่ความเป็นสากลมากขึ้น รวมถึงการนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอต่อ “ผู้บริหารของการประปาส่วนภูมิภาค” เพื่อสร้างความตระหนักรู้ (awareness) ในการยกระดับความปลอดภัยของน้ำประปาผ่านการวิเคราะห์ความเสี่ยง

โครงสร้างของการศึกษาโครงการวิจัย ประกอบด้วย

1. การศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในโรงงานผลิตน้ำบางเขน (steps in water processing)

เพื่อสามารถวางแผนการเก็บตัวอย่างในการประเมินความเสี่ยงและการจัดการความเสี่ยง จำเป็นที่จะต้องเข้าใจระบบและขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความร่วมมืออย่างดีจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนในการเก็บตัวอย่างในโรงงานผลิตน้ำ ดังนั้น การศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปาจึงใช้ต้นแบบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

2. การกำหนดจำนวนตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (sample sizes in water processing plant)

การเก็บตัวอย่างน้ำจะกำหนดให้มีความสอดคล้องกับขั้นตอนการผลิตน้ำประปาและการคัดเลือกมาตรการจัดการความเสี่ยงด้วย โดยวางแผนการเก็บตัวอย่างเป็น 2 ช่วงระยะ คือ ช่วงระยะ “การประเมินความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจำนวน 120 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา โดยเก็บตัวอย่างขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่สำคัญ 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย แหล่งน้ำดิบ (raw water) การกวนช้า (slow mix) การกรอง (filtration) การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (disinfection) และการสูบส่ง-สูบจ่าย (distribution) และในช่วง 6 เดือนสุดท้ายของโครงการซึ่งเป็นช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 20 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ยกเว้นขั้นตอนการสูบส่ง-สูบจ่ายน้ำ เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 40 ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำประปาทั้งหมดใน “ระยะการประเมินความเสี่ยง” และ “ระยะการจัดการความเสี่ยง” จำนวน 600 ตัวอย่าง และ 120 ตัวอย่าง ตามลำดับ รวม 720 ตัวอย่าง ส่งเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรค จำนวน 5 ชนิดและ 3 ชนิด ตามลำดับ ดังนั้น คิดเป็นจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 5,760 ตัวอย่าง

สรุปจำนวนตัวอย่างที่เก็บตลอดโครงการ

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	จำนวนตัวอย่าง
1. น้ำดิบ	140
2. การกวนช้า	140
3. การกรอง	140
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	140
5. การสูบส่ง-สูบจ่าย	160
รวม	720

3. การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา (Microbiological analysis)

- แบคทีเรีย : *Vibrio cholera* : O1 และ O139, *Shigella* spp., *Salmonella* spp. และ *Campylobacter* spp.

- โปรโตซัว : *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* และ *Entamoeba histolytica*

4. ระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค (contamination level)

รายงานในรูปของ ความชุก (prevalence) และ ความเข้มข้น (concentration) เนื่องจากการประเมินความเสี่ยงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานทั้ง 2 รูปแบบนี้

5. การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (Quantitative microbial risk assessment)

ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

- การระบุอันตราย (Hazard identification) เป็นการทบทวนและยืนยันการเจ็บป่วยจริงที่เกิดจากอันตรายที่สนใจ ซึ่งในที่นี้ ก็คือ จุลินทรีย์ก่อโรคที่ติดต่อทางการบริโภคน้ำ เช่น แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัวชนิดต่างๆ ที่สามารถก่อโรคในคนได้

- การอธิบายอันตราย (Hazard characterization) เป็นการประเมินความน่าจะเป็นหรือจำนวนการเจ็บป่วยต่อเนื่องจากการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรค โดยอาศัยข้อมูลจากขั้นตอน การประเมินการสัมผัส การตอบสนองของประชากรมนุษย์เมื่อได้รับจุลินทรีย์เข้าในร่างกายนั้น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนอย่างยิ่ง เนื่องจาก ประกอบด้วยปัจจัยมากมายที่เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่อาจจะสามารถแจกแจงได้เป็น 3 องค์ประกอบ คือ จุลชีววิทยา (Microbiological factor) ร่างกาย (Host factor) และ อาหารบริโภค (Food matrix factor) โดยแบบจำลองที่ใช้ในขั้นตอนนี้จะมี 2 กลุ่ม คือ Beta-Poisson และ Exponential models

- การประเมินการสัมผัส (Exposure assessment) เป็นการประเมินโอกาสในการรับสัมผัส (exposure) กับอันตราย ซึ่งในที่นี้ ก็คือ การได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคที่อาจจะปนเปื้อนมากับน้ำที่บริโภคเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้น ข้อมูลสำคัญในการประเมินการสัมผัส ก็คือ ข้อมูลการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำ (ความชุกและความเข้มข้น) ปริมาณการบริโภคน้ำ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินการสัมผัส คือ ความน่าจะเป็นในการสัมผัส (Probability of exposure)

- การอธิบายความเสี่ยง (Risk characterization) เป็นการประเมินโอกาสในการเจ็บป่วยจากการบริโภคอาหารหรือน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์ก่อโรค เป็นการพิจารณาความน่าจะเป็นต่อเนื่องของ 2 เหตุการณ์หลัก คือ 1.เหตุการณ์ในการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคปริมาณหนึ่ง (dose) ตามมาด้วย 2.เหตุการณ์การเกิดโรค (response) อันเกิดจากปริมาณจุลินทรีย์ที่ได้รับ

- จากนั้น จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo Simulation) ซ้ำๆ จำนวน 10,000 รอบ (iteration) โดยอาศัยโปรแกรม @Risk 4.5.3 Professional edition ก็จะได้ การแจกแจงค่าที่น่าจะเป็นของความเสี่ยงของประชากรไทย

6. การกำหนดเป้าหมายสุขภาพ (Setting health-based target)

แนวคิดของ “เป้าหมายสุขภาพ” สามารถนำไปใช้ได้กับทุกประเทศและทุกระดับของการพัฒนา คุณภาพน้ำ การกำหนดเป้าหมายสุขภาพควรจะต้องเป็นจริงได้ (realistic) วัดได้ (measurable) โดยพิจารณา ปัจจัยพื้นฐานต่างๆ เป้าหมายสุขภาพควรจะผนวกไปเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายด้านสาธารณสุขในระดับประเทศ ซึ่งมีการพิจารณาพร้อมกับภาวะสาธารณสุข (public health status) แนวโน้ม ความเจ็บป่วยที่มีสาเหตุมาจากการใช้น้ำประปา ทั้งนี้ทั้งนั้นแหล่งที่มาของจุลินทรีย์ก่อโรคมิได้มาจากน้ำเพียงแหล่งเดียวเท่านั้น ยังอาจจะ รวมถึง อาหาร อากาศ สุขอนามัยส่วนบุคคล เป็นต้น ในกรณีที่แหล่งที่มาของจุลินทรีย์ก่อโรคมีความ หลากหลายมาก ทำให้คุณค่าหรือความจำเป็นในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพมีความด้อยลงไปได้

เป้าหมายสุขภาพสามารถใช้เป็นแนวทางในการวัดผลลัพธ์ทางสุขภาพได้โดยตรง กล่าวคือ ในกรณีที่โรค ทางเดินอาหารที่เกิดจากน้ำเป็นสาเหตุหลักของโรคทางเดินอาหารส่วนใหญ่ของประเทศ ดังนั้น ข้อมูลด้าน ระบาดวิทยาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การลดจำนวนผู้ป่วยโรคทางเดินอาหารลง (รูปแบบหนึ่งของผลลัพธ์สุขภาพ) สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัด (index) ถึงประสิทธิภาพของปรับปรุงหรือการพัฒนาวิธีควบคุม (intervention) จุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในระบบการผลิตน้ำได้

7. เป้าหมายสุขภาพ (Health-based targets)

การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยน้ำดื่มหรือน้ำประปาที่สอดคล้องกับคำแนะนำล่าสุดขององค์การอนามัยโลก คือ การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในรูปของ “เป้าหมายสุขภาพ” หรือ Health-based target สอดคล้องกับ “แนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) (WHO, 2011) ที่มุ่งเน้นไปที่ความเสี่ยง (risk) หรือ โอกาสในการ เกิดความเจ็บป่วยจากอันตราย (hazard) ทั้งทางเคมีและทางจุลินทรีย์ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (reference) ของ หน่วยงานในการพัฒนาสู่เป้าหมายในการลดจำนวนผู้ป่วยที่มีสาเหตุจากอันตรายทางเคมีหรือจุลินทรีย์ก่อโรค ผ่านน้ำ ซึ่งเท่ากับเป็นการยกระดับความปลอดภัยของประชาชนในการอุปโภคหรือบริโภคน้ำ

เป้าหมายสุขภาพ หรือ Health-based targets มีได้หลายลักษณะ

1. เป้าผลลัพธ์สุขภาพ หรือ Health outcome target เป็นเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดในรูปของ จำนวนผู้ป่วยสูงสุดจากจุลินทรีย์ก่อโรค หรือ ในรูปของภาระโรคที่ยอมรับได้ (tolerable burden of disease) ซึ่งระดับที่แนะนำ คือ 10^{-6} DALY ต่อคนต่อปี (ศึกษาเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ Disability-adjusted life years หรือ DALY)

2. เป้าคุณภาพน้ำ หรือ Water quality target นิยมใช้กับอันตรายเคมี (chemical hazard) มากกว่าอันตรายชีวภาพ

3. เป้าประสิทธิภาพ หรือ Performance target เป็นเป้าหมายสุขภาพที่เชื่อมโยง “เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ” (ซึ่งเป็นเป้าหมายสุขภาพชนิดที่ 1) ในฐานะผู้รับความเสี่ยง และ “ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ใน กระบวนการผลิตน้ำประปา” ในฐานะผู้จัดการความเสี่ยงเข้าไว้ด้วยกัน เช่น เป้าประสิทธิภาพของขั้นตอนการ ผลิตน้ำประปาในการลดความเข้มข้นหรือจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำได้ร้อยละ 99.0 (หรือ $2 \log_{10}$ reduction) ซึ่งเทียบเท่ากับการลดจำนวนผู้ป่วยในกลุ่มเสี่ยงลงไปได้ 10^2 DALY ต่อคนต่อปี

4. เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ (specific technology target) เช่น การกำหนดเป้าประสงค์ในขั้นตอนการ ผลิตน้ำประปา

เป้าหมายสุขภาพ	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus
จำนวนเชื้อ / ลิตรน้ำดิบ	10	100	10
Health outcome target	10^{-6} DALY / คน / ปี	10^{-6} DALY / คน / ปี	10^{-6} DALY / คน / ปี
Risk of diarrheal illness	1 per 1,500 / ปี	1 per 4,600 / ปี	1 per 14,000 / ปี
Drinking-water quality	1 per 79,000 ลิตร	1 per 9,500 ลิตร	1 per 90,000 ลิตร
Performance target	$5.89 \log_{10}$	$5.98 \log_{10}$	$5.96 \log_{10}$

8. Disability-adjusted life years (DALY) เป็นหน่วยในการวัดภาระโรค (burden of disease) และ องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้แนะนำให้ใช้ DALY เป็นเป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพที่สามารถเชื่อมโยงกับเป้าหมายสุขภาพอื่นๆ ได้ กล่าวคือ การตัดสินใจในการกำหนดระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (acceptance risk) หรือภาระโรคที่ทนได้ (tolerable burden of disease) ในระดับประเทศนั้น มีความสลับซับซ้อนและจะต้องมีการพิจารณาถึงถึงความเป็นไปได้และความรุนแรงของผลกระทบ รวมถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม สังคม วัฒนธรรมและการเมืองด้วย นอกจากนี้ภาระโรคที่ทนได้และระดับการอ้างอิงความเสี่ยง (reference level of risk) สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาเป้าหมายสุขภาพ

มาตรา (metric) ที่ใช้ในการวัดความมากมายและใช้ในการเปรียบเทียบภาระโรคที่ทนได้ (tolerable burden of disease) จะมีความสัมพันธ์กับจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำ กล่าวคือ จุลินทรีย์ก่อโรคเหล่านี้มีความน่าจะเป็น ความรุนแรง และระยะเวลาในการก่อโรคที่แตกต่างกัน ดังนั้นมาตราที่ใช้ในการวัดภาระโรคที่ทนได้ควรจะใช้ได้กับ (applicable) อันตรายชนิดต่างๆ เช่น จุลินทรีย์ เคมี หรือ รังสี โดยมาตราที่แนะนำให้ใช้โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) คือ disability-adjusted life year (DALY)

จุดเด่นหรือข้อได้เปรียบของ DALY คือ การรวมผลกระทบต่อชีวิตในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แตกต่างกันเข้าด้วยกัน และเน้นย้ำที่ผลกระทบที่แท้จริง (actual outcome) มากกว่าการวัดศักยภาพในการก่อให้เกิดความเสี่ยง ดังนั้น DALY จึงใช้ในการลำดับความสำคัญทางสาธารณสุขอย่างมีเหตุผลและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อกำหนดภาระโรคที่ทนได้และระดับการอ้างอิงความเสี่ยงได้

ภาระโรคที่ทนได้ คือ ขอบเขตบน (upper limit) ของ DALY ที่ระดับ หนึ่งในล้านคน/ปี (10^{-6} DALY/person/year) ซึ่งเทียบเคียงโดยประมาณได้กับ ความเสี่ยงตลอดชีวิต (อายุขัยประมาณ 70 ปี) ที่ระดับหนึ่งในแสนคนของการเกิดมะเร็ง (10^{-5} excess lifetime risk of cancer) การกำหนดค่า DALY ที่ระดับ 10^{-6} อาจจะทำไม่ได้ในทางปฏิบัติสำหรับบางประเทศหรือบางสถานการณ์ ดังนั้นจึงอาจจะอนุโลมให้กำหนด DALY ที่ระดับ 10^{-5} หรือ 10^{-4} ก็ได้

9. เป้าคุณภาพน้ำ (Water quality target)

เป้าหมายคุณภาพน้ำโดยทั่วไปแล้วจะไม่มี ความจำเพาะกับชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรค เนื่องจาก การเฝ้าระวังการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำอาจจะทำได้จริงในทางปฏิบัติและอาจจะมีต้นทุนที่สูงมากเกินไป ดังนั้นจึงเลี่ยงการกำหนดเป้าหมายคุณภาพน้ำโดยตรง แต่จะอาศัยข้อเทียบเคียงทั่วไปของเป้าหมายคุณภาพน้ำกับเป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพแทน กล่าวคือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรค 1 เซลล์/น้ำ 10^{-4} - 10^{-5} ลิตร เทียบเท่ากับ (หรือก่อให้เกิด) เป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ทั้งนี้เมื่อเป้าหมายคุณภาพน้ำได้เฝ้าระวังที่จุลินทรีย์ก่อโรค

โดยตรง ดังนั้นเป่าคุณภาพน้ำจึงใช้วิธีการเฝ้าระวังการปนเปื้อนจุลินทรีย์บ่งชี้ (indicator organism) เช่น *E.coli* เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของจุลินทรีย์ก่อโรค

10. เป้าประสิทธิภาพ (Performance target)

เป้าหมายประสิทธิภาพมีประโยชน์ในการเลือกและการใช้มาตรการควบคุมเพื่อป้องกันจุลินทรีย์ก่อโรคปนเปื้อนเข้ามาในการผลิตน้ำตั้งแต่ แหล่งน้ำดิบ ขั้นตอนการผลิต ไปจนกระทั่งถึงระบบสูบน้ำไปยังผู้ใช้

การประยุกต์เป้าหมายประสิทธิภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การศึกษาประสิทธิภาพรวมของขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำในการลดจุลินทรีย์ก่อโรคให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพต้นทาง โดยทั่วไปแล้วเป้าหมายประสิทธิภาพจะกำหนดในรูปของการลดจุลินทรีย์ก่อโรคลงในหน่วยฐาน log (log reduction) การเลือกวิธีการผลิตน้ำในขั้นตอนต่างๆ จึงควรมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ระบุประสิทธิภาพในการลดจุลินทรีย์ให้ได้ตามเป้าหมายประสิทธิภาพ นอกจากนี้เป้าหมายประสิทธิภาพยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ตั้งแต่แหล่งน้ำดิบ ผ่านขั้นตอนต่างๆในการผลิตน้ำ และ ระบบสูบน้ำไปยังผู้ใช้

11. การกำหนดเป้าหมายประสิทธิภาพโดยฐานความเสี่ยง (risk-based performance target setting)

การประเมินความเสี่ยงเป็นกระบวนการในการประมาณค่าความเสี่ยงของประชากรโดยพิจารณา ร่วมกับคุณภาพน้ำดิบและการควบคุม ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงของความเสี่ยง (reference level of risk) หรือ ระดับความเสี่ยงที่ทนได้ (tolerable risk)

เป้าหมายประสิทธิภาพมักจะนำไปใช้กับประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ (treatment performance) โดยที่ประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ หมายถึง การกำหนดการลดจำนวนจุลินทรีย์เท่าที่จำเป็นเพื่อให้ น้ำปลอดภัย เป้าประสิทธิภาพอาจจะนำไปใช้กับระบบเฉพาะหรือระบบทั่วไปได้ด้วย เป้าสำหรับประสิทธิภาพการทำลายเชื้อสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดต่างๆ จะขึ้นอยู่กับระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำ ยกตัวอย่าง เช่น คุณภาพน้ำดิบมีระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ 10 เซลล์/ลิตร จะพบว่าเป้าหมายประสิทธิภาพสำหรับ *Cryptosporidium* คือ 5.89 log (หรือ ร้อยละ 99.99987) เมื่อโรงงานผลิตน้ำสามารถบรรลุเป้าหมายประสิทธิภาพ ก็จะทำให้ได้เป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี

12. การจัดการความเสี่ยง (Risk management)

ผลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง ทำให้สามารถทราบระดับความรุนแรงและตำแหน่งของปัญหาในเชิงระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen contamination) ส่งผลให้หน่วยงานสามารถกำหนดแนวทางหรือมาตรการที่เหมาะสมในการลดระดับการปนเปื้อนส่งผลให้ความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือความเสี่ยงที่ได้มีความสอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดโดยหน่วยงานนั้นๆ

เป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี เป็นระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ในระดับนานาชาติที่แนะนำ โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งผลการศึกษาระดับการปนเปื้อนของแบคทีเรียและโปรโตซัวเมื่อนำมาวิเคราะห์คำนวณเป็นเป้าหมายสุขภาพ พบว่า ผลลัพธ์สุขภาพของการดื่มน้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดระดับความปลอดภัยของน้ำประปาในเขตความรับผิดชอบของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

13. มาตรการจัดการความเสี่ยง (Risk management options)

เนื่องจากผลลัพธ์สุขภาพที่วิเคราะห์ได้จากประสิทธิภาพการทำงานของโรงงานผลิตน้ำบางเขนอยู่ในระดับที่สอดคล้องกับ เป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการปรับเปลี่ยนหรือนำมาตรการจัดการความเสี่ยงมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ก่อกับการตรวจพบการปนเปื้อนของ *Giardia lamblia* ในบางขั้นตอนของการผลิตน้ำในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน รวมถึงตัวอย่างน้ำประปาจากเส้นท่อที่จ่ายน้ำไปยังผู้ใช้ น้ำ โดยมีข้อสังเกตว่า

การปนเปื้อนของ *Giardia lamblia* นั้น เกิดขึ้นในช่วงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2557 ซึ่งมีความเห็นร่วมกันของทีมนักวิจัยและการประปานครหลวง ถึงความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนและฤดูกาล กล่าวคือ เดือนกรกฎาคมเป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูฝน ที่อาจจะชะล้างการสะสมการปนเปื้อนของโปรโตซัวในช่วงฤดูแล้ง ทำให้มีโอกาสในการปนเปื้อนของโปรโตซัวตลอดเส้นทางไหลของน้ำดิบก่อนจะเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงทำให้สามารถตรวจพบโปรโตซัวได้

โดยที่แผนงานของโครงการวิจัยได้กำหนดการเก็บตัวอย่างน้ำหลังการปรับใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง ดังนั้นจึงได้กำหนดการเก็บตัวอย่างน้ำโดยมุ่งเน้นเก็บตัวอย่างในช่วงรอยต่อระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน เพื่อพิสูจน์สมมติฐานของการปนเปื้อนของโปรโตซัวที่อาจจะมีความสัมพันธ์กับฤดูกาล

แผนการเก็บตัวอย่างในช่วงระยะการจัดการความเสี่ยง แบ่งเป็น 4 ครั้ง ช่วงระยะห่างกัน 1 เดือน โดยกำหนดให้การเก็บตัวอย่างน้ำใน 2 ครั้งแรก (เดือน) เป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อเป็นข้อมูลระดับการปนเปื้อนของโปรโตซัวในฤดูแล้ง และกำหนดให้การเก็บตัวอย่างน้ำใน 2 ครั้งหลัง (เดือน) เป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อเป็นข้อมูลระดับการปนเปื้อนของโปรโตซัวในฤดูฝน เนื่องจากการเก็บตัวอย่างที่ต้องการเพิ่มโอกาสในการตรวจหาโปรโตซัวในน้ำที่สุบง่าย เพื่อตรวจสอบระดับความปลอดภัยในการใช้น้ำและประสิทธิภาพการผลิตน้ำประปาที่ปลอดภัยของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนที่เข้มงวดขึ้น

การกำหนดจำนวนตัวอย่างจึงมีความแตกต่างจากการเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินความเสี่ยงในระยะที่ 1 ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสัดส่วนการเก็บตัวอย่างน้ำในเส้นท่อที่จ่ายน้ำไปสู่ผู้ใช้น้ำเป็น 2 เท่า (10 ตัวอย่าง) ของจำนวนตัวอย่างน้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำ (5 ตัวอย่าง) ในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังได้สนใจถึงแนวทางในการลดหรือการควบคุมการปนเปื้อนของโปรโตซัว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Giardia lamblia* ดังนั้น จึงได้เพิ่มเติมหัวข้อเรื่อง ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโปรโตซัว (Drinking water treatments relating to the reduction of protozoa) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการจัดการความเสี่ยงต่อไป

14. การอบรมการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment training)

การสร้างเสริมประสบการณ์และศักยภาพของหน่วยงานการประปานครหลวงให้มีความเข้าใจหลักการและวิธีการในการประเมินความเสี่ยง เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาความปลอดภัยน้ำดื่มโดยนำการประเมินความเสี่ยง (risk assessment) และการจัดการความเสี่ยง (risk management) มาเป็นแนวทางในการสร้างแผนความปลอดภัยน้ำ (water safety plan) อันเป็นส่วนหนึ่งของแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 ในปี ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาและกำกับความปลอดภัยน้ำประปานอกเหนือจากการดำเนินงานหลักของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority : MWA) ในการทำหน้าที่จัดหาและควบคุมคุณภาพน้ำประปาสำหรับประชาชน

15. การสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงระดับจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนต่างๆ ของการผลิตน้ำประปา (modelling) ตั้งแต่น้ำดิบจนกระทั่งถึงการสูบส่ง-สุบง่าย

เนื่องจาก ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนพบเพียงการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. และ *Giardia lamblia* ดังนั้น การสร้างแบบจำลองจึงจำกัดเพียงจุลินทรีย์ก่อโรคทั้ง 2 ชนิดนี้ อย่างไรก็ตาม หลักการสร้างแบบจำลองสามารถนำไปใช้กับจุลินทรีย์ก่อโรคและไม่ก่อโรคชนิดอื่นๆ ได้ด้วย

16. ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำประปา

(contamination level)

- ไม่พบการปนเปื้อน *Vibrio cholera*, *Shigella* spp. และ *Campylobacter* spp. ในตัวอย่างน้ำที่ตรวจทั้งหมด 140-160 ตัวอย่าง คำนวณได้ความชุกเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 0.5 และ 0.7 ความเข้มข้นเฉลี่ยระหว่าง $7.14 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$ และ $5.56 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$

- ไม่พบการปนเปื้อน *Entamoeba histolytica* และ *Giardia lamblia* ในตัวอย่างน้ำที่ตรวจทั้งหมด 140-160 ตัวอย่าง คำนวณได้ความชุกเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 0.5 และ 0.7 ความเข้มข้นเฉลี่ยระหว่าง $2.78 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$ และ $3.57 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$

- แม้ว่า จะตรวจไม่พบการปนเปื้อนในทุกตัวอย่างที่ตรวจ ($s = 0$) แต่ mean prevalence ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจาก Beta distribution ก็ให้ค่าเฉลี่ยความชุกที่ไม่เป็นศูนย์ ดังกรณีของ *Vibrio cholera*, *Shigella* spp. *Campylobacter* spp. *Entamoeba histolytica* และ *Giardia lamblia* ความชุกเฉลี่ยมีความแตกต่างจากความชุกทางระบาดวิทยาซึ่งจะเป็นการคำนวณสัดส่วนจำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวกต่อจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งหมด ดังนั้น ความชุกทางระบาดวิทยาในกรณีที่ไม่พบการปนเปื้อนเลย จึงมีค่าความชุกเป็น ร้อยละ 0 เสมอ โดยไม่ขึ้นกับจำนวนตัวอย่างที่ตรวจ

- พบการปนเปื้อน *Salmonella* spp. จากทั้งหมด 120-140 ตัวอย่าง

= ขั้นตอนน้ำดิบ 13 ตัวอย่าง (ร้อยละ 19.7 ความเข้มข้น $2.14 \times 10^{-3} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการกวนช้า 7 ตัวอย่าง (ร้อยละ 5.6 ความเข้มข้น $5.13 \times 10^{-4} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการกรอง 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.8 ความเข้มข้น $2.17 \times 10^{-4} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการทำลายเชื้อ 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 0.7 ความเข้มข้น $7.14 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการสูบล้าง 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 0.5 ความเข้มข้น $5.56 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$)

= การปนเปื้อน *Salmonella* spp. ในน้ำดิบ และ ลดลงเมื่อถึงขั้นตอนการกวนช้า ในระดับคงที่แสดงว่า ขั้นตอนการกวนช้า ซึ่งประกอบด้วย การเติมสารเคมี และ การตะกอน อาจจะช่วยลดระดับการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. ที่มีอยู่ในน้ำดิบ

= การปนเปื้อน *Salmonella* spp. จากน้ำดิบและขั้นตอนการกวนช้า มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงเมื่อน้ำผ่านขั้นตอนการกรองและการทำลายเชื้อ จนกระทั่งตรวจไม่พบ *Salmonella* spp. เลยในระบบน้ำประปาที่สูบล้างไปยังผู้บริโภค

- พบการปนเปื้อน *Giardia lamblia* ในตัวอย่างน้ำจากทุกขั้นตอนของการผลิตน้ำในการเก็บตัวอย่างน้ำ ดังนี้

= ขั้นตอนน้ำดิบ 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 1.41 ความเข้มข้น $3.58 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการกวนช้า 2 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.11 ความเข้มข้น $7.19 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการกรอง 2 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.11 ความเข้มข้น $7.19 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการทำลายเชื้อ 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 1.41 ความเข้มข้น $3.58 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

= ขั้นตอนการสูบล้าง 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.20 ความเข้มข้น $8.40 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

17. ผลการประเมินความเสี่ยง (risk estimate)

- อัตราป่วยเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบล้างและสูบล้าง จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 1 ถึง 7 คน/แสนคน/ปี

- อัตราป่วยเฉลี่ยสาเหตุจากโปรโตซัวที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบน้ำส่งและสูบน้ำจ่าย จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 0.05 ถึง 0.86 คน/แสนคน/ปี
- ความเสี่ยงเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาจากโรงงานบางเขน โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 2.79×10^{-8} ถึง 2.38×10^{-7}
- ความเสี่ยงเฉลี่ยสาเหตุจากโปรโตซัวที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาจากโรงงานบางเขน โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 1.38×10^{-10} ถึง 1.80×10^{-9}
- เกณฑ์ความปลอดภัยของน้ำประปาที่กำหนดขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$ ในขณะที่ DALY/year ของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคที่สูงที่สุด (maximum) ที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ 9.77×10^{-13} ถึง 7.67×10^{-7} และ 7.84×10^{-15} ถึง 4.11×10^{-9} ตามลำดับ ดังนั้น ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงได้มาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก

=====

บทคัดย่อภาษาไทย

หัวข้อวิจัย การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง
ผู้ดำเนินการวิจัย

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. รศ.น.สพ.ดร.ศุภชัย เนื่อนवलสุวรรณ | คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. นายปริญญา แนนหนา | ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง |
| 3. น.ส.นงนรา อัดนวนิช | ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง |
| 4. นายพิพัฒน์ ไชยกุลวัฒนา | ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง |
| 5. นายกิติภัทร ลิ้มประเสริฐ | ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง |
| 6. น.ส.ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล | ฝ่ายบริหารความเสี่ยง การประปานครหลวง |
| 7. นางโสภิน รัชตะวาณิชย์ | ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง |
| 8. รศ.สพ.ญ.ดร.ธิดารัตน์ บุญมาศ | คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 9. น.สพ.ชัยวัฒน์ พูลศรีกาญจน์ | กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข |

ปี พ.ศ. 2556 ถึง 2558

การวิเคราะห์ความเสี่ยง (risk analysis) ประกอบด้วย ประเมินความเสี่ยง (risk assessment) การจัดการความเสี่ยง (risk management) และการสื่อสารความเสี่ยง (risk communication) ในบริบทของความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยการประปานครหลวงทั้งเพื่อการอุปโภคและบริโภค หมายถึง การประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์ก่อโรคทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัวในการใช้น้ำประปาทั้งเพื่อการอุปโภคและบริโภคที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน ในรูปของอัตราป่วยของผู้ใช้น้ำประปาต่อแสนคนต่อปี (ตามแนวทางของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข) หรือ ในรูปของ Disability-adjusted life years (DALY) ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก

วัตถุประสงค์ของการดำเนินการโครงการวิจัยนี้ คือ การระบุปัจจัยหรือขั้นตอนที่มีผลต่อมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา การศึกษามาตรการจัดการความเสี่ยงยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา และการประปานครหลวงสามารถประเมินความเสี่ยงเพื่อพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) โดยองค์การอนามัยโลก โดยประโยชน์ที่มุ่งหวังจากโครงการวิจัย คือ การเฝ้าระวังระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำประปา (Surveillance) ค่าประมาณความเสี่ยงจุลินทรีย์ของน้ำประปา (Risk estimate) ก่อนและหลังการจัดการความเสี่ยง การได้ Model ต้นแบบที่เป็น platform ในการจัดการความเสี่ยงที่สามารถนำไปใช้ได้ ในวงกว้างและในหลายระดับ เช่น สามารถนำไปปรับใช้กับการประปาส่วนภูมิภาค เป็นต้น และการประปานครหลวงสามารถจัดทำระบบการประเมินความเสี่ยงเชิงจุลินทรีย์ได้

การเก็บตัวอย่างน้ำกำหนดให้มีความสอดคล้องกับขั้นตอนการผลิตน้ำประปาและการคัดเลือกมาตรการจัดการความเสี่ยงด้วย โดยวางแผนการเก็บตัวอย่างเป็น 2 ช่วงระยะ คือ ช่วงระยะ “การประเมินความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจำนวน 120 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา โดยเก็บตัวอย่างขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่สำคัญ 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย แหล่งน้ำดิบ (raw water) การกวนช้า (slow

mix) การกรอง (filtration) การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (disinfection) และการสูบส่ง-สูบจ่าย (distribution) และในช่วง 6 เดือนสุดท้ายของโครงการซึ่งเป็นช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 20 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ยกเว้นขั้นตอนการสูบส่ง-สูบจ่ายน้ำ เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 40 ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำประปาทั้งหมดใน “ระยะการประเมินความเสี่ยง” และ “ระยะการจัดการความเสี่ยง” จำนวน 600 ตัวอย่าง และ 120 ตัวอย่าง ตามลำดับ รวม 720 ตัวอย่าง ส่งเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรค ประกอบด้วย *Vibrio cholera* : O1 และ O139, *Shigella* spp., *Salmonella* spp. และ *Campylobacter* spp. และโปรโตซัวก่อโรค ประกอบด้วย *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* และ *Entamoeba histolytica* ดังนั้น คิดเป็นจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 5,760 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ไม่พบการปนเปื้อน *Vibrio cholera*, *Shigella* spp., *Campylobacter* spp. *Entamoeba histolytica* และ *Giardia lamblia* ในตัวอย่างน้ำที่ตรวจทั้งหมด 140-160 ตัวอย่าง พบการปนเปื้อน *Salmonella* spp. จำนวน 27 ตัวอย่าง โดยการปนเปื้อน *Salmonella* spp. จากน้ำดิบและขั้นตอนการกวนช้า มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงเมื่อน้ำผ่านขั้นตอนการกรองและการทำลายเชื้อ จนกระทั่งเป็นน้ำประปาที่สูบจ่ายไปยังผู้บริโภค พบการปนเปื้อน *Giardia lamblia* 9 ตัวอย่าง

เมื่อนำผลการประเมินระดับการปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคทั้งความชุก ความเข้มข้นและปริมาณการอุปโภคและบริโภคน้ำประปาของประชากรไทย ไปประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ โดยผลการประเมินความเสี่ยง (risk estimate) พบว่า อัตราป่วยเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียและโปรโตซัวที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบส่ง-และสูบจ่าย จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 0.05 ถึง 7 คน/แสนคน/ปี ความเสี่ยงเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาจากโรงงานบางเขน โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 1.38×10^{-10} ถึง 2.38×10^{-7} เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความปลอดภัยของน้ำประปาที่กำหนดขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$ ในขณะที่ DALY/year ของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคที่สูงที่สุด (maximum) ที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ 9.77×10^{-13} ถึง 7.67×10^{-7} และ 7.84×10^{-15} ถึง 4.11×10^{-9} ตามลำดับ ดังนั้น ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขต จึงได้มาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก ดังนั้นมาตรการจัดการความเสี่ยง (risk management) อาจจะยังไม่จำเป็นในการยกระดับความปลอดภัยของระบบการผลิตน้ำประปา และการสื่อสารความเสี่ยง (risk communication) เป็นสิ่งจำเป็นในการนำข้อมูลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยงใช้ในการประชาสัมพันธ์เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคในการอุปโภคและบริโภคน้ำประปาต่อไป

Abstract

Research Title Microbial Risk Analysis of MWA Water Treatment Process

Researchers

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. Suphachai Nuanualsuwan | Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University |
| 2. Parinya Naenna | Water Quality Department, Metropolitan Waterworks Authority |
| 3. Nongnara Atanavanich | Water Quality Department, Metropolitan Waterworks Authority |
| 4. Pipat Chaikunwattana | Water Quality Department, Metropolitan Waterworks Authority |
| 5. Kitiphat Limprasert | Water Quality Department, Metropolitan Waterworks Authority |
| 6. Chaweepan Suangkiattikun | Risk Management Department, Metropolitan Waterworks Authority |
| 7. Sopin Ratchatawanit | Samsen Water Treatment Plant Department,
Metropolitan Waterworks Authority |
| 8. Thidarut Boonmars | Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University |
| 9. Chaiwat Pulsrikarn | Department of Medical Science, Ministry of Public Health |

Years 2013-2015

Risk analysis is composed of risk assessment, risk management and risk communication. The context of water safety by water processing plant of Metropolitan Waterworks Authority (MWA) is involved the risk assessment of pathogenic bacteria and protozoa in terms of illness rate per 100,000 capita per year usually reported by Ministry of public health) and Disability-adjusted life years (DALY) recommended by World Health Organization (WHO).

The objectives of this research were to identify factor(s) or step (s) affecting the water safety standard, to determine the risk management options to increase the water safety standard and to enable MWA to assess the risk in order to develop water safety plan which is compatible with Guidelines for Drinking Water Quality by WHO). The benefits from this research would be the surveillance of the contamination of pathogenic bacteria and protozoa, determination of risk estimates before and after applying risk management options, obtaining the model to use in the risk management for both MWA and Provincial Waterworks Authority and enabling MWA to set up system for risk assessment

Water sampling was set out comply with the water processing step and selecting the risk management option. The sampling was composed of 2 phases. Risk assessment phase collected and analyzed 120 water samples for each water processing steps, which are raw water, slow mix, filtration, disinfection and distribution. The last 6 months in the risk

management phase collected additional 20 water samples for each processing steps expect additional 40 water samples in the distribution step.

Water samples in risk assessment and risk management phases were 600 and 120 samples, respectively. Collectively 720 samples were analyzed for the contamination of 5 pathogenic bacteria which were *Vibrio cholera* : O1 and O139, *Shigella* spp., *Salmonella* spp. and *Campylobacter* spp. and pathogenic protozoa which were *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* and *Entamoeba histolytica*. The microbiological analyses indicated that among 5,760 microbiological samples no *Vibrio cholera*, *Shigella* spp., *Campylobacter* spp. *Entamoeba histolytica* and *Giardia lamblia* were detected. *Salmonella* spp. was detected 27 samples in such a way that the contamination rates gradually decrease from the raw water step down to the distribution step. *Giardia lamblia* was detected in 9 water samples

The result of microbiological analyses in terms of prevalence and concentration together with water consumption of Thai people was used to assess the risk. The risk estimates indicated that mean illness rate due to the contamination of pathogenic bacteria and protozoa in 160 distributed water samples from Bangkaen water processing plant was between 0.05 and 7 person/100,000/year. The mean risk in terms of health-based target due to the contamination of pathogenic bacteria and protozoa in 160 distributed water samples from Bangkaen water processing plant was between 1.38×10^{-10} and 2.38×10^{-7} DALY/year. The WHO standard for safety drinking water was less than $< 1 \times 10^{-6}$ DALY/year. While maximum DALY/year due to pathogenic bacteria and protozoa from contaminated distributed water from Bangkaen water processing plant were very low at 9.77×10^{-13} and 7.67×10^{-7} DALY/year and 7.84×10^{-15} and 4.11×10^{-9} DALY/year, respectively. Therefore the risk of distributed water usage from Bangkaen water processing plant passed the water safety standard of WHO. Whereas risk management was seemed to be unnecessary to increase the water safety and) and risk communication in the light of risk assessment was mandatory to assure the confidence of water users.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ที่มีส่วนร่วมในโครงการวิจัย กล่าวคือ

ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง ประกอบด้วย “คุณจงกลณี อาศุเวทย์” และ “คุณศิริไล กิจพิทักษ์” ที่ได้ให้คำแนะนำและแนวคิดของโครงการวิจัยในระยะเริ่มต้นรวมถึงช่วงเปลี่ยนผ่านของผู้บริหารการประปา นครหลวงอย่างต่อเนื่องจนสามารถดำเนินการวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่เก็บตัวอย่างน้ำทั้งในโรงงานผลิตและพื้นที่ใช้น้ำ

เจ้าหน้าที่วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ “ห้องปฏิบัติการของฝ่ายคุณภาพน้ำ” ประกอบด้วย คุณชลธร เทศนิม คุณวรัญญา บุญรัตน์ และ คุณกรกช ชมะรัตน์

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ “ภาควิชาปรสิตวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น” (โดย รศ. สพ.ญ.ดร. ธิดารัตน์ บุญมาศ)

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ “การประเมินความเสี่ยงอาหารและน้ำ” ภาควิชาสัตวแพทยสาธารณสุข คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วย คุณไฉไล คุ้มมนานกุล

รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องแต่อาจจะมิได้กล่าวนามไว้ ณ โอกาสนี้ที่ทำให้สามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร (Executive summary)	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
กิตติกรรมประกาศ	ณ
สารบัญ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
กรอบแนวคิด	
วัตถุประสงค์	
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	
กระบวนการผลิตต้นผลงานดังกล่าวออกสู่การใช้ประโยชน์	
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ	
(Quantitative microbial risk assessment : QMRA)	
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	7
การศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในโรงงานผลิตน้ำบางเขน	
(steps in water processing)	
การกำหนดจำนวนตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	
(sample sizes in water processing plant)	
ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำ (water sampling points)	
ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากเส้นท่อ (water sampling procedure)	
การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา (Microbiological analysis)	
- ชนิดจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogens)	
- การวิเคราะห์จุลชีววิทยา (Analytical method)	
- การหาความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรค (Prevalence)	
- การหาความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรคโดยวิธี Maximum likelihood (ML)	
(Concentration)	
การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ	
(Quantitative microbial risk assessment: QMRA)	
- การระบุอันตราย (Hazard identification)	
- การอธิบายอันตราย (Hazard characterization)	
- การประเมินการสัมผัส (Exposure assessment)	
- การอธิบายความเสี่ยง (Risk characterization)	
การรายงานผลการประเมินความเสี่ยง	
(Reporting risk assessment)	

การกำหนดเป้าหมายสุขภาพ

(Setting health-based target)

เป้าหมายสุขภาพ

(Health-based targets)

ชนิดของเป้าหมายสุขภาพ

(Types of health-based targets)

- เป้าผลลัพธ์สุขภาพ (Health outcome target)
 - Disability-adjusted life years (DALY)
- เป้าคุณภาพน้ำ (Water quality target)
- เป้าประสิทธิภาพ (Performance target)
 - = จุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง (reference pathogens)
 - = การเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง (Selection of reference pathogens)
 - = การกำหนดเป้าประสิทธิภาพโดยฐานความเสี่ยง (risk-based performance target setting)
 - = การนำเสนอผลของการพัฒนาเป้าประสิทธิภาพ (presenting the outcome of performance target development)
- เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ (Specified technology target)

การจัดการความเสี่ยง

(Risk management)

มาตรการจัดการความเสี่ยง

การอบรมการประเมินความเสี่ยง

(Risk assessment training)

บทที่ 3 ผลการวิจัย

51

โรงงานผลิตน้ำบางเขน

แหล่งน้ำดิบ

- แม่น้ำเจ้าพระยา
- สถานีสูบน้ำดิบสำแล
- คลองประปาตะวันออก

แผนผังโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

ระบบการผลิตน้ำประปา

- ระบบสูบ-ส่งน้ำดิบ
- ระบบผลิตน้ำประปา
 - = ระบบการตกตะกอน (Clarification)
 - * การเติมสารเคมี
 - * การกวนเร็ว (Fast mix)
 - * การกวนช้า (Slow mix)

* การตกตะกอน (Sedimentation)

= การกรอง (filtration)

= การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (Disinfection)

= ถังน้ำใส (clear water tank)

- ระบบสูบส่ง-สูบน้ำจ่ายน้ำประปา (Transmission and distribution)

- ระบบส่วนกลาง (Central System) ประกอบด้วย

= ระบบอุโมงค์ส่ง (tunnel transmission)

= ระบบท่อส่ง (conduit transmission)

- ระบบท่อส่งย่อย

ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำ

ผลการประเมินความเสี่ยง

แบบจำลองการปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

(Microbial contamination models in drinking-water treatment process)

แบบจำลองในการจำลองเหตุการณ์เพื่อการลดโปรโตซัวในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

(Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments)

- น้ำดิบ (Raw water)

- ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (Primary treatment)

- ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (Secondary treatment)

= การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation/flocculation)

= การกรอง (filtration)

= แบบจำลองของความเข้มข้น *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 2

- ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (Tertiary treatment)

แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดซัลโมเนลลาในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

(Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments)

- น้ำดิบ (Raw water)

- ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (Primary treatment)

- ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (Secondary treatment)

= การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation/flocculation)

= การกรอง (filtration)

= แบบจำลองของความเข้มข้นซัลโมเนลลาในขั้นตอนการผลิตที่ 2

- ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (Tertiary treatment)

= แบบจำลองของความเข้มข้นซัลโมเนลลา ในขั้นตอนการผลิตที่ 3

เป้าหมายสุขภาพของการผลิตน้ำโดยการประปาครหลวง

การกำหนดเป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพของการประปาครหลวง

(Setting health outcome target for MWA)

การกำหนดเป้าประสิทธิภาพของการประปานครหลวง

(Setting performance target for MWA)

มาตรการจัดการความเสี่ยงในการกำจัดโปรโตซัวในการผลิตน้ำประปา

(Risk management option to reduce protozoa in drinking water treatments)

- น้ำดิบ (Raw water)
- ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (Primary treatment)
- ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (Secondary treatment)
 - = การสร้างตะกอน และ การรวมตะกอน (coagulation and flocculation)
 - = สารสร้างตะกอน (coagulant)
 - = การตกตะกอน (sedimentation)
 - = การกรอง (filtration)
- ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (Tertiary treatment)
- วิธีทางเคมี (chemical means)
- วิธีอื่นๆ (other means)

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 1

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 2

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 3

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย และการอภิปรายผล 109

ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค (contamination level)

ผลการประเมินความเสี่ยง (risk estimate)

การรายงานระดับความเสี่ยง (Risk estimates)

- รูปแบบ “อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน”
- รูปแบบ “DALY/year”

คำชี้แจงเพิ่มเติม กรณีการพบ *Giardia* cyst ในระบบการผลิตน้ำประปา

เอกสารอ้างอิง 113

ภาคผนวก 118

วิธีการเตรียมจุลินทรีย์

ตัวอย่างผลการตรวจด้วยวิธี PCR สำหรับโปรโตซัว 3 ชนิด

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

ตลอดโครงการ

บทที่ 1

บทนำ

กรอบแนวคิด

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาความปลอดภัยน้ำดื่มโดยนำการประเมินความเสี่ยง (risk assessment) และการจัดการความเสี่ยง (risk management) มาเป็นแนวทางในการสร้างแผนความปลอดภัยน้ำ (water safety plan) อันเป็นส่วนหนึ่งของแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 ในปี ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาและกำกับความปลอดภัยน้ำประปา นอกเหนือจากการดำเนินงานหลักของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority : MWA) ในการทำหน้าที่จัดหาและควบคุมคุณภาพน้ำประปาสำหรับประชาชน

การประปานครหลวงสามารถนำการประเมินความเสี่ยงมาใช้ประเมินความปลอดภัยและระบุปัจจัยรวมถึงขั้นตอนตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มีผลต่อความปลอดภัยได้โดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็น (probabilistic model) และการจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo simulation) ของการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ (waterborne pathogens) ตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้การประปานครหลวงสามารถพิจารณามาตรการจัดการความเสี่ยงต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา เพื่อยกระดับความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงที่เหมาะสมต่อไปได้

วัตถุประสงค์

1. การระบุปัจจัยหรือขั้นตอนที่มีผลต่อมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา
2. การศึกษามาตรการจัดการความเสี่ยงระดับมาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปา
3. การประปานครหลวงสามารถประเมินความเสี่ยงเพื่อพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การเฝ้าระวังระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำประปา (Surveillance)
2. ค่าประมาณความเสี่ยงจุลินทรีย์ของน้ำประปา (Risk estimate) ก่อนและหลังการจัดการความเสี่ยง
3. ได้ Model ต้นแบบที่เป็น platform ในการจัดการความเสี่ยงที่สามารถนำไปใช้ได้ในวงกว้างและในหลายระดับ เช่น สามารถนำไปปรับใช้กับการประปาส่วนภูมิภาค เป็นต้น
4. การประปานครหลวงสามารถจัดทำระบบการประเมินความเสี่ยงเชิงจุลินทรีย์ได้

กระบวนการผลักดันผลงานดังกล่าวออกสู่การใช้ประโยชน์

เนื่องจาก ผู้ที่จักได้รับประโยชน์โดยตรง คือ การประปานครหลวง และ โดยที่การประปานครหลวงก็ได้เข้าร่วมในโครงการวิจัยอยู่แล้ว ดังนั้นกระบวนการผลักดันผลงาน คือ

1. การนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอโดยตรงต่อ “ผู้บริหารของการประปานครหลวง” ผ่านทีมคณะวิจัยจากการประปานครหลวง เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายและการผลักดันความปลอดภัยของน้ำประปาสู่ความเป็นสากลมากขึ้น

2. การนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอต่อ “ผู้บริหารของการประปาสวนภูมิภาค” เพื่อสร้างความตระหนักรู้ (awareness) ในการยกระดับความปลอดภัยของน้ำประปาผ่านการวิเคราะห์ความเสี่ยง

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โรคติดเชื้อหลายชนิดที่มีการระบาดในประเทศไทยสามารถแพร่ระบาดและติดต่อกันได้โดยอาศัยน้ำเป็นสื่อ (waterborne diseases) โดยกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรคส่วนใหญ่ที่เป็นสาเหตุของโรคติดต่อผ่านน้ำ (waterborne pathogens) ได้แก่ กลุ่มแบคทีเรีย กลุ่มไวรัสและ กลุ่มโปรโตซัว เป็นต้น กลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเหล่านี้มักจะมีการติดต่อ (transmission) หรือแพร่กระจาย (spread) ผ่านทางอุจจาระ(คนหรือสัตว์)ไปสู่ปาก (fecal-oral routs) ดังตารางที่ 1.1 และสาเหตุหลักของการระบาดของโรคติดต่อผ่านน้ำของหลายประเทศทั่วโลกมักจะมีสาเหตุมาจากความบกพร่องของการจัดหาความปลอดภัยน้ำ (water safety supply) ทำให้จุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำที่มีแหล่งกักโรคทั้งในมนุษย์และ/หรือสัตว์ (reservoirs) มีโอกาสเข้าไปปนเปื้อนในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตและนำส่งน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภคของประชากร จนกระทั่งก่อให้เกิดการระบาดของโรคติดต่อผ่านน้ำได้

ปัจจัยสำคัญร่วมที่ทำให้เกิดการระบาดของโรคติดต่อทางน้ำ คือ จุลินทรีย์ก่อโรคมักมีการติดต่อและแพร่กระจายผ่านทางอุจจาระไปสู่ปาก และ ความทนทาน (persistence) ในสิ่งแวดล้อมนอกร่างกายสิ่งมีชีวิต ดังตารางที่ 1 ดังนั้น วิธี (pathway) ในการเกิดโรคระบาดที่มีน้ำเป็นสื่อ โดยทั่วไปแล้วจะเริ่มจากการที่จุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเกิดการติดเชื้อโดยการเพิ่มจำนวนในทางเดินอาหารในร่างกายของคนและ/หรือสัตว์ และเมื่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายไม่สามารถควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคเหล่านี้ได้ ก็จะมีการตอบสนองในรูปแบบของกลุ่มอาการโดยเฉพาะกลุ่มอาการในระบบทางเดินอาหาร เช่น ปวดท้อง อาเจียน หรือ ถ่ายเหลว เป็นต้น ทำให้จุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเหล่านี้ถูกขับออกจากร่างกายออกสู่ภายนอก หากสิ่งปฏิกูลที่มีจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเหล่านี้ออกจากร่างกายแล้วมีการปนเปื้อนไปในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำผิวดิน (surface water) ก็จะทำให้แหล่งน้ำผิวดินนั้นกลายเป็นแหล่งแพร่กระจายจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำออกไปได้อย่างกว้างขวาง แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำจะมีความทนทานอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมอันเนื่องมาจาก อุณหภูมิ (temperature) ความเป็นกรดต่าง (pH) สารเคมี (chemical) ยากำจัดเชื้อ (disinfectant) และรังสียูวีจากแสงแดด (ultraviolet radiation) เป็นต้น อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติแล้วจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเหล่านี้จะค่อยๆ ถูกทำลาย (inactivated) และลดจำนวนลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหมดไปโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพต่อประชาชนแต่อย่างใด หรือในทางตรงกันข้ามจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำอาจจะมีปริมาณหรือการคงตัวมากเพียงพอ ก่อปรกับบางจังหวะที่เกิดความบกพร่องของการจัดหาความปลอดภัยน้ำ จุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำเหล่านี้ก็อาจจะปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่การผลิตน้ำประปาและแพร่กระจายไปยังประชาชนผ่านระบบการจ่ายน้ำ (distribution) จนกระทั่งก่อให้เกิดโรคระบาดได้ในที่สุด ดังนั้นกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงควรให้ความสำคัญกับความเสี่ยง หรือโอกาสการเกิดโรคติดต่อที่มีน้ำเป็นสื่อ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับประชากรกลุ่มเสี่ยง คือ ประชาชนทั่วไปที่อุปโภคหรือน้ำประปา

ตารางที่ 1.1 ความสำคัญและลักษณะเฉพาะของจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านทางน้ำ (waterborne pathogens)

	ความสำคัญ ต่อสุขภาพ ^ก	ความคงตัว ในแหล่งน้ำ ^ข	ความทน ต่อคลอรีน ^ค	การ ติดเชื้ ^ง	การพบ ในสัตว์
แบคทีเรีย					
<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>C. coli</i>	High	Moderate	Low	Moderate	Yes
<i>Escherichia coli</i> – Pathogenic	High	Moderate	Low	Low	Yes
<i>E. coli</i> – Enterohaemorrhagic	High	Moderate	Low	High	Yes
<i>Legionella</i> spp.	High	May multiply	Low	Moderate	No
<i>Leptospira</i>	High	Long	Low	High	Yes
<i>Mycobacteria</i> (nonTB)	Low	May multiply	High	Low	No
<i>Salmonella Typhi</i>	High	Moderate	Low	Low	No
Other <i>Salmonellae</i>	High	May multiply	Low	Low	Yes
<i>Shigella</i> spp.	High	Short	Low	High	No
<i>Vibrio cholerae</i>	High	Short to Long	Low	Low	No
ไวรัส					
Adenoviruses	Moderate	Long	Moderate	High	No
Enteroviruses	High	Long	Moderate	High	No
Hepatitis A virus	High	Long	Moderate	High	No
Hepatitis E virus	High	Long	Moderate	High	May
Noroviruses	High	Long	Moderate	High	May
Rotaviruses	High	Long	Moderate	High	No
โพรโตซัว					
<i>Acanthamoeba</i> spp.	High	May multiply	High	High	No
<i>Cryptosporidium parvum</i> High	Long	High	High	Yes	
<i>Cyclospora cayetanensis</i>	High	Long	High	High	No
<i>Entamoeba histolytica</i>	High	Moderate	High	High	No
<i>Giardia intestinalis</i>	High	Moderate	High	High	Yes

^ก ความสำคัญต่อสุขภาพสัมพันธ์กับการเกิดโรค ความรุนแรงและการระบาดโรค

^ข ระยะติดเชื้ในน้ำ 20 °ซ : short = ไม่เกิน 1 สัปดาห์; moderate = ไม่เกิน 1 เดือน; long = เกิน 1 เดือน

^ค ระยะติดเชื้ในน้ำ pH 7-8 ร้อยละ 99 ถูกทำลายที่ 20 °ซ : low < 1 นาที; moderate < 30 นาที; high > 30 นาที

^ง จำนวนเชื้ก่อโรค High = $1-10^2$ เซลล์ (หรือ particles), moderate = 10^2-10^4 ; low > 10^4

การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยน้ำดื่มที่สอดคล้องกับท้องถื่นการอนามัยโลกกำหนดไว้ล่าสุด คือ การกำหนดในรูปของ “เป้าหมายสุขภาพ” หรือ Health-based target ตามแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 ในปี ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ที่มุ่งเน้นไปที่ความเสี่ยงหรือโอกาสในการเกิดความเจ็บป่วยเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (reference) ที่หน่วยงานใช้ในการพัฒนาสู่เป้าหมายในการลดจำนวนผู้ป่วยที่มีสาเหตุจากจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ ซึ่งเท่ากับเป็นการยกระดับความปลอดภัยของประชาชนในการอุปโภคหรือบริโภคน้ำ เป้าสุขภาพสำหรับอันตรายชีวภาพ (biological hazard) มีหลายชนิด ดังตารางที่ 1.2

1. เป้าผลลัพธ์สุขภาพ (Health outcome target)

เป็นเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดในรูปของจำนวนผู้ป่วยสูงสุดจากจุลินทรีย์ก่อโรค หรือ ในรูปของภาระโรคที่ยอมรับได้ (tolerable burden of disease) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 10^{-6} DALY (disability-adjusted life year) ต่อคนต่อปี

2. เป้าคุณภาพน้ำ (Water quality target)

นิยมใช้กับอันตรายเคมี (chemical hazard) มากกว่าอันตรายชีวภาพ

3. เป้าประสิทธิภาพ (Performance target)

เป็นเป้าหมายสุขภาพที่เชื่อมโยง “เป้าหมายสุขภาพ” ในฐานะผู้รับความเสี่ยง และ “ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์-ในกระบวนการผลิตน้ำประปา” ในฐานะผู้จัดการความเสี่ยงเข้าไว้ด้วยกัน เช่น เป้าประสิทธิภาพของขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในการลดความเข้มข้นหรือจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำได้ร้อยละ 99 (หรือ $2 \log_{10}$ reduction) เท่ากับเป็นการลดจำนวนผู้ป่วยในกลุ่มเสี่ยงลงไปได้ 10^2 DALY ต่อคนต่อปี

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างรูปแบบของเป้าหมายสุขภาพ

	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus
จำนวนเชื้อ / ลิตรน้ำดิบ	10	100	10
Health outcome target	1×10^{-6} DALY/คน/ปี	1×10^{-6} DALY /คน/ปี	1×10^{-6} DALY/คน/ปี
Risk of diarrhoeal illness	1 per 1,500 / ปี	1 per 4,600 / ปี	1 per 14,000 / ปี
Drinking-water quality	1 per 79,000 ลิตร	1 per 9,500 ลิตร	1 per 90,000 ลิตร
Performance target	$5.89 \log_{10}$ หน่วย	$5.98 \log_{10}$ หน่วย	$5.96 \log_{10}$ หน่วย

ดังนั้น หากน้ำดิบมีระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค $1 \log$ ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนผู้ป่วย 10^1 DALY ต่อคนต่อปี ดังนั้นน้ำประปาที่ผลิตได้จึงมีความปลอดภัยเพียงพอ ในทางตรงกันข้าม หากน้ำดิบมีระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค $3 \log$ ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนผู้ป่วย 10^3 DALY ต่อคนต่อปี ดังนั้นน้ำประปาที่ผลิตได้จึงยังมีความเสี่ยงอยู่ เนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคได้เพียง $1 \log$ ทำให้มีจุลินทรีย์ก่อโรคคงค้างในน้ำประปาอยู่อีก $1 \log$ ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนผู้ป่วย 10^1 DALY ต่อคนต่อปี

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยน้ำดื่มในรูปของ “เป้าหมายสุขภาพ” จำเป็นต้องทราบระดับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรคตั้งแต่น้ำดิบ จำเป็นต้องทราบประสิทธิภาพของกระบวนการทำลายจุลินทรีย์ในน้ำ และจำเป็นต้องเข้าใจวิธีการประเมินความเสี่ยงต่อจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ

จากการอุปโภคและบริโภคน้ำที่อาจจะมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ดังกล่าวในน้ำดิบในระดับความเข้มข้นที่มีความหลากหลายหรือความผันผวนตามฤดูกาล

เมื่อมีการกำหนด “เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ” (ที่สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้) เป็นเป้าหมายหลักสูงสุดแล้ว และต้องการความเชื่อมโยง “เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ” นี้ให้สอดคล้องกับแต่ละขั้นตอนตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปาแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยแนวทางการประเมินความเสี่ยงในการดัดแปลง (convert) “เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ” ให้กลายเป็น “เป้าประสิทธิภาพ” ของขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตน้ำจนกระทั่ง “เป้าประสิทธิภาพ” ก็อาจจะแทนที่ด้วยคำว่า “เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพฐานความเสี่ยง” หรือ Risk-based performance target ได้เช่นเดียวกัน จากรูปแบบของเป้าหมายสุขภาพจะเห็นได้ว่า การยกระดับความปลอดภัยน้ำดื่มโดยเน้นที่ขั้นตอนตลอดกระบวนการผลิตตั้งแต่การรับน้ำดิบ การแปรรูปไปเป็นน้ำประปา และระบบการแจกจ่ายเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำประปาตามเป้าหมายสุขภาพ จำเป็นต้องอาศัยการประเมินความเสี่ยงเป็นพื้นฐานในการเชื่อมโยงกระบวนการผลิตและความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนผู้ใช้น้ำประปาโดยตรง

การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ

(Quantitative microbial risk assessment : QMRA)

การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (Quantitative microbial risk assessment : QMRA) สามารถใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการประมาณ (estimate) ในเชิงความน่าจะเป็น (probability) และจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์ก่อโรค (cases) ที่อาจจะปนเปื้อนในอาหารและน้ำจากการบริโภค การประเมินความเสี่ยงประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ คือ

1. การระบุอันตราย (Hazard identification) เป็นการทบทวนและยืนยันการเจ็บป่วยจริงที่เกิดจากอันตรายที่สนใจ คือ จุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ เช่น แบคทีเรีย ไวรัส และโพรโตซัว เป็นต้น

2. การอธิบายอันตราย (Hazard characterization) เป็นการประเมินความน่าจะเป็นหรือจำนวนผู้เจ็บป่วยที่ต่อเนื่องจากการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรค โดยอาศัยข้อมูลจากขั้นตอน การประเมินการสัมผัส (ขั้นตอนที่ 3) โดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนนี้จะอาศัยแบบจำลองในรูปของสมการคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ เรียกว่า Dose-response model

3. การประเมินการสัมผัส (Exposure assessment) เป็นการประเมินโอกาสในการรับสัมผัส (exposure) อันตราย ในที่นี้คือการรับจุลินทรีย์ก่อโรคที่อาจจะปนเปื้อนมากับน้ำที่บริโภค ดังนั้น ข้อมูลสำคัญในการประเมินการสัมผัส ก็คือ การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำ (Prevalence and/or Concentration) รวมถึง ปริมาณการบริโภคน้ำ (Consumption) ด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินการสัมผัส คือ ปริมาณจุลินทรีย์ที่รับเข้าสู่ร่างกาย (dose) ซึ่งจะรายงานในหน่วย ของ colony-forming unit (CFU) หรือ most probable number (MPN) ทั้งนี้ทั้งนั้น จะขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์หาจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนเป็นสำคัญ

4. การอธิบายความเสี่ยง (Risk characterization) เป็นการประเมินโอกาสในการเจ็บป่วยจากการบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์ก่อโรค ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงเป็นการบูรณาการเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ตามด้วย ขั้นตอนที่ 2 กล่าวคือ เป็นการพิจารณาความน่าจะเป็นต่อเนื่องของ 2 เหตุการณ์ คือ ^{1.} เหตุการณ์ในการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคปริมาณหนึ่ง (dose) ตามมาด้วย ^{2.} เหตุการณ์การเกิดโรค (response) อันเกิดจากปริมาณจุลินทรีย์ที่ได้รับ จากนั้น จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo Simulation) โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป

ข้อมูลในการวิเคราะห์โดยมากแล้วจะอยู่ในรูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution) กล่าวคือ ข้อมูลที่ได้จะมีการปรับให้มีลักษณะที่สะท้อนค่าที่เป็นไปได้ตั้งแต่ต่ำสุดไปจนถึงมากที่สุด โดยมีการกำกับความจะเป็น (probability) ของค่าที่เป็นไปได้เหล่านั้นด้วย ซึ่งการปรับรูปแบบข้อมูลในลักษณะของการแจกแจงความน่าจะเป็นจัดเป็นรูปแบบเฉพาะที่ใช้กันทั่วไปในการประเมินความเสี่ยง

ประเด็นที่สำคัญการกำหนดความน่าเชื่อถือและการนำไปใช้ประโยชน์ของการประเมินความเสี่ยง คือ uncertainty ซึ่งอาจจะเรียกกันทั่วไปว่า ความไม่แน่นอน กล่าวคือ การประเมินความเสี่ยงที่มีค่า uncertainty มาก ก็ทำให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือน้อย เนื่องจาก ผู้จัดการความเสี่ยงยังคงจะต้องคาดเดาค่าที่ถูกต้องที่แท้จริงจากช่วงของผลการศึกษาที่กว้าง ทำให้เกิดการใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติน้อย ดังนั้น ผู้จัดการความเสี่ยงที่จะสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง จำเป็นต้องอาศัยผลการประเมินความเสี่ยงที่มีความน่าเชื่อถือที่มีค่า uncertainty น้อย โดยทั่วไปแล้ว ค่า uncertainty นี้จะแปรผกผันกับจำนวนตัวอย่าง (sample size) หมายความว่า จำนวนตัวอย่างที่มากขึ้นก็จะทำให้ค่า uncertainty น้อยลง หรือ จำนวนตัวอย่างที่น้อยลงก็จะทำให้ค่า uncertainty มากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า จำนวนตัวอย่างมิได้เป็นอุปสรรคในการประเมินความเสี่ยงแต่อย่างใด หมายความว่า การประเมินความเสี่ยงสามารถดำเนินการได้ไม่จำกัดว่าจำนวนตัวอย่างจะน้อยหรือมากก็ตาม

เมื่อทราบระดับความเสี่ยงในการอุปโภคและบริโภคน้ำของประชากร (unrestricted risk) โดยเปรียบเทียบกับเป้าหมายสุขภาพ (health-outcome target) ที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกที่ 10^{-6} DALY/คน/ปี ทำให้การประปานครหลวงทราบถึง “เป้าหมายประสิทธิภาพ” (performance target) ที่พึงให้ได้สู่หัตถ์ตลอดทุกขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ทำให้สามารถลำดับ (prioritize) และ คัดเลือก (select) มาตรการจัดการความเสี่ยง (risk management measures) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่มีความเหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ (practical) อนึ่งหลังจากได้มีการนำทางเลือกการจัดการความเสี่ยงไปปฏิบัติ (implement) แล้ว การประเมินความเสี่ยงซ้ำอีกครั้ง (re-assessment) มีความจำเป็นเพื่อเป็นการทวนสอบ (verification) ประสิทธิภาพการกระบวนการผลิตและทำให้ทราบระดับความเสี่ยงที่ผ่านการจัดการความเสี่ยงแล้ว (restricted risk) ด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในโรงงานผลิตน้ำบางเขน (steps in water processing)

เพื่อสามารถวางแผนการเก็บตัวอย่างในการประเมินความเสี่ยงและการจัดการความเสี่ยง จำเป็นที่จะต้องเข้าใจระบบและขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความร่วมมืออย่างดีจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนในการเก็บตัวอย่างในโรงงานผลิตน้ำ ดังนั้น การศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปาจึงใช้ต้นแบบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ดังต่อไปนี้

1. โรงงานผลิตน้ำบางเขน
2. แหล่งน้ำดิบ
 - ก. แม่น้ำเจ้าพระยา
 - ข. สถานีสูบน้ำดิบสำแล
 - ค. คลองประปาตะวันออก
3. แผนผังโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน
4. ระบบการผลิตน้ำประปา
 - ก. ระบบสูบ-ส่งน้ำดิบ
 - ข. ระบบผลิตน้ำประปา
 1. ระบบการตกตะกอน (Clarification)
 - ก) การเติมสารเคมี
 - ข) การกวนเร็ว (Fast mix)
 - ค) การกวนช้า (Slow mix)
 - ง) การตกตะกอน (Sedimentation)
 2. การกรอง (filtration)
 3. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (Disinfection)
 4. ถังน้ำใส (clear water tank)
5. ระบบสูบส่ง-สูบจ่ายน้ำประปา (Transmission and distribution)
 - ก. ระบบส่วนกลาง (Central System) ประกอบด้วย
 1. ระบบอุโมงค์ส่ง (tunnel transmission)
 2. ระบบท่อส่ง (conduit transmission)
 - ข. ระบบท่อส่งย่อย

การกำหนดจำนวนตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (sample sizes in water processing plant)

การเก็บตัวอย่างน้ำจะกำหนดให้มีความสอดคล้องกับขั้นตอนการผลิตน้ำประปาและการคัดเลือกมาตรการจัดการความเสี่ยงด้วย โดยวางแผนการเก็บตัวอย่างเพื่อการประเมินความเสี่ยงก่อนการจัดการความเสี่ยงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แผนการเก็บตัวอย่างเพื่อการประเมินความเสี่ยง

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	ช่วงระยะ “การประเมินความเสี่ยง”										ช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง”			
	เดือน										เดือน			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
1. น้ำดิบ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
2. การกวนช้า	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
3. การกรอง	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
5. การสูบส่ง-สูบน้ำจ่าย	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	10	10
รวม (แต่ละเดือน)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	30	30	30

ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำ (water sampling points)

เมื่อได้มีการกำหนดตำแหน่งและจำนวนตัวอย่างในการเก็บน้ำตามแผนการเก็บตัวอย่างน้ำ ดังตารางที่ 4 ได้มีการกำหนดปริมาตรตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร (มล.) /ตัวอย่างการตรวจแบคทีเรีย และ ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 2,000 มล./ตัวอย่างการตรวจโปรโตซัว โดยเน้นการเก็บตัวอย่างปลอดเชื้อ (aseptic technique) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์อื่นๆ นอกเหนือจากจุลินทรีย์เป้าหมายในตัวอย่างน้ำ

ตำแหน่งหรือขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำ จะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

1. แหล่งน้ำดิบ (Raw water) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำอยู่ที่อ่างเก็บน้ำดิบจากคลองประปา บริเวณด้านหน้าโรงสูบน้ำดิบ บริเวณโรงงานผลิตน้ำบางเขน ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำดิบ (Raw water) หน้าโรงสูบน้ำดิบ โรงงานผลิตน้ำบางเขน

2. การกวนช้า (Slow mix) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากผ่านขั้นตอนการกวนช้า บริเวณน้ำล้นออกจากถังตกตะกอน (clarifier tank) line 1 ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำจากการกวนช้า

3. การกรอง (Filtration) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำหลังผ่านขั้นตอนการกรองน้ำจากถังกรอง 1
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (Disinfection) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำจากสถานีสูบน้ำที่ 1
5. การสูบส่ง-สูบน้ำ (Distribution) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำจากน้ำประปาเส้นท่อ ณ จุดจ่ายน้ำประปาในเขตพื้นที่ของชุมชน โดยเก็บตัวอย่างน้ำละกันไปในแต่ละรอบ
 - ก) สำนักงานประปาสาขานนทบุรี
 - ข) สถานีอนามัย
 1. ตำบลบางตลาด
 2. บ้านทานสัมฤทธิ์
 3. ตำบลท่าทราย
 4. ตลาดขวัญ
 - ค) สำนักงานเขตหลักสี่
 - ง) สถานีขนส่งจังหวัดนนทบุรี
 - จ) ที่ทำการไปรษณีย์ นนทบุรี
 - ฉ) โรงเรียน
 1. นครนนท์วิทยา 2 (วัดทินกรนิมิตร)
 2. ประชาอุปถัมภ์
 3. โรงเรียนวัดบัวขวัญ
 - ช) ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร (ธกส.) สาขานนทบุรี
 - ซ) หมู่บ้านชวนชื่น (พระนั่งเกล้า)
 - ฌ) เทสโก้โลตัส สาขาสี่แยกพงษ์เพชร

ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากเส้นท่อ (water sampling procedure)

1. เปิดก๊อกค้างไว้นาน 2-3 นาที เพื่อปล่อยน้ำค้างนิ่งในเส้นท่อ (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 การปล่อยน้ำค้างเส้นท่อ

2. เมื่อตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นก่อนการเก็บตัวอย่างน้ำเรียบร้อยแล้ว ให้บันทึกเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำลงในใบเก็บน้ำ
3. การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อการตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และชีวเคมี โดยเก็บตัวอย่างน้ำถึงคอขวดเก็บตัวอย่าง (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และชีวเคมี

4. การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา โดยการหยุดน้ำก่อน ระหว่างนั้นจึงเช็ดหัวก๊อกทั้งภายในและภายนอกด้วยสำลีชุบแอลกอฮอล์ร้อยละ 70 เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่อาจจะปนเปื้อนที่บริเวณด้านนอกโดยเฉพาอย่างยิ่งที่ปากก๊อกให้สะอาด (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคที่ด้านนอกและปากก๊อก

5. เปิดน้ำอีกครั้ง เทขวดแก้วออกจากภาชนะโลหะ เปิดจุกขวดแก้ว โดยเก็บตัวอย่างน้ำให้ถึงคอขวด (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อการตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาในขวดแก้ว

6. ปิดจุก บรรจุกลับลงในภาชนะโลหะ แล้วเก็บขวดเก็บตัวอย่างในภาชนะที่พอเหมาะและมีแผ่นทำความเย็นอยู่ภายใน เพื่อรักษาสภาพตัวอย่างขณะขนส่ง (ภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 การเก็บขวดเก็บตัวอย่างน้ำในภาชนะบรรจุ

การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา (Microbiological analysis)

1. ชนิดจุลินทรีย์ก่อโรค

(Pathogens)

ประเด็นสำคัญที่ใช้ในการคัดเลือกชนิดจุลินทรีย์ก่อโรค ประกอบด้วย

- 1.1 เป็นจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ (waterborne disease pathogens)
- 1.2 ข้อมูลเพียงพอสำหรับการประเมินความเสี่ยง
- 1.3 มีหลักฐานการปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบ
- 1.4 โรงงานผลิตน้ำสามารถลดหรือทำลายได้
- 1.5 ระบาดวิทยา การก่อโรค และความรุนแรง

ดังนั้น จุลินทรีย์ก่อโรคในการประเมินความเสี่ยงครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเฉพาะกลุ่มที่มักมีการระบาดโดยมีน้ำเป็นสื่อในช่วงที่ระบบสาธารณสุขปกคบกพร่องหรือในภาวะของอุทกภัย โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่มแบคทีเรีย ประกอบด้วย

1. *Vibrio cholera* : O1
2. *Vibrio cholera* : O139
3. *Shigella* spp.
4. *Salmonella* spp.
5. *Campylobacter* spp.

= กลุ่มโปรโตซัว ประกอบด้วย

1. *Cryptosporidium parvum*
2. *Giardia lamblia*
3. *Entamoeba histolytica*

2. การวิเคราะห์จุลชีววิทยา

(Analytical method)

2.1 ปริมาตรตัวอย่างน้ำในการตรวจแต่ละกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรค

- แบคทีเรีย 100 มิลลิลิตร
- โปรโตซัว 20 ลิตร

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำที่เก็บได้เมื่อนำส่งถึงห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา จะผ่านการกรองด้วย filter

- แบคทีเรีย

= *Vibrio cholera* และ *Shigella* spp. ใช้ Membrane filter ขนาด porosity 0.45 um

= *Salmonella* spp. และ *Campylobacter* spp. ใช้ Cellulose nitrate membrane filter (WhatmanTM) ขนาด porosity 0.2 um เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มม.

- โปรโตซัว

= *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* และ *Entamoeba histolytica* ใช้ Glass microfiber filter GF/F (WhatmanTM) เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มม.

2.3 วิธีการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรค (Detection method)

2.3.1 *Vibrio cholerae* O1 และ O139

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, คศ.2012 โดย American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF) Part 9000 Microbiological examination 9260H หน้า 162-168 (9-160 ถึง 9-166)

2.3.2 *Shigella* spp.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, คศ.2012 โดย American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF) Part 9000 Microbiological examination 9260E หน้า 152-154 (9-150 ถึง 9-152)

2.3.3 *Salmonella* spp. (HPA standard method)

Detection of *Salmonella* species ฉบับที่ 3 ฉบับวันที่ 09-07-2006 โดย Standards Unit, Evaluations and Standards Laboratory, Centre for Infections โดยความร่วมมือของ Regional Food, Water and Environmental Coordinators Forum. Reference no: W7i3 from the Health Protection Agency ประเทศสหราชอาณาจักร

2.3.4 *Campylobacter* spp. (HPA standard method)

Detection of *Campylobacter* species in water ฉบับที่ 3 ฉบับวันที่ 24-10-2007 โดย Standards Unit, Evaluations and Standards Laboratory, Centre for Infections โดยความร่วมมือของ Regional Food, Water and Environmental Coordinators Forum. Reference no: W 8i3 from the Health Protection Agency ประเทศสหราชอาณาจักร

2.3.5 *Cryptosporidium parvum* (Guy et al., 2003)

โดยการสกัด DNA จาก membrane filter จากนั้นใช้วิธีปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerase chain reaction) โดยใช้ primers SB012F และ SB012R จะได้ amplicon (PCR product) ขนาด 458 base pairs

2.3.6 *Giardia lamblia* (Guy et al., 2003)

โดยการสกัด DNA จาก membrane filter จากนั้นใช้วิธีปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerase chain reaction) โดยใช้ primers GABB97F และ GABB220R จะได้ amplicon (PCR product) ขนาด 163 base pairs probe GLHSP184

2.3.7 *Entamoeba histolytica*

โดยการสกัด DNA จาก membrane filter จากนั้นใช้วิธีปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerase chain reaction) โดยใช้ primers EntaF และ EhR จะได้ amplicon (PCR product) ขนาด 166 base pairs

การวิเคราะห์โปรโตซัวจากตัวอย่างน้ำและการสกัดดีเอ็นเอจากกระดาศกรง

กรองตัวอย่างน้ำประปา 20 ลิตร ที่ต้องการตรวจหาการปนเปื้อนมาทำการกรองอย่างง่ายเพื่อเอาตะกอนขนาดใหญ่ที่ปนเปื้อนออกก่อน แล้วนำน้ำที่ได้มาผ่านโดยการกรองผ่านแผ่นกระดาศกรง ขนาด 0.45 ไมโครเมตรอีกครั้ง นำแผ่นกระดาศกรงที่ได้ดังกล่าวเก็บภายใต้อุณหภูมิ -20°C และนำมาสกัดดีเอ็นเอต่อไป

ขั้นตอนการสกัดดีเอ็นเอ

1. นำตัวอย่างที่เป็นกระดาศกรง มาผึ่งไว้ให้น้ำแข็งที่เกาะอยู่ละลาย ฉีดล้างด้วยน้ำกลั่น (เล็กน้อย) ใช้ Forceps เชียให้ตะกอนที่ติดอยู่ที่กระดาศกรง และเทใส่ในหลอดตัวอย่างขนาด 15 ml
2. ละลายน้ำตาลทรายขาวกับน้ำกลั่นจนไม่สามารถละลายได้ นำมาเติมในหลอดตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างลอยน้ำขึ้นมายู่ชั้นบน ตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
3. ดูดตะกอนที่ลอยอยู่ด้านบนของหลอดตัวอย่าง ใส่ในหลอดตัวอย่างขนาด 15 ml แล้วเติมน้ำกลั่นให้เต็ม ตั้งทิ้งไว้ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตกตะกอน
4. นำหลอดตัวอย่างไปเก็บในเก็บภายใต้อุณหภูมิ -20°C
5. นำหลอดตัวอย่าง ที่ได้มาเปิดน้ำผ่าน ทำให้ละลาย ดูดมา 1.5 ml ใส่หลอดตัวอย่างใหม่ นำไปปั่นเหวี่ยง 12,000 รอบ เป็นเวลา 5 นาที
6. เทส่วนใสทิ้ง เติม TE buffer จำนวน 1 ml ผสมให้เข้ากันดี
7. เติม 5% SDS จาก SDS 20% จะต้องเติม 2.5 ml ต่อ tube จากนั้นเติม Proteinase K (20mg/mL) นำไป incubate ที่ 37°C 30 นาที
8. เติม 5M NaCl จำนวน 100 μl และ CTAB จำนวน 80 μl นำไป incubate ที่ 65°C 15 min
9. เติม Phenol: Chloroform อัตราส่วน 1:1 (200ml:200ml) ทิ้งไว้ 3 min นำไปปั่น 12,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที
10. ดูดส่วนใสเอาใส่หลอดตัวอย่างใหม่ (ในกรณีที่ตะกอนไม่ตก ให้ปั่นซ้ำอีกรอบ) เติม Chloroform อีกรอบในปริมาณที่เท่ากัน (เช่น ดูดส่วนใสได้ 200ml ก็เติม Chloroform 200ml) นำไปปั่นที่ 4°C 12,000 rpm 10 min ดูดส่วนใสไว้
11. เติม Na acetate 1 ใน 10 เท่าของ volume ที่ดูดมาได้ แล้วเติม Absolute Alcohol 2.5 เท่าของ Volume ทั้งหมด ผสมให้เข้ากันแล้ว spin down เก็บไว้ที่ -20°C
12. นำมาปั่นที่ 4°C 12,000 rpm 10 min จะได้ตะกอน (อาจปั่นซ้ำถ้าไม่พบตะกอน)
13. เทส่วนใสออกแล้วล้างตะกอนด้วย 75% แอลกอฮอล์ 300ml mix ไปมา แล้วนำไปปั่นที่ 4°C 12,000 rpm 10min เท 75% แอลกอฮอล์ ออกแล้ว ผึ่ง ให้แห้ง 20 นาที
14. ละลายตะกอนด้วย DI 10ml แล้ว ละลายเข้ากันดี
15. นำไปวัดความเข้มข้นของ DNA และเก็บที่ -20°C สำหรับทำ PCR ต่อไป

ขั้นตอนการทำ PCR

ส่วนประกอบของการทำพีซีอาร์ ประกอบไปด้วย

- ดีเอ็นเอ 1 ไมโครลิตร
- ไพรมเมอร์ที่จำเพาะ อย่างละ 1 ไมโครลิตร (0.5 μm)
- MgCl_2 1 ไมโครลิตร (25mM)
- Taq polymerase 0.04 ไมโครลิตร

เติมน้ำกลั่นจนครบ 10 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน

แล้วนำไปเข้าเครื่อง Thermocycler โดยมี condition ดังนี้

- 94 °C for 30 วินาที
- 56 °C for 30 วินาที
- 72 °C for 60 วินาที

ทำซ้ำจำนวน 35 รอบ เมื่อได้ PCR product แล้วนำไปตรวจสอบบน 2% agarose gel และถ่ายภาพภายใต้ UVP

Primers ที่ใช้ในการตรวจสอบ

Primers ที่จำเพาะต่อ *Entamoeba histolytica*, *Cryptosporidium parvum* และ *Giardia lamblia* ดังนี้

- *C. parvum* : product size 458 base pairs

SB012F	5- ATAAACAAGCAGGAAAAAAGGT-3
SB012R	5- CGCACAAGTTACAAGGATTATT-3
- *G. lamblia* : product size 163 base pairs

GABB97F	5- AGGGCTCCGGCATAACTTTCC -3
GABB220R	5- GTATCTGTGACCCGTCCGAG-3
probe GLHSP184	CAGGCCTTGGCGTTCCCGAA
- *E. histolytica*: product size 166 base pairs

EntaF	5- ATGCACGAGAGCGAAAGCAT-3
EhR	5- GATCTAGAAACAATGCTT TC T-3

3. การหาความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรค (Prevalence)

ความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรคนิยมใช้ร้อยละของการตรวจพบจุลินทรีย์ก่อโรคต่อจำนวนตัวอย่างที่ตรวจ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการประเมินความเสี่ยงมีความเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงนิยมใช้การแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution) ในการอธิบายความไม่แน่นอนของความชุก โดยทั่วไปแล้วการอธิบายความไม่แน่นอนของความชุกจะใช้ Beta distribution $Beta(\alpha_1, \alpha_2)$ (Vose, 1998)

โดยที่ α_1 คือ $s + 1$

α_2 คือ $n - s + 1$

n คือ จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ (trial)

s คือ จำนวนตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนด้วย *Salmonella* spp. (s = success)

นอกจากนี้ ค่าคาดหวัง (expected value) หรือ ค่าเฉลี่ยของ Beta distribution จะใช้สูตร

$$\text{Mean Prevalence} = \frac{s+1}{n+2} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างที่ 1 จำนวนตัวอย่างที่ตรวจ 30 ตัวอย่าง ไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคเลย ความชุกเฉลี่ยของจุลินทรีย์ก่อโรค

จำนวนตัวอย่างที่ตรวจ 30 ตัวอย่าง หรือ $n = 30$
 จำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวก 0 ตัวอย่าง หรือ $s = 0$

$$\text{Mean Prevalence} = \frac{s+1}{n+2}$$

$$\text{Mean Prevalence} = \frac{0+1}{30+2}$$

Mean Prevalence = $1/32 = 0.03125$ หรือ ประมาณร้อยละ 3

ดังนั้น แม้ว่าจะตรวจไม่พบการปนเปื้อนในทุกตัวอย่างที่ตรวจ ($s = 0$) แต่ mean prevalence ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจาก Beta distribution ก็ให้ค่าเฉลี่ยความชุกที่ไม่เป็นศูนย์

ในทางตรงกันข้าม การคำนวณความชุกทางระบาดวิทยา จะเป็นสัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวกต่อจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งหมด คือ $s = 0$ และ $n = 30$ ดังนั้น ความชุกที่ได้จึงเป็น ร้อยละ 0

ตัวอย่างที่ 2 จำนวนตัวอย่างที่ตรวจ 3,000 ตัวอย่าง ไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคเลย ความชุกเฉลี่ยของจุลินทรีย์ก่อโรค

จำนวนตัวอย่างที่ตรวจ 3,000 ตัวอย่าง หรือ $n = 3,000$
 จำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวก 0 ตัวอย่าง หรือ $s = 0$

$$\text{Mean Prevalence} = \frac{s+1}{n+2}$$

$$\text{Mean Prevalence} = \frac{0+1}{3,000+2}$$

Mean Prevalence = $1/3,002 = 0.000333$ หรือ ประมาณร้อยละ 0.03

ในตัวอย่างที่ 2 จำนวนตัวอย่างที่ตรวจมีจำนวนมากกว่าตัวอย่างที่ 1 ถึง 100 เท่า กล่าวคือ $n = 3,000$ ในขณะที่ ตรวจไม่พบการปนเปื้อนในทุกตัวอย่างที่ตรวจ ($s = 0$) เช่นเดียวกัน โดย mean prevalence ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจาก Beta distribution ก็ให้ค่าเฉลี่ยความชุกที่ไม่เป็นศูนย์เช่นเดียวกัน เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อจำนวนตัวอย่างที่ตรวจมีจำนวนมากขึ้น และ $s = 0$ เหมือนเดิม ความชุกเฉลี่ยจะมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเป็นความชุกที่ได้จากการคำนวณความชุกทางระบาดวิทยา

โดยที่ความชุกทางระบาดวิทยา คือ สัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวกต่อจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งหมด คือ $s = 0$ และในตัวอย่างที่ 2 มี $n = 3,000$ ดังนั้น ความชุกที่ได้จึงเป็น ร้อยละ 0 ไม่แตกต่างจากความชุกเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่ตรวจเพียง 30 ตัวอย่าง

4. การหาความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรคโดยวิธี Maximum likelihood (ML) (Concentration)

ในการศึกษาครั้งนี้ มีจำนวนตัวอย่างค่อนข้างมาก และแต่ละตัวอย่างมีปริมาตรมาก ระหว่าง 100 มล สำหรับ แบคทีเรีย ถึง 20,000 มล สำหรับโปรโตซัว นอกจากนี้ ความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำยังอยู่ในระดับที่ต่ำมาก ดังนั้น จึงเลือกวิธีการตรวจวิเคราะห์จุลชีววิทยาเป็นการตรวจเชิงคุณภาพ (qualitative data) โดยใช้สมการในการแปลงค่าความชุก (prevalence) เป็นความเข้มข้น (quantitative data) ได้โดยอาศัยข้อมูลจำนวนตัวอย่าง (sample size) ที่ตรวจวิเคราะห์ทั้งหมดร่วมกับ ค่าความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างที่วิเคราะห์ กล่าวคือ

การประมาณความเข้มข้นของจุลินทรีย์โดย quantal assay จะต้องมีการกำหนดปริมาตรตัวอย่างน้ำที่แน่นอน แล้ววิเคราะห์การพบ (presence) หรือไม่พบ (absence) ของจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำ ปริมาตรดังกล่าว ซึ่งตรงกับแนวทางการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างโดยวิธี Most probable number (MPN) ซึ่งอาจจะเป็นที่รู้จักกันกว้างขวางกว่า โดยการกำหนดปริมาตรตัวอย่างน้ำและจำนวนซ้ำของตัวอย่างน้ำจะมีการวางแผนเป็นชุดๆ ดังตารางที่ 2.1 (Haas et al., 1999)

ตารางที่ 2.1 การกำหนดปริมาตรตัวอย่างน้ำและจำนวนซ้ำของตัวอย่างน้ำในการตรวจโดย Quantal assay

ชุด (r)	ปริมาตรตัวอย่าง/ซ้ำ (V_i)	จำนวนซ้ำในชุด (n_i)	จำนวนซ้ำที่เป็นบวก (p_i)
1	V_1	n_1	p_1
2	V_2	n_2	p_2
3	V_3	n_3	p_3
4	V_4	n_4	p_4

เมื่ออาศัยหลักการของ Maximum likelihood แล้ว ค่าประมาณ MPN ของความเข้มข้น ($\bar{\mu}$) ซึ่งก็คือ ค่าประมาณ Maximum likelihood estimator (MLE) ของ $\bar{\mu}$ เช่นเดียวกันด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการหาค่าความเข้มข้น $\bar{\mu}$ ที่ทำให้ค่า L ในฝั่งซ้ายของสมการ (1) มีค่าสูงสุด (maximize) ตามชื่อหลักการ

$$L = \prod_{i=1}^r \frac{n_i!}{p_i!(n_i - p_i)!} \left\{ \left[1 - e^{(-\bar{\mu}V_i)} \right]^{p_i} \left[e^{(-\bar{\mu}V_i)} \right]^{n_i - p_i} \right\} \quad (2.2)$$

ซึ่งเท่ากับการทำให้ $-\ln(L')$ ในฝั่งซ้ายของสมการ (2.2) มีค่าต่ำสุด (minimize) เนื่องจาก $-\ln(L')$ เป็นค่าลบนั่นเอง

$$-\ln(L') = \sum_{i=1}^r \left\{ -p_i \ln \left[1 - e^{(-\bar{\mu}V_i)} \right] + (n_i - p_i)(\bar{\mu}V_i) \right\} \quad (2.3)$$

ตัวอย่างที่ 3 การหาค่าความเข้มข้นโดยใช้สมการ (2.3)

ชุด (Set : r_i)	ปริมาตรตัวอย่าง/ซ้ำ (Volume/replicate : V_i)	จำนวนซ้ำ (replicate : n_i)	จำนวนซ้ำที่เป็นบวก (positive replicate : p_i)	$-\ln(L_i)$
1	10	5	5	0.0018
2	1	5	3	3.3934
3	0.1	5	0	0.3962
ความเข้มข้น	0.7924		$-\ln(L) =$	3.791

ค่าความเข้มข้น $\bar{\mu}$ ที่ทำให้ค่า $-\ln(L')$ ในสมการ (2.2) มีค่าต่ำสุด (minimize) ที่ 3.791 คือ 0.7924 ml^{-1}

เมื่อนำหลักการ MLE มาประยุกต์ในบริบทของการศึกษานี้ ซึ่งตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำโดยใช้ปริมาตรเท่ากันทุกครั้ง ซึ่งเท่ากับว่า r มีเพียง 1 ชุด เท่านั้น ดังนั้น เมื่อ differentiate สมการ (2.3) ด้วย $\bar{\mu}$ เพื่อหาค่าประมาณ ML โดยตรง จะได้ค่าประมาณความเข้มข้น ดังสมการ (2.4)

$$\mu = -\frac{1}{V} \ln \left(\frac{n-p}{n} \right) \quad (2.4)$$

ตัวอย่างที่ 4 เมื่อวิเคราะห์ 2 ตัวอย่างน้ำ แต่ละตัวอย่างน้ำมีปริมาตร 500 ml ผลการวิเคราะห์แบคทีเรียพบว่า มี 1 ตัวอย่างน้ำให้ผลบวก ดังนั้น ความเข้มข้นของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำจะมีค่า ดังนี้

$$\mu = -\frac{1}{500} \ln \left(\frac{2-1}{2} \right)$$

เมื่อคำนวณแล้ว ความเข้มข้นของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ 0.001386 ml^{-1} หรือ $1.386 \times 10^{-3} \text{ ml}^{-1}$

ตัวอย่างที่ 5 เมื่อวิเคราะห์ 2 ตัวอย่างน้ำ แต่ละตัวอย่างน้ำมีปริมาตร 2,000 ml ผลการวิเคราะห์โปรโตซัวพบว่า มี 1 ตัวอย่างน้ำให้ผลบวก ดังนั้น ความเข้มข้นของโปรโตซัวในตัวอย่างน้ำจะมีค่า ดังนี้

$$\mu = -\frac{1}{20000} \ln \left(\frac{2-1}{2} \right)$$

เมื่อคำนวณแล้ว ความเข้มข้นของโปรโตซัวในตัวอย่างน้ำ $0.00003466 \text{ ml}^{-1}$ หรือ $3.466 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$

จากตัวอย่างที่ 2 และ ตัวอย่างที่ 3 จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อจำนวนตัวอย่างที่ตรวจ (n) และ ผลการวิเคราะห์ที่ให้ผลบวก (p) ที่เท่ากันแล้ว ความเข้มข้นของตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับปริมาตรน้ำในการวิเคราะห์โดยตรง กล่าวคือ ถ้าปริมาตรตัวอย่างน้ำน้อยกว่า ก็จะมีค่าความเข้มข้นจุลินทรีย์มากกว่า ปริมาตรตัวอย่างน้ำมากกว่า

การประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ

(Quantitative microbial risk assessment: QMRA)

1.การระบุอันตราย

(Hazard identification)

การระบุอันตราย เป็นการทบทวนและยืนยันการเจ็บป่วยจริงที่เกิดจากอันตรายที่สนใจ ซึ่งในที่นี้ ก็คือ จุลินทรีย์ก่อโรคที่ติดต่อกับการบริโภคอาหารและน้ำ เช่น แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัวชนิดต่างๆ ที่สามารถก่อโรคในคนได้ ดังนั้น โดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเชิงพรรณนา

2.การอธิบายอันตราย

(Hazard characterization)

การอธิบายอันตราย เป็นการประเมินความน่าจะเป็นหรือจำนวนการเจ็บป่วยต่อเนื่องจากการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรค โดยอาศัยข้อมูลจากขั้นตอน การประเมินการสัมผัส

การตอบสนองของประชากรมนุษย์เมื่อได้รับจุลินทรีย์เข้าในร่างกายนั้น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนอย่างยิ่ง เนื่องจาก ประกอบด้วยปัจจัยมากมายที่เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่อาจจะสามารถแจกแจงได้เป็น 3 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ

1. องค์ประกอบทางจุลชีววิทยา (Microbiological factor)

ลักษณะบางอย่างในเชิงโครงสร้าง (Structure)และรหัสพันธุกรรม(DNA) ที่ทำให้จุลินทรีย์ก่อโรคสามารถก่อโรคได้ อาจจะเรียกว่าเป็น องค์ประกอบก่อโรครุนแรง (Virulence factors) เช่น ความสามารถในการเกาะกับผนังเยื่อลำไส้ (Adherence) ความสามารถในการรุกรานผ่านผนังเยื่อลำไส้ (Invasion) สารพิษที่ผนังเซลล์ส่วน lipopolysaccharide (LPS) หรือ Exotoxin ทำให้จุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตได้ในสิ่งแวดล้อมและรอดชีวิตผ่าน(survive) ระบบภูมิคุ้มกันทางกายภาพและทางเคมีในตัวของผู้บริโภคได้ด้วย

2. องค์ประกอบทางร่างกาย (Host factor)

- ประชากรและเศรษฐกิจสังคม(Demographic and socioeconomic factors) ได้แก่ อายุ เพศ ชนชาติ เชื้อชาติ ภาวะโภชนาการ สังคม เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม การเดินทางภายในและระหว่างประเทศ กลุ่มอายุที่มีอุบัติการณ์การติดเชื้อโมเนลลาสูงมีสองกลุ่ม คือ เด็กและคนชรา โดยแนวโน้มการได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคในกลุ่มเด็กจะอยู่ระหว่างแรกเกิดถึง 5 ปี โดยมีอุบัติการณ์สูงมากในช่วงอายุไม่เกิน 1 ปี เช่น เด็กมักได้รับเชื้อโมเนลลาจากอาหารมากกว่าการระบาดจากสุขอนามัยบกพร่องในศูนย์รับเลี้ยงเด็ก ความสัมพันธ์ของอายุยังเกี่ยวข้องกับลักษณะพฤติกรรมของเด็กด้วย เช่น พฤติกรรมการกินดิน ททราย การสัมผัสสัตว์เลื้อยคลาน สัตว์เลี้ยง เป็นต้น

- พันธุกรรม (Genetic factors) ยีน (gene) มีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับโรค

- สุขภาพ (Health factors) ประกอบด้วย สภาวะภูมิคุ้มกัน การติดเชื้อร่วม โรคหรือความเจ็บป่วยที่เป็นอยู่ ยาที่ใช้ การตั้งท้อง เป็นต้น ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดการตอบสนองของร่างกายต่อจุลินทรีย์ก่อโรค ซึ่งผลลัพธ์ของการตอบสนองอาจจะเพียงมีการติดเชื้อ (infection) หรือ รุนแรงขึ้นจนแสดงอาการหรือความเจ็บป่วย (clinical illness) มีหลักฐานบ่งชี้ว่า ร่างกายสามารถจดจำจุลินทรีย์ก่อโรคได้ ทำให้การได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคซ้ำอีกครั้ง ไม่ก่อให้เกิดอาการรุนแรงเท่าการได้รับในครั้งแรก

3. องค์ประกอบทางอาหารบริโภคร (Food matrix factor)

- อาหารเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับร่างกายและจุลินทรีย์ก่อโรค จุลินทรีย์ก่อโรคจะต้องผ่านระบบป้องกันตัวของร่างกายด่านแรก คือ ความเป็นกรดที่สูงในกระเพาะอาหาร ซึ่งอาจจะต่ำถึงระดับ pH 2 ดังนั้น ภาวะร่างกายของกลุ่มที่เสี่ยงต่อจุลินทรีย์ก่อโรคจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเป็นกรดในกระเพาะอาหารลดลง เช่น ยาลดกรดในกระเพาะอาหาร โรคกระเพาะ ภาวะเบาหวาน และอายุมากขึ้น นอกจากนี้ ปัจจัยที่ตัวอาหาร ได้แก่ ปริมาณอาหารที่บริโภค ระดับไขมัน ระบบป้องกันการเปลี่ยน pH (buffering capacity) ธรรมชาติของการมีเชื้อในอาหารมีอยู่นั้นๆ

- ปริมาณอาหารหรือน้ำที่บริโภค (food or water consumption) มีส่วนกำหนดโอกาสในการได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคด้วย เนื่องจาก จุลินทรีย์ก่อโรคมิได้กระจายเท่ากันตลอดทั่วอาหาร(non-homogeneous) ดังนั้น อาจจะต้องตั้งข้อสังเกตได้ว่า ปริมาณอาหารที่บริโภคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโอกาสการป่วย นอกจากนี้ จุลินทรีย์ทั่วไปมีแนวโน้มว่าจะรวมกลุ่มกันเป็นก้อน (clump) ทำให้จุลินทรีย์ชั้นในได้รับการปกป้องจากกรดในกระเพาะอาหารได้ สิ่งแวดล้อมขนาดเล็ก (microenvironment) ที่จุลินทรีย์ก่อโรคเกาะอยู่กับอาหารเป็นตัวกำหนดความอยู่รอดของจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น อาหารที่มีส่วนประกอบของไขมัน บริเวณที่เป็นไขมันจะเอื้อต่อการอยู่รอดของจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านความเป็นกรดในกระเพาะอาหารได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม บางการศึกษาได้ข้อสรุปที่ค้านกับผลการศึกษาค้นคว้านี้ เช่น ในน้ำมัน[36]และไข่ขาว[37] เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ช่วยลดโอกาสการได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคในทางกลับกันแอลกอฮอล์อาจจะช่วยกระตุ้นการหลั่งกรดในกระเพาะได้ด้วย

การตอบสนองต่ออันตราย (response) ของร่างกายสามารถพิจารณาได้ทุกปฏิกิริยาของร่างกายต่อเมื่อได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเพื่อให้เข้าใจได้โดยไม่ซับซ้อน ก็มักจะพิจารณาตามลำดับเงื่อนไขของเวลาตั้งแต่ได้รับอันตรายเข้าสู่ร่างกาย (Chronological events)

การติดเชื้อ (infection) เป็นเหตุการณ์ที่จุลินทรีย์ก่อโรคจำนวนหนึ่งที่หลบหลีกจากระบบภูมิคุ้มกันหรือ ระบบป้องกันอื่นๆ ของร่างกาย เช่น กรดในกระเพาะอาหาร เอนไซม์หรือน้ำย่อยในทางเดินอาหาร เป็นต้น จนกระทั่งสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนภายในร่างกาย และมีการขับอันตรายออกจากร่างกายได้ นอกจากนี้ การติดเชื้อยังกินความถึงการตรวจพบระดับภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ออันตรายนั้น หรือ ระดับภูมิต้านทานมีใช้ด้วย ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์ก่อโรคยังไม่ก่อให้เกิดอาการหรือความเจ็บป่วยใดๆ เนื่องจากเนื้อเยื่อของร่างกายยังไม่มีเสียหายมาก

การเจ็บป่วย (illness) เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการติดเชื้อ กล่าวคือ หลังจากที่จุลินทรีย์ก่อโรคสามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ในร่างกายแล้ว ก็จะอาศัยอาหาร ซึ่งก็คือ เนื้อเยื่อของร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในลำไส้เพื่อเพิ่มจำนวนตัวเอง เมื่อร่างกายไม่สามารถรับมือหรือจัดการกับอันตรายที่มีการเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากในร่างกาย กระทั่งก่อให้เกิดความผิดปกติของการทำงานหรือระบบต่างๆ ของร่างกาย ก็จัดว่าเป็นการเจ็บป่วย โดยที่สัดส่วนการเจ็บป่วย (morbidity ratio) เป็นสัดส่วนของผู้ที่เกิดการเจ็บป่วยจากการติดเชื้อ

การฟื้นตัว หรือ การป่วยเรื้อรังอื่นๆ หรือ การเสียชีวิต (recovery, sequelae, death) บางกรณีเมื่อร่างกายสามารถจำกัดและ/หรือกำจัดเชื้อโมเนลลาได้ในระหว่างขั้นตอนการติดเชื้อโมเนลลา ร่างกายก็ไม่จำเป็นต้องเกิดอาการเจ็บป่วยก็ได้

แต่เมื่อเกิดอาการเจ็บป่วยแล้ว ผลที่ตามมาอาจจะมีความเป็นไปได้หลายอย่าง ทั้งนี้ทั้งนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น เมื่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายปรับตัวได้ทันก็จะสามารถลดหรือกำจัดเชื้อได้และถ้าร่างกายสามารถซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่เสียหายได้ทัน ผลก็คือ ร่างกายสามารถฟื้นตัวได้เป็นปกติ ใน

ขณะเดียวกัน ถ้าร่างกายไม่สามารถปรับตัวทันกับความเสียหายรุนแรงที่เกิดจากเซลล์โมเนลลา ผลก็คือ ร่างกายจะเกิดความเจ็บป่วยเรื้อรังอื่นๆ ตามมาเช่น โรคข้อ(Reactive arthritis และ Reiter's syndrome) และ GuillianBarre syndrome เป็นต้น หรือ ขั้นที่รุนแรงมากขึ้น คือ เสียชีวิตได้

Dose-response model ที่ใช้ในการทำนายจำนวนผู้ป่วยจากปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับ มีอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แบบจำลองการอธิบายอันตรายโดยการตอบสนองต่อจุลินทรีย์ก่อโรค (Dose-response model)

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์*
Log-Logistic	$P = \beta / (1 + [(1-p)/p] \exp^{-\epsilon (\log N - \chi)})$
Simple exponential	$P = 1 - \exp^{-r \log N}$
Flexible exponential	$P = \beta [1 - p \exp^{-\epsilon (\log N - \chi)}]$
Beta-Poisson	$P = 1 - (1 + N / \beta)^{-\alpha}$
Beta-Binomial	$P = 1 - [1 - P(1)]^N$
Weibull-Gamma	$P = 1 - [1 + N^b / \beta]^{-\alpha}$
Gompertz	$P = 1 - \exp [\exp (a + b f(N))]$

* P หรือ P(d) หมายถึง คำนวณจะเป็นในการเจ็บป่วย หรือ สัดส่วนผู้ป่วยเมื่อได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคจำนวน d N หมายถึง ปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับ บางครั้งจะใช้คำว่า dose (d)

จากสมการทั้งหมดในตารางข้างต้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่า P หรือ สัดส่วนผู้ป่วยจะมากขึ้น เมื่อปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรค (N) ที่ได้รับมากขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ จักได้กำหนดให้ N หรือ dose เป็นปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับจากการบริโภคต่อครั้ง (per serving) หรือ ต่อมื้ออาหาร (per meal) เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณคำนวณจะเป็นในการสัมผัส (probability of exposure : P_E) ในขั้นตอนการประเมินการสัมผัส

ดังที่ทราบแล้วว่า การเจ็บป่วยที่ตอบสนองต่อการได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคมีปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ องค์ประกอบทางร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระดับภูมิคุ้มกัน ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นกับประสบการณ์การได้รับจุลินทรีย์ก่อโรค หรือ อายุ ในขณะที่ แบบจำลองการอธิบายอันตรายในวารสารวิทยาศาสตร์เกือบทั้งหมดเป็นข้อมูลจากต่างประเทศ (ตารางที่ 2.3) ดังนั้น ผลการประเมินความเสี่ยงจำเป็นต้องรับทราบข้อจำกัดนี้ด้วย ในขณะเดียวกัน คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการโครงการสร้างแบบจำลองการอธิบายอันตรายของเซลล์โมเนลลา ซึ่งสร้างขึ้นจากข้อมูลการระบาดในประเทศไทย ซึ่งขณะนี้ใกล้ดำเนินการเสร็จสิ้น ดังนั้น ในโครงการนี้ จึงเป็นโครงการแรกที่ได้รับประโยชน์โดยตรงในการประมาณจำนวนผู้ป่วยสำหรับประชากรไทยเอง และนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองการอธิบายอันตรายของต่างประเทศ

ตารางที่ 2.3 Dose-response (DR) model สำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้

จุลินทรีย์ก่อโรค	DR Model	Parameter	อ้างอิง
<i>Salmonella</i> spp.	Beta-Poisson form	$\alpha = 0.3681$ $r = 0.01065$	Nuanualsuwan 2011
<i>Shigella</i> spp.	Beta-Poisson	$\alpha = 0.27$ $\beta = 117$	DuPont 1972
<i>Campylobacter</i> spp.	Beta-Poisson	$\alpha = 0.144$ $\beta = 7.285$	Black 1988
<i>E.coli</i> (EIEC)	Beta-Poisson	$\alpha = 0.16$ $\beta = 24,400$	DuPont 1971
<i>Vibrio cholerae</i>	Beta-Poisson	$\alpha = 0.25$ $\beta = 16.2$	Cash 1974
<i>V.parahaemolyticus</i>	Beta-Poisson form	$\alpha = 0.00836$ $r = 321.1195$	Nuanualsuwan 2011
<i>Entamoeba histolytica</i> *	Beta-Poisson	$\alpha = 0.101$ $\beta = 0.357$	Rendtorff 1954
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Exponential	$r = 0.0572$	Messner 2001
<i>Giardia lamblia</i> **	Exponential	$r = 0.0199$	Rendtorff 1954

* *Entamoeba coli* as surrogate for *Entamoeba histolytica* <http://wiki.camra.msu.edu>

** *Giardia duodenalis* as surrogate for *G.lamblia* <http://wiki.camra.msu.edu>

3. การประเมินการสัมผัส

(Exposure assessment)

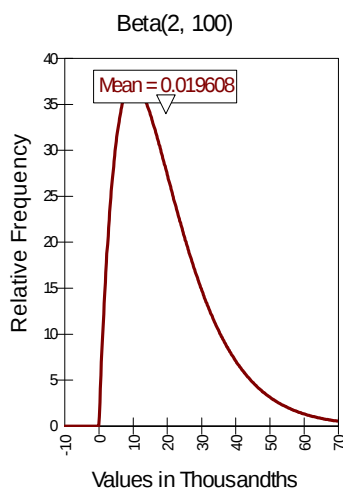
การประเมินการสัมผัสเป็นการประเมินโอกาสในการรับสัมผัส (exposure) กับอันตราย ซึ่งในที่นี้ ก็คือ การได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคที่อาจจะปนเปื้อนมากับน้ำที่บริโภคเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้น ข้อมูลสำคัญในการประเมินการสัมผัส ก็คือ

1. ข้อมูลการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำ (Prevalence & Concentration)

- ความชุก (Prevalence) การแจกแจงความน่าจะเป็นของความชุกจะใช้ Beta distribution เป็นการอาศัยหลักการกระบวนการทวินาม (Binomial process) กล่าวคือ ความชุกหรือการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่สนใจนั้นมีความเป็นไปได้เพียง 2 กรณีเท่านั้น คือ มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อน ดังนั้น จึงได้นำเอาหลักการนี้มาวิเคราะห์หาระดับความชุกหรือการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ

ความชุกของ *Salmonella* spp. ในตัวอย่างน้ำ เป็นการคำนวณความชุกของ *Salmonella* spp. ภายในตัวอย่างน้ำ โดยข้อมูลที่ต้องการทราบก่อน คือ จำนวนตัวอย่างน้ำที่ทดสอบแล้วให้ผลบวกต่อ *Salmonella* spp. (contaminated) แต่เนื่องจาก ไม่ทราบความชุกของ *Salmonella* spp. ในน้ำมาก่อนล่วงหน้า ดังนั้น ความชุกก่อนการทดสอบจึงเป็นการแจกแจงแบบสมมติมีความชุกในช่วงระหว่างร้อยละ 0 และ 100 หรือเขียนเป็นแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นว่า Uniform (0,1) หลังจากทำการทดสอบแล้วจะได้การแจกแจงความน่าจะเป็นความชุกเป็น Beta (α_1, α_2)

โดยที่ α_1 คือ $s + 1$
 α_2 คือ $n - s + 1$
 n คือ จำนวนตัวอย่างน้ำที่ทดสอบ (trial)
 s คือ จำนวนตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วย *Salmonella* spp. (success)



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างน้ำปนเปื้อน 1 ตัวอย่างจาก 100 ตัวอย่างน้ำ จะมีค่าเฉลี่ยความชุกร้อยละ 1.96

ตัวอย่างการคำนวณความชุก ถ้าจำนวนตัวอย่างน้ำ 100 ตัวอย่าง พบว่า มีอยู่ 1 ตัวอย่างน้ำที่ให้ผลบวกกับการทดสอบหา *Salmonella* spp. ดังนั้น การแทนค่าในการแจกแจงความน่าจะเป็นจะเป็น Beta(1+ 1, 100-1+1) หรือ Beta(2,100) (ภาพที่ 2.8) ได้ค่าเฉลี่ยของความชุก เป็น ร้อยละ 1.96 และมีค่าความชุกที่มีโอกาสเป็นไปได้สูงสุด ร้อยละ 1 แต่มีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าความชุกเป็นค่าอื่นๆ ได้ด้วย เช่น ร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 100 แต่โอกาสการเกิดความชุกในค่าอื่นๆ นั้น มีระดับความเป็นไปได้ที่น้อยกว่าความชุกร้อยละ 1 ดังภาพที่ 4 จะสังเกตได้ว่า ความชุกที่เป็นค่าเฉลี่ยจากการแจกแจงความน่าจะเป็น Beta มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณตามปกติ คือ 1/100 หรือ ร้อยละ 1

2. ปริมาณการบริโภคน้ำ (Water consumption)

ข้อมูลปริมาณการบริโภคน้ำ ได้มาจากหลายแหล่ง เช่น

1. Domestic water quantity, service level and health โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) พ.ศ. 2546 อ้างอิงถึงรายงานของ IPCS พ.ศ. 2537 มีความผันแปรขึ้นอยู่กัยอายุ เพศ กิจกรรมและภูมิอากาศ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าอ้างอิงปริมาณการรับน้ำ (หน่วย : ลิตร/คน/วัน)

กลุ่มประชากร	สภาวะปกติ	อุณหภูมิเฉลี่ย 32 ^o ซ	ประกอบกิจกรรมปานกลาง
ผู้ใหญ่	1.0-2.4 (เฉลี่ย 1.4)	2.8 – 3.4	3.7
ผู้ใหญ่เพศชาย	2.0	-	-
ผู้ใหญ่เพศหญิง	1.4	-	-
เด็กอายุ 10 ปี	1.0	-	-

2. Technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencies ของ Water, engineering and development center (WEDC) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) พ.ศ. 2556 ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความต้องการน้ำเพื่อการดำรงชีพ (หน่วย : ลิตร/คน/วัน)

ความต้องการ	ปริมาณ
น้ำและน้ำจากอาหาร	2.5 - 3.0
สุขอนามัย	2.0 - 6.0
การปรุงอาหาร	3.0 - 6.0
รวม	7.5 - 15.5

ข้อมูลปริมาณการบริโภคน้ำใช้รายงานโดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติในรูปแบบของเอกสาร และแบบ search online (<http://consumption.acfs.go.th/index.php>) พบว่า น้ำดื่มสำหรับประชาชนไทยมีค่าเฉลี่ยสำหรับ eater only อายุมากกว่า 3 ปี 751.79 มล./วัน ซึ่งใช้เป็นข้อมูลกรณีการคำนวณค่าประมาณแบบจุด (point estimate) ในขณะที่ ค่า percentile ที่ 97.5 สำหรับ eater only อายุมากกว่า 3 ปี 2,000 มล/คน/วัน (ภาพที่ 2.9)

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ ประชาชนในเขตกรุงเทพบางส่วนดื่มน้ำประปาโดยตรง และ ประชาชนในเขตกรุงเทพบางส่วนดื่มน้ำประปาที่ผ่านกระบวนการเพิ่มเติม เช่น การกรอง การต้ม หรือ การใช้รังสี Ultra Violet เป็นต้น ประชาชนในเขตกรุงเทพบางส่วนเลือกดื่มน้ำชนิดบรรจุขวด ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยสำหรับ eater only อายุมากกว่า 3 ปี 751.79 มล/คน/วัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เท่ากับ 1 และกำหนดให้ปริมาณน้ำประปาสูงสุดที่ดื่ม คือ 1,000 มล. นำไปใช้สร้างการแจกแจงความน่าจะเป็นชนิด Normal ตามลำดับ

เว็บไซต์ข้อมูลการบริโภคอาหารไทย - Windows Internet Explorer

http://consumption.acfs.go.th/index.php?content=consumption&topic=13&subtopic=editonly&search=138

หน้าแรก > Consumption > ≥ 3 yrs

ปริมาณอาหารที่บริโภคเฉลี่ย 3 ปีขึ้นไป

ประเภทข้อมูล: Eater Only 1801 Search Show All

Total 1 consumption, Pages : 1 / 1

Food Code	รายการอาหาร	Eater Only (กรัม/คน/วัน)															
		Mean								Percentile 97.5							
		3-6	6-9	9-16	16-19	19-35	35-65	>65	avg>3	3-6	6-9	9-16	16-19	19-35	35-65	>65	avg>3
1801	น้ำปลา	482.33	377.96	713.94	791.72	904.65	945.97	832.09	751.79	1100.00	1200.00	1600.00	1800.00	2053.00	2100.00	1900.00	2000.00

Food Consumption (ฐานข้อมูลการบริโภคอาหาร) <Version 1.0.6>
of Agricultural Commodity and Food Standards, Ministry of Agriculture and Cooperative,
Road, Ladysao Chatchak Bangkok 10900, Thailand. Tel. (662) 561 - 2277

ภาพที่ 2.9 ผลการสืบค้นข้อมูลการบริโภคน้ำดื่ม (consumption data) แบบ online โดย สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช)

แบบจำลองที่ใช้ในการประเมินการสัมผัส

1. ความน่าจะเป็นในการสัมผัส (Probability of exposure)

ความน่าจะเป็นในการสัมผัส (P_E) เป็นการอธิบายโอกาสหรือความเป็นไปได้ที่ร่างกายจะได้รับสัมผัสจุลินทรีย์ก่อโรคน้อยกว่า 1 หน่วยก่อโรค (เซลล์แบคทีเรีย หรือ อนุภาคไวรัส) ซึ่ง P_E เป็นค่าที่เป็นตัวแทนอธิบายโอกาสการเกิดเหตุการณ์การรับสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคเข้าสู่ร่างกายจากการบริโภคอาหารและน้ำ โดยใช้แบบจำลอง

$$P_E = P(1 - e^{-N}) \quad (4)$$

โดยที่

P คือ ความชุกของจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารหรือน้ำ

N คือ จำนวนจุลินทรีย์ที่ร่างกายได้รับเข้าไปในร่างกาย

โดยที่

$$N = Concentration \times Consumption \quad (5)$$

โดยที่

Concentration คือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรคปนเปื้อนในน้ำ

Consumption คือ ปริมาณการบริโภคอาหารน้ำ/คน/วัน

4. การอธิบายความเสี่ยง

(Risk characterization)

การอธิบายความเสี่ยงเป็นการประเมินโอกาสในการเจ็บป่วยจากการบริโภคอาหารหรือน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์ก่อโรค ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงเป็นการบูรณาการเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ตามด้วย ขั้นตอนที่ 2 กล่าวคือ เป็นการพิจารณาความน่าจะเป็นต่อเนื่องของ 2 เหตุการณ์หลัก คือ ¹เหตุการณ์ในการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคปริมาณหนึ่ง (dose) ตามมาด้วย ²เหตุการณ์การเกิดโรค (response) อันเกิด

จากปริมาณจุลินทรีย์ที่ได้รับ ดังนั้น แบบจำลองที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง รวมทั้ง 2 เหตุการณ์
ต่อเนื่องกัน คือ

$$P_S = P_E \times P_I(d) \quad (2.5)$$

โดยที่

- P_S คือ ค่าประมาณความเสี่ยงจากการสัมผัสกับอาหารหรือน้ำเพียง 1 ครั้ง
 P_E คือ ความน่าจะเป็นในการสัมผัสกับจุลินทรีย์อย่างน้อย 1 หน่วยก่อโรค
 $P_I(d)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วย หรือ สัตว์ส่วนผู้ป่วยเมื่อได้รับจุลินทรีย์ก่อโรคจำนวน d

ในสมการ (2.5) เป็นค่าประมาณความเสี่ยงจากการสัมผัสกับน้ำเพียง 1 ครั้ง (single exposure) อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้สูงที่อาจจะมีการสัมผัสกับน้ำที่มีการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคมามากกว่า 1 ครั้ง (multiple exposure)

$$P_M = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_S) \quad (2.6)$$

โดยที่

- P_M คือ ค่าประมาณความเสี่ยงจากการสัมผัสกับน้ำ 365 วัน (Risk/year)
 P_S คือ ค่าประมาณความเสี่ยงจากการสัมผัสกับน้ำเพียง 1 วัน
 n คือ จำนวนวันที่สัมผัสกับน้ำ ในระยะเวลาที่สนใจ เช่น 1 ปี

จากนั้น จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo Simulation) ซ้ำๆ จำนวน 10,000 รอบ (iteration) โดยอาศัยโปรแกรม @Risk 4.5.3 Professional edition (Risk analysis Add-in for Microsoft Excel : Palisade Corporation) ก็จะได้การแจกแจงค่าที่น่าจะเป็นของความเสี่ยงของประชากรไทย

การรายงานผลการประเมินความเสี่ยง

(Reporting risk assessment)

เนื่องจากการนำผลการประเมินความเสี่ยงไปใช้ อาจจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้ผลการประเมินความเสี่ยงสามารถนำไปได้ในหลากหลายหรือเปรียบเทียบกันระดับความเสี่ยงจากรายงานอื่นๆ จึงจะรายงานผลการประเมินความเสี่ยงเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี (rate of illness)

การรายงานความเสี่ยงในรูปของ “อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี” เป็นรูปแบบการรายงานที่สอดคล้องกับสรุปรายงานการเฝ้าระวังโรค ของสำนักกระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข

$$\text{อัตราป่วย/ประชากรแสนคน/ปี} = P_M \times 100,000 \quad (2.7)$$

2. Disability-adjusted life year/year (DALY/year)

ตาม Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย WHO ในบทที่ 3 ได้กำหนดเป้าหมายสุขภาพ (Health-based target) ในรูปของ disability-adjusted life year (DALY) โดยที่

$$\text{DALY} = \text{YLL (years of life lost)} + \text{YLD (years lived with a disability or illness)} \quad (2.8)$$

โดยมีตัวอย่างการคำนวณ DALY per case ของการติดเชื้อไวรัส rotavirus ในประเทศที่พัฒนาแล้ว มีข้อมูลดังนี้ คือ

- | | | | |
|----------------------------|----------------------|--------------|------------|
| 1. การถ่ายเหลวแบบไม่รุนแรง | ระดับ 0.10 นาน 7 วัน | ร้อยละ 97.5 | ของผู้ป่วย |
| 2. การถ่ายเหลวแบบรุนแรง | ระดับ 0.23 นาน 7 วัน | ร้อยละ 2.5 | ของผู้ป่วย |
| 3. การตาย | พบในเด็กก่อน | ร้อยละ 0.015 | ของผู้ป่วย |

$$\begin{aligned}
 \text{DALY} &= (0.1 \times [7/365] \times 0.975) + (0.23 \times [7/365] \times 0.025) + (1 \times 70 \times 0.00015) \\
 &= 0.0019 + 0.0001 + 0.0105 \\
 &= 0.0125 / \text{case}
 \end{aligned}$$

จากค่า DALY/case สามารถนำมาใช้ในการคำนวณ DALY/year ได้ ตาม Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย WHO ในบทที่ 7 ดังสมการ

$$\text{DALY} / \text{year} = \frac{P_M \times db \times f_s}{100} \quad (2.9)$$

P_M คือ ค่าประมาณความเสี่ยงจากการสัมผัสกับน้ำใน 1 ปี (Risk/year)

db คือ disease burden หรือ DALY/case

f_s คือ สัดส่วนของประชากรที่ไว (susceptible) ต่อการเจ็บป่วย

ข้อมูลของ Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย WHO ในบทที่ 7 กล่าวเฉพาะ DALY/case ของ *Campylobacter* และ *Cryptosporidium* เท่ากับ 0.0046 และ 0.014 ตามลำดับ สำหรับข้อมูล DALY/case ของแบคทีเรียและโปรโตซัวอื่นจะใช้รายงานของ Havelaar et al., 2012 อย่างไรก็ดีตาม เนื่องจาก แนวคิดเรื่องระดับขั้นต่ำในการเจ็บป่วย (threshold) ของประชากรไทย ที่อาจจะเคยได้รับสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคมามาก่อน เชื่อว่าประชากรไทยน่าจะมี DALY/case ที่ต่ำกว่า DALY/case ที่รายงานในประชากรชาวตะวันตก ดังนั้นจึงได้มีการปรับ DALY/case ของประชากรไทยให้มีค่าประมาณร้อยละ 10 ของ DALY/case ที่เป็นรายงานของประชากรชาวตะวันตก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่า DALY/case ที่เกิดจากจุลินทรีย์ก่อโรคสำหรับประชากรไทย

จุลินทรีย์ก่อโรค	DALY/case	อ้างอิง
<i>Salmonella</i> spp.	0.0036	Havelaar et al., 2012
<i>Shigella</i> spp.	0.0036	Havelaar et al., 2012
<i>Campylobacter</i> spp.	0.0041	WHO, 2011 ^a
<i>E.coli</i> (EIEC)	0.0036	Havelaar et al., 2012
<i>Vibrio cholerae</i>	0.0036	Havelaar et al., 2012
<i>V.parahaemolyticus</i>	0.0036	Havelaar et al., 2012
<i>Entamoeba histolytica</i>	0.0028	Havelaar et al., 2012
<i>Cryptosporidium parvum</i>	0.0021	WHO, 2011
<i>Giardia lamblia</i>	0.0028	Havelaar et al., 2012

^aWHO 2011. Guidelines for Drinking Water Quality. ISBN 978 92 4 154815 1 WHO Library Cataloguing-in-Publication Data pp.541.

การกำหนดเป้าหมายสุขภาพ

(Setting health-based target)

แนวคิดของ “เป้าหมายสุขภาพ” สามารถนำไปใช้ได้กับทุกประเทศและทุกระดับของการพัฒนาคุณภาพน้ำ การกำหนดเป้าหมายสุขภาพควรจะต้องเป็นจริงได้ (realistic) วัดได้ (measurable) โดยพิจารณาปัจจัยพื้นฐานต่างๆ เช่น

- ปัจจัยด้านข้อมูลทางวิทยาศาสตร์
- ปัจจัยด้านท้องถิ่นอื่นๆ เช่น สภาวะเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และวัฒนธรรม
- ปัจจัยด้านการเงิน
- ปัจจัยด้านวิชาการ
- ปัจจัยด้านสถาบันสนับสนุน

เป้าหมายสุขภาพควรจะผนวกไปเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายด้านสาธารณสุขในระดับประเทศ ซึ่งมีการพิจารณาร่วมกับภาวะสาธารณสุข (public health status) แนวโน้ม ความเจ็บป่วยที่มีสาเหตุมาจากการใช้น้ำประปา ทั้งนี้ทั้งนั้นแหล่งที่มาของจุลินทรีย์ก่อโรคมักได้มาจากน้ำเพียงแหล่งเดียวเท่านั้น ดังนั้นในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพของน้ำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้บริหารหรือผู้มีอำนาจตัดสินใจ พึงจะพิจารณาถึงแหล่งหรือต้นตอของจุลินทรีย์ก่อโรคอื่นๆ ที่อาจจะเป็นไปได้หรือเคยมีการรายงานมาแล้วด้วย เช่น อาหาร อากาศ สุขอนามัยส่วนบุคคล เป็นต้น ในกรณีที่แหล่งที่มาของจุลินทรีย์ก่อโรคมีความหลากหลายมาก ทำให้คุณค่าหรือความจำเป็นในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพมีความด้อยลงไปได้ ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดเป้าหมายสุขภาพของการปนเปื้อนสารเคมีในน้ำดื่มอาจจะมีคุณค่าไม่มากนัก หากว่าการเจ็บป่วยจากการได้รับสารเคมีผ่านทางน้ำนั้นมีสัดส่วนผู้ป่วยที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผู้ป่วยจากสารเคมีที่ปนเปื้อนผ่านทางแหล่งอื่นๆ และเมื่อพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ค่าใช้จ่าย ต้นทุน ทรัพยากร งบประมาณรวมแล้ว เหตุผลในการที่จะปรับปรุงให้น้ำมีระดับการปนเปื้อนสารเคมีชนิดนั้นในระดับที่ปลอดภัยก็อาจจะไม่หนักแน่นเพียงพอ

การกำหนดเป้าหมายสุขภาพยังควรจะต้องตระหนักถึงผลที่ได้ (impact) เช่น จำนวนผู้ป่วยที่ลดลงไปจากวิธีการควบคุม (intervention) จุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลดจำนวนผู้ป่วยด้วยวิธีอื่นๆ ในกรณีที่วิธีการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำอาจจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการปรับปรุงให้น้ำมีคุณภาพที่ปลอดภัยตามเป้าหมายสุขภาพ เป็นเหตุให้ขาดเหตุผลที่มีน้ำหนักเพียงพอในการได้รับงบประมาณจากผู้มีอำนาจในหน่วยงานหรือรัฐบาล เนื่องจาก จำนวนผู้ป่วยส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากแหล่งอื่นนั่นเอง ดังนั้น ในทางตรงกันข้าม วิธีการควบคุมโรคไทฟอยด์ (typhoid) หรือ โรคบิด (dysentery) ที่มีสาเหตุจากน้ำกลับจะมีแนวโน้มได้รับการสนับสนุนงบประมาณมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคไทฟอยด์ (typhoid) หรือ โรคบิด (dysentery) สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการควบคุมระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคเหล่านี้ในน้ำ

การกำหนดเป้าหมายสุขภาพยังควรจะต้องพิจารณาในบริบทของนโยบายสาธารณสุขที่กว้างออกไป กล่าวคือ การกำหนดเป้าหมายสุขภาพมีส่วนช่วยในการปรับปรุง สุขอนามัย การกำจัดสิ่งปฏิกูล สุขอนามัยส่วนบุคคล การสาธารณสุข (public education) เท่ากับเป็นการช่วยลดการสัมผัสสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรคโดยตรงหรือสัมผัสสัมผัสจุลินทรีย์ผ่านกิจกรรมทางน้ำ การส่งเสริมสาธารณสุข การลดจำนวนผู้ที่เป็นพาหะโรค การลดจำนวนผู้ป่วยจากการใช้น้ำ แม้ว่าการลำดับความสำคัญของนโยบายสาธารณสุขจะมุ่งเน้นไปที่สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดจำนวนผู้ป่วยจำนวนมากมาก่อนสาเหตุรองที่ก่อให้เกิดจำนวนผู้ป่วยจำนวนน้อยกว่า ผู้มี

อำนาจอาจจะพิจารณาสาเหตุรองในลำดับต้นๆ ก็ได้ หากว่าสาเหตุรองเหล่านี้สามารถกำจัดหรือควบคุมได้โดยใช้ทรัพยากรต่างๆ ที่น้อยกว่าหรือใช้เวลาน้อยกว่า และวิธีการควบคุมก็ไม่เบี่ยงเบนไปจากวิธีการควบคุมสาเหตุหลักที่ดำเนินการอยู่แล้วก็ได้

แนวคิดสำคัญในการจัดสรรทรัพยากรในการปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ คือ แนวทางการเรียงลำดับจากเป้าหมายที่ง่ายกว่าไปสู่เป้าหมายที่ยากกว่า (stringent transitional target) แนวคิดนี้มีความสอดคล้องกับแนวทางการควบคุมเน้นให้มีการพัฒนาเป็นลำดับหรือเป็นขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (incremental improvement) กระบวนการของแนวคิดนี้ได้แบ่งเป้าหมายสุขภาพเป็นระยะต่างๆ (stage) และประโยชน์ที่หน่วยงานจะได้รับจากการพัฒนาตามระยะต่างๆ ของการกำหนดเป้าหมายสุขภาพ (ตารางที่ 2.7)

ตารางที่ 2.7 ระยะและประโยชน์ที่ได้รับในการพัฒนาเป้าหมายสุขภาพ

ระยะในการพัฒนาเป้าหมายสุขภาพ (Target development stage)	ประโยชน์ (benefit)
ระยะก่อร่าง (Formulation)	ข้อมูลสาธารณสุขเชิงลึก ทราบช่องว่างของความรู้ การลำดับความสำคัญ ความโปร่งใสของนโยบายสุขภาพ ความสม่ำเสมอของโครงการด้านสุขภาพระดับชาติ ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น
ระยะดำเนินการ (Implementation)	แรงขับเคลื่อนในการลงมือปฏิบัติ ยกระดับการคำนึงสัญญา ส่งเสริมความรับผิดชอบ แนวทางในการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ
ระยะประเมินผล (Evaluation)	วางฐานรากการกำหนดระดับหรือลำดับการพัฒนา แก้ไขจุดด้อยหรือจุดหักเห ระบุทราบข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้

แหล่งข้อมูลสำคัญในด้านความเสี่ยงสุขภาพอาจจะได้มาจากข้อมูลการระบาด (epidemiology) และการประเมินความเสี่ยง ซึ่งข้อมูลทั้ง 2 ส่วนนี้จะมีลักษณะเสริมกัน (complementary) ซึ่งความจำกัดของข้อมูลทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาหรือข้อขัดขัดในการพัฒนาเป้าหมายสุขภาพ อย่างไรก็ตามข้อมูลทั้ง 2 ส่วนนี้มีแนวโน้มจะเข้าถึงข้อมูลได้ดีขึ้นตามลำดับ ข้อมูลเฉพาะในท้องถิ่นก็มีส่วนสำคัญในการใช้เพื่อช่วยกำหนดเป้าหมายสุขภาพแห่งชาติได้ด้วย

เป้าหมายสุขภาพสามารถใช้เป็นแนวทางในการวัดผลลัพธ์ทางสุขภาพได้โดยตรง กล่าวคือ ในกรณีที่โรคทางเดินอาหารที่เกิดจากน้ำเป็นสาเหตุหลักของโรคทางเดินอาหารส่วนใหญ่ของประเทศ ดังนั้น ข้อมูลด้านระบาดวิทยาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การลดจำนวนผู้ป่วยโรคทางเดินอาหารลง (รูปแบบหนึ่งของผลลัพธ์สุขภาพ)

สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัด (index) ถึงประสิทธิภาพของปรับปรุงหรือการพัฒนาวิธีควบคุม (intervention) จุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในระบบการผลิตน้ำได้

การนำข้อมูลด้านระบาดวิทยาเพื่อใช้ในการคำนวณเป้าหมายสุขภาพ ต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น

- ความจำเพาะของผลของการลดจำนวนผู้ป่วยกับวิธีการควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรค
- การใช้ข้อมูลระบาดวิทยาจากตัวอย่าง (sample) เป็นตัวแทนที่ดี (representative) ของข้อมูลประชากร (population)
- ความแตกต่างของประชากร (demographic) และ สภาวะเศรษฐกิจสังคม (socioeconomic)

นอกจากข้อมูลด้านระบาดวิทยาแล้ว การประเมินความเสี่ยง (risk assessment) ยังสามารถนำมาใช้ในการช่วยกำหนดเป้าหมายสุขภาพได้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีจำนวนผู้ป่วยที่เกิดจากสาเหตุของน้ำมีจำนวนน้อย ทำให้ข้อมูลด้านระบาดวิทยาจากการเฝ้าระวังโรคมียังไม่เพียงพอ

เป้าหมายสุขภาพ

(Health-based targets)

การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยน้ำดื่มหรือน้ำประปาที่สอดคล้องกับคำแนะนำล่าสุดขององค์การอนามัยโลก คือ การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในรูปของ “เป้าหมายสุขภาพ” หรือ Health-based target สอดคล้องกับ “แนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) (WHO, 2011) ที่มุ่งเน้นไปที่ความเสี่ยง (risk) หรือ โอกาสในการเกิดความเจ็บป่วยจากอันตราย (hazard) ทั้งทางเคมีและทางจุลินทรีย์ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (reference) ของหน่วยงานในการพัฒนาสู่เป้าหมายในการลดจำนวนผู้ป่วยที่มีสาเหตุจากอันตรายทางเคมีหรือจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ ซึ่งเท่ากับเป็นการยกระดับความปลอดภัยของประชาชนในการอุปโภคหรือบริโภคน้ำ

เป้าหมายสุขภาพ หรือ Health-based targets มีได้หลายลักษณะ กล่าวคือ ¹เป้าหมายส่งเสริมสุขภาพ (health objective) ²เป้าหมายส่งเสริมคุณภาพน้ำ (water quality objective) หรือ ³เป้าหมายส่งเสริมประสิทธิภาพ (performance objective) ที่กำหนดขึ้นโดยพื้นฐานการตัดสินใจความปลอดภัยและพื้นฐานการประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์ก่อโรค ตาม “แนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ได้กำหนดชนิดของเป้าหมายสุขภาพ ดังนี้ (ตารางที่ 2.8)

1. เป้าผลลัพธ์สุขภาพ หรือ Health outcome target เป็นเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดในรูปของจำนวนผู้ป่วยสูงสุดจากจุลินทรีย์ก่อโรค หรือ ในรูปของภาระโรคที่ยอมรับได้ (tolerable burden of disease) ซึ่งระดับที่แนะนำ คือ 10^{-6} DALY ต่อคนต่อปี (ศึกษาเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ Disability-adjusted life years หรือ DALY)
2. เป้าคุณภาพน้ำ หรือ Water quality target นิยมใช้กับอันตรายเคมี (chemical hazard) มากกว่าอันตรายชีวภาพ
3. เป้าประสิทธิภาพ หรือ Performance target เป็นเป้าหมายสุขภาพที่เชื่อมโยง “เป้าหมายสุขภาพ” (ซึ่งเป็นเป้าหมายสุขภาพชนิดที่ 1) ในฐานะผู้รับความเสี่ยง และ “ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำประปา” ในฐานะผู้จัดการความเสี่ยงเข้าไว้ด้วยกัน เช่น เป้าประสิทธิภาพของขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในการลดความเข้มข้นหรือจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำได้ร้อยละ 99.0 (หรือ $2 \log_{10}$ reduction) ซึ่งเทียบเท่ากับการลดจำนวนผู้ป่วยในกลุ่มเสี่ยงลงไปได้ 10^2 DALY ต่อคนต่อปี

4. เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ (specific technology target) เช่น การกำหนดเป้าประสงค์ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างรูปแบบของเป้าหมายสุขภาพ (health-based target)

เป้าหมายสุขภาพ	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus
จำนวนเชื้อ / ลิตรน้ำดิบ	10	100	10
Health outcome target	10^{-6} DALY / คน / ปี	10^{-6} DALY / คน / ปี	10^{-6} DALY / คน / ปี
Risk of diarrheal illness	1 per 1,500 / ปี	1 per 4,600 / ปี	1 per 14,000 / ปี
Drinking-water quality	1 per 79,000 ลิตร	1 per 9,500 ลิตร	1 per 90,000 ลิตร
Performance target	$5.89 \log_{10}$	$5.98 \log_{10}$	$5.96 \log_{10}$

เป้าหมายนี้เป็นองค์ประกอบของแนวทางในการผลิตน้ำประปาหรือมาตรฐานการผลิตน้ำประปา มีประโยชน์ในหลายๆ ประเด็น เช่น

1. การรักษาระดับและการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่เหมาะสมและจะมีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำ (protect and improvement)
2. การกำหนดเป้าหมายในการทำงานของหน่วยงานในการผลิตน้ำและการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของการผลิตน้ำ (benchmark)
3. การเป็นส่วนหนึ่งหรือพื้นฐานของการพัฒนา water safety plan (development)
4. การทวนสอบการนำ water safety plan ไปปฏิบัติจริง (verification)
5. ดัชนีชี้วัดระดับการพัฒนาของ water safety plan (milestone)
6. เครื่องมือช่วยในการตัดสินใจเลือกการจัดการเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ (intervention)

ชนิดของเป้าหมายสุขภาพ

(Types of health-based targets)

ชนิดของเป้าหมายสุขภาพมีความแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.9) ขึ้นอยู่กับทรัพยากรที่ต้องใช้ในการพัฒนาและการนำไปปฏิบัติใช้ และระดับความแม่นยำ (precision) โดยที่ระดับความแม่นยำของเป้าหมายสุขภาพหมายถึง ประโยชน์เชิงสาธารณสุขอันเกิดมาจากการจัดการความเสี่ยง เป้าหมายสุขภาพที่ความแม่นยำสูงสุด (most precise) คือ เป้าผลลัพธ์สุขภาพ (health outcome target) ซึ่งเป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพนี้จะทำหน้าที่เป็นเป้าหมายสุขภาพต้นทางหรือค่าอ้างอิงเริ่มต้นในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพอื่นๆ เป็นทอดๆ ตามลำดับ (ตารางที่ 2.10)

ตารางที่ 2.9 ชนิดและธรรมชาติของเป้าหมายสุขภาพ

ชนิดของเป้าหมายสุขภาพ	ธรรมชาติของเป้า	การนำไปใช้	หมายเหตุ
เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ	กำหนดการะโรคที่ยอมรับได้	- เป็นเป้าหมายนโยบาย - กำหนดเป้าหมายสุขภาพอื่นๆ	10^{-6} DALY/คน/ปี
เป้าหมายคุณภาพน้ำ	กำหนดค่าในทางปฏิบัติ	ไม่มีการกำหนดค่าทางจุลชีววิทยา	<i>E.coli</i> เป็นดัชนีคุณภาพน้ำ
เป้าหมายประสิทธิภาพ	การลดระดับจุลินทรีย์ก่อโรค	ลดระดับจุลินทรีย์ในหน่วย log	คำนวณจากการประเมินความเสี่ยง
เป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะ	การกำหนดเทคโนโลยีน้ำ	ควบคุมอันตรายเคมี/จุลชีววิทยา	ขึ้นกับ - คุณภาพน้ำดิบ - ประสิทธิภาพการทำงานของขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำ

เป้าหมายสุขภาพชนิดต่างๆ ตามตารางที่ 17-18 มีการกำหนดในลำดับแรกทางด้านบนสุดของตาราง คือ เป้าผลลัพธ์สุขภาพ จากนั้นจึงมีการกำหนดเป้าหมายสุขภาพในลำดับเรียงลงมาด้านล่างสุดของตารางที่ 2.9-2.10 คือ เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ โดยเป้าหมายสุขภาพที่อยู่ด้านล่างสุดของตารางที่ 2.9-2.10 คือ เป้าเทคโนโลยีเฉพาะจะมีการแปลผล ทำความเข้าใจ และนำไปปฏิบัติได้ง่ายที่สุด

ตารางที่ 2.10 ลำดับและความสัมพันธ์ของเป้าหมายสุขภาพชนิดต่างๆ

ชนิดของเป้าหมายสุขภาพ (Types of Health-based target)	ตัวอย่างของจุลินทรีย์ก่อโรค (Examples of pathogen)	
	<i>Campylobacter</i>	<i>Cryptosporidium</i>
1. เป้าผลลัพธ์สุขภาพ (Health outcome target)	10^{-6} DALY/คน/ปี	10^{-6} DALY/คน/ปี
↓	↓	↓
2. เป้าคุณภาพน้ำ (Water quality target)	100 cfu/L	ข้อมูลไม่เพียงพอในการกำหนดเป้า
↓	↓	↓
3. เป้าประสิทธิภาพ (Performance target)	ลดลง 6 log	ข้อมูลไม่เพียงพอในการกำหนดเป้า
↓		↓
4. เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ (Specific technology target)	N/A	การสร้าง/การรวมตะกอน

ในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพควรพิจารณาถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบชั่วคราว (short-term event) และความผันผวนหรือความไม่แน่นอน (fluctuation) ของคุณภาพน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงที่ของคุณภาพน้ำ (steady state) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเป้าหมายเฉพาะ คุณภาพน้ำชั่วคราวอาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีของการเกิดฝกหนักหรือระหว่างการบำรุงรักษา (maintenance) เหตุการณ์ภัยพิบัติ (disasters) สามารถทำให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำส่งผลกระทบอย่างต่อเนื่อง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานด้อย

ลงไปได้และก่อให้เกิดการแพร่ระบาดของจุลินทรีย์ก่อโรคได้มากที่สุด การจัดการกับคุณภาพน้ำชั่วคราว เช่น เหตุการณ์ภัยพิบัติ เป็นตัวอย่างที่ดีของการปรับใช้แนวคิด multiple barrier มาใช้ในการควบคุมความปลอดภัยน้ำ กล่าวคือ การกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคในการผลิตน้ำจะอาศัยความสามารถหรือประสิทธิภาพการกำจัดหรือลดจุลินทรีย์ก่อโรคของแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำ ในการร่วมกันกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคเพื่อให้ น้ำปลอดภัยเช่นเดิม ดังนั้น เมื่อเกิดความบกพร่องของขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง ความปลอดภัยของน้ำก็ยังคงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายมากนัก เนื่องจากขั้นตอนอื่นๆ ในการผลิตน้ำยังมีประสิทธิภาพหรืออาจจะช่วยชดเชยให้การควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคอยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้

สำหรับอันตรายทางจุลินทรีย์แล้ว เป้าฐานสุขภาพมักจะอยู่ในรูปของเป้าประสิทธิภาพหรือเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะ ทางเลือกในการกำหนดเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะ (specific technology target) จะขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลของแหล่งน้ำ ในขณะที่เป้าประสิทธิภาพ (performance target) อาจจะต้องการข้อมูลมากกว่าคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำ เป้าคุณภาพน้ำ (water quality target) โดยทั่วไปแล้วจะมีความจำเพาะกับชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรค เนื่องจาก การเฝ้าระวังการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำอาจจะทำได้จริงในทางปฏิบัติและยังมีต้นทุนที่สูงเกินไปด้วย ดังนั้นจึงเสี่ยงการกำหนดเป้าหมายน้ำโดยตรง แต่จะอาศัยข้อเทียบเคียงทั่วไปของเป้าหมายน้ำกับเป้าหมายสุขภาพแทน กล่าวคือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรค 1 เซลล์/น้ำ 10^4 - 10^5 ลิตร เทียบเท่ากับ (หรือ ก่อให้เกิด) เป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ทั้งนี้เมื่อเป้าหมายน้ำไม่ได้เฝ้าระวังที่จุลินทรีย์ก่อโรคโดยตรง ดังนั้นเป้าหมายน้ำจึงใช้วิธีการเฝ้าระวังการปนเปื้อนจุลินทรีย์บ่งชี้ (indicator organism) เช่น *E.coli* เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของจุลินทรีย์ก่อโรค

จากข้อมูลการระบาดระบุว่า การเกิดปัญหาสาธารณสุขจากน้ำในแต่ละเหตุการณ์นั้น จะเกิดจากจุลินทรีย์ก่อโรคเพียงชนิดเดียว ดังนั้นการกำหนดเป้าหมายสุขภาพจึงคำนวณแยกตามแต่ละชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรค

เป้าหมายสุขภาพ

(Health outcome target)

ดัชนีบ่งชี้ความปลอดภัยของน้ำในเชิงสุขภาพที่ตรงที่สุด คือ เป้าผลลัพธ์สุขภาพ เช่น จำนวนหรืออุบัติการณ์ผู้ป่วยโรคทางเดินอาหาร หรือ ภาระโรคที่ยอมรับได้ (tolerable burden of disease) เป็นต้น โดยเป้าหมายสุขภาพอาจจะกำหนดเป็นเป้าในระดับประเทศก็ได้ เป้าผลลัพธ์สุขภาพถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการกำหนดเป้าหมายสุขภาพอื่นๆ ได้แก่ เป้าคุณภาพน้ำ เป้าประสิทธิภาพและเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะ ตามลำดับ เป้าผลลัพธ์สุขภาพที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป คือ ภาระโรคที่ยอมรับได้ ที่ระดับ 10^{-6} DALY/คน/ปี

เมื่อได้กำหนดเป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี แล้ว ก็จะต้องมีการคำนวณเปลี่ยน (derivation) เป้าผลลัพธ์สุขภาพไปเป็นเป้าหมายน้ำ เป้าประสิทธิภาพและเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะตามลำดับต่อไป ใน water safety plan

Disability-adjusted life years

(DALY)

Disability adjusted life years หรือ DALY เป็นหน่วยในการวัดภาระโรค (burden of disease) และ องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้แนะนำให้ใช้ DALY เป็นเป้าหมายสุขภาพที่สามารถเชื่อมโยงกับเป้าหมายสุขภาพอื่นๆ ได้ กล่าวคือ การตัดสินใจในการกำหนดระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (acceptance risk) หรือ ภาระโรคที่ทนได้ (tolerable burden of disease) ในระดับประเทศนั้น มีความสลับซับซ้อนและจะต้องมีการพิจารณาถึงถึงความเป็นและความรุนแรงของผลกระทบ รวมถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม สังคม

วัฒนธรรมและการเมืองด้วย นอกจากนี้ภาระโรคที่ทนได้และระดับการอ้างอิงความเสี่ยง (reference level of risk) สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาเป้าหมายสุขภาพ

ภาระโรคที่ทนได้ (tolerable burden of disease) ที่มีสาเหตุจากน้ำมักจะอยู่ในรูปของ ผลลัพธ์สุขภาพเฉพาะ (specific health outcome) เช่น ความถี่สูงสุดของโรคอาหารเป็นพิษ หรือ อุบัติการณ์ของโรคมาเร็ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของภาระโรคที่ทนได้ไม่จำเป็นที่จะต้องอยู่ในรูปของตัวเลขอย่างเดียวเท่านั้น ภาระโรคที่ทนได้อาจจะอยู่ในรูปของความรุนแรงของผลลัพธ์ (severity of outcome) ก็ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก จุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำมีความหลากหลาย ทำให้ความรุนแรงของการเกิดโรคมียุทธศาสตร์หลากหลายตามไปด้วย

มาตรา (metric) ที่ใช้ในการวัดความมากมายและใช้ในการเปรียบเทียบภาระโรคที่ทนได้ (tolerable burden of disease) จะมีความสัมพันธ์กับจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำ กล่าวคือ จุลินทรีย์ก่อโรคเหล่านี้มีความน่าจะเป็น ความรุนแรง และระยะเวลาในการก่อโรคที่แตกต่างกัน ดังนั้นมาตราที่ใช้ในการวัดภาระโรคที่ทนได้ควรจะใช้ได้กับ (applicable) อันตรายชนิดต่างๆ เช่น จุลินทรีย์ เคมี หรือ รังสี โดยมาตราที่แนะนำให้ใช้โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) คือ disability-adjusted life year (DALY)

จุดเด่นหรือข้อได้เปรียบของ DALY คือ การรวมผลกระทบต่อนานในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แตกต่างกันเข้าด้วยกัน และเน้นย้ำที่ผลกระทบที่แท้จริง (actual outcome) มากกว่าการวัดศักยภาพในการก่อให้เกิดความเสี่ยง ดังนั้น DALY จึงใช้ในการลำดับความสำคัญทางสาธารณสุขอย่างมีเหตุผลและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อกำหนดภาระโรคที่ทนได้และระดับการอ้างอิงความเสี่ยงได้

ภาระโรคที่ทนได้ คือ ขอบเขตบน (upper limit) ของ DALY ที่ระดับ หนึ่งในล้านคน/ปี (10^{-6} DALY/person/year) ซึ่งเทียบเคียงโดยประมาณได้กับ ความเสี่ยงตลอดชีวิต (อายุขัยประมาณ 70 ปี) ที่ระดับหนึ่งในแสนคนของการเกิดมาเร็ง (10^{-5} excess lifetime risk of cancer) การกำหนดค่า DALY ที่ระดับ 10^{-6} อาจจะทำได้ไม่ในทางปฏิบัติสำหรับบางประเทศหรือบางสถานการณ์ ดังนั้นจึงอาจจะอนุโลมให้กำหนด DALY ที่ระดับ 10^{-5} หรือ 10^{-4} ก็ได้

เป้าหมายน้ำ

(Water quality target)

เป้าหมายน้ำโดยทั่วไปแล้วจะไม่มี ความจำเพาะกับชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรค เนื่องจาก การเฝ้าระวังการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำอาจจะทำได้จริงในทางปฏิบัติและอาจจะมีต้นทุนที่สูงมากเกินไป ดังนั้นจึงเสี่ยงการกำหนดเป้าหมายน้ำโดยตรง แต่จะอาศัยข้อเทียบเคียงทั่วไปของเป้าหมายน้ำกับเป้าหมายสุขภาพแทน กล่าวคือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก่อโรค 1 เซลล์/น้ำ 10^4 - 10^5 ลิตร เทียบเท่ากับ (หรือก่อให้เกิด) เป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ทั้งนี้เมื่อเป้าหมายน้ำมีได้เฝ้าระวังที่จุลินทรีย์ก่อโรคโดยตรง ดังนั้นเป้าหมายน้ำจึงใช้วิธีการเฝ้าระวังการปนเปื้อนจุลินทรีย์บ่งชี้ (indicator organism) เช่น *E.coli* เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของจุลินทรีย์ก่อโรค

เป้าหมายประสิทธิภาพ

(Performance target)

แม้ว่าเป้าหมายประสิทธิภาพจะสามารถใช้ได้กับอันตรายเคมีในน้ำได้ด้วย แต่การใช้งานของเป้าหมายประสิทธิภาพมักจะใช้กับอันตรายจุลินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ เป้าประสิทธิภาพมีประโยชน์ในการเลือกและการใช้

มาตรการควบคุมเพื่อป้องกันจุลินทรีย์ก่อโรคปนเปื้อนเข้ามาในการผลิตน้ำตั้งแต่ แหล่งน้ำดิบ ขั้นตอนการผลิต ไปจนกระทั่งถึงระบบสูบน้ำไปยังผู้ใช้

นิยามของเป้าประสิทธิภาพ คือ ข้อที่ต้องปฏิบัติต่อคุณภาพแหล่งน้ำ ตามทฤษฎีแล้ว เป้าประสิทธิภาพจะมีความจำเพาะและขึ้นอยู่กับข้อมูลของระบบการผลิตน้ำ การคำนวณหรือการกำหนดเป้าประสิทธิภาพต้องอาศัยการบูรณาการของปัจจัยต่างๆ เช่น ภาระโรคที่ยอมรับได้ ความรุนแรงของโรคและการประเมินความเสี่ยง เป็นต้น

ในกรณีที่มีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคทุกชนิดจะทำให้ไม่สามารถคำนวณเป้าประสิทธิภาพได้ครบถ้วนสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคทุกชนิด ดังนั้นทางออกที่สามารถปฏิบัติได้ คือ การกำหนดเป้าประสิทธิภาพเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น ไวรัส แบคทีเรีย โปรโตซัว เป็นต้น การเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง (reference pathogens) ของแต่ละกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรคเพื่อใช้ในการคำนวณเป้าประสิทธิภาพให้พิจารณาจากความไวต่อการทำลาย ความชุกของจุลินทรีย์และลักษณะของน้ำในแหล่งน้ำท้องถิ่นนั้นๆ

การประยุกต์เป้าประสิทธิภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การศึกษาประสิทธิภาพรวมของขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำในการลดจุลินทรีย์ก่อโรคให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพต้นทาง โดยทั่วไปแล้วเป้าประสิทธิภาพจะกำหนดในรูปของการลดจุลินทรีย์ก่อโรคลงในหน่วยฐาน log (log reduction) การเลือกวิธีการผลิตน้ำในขั้นตอนต่างๆ จึงควรมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ระบุประสิทธิภาพในการลดจุลินทรีย์ให้ได้ตามเป้าประสิทธิภาพ นอกจากนี้เป้าประสิทธิภาพยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ตั้งแต่แหล่งน้ำดิบ ผ่านขั้นตอนต่างๆในการผลิตน้ำ และ ระบบสูบน้ำไปยังผู้ใช้

จุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง

(reference pathogens)

โดยทั่วไปแล้วการกำหนดเป้าประสิทธิภาพสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคทุกชนิดเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านข้อมูล ดังนั้นทางออกที่สามารถปฏิบัติได้ คือ การกำหนดเป้าประสิทธิภาพตามกลุ่มของจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น กลุ่มไวรัส กลุ่มแบคทีเรีย และกลุ่มโปรโตซัว เป็นต้น การเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงของแต่ละกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรค เพื่อใช้ในการคำนวณเป้าประสิทธิภาพให้พิจารณาจากความไวต่อการทำลาย ความชุกของจุลินทรีย์และลักษณะของน้ำในแหล่งน้ำท้องถิ่นนั้นๆ

เกณฑ์ทั่วไปที่แนะนำสำหรับการเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง คือ

1. การเกิดโรคหรือการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงที่มีน้ำเป็นสื่อ (waterborne transmission)
2. มีข้อมูลของจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงเพียงพอในการประเมินความเสี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขั้นตอนการอธิบายอันตราย (dose-response assessment)
3. พบอุบัติการณ์การปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบ (occurrence in source water)
4. มีความคงทนหรือคงตัวได้ในสิ่งแวดล้อม (persistence in environment)
5. ขั้นตอนการผลิตน้ำสามารถกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงได้ (sensitivity to elimination by treatment process)
6. ความสามารถในการติดเชื้อ (infectivity) อุบัติการณ์ (incidence) และความรุนแรงของโรค (severity)

การเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง

(Selection of reference pathogens)

การเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเทศ พื้นที่ ทั้งนี้ทั้งนั้นให้พิจารณาจากปัจจัยด้านสภาวะท้องถิ่น อุบัติการณ์ ความรุนแรงของโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ และคุณภาพของแหล่งน้ำ หลักฐานทางระบาดวิทยา (เช่น ความชุกโรค) นำมาใช้ในการเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีศักยภาพในการเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงจะเลือกจากจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีข้อมูลของจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงเพียงพอในการประเมินความเสี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้นตอนการอธิบายอันตราย (dose-response assessment)

ปัจจัยสำคัญในการเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง คือ จุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงนี้ควรจะเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคที่ก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหารที่มีน้ำเป็นสื่อ ซึ่งการตัดสินใจตามปัจจัยนี้จะอาศัยข้อมูล เช่น การเฝ้าระวังการเกิดโรค (disease surveillance) การสืบสวนสอบสวนโรค (disease investigation) การยืนยันสาเหตุการป่วยจากห้องปฏิบัติการ (laboratory-confirmed clinical case) เป็นต้น

กลุ่มไวรัส

(viruses)

ไวรัสเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีขนาดเล็กที่สุด ดังนั้นขั้นตอนการผลิตน้ำที่ใช้วิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง เป็นต้น จึงกำจัดไวรัสออกได้ยากกว่า ความไวต่อการทำลายของไวรัสแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง adenovirus จะทนต่อแสง UV ได้มากกว่า ไวรัสสามารถคงทนหรือคงตัวอยู่ได้นานในสิ่งแวดล้อม จำนวนอนุภาคไวรัสที่ทำให้เกิดโรคได้มีจำนวนน้อย ไวรัสที่ติดต่อทางน้ำส่วนมากก่อให้เกิดโรคเฉพาะกับมนุษย์เท่านั้น (human specific)

Rotavirus, enterovirus และ norovirus เป็นไวรัสที่มีศักยภาพในการเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงได้ กล่าวคือ rotavirus เป็นสาเหตุหลักของการเกิดโรคทางเดินอาหารอย่างรุนแรงในเด็กอายุไม่เกิน 5 ปี บางรายอาจจะรุนแรงถึงขั้นเข้ารักษาตัวในโรงพยาบาลและบางรายอาจจะเสียชีวิตได้ อุบัติการณ์ของ rotavirus พบมากในพื้นที่ที่มีรายได้ประชากรไม่สูง แม้ว่าจะมี dose-response model (สามารถประเมินความเสี่ยงได้) สำหรับ rotavirus ก็ตาม แต่ยังไม่มีการวินิจฉัยหาจำนวนอนุภาคไวรัส (นับจำนวน) ได้โดยใช้เซลล์เพาะเลี้ยง (cell culture method) โดยมากแล้ว rotavirus จะถูกขับออกมาเป็นจำนวนมากกับอุจจาระของผู้ป่วย ทำให้เกิดการปนเปื้อนระดับสูงในแหล่งน้ำ มีการรายงานการแพร่ระบาดของ rotavirus อยู่เป็นครั้งคราว นอกจากการแพร่ระบาดโดยมีน้ำเป็นสื่อแล้ว มีแนวโน้มว่ายังมีสาเหตุอื่นที่ก่อให้เกิดการแพร่ระบาด rotavirus ได้ในประเทศที่รายได้ไม่สูง เช่น สุขอนามัยส่วนบุคคล เป็นต้น

enterovirus (poliovirus จัดเป็น enterovirus ด้วย) รวมถึง parechovirus เป็นไวรัสที่ก่อให้เกิดอาการที่หลากหลาย กล่าวคือ มีทั้งอาการใช้ต่ำๆ เท่านั้น ไปจนถึงอาการรุนแรงในเด็ก เช่น อัมพาต เยื่อหุ้มสมองอักเสบ และสมองอักเสบ เป็นต้น ไวรัสกลุ่มนี้มี dose-response model (สามารถประเมินความเสี่ยงได้) และมีวิธีการวินิจฉัยหาจำนวนอนุภาคไวรัสได้โดยใช้เซลล์เพาะเลี้ยง (cell culture method) สำหรับไวรัสเหล่านี้ โดยมากแล้วจะถูกขับออกมาเป็นจำนวนมากกับอุจจาระของผู้ป่วย ทำให้เกิดการปนเปื้อนระดับสูงในแหล่งน้ำ

norovirus เป็นสาเหตุของโรคทางเดินอาหารหลักของผู้ป่วยในทุกกลุ่มอายุ ก่อให้เกิดอาการโรคทางเดินอาหารที่ไม่รุนแรง (mild) และระยะเวลาป่วยสั้นไม่เกิน 3 วัน ภาระโรค (burden of disease) ของ norovirus จะน้อยกว่า rotavirus ระดับภูมิคุ้มกันโรคต่อ norovirus จะคงตัวอยู่ไม่นานนัก ดังนั้นจึงมี

โอกาสติดเชื้อและก่อโรคซ้ำได้อีกในอนาคต แม้ว่าจะมี dose-response model (สามารถประเมินความเสี่ยงได้) แต่ไม่มีวิธีการวินิจฉัยหาจำนวนอนุภาคไวรัสได้โดยใช้เซลล์เพาะเลี้ยง (cell culture method)

กลุ่มแบคทีเรีย

(bacteria)

แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคที่ทนทานต่อการทำลายจุลินทรีย์ (inactivation) น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับจุลินทรีย์ก่อโรคกลุ่มอื่น แบคทีเรียลำไส้ (enteric bacteria) คงตัวอยู่ในน้ำได้ไม่นาน จึงไม่สามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนในน้ำได้ ยกเว้น แบคทีเรียอิสระ เช่น *Legionella* และ non-tuberculous mycobacterium สามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้ในน้ำได้ แบคทีเรียที่ก่อโรคในคนบางชนิดสามารถเพิ่มจำนวนในสัตว์ได้ (non-human specific)

แบคทีเรียที่มีศักยภาพในการเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงได้ เนื่องจาก มี dose-response model (สามารถประเมินความเสี่ยงได้) เช่น *Vibrio*, *Campylobacter*, *E.coli* O157, *Salmonella* และ *Shigella* เป็นต้น

Vibrio cholera เป็นแบคทีเรียชนิดที่สร้างสารพิษ (toxin) ได้ ทำให้เกิดอาการถ่ายเหลวเป็นน้ำ (watery diarrhoea) แต่หากไม่ได้รับการรักษาก็อาจทำให้ถึงขั้นเสียชีวิตได้ จำนวนเซลล์ที่ก่อโรค (infective dose) ค่อนข้างสูง เคยมีรายงานการเกิดอุบัติการณ์ระบาดใหญ่และเกิดขึ้นเป็นระยะๆ

Campylobacter เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคทางเดินอาหารทั่วโลก ก่อให้เกิดอาการในระบบทางเดินอาหาร แต่มีอัตราการตายที่ต่ำ จำนวนเซลล์ที่ก่อโรค (infective dose) ค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณ 1,000 เซลล์ พบจุลินทรีย์นี้ได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เคยมีรายงานการระบาดของโรคผ่านน้ำ

E.coli O157 รวมถึง enterohaemorrhagic strain ของ *E.coli* แม้ว่าจะมีอุบัติการณ์เกิดโรคน้อยกว่า *Campylobacter* แต่อาการในเด็กกลับจะรุนแรง เช่น การปัสสาวะมีเลือด (hemolytic uremic syndrome : HUS) จนถึงขั้นเสียชีวิตได้ด้วย จำนวนเซลล์ที่ก่อโรค (infective dose) ต่ำมาก คือ ประมาณ 100 เซลล์เท่านั้น

Salmonella ชนิด non-typhoid ก่อให้เกิดการระบาดผ่านทางน้ำน้อยมาก ในขณะที่ *Salmonella typhi* (typhoidal *Salmonella*) จะก่อให้เกิดการระบาดใหญ่และรุนแรง

Shigella เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหารกว่า 2 ล้านคนทั่วโลกในแต่ละปี มีอัตราการตายสูงประมาณ 60,000 ราย โดยมากมาจากประเทศที่กำลังพัฒนา จำนวนเซลล์ที่ก่อโรค (infective dose) น้อยมาก คือ ประมาณ 10-100 เซลล์เท่านั้น เคยมีรายงานการเกิดโรคระบาดใหญ่

กลุ่มโปรโตซัว

(protozoa)

โปรโตซัวเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีความทนทานต่อสารเคมีในการทำลายจุลินทรีย์มากที่สุด พบว่า *Cryptosporidium* oocyst ถูกทำลายได้ง่ายด้วยแสง UV แต่ทนทานต่อคลอรีน เนื่องจากขนาดของโปรโตซัว (ตั้งแต่ 2 ไมโครเมตร) จึงถูกกำจัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพในขั้นตอนการผลิตน้ำ โปรโตซัวสามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้เป็นระยะเวลานาน โปรโตซัวที่เพิ่มจำนวนได้ทั้งในมนุษย์หรือสัตว์ เช่น *Cryptosporidium*, *Balantidium* เป็นต้น ส่วนโปรโตซัวที่เพิ่มจำนวนได้เฉพาะในคน เช่น *Cyclospora*, *Entamoeba* เป็นต้น จำนวนเซลล์ที่ก่อโรค (infective dose) น้อย

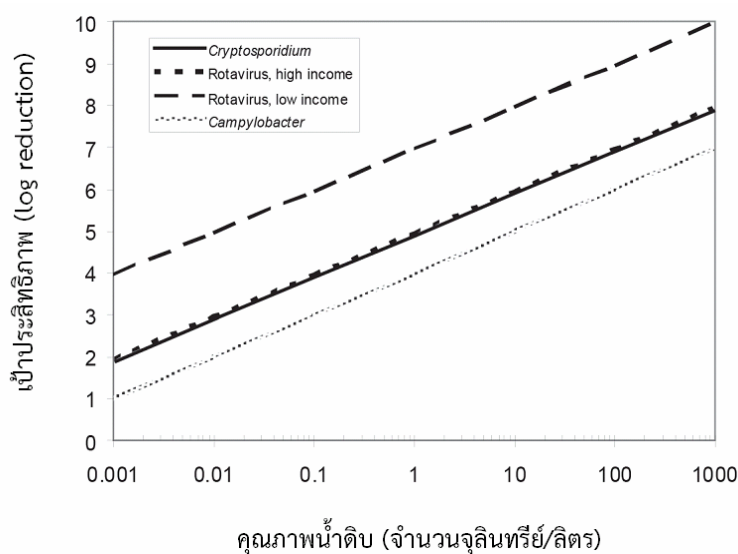
มี dose-response model (สามารถประเมินความเสี่ยงได้) สำหรับ *Cryptosporidium* และ *Giardia* โดยพบว่า การติดเชื้อของ *Cryptosporidium* มีน้อยกว่าการติดเชื้อของ *Giardia* แต่ระยะเวลาการเกิดโรคของ *Giardia* จะยาวนานกว่า *Cryptosporidium* เนื่องจาก ขนาดของ *Cryptosporidium* เล็กกว่า *Giardia* ดังนั้นการกำจัด *Cryptosporidium* ด้วยวิธีทางกายภาพจึงยากกว่า *Giardia* นอกจากนี้ *Cryptosporidium* ยังมีความทนทานต่อสารเคมีทำลายจุลินทรีย์และทนทานในสิ่งแวดล้อมมากกว่า

การกำหนดเป้าประสิทธิภาพโดยฐานความเสี่ยง

(risk-based performance target setting)

การประเมินความเสี่ยงเป็นกระบวนการในการประมาณค่าความเสี่ยงของประชากรโดยพิจารณา ร่วมกับคุณภาพน้ำดิบและการควบคุม ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงของความเสี่ยง (reference level of risk) หรือ ระดับความเสี่ยงที่ทนได้ (tolerable risk)

เป้าประสิทธิภาพมักจะนำไปใช้กับประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ (treatment performance) โดยที่ ประสิทธิภาพการทำลายเชื้อ หมายถึง การกำหนดการลดจำนวนจุลินทรีย์เท่าที่จำเป็นเพื่อให้น้ำปลอดภัย เป้าประสิทธิภาพอาจจะนำไปใช้กับระบบเฉพาะหรือระบบทั่วไปได้ด้วย เป้าสำหรับประสิทธิภาพการทำลายเชื้อสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคนิตต่างๆ จะขึ้นอยู่กับระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำ ยกตัวอย่าง เช่น คุณภาพน้ำดิบมีระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ 10 เซลล์/ลิตร จากภาพที่ 2.10 จะพบว่าเป้าประสิทธิภาพสำหรับ *Cryptosporidium* คือ 5.89 log (หรือ ร้อยละ 99.99987) ในขณะที่เป้าประสิทธิภาพสำหรับ Rotavirus ในประเทศรายได้สูง คือ 5.96 log (หรือ ร้อยละ 99.99989) เมื่อโรงงานผลิตน้ำสามารถ บรรลุเป้าประสิทธิภาพ ก็จะทำให้ได้เป้าหมายผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี (ภาพที่ 2.10) สำหรับกรณีเป้าประสิทธิภาพสำหรับ Rotavirus ในประเทศรายได้ต่ำ คือ 7.96 log ซึ่งความแตกต่างระหว่างเป้าประสิทธิภาพของ Rotavirus ในประเทศรายได้สูงและประเทศรายได้ต่ำ คือ ระดับความรุนแรงของโรค กล่าวคือ ประเทศรายได้ต่ำมีอัตราการตายของเด็กสูงกว่า นอกจากนี้สัดส่วนประชากรของเด็กในกลุ่มอายุน้อยกว่า 5 ปี (ช่วงอายุที่ไวต่อการติดเชื้อ Rotavirus) มีมากกว่าด้วย ดังนั้นภาระโรคของ Rotavirus ในประเทศรายได้ต่ำจึงสูงกว่าภาระโรคของ Rotavirus ในประเทศรายได้สูงตามไปด้วย



ภาพที่ 2.10 เป้าประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ก่อโรคกลุ่มต่างๆ ที่สอดคล้องกับ 10^{-6} DALY/คน/ปี

ตัวอย่างการคำนวณเป้าประสิทธิภาพสามารถศึกษาได้จากตารางที่ 2.11 ซึ่งจากตัวอย่างนี้จะใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองการประเมินความเสี่ยงสำหรับจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ จุลินทรีย์ก่อโรคที่เลือกนำเสนอในตัวอย่างดังตารางใช้เป็นตัวแทนกลุ่มจุลินทรีย์ก่อโรค คือ โปรโตซัว แบคทีเรียและไวรัส ตามลำดับ โดยการคำนวณเป้าประสิทธิภาพจะมุ่งให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับเป้าผลลัพธ์สุขภาพ คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี

ตารางที่ 2.11 ตัวอย่างรูปแบบของเป้าฐานสุขภาพ

	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus	Unit
Raw water quality	10	100	10	จำนวนเชื้อ/ลิตรน้ำดิบ
Health outcome target	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	DALY/คน/ปี
Risk of diarrhea illness	1 per 1,500/ปี	1 per 4,600/ปี	1 per 14,000/ปี	
Drinking-water quality	1 per 79,000 ลิตร	1 per 9,500 ลิตร	1 per 90,000 ลิตร	
Performance target	5.89	5.98	5.96	$\log_{10}$

การนำเสนอผลของการพัฒนาเป้าประสิทธิภาพ

(presenting the outcome of performance target development)

ตารางที่ 2.8 เป็นตารางที่ใช้ในการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างเป้าประสิทธิภาพและเป้าฐานสุขภาพ ต้นทางอื่นๆ โดยประเด็นสำคัญของการพัฒนาเป้าประสิทธิภาพมิใช่เป้าคุณภาพน้ำ และ มิใช่การมุ่งประเด็นในการเฝ้าระวังระดับการปนเปื้อนของน้ำดื่ม ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.8 ที่กำหนดคุณภาพน้ำดื่มที่สอดคล้องกับเป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี คือ มีเพียง 1 *Cryptosporidium* oocyst/79,000 L น้ำดื่ม หรือเทียบเท่ากับ 1.3×10^{-5} *Cryptosporidium*/L น้ำดื่ม ซึ่งประเด็นที่ผู้จัดการความเสี่ยงสามารถเล็งเห็นประโยชน์จากเป้าประสิทธิภาพ คือ การที่ทุกขั้นตอนร่วมกันในการผลิตน้ำประปาจะลดจำนวน *Cryptosporidium* ให้ได้ 5.89 log หรือเทียบเท่ากับ ร้อยละ 99.99987

การประยุกต์การกำหนดเป้าประสิทธิภาพโดยฐานความเสี่ยงกับสถานการณ์ท้องถิ่น

(adapting risk-based performance target setting to local circumstances)

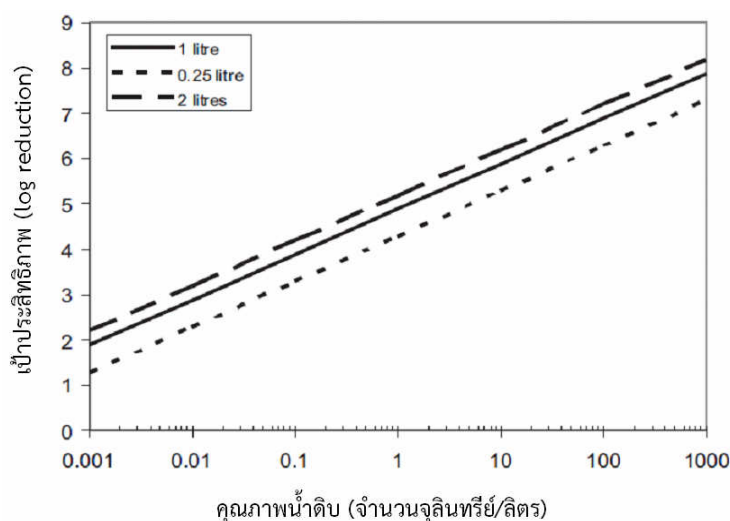
จุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงในแต่ละประเทศ แต่ละพื้นที่ย่อมมีความแตกต่างกันไป ทั้งนี้ทั้งนั้นให้พิจารณาเลือกจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิงที่มีความจำเพาะในแต่ละประเทศและแต่ละพื้นที่ และใช้การประเมินความเสี่ยงเป็นส่วนหนึ่งของปัจจัยในการพิจารณาด้วย อย่างไรก็ตามหากมิได้มีข้อมูลระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มในน้ำดิบ สามารถใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2.12 ได้

ตารางที่ 2.12 ความเข้มข้นของจุลินทรีย์บ่งชี้และจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและน้ำดิบ

จุลินทรีย์	จำนวน/กรัมอุจจาระ	จำนวน/ลิตรน้ำเสีย	จำนวน/ลิตรน้ำดิบ
Fecal coliform	10^7	$10^7 - 10^{10}$	$10^2 - 10^5$
<i>Campylobacter</i>	10^6	$10^2 - 10^6$	$10^2 - 10^5$
<i>Vibrio cholera</i>	10^6	$10^2 - 10^6$	$10^2 - 10^8$
Enteroviruses	10^6	$1 - 10^3$	$10^{-2} - 10$
Rotavirus	10^9	$10 - 10^3$	$10^{-2} - 10^2$
<i>Cryptosporidium</i>	10^7	$1 - 10^4$	$0 - 10^3$
<i>Giardia intestinalis</i>	10^7	$1 - 10^4$	$0 - 10^3$

ค่าตามตารางที่ 2.8 เป็นค่าประมาณแบบเดี่ยว (point estimate) ที่ไม่ได้ครอบคลุมความหลากหลาย (variability) และความไม่รู้ (uncertainty) เข้าไปด้วย แบบจำลองการประเมินความเสี่ยงชนิดเต็มรูปแบบจะมีการผนวกทั้งความหลากหลาย (variability) และความไม่รู้ (uncertainty) เข้าไปด้วย ในรูปของการแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution) การประเมินความเสี่ยงดังกล่าวจะต้องอาศัยความรู้ด้านคณิตศาสตร์และสถิติเพิ่มเติม ดังนั้นบางประเทศอาจจะเลือกแบบจำลองการประเมินความเสี่ยงแบบค่าเดียวก็ได้

ระดับการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำอาจะมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง เช่น ปริมาณการดื่มน้ำ สัดส่วนของประชากรที่ไวต่อการเกิดโรค เป็นต้น สำหรับปริมาณน้ำดื่มมีความสัมพันธ์กับเป้าประสิทธิภาพ กล่าวคือ เมื่อคุณภาพน้ำมีระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ 10 เซลล์/ลิตร ดังภาพที่ 2.11 พบว่า

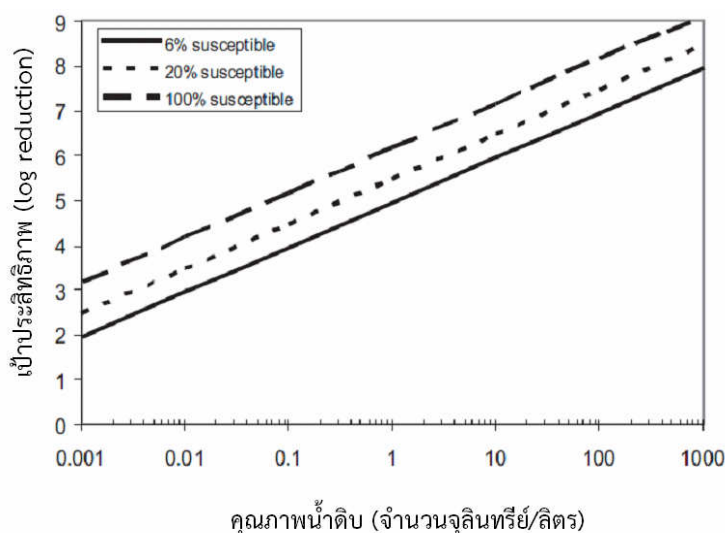


ภาพที่ 2.11 เป้าประสิทธิภาพสำหรับ *Cryptosporidium* ที่สอดคล้องกับ 10^{-6} DALY/คน/ปี

กรณีที่ 1 ปริมาณการดื่มน้ำที่ไม่ได้ผ่านการต้ม 0.25 ลิตร/วัน จะสอดคล้องกับเป้าประสิทธิภาพ 4.3 log สำหรับ *Cryptosporidium* ในขณะ

กรณีที่ 2 ปริมาณการดื่มน้ำที่ไม่ได้ผ่านการต้มเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ลิตร/วัน จะสอดคล้องกับเป้าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็น 5.2 log ดังภาพที่ 2.11

สำหรับสัดส่วนของประชากรที่ไวต่อการเกิดโรคมีความสัมพันธ์กับเป้าประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อคุณภาพน้ำมีระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ 10 เซลล์/ลิตร ดังภาพที่ 2.12 พบว่า



ภาพที่ 2.12 เป้าประสิทธิภาพสำหรับ Rotavirus ที่สอดคล้องกับ 10^{-6} DALY/คน/ปี

กรณีที่ 1 สัดส่วนของประชากรที่ไวต่อการเกิดโรคที่ร้อยละ 6 จะสอดคล้องกับเป้าประสิทธิภาพ 5.96 log สำหรับ Rotavirus

กรณีที่ 2 สัดส่วนของประชากรที่ไวต่อการเกิดโรคเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 จะสอดคล้องกับเป้าประสิทธิภาพเพิ่มเป็น 7.18 log ดังภาพที่ 2.12

เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ

(Specified technology target)

เป้าเทคโนโลยีเฉพาะส่วนมากแล้วจะอยู่ในรูปแบบของคำแนะนำ (recommendation) ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีที่ใช้ในสถานการณ์เฉพาะ เช่น การกรอง การทำลายจุลินทรีย์ เป็นต้น การเลือกเทคโนโลยีจะคำนึงถึงการประเมินคุณภาพของแหล่งน้ำดิบ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน เป็นต้น เป้าเทคโนโลยีเฉพาะมักจะใช้กับระบบจัดหาน้ำสำหรับชุมชนขนาดเล็กหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือน เป้าเทคโนโลยีเฉพาะสามารถใช้ได้กับทั้งอันตรายเคมีและอันตรายจุลินทรีย์

ระบบจัดหาน้ำสำหรับชุมชนขนาดเล็กมักจะมีทรัพยากรจำกัด ความสามารถในการพัฒนาระบบประเมินและเป้าหมายสุขภาพ หน่วยงานควบคุมของรัฐบาลอาจจะมีข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีเฉพาะรวมถึงทางเลือกอื่นๆ ในการรับรองการทำงานของระบบจัดหาน้ำสำหรับชุมชนขนาดเล็กด้วย เช่น

- กระบวนการผลิตน้ำที่ได้รับการรับรองให้ใช้กับชนิดและคุณภาพของแหล่งน้ำ

- คำแนะนำในการป้องกันการปนเปื้อนแหล่งน้ำ
- ข้อบังคับในการคงความปลอดภัยของน้ำในระบบสูบน้ำ

เนื่องจาก ชนิดและคุณภาพของแหล่งน้ำอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นจึงควรมีการทบทวนเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะให้มีความทันสมัยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของแหล่งน้ำและความก้าวหน้าด้านความรู้และเทคโนโลยีที่เป็นปัจจุบัน

การจัดการความเสี่ยง (Risk management)

ผลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง ทำให้สามารถทราบระดับความรุนแรงและตำแหน่งของปัญหาในเชิงระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen contamination) ส่งผลให้หน่วยงานสามารถกำหนดแนวทางหรือมาตรการที่เหมาะสมในการลดระดับการปนเปื้อนส่งผลให้ความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือความเสี่ยงที่ได้มีความสอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดโดยหน่วยงานนั้นๆ

เป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี เป็นระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ในระดับนานาชาติที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งผลการศึกษาระดับการปนเปื้อนของแบคทีเรียและโปรโตซัวเมื่อนำมาวิเคราะห์คำนวณเป็นเป้าหมายสุขภาพ พบว่า ผลลัพธ์สุขภาพของการดื่มน้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดระดับความปลอดภัยของน้ำประปาในเขตความรับผิดชอบของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

มาตรการจัดการความเสี่ยง (Risk management options)

เนื่องจากผลลัพธ์สุขภาพที่วิเคราะห์ได้จากประสิทธิภาพการทำงานของโรงงานผลิตน้ำบางเขนอยู่ในระดับที่สอดคล้องกับ เป้าผลลัพธ์สุขภาพ 10^{-6} DALY/คน/ปี ที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการปรับเปลี่ยนหรือนำมาตรการจัดการความเสี่ยงมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ก่อกำกับการตรวจพบการปนเปื้อนของ *Giardia lamblia* ในบางขั้นตอนของการผลิตน้ำในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน รวมถึงตัวอย่างน้ำประปาจากเส้นท่อที่จ่ายน้ำไปยังผู้ใช้น้ำ โดยมีข้อสังเกตว่าการปนเปื้อนของ *Giardia lamblia* นั้น เกิดขึ้นในช่วงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2557 ซึ่งมีความเห็นร่วมกันของทีมนักวิจัยและการประสานครหลวง ถึงความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนและฤดูกาล กล่าวคือ เดือนกรกฎาคมเป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูฝน ที่อาจจะชะล้างการสะสมการปนเปื้อนของโปรโตซัวในช่วงฤดูแล้ง ทำให้มีโอกาสน้ำประปาปนเปื้อนของโปรโตซัวตลอดเส้นทางไหลของน้ำดิบก่อนจะเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงทำให้สามารถตรวจพบโปรโตซัวได้

โดยที่แผนงานของโครงการวิจัยได้กำหนดการเก็บตัวอย่างน้ำหลังการปรับใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง ดังนั้นจึงได้กำหนดการเก็บตัวอย่างน้ำโดยมุ่งเน้นเก็บตัวอย่างในช่วงรอยต่อระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน เพื่อพิสูจน์สมมติฐานของการปนเปื้อนของโปรโตซัวที่อาจจะมีความสัมพันธ์กับฤดูกาล

แผนการเก็บตัวอย่างในช่วงระยะการจัดการความเสี่ยง แบ่งเป็น 4 ครั้ง ช่วงระยะห่างกัน 1 เดือน โดยกำหนดให้การเก็บตัวอย่างน้ำใน 2 ครั้งแรก (เดือน) เป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อเป็นข้อมูลระดับการปนเปื้อนของโปรโตซัวในฤดูแล้ง และกำหนดให้การเก็บตัวอย่างน้ำใน 2 ครั้งหลัง (เดือน) เป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อเป็นข้อมูลระดับการปนเปื้อนของโปรโตซัวในฤดูฝน เนื่องจากเป็นการเก็บตัวอย่างที่ต้องการเพิ่มโอกาสในการตรวจหาโปรโตซัวในน้ำที่สุบจ่าย เพื่อตรวจสอบระดับความปลอดภัยในการใช้น้ำและประสิทธิภาพการผลิตน้ำประปาที่ปลอดภัยของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนที่เข้มงวดขึ้น

การกำหนดจำนวนตัวอย่างจึงมีความแตกต่างจากการเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินความเสี่ยงในระยะที่ 1 ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสัดส่วนการเก็บตัวอย่างน้ำในเส้นท่อที่จ่ายน้ำไปสู่ผู้ใช้น้ำเป็น 2 เท่า (10 ตัวอย่าง) ของจำนวนตัวอย่างน้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำ (5 ตัวอย่าง) ในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน ดังตารางที่ 2.1 (นำเสนอซ้ำ)

ตารางที่ 2.1 แผนการเก็บตัวอย่างเพื่อการประเมินความเสี่ยง (นำเสนอซ้ำ)

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	ช่วงระยะ “การประเมินความเสี่ยง”										ช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง”			
	เดือน										เดือน			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
1. น้ำดิบ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
2. การกวนช้า	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
3. การกรอง	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5
5. การสูบส่ง-สูบจ่าย	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	10	10
รวม (แต่ละเดือน)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	30	30	30

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังได้สนใจถึงแนวทางในการลดหรือการควบคุมการปนเปื้อนของโปรโตซัว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Giardia lamblia* ดังนั้น จึงได้เพิ่มเติมหัวข้อเรื่อง ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโปรโตซัว (Drinking water treatments relating to the reduction of protozoa) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการจัดการความเสี่ยงต่อไป

การอบรมการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment training)

การอบรมหลักและวิธีการประเมินความเสี่ยงเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งในโครงการวิจัย ในการสร้างเสริมประสบการณ์และศักยภาพของหน่วยงานการประปานครหลวงให้มีความเข้าใจหลักการและวิธีการในการประเมินความเสี่ยง เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาความปลอดภัยน้ำดื่มโดยนำการประเมินความเสี่ยง (risk assessment) และการจัดการความเสี่ยง (risk management) มาเป็นแนวทางในการสร้างแผนความปลอดภัยน้ำ (water safety plan) อันเป็นส่วนหนึ่งของแนวทางการพัฒนาคุณภาพน้ำดื่ม (Guidelines for Drinking Water Quality) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 ในปี ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาและกำกับความปลอดภัยน้ำประปานอกเหนือจากการดำเนินงานหลักของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority : MWA) ในการทำหน้าที่จัดหาและควบคุมคุณภาพน้ำประปาสำหรับประชาชน

การประปานครหลวงสามารถนำการประเมินความเสี่ยงมาใช้ประเมินความปลอดภัยและระบุปัจจัยรวมถึงขั้นตอนตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มีผลต่อความปลอดภัยได้โดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็น (probabilistic model) และการจำลองเหตุการณ์จริง (Monte Carlo simulation) ของการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำ (waterborne pathogens) ตลอดกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้การประปานครหลวงสามารถพิจารณามาตรการจัดการความเสี่ยงต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา เพื่อยกระดับความปลอดภัยน้ำประปาให้สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงที่เหมาะสมต่อไปได้

โดยหน่วยงานและตำแหน่งของการประปานครหลวงที่เข้าฟังการบรรยาย ประกอบด้วย

1. ผู้ช่วยผู้ว่าการประปานครหลวง
 - ก. แหล่งน้ำและคุณภาพน้ำ
 - ข. ผลิตน้ำ
2. ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง
3. ผู้อำนวยการกอง
 - ก. บริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ ฝ่ายบริหารความเสี่ยง
 - ข. ผลิตและจ่ายน้ำ ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน
 - ค. พัฒนาคุณภาพน้ำ
 - ง. วิเคราะห์คุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
4. ผู้อำนวยการฝ่าย
 - ก. คุณภาพน้ำ
 - ข. ทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม
 - ค. โรงงานผลิตน้ำสามเสน
5. หัวหน้าส่วน
 - ก. น้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 - ข. แผนและประเมินผล กองแผนคุณภาพน้ำ
 - ค. วิเคราะห์ทางเคมี กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 - ง. วิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- จ. วิเคราะห์ทางสารพิษ โลหะหนัก กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 - ฉ. วิชาการคุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
 - ช. วิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน
 - ซ. วิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน
 - ณ. แหล่งน้ำตะวันตก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 - ญ. แหล่งน้ำตะวันออก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 - ฎ. วิเคราะห์ทางสารพิษ โลหะหนัก
6. วิศวก
- ก. กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ ฝ่ายบริหารความเสี่ยง
 - ข. ส่วนกำจัดตะกอน กองควบคุมระบบกำจัดตะกอน ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน
 - ค. ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
7. นักวิทยาศาสตร์
- ก. ฝ่ายคุณภาพน้ำ
 - ข. กองพัฒนาคุณภาพน้ำ
 - ค. ส่วนฐานข้อมูลคุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
 - ง. ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 - จ. ส่วนแผนและประเมินผล กองแผนคุณภาพน้ำ
 - ฉ. ส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 - ช. ส่วนแหล่งน้ำตะวันตก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 - ซ. ส่วนแหล่งน้ำตะวันออก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ

=====

บทที่ 3

ผลการวิจัย

โรงงานผลิตน้ำบางเขน

โรงงานผลิตน้ำบางเขน (ภาพที่ 3.1) เป็นสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้ ตั้งอยู่เลขที่ 400 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กทม. 10210 เปิดดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ.2522 จัดเป็นโรงงานผลิตน้ำแห่งที่ 3 ของการประปานครหลวง

โรงงานผลิตน้ำบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำที่มีขนาดใหญ่ รับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ส่งผ่านคลองประปาตะวันออกจนถึงโรงงานผลิตน้ำ ระยะทางประมาณ 18 กิโลเมตร



ภาพที่ 3.1 โรงงานผลิตน้ำบางเขน

โรงงานผลิตน้ำบางเขนสามารถผลิตน้ำได้วันละประมาณ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร และเนื่องจากเป็นโรงงานผลิตน้ำที่มีขนาดใหญ่และกำลังการผลิตสูง จึงสามารถให้บริการน้ำประปาในพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ประกอบด้วย เขตหนองจอก บางรัก บางเขน บางกะปิ พระโขนง มีนบุรี ลาดกระบัง ยานนาวา ห้วยขวาง ดินแดง บึงกุ่ม สาทร บางซื่อ จตุจักร บางคอแหลม ประเวศ คลองเตย สวนหลวง ดอนเมือง ลาดพร้าว วัฒนา หลักสี่ สายไหม คันนายาว สะพานสูง วังทองหลาง คลองสามวา บางนา ส่วนหนึ่งของพระนคร พญาไทและดุสิต ส่วนหนึ่งของอำเภอเมืองนนทบุรีและปากเกร็ด อำเภอเมืองสมุทรปราการ บางป่อ บางพลี บางเสาธง และส่วนหนึ่งของพระประแดง อย่างไรก็ตาม เพื่อรองรับความต้องการน้ำที่มีมากขึ้นในอนาคต โรงงานผลิตน้ำบางเขนสามารถขยายกำลังการผลิตน้ำให้ได้ถึงวันละ 4.8 ล้านลูกบาศก์เมตร

แหล่งน้ำดิบ

แหล่งน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน มีต้นทางจากแม่น้ำเจ้าพระยา ดังมีลำดับและรายละเอียดต่อไปนี้

1. แม่น้ำเจ้าพระยา

ต้นกำเนิดของแม่น้ำเจ้าพระยาเกิดจากการไหลของแม่น้ำยม (ภาพที่ 3.2) มาสมทบกับแม่น้ำน่าน ต่อจากนั้นจึงไหลมาบรรจบกับแม่น้ำปิงเป็นแม่น้ำเจ้าพระยา ณ ตำบลปากน้ำโพและตำบลแควใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ จากนั้นแม่น้ำเจ้าพระยาได้ไหลผ่านจังหวัดในกลุ่มน้ำภาคกลางของประเทศไทย ได้แก่ อุทัยธานี ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี และกรุงเทพมหานคร จากนั้นจึงไหลลงสู่อ่าวไทย ณ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ โดยมีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 372 กิโลเมตร



ภาพที่ 3.2 แม่น้ำยมที่ผ่านเขตจังหวัดนครสวรรค์

2. สถานีสูบน้ำดิบสำแล

สถานีสูบน้ำดิบสำแล (ภาพที่ 3.3) คือ จุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าสู่คลองประปาตะวันออก อยู่ใกล้วัดสำแล ตำบลบ้านกระแซง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 41 กิโลเมตร และห่างจากปากอ่าวไทยประมาณ 96 กิโลเมตร



ภาพที่ 3.3 สถานีสูบน้ำดิบสำแล

สถานีสูบน้ำดิบสำแลมีโครงสร้างของสถานีสูบน้ำดิบ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

2.1 โครงสร้างใต้ดิน (basement) มีความลึกประมาณ 8 เมตร ประกอบด้วย เครื่องปั๊มแนวนอน (horizontal axial flow) ซึ่งแต่ละเครื่องมีกำลังการสูบน้ำ 400 ลูกบาศก์เมตร/นาที่

2.2 โครงสร้างบนดิน (over ground) มีความสูง 11 เมตร ใช้ติดตั้งเครื่องควบคุมต่างๆ เครื่องจ่ายไฟ และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานของสถานีสูบน้ำดิบ

ซึ่งกำลังการสูบน้ำโดยรวมของสถานีสูบน้ำดิบสำแลมีค่าสูงสุด 5.8 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน ดำเนินงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยแผนการสูบส่งน้ำดิบต้องสัมพันธ์กับปริมาณความต้องการน้ำดิบเพื่อใช้ผลิตน้ำประปาของ โรงงานผลิตน้ำบางเขน โรงงานผลิตน้ำสามเสน และโรงงานผลิตน้ำธนบุรี

3. คลองประปาตะวันออก

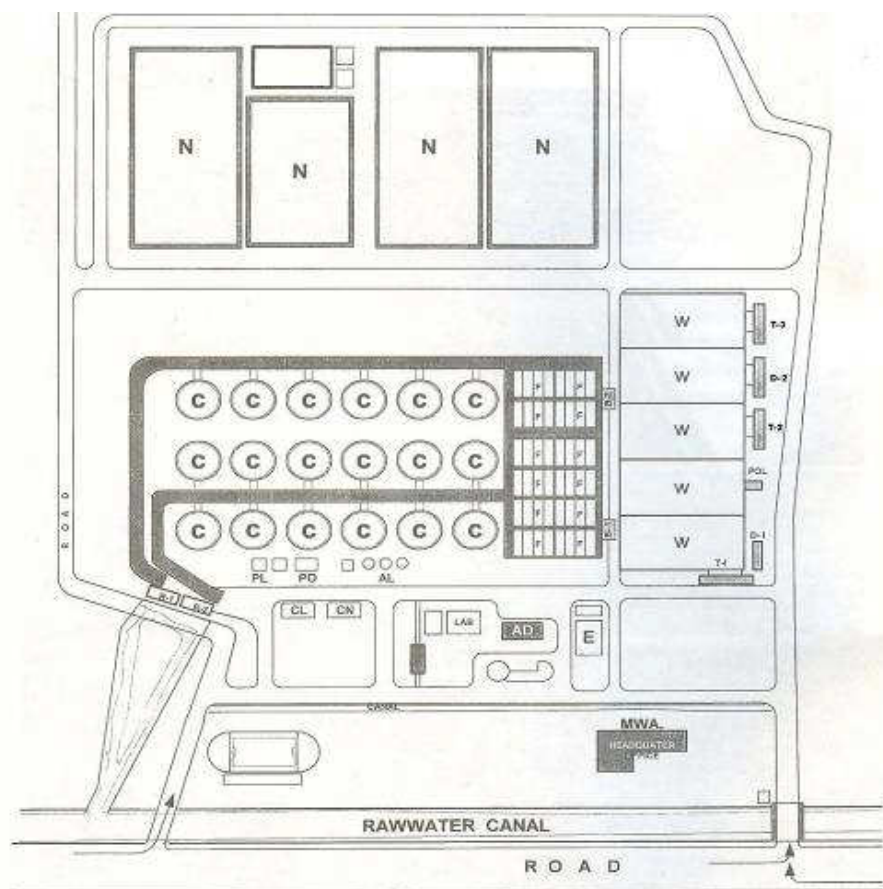
คลองประปาตะวันออก (ภาพที่ 3.4) มีลักษณะเป็นคลองดิน ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บและส่งน้ำดิบ เพื่อใช้ผลิตน้ำประปาตามพระราชดำริพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว โดยเส้นทางคลองประปาตะวันออกนี้พาดผ่านชุมชน และคลองธรรมชาติหลายแห่ง จึงต้องมีโครงสร้างเป็นไซฟอนลอดคลองต่างๆในบางช่วงของคลองประปา และมีอุโมงค์ส่งน้ำในบางพื้นที่ เพื่อให้ส่งน้ำดิบไปยังโรงงานผลิตน้ำประปาทั้ง 3 แห่ง เพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้ในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก



ภาพที่ 3.4 แผนผังคลองประปาตะวันออก

และคลองประปาตะวันออก ณ “โรงงานผลิตน้ำบางเขน” และ “โรงงานผลิตน้ำสามเสน” ตามลำดับ

แผนผังโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน



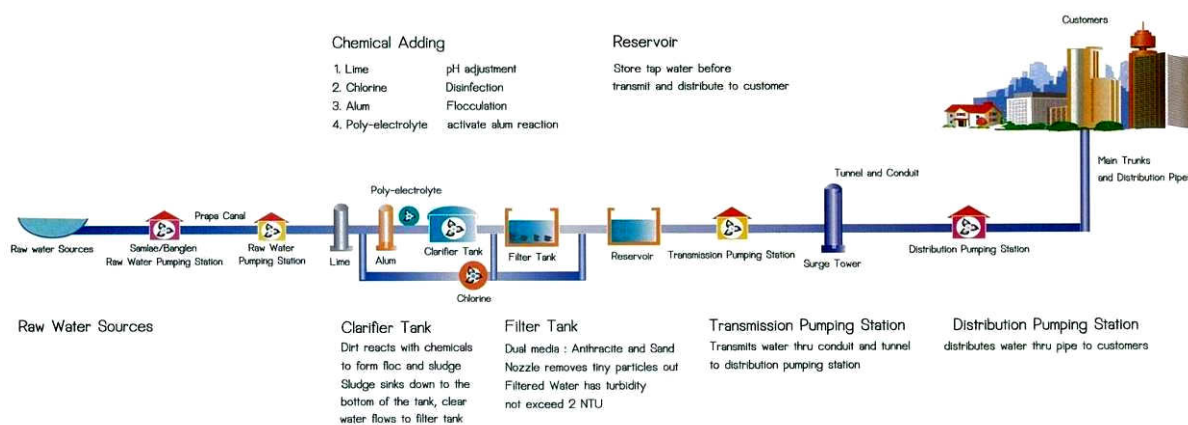
อักษรย่อของโครงสร้างต่างๆ ในโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

AD	อาคารธุรการ (Administration Building)	LAB	ห้องปฏิบัติการ (Laboratory)
AL	อาคารสารส้ม (Alum Building)	N	แอ่งกักตะกอน (Sludge Lagoons)
B1-2	สถานีปั๊มล้างถังกรองน้ำ (Back Wash Water Pumping Stations)	PL	อาคารปูนขาวต้น (Pre-Lime Building)
C	ถังตกตะกอน (Clarifier Tanks)	PO	อาคาร Polyelectrolyte Building
CL	อาคารคลอรีน (Chlorine Building)	POL	อาคารปูนขาวท้าย (Post-Lime Building)
CN	การสะเทินคลอรีน (Chlorine Neutralization)	R1-2	โรงสูบน้ำดิบ 1 และ โรงสูบน้ำดิบ 2 (Raw Water Pumping Stations)
D1-2	สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำ (Distribution Pumping Stations)	T1-2-3	สถานีสูบน้ำส่งน้ำ (Transmission Pumping Stations)
E	สถานีไฟฟ้าย่อย (Electrical Substation)	W	คลังน้ำสะอาด (Filtered Water Reservoir)
F	ถังกรอง (Filter Tanks)		

ระบบการผลิตน้ำประปา

ระบบผลิตน้ำประปา ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ตามลำดับขั้นตอนการผลิต (ภาพที่ 3.5) ดังต่อไปนี้

คือ



ภาพที่ 3.5 ระบบการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง

1. ระบบสูบ-ส่งน้ำดิบ

โรงสูบน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปา (raw water pumping station) เป็นด่านแรกของการผลิตน้ำประปา โดยการใช้เครื่องปั๊มน้ำสูบน้ำดิบจากคลองประปาตะวันออกที่อยู่หน้าโรงสูบน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน (ภาพที่ 3.6) เพื่อนำเข้าสู่ระบบการผลิตน้ำประปา สำหรับโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีโรงสูบน้ำดิบจำนวน 2 แห่งแต่ละโรงสูบน้ำมีพื้นที่ 17x40 ตารางเมตร สูง 18 เมตร



ภาพที่ 3.6 แหล่งกักเก็บน้ำดิบก่อนสูบน้ำผ่านเข้าสู่โรงสูบน้ำดิบ ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน

ตัวโครงสร้างของโรงสูบน้ำดิบ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

1. โครงสร้างใต้ดิน (basement) มีความลึก 4 เมตร (ภาพที่ 3.7)

โรงสูบน้ำดิบ 1 ประกอบด้วย เครื่องปั๊มแนวนอน (horizontal axial flow) จำนวน 6 เครื่อง แต่ละเครื่องมีอัตราการสูบ 348-358 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ (ตารางที่ 1)

โรงสูบน้ำดิบ 2 ประกอบด้วย เครื่องปั๊มแนวนอน (horizontal axial flow) จำนวน 4 เครื่อง เครื่องหนึ่งมีอัตราการสูบ 174 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ อีกสองเครื่องมีอัตราการสูบจ่าย 348 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ (ตารางที่ 3.1) ตารางที่ 3.1 ประสิทธิภาพทางเทคนิคเครื่องสูบน้ำดิบในโรงสูบน้ำดิบ

ลักษณะ	หน่วย	โรงสูบน้ำดิบ 1	โรงสูบน้ำดิบ 2
เครื่องปั๊ม	N/A	Horizontal Mixed Flow	Horizontal Mixed Flow
จำนวนเครื่องปั๊ม	unit	6	4
อัตราการสูบจ่าย	meter ³ /min	348-358	174-348
ระดับความลึกน้ำ (rated head)	meter	9.3-10	9.3-10
กำลังขับ (driver size)	hp	900-1,340	500-1,340
แรงดันไฟฟ้า 3 phases 50 Hz	volt	6,600	6,600
รอบการหมุนสูงสุด	rpm	300-320	200-407



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างบนดินและใต้ดินของโรงสูบน้ำดิบ

2. โครงสร้างบนดิน (over ground) มีความสูง 13 เมตร ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องปั๊มในโรงสูบน้ำดิบ (ภาพที่ 3.8)



ภาพที่ 3.8 โรงสูบน้ำดิบในโรงงานผลิตน้ำบางเขน

เนื่องจากน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาอาจจะมีการปนเปื้อนด้วยสิ่งสกปรกขนาดแตกต่างกันไป เช่น ใบไม้ สาหร่าย เป็นต้น จำเป็นจะต้องมีระบบในการกรองสิ่งปนเปื้อนที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าเหล่านี้ออกไปก่อน โดยการใช้ระบบอุปกรณ์ตะแกรงดักขยะ เช่น Trash rake ที่มี band screen (ภาพที่ 3.9) ขนาดช่องความกว้างแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ในการคัดกรองสิ่งสกปรกออกจากน้ำดิบในขั้นต้นนี้ก่อน



ภาพที่ 3.9 ระบบอุปกรณ์การกำจัดเศษสิ่งสกปรกที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่ปนเปื้อนในน้ำดิบ

น้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาได้ ควรจะต้องมีคุณภาพเหมาะสมทั้งในเชิงจุลชีววิทยาและในเชิงเคมี ทั้งนี้หากว่า น้ำดิบมีการปนเปื้อนด้วยสิ่งสกปรก สิ่งปนเปื้อน หรือ สารเคมีในระดับสูง ก็จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำประปาโดยตรง กล่าวคือ ในสภาวะปกติโรงงานผลิตน้ำประปาดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับคุณภาพน้ำดิบปกติ เป็นการประหยัดการใช้ทรัพยากรและพลังงานของโรงงานผลิตน้ำประปา ในสภาวะที่น้ำดิบมีระดับการปนเปื้อนที่สูงกว่าปกติ โรงงานผลิตน้ำประปาดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยประสิทธิภาพตามปกติ ก็อาจจะไม่สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาให้ได้ตามมาตรฐานได้ ทำให้น้ำประปามีคุณภาพด้อยหรือต่ำกว่ามาตรฐาน

สำหรับ Operational monitoring parameter สำหรับน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา ที่แนะนำโดย Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย World Health Organization ปี 2011 มีทั้งการเฝ้าระวังคุณภาพในเชิงชีววิทยาและในเชิงเคมี ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Operational monitoring parameter ในขั้นตอนต่างๆ ของระบบการผลิตน้ำประปา

Operational parameter	Raw water	Coagulation	Sedimentation	Filtration	Disinfection	Distribution system
pH		+	+		+	+
Turbidity	+	+	+	+	+	+
Dissolved oxygen	+					
Stream/river flow	+					
Rainfall	+					
Color	+					
Conductivity	+					
Organic carbon	+		+			
Algae, algal toxin	+					
Chemical dosage		+			+	
Flow rate		+	+	+	+	
Net charge		+				
Streaming current value		+				
Head loss				+		
Ct*					+	
Disinfectant residual					+	+
Oxidation-reduction potential					+	
DBPs					+	+
Heterotropic bacteria					+	+
Hydraulic pressure						+

*Ct : concentration x contact time

2. ระบบผลิตน้ำประปา

ระบบผลิตน้ำประปาประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญๆ คือการสูบน้ำดิบเข้าโรงงานผลิตน้ำ ระบบการตกตะกอน ระบบการกรอง ระบบการฆ่าเชื้อ ระบบสำรองน้ำประปา ระบบสูบน้ำ และสูบน้ำจ่ายน้ำประปาให้บริการผู้ใช้น้ำ (ภาพที่ 3.9)

2.1 ระบบการตกตะกอน (Clarification)

เป็นระบบที่กำจัดตะกอนขนาดเล็กที่เจือปนในน้ำออกโดยการใช้สารเคมีให้ตะกอนมารวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นสามารถจมลงได้ตามแรงโน้มถ่วงของโลก

โรงงานผลิตน้ำบางแห่งใช้ถังตกตะกอนแบบ flat conical clarifier tank กลุ่ม solid contact units ชนิด slurry recirculation type จำนวน 18 ถัง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เมตร (ภาพที่ 3.10) มี Design

loading rate อยู่ที่ 70 มิลลิเมตร/นาที่ ได้อัตราการตกตะกอนน้ำใส (clarifier rate) 200,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน (ตารางที่ 3) ดังนั้น จึงมีกำลังผลิต 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน

ถังตกตะกอนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนปฏิกิริยา (reaction zone) อยู่ที่ส่วนกลางของถังตกตะกอน ทำหน้าที่กวนและผสมสารส้มและ polyelectrolyte

- ส่วนตกตะกอน (sedimentation zone) เป็นส่วนที่เหลือทั้งหมดของถังตกตะกอน เป็นบริเวณที่เป็นส่วนการผสมของน้ำดิบและสารเคมีต่อเนื่องมาจาก flocculation



ภาพที่ 3.10 ถังตกตะกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เมตร จำนวน 18 ถัง โรงผลิตน้ำประปาบางเขน
ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพทางเทคนิคของถังตกตะกอน

ลักษณะ	หน่วย	ถังตกตะกอน
ชนิด	N/A	Slurry Recirculation (Solid Contact Recirculation)
จำนวนถังตกตะกอน	unit	18
เส้นผ่านศูนย์กลาง	meter	58
Clarification rate (ต่อถัง)	CMD	200,000
Prelime feeding (influent)	ppm	5-15
สัดส่วน Alum (influent)	ppm	20-70
สัดส่วน Polyelectrolyte (reaction zone)	ppm	0.03-0.10
ความขุ่น effluent	NTU	5-7
ระบบการแยกตะกอน	N/A	แยกจากกันถังตกตะกอนโดยอัตโนมัติ

หลักการทำงานโดยอาศัยหลักการดังนี้

2.1.1 การเติมสารเคมี

เป็นการเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมกับการตกตะกอนเช่นการเติม ปูนขาว (Pre Lime) เพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เหมาะสมในการตกตะกอนด้วยสารเคมีแต่ละชนิด เติมนคลอรีน (Pre-chlorination) เพื่อกำจัดสี กลิ่น ที่เจือปนในน้ำ ยับยั้งการเคลื่อนที่ของสาหร่าย เติมน้ำมันกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อดูดซับสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำ เป็นต้น ภาพที่ 3.11

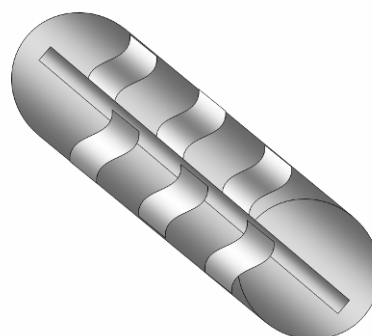
แล้วจึงเติมสารเคมีหลักที่จะจับกับตะกอนขนาดเล็กคือ สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) หรือสารตกตะกอนตัวอื่นๆ เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ PACl ($\text{Al}_n(\text{OH})_m \text{Cl}_{(3n-m)}$) อะลูมิเนียมไฮดรอกซีคลอไรด์ เป็นต้น



ภาพที่ 3.11 จุดเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเติมสารตกตะกอน

2.1.2 การกวนเร็ว (Fast mix)

หลังจากจุดเติมสารเคมี ภายในท่อส่งน้ำจะมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนเพื่อให้สารเคมีจะปลดเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ (destabilization) และกระตุ้นให้เกิดการสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์ (transport of colloidal particles) ให้มากที่สุด โดยมีระยะเวลา (detention time) การกวนเร็ว ประมาณ 1-2 วินาที อัตราการกวน (G-value) ระหว่าง 700-1,500 วินาที⁻¹ การกวนเร็วในระบบผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขนจะอยู่ในท่อส่งน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอน (ภาพที่ 3.12)



ภาพที่ 3.12 ภาพระบบท่อที่ช่วยให้เกิดการปั่นป่วนก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอน

2.1.3 การกวนช้า (Slow mix)

เป็นการรวมตะกอนหรือการสมานตะกอน เป็นขั้นตอนการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ขาดเสถียรภาพแล้ว เกิดการเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งสามารถตกตะกอนได้โดยง่าย โดยใช้ระยะเวลา (Detention time) ประมาณ 20-40 นาที อัตราการกวน (G-value) ระหว่าง 10 – 70 วินาที⁻¹ บางครั้งอาจเรียกว่า ขั้นตอน Flocculation สำหรับโรงงานผลิตน้ำบางเขน การกวนช้าจะอยู่ตอนในของถังตกตะกอนซึ่งเป็นระบบที่ใช้ตะกอนเดิมที่มีอยู่ช่วยจับตะกอนใหม่ให้มีขนาดใหญ่ สามารถตกตะกอนได้รวดเร็วขึ้น (ภาพที่ 3.13)



ภาพที่ 3.13 ด้านในของถังตกตะกอนซึ่งเป็นการกวนช้าเพื่อให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น

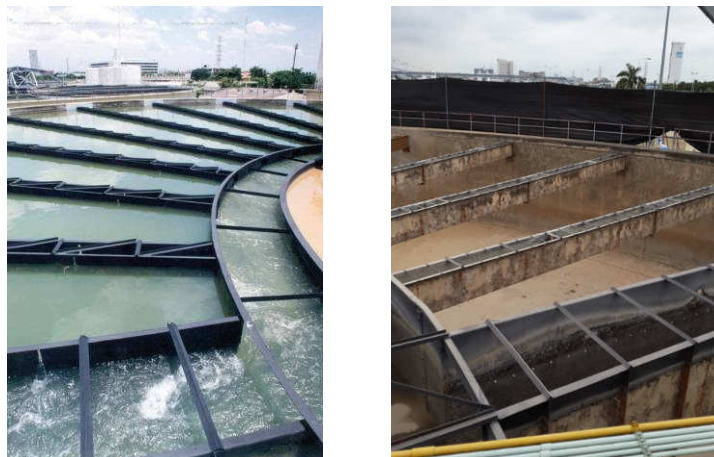
2.1.4 การตกตะกอน (Sedimentation)

ขั้นตอนในการแยกกลุ่มอนุภาคแขวนลอยที่จับตัวกันแขวนลอยอยู่ในน้ำออกจากของเหลวโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยการลดระดับความเร็วของน้ำในการไหลให้ต่ำลงจนถึงจุดที่สารแขวนลอยนั้นจมลง แยกส่วนน้ำใสด้านบนและส่วนตะกอน (sludge) ที่สะสมรวมตัวตกตะกอนอยู่ด้านล่างของถังตกตะกอน น้ำใสด้านบนจะไหลล้นเหนือศูนย์กลาง (radial) เพื่อผ่านเข้าสู่ระบบทางน้ำไหลออก (effluent channel) (ภาพที่ 3.14) เพื่อลำเลียงไปกระบวนการต่อไป



ภาพที่ 3.14 ด้านนอกของถังตกตะกอนซึ่งเป็นพื้นที่การปล่อยให้ตะกอนจมลง และลำเลียงน้ำใสออกไป

การควบคุมระบบผลิตน้ำจะต้องกำกับคุณภาพน้ำที่ออกจากถังตกตะกอน (Clarifier tank) โดยให้มีความขุ่น (turbidity) 7 ± 3 NTU ความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 6.5-8.5 และ ความเป็นด่าง (Alkalinity) ไม่ต่ำกว่า 50 mg/l (ตารางที่ 3.2)



ภาพที่ 3.15 เปรียบเทียบถังตกตะกอนระหว่างการใช้งานและระหว่างการซ่อมบำรุง

2.2 การกรอง (filtration)

การกรองเป็นขั้นตอนในการคัดแยกอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กที่ยังคงหลงเหลืออยู่จากขั้นตอนการตกตะกอนออกจากน้ำโดยการผ่านน้ำเข้าไปยังชั้นกรองซึ่งมีรูพรุน (ภาพที่ 3.16)



ภาพที่ 3.16 ระบบการกรองแบบถังกรองเร็ว

โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีถังกรองจำนวน 48 ชุด มีพื้นที่ 9.4×27.4 ตารางเมตรต่อถัง มีกำลังการผลิต 75,000-100,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อถัง ใช้ดำเนินงานอย่างน้อย 33-36 ถังกรองต่อวัน

วัสดุกรองที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้มี 2 ชนิดคือ แอนทราไซด์หนา 0.8 เมตร และทราย 0.4 เมตร โดยมีหัวกรอง (Nozzle) จำนวน 10,980 หัวต่อถัง เป็นตัวรับน้ำกรองด้านล่าง ซึ่งมีความขุ่นเหลือน้อยกว่า 1.0 NTU เมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องประมาณ 48 ชั่วโมงหรือที่ Head loss ที่ 2.0 เมตร ต้องล้างทำความสะอาดวัสดุกรอง (ภาพที่ 3.17) เพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสม

การควบคุมระบบผลิตน้ำจะต้องกำกับคุณภาพน้ำที่ออกจากถังกรอง (filtration tank) โดยให้มีความขุ่น (turbidity) ไม่เกิน 1 NTU ความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 6.5-8.5 และ สีไม่เกิน 15 TCU (ตารางที่ 3.2)



ภาพที่ 3.17 การล้างระบบกรองของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

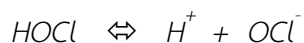
2.3 การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (Disinfection)

แม้ว่าน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกรองแล้วจะมีความใสและดูสะอาดปลอดภัย แต่เนื่องจากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาตั้งแต่รับน้ำดิบจากแหล่งน้ำผ่านขั้นตอนต่างๆ มาจนกระทั่งถึงการกรอง ยังไม่มีขั้นตอนใดที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคในระดับที่ทำให้น้ำมีความปลอดภัยเพียงพอ ดังนั้นจึงยังอาจจะมีจุลินทรีย์ก่อโรคหลงเหลือหรือปนเปื้อนอยู่ ฉะนั้นเพื่อความปลอดภัยและความมั่นใจจึงจะต้องทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคในน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภค

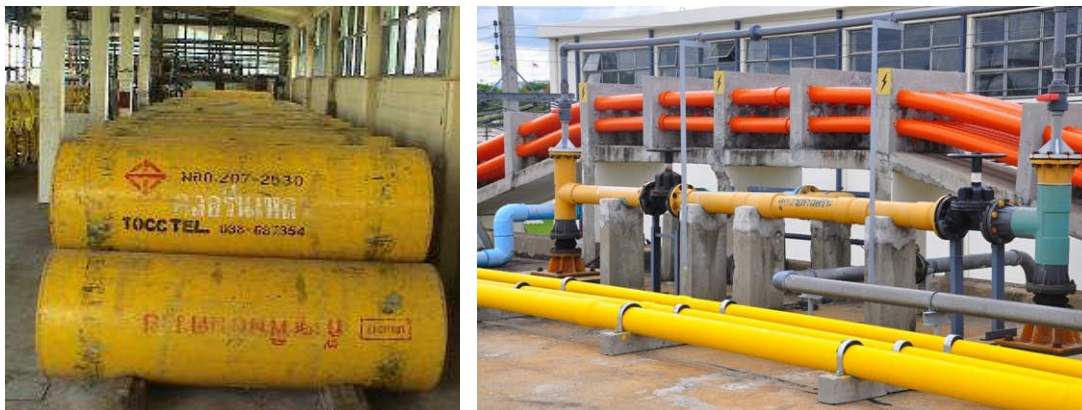
การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคในการผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ใช้คลอรีนในปริมาณที่เหมาะสมเป็นตัวฆ่าเชื้อ ซึ่งจะทำให้น้ำประปาสะอาดปลอดภัยจากเชื้อก่อโรคสามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างปลอดภัย

คลอรีนที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้ คลอรีนก๊าซ (Cl_2) ที่บรรจุในถังอัดความดันซึ่งทำให้อยู่ในลักษณะของเหลว ซึ่งบางครั้งจะเรียก คลอรีนเหลว ซึ่งเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการดังนี้





Cl_2 , HOCl (hypochlorous acid) และ OCl^- (hypochlorite) เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual chlorine) ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันอยู่ที่ สภาพ pH ของน้ำ



ภาพที่ 18 สถานที่เก็บคลอรีนเหลว และจุดจ่ายคลอรีนในโรงงานผลิตน้ำบางเขน

2.4 ถังน้ำใส (clear water tank)

น้ำกรองที่ผ่านการเติมคลอรีนจะถูกส่งเข้าเก็บในถังขนาดใหญ่เรียกว่า ถังน้ำใส (Reservoir) (ภาพที่ 3.19) ก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมแรงสูง 5 เมตร มีความจุ 360,000 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 10 ของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงในแต่ละวันเพื่อสูบส่งและสูบจ่ายไปยังผู้ใช้น้ำประปาต่อไป



ภาพที่ 3.19 ถังน้ำใสทำหน้าที่เป็นคลังเก็บน้ำประปาที่ผ่านการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคแล้ว

3. ระบบสูบส่ง-สูบน้ำจ่ายน้ำประปา (Transmission and distribution)

น้ำประปาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนแล้ว จะถูกสูบส่งและสูบน้ำจ่ายไปยังครัวเรือนผู้ใช้น้ำโดยผ่านทางอุโมงค์ (Tunnel) และ เส้นท่อประปา (Conduit) สถานีสูบส่งจะมี rated capacity per unit ระหว่าง 133-300 CMM ส่วนสถานีสูบน้ำจ่ายจะมี rated capacity per unit ระหว่าง 111-125 CMM

3.1 ระบบส่วนกลาง (Central System) ประกอบด้วย

3.1.1 ระบบอุโมงค์ส่ง (tunnel transmission)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอุโมงค์ส่ง 2.0-3.4 เมตร ระยะทาง 105 กิโลเมตร โดยวางอุโมงค์ให้ลึกจากผิวดินประมาณ 20 เมตร ประกอบด้วย 2 เส้นทาง คือ

3.1.1.1 เส้นทางที่ 1 คือ สถานีสูบส่งที่ 1 ในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนไปสู่สถานีสูบน้ำจ่าย พหลโยธิน ลุมพินี ราษฎร์บูรณะ และท่าพระ ระยะทาง 35 กิโลเมตร

3.1.1.2 เส้นทางที่ 2 คือ สถานีสูบส่งที่ 3 ในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนไปสู่สถานีสูบน้ำจ่าย มินบุรี ลาดกระบัง บางพลี ระยะทาง 70 กิโลเมตร

3.1.2 ระบบท่อส่ง (conduit transmission)

ท่อส่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0-3.4 เมตร ระยะทาง 48 กิโลเมตร โดยวางท่อส่งให้ลึกจากผิวดินประมาณ 4 เมตร เริ่มต้นที่สถานีสูบส่งที่ 2 ในโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนไปสู่สถานีสูบน้ำจ่าย ลาดพร้าว คลองเตยและสำโรง (ภาพที่ 3.20)



ภาพที่ 3.20 สถานีสูบส่งน้ำประปา และ สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

3.2 ระบบท่อส่งย่อย

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อส่งย่อย 500-2,000 มิลลิเมตร ระยะทาง 1,524 กิโลเมตร น้ำประปาเข้าสู่ระบบท่อจ่ายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100-400 มิลลิเมตร ระยะทาง 18,109 กิโลเมตร นอกจากนี้ความยาวท่อบริการจ่ายน้ำรวมทั้งสิ้น 5,813 กิโลเมตร

ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำ

ในช่วงระยะ “การประเมินความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจำนวน 120 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (ตารางที่ 2.1) และในช่วง 6 เดือนสุดท้ายของโครงการซึ่งเป็นช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง” เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 20 ตัวอย่าง/ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ยกเว้นขั้นตอนการสูบส่ง-สูบน้ำเข้าเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพิ่มเติมอีกจำนวน 40 ตัวอย่าง (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างน้ำประปาที่เก็บและวิเคราะห์ในระยะเวลา “การประเมินความเสี่ยง”

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	เดือน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. น้ำดิบ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120
2. การกวนช้า	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120
3. การกรอง	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120
5. การสูบส่ง-สูบน้ำเข้า	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	120
รวม (แต่ละเดือน)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	600

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างน้ำประปาที่เก็บและวิเคราะห์ในระยะเวลา “การจัดการความเสี่ยง”

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	เดือน				รวม
	1	2	3	4	
1. น้ำดิบ	5	5	5	5	20
2. การกวนช้า	5	5	5	5	20
3. การกรอง	5	5	5	5	20
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	5	5	5	5	20
5. การสูบส่ง-สูบน้ำเข้า	10	10	10	10	40
รวม (แต่ละเดือน)	30	30	30	30	120

ตัวอย่างน้ำประปาทั้งหมดใน “ระยะการประเมินความเสี่ยง” และ “ระยะการจัดการความเสี่ยง” จำนวน 600 ตัวอย่าง และ 120 ตัวอย่าง ตามลำดับ รวม 720 ตัวอย่าง (ตารางที่ 3.5) ส่งเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรค จำนวน 5 ชนิดและ 3 ชนิด ตามลำดับ ดังนั้น คิดเป็นจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 5,760 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 สรุปจำนวนตัวอย่างที่เก็บตลอดโครงการ

ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	จำนวนตัวอย่าง
1. น้ำดิบ	140
2. การกวนช้า	140
3. การกรอง	140
4. การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค	140
5. การสูบส่ง-สูบจ่าย	160
รวม	720

อ้างอิงผลการตรวจเชิงคุณภาพการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคกลุ่มแบคทีเรียและกลุ่มโปรโตซัวในตัวอย่างน้ำในขั้นตอนต่างๆ ของการผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน ดังรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3 อย่างไรก็ตาม จากการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนเพิ่มเติมในช่วงระยะ “การจัดการความเสี่ยง” ผลปรากฏว่า ไม่มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำทั้งหมด 120 ตัวอย่าง โดยจำนวนตัวอย่างน้ำที่ให้ผลบวกจากจำนวนตัวอย่างน้ำ 720 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างน้ำที่ให้ผลบวกต่อจุลินทรีย์ก่อโรคจากตัวอย่างน้ำทั้งสิ้น 720 ตัวอย่าง
($n = 140$ ยกเว้น การสูบจ่าย $n = 160$)

ขั้นตอน	แบคทีเรีย				โปรโตซัว		
	<i>V.cholera</i>	<i>Shigella</i>	<i>Salmonella</i>	<i>Campylobacter</i>	<i>E.histolytica</i>	<i>C. parvum</i>	<i>G.lamblia</i>
	<i>O1 & O139</i>						
น้ำดิบ	0	0	27	0	0	0	1
การตกตะกอน	0	0	7	0	0	0	2
การกรอง	0	0	3	0	0	0	2
การทำลายเชื้อ	0	0	0	0	0	0	1
การสูบจ่าย	0	0	0	0	0	0	3

ผลการตรวจวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนรายงานใน 2 รูปแบบ คือ ความชุกเฉลี่ย (mean prevalence : percentage) และความเข้มข้น (concentration : ml^{-1}) ดังแสดงในตารางที่ 3.6-3.7 และ ภาพที่ 3.21-3.22

ตารางที่ 3.6 ระดับการปนเปื้อนแบคทีเรียก่อโรคในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน ($n = 140$ ยกเว้น การสุบจ่าย $n = 160$)

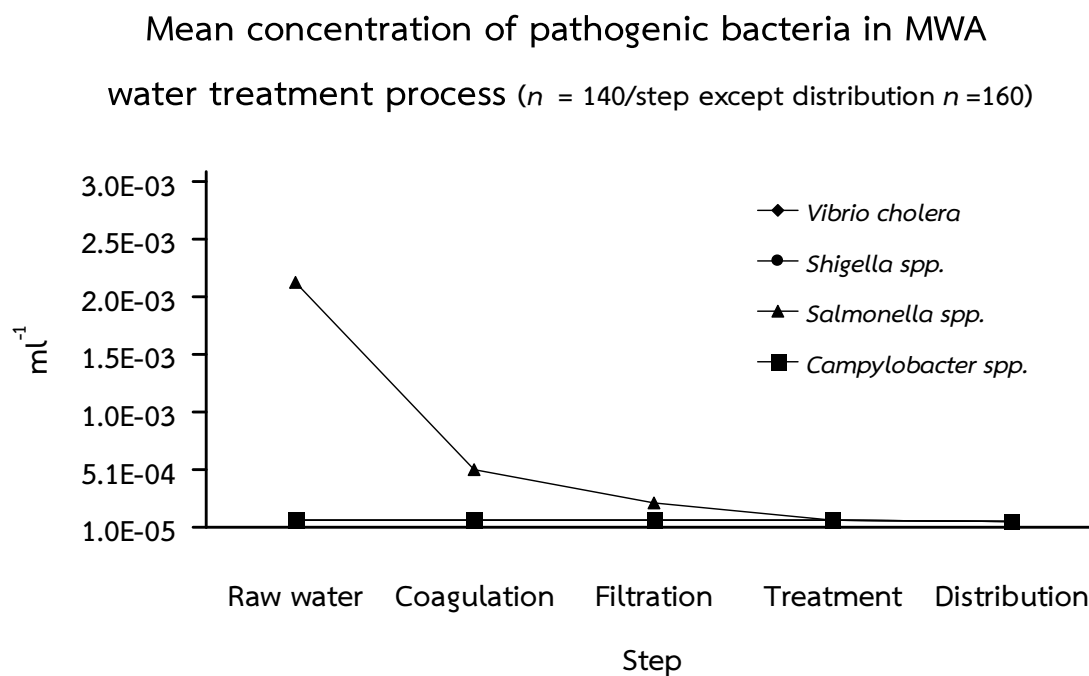
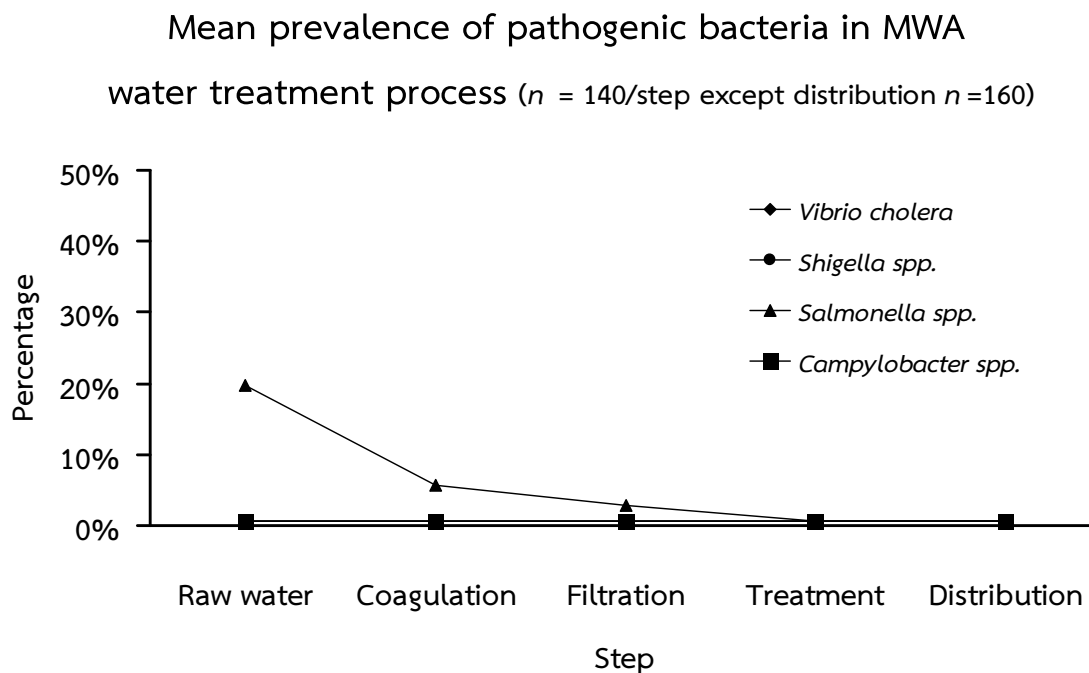
ขั้นตอน	<i>Vibrio cholera</i>		<i>Shigella</i>		<i>Salmonella</i>		<i>Campylobacter</i>	
	Prevalence ¹ (%)	Conc. (ml^{-1})	Prevalence (%)	Conc. (ml^{-1})	Prevalence (%)	Conc. (ml^{-1})	Prevalence (%)	Conc. (ml^{-1})
น้ำดิบ	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}	19.7	2.14×10^{-3}	0.7	7.14×10^{-5}
ตกตะกอน	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}	5.6	5.13×10^{-4}	0.7	7.14×10^{-5}
กรอง	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}	2.8	2.17×10^{-4}	0.7	7.14×10^{-5}
ทำลายเชื้อ	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}	0.7	7.14×10^{-5}
สุบจ่าย	0.5	5.56×10^{-5}	0.5	5.56×10^{-5}	0.5	5.56×10^{-5}	0.5	5.56×10^{-5}

ตารางที่ 3.7 ระดับการปนเปื้อนโปรโตซัวก่อโรคในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน ($n = 140$ ยกเว้น การสุบจ่าย $n = 160$)

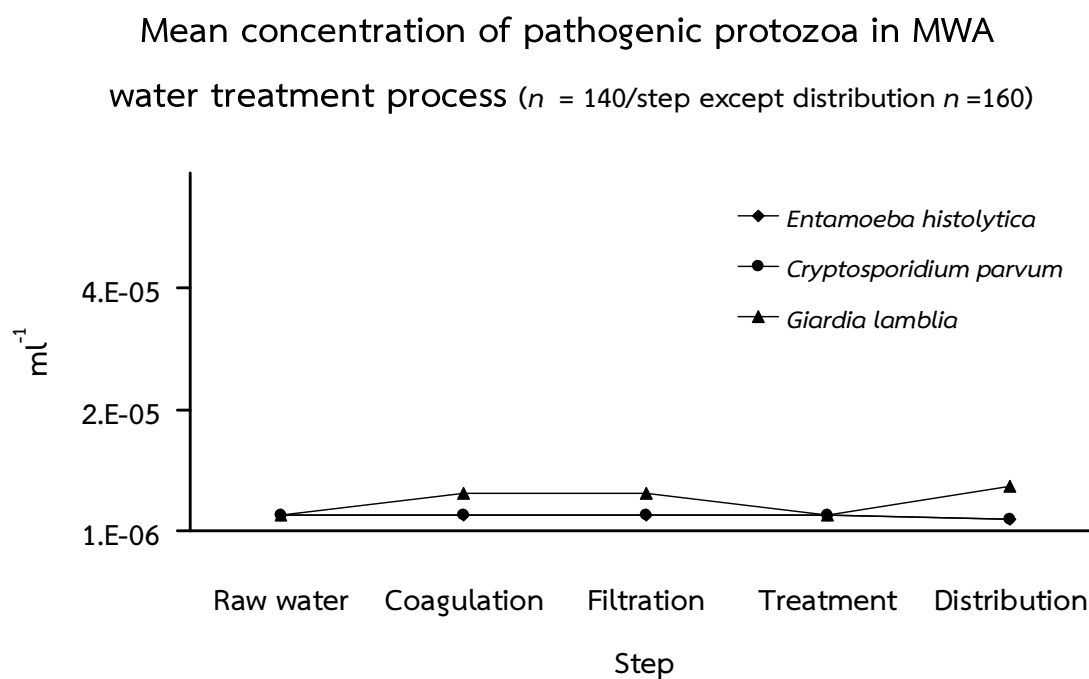
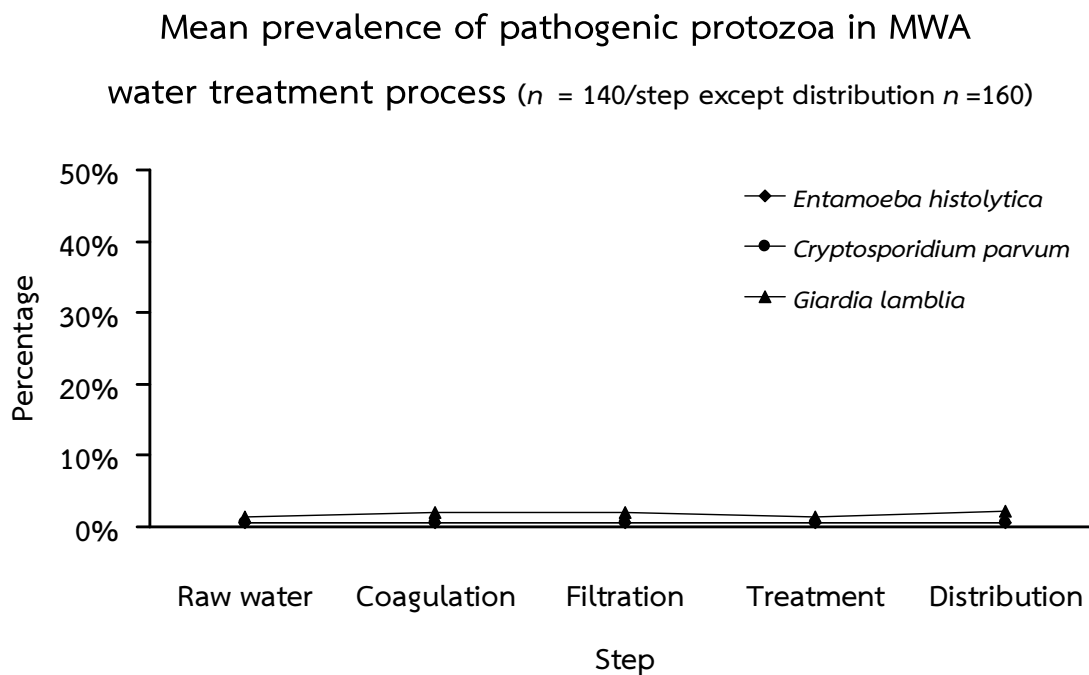
ขั้นตอน	<i>Entamoeba histolytica</i>		<i>Cryptosporidium parvum</i>		<i>Giardia lamblia</i>	
	Prevalence ² (%)	Conc. (ml^{-1})	Prevalence (%)	Conc. (ml^{-1})	Prevalence (%)	Conc. (ml^{-1})
น้ำดิบ	0.70	3.57×10^{-6}	0.70	3.57×10^{-6}	1.41	3.58×10^{-6}
ตกตะกอน	0.70	3.57×10^{-6}	0.70	3.57×10^{-6}	2.11	7.19×10^{-6}
กรอง	0.70	3.57×10^{-6}	0.70	3.57×10^{-6}	2.11	7.19×10^{-6}
ทำลายเชื้อ	0.70	3.57×10^{-6}	0.70	3.57×10^{-6}	1.41	3.58×10^{-6}
สุบจ่าย	0.55	2.78×10^{-6}	0.55	2.78×10^{-6}	2.20	8.40×10^{-6}

¹ ความชุกเฉลี่ยที่คำนวณจาก Beta distribution โปรดศึกษาเพิ่มเติมจากตัวอย่างที่ 1 และ 2

² ความชุกเฉลี่ยที่คำนวณจาก Beta distribution โปรดศึกษาเพิ่มเติมจากตัวอย่างที่ 1 และ 2



ภาพที่ 3.21 ความชุกเฉลี่ยและความเข้มข้นเฉลี่ยของแบคทีเรียก่อโรคในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำ



ภาพที่ 3.22 ความชุกเฉลี่ยและความเข้มข้นเฉลี่ยของโปรโตซัวก่อโรคในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำ

ผลการประเมินความเสี่ยง

ผลการประเมินความเสี่ยงรายงานในรูปของ “อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี” ดังตารางที่ 3.8-3.9

ตารางที่ 3.8 อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี จากน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะชั้นตอนสูบล้างและสูบล้าง จำนวน 160 ตัวอย่าง สาเหตุจากแบคทีเรีย

Bacteria	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Shigella</i>	2.7×10^{-5}	5.08×10^{-2}	1	2	3
<i>Vibrio cholera</i> O1	1.2×10^{-4}	0.33	5	13	17
<i>Vibrio cholera</i> O139	5.0×10^{-4}	0.33	5	13	16
<i>Salmonella</i>	2.9×10^{-4}	0.23	4	9	12
<i>Campylobacter</i>	5.6×10^{-4}	0.42	7	17	21

ตารางที่ 3.8 อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี จากน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะชั้นตอนสูบล้างและสูบล้าง จำนวน 160 ตัวอย่าง สาเหตุจากโปรโตซัว

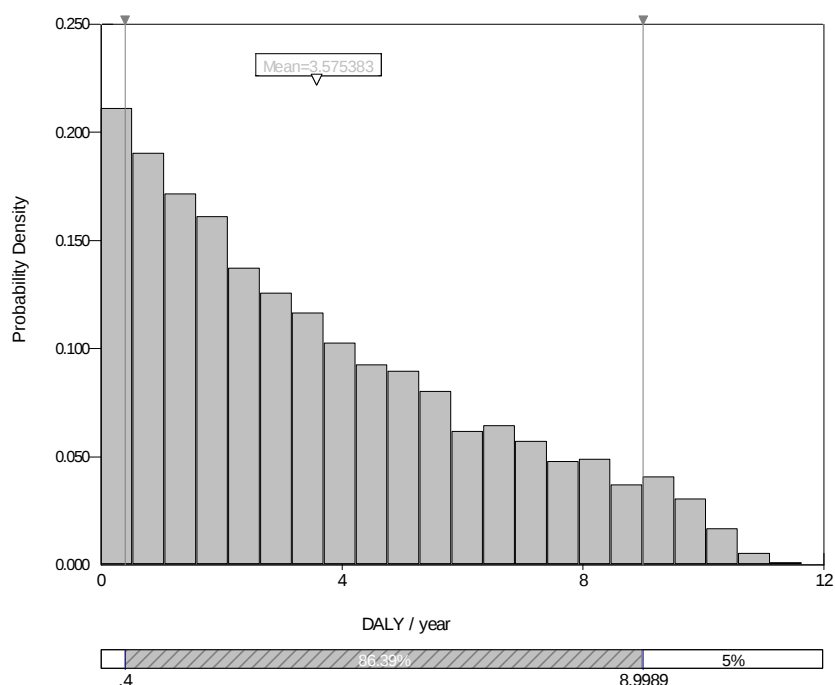
Protozoa	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Cryptosporidium parvum</i>	2.80×10^{-6}	0.03	0.05	0.12	0.16
<i>Giardia lamblia</i>	3.34×10^{-2}	0.31	0.86	1.55	1.96
<i>Entamoeba histolytica</i>	2.84×10^{-5}	0.16	0.24	0.61	0.77

ผลการประเมินความเสี่ยงโดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ โดยรายงานในรูปของ DALY/year จากน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบส่งและสูบจ่าย ดังตารางที่ 3.9-3.10 และ ภาพที่ 3.23-3.24 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาจากโรงงานบางเขน (DALY/year) โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) ของแบคทีเรีย

Bacteria	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Shigella</i>	9.77×10^{-13}	1.83×10^{-9}	2.79×10^{-8}	6.97×10^{-8}	9.50×10^{-8}
<i>Vibrio cholera</i> O1	4.24×10^{-12}	1.20×10^{-8}	1.86×10^{-7}	4.65×10^{-7}	5.98×10^{-7}
<i>Vibrio cholera</i> O139	1.81×10^{-11}	1.20×10^{-8}	1.86×10^{-7}	4.66×10^{-7}	5.85×10^{-7}
<i>Salmonella</i>	1.18×10^{-11}	9.48×10^{-9}	1.47×10^{-7}	3.69×10^{-7}	4.77×10^{-7}
<i>Campylobacter</i>	2.03×10^{-11}	1.53×10^{-8}	2.38×10^{-7}	5.95×10^{-7}	7.67×10^{-7}

จากตัวอย่างน้ำประปาจำนวน 160 ตัวอย่าง
เกณฑ์ความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$



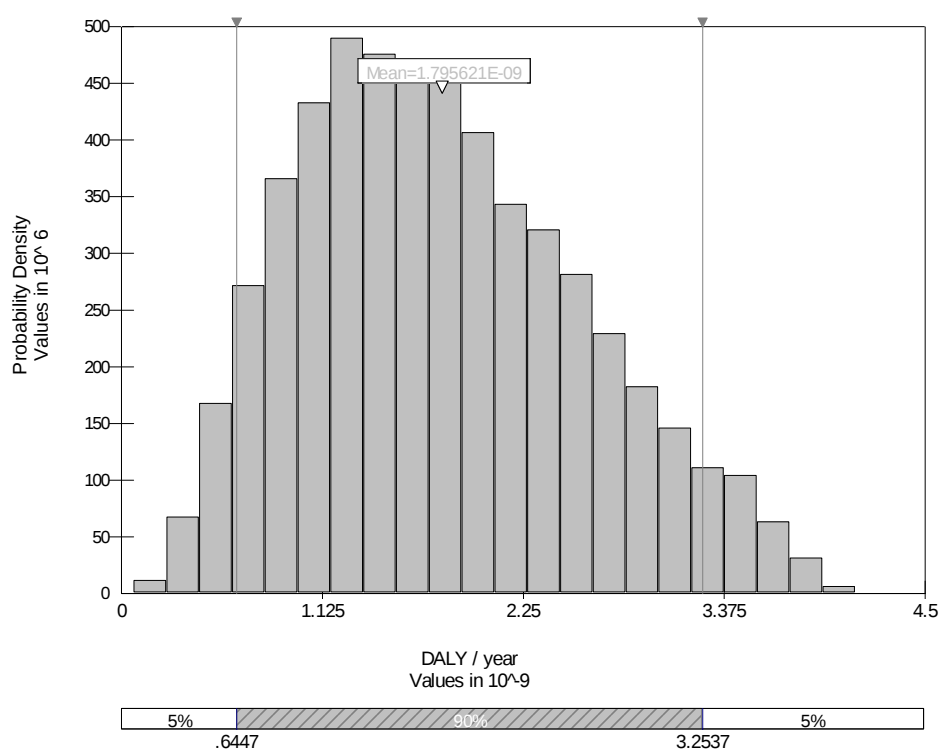
ภาพที่ 3.23 ผลการจำลองเหตุการณ์จริง (simulation) ของ DALY/year ของ *Salmonella* ในน้ำประปา

ตารางที่ 3.10 ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาจากโรงงานบางเขน (DALY/year) โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) ของโปรโตซัว

Protozoa	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Cryptosporidium parvum</i>	7.84×10^{-15}	8.93×10^{-12}	1.38×10^{-10}	3.45×10^{-10}	4.36×10^{-10}
<i>Giardia lamblia</i>	7.01×10^{-11}	6.45×10^{-10}	1.80×10^{-9}	3.25×10^{-9}	4.11×10^{-9}
<i>Entamoeba histolytica</i>	7.95×10^{-14}	4.35×10^{-11}	6.78×10^{-10}	1.70×10^{-9}	2.15×10^{-9}

จากตัวอย่างน้ำประปาจำนวน 160 ตัวอย่าง

เกณฑ์ความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$



ภาพที่ 3.24 ผลการจำลองเหตุการณ์จริง (simulation) ของ DALY/year ของ *Giardia lamblia* ในน้ำประปา

เกณฑ์ความปลอดภัยของน้ำประปาที่กำหนดขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$ ในขณะที่ DALY/year ของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ ระหว่าง 9.77×10^{-13} ถึง 7.67×10^{-7} และ ระหว่าง 7.84×10^{-15} ถึง 4.11×10^{-9} ตามลำดับ ดังนั้น ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงได้มาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก

แบบจำลองการปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

(Microbial contamination models in drinking-water treatment process)

วัตถุประสงค์สำคัญในการสร้างแบบจำลองการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา คือ การกำหนด “เป้าหมายสุขภาพ” หรือ Health-based target การผลิตน้ำประปา ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (ขอให้ศึกษาเรื่อง เป้าหมายสุขภาพ เพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป)

การสร้างแบบจำลองการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่สอดคล้องกับเป้าหมายสุขภาพ คือ การกำหนด “เป้าหมายประสิทธิภาพ” หรือ Performance target ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา โดยอ้างอิงระดับความเสี่ยงหนึ่ง (reference level of risk) เป็นค่าเริ่มต้น เพื่อเป็นแนวทางในการเฝ้าระวังการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ดังตัวอย่างแบบง่าย ๆ เพื่อประกอบความเข้าใจ ดังต่อไปนี้

1. หากกำหนดให้ risk of illness per day ($P_{ill,d}$) ที่ระดับ 2.6×10^{-6} เป็นระดับความเสี่ยงอ้างอิง
2. ความเสี่ยงเป็นผลคูณ ของความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วย/เซลล์จุลินทรีย์ก่อโรค (r) และ จำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับ/วัน (E) ดังนี้

$$Risk = r \times E$$

Risk คือ ค่าประมาณความเสี่ยง/วัน

r คือ ความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วย/เซลล์จุลินทรีย์ก่อโรค $= 2.0 \times 10^{-1}$

E คือ จำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับ/วัน $= 1.3 \times 10^{-5}$ เซลล์/วัน

3. กำหนดให้การบริโภคน้ำเป็น 1.0 ลิตร/วัน
4. ทำให้คำนวณได้จุลินทรีย์ก่อโรคความเข้มข้น 1.3×10^{-5} เซลล์/ลิตร $= -4.89 \log$ เซลล์/ลิตร
5. หากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาสามารถลดความเข้มข้นจุลินทรีย์ได้ $4.89 \log$ เซลล์/ลิตร ดังนั้น น้ำดิบในการผลิตประปาจะอนุโลมให้มีจุลินทรีย์ก่อโรคได้ < 1 เซลล์ ในขณะที่ หากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาสามารถลดความเข้มข้นจุลินทรีย์ได้ $5.89 \log$ เซลล์/ลิตร ดังนั้น น้ำดิบในการผลิตประปาจะอนุโลมให้มีจุลินทรีย์ก่อโรคได้ < 10 เซลล์
6. ทั้งนี้ มิได้หมายความว่า การผลิตน้ำประปาจะต้องสามารถแยก³ (remove) หรือ ทำลาย (inactivate) จุลินทรีย์ก่อโรคให้ได้มากถึง $5.89 \log$ เซลล์/ลิตร เพียงขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งเท่านั้น แต่อาจจะเป็นผลรวมของการแยก (removal) หรือการทำลาย (inactivation) จุลินทรีย์ของทุกขั้นตอนการผลิตน้ำประปารวมกันก็ได้ เช่น

ก. ขั้นตอน coagulation	แยกจุลินทรีย์ได้	3.0 log เซลล์/ลิตร
ข. ขั้นตอน sedimentation	แยกจุลินทรีย์ได้	1.0 log เซลล์/ลิตร
ค. ขั้นตอน filtration	แยกจุลินทรีย์ได้	1.0 log เซลล์/ลิตร
ง. ขั้นตอน disinfection	ทำลายจุลินทรีย์ได้	0.89 log เซลล์/ลิตร
จ. รวมทุกขั้นตอน	แยกและทำลายได้	5.89 log เซลล์/ลิตร
7. ดังนั้นหากน้ำดิบมีจุลินทรีย์ปนเปื้อน 10 เซลล์/ลิตร หรือ 1 log เซลล์/ลิตร และผ่านขั้นตอนการผลิตน้ำประปาดังข้อที่ผ่านมา ก็จะทำให้น้ำประปามีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ 1.3×10^{-5}

³ การกำจัด (elimination) หรือ การลด (reduction) หมายถึง ทั้ง การแยก (removal) และ การทำลาย (inactivation or disinfection)

เซลล์/ลิตร เทียบเท่ากับ $-4.89 \log$ เซลล์/ลิตร ดังข้อ (4) และเมื่อนำไปคำนวณต่อเนื่องก็จะได้ความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วย/เซลล์จุลินทรีย์ก่อโรค $= 2.0 \times 10^{-1}$ และ จำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคที่ได้รับ/วัน $= 1.3 \times 10^{-5}$ เซลล์/วัน และสอดคล้องกับค่า risk of illness per day ($P_{ill,d}$) ที่ระดับ 2.6×10^{-6} ซึ่งเป็นระดับความเสี่ยงอ้างอิงนั่นเอง

8. หากต้องการกำหนด “เป้าคุณภาพน้ำ” หรือ ความเข้มข้นจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาตามตัวอย่าง ก็จะเป็นดังนี้

ก. น้ำดิบ ณ จุดเริ่มต้น	ไม่เกิน	$1.0 \log = 10$	เซลล์/ลิตร
ข. น้ำผ่านขั้นตอน coagulation	ไม่เกิน	$-2.0 \log = 0.01$	เซลล์/ลิตร
ค. น้ำผ่านขั้นตอน sedimentation	ไม่เกิน	$-3.0 \log = 0.001$	เซลล์/ลิตร
ง. น้ำผ่านขั้นตอน filtration	ไม่เกิน	$-4.0 \log = 0.0001$	เซลล์/ลิตร
จ. น้ำผ่านขั้นตอน disinfection	ไม่เกิน	$-4.89 \log = 0.00013$	เซลล์/ลิตร หรือเท่ากับ 1.3×10^{-5} เซลล์/ลิตร ดังข้อ (3)

9. หากต้องการกำหนด “เป้าคุณภาพน้ำ” ตามข้อ (8) ข. ถึงข้อ (8) จ. ก็จะเทียบเท่ากับ การตรวจไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ก. ตัวอย่างน้ำที่ผ่านขั้นตอน coagulation	ปริมาตร	100 ลิตร
ข. ตัวอย่างน้ำที่ผ่านขั้นตอน sedimentation	ปริมาตร	1,000 ลิตร
ค. ตัวอย่างน้ำที่ผ่านขั้นตอน filtration	ปริมาตร	10,000 ลิตร
ง. ตัวอย่างน้ำที่ผ่านขั้นตอน disinfection	ปริมาตร	76,923 ลิตร

เนื่องจาก ผลการวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคตลอด 10 เดือนที่ผ่านมา พบการปนเปื้อนของโปรโตซัว คือ *Giardia lamblia* และ แบคทีเรีย คือ *Salmonella* spp. เท่านั้น ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา จะครอบคลุมจุลินทรีย์ก่อโรคทั้ง 2 ชนิดนี้

แบบจำลองในการจำลองเหตุการณ์เพื่อการลดโปรโตซัวในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments)

การสร้างแบบจำลองในการจำลองเหตุการณ์เพื่อการกำจัดหรือลดจำนวนโปรโตซัวในขั้นตอนต่างๆของการผลิตน้ำประปา จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ

1. การสร้างแบบจำลองทั่วไป (Generic modeling) เป็นขั้นตอนในการสืบค้นหรือพัฒนาแบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์ก่อโรคในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ซึ่งแบบจำลองทั่วไปที่ได้นี้ จะประกอบด้วย ตัวแปร (ปัจจัยหรือพารามิเตอร์) ที่ทำหน้าที่ ในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ก่อโรคในแต่ละขั้นตอนเท่านั้น
2. การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง (Model parameterization) หลังจากที่ได้แบบจำลองทั่วไปที่มีพารามิเตอร์ (parameter) ของแบบจำลองนั้นแล้ว จึงเป็นการนำแบบจำลองทั่วไปที่ได้มาเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง (fitting model to data) ดังนั้นแบบจำลองที่ได้ก็จะมีเฉพาะ (specific) กับขั้นตอนและการทำงานจริงในทางปฏิบัติของการผลิตน้ำประปา

น้ำดิบ

(Raw water)

ระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst ในน้ำดิบจะเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจาก เป็นค่าเริ่มต้นของการปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาแล้ว อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนอาจจะไม่มีความสมบูรณ์แบบ หมายความว่า วิธีการตรวจวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถตรวจหาระดับการปนเปื้อนทั้งหมดหรือระดับการปนเปื้อนที่แท้จริง (true concentration) ของ *Giardia* cyst ได้ หรือ เกิดมี ผลลบลวง (False negative) ขึ้นมา สาเหตุหนึ่งของการเกิดผลลบลวงในการตรวจพบโปรโตซัว คือ ความเป็นกรดต่าง (pH) (Kuhn et al., 2002) ดังนั้น จึงควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อชดเชยจำนวนโปรโตซัวโดยใช้ความไวของการวิเคราะห์ (sensitivity of the test) หรือบางครั้งเรียกว่า อัตราการชดเชย (recovery rate) มาใช้ในการคำนวณด้วย

1. การแจกแจงความน่าจะเป็นที่ใช้ในการหาผลลบลวง (False negative) คือ การแจกแจงแบบทวินามนิเสธ (Negative binomial distribution) ดังนี้

$$\text{Negative binomial} (s, p) \quad (3.1)$$

โดย s คือ ระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst ในน้ำดิบ

p คือ ความไวของการทดสอบ (sensitivity)

สำหรับความไวของการวิเคราะห์การปนเปื้อน *Giardia* cyst จะอาศัยความไวของการวิเคราะห์การปนเปื้อนของ *Cryptosporidium* oocyst (Pouillot et al., 2004)

2. การแจกแจงความน่าจะเป็นในการอธิบาย ความไวของการวิเคราะห์ (sensitivity of the test) คือ การแจกแจงเบต้า (Beta distribution) ดังนี้

$$\text{Beta} (\alpha, \beta) \quad (3.2)$$

โดยทั่วไปแล้ว อาจจะคุ้นเคยกับการใช้การแจกแจงเบต้าในการอธิบายความชุก (prevalence) โดย

alpha (α) คือ จำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวก (positive result) ส่วน beta (β) คือ จำนวนตัวอย่างที่ให้ผลลบ (negative result)

ผลการศึกษา พบว่า ความไวของการวิเคราะห์การปนเปื้อนมีค่าเฉลี่ย (average) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ร้อยละ 41 (0.41) และ 0.18 ตามลำดับ เมื่อนำมาเทียบกับ Beta distribution จะได้ค่าของพารามิเตอร์ alpha และ beta เป็น 2.65 และ 3.64 ตามลำดับ ดังสมการ (3) (Pouillot et al., 2004) ดังนี้

$$Beta(2.65, 3.64) \quad (3.3)$$

3. การแจกแจงของระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst ในน้ำดิบ สามารถจะเลือกใช้การแจกแจงชนิด Poisson หรือ การแจกแจงชนิด Log Normal ก็ได้ โดยความเข้มข้นเฉลี่ย (mean concentration) คือ 0.00000358 (3.58×10^{-6}) cysts/mL จากข้อมูลตารางที่ 3.7 โดยบางการศึกษาจะเลือกใช้การแจกแจงชนิด Poisson (Cummins et al., 2010) เนื่องจาก ไม่จำเป็นต้องกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเข้มข้นเฉลี่ยของ *Giardia* cyst อยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ 3.58×10^{-6} cysts/mL หรือ 3.58×10^{-3} cysts/L จึงปรับจำนวน *Giardia* cyst ต่อปริมาตรน้ำที่มากขึ้นมา แส่นเท่า ($\times 10^5$) ได้เป็น 358 cysts/100,000 L ดังสมการ (3.4) ดังนี้

$$Poisson(418) \quad (3.4)$$

4. เมื่อแทนค่าของการแจกแจงความน่าจะเป็นของทั้งความเข้มข้นเฉลี่ยของ *Giardia* cysts คือ Poisson distribution และ ความไวของการวิเคราะห์ คือ Beta distribution ลงไปในการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบทวินามนิเสธ จะได้การแจกแจง ดังสมการ (3.5) ดังนี้

$$Negative\ binomial(Poisson(358), Beta(2.65, 3.64)) \quad (3.5)$$

ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในน้ำดิบหลังการชดเชยความไวในการวิเคราะห์ประมาณ 419 cysts/ 100,000 L

ขั้นตอนการผลิตที่ 1

(Primary treatment)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1 จะเป็นการกรองสิ่งปนเปื้อนที่หยาบหรือมีขนาดใหญ่ออกจากน้ำดิบ อาจประกอบด้วยหลายๆ ขั้นตอนย่อย คือ การกักเก็บ (storage) การปรับสภาพ (pre-conditioning) และการใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination) เนื่องจาก การศึกษาครั้งนี้ไม่มีการเก็บตัวอย่างจากน้ำที่ผ่านจากขั้นตอนการผลิตที่ 1 ดังนั้น จึงถือว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในน้ำ

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การรายงานมีความสมบูรณ์ จึงได้นำเสนอแบบจำลองทั่วไปของขั้นตอนการผลิตที่ 1 โดยปราศจากการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลองทั่วไป (Model parameterization)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1 จะมีการแยก (removal) *Giardia* cyst ออกจากน้ำดิบในฐานร้อยละ เรียกว่า decimal reduction (DR) ซึ่ง DR จะคำนวณอย่างต่อเนื่องโดยอาศัย การลดจำนวน *Giardia* cyst ในลักษณะ log ฐาน 10 ($\log_{10}$) ดังนี้

$$DR = 1 - 10^{-LR} \quad (3.6)$$

โดย

DR คือ Decimal reduction

LR คือ $\log_{10}$ reduction

ตัวอย่างที่ 1 หากขั้นตอนการคัดกรอง (screening) สามารถลดจำนวน *Giardia* จาก 1,000 cysts/L เหลือ 10 cysts/L เมื่อคำนวณจำนวน cyst ในลักษณะ $\log$ ฐาน 10 จะได้เป็น

- จำนวน cyst ก่อนผ่านขั้นตอน = 1,000 หรือ 3 $\log_{10}$ cysts/L

- จำนวน cyst หลังผ่านขั้นตอน = 10 หรือ 1 $\log_{10}$ cysts/L

ดังนั้น $\log_{10}$ reduction (LR) = 2 $\log_{10}$ cysts/L

เมื่อแทนค่า LR = 2 $\log_{10}$ cysts/L ลงในสมการ

$$DR = 1 - 10^{-2} = 0.99$$

ดังนั้น decimal reduction (DR) จะได้ 0.99 หรือ ร้อยละ 99 หรือ 99.0 %

ตัวอย่างที่ 2 หากขั้นตอนการคัดกรอง (screening) สามารถลดจำนวน *Giardia* จาก 1,000 cysts/L เหลือ 1 cysts/L เมื่อคำนวณจำนวน cyst ในลักษณะ $\log$ ฐาน 10 จะได้เป็น

- จำนวน cyst ก่อนผ่านขั้นตอน = 1,000 หรือ 3 $\log_{10}$ cysts/L

- จำนวน cyst หลังผ่านขั้นตอน = 1 หรือ 0 $\log_{10}$ cysts/L

ดังนั้น $\log_{10}$ reduction (LR) = 3 $\log_{10}$ cysts/L

เมื่อแทนค่า LR = 3 $\log_{10}$ cysts/L ลงในสมการ

$$DR = 1 - 10^{-3} = 0.999$$

ดังนั้น decimal reduction (DR) จะได้ 0.99 หรือ ร้อยละ 99.9 หรือ 99.9 %

แต่ละขั้นตอนย่อยของการผลิตน้ำขั้นตอนที่ 1 สามารถลดจำนวน *Giardia* cyst ได้ด้วยประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน โดยรายงานในรูปของ decimal reduction (DR) โดยขั้นตอนที่มีศักยภาพในการลดจำนวน *Giardia* cyst ประกอบด้วย

1. การคัดกรอง (screening) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : S_c
 2. การกักเก็บ (storage) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : S_t
 3. การปรับสภาพ (pre-conditioning) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : P_c
 4. การใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : P_{pre-cl}
- แบบจำลองทั่วไปสำหรับการลด *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 1 ดังนี้

$$C_{ppt} = C_T \times (1 - S_c) \times (1 - S_t) \times (1 - P_c) \times (1 - P_{pre-cl}) \quad (7)$$

โดย

C_{ppt} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)

C_T	คือ ความเข้มข้นของ <i>Giardia</i> cyst ที่แท้จริงในน้ำดิบ	(true concentration)
Sc	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การคัดกรอง	(screening)
St	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การกักเก็บ	(storage)
Pc	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การปรับสภาพ	(pre conditioning)
$Ppre-cl$	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การใส่คลอรีนขั้นต้น	(pre-chlorination)

ข้อสังเกตของแบบจำลองทั่วไปนี้ คือ

1. แบบจำลองจะใช้ค่าที่คำนวณได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้เป็นค่าเริ่มต้น ในที่นี้ ค่าเริ่มต้น คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cysts ที่แท้จริงในน้ำดิบ คือ Poisson (491) และตามแบบจำลองต่อมาก็จะมีการปรับค่าของความเข้มข้น *Giardia* cyst ตามขั้นตอนย่อยๆ ของขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 1 ตามลำดับ

2. ประสิทธิภาพของการลด *Giardia* cyst จะเป็นลักษณะของการสะสม (cumulative) ของแต่ละขั้นตอนย่อยๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งสอดคล้องกับ multiple-barrier concept ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ “ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโปรโตซัว” ข้างต้นแล้ว

ขั้นตอนการผลิตที่ 2

(Secondary treatment)

การเก็บตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ประกอบด้วย

- การสร้างตะกอน (coagulation) และ การรวมตะกอน (flocculation)
- การกรอง (filtration)

แบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ *Giardia* cyst มีลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนการผลิตที่ 1 กล่าวคือ

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (1 - CF) \times (1 - F) \quad (3.8)$$

โดย

C_{pst}	คือ ความเข้มข้นของ <i>Giardia</i> cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)
C_{ppt}	คือ ความเข้มข้นของ <i>Giardia</i> cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)
CF	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การสร้าง/รวมตะกอน (coagulation/flocculation)
F	คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การกรอง (filtration)

จากข้อมูลตารางที่ 3.7 ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในน้ำที่ผ่านการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation and flocculation) และความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในน้ำที่ผ่านการกรอง (filtration) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง คือ 719 cysts/ 100,000 L

การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation/flocculation)

1. คำนวณ Log reduction (LR_{CF})

○ ความเข้มข้น <i>Giardia</i> cyst จากขั้นตอนการผลิตที่ 1	574	cysts/100,000 L
	หรือ 2.69	log cysts/100,000 L

○ ความเข้มข้น *Giardia* cyst จากการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน 719 cysts/100,000 L

หรือ 2.85 log cysts/100,000 L

○ Log reduction (2.85 log – 2.69 log) -0.166 log cysts/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_{CF})

$$DR_{CF} = 1 - 10^{-LR_{CF}}$$

$$DR_{CF} = 1 - 10^{-(-0.166)} = -0.464$$

ข้อสังเกต โดยทั่วไปแล้ว ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในขั้นตอนถัดไปควรจะมีระดับที่ลดลง ตรงกับความหมายของทั้ง log reduction และ decimal reduction ซึ่งจะได้ค่าของทั้ง log reduction และ decimal reduction ที่เป็นบวก (positive) อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลการวิเคราะห์ *Giardia* cyst จากขั้นตอนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน ปรากฏว่า ความเข้มข้น *Giardia* cyst มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงทำให้ทั้ง log reduction และ decimal reduction มีค่าเป็นลบ (negative)

การกรอง (filtration)

1. คำนวณ Log reduction (LR_F)

○ ความเข้มข้น *Giardia* cyst จากการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน 719 cysts/100,000 L

หรือ 2.85 log cysts/100,000 L

○ ความเข้มข้น *Giardia* cyst จากการกรอง 719 cysts/100,000 L

หรือ 2.85 log cysts/100,000 L

○ Log reduction (2.85 log – 2.85 log) 0.00 log cysts/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_F)

$$DR_F = 1 - 10^{-LR_F}$$

$$DR_F = 1 - 10^{-(0.0)} = 0.0$$

ข้อสังเกต เนื่องจากความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในขั้นตอนถัดไปมีระดับคงที่ (ตารางที่ 3.7) ทำให้ค่า log reduction และ decimal reduction ที่ได้เป็นศูนย์ (zero)

แบบจำลองของความเข้มข้น *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 2

เมื่อแทนค่าของ $DR_{CF} = -0.464$ และ $DR_F = 0$ ที่ได้จากการวิเคราะห์การปนเปื้อนลงในสมการ (3.8) ก็จะได้แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ดังนี้

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (1 - (-0.464)) \times (1 - 0)$$

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (1.464)$$

$$C_{pst} = 1.464 C_{ppt}$$

โดย

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

C_{ppt} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)

จากแบบจำลองอาจจะสรุปได้ว่า ขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 2 (การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน ผนวกกับขั้นตอนการกรอง) ทำให้ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst เพิ่มขึ้น 1.464 หรือ ~ 1.5 เท่าจากการขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 1

ขั้นตอนการผลิตที่ 3

(Tertiary treatment)

ตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตที่ 3 เป็นตัวอย่างน้ำในถังน้ำใส (clear well) ซึ่งผ่านการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (inactivation) ด้วยคลอรีนมาแล้ว

แบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ *Giardia* cyst มีลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนการผลิตที่ 1 กล่าวคือ

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - D) \quad (9)$$

โดย

C_{ptt} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 3 (post tertiary treatment)

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

D คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การใส่คลอรีน (chlorination)

จากข้อมูลตารางที่ 3 ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในน้ำที่ผ่านการใส่คลอรีน (chlorination) คือ 418 cysts/ 100,000 L

1. คำนวณ Log reduction (LR_D)

- ความเข้มข้น *Giardia* cyst จากขั้นตอนการผลิตที่ 2

719 cysts/100,000 L

หรือ 2.85 log cysts/100,000 L
- ความเข้มข้น *Giardia* cyst จากการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคด้วยคลอรีน 358

cysts/100,000 L

หรือ 2.55 log cysts/100,000 L

O Log reduction (2.85 log – 2.55 log) 0.303 log cysts/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_D)

$$DR_D = 1 - 10^{-LR_D}$$

$$DR_D = 1 - 10^{-(0.303)} = 0.502$$

แบบจำลองของความเข้มข้น *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 3

เมื่อแทนค่าของ $DR_D = 0.502$ ที่ได้จากการวิเคราะห์การปนเปื้อนลงในสมการ (9) ก็จะได้แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ดังนี้

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - D)$$

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - 0.502)$$

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (0.498)$$

$$C_{ptt} = 0.498 C_{pst}$$

โดย

C_{ptt} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 3 (post tertiary treatment)

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

จากแบบจำลองอาจจะสรุปได้ว่า ขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 3 (การทำลายจุลินทรีย์ด้วยคลอรีน) ทำให้ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ลดลงประมาณร้อยละ 50 จากการขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 2

การสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของ *Giardia lamblia* ในทุกขั้นตอนการผลิตน้ำประปาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดโปรโตซัวในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา
Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments

Stage	Symbol	Description	Model/distribution	Variable value	Unit	log concentration
Source water	Crw	Cysts in raw water	Poisson(358)	358	C/100,000 L	
	Cw	Variability of cyst in raw water			C/100,000 L	
	Rr	Recovery rate	Beta(2.65, 3.64)	0.421	Factor	
	C _T	True number of cysts	Negbin [Poisson(417), Beta(2.65,3.64)]	491	C/100,000 L	2.76
Primary Treatment	Sc	Decimal Reduction of Screening	0	0	Decimal reduction	
	St	Decimal Reduction of Storage	0	0	Decimal reduction	
	Pc	Decimal Reduction of Pre-conditioning	0	0	Decimal reduction	
	Ppre-cl	Decimal Reduction of Pre-chlorination	0	0	Decimal reduction	
	C _{PPT}	Post primary treatment	C _T x (1-(Sc) x (1-St) x (1-Pc) x (1-Ppre-cl)	491	C/100,000 L	2.76

ตารางที่ 3.11 แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดโปรโตซัวในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (ต่อ)

Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments (continued)

Stage	Symbol	Description	Model/distribution	Variable value	Unit	log concentration
Secondary treatment	CF	Decimal Reduction of Coagulation/Flocculation	$1 - 10^{(-LR_{CF})}$	-0.464	Decimal reduction	
	C_{CF}	Concentration after Coagulation/Flocculation	N/A	719	C/100,000 L	2.92
	LR_{CF}	Log reduction of Coagulation/Flocculation	$\log(C_{PPT}) - \log(C_{CF})$	-0.166	log	
	F	Decimal Reduction of Filtration	$1 - 10^{(-LR_F)}$	0	Decimal reduction	
	C_F	Concentration after Filtration	N/A	719	C/100,000 L	2.92
	LR_F	Log reduction of Filtration	$\log(C_{CF}) - \log(C_F)$	0	log	
	C_{PST}	Post secondary treatment	$C_{PPT} \times (1 - CF) \times (1 - F)$	719	C/100,000 L	2.92
Tertiary treatment	Ppost-cl	Decimal Reduction of Post chlorination	$1 - 10^{(-LR_D)}$	0.502	Decimal reduction	
	C_D	Concentration after Disinfection	N/A	358	C/100,000 L	2.62
	LR_D	Log reduction of Disinfection	$\log(C_F) - \log(C_D)$	0.303	log	
	C_{PTT}	Post tertiary treatment	$C_{PST} \times (1 - D)$	358	C/100,000 L	2.62

แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดซัลโมเนลลาในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (Models simulating protozoa reduction in drinking water treatments)

การสร้างแบบจำลองเพื่อการจำลองเหตุการณ์ในการกำจัดซัลโมเนลลาในขั้นตอนต่างๆของการผลิตน้ำประปา จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การสร้างแบบจำลองทั่วไป (Generic modeling) เป็นขั้นตอนในการสืบค้นหรือพัฒนาแบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ซึ่งแบบจำลองทั่วไปที่ได้นี้ประกอบด้วยตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ทำหน้าที่กำหนดการลดลงของจุลินทรีย์ในแต่ละขั้นตอนเท่านั้น
2. การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง (Model parameterization) หลังจากที่ได้แบบจำลองทั่วไปที่มีพารามิเตอร์ (parameter) ของแบบจำลองนั้นแล้ว จึงเป็นการนำแบบจำลองทั่วไปที่ได้มาเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง (fitting model to data)⁴ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้ก็就会有ความจำเพาะ (specific) กับขั้นตอนและการทำงานจริงในทางปฏิบัติของการผลิตน้ำประปา

น้ำดิบ

(Raw water)

ระดับการปนเปื้อนของซัลโมเนลลา ในน้ำดิบจะเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจาก เป็นค่าเริ่มต้นของการปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาแล้ว อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนอาจจะไม่มีความสมบูรณ์แบบ หมายความว่า วิธีการตรวจวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถตรวจหาระดับการปนเปื้อนทั้งหมดหรือระดับการปนเปื้อนที่แท้จริง (true concentration) ของซัลโมเนลลาได้ หรือ เรียกว่า ผลลบลง (False negative) อย่างไรก็ตาม วิธีการตรวจวิเคราะห์ซัลโมเนลลาที่ใช้เป็นวิธีมาตรฐาน ดังนั้นจึงขออนุมานว่า ไม่มีผลลบลงจากการวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้

1. การแจกแจงของระดับการปนเปื้อนของซัลโมเนลลาในน้ำดิบ สามารถจะเลือกใช้การแจกแจงชนิด Poisson หรือ การแจกแจงชนิด Log Normal ก็ได้ โดยความเข้มข้นเฉลี่ย (mean concentration) คือ 0.00214 (2.14×10^{-3}) cells/mL ข้อมูลจากตารางที่ 3.6 โดยบางการศึกษาจะเลือกใช้การแจกแจงชนิด Poisson (Cummins et al., 2010) เนื่องจาก ไม่จำเป็นต้องกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลโมเนลลาอยู่ในระดับที่ต่ำ คือ 2.14×10^{-3} cells/mL หรือ 2.14 cells/L จึงปรับให้เป็นจำนวนเซลล์ต่อ 100,000 ลิตร หรือ 214,000 cells/100,000 L (ซึ่งสอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองของ *Giardia* ด้วย) ดังนี้

$$Poisson (214,000)$$

(11)

⁴ Kodel et al., 2002 Environmental and Ecological Statistics

ขั้นตอนการผลิตที่ 1

(Primary treatment)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1 จะเป็นการกรองสิ่งปนเปื้อนที่หยาบหรือมีขนาดใหญ่จากน้ำดิบ อาจจะประกอบด้วยหลายๆ ขั้นตอนย่อย คือ การกักเก็บ (storage) การปรับสภาพ (pre-conditioning) และ การใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination) เนื่องจากไม่มีการเก็บตัวอย่างจากน้ำที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 ดังนั้น จึงถือว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลโมเนลลาในน้ำ

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การรายงานมีความสมบูรณ์ จึงได้นำเสนอแบบจำลองทั่วไปของขั้นตอนการผลิตที่ 1 โดยไม่มีการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง (Model parameterization)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1 จะมีการแยก (removal) ซัลโมเนลลา ออกจากน้ำดิบในฐานร้อยละ เรียกว่า decimal reduction (DR) ซึ่ง DR จะคำนวณอย่างต่อเนื่องโดยอาศัย การลดจำนวนซัลโมเนลลา ในลักษณะ $\log$ ฐาน 10 ($\log_{10}$) ดังนี้

$$DR = 1 - 10^{-LR} \quad (6)$$

โดย

DR คือ Decimal reduction

LR คือ $\log_{10}$ reduction

แต่ละขั้นตอนย่อยของการผลิตน้ำขั้นตอนที่ 1 สามารถลดจำนวนซัลโมเนลลาได้ด้วยประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน โดยรายงานในรูปของ decimal reduction (DR) โดยขั้นตอนที่มีศักยภาพในการลดจำนวนซัลโมเนลลา ประกอบด้วย

1. การคัดกรอง (screening) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : S_c
2. การกักเก็บ (storage) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : S_t
3. การปรับสภาพ (pre-conditioning) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : P_c
4. การใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination) decimal reduction ขั้นตอนนี้ : P_{pre-cl}

แบบจำลองทั่วไปสำหรับการลด *Giardia* cyst ในขั้นตอนการผลิตที่ 1 ดังนี้

$$C_{ppt} = C_T \times (1 - S_c) \times (1 - S_t) \times (1 - P_c) \times (1 - P_{pre-cl}) \quad (7)$$

โดย

C_{ppt} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)

C_T คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลาที่แท้จริงในน้ำดิบ (true concentration)

S_c คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การคัดกรอง (screening)

S_t คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การกักเก็บ (storage)

P_c คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การปรับสภาพ (pre conditioning)

P_{pre-cl} คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination)

ข้อสังเกตของแบบจำลองทั่วไปนี้ คือ

1. แบบจำลองจะใช้ค่าที่คำนวณได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้เป็นค่าเริ่มต้น ในที่นี้ ค่าเริ่มต้น คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลาที่แท้จริงในน้ำดิบ คือ Poisson (214,000) จากข้อมูลตารางที่ 3.6 และ มีการปรับลดความเข้มข้นซัลโมเนลลาตามขั้นตอนย่อยๆ ของขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 1

2. ประสิทธิภาพของการลดซัลโมเนลลาจะเป็นลักษณะของการสะสม (cumulative) ของแต่ละขั้นตอนย่อยๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งสอดคล้องกับ multiple-barrier concept ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ “ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโปรโตซัว” ข้างต้นแล้ว

ขั้นตอนการผลิตที่ 2

(Secondary treatment)

การเก็บตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ประกอบด้วย

- การสร้างตะกอน (coagulation) และ การรวมตะกอน (flocculation)
- การกรอง (filtration)

แบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลโมเนลลามีลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนการผลิตที่ 1 กล่าวคือ

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (1 - CF) \times (1 - F) \quad (8)$$

โดย

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

C_{ppt} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)

CF คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การสร้าง/รวมตะกอน (coagulation/flocculation)

F คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การกรอง (filtration)

จากข้อมูลตารางที่ 3.6 ความเข้มข้นของซัลโมเนลลาในน้ำที่ผ่านการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation and flocculation) และความเข้มข้นของซัลโมเนลลาในน้ำที่ผ่านการกรอง (filtration) คือ 51,300 และ 21,700 cells/100,000 L ตามลำดับ

การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (coagulation/flocculation)

1. คำนวณ Log reduction (LR_{CF})

- ความเข้มข้นซัลโมเนลลา จากขั้นตอนการผลิตที่ 1 214,000 cells/100,000 L
หรือ 5.33 log cells/100,000 L
- ความเข้มข้นซัลโมเนลลา จากการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน 51,300 cells/100,000 L
หรือ 4.71 log cells/100,000 L

- O Log reduction (5.33 log – 4.71 log) 0.620 log cells/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_{CF})

$$DR_{CF} = 1 - 10^{-LR_{CF}}$$

$$DR_{CF} = 1 - 10^{-(0.620)} = 0.760$$

การกรอง (filtration)

1. คำนวณ Log reduction (LR_F)

- O ความเข้มข้นเซลล์โมเนลลา จากการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน 51,300 cells/100,000 L
หรือ 4.71 log cells/100,000 L
- O ความเข้มข้นเซลล์โมเนลลา จากการกรอง 21,700 cells/100,000 L
หรือ 4.33 log cells/100,000 L
- O Log reduction (4.71 log – 4.33 log) 0.374 log cells/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_F)

$$DR_F = 1 - 10^{-LR_F}$$

$$DR_F = 1 - 10^{-(0.374)} = 0.577$$

แบบจำลองของความเข้มข้นเซลล์โมเนลลาในขั้นตอนการผลิตที่ 2

เมื่อแทนค่าของ $DR_{CF} = 0.760$ และ $DR_F = 0.577$ ที่ได้จากการวิเคราะห์การปนเปื้อนลงในสมการ (3.8) ก็จะได้แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเซลล์โมเนลลา ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ดังนี้

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (1 - 0.760) \times (1 - 0.577)$$

$$C_{pst} = C_{ppt} \times (0.102)$$

$$C_{pst} = 0.102 C_{ppt}$$

โดย

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของเซลล์โมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

Cp_{pt} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 1 (post primary treatment)
จากแบบจำลองอาจจะสรุปได้ว่า ขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 2 (การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน ผนวก
กับขั้นตอนการกรอง) ทำให้ความเข้มข้นของซัลโมเนลลาลดลงประมาณ ร้อยละ 89.8 จากการขั้นตอนการ
ผลิตที่ 1

ขั้นตอนการผลิตที่ 3

(Tertiary treatment)

ตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตที่ 3 เป็นตัวอย่างน้ำในถังน้ำใส (clear well) ซึ่งผ่านการทำลายจุลินทรีย์
(inactivation) ด้วยคลอรีนมาแล้ว

แบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลโมเนลลา มีลักษณะเดียวกัน
กับขั้นตอนการผลิตที่ 1 กล่าวคือ

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - D) \quad (9)$$

โดย

C_{ptt} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 3 (post tertiary treatment)

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary
treatment)

D คือ decimal reduction ในขั้นตอนย่อย การใส่คลอรีน (chlorination)

ความเข้มข้นของ ซัลโมเนลลา ในน้ำที่ผ่านการใส่คลอรีน (chlorination) คือ 7,100 cells/100,000L

1. คำนวณ Log reduction (LR_D)

O	ความเข้มข้นซัลโมเนลลา จากขั้นตอนการผลิตที่ 2	21,700	cells/100,000 L
		หรือ 4.33	log cells/100,000 L
O	ความเข้มข้นซัลโมเนลลา จากการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคด้วยคลอรีน	7,100	cells/100,000 L
		หรือ 3.85	log cells/100,000 L
O	Log reduction (4.33 log – 3.85 log)	0.485	log cells/100,000 L

2. คำนวณ Decimal reduction (DR_D)

$$DR_D = 1 - 10^{-LR_D}$$

$$DR_D = 1 - 10^{-(0.485)} = 0.673$$

แบบจำลองของความเข้มข้นซัลโมเนลลา ในขั้นตอนการผลิตที่ 3

เมื่อแทนค่าของ $DR_D = 0.673$ ที่ได้จากการวิเคราะห์การปนเปื้อนลงในสมการ (9) ก็จะได้แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ดังนี้

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - D) \quad (9)$$

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (1 - 0.673)$$

$$C_{ptt} = C_{pst} \times (0.346)$$

$$C_{ptt} = 0.346 C_{pst}$$

โดย

C_{ptt} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 3 (post tertiary treatment)

C_{pst} คือ ความเข้มข้นของซัลโมเนลลา ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตที่ 2 (post secondary treatment)

จากแบบจำลองอาจจะสรุปได้ว่า ขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 3 (การทำลายจุลินทรีย์ด้วยคลอรีน) ทำให้ความเข้มข้นของซัลโมเนลลาลดลงประมาณร้อยละ 65 จากการขั้นตอนการผลิตน้ำที่ 2

การสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของ *Salmonella* spp. ในทุกขั้นตอนการผลิตน้ำประปาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดเซลล์โมเนลลาในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา
Models simulating *Salmonella* reduction in drinking water treatments

Stage	Symbol	Description	Model/distribution	Variable value	Unit	log conc.
Source water	Crw	Cell in raw water	Poisson(214000)	214,000	C/100,000 L	
	C _T	True number of cells	Poisson(214000)	214,000	C/100,000 L	5.41
Primary Treatment	Sc	Decimal Reduction of Screening	0	0	Decimal reduction	
	St	Decimal Reduction of Storage	0	0	Decimal reduction	
	Pc	Decimal Reduction of Pre-conditioning	0	0	Decimal reduction	
	Ppre-cl	Decimal Reduction of Pre-chlorination	0	0	Decimal reduction	
	C _{PPT}	Post primary treatment	C _T x (1-(Sc) x (1-St) x (1-Pc) x (1-Ppre-cl)	214,000	C/100,000 L	5.41

ตารางที่ 3.12 แบบจำลองการจำลองเหตุการณ์การลดซัลโมเนลลาในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (ต่อ)

Models simulating *Salmonella* reduction in drinking water treatments (continued)

Stage	Symbol	Description	Model/distribution	Variable value	Unit	log conc.
Secondary treatment	CF	Decimal Reduction of Coagulation/Flocculation	$1 - 10^{(-LR_{CF})}$	0.760	Decimal reduction	
	C _{CF}	Concentration after Coagulation/Flocculation	N/A	51,300	C/100,000 L	4.78
	LR _{CF}	Log reduction of Coagulation/Flocculation	$\log(C_{PPT}) - \log(C_{CF})$	0.620	log	
	F	Decimal Reduction of Filtration	$1 - 10^{(-LR_F)}$	0.577	Decimal reduction	
	C _F	Concentration after Filtration	N/A	21,700	C/100,000 L	4.40
	LR _F	Log reduction of Filtration	$\log(C_{CF}) - \log(C_F)$	0.374	log	
	C _{PST}	Post secondary treatment	$C_{PPT} \times (1 - CF) \times (1 - F)$	21,700	C/100,000 L	4.40
Tertiary treatment	Ppost-cl	Decimal Reduction of Post chlorination	$1 - 10^{(-LR_D)}$	0.673	Decimal reduction	
	C _D	Concentration after Disinfection	N/A	7,100	C/100,000 L	3.92
	LR _D	Log reduction of Disinfection	$\log(C_F) - \log(C_D)$	0.485	log	
	C _{PTT}	Post tertiary treatment	$C_{PST} \times (1 - D)$	7,100	C/100,000 L	3.92

เป้าหมายสุขภาพของการผลิตน้ำโดยการประปาครหลวง

“แนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) (WHO, 2011) กล่าวถึงเป้าหมายสุขภาพไว้ 4 ชนิด คือ

1. เป้าผลลัพธ์สุขภาพ หรือ Health outcome target

เป็นเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดในรูปของจำนวนผู้ป่วยสูงสุดจากจุลินทรีย์ก่อโรค หรือ ในรูปของภาระโรคที่ยอมรับได้ (tolerable burden of disease) ซึ่งระดับที่แนะนำ คือ 10^{-6} DALY ต่อคนต่อปี (ศึกษาเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ Disability-adjusted life years หรือ DALY)

2. เป้าคุณภาพน้ำ หรือ Water quality target

เป้าหมายคุณภาพน้ำเป็นเป้าหมายสุขภาพที่ใช้สำหรับอันตรายเคมีมากกว่าอันตรายทางจุลชีววิทยา นอกจากนี้ เป้าคุณภาพน้ำทางจุลชีววิทยาไม่เน้นการกำหนดจำเพาะสำหรับทั้งจุลินทรีย์ก่อโรคหรือกระทั่งจุลินทรีย์ก่อโรคอ้างอิง (reference pathogens) ของกลุ่มจุลินทรีย์ ดังนั้นเป้าหมายน้ำจึงใช้วิธีการเฝ้าระวังการปนเปื้อนจุลินทรีย์บ่งชี้ (indicator organism) แทน เช่น *E.coli* เป็นต้น ดังนั้นสำหรับการศึกษารุ่นนี้ที่เน้นที่อันตรายทางจุลินทรีย์ จึงมิได้กำหนดเป้าหมายน้ำ

3. เป้าประสิทธิภาพ หรือ Performance target

เป้าหมายสุขภาพที่เชื่อมโยง “เป้าหมายสุขภาพ” ในฐานะผู้รับความเสี่ยง และ “ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์-ในกระบวนการผลิตน้ำประปา” ในฐานะผู้จัดการความเสี่ยงเข้าไว้ด้วยกัน เช่น เป้าประสิทธิภาพของขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในการลดความเข้มข้นหรือจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคผ่านน้ำได้ร้อยละ 99 (หรือ $2 \log_{10}$ reduction) เท่ากับเป็นการลดจำนวนผู้ป่วยในกลุ่มเสี่ยงลงไปได้ 10^2 DALY ต่อคนต่อปี

4. เป้าเทคโนโลยีเฉพาะ หรือ Specific technology target

เป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะส่วนมากแล้วจะอยู่ในรูปแบบของคำแนะนำ (recommendation) ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีที่ใช้ในสถานการณ์เฉพาะ เช่น การกรอง การทำลายจุลินทรีย์ เป็นต้น การเลือกเทคโนโลยีจะคำนึงถึงการประเมินคุณภาพของแหล่งน้ำดิบ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน เป็นต้น เป้าเทคโนโลยีเฉพาะมักจะใช้กับระบบจัดหาน้ำสำหรับชุมชนขนาดเล็กหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือน เป้าเทคโนโลยีเฉพาะสามารถใช้ได้กับทั้งอันตรายเคมีและอันตรายจุลินทรีย์ ดังนั้นเป้าหมายเทคโนโลยีเฉพาะจึงไม่อยู่ในบริบทของการศึกษารุ่นนี้

ดังนั้น เป้าหมายสุขภาพของการประปาครหลวงจึงครอบคลุมเฉพาะ “เป้าหมายสุขภาพ” และ “เป้าหมายประสิทธิภาพ” ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

การกำหนดเป้าหมายสุขภาพของการประปาครหลวง

(Setting health outcome target for MWA)

เป้าหมายสุขภาพในการศึกษารุ่นนี้ จะได้ปฏิบัติตามคำแนะนำของ “แนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม” หรือ Guidelines for Drinking Water Quality ฉบับล่าสุด ครั้งที่ 4 ค.ศ. 2011 (พ.ศ. 2554) คือ การใช้ Disability adjusted life years (DALY) ซึ่งกำหนดค่ามาตรฐานเป็นการทั่วไป คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี เป็นค่าเริ่มต้นในการศึกษา จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับ DALY ที่คำนวณได้จากการประเมินความเสี่ยง กล่าวคือ DALY เฉลี่ยของแบคทีเรีย อยู่ระหว่าง 9.77×10^{-15} ถึง 7.67×10^{-7} (ตารางที่ 3.13) และ DALY เฉลี่ยของโปรโตซัว อยู่ระหว่าง 7.84×10^{-15} ถึง 4.11×10^{-9} (ตารางที่ 3.14)

ตารางที่ 3.13 ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาจากโรงงานบางเขน (DALY/year) โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) ของแบคทีเรีย

Bacteria	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Shigella</i>	9.77×10^{-13}	1.83×10^{-9}	2.79×10^{-8}	6.97×10^{-8}	9.50×10^{-8}
<i>Vibrio cholera</i> O1	4.24×10^{-12}	1.20×10^{-8}	1.86×10^{-7}	4.65×10^{-7}	5.98×10^{-7}
<i>Vibrio cholera</i> O139	1.81×10^{-11}	1.20×10^{-8}	1.86×10^{-7}	4.66×10^{-7}	5.85×10^{-7}
<i>Salmonella</i>	1.18×10^{-11}	9.48×10^{-9}	1.47×10^{-7}	3.69×10^{-7}	4.77×10^{-7}
<i>Campylobacter</i>	2.03×10^{-11}	1.53×10^{-8}	2.38×10^{-7}	5.95×10^{-7}	7.67×10^{-7}

จากตัวอย่างน้ำประปาจำนวน 160 ตัวอย่าง

เกณฑ์ความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$

ผลการประเมินความเสี่ยงสำหรับแบคทีเรีย พบว่า DALY ที่สูงที่สุด (max) เท่ากับ 7.67×10^{-7} ซึ่งต่ำกว่า DALY มาตรฐานของแนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี ดังนั้น มาตรฐานความปลอดภัยของน้ำประปาจากแบคทีเรียก่อโรคจึงผ่านเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก และการประปานครหลวงสามารถกำหนด DALY มาตรฐานของแนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี เป็น “เป้าหมายสุขภาพ” ของแบคทีเรียก่อโรคสำหรับการผลิตน้ำประปาของการประปาฯ ได้

ตารางที่ 3.14 ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาจากโรงงานบางเขน (DALY/year) โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) ของโปรโตซัว

Protozoa	Min	5 th percentile	Mean	90 th percentile	Max
<i>Cryptosporidium parvum</i>	7.84×10^{-15}	8.93×10^{-12}	1.38×10^{-10}	3.45×10^{-10}	4.36×10^{-10}
<i>Giardia lamblia</i>	7.01×10^{-11}	6.45×10^{-10}	1.80×10^{-9}	3.25×10^{-9}	4.11×10^{-9}
<i>Entamoeba histolytica</i>	7.95×10^{-14}	4.35×10^{-11}	6.78×10^{-10}	1.70×10^{-9}	2.15×10^{-9}

จากตัวอย่างน้ำประปาจำนวน 160 ตัวอย่าง

เกณฑ์ความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$

ผลการประเมินความเสี่ยงสำหรับโปรโตซัว พบว่า DALY ที่สูงที่สุด (max) เท่ากับ 4.11×10^{-9} ซึ่งต่ำกว่า DALY มาตรฐานของแนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี ดังนั้น มาตรฐานความปลอดภัยของน้ำประปาจากโปรโตซัวก่อโรคจึงผ่านเป้าหมายสุขภาพที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก และการประปาฯ สามารถกำหนด DALY มาตรฐานของแนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี เป็น “เป้าหมายสุขภาพ” ของโปรโตซัวก่อโรคสำหรับการผลิตน้ำประปาของการประปาฯ ได้

การกำหนดเป้าประสิทธิภาพของการประปานครหลวง

(Setting performance target for MWA)

การประยุกต์ “เป้าประสิทธิภาพ” ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การศึกษาประสิทธิภาพรวมของขั้นตอนต่างๆ ในการผลิตน้ำในการลดจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen reduction) ให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับ “เป้าผลลัพธ์สุขภาพ” สำหรับกรณีของการประปานครหลวงได้กำหนดให้ “เป้าผลลัพธ์สุขภาพ” สำหรับทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัวไว้เท่ากัน คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี

เนื่องจากระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของการปนเปื้อนทั้งแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคในน้ำประปาที่ส่งจ่ายไปสู่ผู้ใช้น้ำมีค่า DALY ได้ตามมาตรฐานของแนวทางสำหรับคุณภาพน้ำดื่ม คือ 10^{-6} DALY/คน/ปี ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีการกำหนด “เป้าประสิทธิภาพ” เพื่อให้กับโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

มาตรการจัดการความเสี่ยงในการกำจัดโปรโตซัวในการผลิตน้ำประปา

(Risk management option to reduce protozoa in drinking water treatments)

การระบาดของโรคที่เกิดจากโปรโตซัว คือ *Cryptosporidium parvum* และ *Giardia lamblia* ผ่านการดื่มน้ำที่สำคัญโดยมากแล้วเกิดจากสาเหตุ suboptimal treatment ดังนั้น ความปลอดภัยของน้ำประปาจึงขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในการกำจัด⁵ oocyst ของ *Cryptosporidium parvum* และ cyst ของ *Giardia lamblia* ที่อาจจะปนเปื้อนมาในน้ำดิบ มีข้อสังเกตที่น่าสนใจ คือ oocyst ของ *Cryptosporidium parvum* มีขนาดใหญ่กว่า และทนทานต่อการแยกและทำลายมากกว่า cyst ของ *Giardia lamblia* ดังนั้น กลไกการกำจัดโปรโตซัวทั้งสองชนิดนี้ อาจ会有ความแตกต่างกันด้วยคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น (WHO, 2011)

แนวคิดที่สำคัญในการกำจัดโปรโตซัวที่ปนเปื้อนมาในน้ำดิบ จะไม่ขึ้นอยู่กับขั้นตอนใดเพียงขั้นตอนหนึ่งของการผลิตน้ำประปาในการแยกหรือทำลายโปรโตซัว แต่จะเป็นแนวคิด multiple-barrier กล่าวคือ แต่ละขั้นตอนการผลิตน้ำประปาจะช่วยกันทำหน้าที่ในการแยกโปรโตซัวในปริมาณหนึ่ง และเมื่อพิจารณาผลรวมทุกขั้นตอนของการผลิตน้ำประปาแล้ว ก็จะได้ผลลัพธ์รวมของการกำจัดโปรโตซัว ซึ่งควรจะมีประสิทธิภาพ (performance) เพียงพอในการกำจัดโปรโตซัวได้ทั้งหมดที่อาจจะปนเปื้อนอยู่ในน้ำดิบ (Betancourt and Rose, 2004) ซึ่งตาม Surface Water Treatment Rule ในการควบคุม *Giardia lamblia* กำหนดระดับขั้นต่ำในการแยก (removal) และการทำลาย (inactivation) cyst ให้ได้ 3-log หรือ ร้อยละ 99.9 (EPA, 1989) โดยในขั้นตอนการกรอง (filtration) ที่แตกต่างกันก็จะมีประสิทธิภาพในการลดจำนวน cyst ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3.15) ซึ่งแนวคิดนี้จะใช้เป็นแนวทางพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองการกำจัดโปรโตซัวในการผลิตน้ำประปา

ตารางที่ 3.15 ระดับต่ำสุดในการแยก *Giardia* cyst โดยการกรอง (filtration)

Treatment	Assumed log “removals”	Recommended minimum log level of “disinfection”	Sum of log removal & disinfection
Conventional	2.5	0.5	3.0
Direct filtration	2.0	1.0	3.0
Slow sand filtration	2.0	1.0	3.0
Diatomaceous earth filtration	2.0	1.0	3.0

EPA, 1989

⁵ การกำจัด (elimination) หรือ การลด (reduction) หมายถึง ทั้ง การแยก (removal) และ การทำลาย (inactivation or disinfection)

น้ำดิบ

(Raw water)

ระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst จะเป็นค่าเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลอง และยังทำหน้าที่ในการกำหนดเป้าประสิทธิภาพในการผลิตน้ำ กล่าวคือ ระดับการปนเปื้อนในน้ำดิบมาก ก็จำเป็นต้องมีการลดจำนวน *Giardia* cyst ให้มากขึ้นด้วย เพื่อมีการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst อยู่ในระดับที่ปลอดภัยหรือมีความเสี่ยงต่ำที่สุด ดังนั้นการทราบระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cyst ในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนต่างๆ ของการผลิตน้ำประปาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการกำหนดเป้าประสิทธิภาพในการผลิตน้ำ

ปี พ.ศ. 2534 การศึกษาความชุกของ *Giardia* cyst ในแหล่งน้ำผิวดินในรัฐอินิอยส์ พบความชุกของ *Giardia* cyst สูงถึงร้อยละ 81 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean concentration) และค่าความเข้มข้นสูงสุด 2.77 และ 66 *Giardia* cysts/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของ *Giardia* cyst จะมีความสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของน้ำทั้งจากจากโรงงานและบ้านเรือน และพบความสัมพันธ์ของทั้ง *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst กับคุณภาพน้ำ ในประเด็น ความขุ่น (turbidity) โคลิฟอร์มทั้งหมด (total coliform) และ โคลิฟอร์มอุจจาระ (fecal coliform) ต่อมาในปี พ.ศ. 2553 การศึกษาความชุกและความเข้มข้นของทั้ง *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ในแหล่งน้ำผิวดิน (surface water) เช่นเดียวกันแต่เป็นจังหวัดในพื้นที่ชายฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย ประกอบด้วย ภูเก็ต พังงา ระนอง กระบี่ ตรังและสตูล พบความชุกของ *Giardia* cyst ในแม่น้ำและปากแม่น้ำ บ่อน้ำและแหล่งเก็บน้ำ ร้อยละ 16.7, 24.0 และ 25.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean concentration) และ ค่าความเข้มข้นสูงสุด คือ 3.26 และ 13.12 *Giardia* cysts/ลิตร ตามลำดับ (Srisuphanunt et al., 2010)

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 การศึกษาจะพบว่า ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเรขาคณิตของ *Giardia* cysts จะไม่แตกต่างกันมาก (0.49 cysts/ลิตร) ในขณะที่ความชุกของ *Giardia* cysts กลับมีค่าที่แตกต่างกันมาก (ร้อยละ 56-64) ดังนั้น อาจจะพอตั้งข้อสังเกตได้ว่า ความชุกและความเข้มข้นของ *Giardia* cysts อาจจะเป็นอิสระต่อกัน (independent)

นอกเหนือจากการเปรียบเทียบเชิงปริมาณของความชุกและความเข้มข้นของ *Giardia* cyst ซึ่งควรพิจารณาในเชิง uncertainty และ variability แล้ว ยังควรจะต้องคำนึงถึงความไว (sensitivity) ของวิธีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการด้วย หรือ บางครั้งเรียกว่า recovery rate เนื่องจากวิธีการตรวจวิเคราะห์ที่ไม่ไวเพียงพอ หรือ ตรวจวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนได้เฉพาะเมื่อมีระดับการปนเปื้อนของ *Giardia* cysts ที่สูง จะทำให้ประมาณการความชุกและความเข้มข้นต่ำกว่าความเป็นจริง (under estimation) ซึ่งในที่สุด ก็จะทำให้มี *Giardia* cyst เล็ดลอดหรือหลงเหลือในน้ำประปาได้ (Cummin et al., 2010)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1

(Primary treatment)

ขั้นตอนการผลิตที่ 1 เป็นขั้นตอนการผลิตที่ ประกอบด้วยการกรองสิ่งปนเปื้อนที่หยาบหรือขนาดใหญ่ (large debris screening and grid) จากน้ำดิบ โดยอาจจะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยๆ ได้อีก เช่น

- การคัดกรอง (screening)
- การกักเก็บ (storage)
- การปรับสภาพ (pre-conditioning)
- การใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination)

ในกรณีที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 มีเฉพาะขั้นตอนย่อในการคัดกรองวัตถุดิบขนาดใหญ่ เช่น แ่งไม้ หิน กรวด ทราย ขยะ เป็นต้น โดยไม่มีขั้นตอนย่อในการใส่คลอรีนขั้นต้น (pre-chlorination) แล้ว ขั้นตอนการผลิตที่ 1 ก็จะแทบไม่มีผลหรือไม่มีประสิทธิภาพ (negligible) ในการกำจัดหรือทำลายทั้ง *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองก็อาจจะละหรือข้ามขั้นตอนการผลิตที่ 1 ได้

ขั้นตอนการผลิตที่ 2

(Secondary treatment)

ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ทำหน้าที่ในการกำจัดของแข็งที่มีขนาดเล็ก (fine solids) และการปนเปื้อนหลักๆ ด้วยการใช่วัตถุกรอง (filter) การสร้างตะกอน (coagulation) การรวมตะกอน (flocculation) และแผ่น membrane

การสร้างตะกอน และ การรวมตะกอน (coagulation and flocculation)

สารเคมีที่ใช้การสร้างตะกอน (coagulation) และต่อเนื่องถึงการรวมตะกอน (flocculation) เช่น aluminium sulphate, ferric chloride, ferric sulphate และ polyaluminium chloride (PACl) เป็นต้น โดยที่สารเคมีเหล่านี้ แต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้แตกต่างกันไป กล่าวคือ ferric chloride มีประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ดีกว่า (Lechevallier and Norton, 1992; Dugan et al., 2001; Yates et al., 1997; States et al., 2002) โดยกลไกการทำงานของสารประกอบ ferric คือ การทำให้เกิดการตกตะกอน (sedimentation) ที่ดีกว่า ผลที่ตามมา คือ ทำให้การแยก *Cryptosporidium* oocyst ด้วยสารประกอบ ferric มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า (Tetsuji et al., 2006)

ประสิทธิภาพในการกำจัด *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation) เช่น

1. **ประจุผิวอนุภาค (particle surface charge)** โดยอาจจะเป็นการวัดประจุที่ผิวของอนุภาคตัวแทนก็ได้ เช่น zeta potential ดังนั้นการใช้เกลือของโลหะ (metal salt) ในการสร้างตะกอน (coagulation) จะทำให้เกิดการสะเทิน (neutralization) ของประจุที่ผิวของอนุภาค ทำให้เกิดการรวมตะกอน (flocculation) และการกรอง (filtration)
2. **ความเป็นกรดต่าง (pH)** เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประจุผิวอนุภาคอีกทอดหนึ่ง
3. **สารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter: NOM)** เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประจุผิวอนุภาคอีกทอดหนึ่งเช่นเดียวกัน โดยที่การสร้างตะกอน (coagulation) ของสารอินทรีย์ธรรมชาติจะเกิดขึ้นที่สภาวะเป็นกรดอ่อนๆ ประมาณ pH 5-6 (Krasner and Amy, 1995) ดังนั้นการเพิ่มการสร้างตะกอน (coagulation) สามารถกระทำได้ด้วยการเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอน (coagulant) และ/หรือ การลดความเป็นกรดต่าง (pH) เช่น การใช้สารส้ม (Alum) จะช่วยในการลด pH ให้เป็นกรดเล็กน้อย เท่ากับเป็นการเพิ่มการสร้างตะกอน (coagulation) โดยพบว่าสามารถแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้มากกว่า ร้อยละ 90 หรือประมาณ 1 log (Keegan et al., 2008)
4. **สารสร้างตะกอน (coagulant)** ประสิทธิภาพในการแยก (removal) *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสร้างตะกอน โดยพบว่า
 - a. **สารส้ม (Alum)** ซึ่งกลไกการกำจัด *Cryptosporidium* oocyst ของสารส้มเกิดจากการแยก (removal) *Cryptosporidium* oocyst ในขั้นตอนการสร้างตะกอนมากกว่าการ

ทำลาย (inactivation) โดยพบว่า สารส้มสามารถแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ประมาณ 0.38 log ในขณะที่ในขั้นตอนการสร้างตะกอน (coagulation) พบว่า *Cryptosporidium* oocyst ถูกทำลายได้ (inactivated) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารส้ม ดังนั้น การทำลาย *Cryptosporidium* oocyst นั้นมิได้เกิดจากตัวสารส้มเองโดยตรง แต่เกิดจากการทำงานของสารส้มในขั้นตอนการสร้างตะกอน นอกจากนี้ สารส้มยังไม่ทำให้ *Cryptosporidium* oocyst มีความไวต่อการทำลาย (inactivated) ด้วยคลอรีน (Keegan et al., 2008)

- b. เฟอร์ริก คลอไรด์ (Ferric chloride) มีประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ดีกว่า Alum สูงสุดประมาณ 1 log ดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ประสิทธิภาพของ Ferric chloride ในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ดีกว่า Alum

Log increase	Reference
0.08	Lechevallier and Norton, 1992
0.30	Dugan et al., 2001
0.65	States et al., 2002
0.80	Yates et al., 1997

การตกตะกอน (sedimentation)

การตกตะกอนโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในแอ่ง (basin) ขนาดใหญ่โดยอยู่ในตำแหน่งทางออกของ flocculation basin โดยออกแบบให้น้ำไหลได้อย่างช้าๆ เพื่อเป็นการเร่งการจม (settle) ของ floc ที่ด้านล่างของ flocculation basin จากนั้นจึงจะเข้าสู่ขั้นตอนการกรอง (filtration) (Jakubowski and Craun, 2002) การแยก *Cryptosporidium* oocyst ในขั้นตอนการตกตะกอนอยู่ในพิสัย (range) ระหว่าง 1.1 และ 2.3 log โดยพบว่าอุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแยก *Cryptosporidium* oocyst (Harrington et al., 2001)

วิธี dissolved air floatation (DAF) เป็นระบบ clarification ชนิดหนึ่ง ในบางโรงงานจะมีการนำ DAF มาใช้ทดแทนวิธีการตกตะกอน (sedimentation) โดยกลไกของ DAF ในการแยก floc คือ การให้ floc จับ (adhere) กับฟองอากาศ (air bubble) ซึ่งพบว่า DAF มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการตกตะกอน กล่าวคือ DAF สามารถกำจัด *Cryptosporidium* oocyst ได้ถึง 2 เท่าของการตะกอน (Betancourt and Rose, 2004) ในขณะที่การใช้ DAF ร่วมกับ filtration จะสามารถกำจัด *Cryptosporidium* oocyst ได้มากกว่าถึง 5 log (Edzwald et al., 2000) ในขณะที่บางรายงานกล่าวว่า ประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกัน (Betancourt and Rose, 2004) เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนการสร้างตะกอน การรวมตะกอน และ DAF ทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้ว จะสามารถแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ระหว่าง 1.3 ถึง 2.8 log (Hall et al., 1995) อย่างไรก็ตาม DAF เพียงขั้นตอนเดียวสามารถแยก (remove) *Giardia* cyst ได้ประมาณ 1-2 log

(Plummer et al., 1995) อย่างไรก็ตามวิธี DAF ไม่สามารถทำลาย (inactivate) *Giardia* cyst (Keegan et al., 2008)

การกรอง (filtration)

การกรองเป็นขั้นตอนในการแยกทั้งจุลินทรีย์และอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยอาศัยกลไกการให้น้ำผ่านสื่อที่มีช่องว่าง (pore) หรือ ผ่านแผ่นเยื่อ (membrane) โดยชั้นต่างๆ ของสื่อ (media layers) อาจจะเป็น ทราย (slow sand หรือ rapid sand), earth (diatomaceous), anthracite ซึ่งอยู่ชั้นบนของทรายที่มีขนาดแตกต่างกัน (dual media หรือ tri-media) หรือ แผ่นเยื่อที่มีช่องว่างขนาดต่างๆ กัน (Betancourt and Rose, 2004) *Cryptosporidium* oocyst จะสามารถผ่านตัวกรองแบบ Granular activated carbon (GAC) และ rapid sand ได้ดีกว่าตัวกรองแบบ dual หรือ mixed media (LeChevallier et al., 1991) การกรองมีประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้ในช่วงกว้างระหว่าง 1.7 ถึง 3.6 log (Harrington et al., 2001) โดยตัวกรองแบบ diatomaceous จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระดับ 6 log (Ongerth and Hutton, 2001)

ปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการประสิทธิภาพการแยก *Cryptosporidium* oocyst ในขั้นตอนการกรอง เช่น ชนิดของสื่อกรอง (filter media) การบรรจุตัวกรอง (filter loading) และชนิดของสารสร้างตะกอน (coagulant) เป็นต้น พบว่า media design ที่แตกต่างกันมีอัตราการกำจัด *Cryptosporidium* oocyst ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Dugan et al., 2001) ในขณะที่การนำ backwash water มาใช้ซ้ำ (recycle) อาจจะเป็นสาเหตุหรือแหล่งของการปนเปื้อน *Cryptosporidium* oocyst ในน้ำได้ (Betancourt and Rose, 2004)

การกรองทรายช้า (slow sand filtration : SSF) เป็นวิธีการที่ใช้กันมานานมากในการทำให้น้ำมีความสะอาดและปลอดภัย โดยอาศัยกลไกของการดักจับ (entrapment) จุลินทรีย์ในช่องว่าง (pore) และการกรองโดย schmutzdecke (เป็นภาษาเยอรมัน แปลว่า dirt cover) ซึ่ง schmutzdecke เป็น biofilm ที่ประกอบด้วย กลุ่มจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย รา โปรโตซัว เป็นต้น สะสมตัวกันอยู่ที่ผิวด้านบนของชั้นทราย (Betancourt and Rose, 2004) ทรายช้าที่มี schmutzdecke เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนของชั้นทรายช้า สามารถแยกโปรโตซัวได้สูงถึง 4-6 log (Hijnen et al., 2007) อย่างไรก็ตามโรงงานที่ใช้วิธีการสร้างตะกอนร่วมกับการรวมตะกอน ที่ต้องมีการใส่สารเคมีด้วย จะทำให้การทำงานของ schmutzdecke ลดลง

การกรองแบบ rapid gravity filtration (RGF) มีหลายชนิด เช่น การกรองแบบสื่อเดียว หรือ single media (เช่น ทราย) การกรองแบบสื่อคู่ หรือ dual media (เช่น ทราย + anthracite) หรือ การกรองแบบสื่อผสม หรือ mixed media (เช่น ทราย + anthracite + garnet) การกรองแบบ RGF สามารถแยก *Cryptosporidium* oocyst ได้สูงสุดถึง 2.47 log (Hashimoto et al., 2002) อย่างไรก็ตาม สื่อกรองคู่ (dual media) และ แบบ 3 ชนิด (tri-media) จะประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst) ได้ดีกว่าสื่อกรองเดียว (rapid sand filter) กล่าวคือ ประสิทธิภาพสูงสุดในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ของสื่อกรองคู่และสื่อกรองแบบ 3 ชนิด คือ 5.8 และ 5.7 log ตามลำดับ

สำหรับโรงงานที่ใช้การสร้างตะกอนร่วมกับการรวมตะกอนมักจะใช้วิธี RGF ในการกรอง ข้อสังเกตที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพในการแยก *Cryptosporidium* oocyst ของขั้นตอนการกรองจะเป็นการประสานงานร่วมกันกับทั้งการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนที่เหมาะสม และเนื่องจากการกรองแบบ RGF ถูกออกแบบให้สามารถล้างสื่อกรองได้โดย back washing ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยก

Cryptosporidium oocyst ไม่คงที่หรือไม่แน่นอนได้ (Patania and Jacangelo, 1995; Baudin and Laine, 1998)

นอกจากสื่อกรองที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีระบบการกรองโดยใช้แรงดันกล (mechanically pressure driven) ให้น้ำผ่านแผ่นเยื่อ ซึ่งระบบนี้กำลังได้รับความสนใจเนื่องจาก คุณสมบัติในการควบคุมผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (disinfection by-products) และการแยกจุลินทรีย์โดยผ่านแผ่นเยื่อกรอง (membrane filter) ที่มีอยู่หลายชนิด เช่น microfiltration (MF) ultrafiltration (UF) nanofiltration (NF) และ reverse osmosis เป็นต้น (Van der Bruggen et al., 2003) มีการใช้ MF และ UF ชนิดความดันต่ำ (low pressure) มาทดแทนการกรองที่ใช้กันทั่วไป (conventional treatment) ขนาดช่องว่าง (pore size) ของแผ่นเยื่อกรองชนิดต่างๆ (ตารางที่ 3.17) มีผลต่อการแยก *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ตารางที่ 3.17 ขนาดช่องว่าง (pore size) ของแผ่นเยื่อกรองชนิดต่างๆ

แผ่นเยื่อกรอง (Filtration membrane)	ขนาดช่องว่าง ^a (Pore size)
nanofiltration (NF)	< 0.002
ultrafiltration (UF)	0.002 - 0.1
microfiltration (MF)	0.1 - 10

^a micron หรือ micrometer (μm)

โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ของ *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ประมาณ 4-6 และ 8-12 ไมครอน (micron หรือ micrometer : μm) ตามลำดับ (WHO, 2011) ขนาดช่องว่างของ MF และ UF ประมาณ 0.01-0.5 ไมครอนสามารถลด *Cryptosporidium* oocyst ได้สูงถึง 4-6 log (Jacangelo et al., 1997) ข้อสังเกต คือ ขนาดช่องว่างที่สามารถกรองแยก *Cryptosporidium* oocyst ก็จะสามารถกรองแยก *Giardia* cyst ได้ด้วย เนื่องจาก *Cryptosporidium* oocyst มีขนาดเล็กกว่า *Giardia* cyst

ความขุ่น (turbidity) มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันกับการปนเปื้อนของ *Cryptosporidium* oocyst (EPA, 2007) เนื่องจาก ขั้นตอนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนมีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานในขั้นตอนการกรอง หมายความว่า ขั้นตอนการกรองจะต้องทำงานมากขึ้นเพื่อชดเชยหากขั้นตอนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนมีความบกพร่องไป จนเมื่อน้ำ outflow อาจจะมีค่าความขุ่น >0.2 NTU ก็จะทำให้มีการเล็ดลอด (breakthrough) ของจุลินทรีย์ผ่านขั้นตอนการกรองได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำของ EPA (2006) สำหรับน้ำ outflow และน้ำผ่านขั้นตอนการกรอง ควรจะมีค่าความขุ่น <0.5 และ <0.25 NTU ตามลำดับ (EPA, 2006)

โดยสรุป คือ ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (secondary treatment) จะมุ่งเน้นที่การแยก (removal) มากกว่า การทำลาย (inactivation) *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst

ขั้นตอนการผลิตที่ 3

(Tertiary treatment)

วัตถุประสงค์หนึ่งที่สำคัญของขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การทำลาย (inactivation) *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ที่เล็ดลอด (breakthrough) หรือ เกินกว่าการทำงานของขั้นตอนการผลิตที่ 2 การทำลายเชื้อในขั้นตอนการผลิตที่ 3 สามารถใช้วิธีทางเคมี (chemical) หรือ วิธีทางกายภาพ (physical) โดยโรงงานสามารถจะเลือกวิธีการต่างๆ ในการทำลายเชื้อในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ได้ เช่น ozonation, chlorination หรือ chloramination เป็นต้น

วิธีทางเคมี (chemical means)

Chlorination จัดว่าเป็นวิธีการทำลายเชื้อที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายแต่มีประสิทธิภาพในการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้ค่อนข้างจำกัด กล่าวคือ การใช้คลอรีนความเข้มข้น 2.5 และ 7.5 mg/L สามารถทำลาย *Cryptosporidium* oocyst ได้ประมาณ 0.3-0.4 log เท่านั้น และถึงแม้ว่า *Cryptosporidium* oocyst จะสัมผัสกับสารส้มในขั้นตอนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนมาก่อนก็ตาม ก็ไม่ได้ทำให้ *Cryptosporidium* oocyst ไวต่อการถูกทำลายมากขึ้นได้ (Keegan et al., 2008)

ส่วน คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide) มีประสิทธิภาพดีกว่าคลอรีนเพียงเล็กน้อยในการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst ประมาณ 1 log (Peeters et al., 1989) แม้ว่า *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst จะมีความทนทานต่อสารเคมีกลุ่มคลอรีนมากกว่าแบคทีเรีย แต่หากรักษาระดับความเข้มข้นคลอรีนในระดับที่สูงเพียงพอ (high enough concentration) ร่วมกับระยะเวลาการในการสัมผัสที่นานเพียงพอ (contact time) ของ *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ต่อคลอรีนแล้ว คลอรีนก็ยังสามารถทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้ในระดับหนึ่ง (Korich et al., 1990; Gyurek et al., 1997)

วิธีอื่นๆ (other means)

แสงยู.วี. (ultraviolet : UV) และโอโซนสามารถทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้ดี (ตารางที่ 3.18) โดยพบว่า แสง UV ในขนาดต่ำ (low dose) ประมาณ 1-9 mJ/cm² มีประสิทธิภาพในการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้ถึง 2-4 log (Craig et al., 2000; Craig et al., 2001; Linden et al., 2002) ในขณะที่ปริมาณโอโซนขนาดต่ำ ประมาณ 0.3-1 mg/L นาน 1 นาที สามารถทำลาย *Cryptosporidium* oocyst ได้ถึง 2 log (Corona-Vasquez et al., 2002; Haas and Kaymak, 2003)

เนื่องจากแสง UV เป็นทางเลือกหนึ่งในการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst และเป็นวิธีทางกายภาพ โดยมีจุดเด่นหรือข้อได้เปรียบที่น่าสนใจแตกต่างจากวิธีทางเคมี คือ

1. แสง UV เป็นวิธีทางกายภาพที่ปลอดภัยหรือการเติมสารเคมี
2. แสง UV ปลอดภัยใช้สารเคมี จึงปลอดภัยเกิดผลพลอยได้ (by-products) ที่ก่ออันตราย
3. แสง UV ทรงประสิทธิภาพในการทำลายทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัว แม้ว่าไวรัสอาจจะมีความทนทานต่อแสง UV ได้ในระดับที่จำกัด
4. แสง UV มี contact time ที่สั้นกว่า วิธีทางเคมี

อย่างไรก็ตาม วิธีการใช้แสง UV ก็มีข้อด้อยเช่นเดียวกัน เช่น แหล่งกำเนิดแสง UV และการออกแบบการใช้งานยังมีความหลากหลาย ส่งผลให้ปริมาณแสง UV ที่ใช้กับน้ำมีความไม่แน่นอนหรือกระทั่งวัดปริมาณแน่นอนไม่ได้ เนื่องจากแสง UV ไม่มีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงผ่านตัวกลางได้ ดังนั้น ความขุ่นของน้ำ (>1 NTU) จึงเป็นอุปสรรคในการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst และ แสง UV จะทำงาน

เฉพาะเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสง UV ดังนั้นจึงไม่มีประสิทธิภาพคงค้างในน้ำ (residual disinfection effect) เหมือนกรณีวิธีทางเคมี

ตารางที่ 3.18 การทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ในน้ำด้วย ozone และ UV

วิธีการ ทำลาย	ความเข้มข้น - เวลา (Concentration – contact time)	<i>Cryptosporidium</i> oocyst	<i>Giardia</i> Cyst	Reference
แสง ยู.วี. (U.V.)	50 mJ/cm ^{2a}	3.9	N/A ^b	Bukhari et al., 1999
	1 mJ/cm ²	1.5	N/A	Zimmer et al., 2003
	3 mJ/cm ²	> 3.2	N/A	Zimmer et al., 2003
	5 mJ/cm ²	N/A	2.0	Craik et al, 2000
	1 mJ/cm ²	N/A	> 4.0	Linden et al., 2002
โอโซน (Ozone)	4.0 mg/L ^c - 10 min ^d	2.0	N/A	Corona-Vasquez et al., 2002
	2.0 mg/L - 1.0 min	2.0	N/A	Corona-Vasquez et al., 2002
	0.3 mg/L - 0.25 min	N/A	2.0	Haas and Kaymak, 2003
	0.3 mg/L - 3.0 min	N/A	2.0	Haas and Kaymak, 2003

^amJ/cm² = millijoules/square centimeter

^bN/A = Not applicable

^cmg/L = milligram/liter

^dmin = minute

โอโซนมีการใช้ครั้งแรกในการผลิตน้ำที่ประเทศฝรั่งเศสประมาณ 100 ปีมาแล้ว และมีโรงงานผลิตน้ำกว่า 2,000 แห่งที่ใช้โอโซน ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. โอโซนสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ได้ทุกกลุ่ม เช่น แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัว
2. โอโซนก่อให้เกิดผลพลอยได้ (by-products) ในระดับต่ำ
3. เครื่องสร้างโอโซน (ozone generator) สามารถรับกำลังการผลิตน้ำได้มาก
4. หากใช้โอโซนกับน้ำที่มี bromide ก็จะก่อให้เกิดผลพลอยได้ คือ bromate
5. โอโซนไม่มีประสิทธิภาพคงค้างในน้ำ (residual disinfection effect)
6. โอโซนมีประสิทธิภาพการทำงานลดลงเฉพาะเมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำ (cold water) ดังนั้น จึงไม่เป็นปัญหาในการใช้โอโซนในพื้นที่เขตอบอุ่น (temperate climate)

โดยสรุปแล้ว โรงงานผลิตน้ำที่มุ่งเน้นการแยกหรือการทำลาย *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีความปลอดภัยในการอุปโภคและบริโภคสามารถเลือกวิธีการในการแยก *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ได้ตั้งแต่บำบัดตามมาด้วยการผลิตน้ำทั้ง 3 ขั้นตอน ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ ค่อนข้างมากที่มีอิทธิพลหรือกำหนดประสิทธิภาพในการลดจำนวน (reduction)

Cryptosporidium oocyst และ *Giardia* cyst ซึ่งพิสัยในการลดจำนวน *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst (ตารางที่ 3.19) อยู่ระหว่าง 1.5-4.0 log และ 1.5-5.0 log ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดจำนวน *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ตามตารางกับข้อกำหนดของ U.S. EPA (1989) ที่ 3.0 log จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการลดจำนวน *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst มีความไม่แน่นอน และ ประสิทธิภาพในการลดจำนวน *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ที่แท้จริงของการประปานครหลวงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการกำหนดเป้าประสิทธิภาพของการผลิตน้ำ

ตารางที่ 3.19 ประสิทธิภาพการแยก^a (removal) *Cryptosporidium* oocyst และ *Giardia* cyst ในโรงงานผลิตน้ำ

ระดับของโรงงาน (Plant scale)	แหล่ง/ปริมาณ โปรโตซัว	<i>Cryptosporidium</i> oocyst	<i>Giardia</i> cyst	Reference
Pilot plant	Spike 10^3 /L	N/A	1.75 - 4.0	DeWalle et al., 1984
Pilot plant	Spike 10^3 /L	N/A	> 5.0	Bellamy et al., 1985
Pilot plant	N/A	N/A	> 2.0 - > 3.0	Jakubowski, 1990
Pilot plant	Spike 10^4 /mL	1.9 – 4.0	2.2 – 3.9	Nieminski & Ongerth, 1995
Full-scale plant	Spike 10^7	1.9 – 2.8	2.8 – 3.7	Nieminski & Ongerth, 1995
Full-scale plant	Environment	2.2 – 2.4	2.0 – 2.5	LeChevallier et al., 1991
Full-scale plant	Environment	1.4 – 1.8	1.5	Kelly et al., 1995
Full-scale plant	Environment	1.5	1.5 – 1.7	States et al., 1997

^a total log removal : หน่วย log

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 1

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. นายบัญชาชัย จันทร์บุษราคัม | ผู้ช่วยผู้ว่าการประปานครหลวง (ผลิตน้ำ) |
| 2. นางจกกลณี อาศุเวทย์ | ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง ระดับ 9 |
| 3. นายสมชาย พวงกลิ่น | ผู้อำนวยการฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 4. นายสมศักดิ์ กิจเจริญ | ผู้อำนวยการฝ่ายทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม |
| 5. นายปริญญา แนนหนา | ผู้อำนวยการฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 6. นางศิริไล กิจพิทักษ์ | ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง ระดับ 8 |
| 7. นายสุรเชษฐ พานิชการ | ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง ระดับ 8 |
| 8. นางสุนทรี ปีสานนท์ | นักวิทยาศาสตร์ 7 ผู้ช่วยผู้ว่าการ (แหล่งน้ำและคุณภาพน้ำ) |
| 9. นายมนตรี ล่องดี | ผู้อำนวยการกองผลิตและจ่ายน้ำ
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 10. นางจันทิมา ฤกษ์วิสาข์ | นักวิทยาศาสตร์ 7 ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน 7 |
| 11. นางโสภิน รัชตะวานิชย์ | หัวหน้าส่วนส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 12. นายเกรียงไกร วนจรไกร | นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 13. นายพีรพล ตั้งประยูรเลิศ | วิศวกร 4 ส่วนกำจัดตะกอน กองควบคุมระบบกำจัดตะกอน
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 14. นายไพโรจน์ สอนทรัพย์ | ผู้อำนวยการกองผลิตและจ่ายน้ำ ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 15. นายสุวิทย์ วัชรบุศราคัม | หัวหน้าส่วนส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 16. น.ส.ปริมา บุญถนอม | นักวิทยาศาสตร์ 4 ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 17. น.ส.ฐิตินันท์ สุทธาวาทิน | ผู้อำนวยการกองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 18. น.ส.ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 19. นายสรกฤษ นันต์ดวงแก้ว | วิศวกร 7 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 20. น.ส.สุพิชฌาณ์ บัวภิบาล | วิศวกร 5 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 21. นายวรพล สุวรรณชมภู | นักบริหารงาน 4 กองประสานงานระบบการควบคุมภายใน
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 22. น.ส.นงนรา อัดนวนิช | นักวิทยาศาสตร์ (วช) 7 ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 23. น.ส.พรรณราย จุลละทรัพย์ | นักวิทยาศาสตร์ 7 ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 24. นางกัญญา สอนทรัพย์ | ผู้อำนวยการกองพัฒนาคุณภาพน้ำ |
| 25. นางอรนุช ดันตีสธิกร | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองพัฒนาคุณภาพน้ำ |

26. นางนิสรัสร์ วงศ์พัฒน์
27. น.ส.ชลินทร์ อันติมานนท์
28. นายอังกูร บุญญะ
29. น.ส.วิชุกานต์ เพียงสวัสดิ์
30. น.ส.เสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์
31. นายพิพัฒน์ ไชยกุลวัฒนา
32. นางเหมภัทร ชาติวัฒนานนท์
33. น.ส.วีรสุดา เฉยยทิศ
34. นายปณิธาน บุญส่ง
35. น.ส.ธิติมา แสงประภากร
36. น.ส.กนกวรรณ หนูช่วย
37. นายกิตติภัทร ลัมประเสริฐ
38. น.ส.ชลธร เทศฉิม
39. น.ส.วรัญญา บุญรัตน์
40. น.ส.กรกช ชมะรัตน์
41. น.ส.อัมพร กาญจนก้านเหลือง
42. น.ส.ศิริพร แก้วยาศรี
43. นายสถาปนา เจริญไชย
44. น.ส.จันทิรา อิ่มใจ
45. ว่าที่ร้อยตรีพิศาล สิทธิชัยลาภา
46. นายพาณิณ ออมทวีพูนทรัพย์
47. นายฉัตรชัย ชาติวัฒนานนท์
48. นางสุวรรณา ออมทวีพูนทรัพย์
49. น.ส.สุรรัตน์ พุทธิโกษา
50. น.ส.กิตติรัตน์ วงษ์อินทร์
51. นายอรรถพล กอเดช

ผู้อำนวยการกองแผนคุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนวิชาการคุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนแผนและประเมินผล กองแผนคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนแผนและประเมินผล กองแผนคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนฐานข้อมูลคุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
 ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางเคมี กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 ส่วนวิเคราะห์ทางเคมี กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางสารพิษ โลหะหนัก
 กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 4 หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางสารพิษ โลหะหนัก
 นักวิทยาศาสตร์ 3 หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางสารพิษ โลหะหนัก
 หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 4 ส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ
 กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ
 กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ
 กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนแหล่งน้ำตะวันออก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนแหล่งน้ำตะวันออก
 กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 4 ส่วนแหล่งน้ำตะวันออก
 กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนแหล่งน้ำตะวันออก
 กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนแหล่งน้ำตะวันตก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนแหล่งน้ำตะวันตก กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 หัวหน้าส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 วิศวกร 5 ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 วิศวกร 5 ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
 นักวิทยาศาสตร์ 3 ส่วนน้ำประปา กองเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 2 (วันที่ 11 และ 13 กุมภาพันธ์ 2557)

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. นายสรกฤช นันต์ดวงแก้ว | วิศวกร 7 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 2. น.ส.ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 3. น.ส.ฐิตินันท์ สุทธวาทิน | ผู้อำนวยการ กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 4. นายวรพล สุวรรณชมภู | นักบริหารงาน 4 กองประสานงานระบบการควบคุมภายใน
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 5. น.ส.สุพิชฌาณ์ บัวภิบาล | วิศวกร 5 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 6. น.ส.นุชนาถ สิ้นเสถียรพร | นักวิทยาศาสตร์ 7 ฝ่ายทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม |
| 7. นางโสภิน รัชตะวานิชย์ | หัวหน้าส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 8. น.ส.แสงระวี นาคสุวรรณค์ | นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต
ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 9. น.ส.นงนรา อัตนวานิช | นักวิทยาศาสตร์ (วช) 7 ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 10. นางอรนุช ตันติสิทธิกร | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองพัฒนาคุณภาพน้ำ |
| 11. นางสุนทรี สุภากรณ์สนิท | หัวหน้าส่วนข้อมูลคุณภาพน้ำ กองแผนคุณภาพน้ำ
ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 12. นายกิติภัทร ลิ้มประเสริฐ | หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
ฝ่ายคุณภาพน้ำ |

รายชื่อผู้ร่วมการฟังการบรรยาย ครั้งที่ 3 (วันที่ 20 มิถุนายน 2557)

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. นายปริญญญา แนนหนา | ผู้อำนวยการฝ่ายคุณภาพน้ำ ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 2. นายสมศักดิ์ กิจเจริญ | ผู้อำนวยการฝ่ายทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม
ฝ่ายทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม |
| 3. นางศิริไล กิจพิทักษ์ | ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวง ระดับ 8 |
| 4. นางสุนทรี ปัสนานนท์ | นักวิทยาศาสตร์ 7 ผู้ช่วยผู้ว่าการ (แหล่งน้ำและคุณภาพน้ำ) |
| 5. น.ส.ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองบริหารความเสี่ยงด้านปฏิบัติการ
ฝ่ายบริหารความเสี่ยง |
| 6. น.ส.ดวงกมล ฐปมงคล | นักวิทยาศาสตร์ 6 กองวิจัย พัฒนา และนวัตกรรม
สถาบันพัฒนาวิชาการ |
| 7. นายธีรกุล พรหมจันทร์ | หัวหน้าส่วนข้อมูลตะกอนและน้ำเสีย
กองควบคุมระบบกำจัดตะกอน ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 8. นายไพฑูรย์ ผ่านอัน | ช่าง 7 ผู้ช่วยผู้ว่าการ (ระบบผลิตน้ำ) |

- | | |
|------------------------------|--|
| 9. นางโสภิน รัชตะวานิชย์ | หัวหน้าส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต |
| | ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน |
| 10. น.ส.แสงระวี นาคสุวรรณค์ | นักวิทยาศาสตร์ 5 ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต |
| | ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน |
| 11. น.ส.นงนรา อัตนวานิช | นักวิทยาศาสตร์ (วช) 7 ฝ่ายคุณภาพน้ำ |
| 12. นางกัญญา สอนทรัพย์ | ผู้อำนวยการกองพัฒนาคุณภาพน้ำ |
| 13. นางอรนุช ตันตีสทิธร | นักวิทยาศาสตร์ 7 กองพัฒนาคุณภาพน้ำ |
| 14. นางนิสรัส วงศ์พัฒน์ | ผู้อำนวยการกองแผนคุณภาพน้ำ |
| 15. นายพิพัฒน์ ไชยกุลวัฒน์ | ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ |
| 16. นายกิติภัทร ลิ้มประเสริฐ | หัวหน้าส่วนวิเคราะห์ทางจุลชีวะ กองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ |
| | ฝ่ายคุณภาพน้ำ |



ภาพที่ 3.25 การฝึกอบรม “การวิเคราะห์ความเสี่ยงคุณภาพน้ำประปา”
ณ ห้องกลิ่นจันทร์ ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง



ภาพที่ 3.26 การฝึกอบรม “การวิเคราะห์ความเสี่ยงคุณภาพน้ำประปา”
ณ ห้องกลั่นจันทน์ ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง



ภาพที่ 3.27 การฝึกอบรม “การวิเคราะห์ความเสี่ยงคุณภาพน้ำประปา”
ณ ห้องกลั่นจันทน์ ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย และ การอภิปรายผล

ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค (contamination level)

1. ไม่พบการปนเปื้อน *Vibrio cholera*, *Shigella* spp. และ *Campylobacter* spp. ในตัวอย่างน้ำที่ตรวจทั้งหมด 140-160 ตัวอย่าง คำนวณได้ความชุกเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 0.5 และ 0.7 ความเข้มข้นเฉลี่ยระหว่าง $7.14 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$ และ $5.56 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$

2. ไม่พบการปนเปื้อน *Entamoeba histolytica* และ *Giardia lamblia* ในตัวอย่างน้ำที่ตรวจทั้งหมด 140-160 ตัวอย่าง คำนวณได้ความชุกเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 0.5 และ 0.7 ความเข้มข้นเฉลี่ยระหว่าง $2.78 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$ และ $3.57 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$

3. แม้ว่าจะตรวจไม่พบการปนเปื้อนในทุกตัวอย่างที่ตรวจ ($s = 0$) แต่ mean prevalence ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจาก Beta distribution ก็ให้ค่าเฉลี่ยความชุกที่ไม่เป็นศูนย์ ดังกรณีของ *Vibrio cholera*, *Shigella* spp. *Campylobacter* spp. *Entamoeba histolytica* และ *Giardia lamblia* ความชุกเฉลี่ยมีความแตกต่างจากความชุกทางระบาดวิทยาซึ่งจะเป็นการคำนวณสัดส่วนจำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวกต่อจำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งหมด ดังนั้น ความชุกทางระบาดวิทยาในกรณีที่ตรวจไม่พบการปนเปื้อนเลย จึงมีค่าความชุกเป็น ร้อยละ 0 เสมอ โดยไม่ขึ้นกับจำนวนตัวอย่างที่ตรวจ

4. พบการปนเปื้อน *Salmonella* spp. จากทั้งหมด 120-140 ตัวอย่าง

4.1 ขั้นตอนน้ำดิบ 13 ตัวอย่าง (ร้อยละ 19.7 ความเข้มข้น $2.14 \times 10^{-3} \text{ ml}^{-1}$)

4.2 ขั้นตอนการกวนช้า 7 ตัวอย่าง (ร้อยละ 5.6 ความเข้มข้น $5.13 \times 10^{-4} \text{ ml}^{-1}$)

4.3 ขั้นตอนการกรอง 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.8 ความเข้มข้น $2.17 \times 10^{-4} \text{ ml}^{-1}$)

4.4 ขั้นตอนการทำลายเชื้อ 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 0.7 ความเข้มข้น $7.14 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$)

4.5 ขั้นตอนการสุบจ่าย 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 0.5 ความเข้มข้น $5.56 \times 10^{-5} \text{ ml}^{-1}$)

5. การปนเปื้อน *Salmonella* spp. ในน้ำดิบ และ ลดลงเมื่อถึงขั้นตอนการกวนช้า ในระดับคงที่แสดงว่า ขั้นตอนการกวนช้า ซึ่งประกอบด้วย การเติมสารเคมี และ การตะกอน อาจจะช่วยลดระดับการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. ที่มีอยู่ในน้ำดิบ

6. การปนเปื้อน *Salmonella* spp. จากน้ำดิบและขั้นตอนการกวนช้า มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงเมื่อน้ำผ่านขั้นตอนการกรองและการทำลายเชื้อ จนกระทั่งตรวจไม่พบ *Salmonella* spp. เลยในระบบน้ำประปาที่สุบจ่ายไปยังผู้บริโภค

7. พบการปนเปื้อน *Giardia lamblia* ในตัวอย่างน้ำจากทุกขั้นตอนของการผลิตน้ำในการเก็บตัวอย่างน้ำ ดังนี้

7.1 ขั้นตอนน้ำดิบ 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 1.41 ความเข้มข้น $3.58 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

7.2 ขั้นตอนการกวนช้า 2 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.11 ความเข้มข้น $7.19 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

7.3 ขั้นตอนการกรอง 2 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.11 ความเข้มข้น $7.19 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

7.4 ขั้นตอนการทำลายเชื้อ 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 1.41 ความเข้มข้น $3.58 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

7.5 ขั้นตอนการสุบจ่าย 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 2.20 ความเข้มข้น $8.40 \times 10^{-6} \text{ ml}^{-1}$)

ผลการประเมินความเสี่ยง (risk estimate)

1. อัตราป่วยเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบส่ง-และสูบน้ำ จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 1 ถึง 7 คน/แสนคน/ปี
2. อัตราป่วยเฉลี่ยสาเหตุจากโปรโตซัวที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงานบางเขน เฉพาะขั้นตอนสูบส่ง-และสูบน้ำ จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 0.05 ถึง 0.86 คน/แสนคน/ปี
3. ความเสี่ยงเฉลี่ยสาเหตุจากแบคทีเรียที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาจากโรงงานบางเขน โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 2.79×10^{-8} ถึง 2.38×10^{-7}
4. ความเสี่ยงเฉลี่ยสาเหตุจากโปรโตซัวที่อาจจะปนเปื้อนน้ำประปาจากโรงงานบางเขน โดยอาศัยเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) จำนวน 160 ตัวอย่าง ระหว่าง 1.38×10^{-10} ถึง 1.80×10^{-9}

การรายงานระดับความเสี่ยง (Risk estimates)

รูปแบบ “อัตราป่วยต่อประชากรแสนคน”

เพื่อเป็นการให้ข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงหรืออัตราการเจ็บป่วยจากโรคติดต่อทางเดินอาหารที่เกิดจากทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัว จึงได้นำเสนอสรุปรายงานการเฝ้าระวังโรคติดต่อประจำปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 (ส่วนสรุปรายงานการเฝ้าระวังโรคติดต่อประจำปี พ.ศ. 2556 กำลังอยู่ในระหว่างดำเนินการจัดพิมพ์เพื่อเผยแพร่) ได้แบ่งรายงานการเฝ้าระวังโรคที่เกี่ยวข้องกับโรคที่ติดต่อกับอาหารและ/หรือน้ำไว้ใน 3 กลุ่ม คือ โรคอุจจาระร่วงเฉียบพลัน (acute diarrhoea) โรคบิด (dysentery) และ โรคอาหารเป็นพิษ (food poisoning) ซึ่งมีอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราป่วยต่อประชากรแสนคนของโรคติดต่อทางเดินอาหาร

กลุ่มโรคติดต่อทางเดินอาหาร	อัตราป่วย/แสนคน	<i>Shigella</i>	<i>Salmonella</i>	<i>E.histolytica</i>
โรคอุจจาระร่วงเฉียบพลัน* (acute diarrhoea)	2,068.09	20.68	20.68	N/A
โรคบิด* (dysentery)	22.31	6.01	N/A	5.21
โรคอาหารเป็นพิษ (food poisoning)	160.31* – 185.78**	N/A	33.67* – 77.04** (mean = 55.35)	N/A
รวม		26.69	76.03	5.21

ที่มา : * Annual Epidemiological Surveillance Report (AESR) 2011

** Annual Epidemiological Surveillance Report (AESR) 2012

1. ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจากแบคทีเรียจากการใช้น้ำประปาอย่างเดียวยู่ระหว่าง 1-7 คน/แสนคน/ปี

2. ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจาก *Shigella* จากการใช้น้ำประปาอย่างเดียวจากการศึกษาครั้งนี้ คือ 1 คน/แสนคน/ปี ในขณะที่อัตราป่วยสาเหตุจาก *Shigella* ที่เกิดจากอาหารและน้ำ คือ 26.69 คน/แสนคน/ปี คิดเป็นร้อยละ 3.7 เท่านั้น

3. ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจาก *Salmonella* จากการใช้น้ำประปาอย่างเดียวจากการศึกษาครั้งนี้ คือ 4 คน/แสนคน/ปี ในขณะที่อัตราป่วยสาเหตุจาก *Salmonella* ที่เกิดจากอาหารและน้ำ คือ 76.03 คน/แสนคน/ปี คิดเป็นร้อยละ 5.3 เท่านั้น

4. ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจากโปรโตซัวจากการใช้น้ำประปาอย่างเดียว เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยจำนวนผู้ป่วยอยู่ระหว่าง 0.05-0.86 คน/แสนคน/ปี

5. ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจาก *Entamoeba histolytica* จากการใช้น้ำประปาอย่างเดียวจากการศึกษาครั้งนี้ คือ 0.05 คน/แสนคน/ปี ในขณะที่อัตราป่วยสาเหตุจาก *Entamoeba histolytica* ที่เกิดจากอาหารและน้ำ คือ 5.21 คน/แสนคน/ปี คิดเป็นร้อยละ 0.96 เท่านั้น

6. ข้อสังเกต คือ ค่าเฉลี่ยความเสี่ยง หรือ ค่าเฉลี่ยอัตราป่วยต่อประชากรแสนคน/ปี สาเหตุจากการใช้น้ำประปาอย่างเดียวจากการศึกษาครั้งนี้ คิดเป็นร้อยละ 0.96-5.3 ของอัตราป่วยที่เกิดจากอาหารและน้ำที่รายงานโดยสำนักระบาด กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้นี้ อาจจะยังมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ โดยควรจะได้มีการตรวจสอบกับสำนักระบาด กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข เพื่อตรวจสอบสัดส่วนที่แท้จริงของผู้ป่วยที่เกิดจากน้ำ ซึ่งจะทำได้ทำให้สามารถปรับระดับความเสี่ยงที่คำนวณได้จากการ model และ simulation ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

รูปแบบ “DALY/year”

1. Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย WHO ในบทที่ 3 ได้กำหนด เป้าฐานสุขภาพ (health-based target) ไว้ที่ $< 10^{-6}$ DALY/year เป็น tolerable burden of disease target ได้ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณียังอนุโลมให้กำหนดระดับเป้าหมายสุขภาพ (health-based target) ที่เข้มงวดน้อยลงมา เช่น $< 10^{-5}$ DALY/year หรือ $< 10^{-4}$ DALY/year ก็ได้

2. เกณฑ์ความปลอดภัยของน้ำประปาที่กำหนดขององค์การอนามัยโลก คือ DALY/year $< 1 \times 10^{-6}$ ในขณะที่ DALY/year ของแบคทีเรียก่อโรคและโปรโตซัวก่อโรคที่สูงที่สุด (maximum) ที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน อยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ 9.77×10^{-13} ถึง 7.67×10^{-7} และ 7.84×10^{-15} ถึง 4.11×10^{-9} ตามลำดับ ดังนั้น ความเสี่ยงจากการใช้น้ำประปาที่ผลิตโดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงได้มาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก

คำชี้แจงเพิ่มเติม กรณีการพบ *Giardia* cyst ในระบบการผลิตน้ำประปา

การตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของโปรโตซัวจะเป็นการใช้ polymerase chain reaction (PCR) ซึ่งไม่สามารถแยกได้ว่าผลบวกที่ได้ อาจจะเป็นโปรโตซัวที่อาจจะยังสามารถก่อโรคได้ (infectious) หรือ เป็นเซลล์ที่ตายแล้ว (inactivated) อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบกับฝ่ายโรงงานบางเขน ได้รับข้อมูลระดับความเข้มข้นของคลอรีนในระบบการผลิตน้ำประปาในวันที่ 7 กรกฎาคม 2557 ดังนี้

1. ก่อนเข้าสู่ขั้นตอน Disinfection

- Pre-chlorination	= ความเข้มข้น	3.0 mg/l
- Intermediated chlorination	= ความเข้มข้น	1.8-2.4 mg/l

2. ขั้นตอน Disinfection

- Post-chlorination

= ความเข้มข้น 2.5-3.0 mg/l

= ระยะเวลา 120 นาที

และเมื่อวัดความเข้มข้นของ residual chlorine ในน้ำประปา ณ สถานีส่งได้ค่าอยู่ระหว่าง 1.0-2.0 mg/l ซึ่งตาม Guidelines for drinking water quality 4th edition โดย WHO ในบทที่ 11 เรื่อง Microbial fact sheet กล่าวว่า “The time required for 90% inactivation (*Giardia intestinalis*)⁶ at a free chlorine residual of 1 mg/l is about 25–30 minutes” หมายความว่า ต้องใช้เวลานานประมาณ 25-30 นาทีในการทำลาย (*Giardia intestinalis*) ให้ลดลง ร้อยละ 90 เมื่อความเข้มข้นของ free chlorine residual คือ 1 mg/l

ดังนั้นหาก free chlorine = 1 mg/l มี contact time = 25 นาที จะสามารถทำลาย *Giardia* cyst ได้ร้อยละ 90 หรือ $1.0 \log (25 \text{ mg/l} \cdot \text{นาที})$

ขั้นตอน Disinfection

การพิจารณาเฉพาะขั้นตอน Post chlorination ใช้ความเข้มข้น 2.5-3.0 mg/l แต่ไม่ทราบว่ามี residual (free) chlorine เท่าไรในขั้นตอน Disinfection แต่ว่า residual chlorine ในระบบสูบน้ำวัดได้ประมาณ 1.0-2.0 mg/l ดังนั้น ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ มี residual (free) chlorine = 1.0 mg/l ในขั้นตอน Disinfection ซึ่งมีระยะเวลาในการสัมผัสกับ *Giardia* cyst = 120 นาที เทียบเท่ากับ free chlorine $120 \text{ mg/l} \cdot \text{นาที}$ ⁷

ในขณะที่ free chlorine 25 mg/l*นาที สามารถทำลาย *Giardia* cyst ได้ 1.0 log

ดังนั้น free chlorine 120 mg/l*นาที สามารถทำลาย *Giardia* cyst ได้ 4.5 log (~63,000 cysts)

ดังนั้น แม้ว่าจะมีการพบ *Giardia* ได้ในระบบสูบน้ำ ระดับของ free chlorine residual ตั้งแต่ขั้นตอน Disinfection ก็สามารถทำลาย *Giardia* ในระบบการผลิตน้ำประปาได้

=====

⁶ ชื่ออื่นของ *G. lamblia* คือ *G. duodenalis* หรือ *G. intestinalis*

⁷ LeChevallier, MW. and Au, KK. 2004. Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. Published by IWA Publishing on behalf of the World Health Organization pp.48 http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/en/watreatpath.pdf

เอกสารอ้างอิง

- การประปานครหลวง “คลอรีน http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=440
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ “การควบคุมกระบวนการผลิตน้ำประปา ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ” การประปานครหลวง http://csr.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=566
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ “การออกแบบระบบผลิตน้ำประปา ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ” การประปานครหลวง http://www.mwa.co.th/download/file_upload/waterwor.pdf
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ “สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มบรรจุขวด” ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง http://csr.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=577
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF) 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition Part 9000 : Microbiological examination
- Annual Epidemiological Surveillance Report (AESR) 2011. Bureau of Epidemiology. National Trustworthy and Competent Authority in Epidemiological Surveillance and Investigation, Thai Veteran-support Organization (Under Royal Patronage) Publishing, Bangkok. ISBN 0857 – 6521
- Annual Epidemiological Surveillance Report (AESR) 2012. Bureau of Epidemiology. National Trustworthy and Competent Authority in Epidemiological Surveillance and Investigation, Thai Veteran-support Organization (Under Royal Patronage) Publishing, Bangkok.
- Baudin I, Laine JM. 1998. Assessment and optimization of clarification process for *Cryptosporidium* removal. Proc. Annual conference. AWWA0898679796; WQTC, San Diego.
- Bellamy, W.D., Silverman, G.P, Hendricks, D.W., 1985. Filtration of *Giardia* cysts and other substances, vol. 2: Slow sand filtration. EPA-600/2-85-026. U.S. Environmental Protection Agency, MERL, Cincinnati, OH, April 1985. NTIS: PB-85-191633/AS.
- Betancourt WQ, Rose JB. 2004. Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *gardia*. Vet Parsitol ;126:219–34.
- Black R.E., Levine, M.M., Clements. M.L., Hughes, T.P. and Blaser, M.J. 1988. Experimental *Campylobacter jejuni* infection in humans. The Journal of Infectious Diseases. 157(3): 472-479.
- Buchanan, R. L., J. L. Smith, and W. Long. 2000. Microbial risk assessment: dose-response relations and risk characterization. Int J Food Microbiol 58:159-72.
- Bukhari Z, Hargy TM, Bolton J, Dussert B, Clancy JL, Marshall MM. 1999. Medium-pressure UV for oocyst inactivation. J AWWA; 91(3):86–94.
- Corona-Vaszuez B, Samuelson A, Rennecker JL, Marinas BJ. 2002. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone and free chlorine. Water Res ;36:4053–63.
- Craik SA, Weldon D, Finch GR, Bolton JR, Belosevic M. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts using medium and low pressure ultraviolet radiation. Water Sci Res ;35:1387–98.
- Cummins, R., Kennedy, M. and Cormican. 2010. Quantitative risk assessment of *Cryptosporidium* in tap water in Ireland. Science of the Total Environment 408 : 740–753

- DeWalle, F.B., Engeset, J., Lawrence, W., 1984. Removal of *Giardia lamblia* cysts by drinking water plants. EPA-600/S2-84-069. U.S. Environmental Protection Agency, MERL, Cincinnati, OH.
- Dugan NR, Fox KR, Owens JH, Miltner RJ. Controlling *Cryptosporidium* oocysts using conventional treatment. J AWWA ;93(12):64–76
- Edzwald JK, Tobiasson JE, Parento LM, Kelley MB, Kaminski GS, Dunn HJ, Galant PB. *Giardia* and *Cryptosporidium* removals by clarification and filtration under challenge conditions. J AWWA;92:70–84.
- EPA Environmental Protection Agency, 1989. National primary drinking water regulations; filtration and disinfection; turbidity; *Giardia lamblia*, viruses, *Legionella*, and heterotrophic bacteria. Surface Water Treatment Rule (SWTR) Fed. Reg. 52 (24), 27486.
- EPA. Environmental Protection Agency, 2006. the quality of drinking water. A report for the year 2005 1-84095-213-X
- FAO/WHO. 2002. Risk assessments of *Salmonella* in eggs and broiler chickens. Microbiological risk assessment series 2. pp.17-96.
- FAO/WHO. 2003. Hazard Characterization for Pathogens in Food and Water: Guideline. Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization.
- Guy, R.A., Pierre Payment, Ulrich J. Krull, and Paul A. Horgen. 2003. Real-Time PCR for Quantification of *Giardia* and *Cryptosporidium* in Environmental Water Samples and Sewage. Applied and Environmental Microbiology. 69: 5178–5185
- Gyurek, L.L., Finch, G.R., Belosevic, M., 1997. Modeling chlorine inactivation kinetics of *Cryptosporidium parvum* in phosphate buffer. J. Environ. Eng. 125, 913–924.
- Haas CN, Kaymak B. 2003. Effect of initial microbial density on inactivation of *Giardia muris* by ozone. Water Res ;37:2980–8.
- Haas, C.N., Rose, J.B. and Gerba, C.P. 1999. Quantitative microbial risk assessment. John Wiley & Sons, Inc.
- Hall T, Pressdee J, Gregory R, Murray K. 1995. *Cryptosporidium* removal during water treatment using dissolved air flotation. Water Sci Technol ;31(3–4):125–35.
- Harrington GW, Chen HW, Harris AJ, Xagoraki I, Battigelli DA, Standridge JH. 2001. Removal of emerging waterborne pathogens, AWWA. Denver, CO: Research Foundation 1- 58321-092-X
- Hashimoto A, Kunikane S, Hirata T. Prevalence of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in the drinking water supply in Japan. Water Res 2002;36(3):519–26.
- Havelaar, A., Haagsma, JA., Mangen, MJ., Kemmeren, JM., Verhoef, LP., Vijgen, SM., Wilson, M., Friesema, IH., Kortbeek, LM., Duynhoven, YT. and Pelt, W. 2012. Disease burden of foodborne pathogens in the Netherlands, 2009. International Journal of Food Microbiology 156: 231–238
- Hijnen WA, Dullemeijt YJ, Schijven JF, Hanzens-Brouwer AJ, Rosielle M, Medema G. 2007. Removal and fate of *Cryptosporidium parvum*, *Clostridium perfringens* and small-sized centric diatoms (*Stephanodiscus hantzschii*) in slow sand filters. Water Res ;41(10):2151–62.
- Jacangelo JG, Rhodes Trussell R, Watson M. 199. Role of membrane technology in drinking water treatment in the United States. Desalination ;113:119–27.

- Jakubowski W, Craun GF. 2002. Update on the control of *Giardia* in water supplies. In: Olson BE, Olson ME, Wallis PM, editors. *Giardia*, the cosmopolitan parasite. Wallingford, UK: CABI Publishing; p. 217–38.
- Jakubowski,W., 1990. The control of *Giardia* in water supplies. In: Meyer, E.A. (Ed.), Human Parasitic Diseases, *Giardiasis*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 335–356.
- Keegan A, Daminato D, Saint CP, Monis P. 2008. Effect of water treatment processes on *Cryptosporidium* infectivity. *Water Res* ;42:1805–11.
- Kelley, M.B.,Warrier, P.K., Brokaw, J.K., Barret, K.L., Krosimar, S.J., 1995. A study of two U.S. army installation drinking water sources and treatment systems for the removal of *Giardia* and *Cryptosporidium*. In: Proceedings of the 1995 Water Quality Technology Conference. AWWA, Denver, CO, pp. 2197–2230.
- Korich, D.G., Mead, J.R., Madore, M.S., Sinclair, N.A., Sterling, C.R., 1990. Effects of ozone, chlorine dioxide, chlorine and monochloramine on *Cryptosporidium* parvum oocyst viability. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 1423–1428.
- Krasner SW, Amy GL. 1995. Jar-test evaluations of enhanced coagulation. *J AWWA*;87(10):93-107.
- Kuhn RC, Rock CM, Oshima KH. 2002. Effects of pH and magnetic material on immunomagnetic separation of *Cryptosporidium* oocysts from concentrated water samples. *Appl Environ Microbiol* ;68:2066–70.
- Lammerding, A. M., and A. Fazil. 2000. Hazard identification and exposure assessment for microbial food safety risk assessment. *Int J Food Microbiol* 58:147-57.
- LeChevallier MW and K.K. Au 2004. Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. Published by IWA Publishing on behalf of the World Health Organization pp.48
- LeChevallier MW, Norton MW, Lee RG. 1991. *Giardia* and *Cryptosporidium* spp. in filtered drinking water supplies. *Appl Environ Microbiol* ;57:2617–21.
- Lechevallier MW, Norton WD. 1992. Examining relationships between particle counts and *Giardia*, *Cryptosporidium*, and turbidity. *J AWWA* ;84(12):54.
- LeChevallier, MW. and Au, KK. 2004. Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. Published by IWA Publishing on behalf of the World Health Organization pp.48 http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/en/watreatpath.pdf
- Linden KG, Shin G, Fauber G, Cairns W, Sobsey MD. 2002. UV disinfection of *Giardia* lamblia cysts in water. *Environ Sci Technol* ;36:2519–22.
- MWA “Bangkhen Water Treatment Plant”
http://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa_internet_eng/download/question/bkplant_eng.pdf
- Nieminski, E.C., Ongerth, J.E, 1995. Removing *Giardia* and *Cryptosporidium* by conventional treatment and direct filtration. *J. AWWA* 87, 96–106.
- Ongerth JE, Hutton PE. 2001. Testing of diatomaceous earth filtration for removal of *Cryptosporidium* oocysts. *J AWWA* ;93:54–63.

- Patania NL, Jacangelo JG. Optimization of filtration for cyst removal. AWWA Research Foundation and AWWA0-89867-825-0; 1995. Denver.
- Peeters JE, Mazas EA, Masschelein WJ, Villacorta Martinez de Maturana I, Bebacker E. 1989. Effect of disinfection of drinking water with ozone or chlorine dioxide on survival of *Cryptosporidium parvum* oocysts. J Appl Environ Microbiol ;55:1519–22.
- Plummer JD, Edzwald JK, Kelley MB. 1995. Removing *Cryptosporidium* by dissolved-air flotation. J AWWA;87(9):85–95.
- Pouillot R, Beaudeau P, Denis JB, Derouin F. 2004. A quantitative risk assessment of waterborne cryptosporidiosis in France using second-order Monte Carlo simulation. Risk Anal;24(1):1-17.
- Srisuphanunt, M. Karanis, P., Charoenca, N., Boonkhao, N., and Ongerth, J. 2010. *Cryptosporidium* and *Giardia* detection in environmental waters of southwest coastal areas of Thailand. Parasitol Res 106:1299–1306
- Standards Unit, Evaluations and Standards Laboratory, Centre for Infections 2006. Detection of *Salmonella* species Issue no. 3 Issue date 09-07-2006 in conjunction with the Regional Food, Water and Environmental Coordinators Forum. Reference no: W7i3 from the Health Protection Agency, United Kingdom
- Standards Unit, Evaluations and Standards Laboratory, Centre for Infections 2007. Detection of *Campylobacter* species in water Issue no. 3 Issue date 24-10-2007 in conjunction with the Regional Food, Water and Environmental Coordinators Forum. Reference no: W 8i3 from the Health Protection Agency United Kingdom
- States SM, Tomko R, Scheuring M, Casson L. 2002. Enhanced coagulation and removal of *Cryptosporidium*. J AWWA ;94(11):67.
- States, S.M., Stadterman, K., Ammon, L., Vogel, P., Baldizar, J., Wright, D., Conley, L., Sykora, J., 1997. Protozoa in river water: sources, occurrence, and treatment. J. AWWA 89, 74–83.
- Tetsuji O, Phengxay D, Wataru N, Takao H, Mitsumasa O. 2006. Enhancement of *Cryptosporidium* oocyst removal by coagulation and sedimentation with polysilicate iron. J Chem Eng Jpn ;39(2):137–43.
- Van der Bruggen B, Vandecasteele C, Gestel TV, Doyen W, Leysen R. 2003. A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. Environ Prog ;22:46–56.
- Vose, D. J. 1998. The application of quantitative risk assessment to microbial food safety. J Food Prot 61:640-8.
- WHO 2001. Water Quality : Guidelines, Standards and Health: Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. ISBN 1 900222 28 0 (IWA Publishing) ISBN 92 4 154533 X (World Health Organization) IWA Publishing, London. pp. 431.
- WHO 2003. Domestic water quantity, service level and health. authors : Howard, G. and Bartram, J. Geneva, Switzerland.
- WHO 2005. Water Safety Plans : Managing drinking-water quality from catchment to consumer. Water, Sanitation and Health Protection and the Human Environment

- WHO 2011. Guidelines for Drinking Water Quality. ISBN 978 92 4 154815 1 WHO Library Cataloguing-in-Publication Data pp.541.
- WHO 2013. Technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencies ของ Water, engineering and development center (WEDC) authors : Reed, B., Reed, B. Loughborough University, Leicestershire UK.
- Yates RS, Green JF, Liang S, Merlo RP, DeLeon R. 1997. Optimizing direct filtration processes for *Cryptosporidium* removal. Proceedings of Annual conference. AWWA. Denver: WQTC
- Zimmer JL, Slawson RM, Huck PM. 2003. Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation. Water Res ;37(14):3517–23.

=====

ภาคผนวก

วิธีการเตรียมจุลินทรีย์

1. การเตรียมเซลล์แบคทีเรีย

1.1 การ subculture

- ใช้แบคทีเรียสำรองที่เก็บในตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส โดยการละลายที่อุณหภูมิห้อง
- ใช้ need หรือ loop เชี่ยเชื้อจากหลอดสำรองเชื้อ ถ่ายเชื้อลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว (broth) ที่เตรียมไว้ล่วงหน้า
- นำอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเชื้ออยู่ ไปบ่มเพาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เช่น 37 องศาเซลเซียส ประมาณ 12-18 ชั่วโมง

1.2 การนับจำนวนเซลล์

- ใช้วิธี Standard plat count (SPC) สามารถทำได้ 2 วิธีการ คือ
 - = Pour plate เหมาะกับเชื้อที่หลากหลายในการใช้อากาศ เช่น aerobic, anaerobic หรือ microaerophilic
 - = Spread plate เหมาะกับเชื้อที่ไม่ทนความร้อนจากวุ้นที่อุณหภูมิสูง
 - = เจือจางแบบ 10 fold serial dilution ประมาณ 7-9 ครั้ง แล้ว เลือกนับเฉพาะ plate ที่มีจำนวนเชื้อระหว่าง 25-250 colonies
 - = ได้ความเข้มข้นเชื้อใน หน่วย colony forming unit/ml (cfu/ml)

2. การเตรียม *Cryptosporidium parvum*

การเตรียม *Cryptosporidium parvum* ระยะ oocyst ได้จากการเก็บจากอุจจาระลูกวัวที่ท้องเสีย ประเทศญี่ปุ่นและดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการ Prof. Takahashi Yuzo คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัย Gifu ประเทศญี่ปุ่น

2.1 นำอุจจาระมาทำ sucrose floatation โดยนำส่วนใสที่ลอยด้านบนปริมาตร 1 ml. มาล้างด้วย PBS อย่างน้อย 3 ครั้ง สุดท้ายนำตะกอนมาแยกหาเฉพาะ *Cryptosporidium parvum* ในระยะ oocyst ด้วย bead kit ซึ่งจะได้เฉพาะ *Cryptosporidium parvum* ติดมากับเม็ด bead แล้วทำการสกัดดีเอ็นเอจากเม็ด bead

2.2 นำ DNA ที่ได้ มาทำการเพิ่มจำนวนโดยใช้ primers จำเพาะ

2.3 หลังจากได้ PCR product ที่จำเพาะแล้วจะนำ run บนเจลอีกครั้ง

2.4 แล้วตัดเจลที่จำเพาะทำการ DNA purification ด้วย kit และนำ DNA ที่ได้ไปเพิ่มจำนวนใน *E.coli* (ใช้ TOPO® TA Cloning® Kits) ซึ่ง DNA เหล่านี้ใช้เป็น positive DNA

3. การเตรียม *Entamoeba histolytica*

การเตรียม positive control สำหรับ *Entamoeba histolytica* DNA นั้นได้รับความอนุเคราะห์จาก Prof. Takahashi Yuzo คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัย Gifu ประเทศญี่ปุ่น

1. นำ DNA ที่ได้ มาทำการเพิ่มจำนวนโดยใช้ primers จำเพาะ

2. หลังจากได้ PCR product ที่จำเพาะแล้วจะนำ run บนเจลอีกครั้ง
3. แล้วตัดเจลที่จำเพาะทำการ DNA purification ด้วย kit และนำ DNA ที่ได้ไปเพิ่มจำนวนใน *E.coli* (ใช้ TOPO® TA Cloning® Kits) ซึ่ง DNA เหล่านี้ใช้เป็น positive DNA

4. การเตรียม *Giardia lamblia*

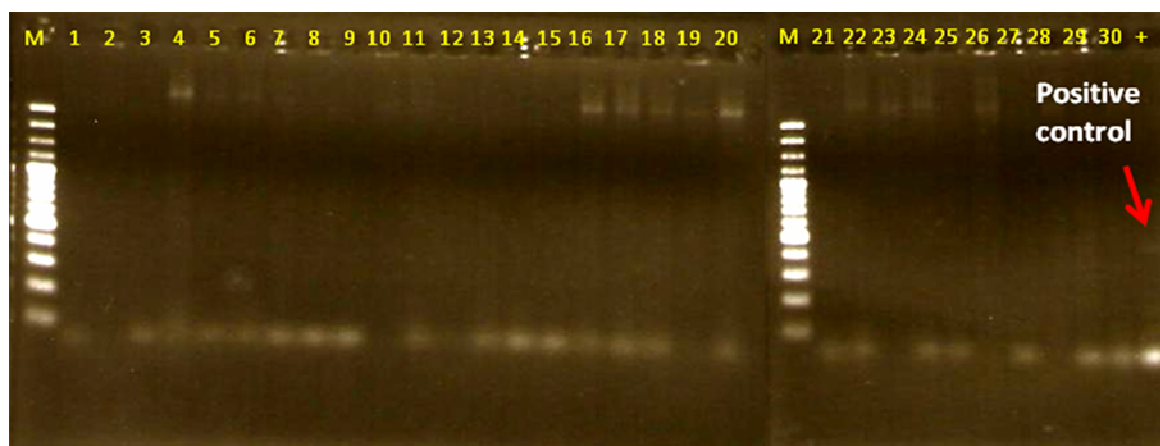
การเตรียม positive control สำหรับ *Giardia lamblia* DNA นั้นได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. จตุรงค์ พุทธิพรทิพย์ ภาควิชาปรสิตวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ดีเอ็นเอที่ได้ มาทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอโดยใช้ primers ที่จำเพาะ
2. หลังจากได้ PCR product ที่จำเพาะแล้วจะนำ run บนเจลอีกครั้ง
3. แล้วตัดเจลที่จำเพาะทำการ DNA purification ด้วย kit และนำ DNA ที่ได้ไปเพิ่มจำนวนใน *E.coli* (ใช้ TOPO® TA Cloning® Kits) ซึ่ง DNA เหล่านี้ใช้เป็น positive DNA

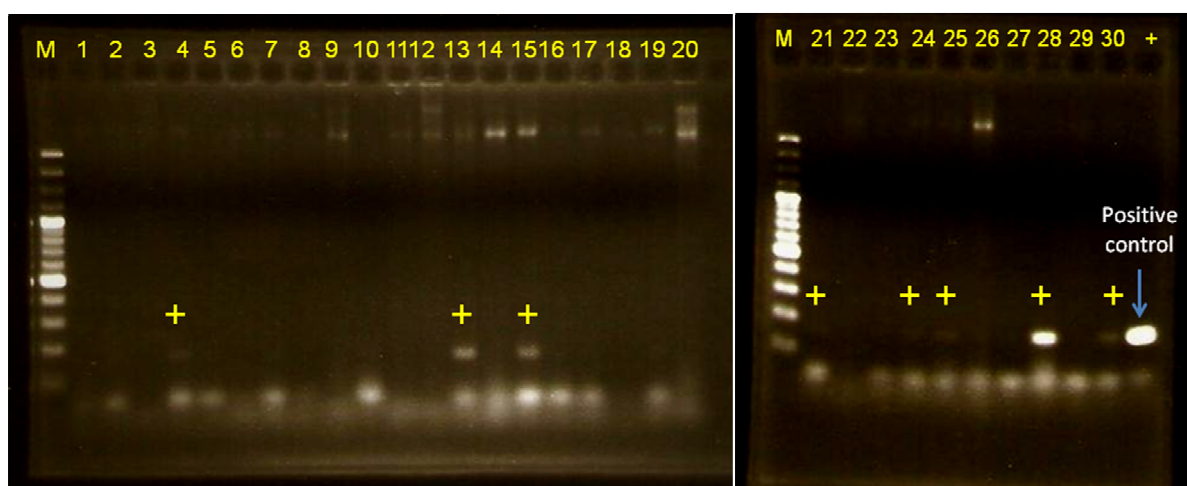
=====

ตัวอย่างผลการตรวจด้วยวิธี PCR สำหรับโปรโตซัว 3 ชนิด คือ

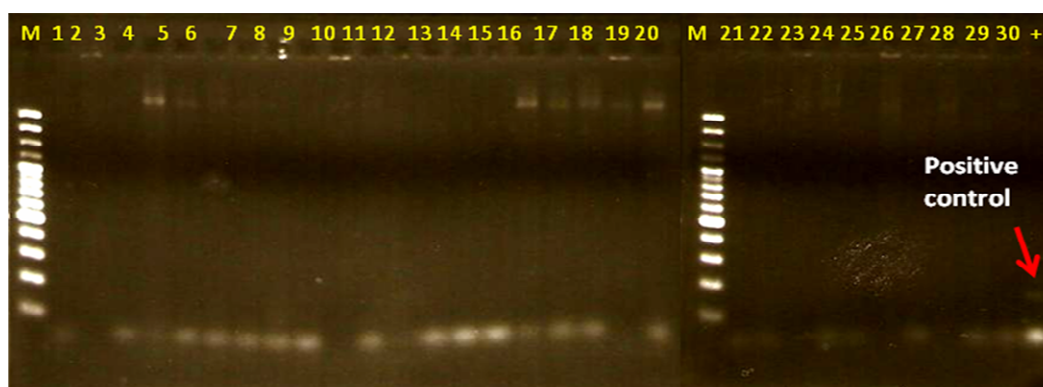
1. *Cryptosporidium parvum*



2. *Giardia lamblia*



3. *Entamoeba histolytica*



บทความสำหรับการเผยแพร่

ยังไม่มี เนื่องจาก ข้อมูลที่นำเสนอต่อสาธารณะอาจจะมีผลกระทบต่อองค์กร ดังนั้น เป้าต้นอาจจะต้องรออนุมัติจากผู้บริหารองค์กรก่อน

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

1. การนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอโดยตรงต่อ “ผู้บริหารของการประปานครหลวง” ผ่านทีมคณะวิจัยจากการประปานครหลวง เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายและการผลักดันความปลอดภัยของน้ำประปาสู่ความเป็นสากลมากขึ้น

2. การนำผลที่ได้จากการวิจัยนำเสนอต่อ “ผู้บริหารของการประปาสวนภูมิภาค” เพื่อสร้างความตระหนักรู้ (awareness) ในการยกระดับความปลอดภัยของน้ำประปาผ่านการวิเคราะห์ความเสี่ยง

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ระยะ	กิจกรรม (Activities)	ผลงานการดำเนินงาน (Outputs)
6 เดือน ที่ 1	- ศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - เก็บตัวอย่างน้ำในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - วิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำ - อบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 1 รุ่น 1	- กำหนดการเก็บตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ - ผู้ผ่านการอบรมการประเมินความเสี่ยงระดับ 1 รุ่น 1
6 เดือน ที่ 2	- เก็บตัวอย่างน้ำในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - วิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำ - อบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 1 รุ่น 2	- ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ - ผลการประเมินความเสี่ยง - ผู้ผ่านการอบรมการประเมินความเสี่ยงระดับ 1 รุ่น 2
6 เดือน ที่ 3	- สร้าง Model การปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - กำหนด “เป้าผลลัพธ์สุขภาพ” - กำหนด “เป้าประสิทธิภาพ” ให้สอดคล้องกับผลประเมินความเสี่ยง - อบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 2	- Model การปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา - ได้ “เป้าผลลัพธ์สุขภาพ” และ “เป้าประสิทธิภาพ” ที่สอดคล้องกับผลประเมินความเสี่ยง - ผู้ผ่านการอบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 2
6 เดือน ที่ 4	- คัดเลือกมาตรการจัดการความเสี่ยง - ปรับใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - เก็บตัวอย่างน้ำในขั้นตอนการผลิตที่ใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - วิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคในตัวอย่างน้ำที่ใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - อบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 3	- ใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - ระดับการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำที่ใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - ผลการประเมินความเสี่ยงหลังจากใช้มาตรการจัดการความเสี่ยง - ผู้ผ่านการอบรมประเมินความเสี่ยงระดับ 3

=====