บทความ: “ไมโครไฟเบอร์” มลสารที่พบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ [1], พัชชาพันธ์ รัตนพันธ์ [1], อาทิตย์ เพ็ชร์รักษ์ [2], นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ [3], เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์ [3], จงรักษ์ ผลประเสริฐ [4]

[1] สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] ภาควิชาเวชศาสตร์สังคมและสิ่งแวดล้อม คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

[3] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การอ้างอิง: สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ, พัชชาพันธ์ รัตนพันธ์, อาทิตย์ เพ็ชร์รักษ์, นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์, จงรักษ์ ผลประเสริฐ. (2564). “ไมโครไฟเบอร์” มลสารที่พบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 25 (ฉบับที่ 1).

---

1. บทนำ

ไมโครพลาสติก (Microplastics) คือ อนุภาคพลาสติกขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้ว อนุภาคไมโครพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมถูกจำแนกตามธรรมชาติและแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) ไมโครพลาสติกชนิดปฐมภูมิ (Primary microplastics) หรือ อนุภาคไมโครพลาสติกที่ขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร มาตั้งแต่ต้นหรือมีขนาดเล็กและถูกนำไปใช้เป็นวัตถุตั้งต้นของกระบวนการผลิต เช่น เม็ดพลาสติกของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกเอทิลีนโพรพิลีน โพลีสไตรีน เป็นต้น หรือเม็ดไมโครบีดที่ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและเวชภัณฑ์ ส่วนผสมของยาสีฟันและเคมีภัณฑ์สำหรับชีวิตประจำวัน (Personal- care products) ด้วยเหตุนี้ จึงมักพบการปนเปื้อนของมลสารไมโครพลาสติกดังกล่าวจากการทิ้งของเสียจากบ้านเรือนโดยตรงสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน ทั้งที่มักพบในรูปร่างทรงกลม ทรงรี หรือมีรูปร่างไม่แน่นอนของวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกชนิดต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายทางธรรมชาติในระยะเวลาอันสั้น (2) ไมโครพลาสติกชนิดทุติยภูมิ (Secondary microplastics) หมายถึง ไมโครพลาสติกซึ่งเดิมเป็นพลาสติกขนาดใหญ่สะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน เกิดการย่อยสลาย แตกหักกลายเป็นอนุภาคหรือชิ้นส่วน

ขนาดเล็กในสิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการต่าง ๆ เช่น ทางกายภาพ ความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น การย่อยสลายด้วยแสง เป็นต้น ส่งผลให้พลาสติกขนาดใหญ่แตกหักเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่เล็กกว่า 5 มิลลิเมตร สะสมอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำเสีย ระบบนิเวศวิทยาต่าง ๆ รวมไปถึงสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหารในระดับต่าง ๆ (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021) นอกจากนี้ ยังมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็ก น้ำหนักเบาและลอยน้ำได้จึงมักหลุดรอดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียและไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้ง การย่อยสลายของไมโครพลาสติกเองทำให้อนุภาคพลาสติกมีขนาดเล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและเพิ่มโอกาสในการดูดซับมลสารชนิดอื่นที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำได้มากขึ้น และยังเป็นตัวกลางในการสะสมและเคลื่อนย้ายสารพิษชนิดอื่นที่ปนเปื้อนในระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น กลุ่มสารอินทรีย์ที่มีการตกค้างยาวนาน โลหะหนัก และมลพิษชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการเฝ้าระวังและควบคุมการเคลื่อนที่เปลี่ยนรูปและแพร่กระจายในแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม

2. ไมโครไฟเบอร์ที่พบในน้ำเสียดิบ และกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

2.1 ชนิดและแหล่งกำเนิดของไมโครไฟเบอร์

ไมโครไฟเบอร์ (Microfibers) เป็นเส้นใยสังเคราะห์ขนาดเล็ก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยเส้นใยโพลิเมอร์ 2 ประเภท ได้แก่ กลุ่มโพลิเอสเตอร์ (Polyester) และกลุ่มโพลีเอมายด์ (Polyamide) รวมกันอยู่ในอนุภาคไมโครไฟเบอร์หนึ่งเส้น (อาทิ ไมโครไฟเบอร์ที่มีค่า Blend 80/20 เป็นผ้าสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของโพลิเอสเตอร์ 80% และโพลีเอมายด์ 20% หรือ ค่า Blend 70/30 ได้แก่ ผ้าสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของโพลิเอสเตอร์ 70% และโพลีเอมายด์ 30%) ส่งผลให้ไมโครไฟเบอร์ที่มีทั้งส่วนประกอบของโพลิเอสเตอร์และโพลีเอมายด์มีคุณสมบัติไฟฟ้าสถิตและการดูดซับ จึงสามารถดูดซับฝุ่นและคราบสิ่งสกปรกได้ดี อย่างไรก็ดี เนื่องด้วยไมโครไฟเบอร์เป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กและละเอียดมากจึงอาจมีการหลุดรอดของเส้นใยไมโครไฟเบอร์สู่แหล่งน้ำเสียดิบกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน หรือระบบนิเวศทางน้ำ ทั้งที่มาจากกระบวนการผลิต การสวมใส่ในชีวิตประจำวัน รวมไปถึงกิจกรรมการซักผ้าของครัวเรือน เป็นต้น

องค์กรระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (International Union for Conservation of Nature (IUCN) รายงานข้อมูลระดับโลกโดยมีสาระบางตอนเกี่ยวกับกระบวนการซักผ้าซึ่งนับเป็นแหล่งปล่อยไมโครพลาสติกชนิดปฐมภูมิและตกค้างอยู่ในทะเลและมหาสมุทรมากกว่า 35% (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2563) อีกทั้งการศึกษาของ De Falco et al. (2019) ยังพบว่าการซักผ้าด้วยน้ำหนักผ้าเฉลี่ย 1 กิโลกรัม จะมีการปลดปล่อยไมโครไฟเบอร์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งครัวเรือนสูงถึง 128 – 308 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมผ้าที่ผ่านการซักแล้ว หรือ 640,000 – 1,500,000 ชิ้น โดยประมาณ ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ รูปแบบและขั้นตอนของการซัก ตลอดจนชนิดของเส้นใยและส่วนประกอบของเนื้อผ้าสังเคราะห์ โดยงานวิจัยดังกล่าวพบไมโครไฟเบอร์ชนิด 100% Polyester, 65% Recycled Polyester หรือ 50% Cotton – 50% Modal เป็นต้น และผลศึกษายังได้รายงานขนาดของไม

โครไฟเบอร์ที่พบในน้ำทิ้งส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 360 – 660 ไมโครเมตร หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 12 - 16 ไมโครเมตร อีกทั้ง การศึกษาของ Browne et al. (2019) ยังพบว่าการซักผ้าใยสังเคราะห์ประเภทโพลิเอสเตอร์ปล่อยเส้นใยไมโครไฟเบอร์สูงมากกว่า 1,900 ชิ้นต่อการซักหนึ่งครั้ง หรือพบไมโครไฟเบอร์ถึง 100 ชิ้นต่อลิตรน้ำเสียจากการซักผ้า

ขณะเดียวกัน Zambrano et al. (2019) ยังได้ศึกษารูปแบบการปลดปล่อยของไมโครไฟเบอร์ที่มาจากกระบวนการซักเสื้อผ้าประเภทผ้าฝ้าย ผ้าเรยอน และผ้าสังเคราะห์โพลิเอสเตอร์ รวมถึงผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการซัก ได้แก่ อุณหภูมิและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำความสะอาดที่มีผลต่อจำนวนไมโครไฟเบอร์ที่เกิดขึ้น ผลศึกษาพบว่า การเติมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดระหว่างการซักส่งผลให้เกิดการปล่อยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ในจำนวนที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิการซักที่ 25 และ 44 องศาเซลเซียส ทั้งการซักเสื้อผ้าประเภทผ้าฝ้าย (Cotton) ผ้าเรยอน (Rayon) และผ้าสังเคราะห์โพลิเอสเตอร์ และเมื่อพิจารณาปัจจัยอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิการซักที่สูงขึ้นส่งผลให้แนวโน้มการปลดปล่อยเส้นใยไมโครไฟเบอร์สูงขึ้นเช่นเดียวกันทั้งสามประเภทเนื้อผ้า สำหรับขนาดของไมโครไฟเบอร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการซักพบว่า 50% ของอนุภาคไมโครไฟเบอร์ที่ตรวจพบมีขนาดเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร นอกจากนี้ Ana Galvão (2020) ได้ศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคไมโครไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผ้าชนิดโพลิเอสเตอร์ โพลีเอมายด์ ผ้าวิสโคส (Viscose) ผ้าอีลาสเทน (Elastane) และผ้าจากเส้นใยอะคริลิค (Acrylic) ที่ปล่อยจากการกระบวนการซัก ผลศึกษาพบว่าอัตราเฉลี่ยการปลดปล่อยไมโครไฟเบอร์มีค่าทั้งสิ้นเท่ากับ 18,000,000 ชิ้นต่อผ้า 6 กิโลกรัม (Reference load of 6 kg of synthetic fibers) ซึ่งอยู่ในช่วงการรายงานอัตราการปลดปล่อยไมโครไฟเบอร์จากกระบวนการซักในภาระ (Reference load) ที่เท่ากัน ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1 และบางการศึกษาได้รายงานค่าการปลดปล่อยไมโครไฟเบอร์จากกระบวนการซักผ้าสังเคราะห์ไว้สูงถึง 7,200,000–21,240,000 ชิ้นต่อผ้า 6 กิโลกรัม (Reference load of 6 kg of synthetic fibers) (De Falco et al., 2018) นอกจากนี้ การศึกษาของ Ana Galvão (2020) พบว่าสัดส่วนอนุภาคกว่าครึ่ง (53%) พบขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50 – 100 ไมโครเมตร และ 40% ในช่วง 100 – 500 ไมโครเมตร มีเพียง 7% ของอนุภาคไมโครไฟเบอร์ที่ตรวจพบได้มีขนาดใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กและยากต่อการกำจัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

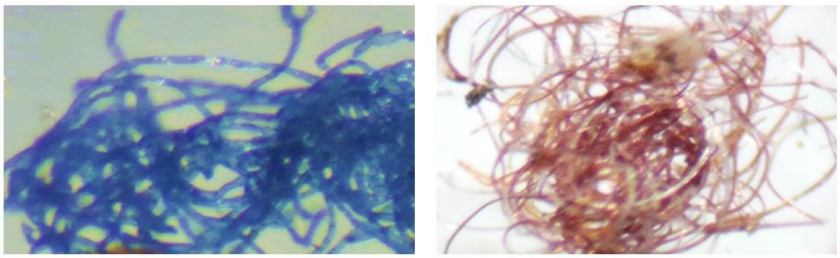
ตารางที่ 1 ผลศึกษาชนิดและจำนวนอนุภาคไมโครไฟเบอร์จากกระบวนการซักต่อผ้าสังเคราะห์ 6 กิโลกรัม (Reference load of 6 kg of synthetic fibers)

ชนิดของไมโครไฟเบอร์	ความยาวเฉลี่ยของอนุภาคไมโครไฟเบอร์ (มิลลิเมตร)	จำนวนของอนุภาคไมโครไฟเบอร์ (ชิ้นต่อผ้าสังเคราะห์ 6 กิโลกรัม)	อ้างอิง
Polyester, Polyester-elastane, Acrylic-polyamide	0.2 – 0.4	1,000,000–6,500,000	Belzagui et al. (2019)
Polyester, Polypropylene	0.339–0.478	7,200,000–21,240,000	De Falco et al. (2018)
Polyester, Elastane, Cotton	-	420,000–2,400,000	Sillanpaa and Sainio (2017)
Polyethylene terephthalate, Polyester	5.3	135,600	Pirc et al. (2016)

2.2 ไมโครไฟเบอร์ที่พบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ผลการศึกษาของ Hongprasith et al. (2020) ที่ทำการตรวจวัดมลสารไมโครพลาสติกในน้ำเสียดิบและกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบบำบัดประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ระบบ Sequence batch reactor ระบบ Oxidation ditch และระบบ Conventional activated sludge ในประเทศไทย พบว่า ไมโครพลาสติกจำพวกไฟเบอร์จัดเป็นอนุภาคไมโครพลาสติกที่พบในสัดส่วนที่สูงที่สุด (32 - 57%) โดยเฉพาะพลาสติกจำพวก Polyester, Polyacrylate, Polypropylene และ Polyethylene เป็นต้น ขณะเดียวกัน ผลรายงานการศึกษาของ สุทธิรัตน์และเจนยุกต์ (2564) ได้วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลที่มีต่อชนิดและปริมาณของไมโครพลาสติกในน้ำเสียดิบและกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนยัง พบว่า ไฟเบอร์ที่มาจากผ้าใยสังเคราะห์ประเภท Polyester และ Rayon เป็นอนุภาคไมโครพลาสติกที่พบสูงเป็นอันดับต้น ๆ ในน้ำเสียตัวอย่างจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของช่วงฤดูร้อน (รูปภาพที่ 1ก) ดังภาพตัวอย่างไฟเบอร์ที่ได้จากภาพถ่ายจากกล้อง Microspectroscopy และการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างวัสดุด้วยเทคนิค FTIR spectrometer (รูปภาพที่ 1ข)

(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ตัวอย่างอนุภาคไมโครพลาสติกจำพวกไฟเบอร์ประเภท Polyethylene และ Polyester ที่พบในตัวอย่างน้ำเสียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศ อาทิ การศึกษาของ Magnusson and Norén (2014) ซึ่งรายงานสัดส่วนของไมโครพลาสติกประเภทไฟเบอร์ที่พบในกากตะกอน (Sewage sludge) และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Effluent) เท่ากับ 70% และ 49% ตามลำดับ เช่นเดียวกับ ผลการทบทวนวรรณกรรมการศึกษาที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศด้านสถานการณ์และการจัดการมลสารไมโครพลาสติกในต่างประเทศโดย Sun et al. (2019) ยังพบว่าไมโครพลาสติกประเภทไฟเบอร์เป็นอนุภาคที่พบสูงที่สุดรูปแบบหนึ่งของน้ำเสียในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้ งานวิจัยของ Mintenig et al. (2017) ได้วิเคราะห์การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน 12 แห่งในประเทศเยอรมนี ยังได้สรุปเช่นเดียวกันว่าไมโครไฟเบอร์เป็นประเภทไมโครพลาสติกที่ตรวจพบส่วนใหญ่ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนกรณีศึกษา และงานวิจัยส่วนใหญ่ได้เสนอแนะให้มีแนวทางจัดการควบคุมการปล่อยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ตั้งแต่ต้นทางหรือแหล่งกำเนิดโดยเฉพาะ กิจกรรมการซักผ้าใยสังเคราะห์ของครัวเรือนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งควรมีการวิจัยและพัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับกำจัดไมโครไฟเบอร์ออกจากน้ำเสียที่บำบัดแล้วก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

3. สรุปและอภิปราย

ไมโครไฟเบอร์เป็นชนิดอนุภาคไมโครพลาสติกที่พบในสัดส่วนที่สูงที่สุดเป็นอันดับแรกที่พบในแหล่งน้ำเสีย ดิบและกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งงานวิจัยในประเทศและต่างประเทศ โดยประเภทเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่พบส่วนใหญ่ ได้แก่ Polyester, Polyamide, Elastane รวมไปถึง Rayon สำหรับแหล่งกิจกรรมที่เป็นต้นกำเนิดหรือแหล่งปล่อยไมโครไฟเบอร์จากน้ำเสียครัวเรือนสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การซักเสื้อผ้าประเภทใย สังเคราะห์ดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการปล่อยอนุภาคไมโครไฟเบอร์ขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาซึ่งยากต่อการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียบางแห่งมีการปล่อยอนุภาคไมโครไฟเบอร์กับน้ำเสียหลังการบำบัด (Effluent) สู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบนิเวศต่าง ๆ หรืออาจนำไปสู่การปนเปื้อนและสะสมในห่วงโซ่อาหารต่อไป ทั้งนี้ ผู้ดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย ผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ภาคนโยบาย ภาคการศึกษา รวมถึงครัวเรือนระดับท้องถิ่น ควรพิจารณาประเด็นต่าง ๆ ต่อไปนี้ เพื่อควบคุมและบรรเทาปัญหามลสารไมโครไฟเบอร์ที่พบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

☑ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนและปริมาณการปล่อยมลสารไมโครไฟเบอร์จากกระบวนการซักผ้าสู่น้ำเสียครัวเรือนและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะคุณลักษณะและสภาพควบคุมระหว่างการซักผ้า (Washing conditions) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ใช้ จำนวนครั้งของการใช้และการซัก (ต่อวัน/สัปดาห์/เดือน) อุณหภูมิขณะซัก เป็นต้น นอกจากนี้ การตรวจวัดและเฝ้าระวังชนิดและขนาดของไมโครไฟเบอร์ที่พบจะเป็นประโยชน์ในการวางแผนควบคุมกิจกรรมแหล่งกำเนิด

☑ ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียทั้งขั้นปฐมภูมิ ทุตยภูมิ และตติยภูมิ และศึกษาวิจัยเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในการกำจัดมลสารไมโครไฟเบอร์ นอกจากนี้ ควรศึกษาถึงผลของฤดูกาลหรือภาวะอากาศสุดโต่ง (Extreme climate events) เช่น พายุ อุทกภัย ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด มลสารดังกล่าว โดยเฉพาะภาวะฉุกเฉินของภัยพิบัติ

☑ ครัวเรือนและผู้บริโภคควรคำนึงถึงหลักการบริโภคที่ยั่งยืน (Sustainable consumption) ในการเลือกซื้อเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลดการบริโภคที่ฟุ่มเฟือยเกินความจำเป็น ขณะเดียวกันภาคอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม ควรประยุกต์ใช้หลักการผลิตที่ยั่งยืน (Sustainable production) โดยการคัดเลือกหรือปรับวัตถุดิบ/เส้นใยที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือลดผลกระทบจากการผลิตที่นำไปสู่การปล่อยมลสารไมโครไฟเบอร์สู่ระบบนิเวศอย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2563 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการดำเนินโครงการวิจัยและบทความวิชาการนี้ และผู้ควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกรณีศึกษาโครงการที่ให้ความมีส่วนร่วมกับกิจกรรมโครงการเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

Ana Galvão A. & Margarida Aleixo& Hilda De Pablo & Clara Lopes & Joana Raimundo. (2020). Microplastics in wastewater: microfiber emissions from common household laundry. Environ. Sci. Pollut. Res.27: 26643–26649. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08765-6

Belzagui F, Crespi M, Álvarez A. (2019). Microplastics' emissions: microfibers' detachment from textile garments. Environ Pollut. 248: 1028–1035. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.059

Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. Environ. Sci. Technol. 45: 9175–9179. https://doi.org/10.1021/es201811s.

De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., & Avella, M. (2019). The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. Sci. Rep. 9(1). https://doi:10.1038/s41598-019-43023-x

De Falco F, Pia M, Gentile G. (2017). Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics. Environ Pollut. 236: 916–925. https://doi.org/10.1016/j.envpol. 2017.10.057

Hernandez, E., Nowack, B., Mitrano, D.M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. Environ. Sci. Technol. 51: 7036-7046.

Hongprasith, N., Kittimethawong, C., Lertluksanaporn, R., Eamchotchawalit, T., Kittipongvises, S., & Lohwacharin, J. (2020). IR microspectroscopic identification of microplastics in municipal wastewater treatment plants. Environ. Sci. Pollut. Res. 27(15): 18557–18564. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08265-7

Magnusson, K., & Norén, F. (2014). Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. IVL Swedish Environmental Research Institute. 55, 22. https://doi.org/naturvardsverket-2226

Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., Primpke, S., & Gerdts, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. Water Res. 108: 365–372. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015

Pirc U, Vidmar M, Mozer A, Kržan A. (2016). Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing. Environ Sci Pollut Res. 23: 22206–22211. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7703-0

Sillanpää M, Sainio P. (2017). Release of polyester and cotton fibers from textiles in machine washings. Environ Sci Pollut Res. 24: 19313–19321. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9621-1

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C.M., Ni, B-J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. Water Res. 152: 21-37.

Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., Daystar, J., Ankeny, M., Cheng, J. J., & Venditti, R. A. (2019). Microfibers generated from the laundering of cotton, rayon and polyester based fabrics and their aquatic biodegradation. Mar. Pollut. Bull. 142: 394–407. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.062

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2563). ซักผ้าอย่างไรช่วยลดมลพิษ. สืบค้นจาก https://www.facebook.com/deqpth/

สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ และ เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์. (2564). รายงานผลศึกษาโครงการประเมินและจัดการผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลที่มีต่อไมโครพลาสติกในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย