สารหล่อเย็น: ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีการบำบัด

Metalworking Fluid: Environmental Effects and Treatment Methods

ลดา มัทธุรศ*

Lada Mathurasa*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University

Received : 2 October 2017

Accepted : 15 January 2018

Published online : 23 January 2018

บทคัดย่อ

สารหล่อเย็นเป็นสารที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ มี 4 ประเภท ได้แก่ ประเภทน้ำมันล้วน ประเภทกึ่งสังเคราะห์ ประเภทสังเคราะห์ และประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวาง สารหล่อเย็นประเภทนี้ประกอบด้วย น้ำมัน สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารเติมแต่ง ซึ่งได้แก่ สารยับยั้งการเกิดสนิม สารควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง สารยับยั้งจุลินทรีย์ สารหล่อลื่น และสารป้องกันการเกิดโฟม โดยสารไดเอททาโนลามีน และสารประกอบไนเตรทที่ทำหน้าที่ควบคุมความเป็นกรดด่างสามารถทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นไนโตรซามีน การใช้งานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้น้ำมันสลายตัวเกิดเป็นสารกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และการใช้สารยับยั้งจุลินทรีย์กลุ่มไทรอะซีนสามารถปลดปล่อยสารฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้ สารหล่อเย็นเมื่อถูกใช้งานจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปและมีความเป็นพิษสูงขึ้น ต้องทำกำจัดอย่างถูกวิธีโดยเฉพาะสารหล่อเย็นที่มีเติมสารหล่อลื่นเป็นสารประกอบคลอรีน การบำบัดสารหล่อเย็นด้วยวิธีทางเคมีและฟิสิกส์เป็นวิธีที่สามารถนำของเสียสารหล่อเย็นไปใช้ประโยชน์ได้ วิธีทางเคมีได้แก่ การตกตะกอน การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า การดูดซับ การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน วิธีทางฟิสิกส์ ได้แก่ การระเหย การทำเยือกแข็งแล้วละลาย และการแยกด้วยเมมเบรน โดยวิธีการตกตะกอนถือว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยเนื่องจากมีการดำเนินการที่ง่าย และใช้ต้นทุนต่ำ

คำสำคัญ : สารหล่อเย็น การตัดโลหะ สิ่งแวดล้อม การบำบัด

*Corresponding author. E-mail : lada@pnru.ac.th

Abstract

Metalworking fluid is widely used in the metal cutting process. There are four types which are straight oil, semisynthetic, synthetic, and soluble oil, a commonly used one. It consists of the oil, the emulsifiers, and the additives which are rust inhibitor, pH buffer, biocides, lubricants and anti-foamer. Diethanolamine and nitrate compounds used to control the pH can react to form nitrosamines. High temperatures can cause oil to decompose into polycyclic aromatic hydrocarbons. The use of triazine, a biocide, can release formaldehyde. These are carcinogens. The properties of soluble oil will be changed to be more toxic after use. Therefore, it should be properly disposed, especially soluble oil added chlorine compounds as a lubricant. Chemical and physical soluble oil treatment provide the way to utilize the soluble oil waste. Chemical methods include coagulation, electrocoagulation, adsorption, Fenton reaction. Physics methods include evaporation, freeze-thaw and membrane separation. The coagulation is considered suitable for Thailand because it is easy to operate and low cost.

Keywords : metalworking fluid, metal cutting, environment, treatment

บทนำ

สารหล่อเย็น เป็นคำที่ใช้เรียกสารที่มีคุณสมบัติลดความร้อนหรือทำให้จุดเดือดของของเหลวเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งใช้เรียกทั้งสารที่ใช้ผสมกับน้ำเพื่อลดความร้อนของเครื่องจักร เช่น ในหม้อน้ำรถยนต์ และสารที่ใช้ลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของโลหะในขณะตัดเฉือน โดยในที่นี้จะกล่าวถึงสารหล่อเย็นในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ สารหล่อเย็น มีชื่อสามัญว่า น้ำมันตัดหรือน้ำมันหล่อเย็น (metalworking fluid; cutting oil) ซึ่งเป็นกลุ่มสารประเภทของเหลวที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบหลัก โดยนำมาใช้ประโยชน์ในการหล่อลื่น ลดความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีขณะทำการตัด เจียร โลหะ ที่มีการสะสมความร้อนจนเกิดเป็นควัน ประกายไฟ จนกระทั่งอาจเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้ ช่วยให้ขอบหน้าตัดของโลหะมีความเรียบเนียน เศษผงโลหะที่เกิดขึ้นจากการตัดหลุดออกไปได้ง่าย และส่งผลให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น (Akeburanawat, 2009; Sangsing, 2015)

ในปี ค.ศ. 1883 Frederick Winslow Taylor นักวิศวกรรมชาวอเมริกัน ได้นำ น้ำ มาใช้เป็นสารหล่อเย็นเป็นครั้งแรก โดยเขาพบว่าหากใช้น้ำในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ น้ำจะช่วยลดความร้อนและช่วยเพิ่มความเร็วในการตัดได้ถึงร้อยละ 40 (Taylor, 1907) ถึงแม้ว่าน้ำจะมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี แต่กลับมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ไม่ดี และก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนในเครื่องจักรและชิ้นงานได้ ตั้งแต่นั้นมาจึงมีการพัฒนาสูตรของสารหล่อเย็นเพื่อให้มีคุณสมบัติทั้งช่วยระบายความร้อนและเป็นสารหล่อลื่นที่ดีควบคู่กัน ซึ่งช่วยปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นงาน รวมทั้งลดแรงตัดและลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการตัดเฉือน (Lawal *et al*., 2012) ปัจจุบันสารหล่อเย็นที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจึงมีมากมายหลากหลายสูตร หลากหลายเครื่องหมายการค้าเพื่อตอบสนองความต้องการที่หลากหลาย เช่น แอกซอนโมบิล เชลล์ ปตท. บางจาก เป็นต้น ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้ตามลักษณะการทำงานของเครื่องจักรและวัสดุที่ต้องการตัด สารหล่อเย็นอาจมีคุณสมบัติเด่นด้านใดด้านหนึ่งหรือหลายด้านก็ได้ ดังนี้

คุณสมบัติในการหล่อเย็น; ช่วยลดอุณหภูมิของเครื่องมือและชิ้นงานขณะที่ใช้อุณหภูมิและความเร็วในการตัดสูง ซึ่งมีผลช่วยลดโอกาสการเสียรูปของชิ้นงานให้เกิดได้น้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยลดการสึกหรอของเครื่องมือที่เกิดจากความร้อนได้อีกด้วย โดย มีรายงานว่าการลดอุณหภูมิของมีดตัดจาก 950 องศาฟาเรนไฮต์ เป็น 900 องศาฟาเรนไฮต์ มีผลให้อายุการใช้งานของมีดตัดยาวนานขึ้นถึง 99 ชั่วโมง จากเดิม 19.5 ชั่วโมง หรือเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่า (Oilserv, 2010) รวมทั้งช่วยลดกำลังการตัดลงซึ่งทำให้ช่วยประหยัดไฟได้อีกด้วย

คุณสมบัติในการหล่อลื่น; เป็นการเคลือบพื้นที่ผิวสัมผัสทำให้ลดการเสียดสี ลดแรงเสียดทาน (Sokovic & Mijanovic, 2001) ช่วยล้างเศษโลหะที่ตกค้างบริเวณที่ตัด ป้องกันการเกาะติดของเศษโลหะที่ชิ้นงานและปลายใบมีด และป้องกันการอุดตันของเครื่องมือได้ด้วย (Michalek *et al*., 2003) โดยสารหล่อเย็นที่มีคุณสมบัติหล่อลื่นไม่เหมาะสมกับงานที่ใช้ความเร็วในการตัดสูง ๆ เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะไประเหยน้ำมันหล่อลื่นออกไปหมดก่อน ดังนั้นสารหล่อเย็นที่มีคุณสมบัติหล่อลื่นจึงเหมาะกับงานตัดที่ใช้ความเร็วต่ำ (Debnath *et al*., 2014)

คุณสมบัติในการป้องกันการเกิดสนิม; สารหล่อเย็นที่ดีควรมีคุณสมบัติป้องกันการเกิดสนิมเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับทั้งเครื่องจักรและชิ้นงาน ซึ่งในปัจจุบันของเหลวที่ใช้ในการหล่อเย็นทุกตัวมีสารป้องกันการเกิดสนิมเป็นส่วนประกอบ (Oilserv, 2010)

1. ประเภทของสารหล่อเย็น

สารหล่อเย็นแบ่งตามสำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ กรมแรงงาน ประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration, 2017) ได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) ประเภทน้ำมันล้วน (straight oil) ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันจากสัตว์ น้ำมันจากพืช หรือน้ำมันสังเคราะห์ คุณภาพของน้ำมันปิโตรเลียมสัมพันธ์กับกระบวนการกลั่น โดยน้ำมันที่มีคุณภาพดีเป็นน้ำมันที่ผ่านการกลั่นเพื่อลดสารกลุ่มโพลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งให้น้อยลง น้ำมันประเภทนี้เมื่อใช้งานไม่ต้องผสมน้ำ นอกจากนี้ยังมีความหนืดสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันประเภทอื่น
2) ประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้ (soluble oil) ประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียมร้อยละ 30-85 ผสมกับสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ทำหน้าที่เป็นสารที่มีคุณสมบัติทำให้น้ำมันผสมรวมอยู่กับน้ำได้ ส่วนใหญ่มักผสมสารเติมแต่งเพื่อยืดอายุการใช้งาน
3) ประเภทกึ่งสังเคราะห์ (semisynthetic) ที่ประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียมเพียงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 5-30 มีสารเติมแต่งซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำได้ แต่มีการใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความซับซ้อนมากกว่า
4) ประเภทสังเคราะห์ (synthetic) ไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะเป็นสารเคมีกลุ่มสารซักฟอก หรือ สารชะล้าง (detergent)

ซึ่งข้อดีข้อเสียและลักษณะการใช้งานของสารหล่อเย็นแต่ละประเภทได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของสารหล่อเย็นแต่ละประเภท

ประเภทของสารหล่อเย็น	ข้อดี	ข้อเสีย
ประเภทน้ำมันล้วน	มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีมากและป้องกันสนิม	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นต่ำ ลุกติดไฟ ทำให้เกิดหมอกควันได้ เหมาะสำหรับการตัดที่ความเร็วต่ำและแรงกดสูงเท่านั้น
ประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้	มีคุณสมบัติการหล่อลื่นและหล่อเย็นที่ดี	อาจก่อให้เกิดปัญหาสนิม มีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และเกิดการระเหยได้
ประเภทกึ่งสังเคราะห์	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นที่ดี ป้องกันสนิม และควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์	เกิดฟองได้ง่าย ความกระด้างของน้ำมีผลต่อความเสถียรของน้ำมัน เกิดการปนเปื้อนจากน้ำมันหรือของเหลวอื่นที่ใช้กับเครื่องจักรได้ง่าย
ประเภทสังเคราะห์	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นที่ดีมาก ป้องกันสนิม ควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ไม่ลุกติดไฟ ไม่มีควัน ป้องกันการกัดกร่อน ลดปัญหาการเกิดโฟม ฟอง	มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ เกิดการปนเปื้อนจากน้ำมันหรือของเหลวอื่นที่ใช้กับเครื่องจักรได้ง่าย

ที่มา: Kuram *et al*. (2013a) และ Kuram *et al*. (2013b)

ตารางที่ 2 ลักษณะการใช้งานของสารหล่อเย็นแต่ละประเภท

ประเภทของสารหล่อเย็น	ลักษณะ	การใช้งาน	การเจือจาง
ประเภทน้ำมันล้วน	เป็นน้ำมัน	ใช้กับวัสดุที่มีความทนทานสูงและไม่เป็นสนิม	ไม่จำเป็นต้องเจือจาง
ประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้	เป็นของเหลว มีสีขาวขุ่น	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นและหล่อลื่น ป้องกันการเกิดสนิม	เจือจางร้อยละ 2–3
ประเภทกึ่งสังเคราะห์	เป็นของเหลวใส	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นที่ดีมาก แต่การหล่อลื่นต่ำกว่าสารหล่อเย็นประเภท น้ำมันที่ละลายน้ำได้	เจือจางร้อยละ 1–3
ประเภทสังเคราะห์	เป็นของเหลวใส	มีคุณสมบัติการหล่อเย็นที่ดีมากแต่การหล่อลื่นต่ำที่สุด	เจือจางร้อยละ 1–5

ที่มา: Foulds (2012)

ในปัจจุบัน สารหล่อเย็นที่ภาคเอกชนใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สารหล่อเย็นประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้ (Duchaine *et al*., 2012; Lima, 2015; Schwarz *et al*., 2015; Yamaguchi *et al*., 2017) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบในเรื่องของประสิทธิภาพและราคา

2.สารหล่อเย็นประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้

สารหล่อเย็นประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้ ประกอบด้วย 1) น้ำมันที่ทำหน้าที่หล่อลื่น 2) สารอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำให้น้ำมันแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ สามารถละลายอยู่ในน้ำได้โดยไม่แยกชั้น และ 3) สารเติมแต่งอื่น ๆ เพื่อปรับคุณสมบัติให้ตรงตามความต้องการในการนำสารหล่อเย็นไปใช้งาน เช่น เพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ป้องกันการเกิดสนิม เป็นต้น ซึ่งหากต้องการใช้งานต้องนำมาผสมกับน้ำเพื่อช่วยลดความร้อนในขณะตัด โดยผสมสารหล่อเย็น 1 ส่วนต่อน้ำ 20 ส่วน (Byers, 2006; Canter, 2005)

1) น้ำมัน

น้ำมันคือองค์ประกอบหลักของสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำ โดยมีอัตราส่วนประมาณร้อยละ 30-85 โดยน้ำมันที่ใช้ได้แก่ น้ำมันแนฟทา (naphthenic oil) หรือน้ำมันพาราฟิน (paraffinic oil) ที่มีความหนืดเท่ากับ 100 SUS (saybolt universal seconds) ที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ หรือบางครั้งเรียกว่า น้ำมัน 100/100 ซึ่งน้ำมันที่มีความหนืดมากกว่านี้สามารถใช้งานได้แต่การทำให้น้ำมันดังกล่าวละลายน้ำจะมีความยากมากขึ้น นอกจากนี้น้ำมันพืชยังสามารถนำมาใช้ทำเป็นสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำได้ แต่ราคาสูง และอายุการใช้งานสั้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสได้ง่าย รวมถึงจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย (Byers, 2006)

2) อิมัลซิไฟเออร์

องค์ประกอบรองจากน้ำมันคือสารอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งจะทำให้น้ำมันแตกกระจายตัวออกเป็นหยดที่มีอนุภาคขนาดเล็กและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ซึ่งทำให้สารหล่อเย็นเมื่อผสมน้ำแล้วมีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนมไปจนถึงใสไม่มีสี ลักษณะสีหรือความใสของน้ำมันที่ผสมน้ำแล้วบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสารหล่อเย็น โดยสารหล่อเย็นที่มีลักษณะสีขาวขุ่น (ขนาดอนุภาคน้ำมันที่แขวนลอยประมาณ 2.0-50 ไมโครเมตร) จะง่ายต่อการนำไปกำจัดหรือบำบัดและเกิดโฟมน้อยกว่า ในขณะที่สารหล่อเย็นที่มีความใส (ขนาดอนุภาคน้ำมันประมาณ 0.1-2.0 ไมโครเมตร) จะมีความสามารถในการแทรกซึมลงในช่องว่างระหว่างใบตัดและวัสดุได้ง่ายกว่าและมีความเสถียรมากกว่า (Foltz, 1990) อิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ผสมลงในสูตรสารหล่อเย็นมีทั้งแบบประจุลบ คือ สารประกอบโซเดียมซัลโฟเนต (sodium sulfonate) และอิมัลซิไฟเออร์แบบไม่มีประจุ เช่น แอลกอฮอล์อิท็อกซิเลท (alcohol ethoxylate) พีอีจี เอสเทอร์ (PEG ester) อัลคาโนลาไมด์ (alkanolamide) และเอทิลลีนออกไซด์โพรพิลีนออกไซด์ บล็อก โพลิเมอร์ (EO/PO block polymer) โดยมักใช้ในกรณีที่ต้องการให้น้ำมันมีอนุภาคขนาดเล็กเมื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำหรือเรียกว่าเกิดไมโครอิมัลชัน (Karsa *et al*., 2012; Rao *et al*., 2007)

3) สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งในสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำ เติมลงไปเพื่อให้สารหล่อเย็นมีคุณสมบัติตรงตามลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น ยับยั้งการเกิดสนิม การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดด่าง เพิ่มการหล่อลื่นและป้องกันการเกิดฟองหรือโฟม เป็นต้น

สารเติมแต่งประเภทยับยั้งการเกิดสนิม เติมลงไปเพื่อป้องกันการเกิดสนิมกับเครื่องจักรหรือชิ้นงานโลหะเนื่องจากสารหล่อเย็นบางประเภทต้องทำการเจือจางด้วยน้ำ สารยับยั้งการเกิดสนิมที่นิยม ได้แก่ แคลเซียม ซัลโฟเนต (calcium sulfonate) อัลคาโนลาไมด์ (alkanolamide) และไขที่ผ่านการออกซิไดซ์ (oxidized wax) ซึ่งต้องใช้สารประกอบโบรอนเพื่อช่วยให้การยับยั้งการเกิดสนิมมีความเสถียรเพิ่มขึ้น (Byers, 2006)

สารควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง หรือค่าพีเอช (pH) สารหล่อเย็นที่ผสมน้ำแล้วควรมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.8 ถึง 9.2 เพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการเกิดกลิ่นหืน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในขณะที่ใช้งาน รวมทั้งช่วยให้สามารถนำสารหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก สารควบคุมค่าความเป็นกรดด่างหรือบัฟเฟอร์ (buffer) ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบเอมีน (amine) และสารประกอบบอริค (boric compounds) ซัลโฟเนต (sulfonate) และสารกลุ่มกรดไขมัน (fatty acid) (Brinksmeier *et al*., 2015)

สารยับยั้งจุลินทรีย์ (biocide) เป็นสารเติมแต่งอีกชนิดที่นิยมใส่ลงในสารหล่อเย็น เพื่อช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ป้องกันการเกิดกลิ่นหืนของน้ำมัน และยืดอายุการใช้งาน (Benedicto *et al*., 2017) เช่น สารกลุ่มไทรอะซีน (triazine) ออกซาโซลีน (oxazoline) สารประกอบบอริค (boric compounds) และสารประกอบฟีนอล (phenolic compound) (Trafny, 2013; Brinksmeier *et al*., 2015) นิยมเติมลงในสารหล่อเย็นเพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา โดยการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในสารหล่อเย็นมีผลทำให้สารหล่อเย็นสูญเสียประสิทธิภาพ (Sokovic & Mijanovic, 2001) ทางเลือกในการยับยั้งจุลินทรีย์อาจทำได้โดยการพาสเจอร์ไรซ์และการฉายรังสีด้วยรังสียูวี อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการดังกล่าวไม่ได้ถูกนำมาขยายผล เนื่องจากความไม่คุ้มทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์ (Schwarz *et al*., 2015)

สารหล่อลื่น ความสามารถในการหล่อลื่นของสารหล่อเย็นประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำมันที่อยู่ในลักษณะอิมัลชัน สารหล่อเย็นที่มีน้ำมันที่อยู่ในลักษณะอิมัลชันในปริมาณมากจะมีความสามารถในการหล่อลื่นได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อผสมน้ำแล้วจะทำให้ความหนืดของสารหล่อเย็นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการหล่อลื่นต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันประเภทน้ำมันล้วน การเติมสารหล่อลื่นลงในสารหล่อเย็นจึงเป็นเรื่องปกติสำหรับสารหล่อเย็นที่จะนำไปใช้กับงานปานกลางถึงงานหนัก สารหล่อลื่นที่นิยมเติมลงในสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำได้แก่ คลอรีน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และสารกลุ่มเอสเทอร์ (Byers, 2006; Brinksmeier *et al*., 2015)

สารป้องกันการเกิดโฟม ในกรณีที่สารหล่อเย็นเกิดฟองโฟมมากเกินไปในขณะใช้งานจะทำให้ความแม่นยำในการตัดลดลง จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันการเกิดโฟม ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบซิลิโคน (silicone) และสารประกอบชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ซิลิโคน เช่น สารประกอบฟอสเฟต (Brinksmeier *et al*., 2015) โดยสารประกอบประเภทซิลิโคนมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดแม้ความเข้มข้นต่ำ อย่างไรก็ตาม หลายโรงงานมีการห้ามใช้ในกระบวนการชุบ การทาสี และการเตรียมพื้นผิวสุดท้าย เนื่องจากจะทำให้เกิดลักษณะของตาปลา (fish eyes) บนพื้นผิวชิ้นงานได้ (Byers, 2006) ตัวอย่างสัดส่วนของสารหล่อเย็นประเภทน้ำมันที่ละลายน้ำได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรทั่วไปที่แสดงถึงสัดส่วนของสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ละลายน้ำได้

หน้าที่	สารประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
น้ำมัน	น้ำมันแนฟทาชนิด 100/100	68
อิมัลซิไฟเออร์	สารประกอบซัลโฟเนต	17
สารหล่อลื่น	คลอริเนตเตดโอเลฟิน	5
สารหล่อลื่น	เอสเทอร์สังเคราะห์	5
สารยับยั้งการเกิดสนิม	อัลคาโนลาไมด์	3
สารยับยั้งจุลินทรีย์	สารประกอบฟีนอล	2
	รวม	100

ที่มา: Byers (2006)

3. ผลของสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของสารหล่อเย็นที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่มีการรายงานมาเมื่อไม่นานนี้ว่า การติดเชื้อของพนักงานตัดโลหะมีสาเหตุมาจากการสัมผัสกับสารหล่อเย็นมากถึงร้อยละ 80 (Shashidhara & Jayaram, 2010) เนื่องจากสารหล่อเย็นก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือทำให้เกิดอาการแพ้ได้ ถึงแม้ว่าสารประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ที่เป็นส่วนผสมในสูตรของสารหล่อเย็นจะมีความปลอดภัย แต่ก็ยังมีสารประกอบทางเคมีในสารหล่อเย็นที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ไนโตรซามีน (nitrosamine) สารประกอบประเภทคลอรีน (chlorinated compounds) สารประกอบบอริค (boric compounds) สารประกอบในกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) และสารยับยั้งจุลินทรีย์ (Brinksmeier *et al*., 2015) ดังนี้

ไนโตรซามีน เป็นสารก่อมะเร็งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ สารประกอบเอมีน เช่น ไดเอททาโนลามีน (diethanolamine) ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ต้านความเป็นกรดและป้องกันการกัดกร่อน และสารประกอบไนไตรท์ เช่น โซเดียมไนไตรท์ที่ใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (Simpson *et al*., 2003; Levy, 2011)

สารประกอบประเภทคลอรีน ได้แก่ คลอริเนตเตดพาราฟินซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มการหล่อลื่น ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลเคนและคลอรีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ร้อยละ 40-70 โดยน้ำหนัก (Fiedler, 2010) ส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ การกำจัดสารหล่อเย็นที่มีส่วนประกอบของคลอรีนต้องกำจัดโดยการเผาในเตาเผาพิเศษเพื่อควบคุมการเกิดสารพิษไดออกซิน (Klocke & Kuchle, 2011) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีสารหล่อเย็นหลายยี่ห้อที่มีการพัฒนาสูตรที่ไม่เติมคลอรีนเพื่อความแสดงถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สารประกอบบอริค เช่น กรดบอริคเป็นสารที่ทำหน้าที่หลายอย่าง ได้แก่ ป้องกันการกัดกร่อน มีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Lawal *et al*., 2012) อย่างไรก็ตาม กรดบอริคจัดอยู่ในประเภทสารที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดปัญหากับระบบสืบพันธุ์และอยู่ในรายชื่อสารที่ต้องมีการเฝ้าระวังจากองค์กรจัดการสารเคมีแห่งสหภาพยุโรป (European Chemicals Agency, 2010)

สารกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เกิดจากการสลายตัวของน้ำมันที่อุณหภูมิสูง พบในน้ำมันที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ สารเหล่านี้ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ เป็นสารก่อมะเร็ง สารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และเป็นสารที่มีผลให้ทารกหรือตัวอ่อนในครรภ์มารดามีความผิดปกติ (Ozcelik *et al*., 2011; Simpson *et al*., 2003)

สารยับยั้งจุลินทรีย์กลุ่มไทรอะซีน (triazine) เป็นสารออกฤทธิ์ที่ปลดปล่อยสารฟอร์มาลดีไฮด์ (Shokrani *et al*., 2012) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ระเหยได้ง่ายและถูกจัดไว้เป็นสารก่อมะเร็งต่อมนุษย์กลุ่มที่ 1 ของหน่วยวิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) อัตราการเกิดสารฟอร์มาลดีไฮด์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอุณหภูมิ (Geier *et al*., 1997 as cited in Geier & Lessmann, 2011)

นอกจากนี้การใช้สารหล่อเย็นที่ความดันและอุณหภูมิในการใช้งานที่สูง สามารถส่งผลให้สารหล่อเย็นเกิดเป็นละอองหมอก หรือควัน และเกิดกลิ่น ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจได้ (Koller *et al*., 2016) โดยเฉพาะสารหล่อเย็นที่มีสารประกอบของ กำมะถัน คลอรีน ฟอสฟอรัส และไฮโดรคาร์บอน เป็นส่วนผสม

สารหล่อเย็นที่ใช้แล้วจะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารหล่อเย็นที่ยังไม่ได้ใช้ เนื่องจากสารเคมีต่าง ๆ ที่เป็นส่วนผสมในสารหล่อเย็นมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีไปตามลักษณะการใช้งานและการย่อยสลายอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ ทำให้เกิดสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (Sokovic & Mijanovic, 2001) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการกำจัดสารหล่อเย็นอย่างถูกวิธี

4. เทคโนโลยีการบำบัดสารหล่อเย็นด้วยวิธีกายภาพ

สารหล่อเย็นมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการใช้งาน อายุการใช้งานหรือลักษณะการใช้งานและการดูแลรักษา (Benedicto *et al*., 2017; Skerlos *et al*., 2008) เมื่อสารหล่อเย็นเริ่มมีกลิ่นเหม็นเกิดขึ้นเป็นสัญญาณบ่งบอกว่ามีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารหล่อเย็น สารหล่อเย็นดังกล่าวจะถูกถ่ายทิ้งซึ่งสารหล่อเย็นที่ใช้แล้วจัดเป็นของเสียอันตราย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการบำบัดอย่างเหมาะสม การบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพมีข้อดีคือสามารถนำน้ำมันไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำไปเป็นเชื้อเพลิง หรือนำกลับมาใช้ใหม่โดยเติมสารเพื่อปรับแต่งให้มีคุณสมบัติดังเดิม เป็นต้น การบำบัดสารหล่อเย็นที่ใช้แล้วแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีทางเคมีและวิธีทางฟิสิกส์ ซึ่งมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาดังนี้

- ปริมาตรของของเสีย
- ความต้องการในการรีไซเคิลหรือนำกลับมาใช้ใหม่
- งบประมาณในการลงทุนสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

4.1 วิธีทางเคมี

การตกตะกอน (coagulation) เป็นการเติมสารเคมี เช่น อลูมิเนียมซัลเฟต อลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอริคคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ (Chawaloesphonsiya *et al*., 2017) เป็นต้น แล้วทำการกวนอย่างเร็วเพื่อให้สารที่ใช้ตกตะกอนจับกับของเสีย แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มหรือเรียกว่าฟล็อค (floc) หลังจากนั้นทำการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้ฟล็อคเกิดการตกตะกอนออกจากของเหลวที่เป็นน้ำ ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดโดยวิธีนี้คือ ชนิด

ของสารที่ใช้ตกตะกอน ความเข้มข้นของสารที่ใช้ ความเร็วในการกวน และค่าความเป็นกรดด่าง (Chawaloesphonsiya *et al*., 2017; Zou *et al*., 2011) ข้อดีของวิธีนี้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ งบลงทุนต่ำในขณะที่สามารถบำบัดสารหล่อเย็นที่ใช้แล้วได้ในปริมาณมาก และมีข้อดีในเชิงวิศวกรรมหลายประการ เช่น การสร้างระบบไม่ซับซ้อน และดูแลรักษาได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การบำบัดด้วยวิธีนี้อาจก่อให้เกิดตะกอนหรือสลัดจ์ (sludge) ที่เป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อมต่อไปได้ (Bratskaya *et al*., 2009)

การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (electrocoagulation) เป็นการใช้หลักการศักย์ไฟฟ้าเคมี โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปที่ขั้วโลหะที่จุ่มอยู่ในของเสีย อิออนของโลหะที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วจะรวมตัวกับของเสียส่วนที่เป็นน้ำมันแล้วทำให้เกิดเป็นฟล็อคขึ้น โลหะที่นิยมใช้เป็นขั้ว ได้แก่ อลูมิเนียม และเหล็ก เป็นต้น ประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ทำขั้ว และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังขั้วโลหะ (Cerqueira *et al*., 2016) วิธีการนี้มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน และใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด (Kobya *et al*., 2008) แต่วิธีการนี้จะมีการสูญเสียโลหะแอโนด และต้องใช้พลังงาน ส่งผลให้มีค่าดำเนินการระบบสูง (Bensadok *et al*., 2008)

การดูดซับ (adsorption) เป็นการใช้ตัวดูดซับซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้สารอินทรีย์ เช่น ชานอ้อย ไคโตซาน (Piyamongkala *et al*., 2008) เปลือกทับทิม และเปลือกถั่ว (Katiyar *et al*, 2014) ที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงให้มีคุณสมบัติเหมาะสมยิ่งขึ้นในการดูดซับน้ำมัน เช่น กระบวนการเผาแบบไร้อากาศ มาทำการดูดซับส่วนที่เป็นน้ำมันออกจากส่วนน้ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการดูดซับ ชนิดของตัวดูดซับและปริมาณที่ใช้ (Champreecha *et al*., 2017) ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถนำวัสดุเหลือใช้มาใช้เป็นตัวดูดซับได้และหลังจากดูดซับแล้วอาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียคือความสามารถในการดูดซับจำกัด และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก

การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) เป็นการออกซิไดซ์น้ำมันซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในของเสียให้แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอิออนของธาตุเหล็ก ประสิทธิภาพในการบำบัดของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ชนิดและความเข้มข้นของอิออนเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Amin *et al*., 2017) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่นิยมใช้มากนักเนื่องจากต้นทุนการดำเนินงานสูงและมีกระบวนการบำบัดที่ซับซ้อน (Arslan *et al*., 2000) และจะใช้กับของเสียน้ำมันหล่อเย็นที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว

4.2 วิธีทางฟิสิกส์

การระเหย (evaporation) เป็นการให้ความร้อนกับของเสียสารหล่อเย็นแล้วทำให้เกิดการระเหยของส่วนที่เป็นน้ำ โดยปกติแล้วจะเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องเพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระบวนการระเหยเกิดขึ้นอย่างคงที่และเพื่อการประหยัดพลังงานอีกด้วย ข้อดีของการใช้กระบวนการระเหย คือ เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องและอัตโนมัติ ไม่ต้องใช้สารเคมี หรืออุปกรณ์อื่น ๆ เพิ่มเติม อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียคือ ต้นทุนการสร้างเครื่อง และค่าไฟสูง ตลอดจนมีค่าใช้จ่ายในการล้างตะกอนคราบสกปรกออกจากเครื่องระเหย และสารอินทรีย์ระเหยง่ายในของเสียอาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้

การทำเยือกแข็งแล้วละลาย (freeze-thaw) เป็นการทำให้ของเสียสารหล่อเย็นเย็นจัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแล้วค่อยทำการละลาย ซึ่งจะส่งผลต่อความเสถียรของน้ำมันในน้ำ ทำให้อนุภาคหยดน้ำมันที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมตัวกันและแยกชั้นออกจากน้ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการแยก คือ อุณหภูมิ และเวลาในการทำให้เยือกแข็ง (Feng *et al*., 2017) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สิ้นเปลืองพลังงานมาก และยังอยู่ในระดับการทดลองที่ยังไม่มีการนำไปใช้จริงในทางการค้า

การแยกด้วยเมมเบรน (membrane) หลักการสำคัญสำหรับการแยกด้วยวิธีการนี้คือเกรเดียนต์ของความดัน เทคนิคเมมเบรนที่ใช้กันนั้นมีหลายแบบ ได้แก่ 1) ไมโครฟิลเตรชัน เป็นการกรองด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนในช่วง 0.1-10 ไมโครเมตร ใช้ความดันต่ำประมาณ 100-500 kPa 2) อัลตร้าฟิลเตรชัน เมมเบรนมีขนาดรูพรุนในช่วง 2-200 นาโนเมตร โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-800 kPa (Thanongsak, 2012) เทคนิคไมโครฟิลเตรชันและอัลต้าฟิลเตรชันนี้ได้รับความนิยมในการบำบัดสารหล่อเย็นมากที่สุด โดยประสิทธิภาพของทั้งสองเทคนิคนั้นอาจไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนนัก เนื่องจากเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะมีชั้นเจลน้ำมันเคลือบอยู่ทำให้ความสามารถในการเลือกผ่านของเมมเบรนของไมโครฟิลเตรชันใกล้เคียงกับอัลตร้าฟิลเตรชันได้ (Cheryan & Rajagopalan, 1998) และ 3) นาโนฟิลเตรชัน เมมเบรนมีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และใช้ความดันสูงประมาณ 1-2 MPa (Thanongsak, 2012) ขนาดโมเลกุลที่สามารถผ่านนาโนฟิลเตรชั่นได้คือ 200 ถึง 2000 ดาลตัน (Astakhov & Joksch, 2012) นาโนฟิลเตรชั่นที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปนั้นโดยส่วนใหญ่จะทำด้วยสารอินทรีย์ จึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิในสภาวะใช้งาน และความคงทนต่อสารเคมี ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ความดัน ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ขนาดอนุภาคของน้ำมันที่ละลายในน้ำ อุณหภูมิ และปริมาณเกลือที่เจือปนอยู่ในน้ำ (Hesampour *et al*., 2008) วิธีการแยกด้วยเมมเบรนนี้ใช้พื้นที่น้อยและช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดมลภาวะได้ อย่างไรก็ตามมักเกิดปัญหาเมมเบรนอุดตันได้ง่าย การบำรุงรักษาระบบ และการเปลี่ยนเมมเบรนใหม่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการบำบัด

การบำบัดสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำได้แต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งต้องพิจารณาถึงต้นทุน ประสิทธิภาพในการบำบัด ความยากง่ายในการดำเนินการ และปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัดด้วย ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณของเสีย ต้นทุนต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ความยากง่ายในการดำเนินการ และประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละวิธี

วิธีการ	ปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัด	ต้นทุน/ต่อประสิทธิภาพ	ความยากง่ายในการดำเนินการ	ประสิทธิภาพในการบำบัด
วิธีทางเคมี				
1. การตกตะกอน	มาก	ต่ำ	ง่าย	COD ร้อยละ 65-97 TOC ร้อยละ 49-81 (Demirbas & Kobya, 2017; Painmanakul *et al*., 2013)
2. การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	COD ร้อยละ 92-93 TOC ร้อยละ 78-82 (Demirbas & Kobya, 2017; Kobya *et al*., 2008)
3. การดูดซับ	ปานกลาง	ต่ำ	ง่าย	COD ร้อยละ 98 (Katiyar *et al*., 2014)

ตารางที่ 4 **(ต่อ)** ปริมาณของเสีย ต้นทุนต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ความยากง่ายในการดำเนินการ และประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละวิธี

วิธีการ	ปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัด	ต้นทุน/ต่อประสิทธิภาพ	ความยากง่ายในการดำเนินการ	ประสิทธิภาพในการบำบัด
4. การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน	ปานกลาง	สูง	ยาก	COD ร้อยละ 76-100* TOC ร้อยละ 99* *หมายเหตุ: เป็นค่าการบำบัดของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำและน้ำมันมาแล้ว (Arslan *et al*., 2000; Painmanakul *et al*., 2013)
วิธีทางฟิสิกส์				
1. การระเหย	น้อย	ปานกลาง	ง่าย	COD ร้อยละ 90-100 (Chipasa, n.d.)
2. การทำเยือกแข็งแล้วละลาย	น้อย	สูง	ปานกลาง	COD ร้อยละ 80 (Feng *et al*., 2017)
3. การแยกด้วยเมมเบรน	ปานกลาง	สูง	ยาก	COD ร้อยละ 75-90[ก] TOC ร้อยละ 92[ข] [ก](Schoeman & Novhe, 2007) [ข](Hua *et al*., 2007)

สรุป

สารหล่อเย็นมีความสำคัญและมีประโยชน์มากสำหรับกระบวนการตัดโลหะ การเลือกประเภทของสารหล่อเย็นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่มักเลือกสารหล่อเย็นประเภทละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม การกำจัดหรือบำบัดสารหล่อเย็นที่ใช้แล้วอย่างไม่ถูกวิธีอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีสารที่เป็นองค์ประกอบหลายชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง สถานประกอบการจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะกับวัตถุประสงค์และความต้องการในการบำบัด โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาได้แก่ ต้นทุน ประสิทธิภาพในการบำบัด ความยากง่ายในการดำเนินการ และปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัดด้วย สำหรับบริษัทขนาดกลางและเล็กในประเทศไทยที่มีข้อจำกัดในเรื่องของต้นทุนการผลิต สามารถเลือกใช้วิธีการตกตะกอนและวิธีการดูดซับซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำ วิธีการไม่ยุ่งยาก ทั้งนี้เพื่อคุณภาพชีวิตของชุมชนในบริเวณนั้น ๆ และเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไว้ให้แก่คนรุ่นหลังได้ใช้ประโยชน์สืบไป

เอกสารอ้างอิง

Akeburanawat, W. (2009). *Hazard of metalworking fluid*. Retrieved July 14, 2017, from http://www.summacheeva.org/index_article_mwf.htm (in Thai)

Amin, M. M., Golbini Mofrad, M. M., Pourzamani, H., Sebaradar, S. M., & Ebrahim, K. (2017). Treatment of industrial wastewater contaminated with recalcitrant metal working fluids by the photo-Fenton process as post-treatment for DAF. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 45*, 412-420.

Arslan, i., Balcioglu, I. A., & Bahnemann, D. W. (2000). Advanced chemical oxidation of reactive dyes in simulated dyehouse effluents by ferrioxalate-Fenton/UV-A and TiO2/UV-A processes. *Dyes and Pigments, 47*(3), 207-218.

Astakhov, V. P., & Joksch, S. (2012). *Metalworking fuids (MWFs) for cutting and grinding: Fundamentals and recent advances*. (pp. 397-401). Cambridge: Woodhead Publishing.

Benedicto, E., Carou, D., & Rubio, E. M. (2017). Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia Engineering, 184*, 99-116.

Bensadok, K., Benammar, S., Lapicque, F., & Nezzal, G. (2008). Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials, 152*(1), 423-430.

Bratskaya, S. Y., Pestov, A. V., Yatluk, Y. G., & Avramenko, V. A. (2009). Heavy metals removal by flocculation/precipitation using N-(2-carboxyethyl)chitosans. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 339*(1), 140-144.

Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A., & Herrmann, C. (2015). Metalworking fluids - Mechanisms and performance. *CIRP Annals - Manuf Tech, 64*(2), 605-628.

Byers, J. P. (2006). *Metalworking Fluids, Second Edition*: (pp. 105-137). Boca Raton: CRC Press.

Canter, N. (2005). HLB: A new system for water-based netalworking fluids. *Tribology and Lubrication Technology, 61*(9), 10-12.

Cerqueira, A. A., & Marques, M. R. d. C. (2012). Electrolytic treatment of wastewater in the oil industry. In J. S. Gomes (Ed.), *New Technologies in the Oil and Gas Industry* (pp. Ch. 01). Rijeka: InTech.

Champreecha, W., Pranudta, A., & Piyamongkala, G. (2017). Equilibrium and batch design studies for cutting fluid adsorption onto sugarcane bagasse and modified sugarcane bagasse. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 27*(1), 1-13. (in Thai)

Chawaloesphonsiya, N., Guiraud, P., & Painmanakul, P. (2017). Analysis of cutting-oil emulsion destabilization by aluminum sulfate. *Environmental Technology*, 1-11.

Cheryan, M., & Rajagopalan, N. (1998). Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. *Journal of Membrane Science, 151*(1), 13-28.

Chipasa, K. (n.d.). *Best practice guide for the disposal of water-mix metalworking fluids*. Retrieved September 14, 2017, from http://www.ukla.org.uk

Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production, 83*, 33-47.

Demirbas, E., & Kobya, M. (2017). Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. *Process Safety and Environmental Protection, 105*(Supplement C), 79-90.

Duchaine, D., Cormier, Y., Gilbert, Y., Veillette, M., Lavoie, J., Mériaux, A., Touzel, C., Sasseville, D., Poulin, Y. (2012). Workers exposed to metalworking fluids: Evaluation of bioaerosol exposure and effects on respiratory and skin Health. *Studies and Research Projects: Report R-745*. Retrieved December 10, 2017, from http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-745.pdf?v=2017-08-26

Lima E. (2015). *Metalworking fluids foam control based on novel surfactants technology*. Retrieved November 30, 2017, from http://msdssearch.dow.com/

European Chemicals Agency, E. (2010). *Identification of SVHC*. Retrieved July 10, 2017, from https://echa.europa.eu/

Feng, W., Yin, Y., de Lourdes Mendoza, M., Wang, L., Chen, X., Liu, Y., Cai, L., Zhang, L. (2017). Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions. *Journal of Cleaner Production, 148*, 84-89.

Fiedler H. (2010). Short-Chain Chlorinated Paraffins: Production, Use and International Regulations. In: Boer J. (eds) Chlorinated paraffins. The handbook of environmental chemistry, vol 10. (pp. 1-40). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Foltz, G. (1990). Definitions of Metalworking Fluids. In Dick, R.M. (Ed.), *Waste mnimization and wastewater treatment of metalworking fluids*. (pp. 2-3). Alexandria: Independent Lubrication Manufacturers Association.

Foulds, L. (2012). Cutting fluids. In Rustemeyer, T., elsner, P., John, S. M., & Maibach, H. I. (Eds.), *Kanerva's occupational dermatology.* (pp. 715-725). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Geier J., & Lessmann H. (2011). Metalworking Fluids. In: Johansen, J., Frosch, P., Lepoittevin, J.P. (Eds.), *Contact Dermatitis.* (pp. 681-694). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hesampour, M., Krzyzaniak, A., & Nyström, M. (2008). Treatment of waste water from metal working by ultrafiltration, considering the effects of operating conditions. *Desalination, 222*(1-3), 212-221.

Hua, F. L., Tsang, Y. F., Wang, Y. J., Chan, S. Y., Chua, H., & Sin, S. N. (2007). Performance study of ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal, 128*(2), 169-175.

Karsa, D. R., Donnelly, P. J., & Goode, J. M. (1991). *Surfactants applications directory*. (pp. 135-146). New York: Blackie and Son Ltd.

Katiyar, A., Singh, A. K., & Singh, L. K. (2014). A new efficient method for removal of metal cutting fluids from machining waste water. *International Journal of Engineering and Technical Research*. (Special Issue), 313-318.

Klocke, F., & Kuchle, A. (2011). *Manufacturing processes 1 (RWTH edition)*. (pp. 219-236). Berlin Heidelberg: Springer.

Kobya, M., Ciftci, C., Bayramoglu, M., & Sensoy, M. T. (2008). Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation. *Separation and Purification Technology, 60*(3), 285-291.

Koller, M. F., Pletscher, C., Scholz, S. M., & Schneuwly, P. (2016). Metal working fluid exposure and diseases in Switzerland. *International Journal of Occupational and Environmental Health, 22*(3), 193-200.

Kuram, E., Ozcelik, B., Bayramoglu, M., Demirbas, E., & Simsek, B. T. (2013a). Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *Journal of Cleaner Production, 42*, 159-166.

Kuram, E., Ozcelik, B., & Demirbas, E. (2013b). Environmentally friendly machining: vegetable based cutting fluids. In J. P. Davim (Ed.), *Green Manufacturing Processes and Systems*. (pp. 23-47). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Lawal, S., Choudhury, I., & Nukman, Y. (2012). Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 52*(1), 1-12.

Levy, B.S. (2011). *Occupational and Environmental Health: Recognizing and Preventing Disease and Injury.* (pp.393). USA: Oxford University Press.

Michalek, D. J., Hii, W. W., Sun, J., Gunter, K. L., & Sutherland, J. W. (2003). Experimental and analytical efforts to characterize cutting fluid mist formation and behavior in machining. *Applied Occupational and Environmental Hygiene, 18*(11), 842-854.

Occupational Safety and Health Administration. (2017). *Metalworking fluids: safety and health best practices manual.* Retrieved June 20, 2017, from https://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html

Oilserv. (2010). *Maintenance of metal working fluid.* Retrieved June 15, 2017, from http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539149449&Ntype=11 (in Thai)

Ozcelik, B., Kuram, E., Huseyin Cetin, M., & Demirbas, E. (2011). Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. *Tribology International, 44*(12), 1864-1871

Painmanakul, P., Chintateerachai, T., Lertlapwasin, S., Rojvilavan, N., Chalermsinsuwan, T., Chawaloesphonsiya, N., & Larpparisudthi, O. (2013). Treatment of cutting oily-wastewater by sono Fenton process: experimental approach and combined process. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 7*(12), 936-940.

Piyamongkala, K., Mekasut, L., & Pongstabodee, S. (2008). Cutting fluid effluent removal by adsorption on chitosan and sds-modified chitosan. *Macromolecular Research, 16*(6), 492-502. (in Thai)

Rao, D. N., Srikant, R. R., & Rao, C. S. (2007). Influence of emulsifier content on properties and durability of cutting fluids. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 29*(4), 396-400.

Razali, M. N., Shahul Hamid, M. Y., & Mohd Azoddein, A. A. (2016). Recovery of mineral oil from waste emulsion using electrocoagulation method. *MATEC Web of Conferences, 38*, 03005p.1-03005p.7.

Sangsing, S. (2015). *Cutting fluid*. Retrieved July 14, 2017, from http://www.tistr.or.th/tistrblog/?p=1931 (in Thai)

Schoeman, J., & Novhe, O. (2007). Evaluation of microfiltration for the treatment of spent cutting-oil. *Water SA, 33*(2), 245-248.

Schwarz, M., Dado, M., Hnilica, R., & Veverková, D. (2015). Environmental and health aspects of metalworking fluid use. *Polish Journal of Environmental Studies, 24*(1), 37-45.

Shashidhara, Y. M., & Jayaram, S. R. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. *Tribology International, 43*(5), 1073-1081.

Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57*, 83-101.

Simpson, A. T., Stear, M., Groves, J. A., Piney, M., Bradley, S. D., Stagg, S., & Crook, B. (2003). Occupational exposure to metalworking fluid mist and sump fluid contaminants. *The Annals of Occupational Hygiene, 47*(1), 17-30.

Skerlos, S. J., Hayes, K. F., Clarens, A. F., & Zhao, F. (2008). Current advances in sustainable metalworking fluids research. *International Journal of Sustainable Manufacturing, 1*(1-2), 180-202.

Sokovic, M., & Mijanovic, K. (2001). Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology, 109*(1), 181-189.

Taylor, F. W. (1907). *On the Art of Cutting Metals*. (pp. 31-58). New York: American society of mechanical engineers.

Thanongsak, W. (2012). Wastewater reclamation and reuse. *Technology promotion, 39*(225), 71-74. (in Thai)

Trafny, E. A. (2013). Microorganisms in metalworking fluids: current issues in research and management. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 26*(1), 4-15.

Yamaguchi, K., Ogawa, K., Fujita, T., Kondo, Y., Sakamoto, S., Yamaguchi, M. (2017). Property and recyclability change of corrosion-inhibition-improved amine-free water-soluble cutting fluid with repeated recycling, *Key Engineering Materials, 749*, 65-69.

Zou, J., Zhu, H., Wang, F., Sui, H., & Fan, J. (2011). Preparation of a new inorganic–organic composite flocculant used in solid–liquid separation for waste drilling fluid. *Chemical Engineering Journal, 171*(1), 350-356.