

การวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ในกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีน Water Footprint Analysis in Benzene and Paraxylene Production Process

เรืองรุตน์ เรืองเดช* และวิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Ruengrut Ruengdej* and Wipawee Tharmmaphornphilas

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phayathai Road, Wang Mai, Pathumwan, Bangkok 10330

Received: December 7, 2018; Accepted: January 7, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้น้ำของกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีน ทั้งการใช้น้ำทางตรงและทางอ้อม การใช้น้ำทางตรงประกอบด้วยการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถวัดโดยตรงจากข้อมูลของโรงงาน การใช้น้ำทางอ้อมประกอบด้วยการใช้น้ำในส่วนของการได้มาของวัตถุดิบ การใช้ไฟฟ้า การผลิตไอน้ำ การผลิตไนโตรเจน และการใช้น้ำในกระบวนการขนส่ง ซึ่งโรงงานไม่สามารถวัดโดยตรง จึงต้องเก็บข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงอื่น ๆ ที่เชื่อถือได้ วิธีประเมินผลกระทบการใช้น้ำที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้วิธีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ โดยอ้างอิงวิธีประเมินตามข้อกำหนดและแนวทางของ ISO 14046 ผลลัพธ์จากการประเมินพบว่าผลิตภัณฑ์เบนซีนและพาราไซลีนมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ซึ่งวัดผลกระทบในแง่ของการขาดแคลนน้ำต่อ 1 กิโลกรัม เท่ากับ 0.613 และ 1.432 LiterH₂Oeq ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้วางแผนมาตรการในการลดการใช้น้ำและผลกระทบจากการใช้น้ำ โดยแบ่งมาตรการเป็น 2 ส่วน คือ การลดผลกระทบที่เกิดจากการใช้น้ำทางตรง และการลดผลกระทบจากการใช้น้ำทางอ้อม เพื่อให้กระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีนเกิดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ : ผลกระทบจากการใช้น้ำ; การประเมินวัฏจักรชีวิต; วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

Abstract

This research studies the effect of water consumption in a chemical industry, that focuses on Benzene and Paraxylene processes. The water consumption consists of direct and indirect water. Direct water means the water used in production process and indirect water means the water used in

producing substrate, electric, steam, nitrogen and water involves in transportation process. This research proposes a water footprint evaluation based on principle, requirement, and guidelines of ISO 14046. It is found that the water scarcity footprints of Benzene and Paraxylene are 0.613 and 1.432 LiterH₂Oeq, respectively. The results not only show the effect from water footprint in terms of water scarcity but also are used to provide corrective action which assesses products, processes and organizations using life cycle assessment (LCA). The corrective action in this study can be proceeded by reducing direct and indirect water effect.

Keywords: water consumption; life cycle assessment (LCA); water footprint

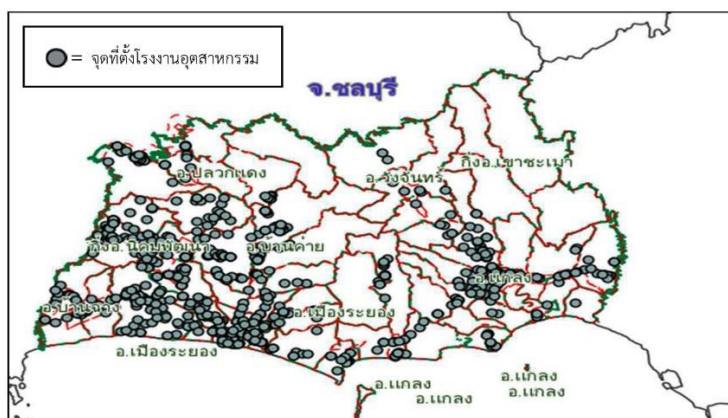
1. คำนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิต และเป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนาประเทศ ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก รวมถึงการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ เป็นปัจจัยที่ทำให้มีความต้องการใช้น้ำสูงขึ้นในทุกภาคส่วน อันส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำในอนาคต ฉะนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสี่ยงดังกล่าวจึงควรมีการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืน โดยวิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของแต่ละภาคส่วน เพื่อหาแนวทางป้องกันความเสี่ยงในการขาดแคลนทรัพยากรน้ำ หรืออย่างน้อยที่สุดควรมีการดำเนินการให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดต่อสังคมและประเทศ

ประเทศไทยในระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา
มาได้เผชิญปัญหาเกี่ยวกับน้ำอย่างต่อเนื่อง อาทิ

สถานการณ์ภัยแล้งที่รุนแรง ปริมาณน้ำสำรองในเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ไม่เพียงพอ ปัญหาแหล่งน้ำเสื่อมโทรมและปนเปื้อนสารพิษอันมีสาเหตุมาจากชุมชนเมือง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม รวมทั้งอุทกภัยรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งวิกฤตน้ำดังกล่าวที่เกิดขึ้นสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจ สังคม และการดำรงวิถีชีวิตของประชาชนอย่างมหาศาล และมีแนวโน้มความรุนแรงเพิ่มขึ้น (WWF, 2018)

อุตสาหกรรมที่นำมาวิเคราะห์ในการวิจัยนี้เป็นอุตสาหกรรมเคมีในจังหวัดระยอง ซึ่งเป็นแหล่งท่องเที่ยว การอุตสาหกรรม และการเกษตรที่สร้างรายได้ให้กับประเทศอย่างมหาศาล จึงทำให้มีสัดส่วนการใช้น้ำสูงมากด้วย ดังนั้นการจัดสรรน้ำเพื่อให้ทุกภาคส่วนมีน้ำใช้อย่างเพียงพอจึงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสำคัญอย่างมาก



รูปที่ 1 ความหนาแน่นของ
โรงงานอุตสาหกรรมใน
จังหวัดระยอง (ระบบ
สารสนเทศภูมิศาสตร์
เพื่อสนับสนุนการ
จัดการทรัพยากรน้ำ
จังหวัดระยอง, 2018)

จากรูปที่ 1 แสดงพื้นที่จังหวัดระยองที่มีโรงงานอุตสาหกรรมตั้งอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้มีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำ เนื่องจากน้ำเป็นทรัพยากรที่จำเป็นสำหรับภาคอุตสาหกรรม และในอุตสาหกรรมเคมีนั้นน้ำถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการต่าง ๆ ตั้งแต่การนำสินแร่หรือวัตถุดิบจากธรรมชาติที่เป็นสารตั้งต้นมาผ่านกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจนได้สารเคมีหรือเคมีภัณฑ์ตามที่ต้องการ ด้วยทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงถือเป็นความท้าทายในการจัดการให้มีการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะการขาดแคลนน้ำมีความเสี่ยงต่อการดำเนินธุรกิจทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โรงงานอุตสาหกรรมจึงควรกำหนดนโยบายและแนวทางในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยควรประเมินปริมาณการใช้น้ำให้ครบทั้งวงจรชีวิต (life cycle assessment) ซึ่งทำให้เห็นปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของกระบวนการต่าง ๆ และสามารถนำมาวางแผนการใช้น้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับวิธีที่นำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางการวิเคราะห์ปริมาณการใช้น้ำในการวิจัยนี้ ใช้วิธีการประเมินการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เพื่อให้ทราบปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริง โดยเรียกการประเมินในลักษณะนี้ว่าการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint) ซึ่งเป็นการประเมินปริมาณและผลกระทบจากการใช้น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม ตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์หรือสินค้าถึงมือผู้บริโภค สินค้าที่มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์น้อยจะได้รับความสะดวกจากลูกค้ามากกว่าสินค้าที่มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มาก เพราะมีการใช้น้ำและสร้างผลกระทบน้อยกว่า การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกจากทำให้เห็นภาพปริมาณการใช้น้ำที่ซ่อนเร้นอยู่ในการผลิตสินค้าได้อย่างชัดเจนมากขึ้นแล้ว ยังสามารถนำมาประเมินผลกระทบที่เกิดจากการผลิตต่อการใช้ทรัพยากรน้ำอีกด้วย

ซึ่งจะทำให้เข้าใจปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งนำไปสู่วิธีแก้ปัญหาที่เชื่อมโยงกับกระบวนการผลิตสินค้าและห่วงโซ่อุปทาน (supply chain)

การประเมินปริมาณและผลกระทบจากการใช้น้ำโดยวิธีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการวิจัยนี้อ้างอิงหลักการและข้อกำหนดตามมาตรฐาน ISO 14046 (environment management: water footprint) โดยทำให้ทราบถึงปริมาณและผลกระทบจากการใช้น้ำที่แท้จริง และสามารถนำผลการวิเคราะห์มาใช้ในการวางแผนและหามาตรการสำหรับเป็นแนวทางในการป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากการขาดแคลนน้ำในอุตสาหกรรมเคมี

1.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องผลลัพธ์ของการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายแง่มุม ได้แก่ ใช้ในการเลือกแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการขาดแคลนน้ำและคุ่มค่าที่ต่ำที่สุดในประเทศจีน (Ning Ding *et al.*, 2018) การนำไปใช้วางแผนกลยุทธ์ในการดำเนินงานของธุรกิจก่อสร้าง (Gerbens-Leenes *et al.*, 2018) การใช้ในการวางแผนการผลิตในธุรกิจเสื้อผ้าให้เกิดผลกระทบต่อการทรัพยากรน้ำน้อยที่สุด (Pal *et al.*, 2017) การนำไปใช้ในการประเมินผลกระทบจากการบำบัดน้ำเสีย (Oele *et al.*, 2017) การใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้เกิดการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนด้วยการเลือกสารตั้งต้นที่สามารถลดผลกระทบจากการใช้น้ำได้มากที่สุด (Xiang *et al.*, 2016) เป็นต้น โดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนี้จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยที่เหมาะสมต่อไป

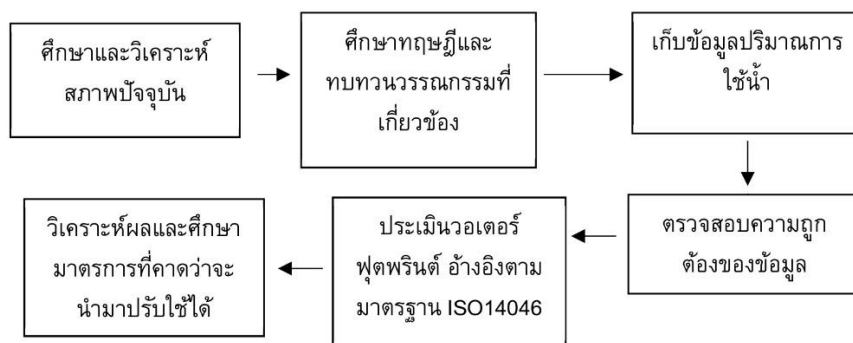
2. วิธีการวิจัย

2.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

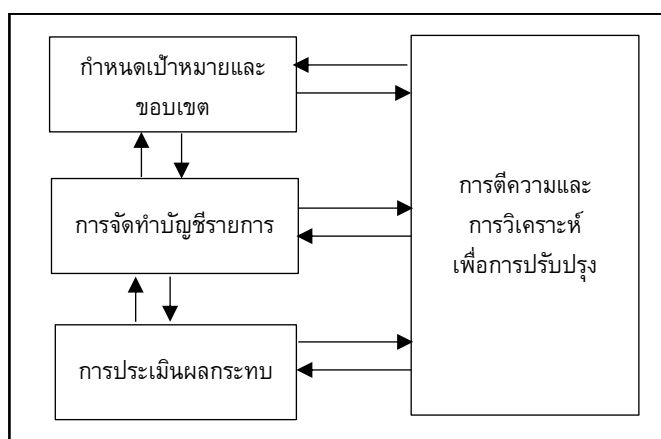
การดำเนินการวิจัยนี้เริ่มดำเนินการตั้งแต่การวิเคราะห์สภาพปัจจุบัน โดยการศึกษา

กระบวนการผลิตและภาพรวมการใช้้ำของโรงงาน จากนั้นจึงศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ประกอบการวางแผนและดำเนินงาน เมื่อได้แนวทางการดำเนินงานแล้วจึง

เก็บข้อมูลและประเมินค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ เพื่อนำไปหามาตรการในการจัดการอย่างตรงจุดต่อไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3 การประเมินอวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ตามหลักมาตรฐาน ISO14046 (International Standard for Organization, 2014)

การดำเนินการวิจัยนี้ใช้วิธีการประเมินอวอเตอร์ฟุตพริ้นต์เป็นหลักในการหาปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของกระบวนการผลิตเบ็นซินและพาราไซลีน โดยวิเคราะห์จากทั้งการใช้น้ำทางตรงที่ประกอบด้วยการใช้น้ำในกระบวนการต่าง ๆ ในการผลิต ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลโดยตรงจากโรงงาน และการใช้น้ำทางอ้อมที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลโดยตรงจากโรงงาน ซึ่งประกอบด้วยการใช้น้ำในการผลิตสารตั้งต้น สารเคมี ไฟฟ้า ทรัพยากรช่วยในการผลิต รวมถึงการขนส่ง อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO14046 ซึ่งมีหลักการประเมินที่สอดคล้องกับหลักการ

ประเมินวัฏจักรชีวิต ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักตามรูปที่ 3 คือ การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (goal and scope) การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (life cycle inventory) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (life cycle impact assessment) การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุง (interpretation and improvement analysis) (International Standard for Organization, 2014)

2.2 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (goal and scope)

การกำหนดขอบเขตมี 2 ประเภท คือ การกำหนดขอบเขตแบบ cradle to gate เริ่มต้นตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบมายังโรงงาน ไปจนถึงการผลิตผลิตภัณฑ์ในโรงงาน และการกำหนดขอบเขตแบบ cradle to grave เริ่มต้นตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการทำลายซาก โดยการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตต้องมีความสอดคล้องกัน สำหรับผลการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยฉบับนี้มีดังนี้

2.2.1 การกำหนดเป้าหมาย (goal)

ประเมินการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์เบนซีนและพาราไซลีน ในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ การผลิต และการเก็บผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีเก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำ เพื่อศึกษาข้อมูลปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของกระบวนการผลิตและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการใช้น้ำ สำหรับนำไปหามาตรการในการลดปริมาณและผลกระทบจากการใช้น้ำ

2.2.2 การกำหนดขอบเขตของการศึกษา (scope)

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีนจะพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) ทั้งจากการใช้น้ำทางตรง ซึ่งประกอบด้วยการใช้น้ำในกระบวนการผลิตและระบบสนับสนุนการผลิตต่าง ๆ และการใช้น้ำทางอ้อมซึ่งประกอบด้วยการใช้น้ำในการผลิตสารตั้งต้นและสารเคมีต่าง ๆ การผลิตไฟฟ้า การผลิตไอน้ำ การผลิตไนโตรเจน และการขนส่ง โดยจะพิจารณาในขอบเขตตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ (cradle to gate) เนื่องจากเป็นขอบเขตที่ทางโรงงานสามารถเก็บข้อมูลและหาแนวทางการจัดการ

2.2.3 หน่วยการทำงาน (function unit,

FU)

การประเมินปริมาณการใช้น้ำขาเข้าและขาออกในการวิจัยนี้ มีการกำหนดหน่วยการทำงาน (function unit) เพื่อระบุหน่วยการวัดปริมาณการใช้น้ำขาเข้าและขาออก โดยใช้หน่วยการทำงานเป็น 1 กิโลกรัมของผลิตภัณฑ์เบนซีน และ 1 กิโลกรัมของผลิตภัณฑ์พาราไซลีน

2.3 การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (life cycle inventory)

การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม คือ การวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องภายในขอบเขตและเป้าหมายของการศึกษา ซึ่งกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีนมีรายละเอียดฝั่งการไหลของกระบวนการผลิตและการใช้น้ำดังรูปที่ 4

2.3.1 การเก็บข้อมูลเพื่อประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

การเก็บข้อมูลเพื่อประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของการวิจัยนี้มีการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม ปี พ.ศ. 2560 โดยเก็บข้อมูลทั้งจากการใช้น้ำทางตรงซึ่งเป็นการใช้น้ำในกระบวนการผลิตที่สามารถเก็บข้อมูลโดยตรงจากโรงงาน และการใช้น้ำทางอ้อมซึ่งเป็นการใช้น้ำในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตประกอบด้วยการใช้น้ำจากกระบวนการผลิตสารตั้งต้น สารเคมี ไฟฟ้าและระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ โดยเก็บข้อมูลจากระบบเก็บข้อมูลของโรงงานและจากผู้ขาย การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ทั้งการใช้น้ำทางตรงและทางอ้อมใช้ข้อมูลทั้ง 2 ประเภท คือ ข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) ข้อมูลปฐมภูมิ (primary data)

การเก็บข้อมูลปฐมภูมิประกอบไปด้วยการเก็บข้อมูลทั่วไปของโรงงาน ข้อมูลกระบวนการผลิต ข้อมูลประเภทและระยะทางการขนส่งวัตถุดิบ ข้อมูลปริมาณการใช่วัตถุดิบ ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงาน

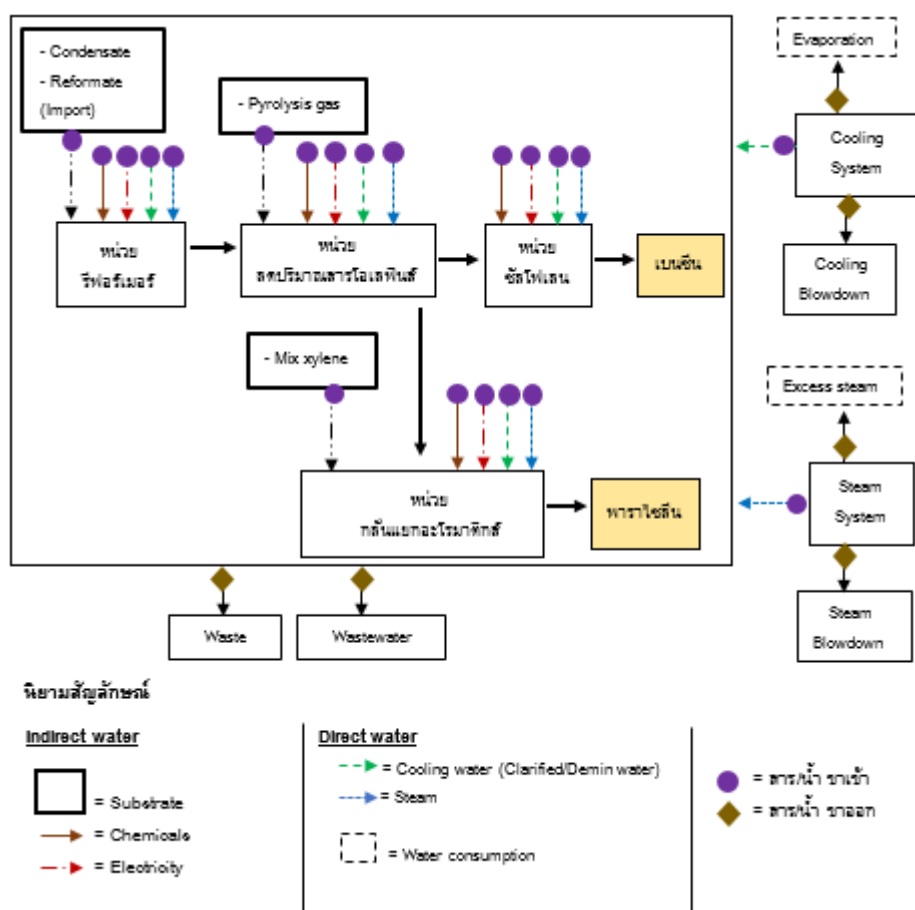
ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำในแต่ละกระบวนการจาก มิเตอร์วัดน้ำ ข้อมูลปริมาณการใช้สารเคมี และ ข้อมูลปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตเบนซีน และพาราไซลีน โดยการทำแบบสอบถามเพื่อให้ผู้ที่ เกี่ยวข้อง เช่น วิศวกร เจ้าหน้าที่ควบคุมการผลิต เจ้าหน้าที่ควบคุมการขนส่ง กรอกข้อมูลปฐภูมิ ดังกล่าว

(2) ข้อมูลทุติยภูมิ (secondary data)

ข้อมูลทุติยภูมิสำหรับใช้ในการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ประกอบด้วยข้อมูลค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์จาก การใช้น้ำทางอ้อมที่ได้จากเอกสารอ้างอิงหรือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือข้อมูลที่ติดมากับวัตถุดิบที่ ใชจากผู้ขายหรือผู้ให้บริการ ซึ่งต้องเป็นข้อมูลที่

เชื่อถือได้และมีการอ้างอิงที่ชัดเจน สำหรับข้อมูล ทุติยภูมิของกระบวนการผลิตเบนซีนและพารา ไซลีนประกอบด้วยค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสาร ดั้งต้น สารเคมี เชื้อเพลิง ไฟฟ้า วัตถุดิบต่าง ๆ ที่ นำมาใช้ในกระบวนการผลิต และการขนส่ง ทรัพยากรต่าง ๆ มายังโรงงาน เป็นต้น รวมถึงค่า ดัชนีการขาดแคลนน้ำของกลุ่มน้ำที่ดึงน้ำมาใช้ เพื่อ นำมาประเมินปริมาณการใช้น้ำและผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำในประเภทการ ขาดแคลนน้ำ (water scarcity footprint, WSF)

สำหรับที่มาของข้อมูลปฐภูมิและ ทุติยภูมิที่เก็บรวบรวมทั้งหมดนั้น สรุปได้ดังตาราง ที่ 1



รูปที่ 4 ผังการไหลของกระบวนการผลิตและการใช้น้ำ

ตารางที่ 1 สรุปที่มาของข้อมูลปฐภูมิและทุติยภูมิสำหรับการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

ลักษณะการใช้น้ำ	รายการ	แหล่งที่มา	
		ข้อมูลปฐภูมิ	ข้อมูลทุติยภูมิ
การใช้น้ำทางอ้อม	สารตั้งต้นในการผลิต	- ปริมาณสารตั้งต้นจากบันทึกข้อมูลสารตั้งต้นของฝ่ายผลิต - รูปแบบและระยะทางการขนส่งจากบันทึกข้อมูลของฝ่ายโลจิสติกส์	- indirect water consumption (IWC) ของสารตั้งต้นจาก Ecoinvent 2.2 database* - ค่า WSI จากงานวิจัย** - ค่า WSF ของการใช้เชื้อเพลิงจาก Ecoinvent 3 database และ Thai National LCI Database*
การใช้น้ำทางอ้อม	สารเคมีในการผลิต	- ปริมาณสารเคมีจากบันทึกข้อมูลของฝ่ายผลิต - รูปแบบและระยะทางการขนส่งจากบันทึกข้อมูลของฝ่ายโลจิสติกส์	- IWC ของสารตั้งต้นจาก Ecoinvent 2.2 database* - ค่า WSI จากงานวิจัย** - ค่า WSF ของการใช้เชื้อเพลิงจาก Ecoinvent 3 database และ Thai National LCI Database*
การใช้น้ำทางอ้อม	การใช้ไฟฟ้า	- ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากบันทึกของฝ่ายวิศวกรรม	- IWC จาก Ecoinvent 3 database*
การใช้น้ำทางตรง	การใช้น้ำ	- ปริมาณการใช้น้ำจากบันทึกของฝ่ายวิศวกรรม	- IWC การผลิตไอน้ำจาก Ecoinvent 2.2 database* - WSI จากงานวิจัย** - แหล่งน้ำที่ใช้ผลิตไอน้ำจากข้อมูลที่ได้มาจากผู้ขาย
การใช้น้ำทางตรง	การใช้น้ำหล่อเย็น	- ปริมาณการใช้ clarified water/demin water /สารเคมี/ไฟฟ้าในระบบหล่อเย็น จากบันทึกข้อมูลของฝ่ายวิศวกรรม - รูปแบบและระยะทางการขนส่งสารเคมีที่ใช้ในระบบหล่อเย็นจากบันทึกข้อมูลของฝ่ายวิศวกรรม	- IWC การผลิต clarified water/demin water จาก Ecoinvent 2.2 database* - IWC การผลิตสารเคมีจาก Ecoinvent 2.2 database* - WSF จาก Thai National LCI Database* - WSI จากงานวิจัย** - แหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิต clarified water และ demin water ที่ได้มาจากผู้ขาย
การใช้น้ำทางตรง	น้ำเสีย	- ปริมาณน้ำเสียจากระบบบันทึกของฝ่ายวิศวกรรม - สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากบันทึกของฝ่ายวิศวกรรม - รูปแบบและระยะทางการขนส่งสารเคมีจากบันทึกของฝ่ายวิศวกรรม	- IWC การผลิตสารเคมีจาก Ecoinvent 2.2 database* - WSF ของการขนส่งจาก Thai National LCI Database**

*SimaPro Life Cycle Analysis version 8.); ** แซบเปียร์ และคณะ (2559)

2.3.2 การปันส่วนและการตรวจสอบข้อมูล

เนื่องจากกระบวนการผลิตสำหรับการวิจัยนี้เป็นกระบวนการที่มีผลิตภัณฑ์ออกมา 2 ผลิตภัณฑ์ คือ เบนซิน และพาราไซลีน จึงต้องมีการปันส่วนข้อมูลบัญชีรายการในกระบวนการที่ซ้ำกัน โดยคำนวณจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนั้น ๆ และเมื่อปันส่วนและเก็บข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและขาออกครบถ้วนแล้ว จะตรวจสอบข้อมูลเพื่อเป็นการสร้างความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ได้ทำการเก็บรวบรวม สำหรับนำไปประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์อย่างถูกต้องแม่นยำต่อไป โดยใช้วิธีการทำสมดุลมวลสาร (mass balance) และสมดุลน้ำ (water balance) ซึ่งเป็นวิธีตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในแต่ละกระบวนการผลิตย่อย ทำให้ทราบความสมดุลของสารและปริมาณน้ำขาเข้าและขา

ออกในแต่ละกระบวนการผลิตว่าถูกต้องหรือไม่ เนื่องจากแต่ละกระบวนการผลิตล้วนต้องเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์พลังงาน อีกทั้งต้องตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลกับกระบวนการผลิตให้มีความสอดคล้องกัน

สำหรับกระบวนการผลิตเบนซินและพาราไซลีน เมื่อวิเคราะห์ตามแผนผังการไหลของกระบวนการตามรูปที่ 4 และนำสมดุลมวลสารและสมดุลมวลน้ำทั้ง 12 เดือน มาทดสอบว่าข้อมูลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยวิธี 2 sample paired t-test เนื่องจากเป็นข้อมูล 2 ชุด ที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าค่าเฉลี่ยของสารและน้ำขาเข้าและขาออกไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในทุกกระบวนการดังแสดงผลในตารางที่ 2 และ 3 จึงนำข้อมูลมาใช้ในการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ต่อไป

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารของแต่ละกระบวนการผลิต

กระบวนการ		Mean (kg)	N (เดือน)	Std. Deviation (kg)	p-value (2 tail)
รีฟอร์มเมอร์	สารขาเข้า	209,080,081.2	12	20,424,288.2	0.41
	สารขาออก	214,029,968.0	12	32,408,958.1	
หน่วยลดปริมาณสารโอเลฟินส์	สารขาเข้า	217,931,944.5	12	21,288,995.2	0.96
	สารขาออก	217,601,301.0	12	32,949,738.3	
หน่วยซัลโฟเลน	สารขาเข้า	47,542,074.1	12	21,288,995.2	0.06
	สารขาออก	45,002,186.6	12	6,814,344.7	
หน่วยกลั่นแยกอะโรมาติกส์	สารขาเข้า	163,218,347.3	12	15,944,218.8	0.21
	สารขาออก	157,650,356.5	12	23,871,815.0	

2.4 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (life cycle impact assessment)

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์มีรูปแบบการประเมินได้หลายรูปแบบตามผลกระทบที่สนใจ

ศึกษา โดยสามารถเลือกประเมินได้ทั้งเฉพาะบางผลกระทบหรือรวมทุกผลกระทบ สำหรับการวิจัยนี้ประเมินในรูปแบบของการขาดแคลนน้ำ (water scarcity footprint, WSF) ซึ่งเป็นหนึ่งในขอบเขตของการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ตามมาตรฐาน

ISO 14046 โดยคำนวณจากผลคูณของปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) และการขาดแคลนน้ำตามหลักการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ระบุในมาตรฐานดังกล่าว โดยปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) คือ ตัวชี้วัดการใช้น้ำ เช่น น้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน ซึ่งในแง่การใช้น้ำเพื่อการบริโภคหมายถึงน้ำที่เกิดขึ้นจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกมา ปริมาณน้ำที่รวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ และปริมาณน้ำที่ไม่ไหลกลับสู่แหล่งน้ำเดิม การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์แบ่งตามประเภทได้ดังนี้ (1) water degradation footprint คือ การประเมินเพื่อป้องกันภัยจากการเกิด ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำ ซึ่งต้องอธิบายครอบคลุมกับกลุ่มผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสื่อมคุณภาพ ได้แก่ aquatic eutrophication, aquatic acidification,

aquatic eco toxicity, thermal pollution เป็นต้น (2) water availability footprint คือ การประเมินเพื่อศักยภาพการเกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้ของแหล่งน้ำ และ (3) water scarcity footprint คือ การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ โดยวิเคราะห์ผลกระทบในรูปแบบการขาดแคลนน้ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) และดัชนีการขาดแคลนน้ำของแต่ละพื้นที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้ $WSF = \sum_{i=1}^n (WSI_i \times V_i)$ (1) โดยที่ WSF คือ water scarcity footprint ($m^3 H_2Oeq$); WSI คือ ดัชนีการขาดแคลนน้ำของแต่ละพื้นที่ footprint ($m^3 H_2Oeq$); V_i คือ ปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไปในแต่ละจุด (m^3)

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์สมดุลมวลน้ำ

การใช้น้ำ	Mean (kg)	N (เดือน)	standard deviation (kg)	p-value (2 tail)
น้ำขาเข้า	148,305.8	12	14,487.5	0.80
น้ำขาออก	149,371.3	12	22,618.2	

ตารางที่ 4 ผลการประเมิน WSF ของกระบวนการผลิตเบนซีน

ช่วงวัฏจักรชีวิต	WSF indirect water (LiterH ₂ Oeq/FU)	WSF direct water (LiterH ₂ Oeq/FU)	ผลรวม WSF (LiterH ₂ Oeq/FU)	สัดส่วน (%)
การได้มาของวัตถุดิบ	0.047	-	0.047	7.60
การผลิต	0.533	0.029	0.565	92.40
รวม	0.581	0.029	0.613	100.00

ตารางที่ 5 ผลการประเมิน WSF ของกระบวนการผลิตพาราไซลีน

ช่วงวัฏจักรชีวิต	WSF indirect water (LiterH ₂ Oeq/FU)	WSF direct water (LiterH ₂ Oeq/FU)	ผลรวม WSF (LiterH ₂ Oeq/FU)	สัดส่วน (%)
การได้มาของวัตถุดิบ	0.0844	-	0.0844	6.00
การผลิต	1.3154	0.032	1.3475	94.00
รวม	1.400	0.032	1.432	100.00

2.4.1 ผลการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์
งานวิจัยฉบับนี้ประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในรูปแบบการขาดแคลนน้ำ (water scarcity footprint, WSF) เนื่องจากพื้นที่จังหวัดระยองมีความเสี่ยงที่จะขาดแคลนน้ำจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมในพื้นที่ ซึ่งการประเมินจะ

ทำให้ทราบถึงผลกระทบจากการใช้น้ำในขอบเขต cradle to gate ของกระบวนการผลิตเบนซินและพาราไซลีน สรุปผลได้ตามตารางที่ 4 และ 5 โดยจะแสดงผลในหน่วย liter H₂Oeq/หน่วยการทำงาน (function unit, FU) ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณไว้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ WSF สำหรับการใช้น้ำทางอ้อมต่อหน่วยการทำงานของการผลิตเบนซิน

ค่า WSF ของการผลิต condensate = (ปริมาณ condensate ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเบนซิน 1 kg x ปริมาณน้ำที่ใช้ในการได้มาซึ่ง condensate) x WSI ของแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิต

$$= (1.35 \text{ kg} \times 0.00006 \text{ m}^3/\text{kg}) \times 0.534 \text{ H}_2\text{Oeq}$$

$$= 0.000043 \text{ m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$$

$$= 0.043 \text{ literH}_2\text{Oeq}$$

ค่า WSF ของการขนส่ง condensate = (ปริมาณ condensate ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเบนซิน 1 kg x ระยะทาง) x WSF ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่ง

$$= [(1.35 \text{ kg} \div 1,000 \text{ kg/ton}) \times 145.4 \text{ km}] \times 0.0000036$$

m³H₂Oeq/tkm

$$= 0.00000070 \text{ m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$$

$$= 0.0007 \text{ literH}_2\text{Oeq}$$

ค่า WSF รวมของการได้มาซึ่ง condensate = ค่า WSF ของการผลิต + ค่า WSF ของการขนส่ง

$$= 0.043 + 0.007$$

$$= 0.050 \text{ literH}_2\text{Oeq}$$

ตัวอย่างการคำนวณ WSF สำหรับการใช้น้ำทางตรงต่อหน่วยการทำงานของการผลิตเบนซิน

ค่า WSF ของการใช้น้ำในกระบวนการผลิต = ปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) โดยไม่ได้กลับสู่แหล่งน้ำเดิม ต่อการผลิตเบนซิน 1 kg x WSI ของแหล่งน้ำที่ดึงน้ำมาใช้

$$= 0.00004 \text{ m}^3 \times 0.048 \text{ H}_2\text{Oeq}$$

$$= 0.0000019 \text{ m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$$

$$= 0.0019 \text{ literH}_2\text{Oeq}$$

(เป็นค่าของเดือน มกราคม)

สำหรับการใช้น้ำในกระบวนการผลิตค่า WSI ของแหล่งน้ำที่ใช้มีค่าแยกเป็นรายเดือน ฉะนั้นค่า WSF จะคิดตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2560 ทีละเดือน แล้วนำมารวมกันเป็นค่า WSF

ตารางที่ 4 พบว่าค่า WSF ของกระบวนการผลิตเบนซินมีค่าสูงสุดจากการใช้น้ำทางอ้อม และส่วนใหญ่เกิดจากการใช้น้ำทางอ้อมในส่วนของการ

การผลิต ซึ่งประกอบด้วยการใช้น้ำเพื่อการผลิตไฟฟ้า ไอน้ำ ในโตรเจน รวมทั้งการใช้น้ำในระบบสนับสนุนต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการผลิต

ตารางที่ 5 ค่า WSF ของกระบวนการผลิตพาราไซลีนมีค่าสูงสุดจากการใช้น้ำทางอ้อมและส่วนใหญ่เกิดจากการใช้น้ำทางอ้อมในส่วนของการผลิต ซึ่งมีผลเป็นไปในทางเดียวกับกระบวนการผลิตเบนซีน

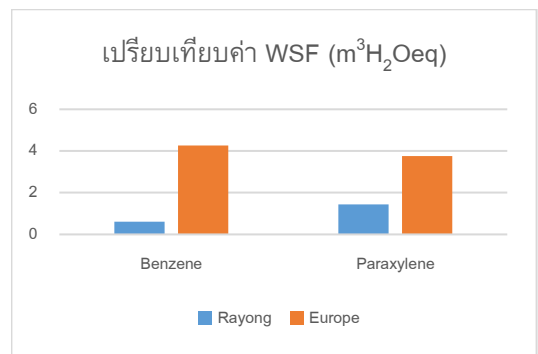
2.5 การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุง (interpretation and improvement analysis)

การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการตีความเพื่อวิเคราะห์ถึงขนาดและปริมาณผลกระทบในการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีนสำหรับนำไปหามาตรการและแนวทางที่เหมาะสมในการลดปริมาณการใช้น้ำและลดผลกระทบจากการขาดแคลนน้ำ อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีนในขอบเขต cradle to gate โดยจะมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 3

3. การวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 การเปรียบเทียบค่า WSF กับแหล่งอื่น ๆ

การศึกษาค้นคว้าค่า WSF ของเบนซีนและพาราไซลีนในขอบเขต cradle to gate จากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยนี้ พบค่า WSF ในฐานข้อมูล Ecoinvent 2.2 ซึ่งเป็นการประเมินค่า WSF ในทวีปยุโรป เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 5 พบว่ามีค่า WSF ของเบนซีนและพาราไซลีนมากกว่าการวิจัยนี้ประมาณ 7 และ 3 เท่า ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า WSF ของเบนซีนและพาราไซลีนในจังหวัดระยองของประเทศไทยนั้น มีค่าต่ำกว่าในทวีปยุโรปสำหรับการวิเคราะห์ค่า WSF ของเบนซีนและพาราไซลีนในพื้นที่อื่น ๆ ในขอบเขต cradle to gate ยังไม่พบแน่ชัด จึงต้องมีการศึกษาเพื่อนำมาเปรียบเทียบสำหรับการปรับปรุงต่อไป



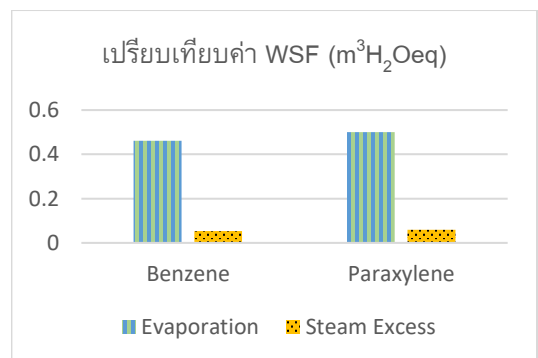
รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่า WSF

3.2 การเปรียบเทียบสัดส่วน WSF ของกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีน

การเปรียบเทียบสัดส่วน WSF ของกระบวนการผลิตเบนซีนและพาราไซลีน แบ่งเป็นการใช้น้ำทางตรงและการใช้น้ำทางอ้อม โดยแสดงผลในหน่วย literH₂Oeq มีรายละเอียดดังนี้

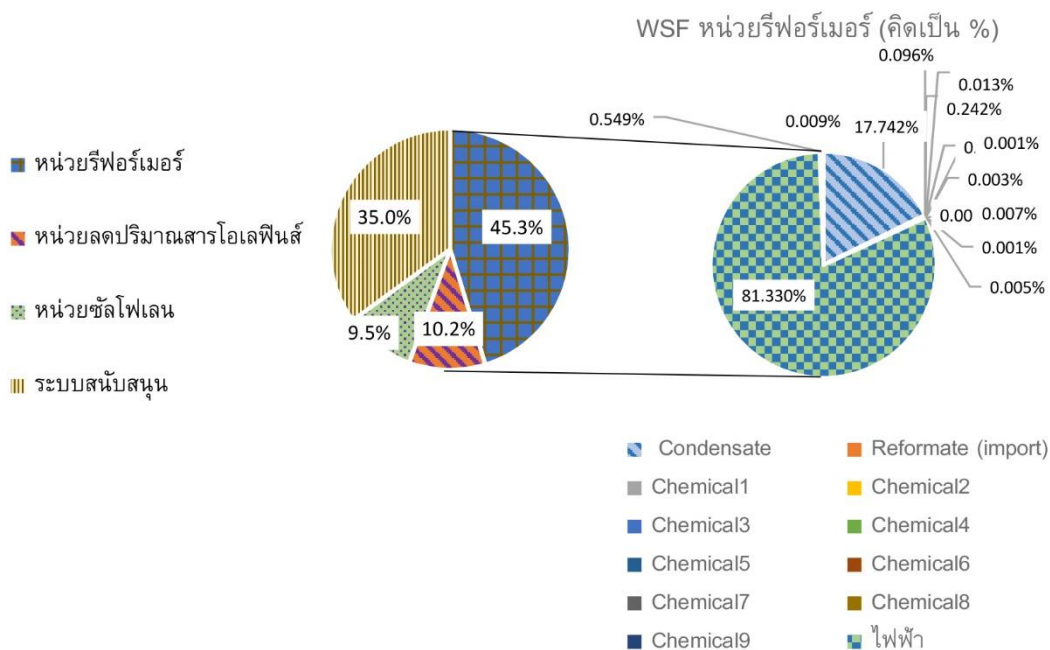
3.2.1 การใช้น้ำทางตรง

ตารางที่ 4 และ 5 การใช้น้ำทางตรงของกระบวนการผลิตเบนซีนมีค่า WSF 0.029 literH₂Oeq และกระบวนการผลิตพาราไซลีนมีค่า WSF 0.032 literH₂Oeq โดยเกิดจากน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) จากการระเหย (evaporation) ของน้ำในระบบหล่อเย็น และไอน้ำส่วนเกิน (steam excess) สูบบรรยากาศ ซึ่งเป็นน้ำส่วนที่ไม่ไหลกลับสู่แหล่งน้ำเดิม จึงเปรียบเทียบดังกราฟในรูปที่ 6



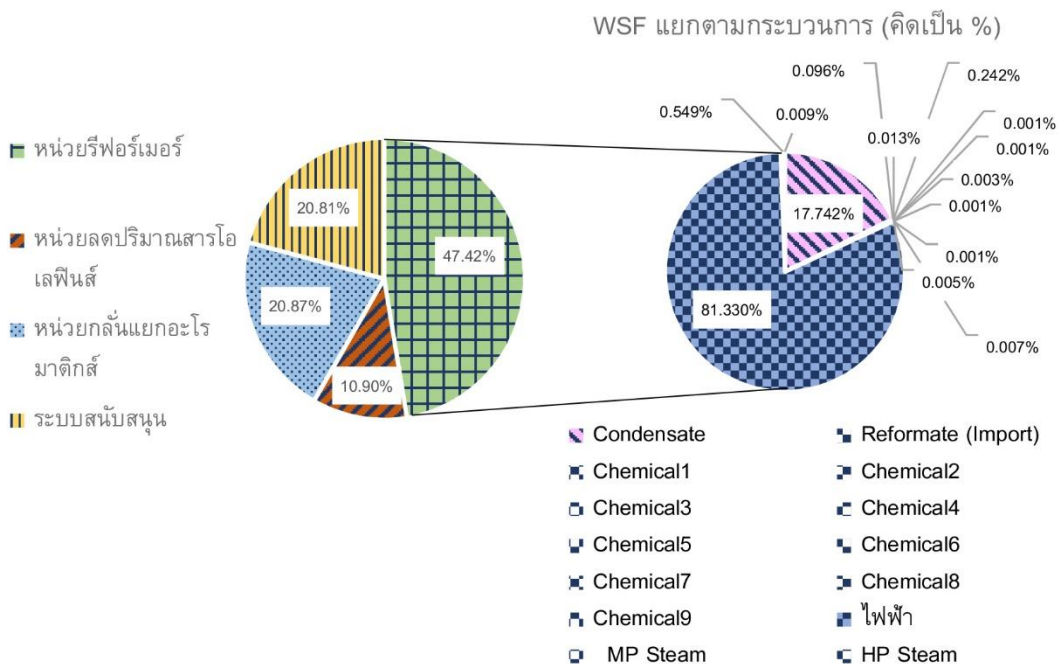
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบ WSF ของการใช้น้ำทางตรง

WSF แยกตามกระบวนการ (คิดเป็น %)



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบ WSF แยกตามกระบวนการผลิตเบนซีน

WSF แยกตามกระบวนการ (คิดเป็น %)



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบ WSF แยกตามกระบวนการผลิตพาราไซลีน

กราฟในรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบค่า WSF ของการใช้น้ำทางตรง ซึ่งการคำนวณค่า WSF ของการใช้น้ำทางตรงได้จากผลคูณของปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไป (water consumption) กับดัชนีการขาดแคลนน้ำ (WSI) พบว่าค่า WSF สูงสุดจากการระเหย (evaporation) ของน้ำจากระบบการหล่อเย็น

3.2.2 การใช้น้ำทางอ้อม

การใช้น้ำทางอ้อมของกระบวนการผลิตเบนซินและพาราไซลีนจากการใช้น้ำที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงในกระบวนการผลิต จะสามารถคำนวณค่า WSF จากข้อมูลทุติยภูมิดังที่แสดงตัวอย่างการคำนวณไว้ในหัวข้อ 2.4.1 สำหรับ การใช้น้ำทางอ้อมสามารถเก็บข้อมูลแยกตามกระบวนการผลิต ฉะนั้นการเปรียบเทียบค่า WSF ของการใช้น้ำทางอ้อมจึงได้วิเคราะห์แยกตามกระบวนการผลิต ดังกราฟในรูปที่ 7-8

กราฟในรูปที่ 7 พบว่าค่า WSF ของกระบวนการผลิตเบนซินมีค่าสูงสุดอยู่ที่หน่วยรีฟอร์มเมอร์ และเมื่อนำหน่วยรีฟอร์มเมอร์มาวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้น้ำทางอ้อมพบว่าเกิดจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ condensate ในปริมาณสูงที่สุด

กราฟในรูปที่ 8 วิเคราะห์การใช้น้ำทางอ้อมของกระบวนการผลิตพาราไซลีน ปรากฏว่ามีค่า WSF สูงสุดที่หน่วยรีฟอร์มเมอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งเกิดจากการใช้น้ำทางอ้อมของการได้มาซึ่งสารตั้งต้น นั่นก็คือ condensate เป็นส่วนใหญ่

ข้อมูลทั้งหมดดังที่กล่าวมาสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการใช้น้ำทางอ้อมของกระบวนการผลิตเบนซิน เมื่อนำมาเปรียบเทียบในแต่ละกระบวนการผลิต พบว่าค่า WSF มีค่าสูงในส่วนของ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ condensate และการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ สำหรับการใช้น้ำทางอ้อมในกระบวนการผลิตพาราไซลีน ผลลัพธ์เป็นไปในทางเดียวกับการผลิตเบนซิน คือ มีค่า WSF

สูงสุดที่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ condensate และการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการรีฟอร์มเมอร์เช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าผลกระทบจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเบนซินและพาราไซลีนมีผลกระทบสูงที่นอกเหนือจากการใช้น้ำโดยตรงที่เก็บข้อมูลได้ผ่านมิเตอร์วัดน้ำ โดยสามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปวางแผนการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นการจัดการในส่วนที่ทำให้ค่า WSF สูงเป็นหลักในการวางแผน

4. สรุปผลจากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตเบนซินในรูปแบบการขาดแคลนน้ำ (water scarcity footprint, WSF) ตามแนวทางของ ISO 14046 พบว่ามีสัดส่วนค่า WSF การใช้น้ำทางอ้อมมากกว่าการใช้น้ำทางตรง 18 เท่า ซึ่งมีค่าสูงมาจากการใช้ไฟฟ้า และการได้มาซึ่งวัตถุดิบ condensate ในกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ และการใช้น้ำทางตรงมีค่า WSF มีค่าสูงสุดในส่วนของการระเหยของน้ำในระบบหล่อเย็น สำหรับการประเมิน WSF ของกระบวนการผลิตพาราไซลีนมีสัดส่วนค่า WSF ในการใช้น้ำทางอ้อมสูงกว่าการใช้น้ำทางตรง 40 เท่า ซึ่งมีค่าสูงมาจากการใช้ไฟฟ้า และการได้มาซึ่งวัตถุดิบ condensate ในกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ ส่วนการใช้น้ำทางตรงมีค่า WSF สูงสุดในการระเหยของน้ำในระบบหล่อเย็นซึ่งมีผลเป็นไปในทางเดียวกันกับกระบวนการผลิตเบนซิน

ผลการประเมินพบว่าค่า WSF มีค่าสูงในส่วนการใช้น้ำทางอ้อม แต่เนื่องการลดค่า WSF จะมีความเป็นไปได้ในการลดจากการใช้น้ำทางตรงมากกว่าทางอ้อม เพราะสามารถควบคุมได้โดยตรงจากโรงงานถึงแม้ว่าจะทำให้ค่า WSF ลดลงได้ไม่มากนักตาม ประกอบกับการศึกษาแนวทางลดการใช้น้ำทางตรงโดยใช้เทคโนโลยีสะอาดในการผลิต (เนตรนภิส, 2547) และแนวทางที่เหมาะสมในการ

ลดต้นทุนจากการใช้น้ำ สมบูรณ์ และคณะ (2555) จึงเสนอการนำมาตรการในการลดการใช้น้ำทางตรงรวมด้วย โดยควรดำเนินการในส่วนที่ทำให้เกิดค่า WSF สูงสุด ได้แก่ ระบบหล่อเย็น (cooling water system) โดยการติดอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ การนำนวัตกรรมของระบบการหล่อเย็นน้ำที่ทำให้สามารถใช้น้ำได้น้อยลงมาใช้เป็นต้น และในส่วนของการใช้น้ำทางอ้อมควรมีการวางแผนลดการใช้น้ำจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ โดยการพิจารณาเลือกซื้อ condensate จากแหล่งที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการใช้แคลนน้ำน้อยที่สุด มาพิจารณาประกอบการจัดซื้อจัดหา ซึ่งผลจากการศึกษาในเบื้องต้นพบแหล่ง condensate ที่อยู่ในพื้นที่ที่มีค่า WSI ต่ำกว่าแหล่งเดิมและอยู่ไม่ไกลจากประเทศไทย คือ แหล่ง Malampaya ประเทศฟิลิปปินส์ จึงเสนอเป็นแนวทางเพื่อพิจารณาความคุ้มค่าต่อไป สำหรับอีกประเด็นต้องจัดการ คือ การลดการใช้น้ำจากการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเสนอแนะให้มีการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในปริมาณสูง หรือพิจารณาแหล่งพลังงานประเภทอื่นที่จะมีการใช้น้ำในการผลิตน้อยกว่าเข้ามาทดแทน

ข้อเสนอแนะเพื่อลดผลกระทบจากการใช้น้ำของกระบวนการผลิตเบนซินและพาราไซลีนข้างต้นจะเป็นแนวทางให้โรงงานอุตสาหกรรมนำไปปฏิบัติเพื่อให้การผลิตเบนซินและพาราไซลีนมีประสิทธิภาพการจัดการทรัพยากรน้ำสูงสุด ซึ่งนอกจากช่วยป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากการดำเนินการในอนาคต แล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินธุรกิจอีกด้วย

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอุตสาหกรรมการผลิตเบนซินและพาราไซลีนตัวอย่างที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณแหล่งอ้างอิงทุกแหล่งที่ได้ใช้ในการวิจัยนี้ จนทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

5. รายการอ้างอิง

- แซบเปียร์ กิวาลา, รัตนวรรณ มั่งคั่ง, ธวัชพร ศิลาเลิศรักษา, จิระวัฒน์ กณะสุด, ปรียาภรณ์ นิลสลับ, นฤเทพ เล็กศิริไธ และวันฉัตร แสงวงศ์ศักดิ์, 2559, โครงการฟุตพริ้นท์น้ำของพืชอาหารอาหารสัตว์ พลังงาน และเส้นใย เพื่อจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ (ระยะที่ 2), สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, กรุงเทพฯ, 112 น.
- เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์, 2547, การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อลดการใช้น้ำในอุตสาหกรรมอาหาร, ว.ศ.น.ย.บริการวิชาการ 12(3-4): 21-26.
- สมบูรณ์ กลั่นสกุล, ปริญญ์ บุญกนิษฐ และสหรัตน์ วงษ์ศรีชะ, 2555, การศึกษาแนวทางที่เหมาะสม, น. 139-148, ใน การลดต้นทุนเพื่อสนับสนุนการจัดการน้ำประปาอย่างยั่งยืนของการประปานครหลวง : กรณีศึกษาโรงกรองน้ำบางเขน, สมาคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- Boulay, A.M., Hoekstra, A.Y. and Vionnet, S., 2013, Complementarities of water-focused life cycle assessment and water footprint assessment, Environ. Sci. Technol. 47: 11926-11927.
- Ding, N., Liu, J., Yang, J. and Lu, B., 2018, Water footprints of energy sources in China: Exploring options to improve water efficiency, J. Clean. Prod. 174: 1021-1031.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y. and Bosman, R., 2018, The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass, Water Resour. Indust. 19: 1-12.
- Pal, H., Chatterjee, K.N. and Sharma, D., 2017,

- Water Footprint of Denim Industry, Woodhead Publishing, Cambridge.
- International Standard for Organization, 2014, ISO 14046 Environment Management- Water Footprint-Illustrative Examples on How to Apply ISO 14046, Geneva.
- Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M.M. and Comas, J., 2016, Water footprint assessment in wastewater treatment plants, J. Clean. Prod. 112: 4741-4748.
- Oele, M., Fanous, R.D., SimaPro Life Cycle Analysis version 8.5 (software).
- Skouteris, G., Ouki, S., Foo, D., Saroj, D., Altini, M., Melidis, P. and O'Dell, S., 2018, Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry, J. Clean. Prod. 172: 786-794.
- Xiang, D., Gao, L., Liu, X., Guo, C., Yang, S., and Qian, Y., 2016, Water consumption analysis of olefins production from alternative resources in China, J. Clean. Prod. 139: 146-156.