



บทที่ 2

พิธีศน์วรรณกรรม

2.1 น้ำเสียสถานบริการน้ำมัน

สถานบริการน้ำมันแต่ละแห่งสามารถสร้างน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารมลพิษ (pollutant) ได้มากถึง 20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากกิจกรรมต่างๆ ภายในสถานบริการ เช่น การจำหน่ายน้ำมัน เชื้อเพลิง การทำความสะอาด การเปลี่ยนถ่ายน้ำมัน ห้องน้ำ ร้านอาหารอาหาร ร้านสะดวกซื้อ เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมันนี้ เป็นปัญหาสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำเสียมีลักษณะเป็นอิมัลชันของน้ำและน้ำมัน (oil / water emulsion) และพบว่า 80 % ของน้ำเสียสถานบริการน้ำมันมาจากการทำความสะอาด (Panpanit, 2001) ตารางที่ 2.1 แสดงสารมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมเกี่ยวกับรถของสถานบริการน้ำมัน

2.1.1 น้ำเสียจากการล้างรถ

กระบวนการล้างรถโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ (Panpanit, 2001)

ขั้นที่ 1 กำจัดฝุ่นผง (dust cleaning) น้ำเสียจากขั้นตอนนี้จะประกอบด้วย โคลน และน้ำมันอิสระ (free oil) จำนวนมาก นอกจากนี้ น้ำแรงดันสูงจะทำให้น้ำมันเป็นอิมัลชันของน้ำและน้ำมัน

ขั้นที่ 2 ทำความสะอาด (foaming) น้ำเสียจากขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยสารทำความสะอาดที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งท้ายสุดจะรวมตัวกับน้ำเสียจากขั้นตอนที่ 1 ดังนั้น อิมัลชันของน้ำและน้ำมัน จึงมีเสถียรภาพ (stabilization)

ขั้นที่ 3 ล้างด้วยน้ำสะอาด (presoak) เป็นการกำจัดสารทำความสะอาดจากขั้นตอนที่แล้ว น้ำเสียจากขั้นตอนนี้ จะมีสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความเข้มข้นลดลงเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากถูกเจือจางด้วยน้ำ

ขั้นที่ 4 ล้าง และทำให้แห้ง (spot free rinse and dryer) รถจะถูกล้างด้วยน้ำคุณภาพสูง และทำให้แห้ง เพื่อไม่ให้รถมีรอยดำ

ตารางที่ 2.1 สารมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมเกี่ยวกับรถของสถานีบริการน้ำมัน (Ratpakdi, 2002)

กิจกรรม	ของเสีย	ไฮโดรคาร์บอน	โลหะหนัก	PAHs	CFCs	ตะกอน	น้ำมัน/ไขมัน	กรด	อัลคาไล	ปิโตรเลียมกลั่น	สารประกอบคลอรีน	ตะกั่ว	แรโยหิน	ตัวทำละลาย	เอธิลีน/โพรพิลีนไกลคอล
การเปลี่ยนถ่าย	น้ำมันเครื่อง ไส้กรอง น้ำมันหล่อลื่น	X	X	X											
	สารหล่อเย็น		X	X											X
	สารทำความสะอาด				X										
การเติมน้ำมัน	การรั่วไหลของ น้ำมันเชื้อเพลิง	X	X	X											
การล้างรถ	สารลดแรงตึงผิว/ สารทำความสะอาด สะอาด		X			X	X	X							
ซ่อมตัวถังและพ่นสี	ตัวทำละลาย และทินเนอร์		X	X			X			X	X				
	สี และสีรองพื้น		X												
	น้ำทิ้งจากการขัดเคลือบสีรถ		X												

ตารางที่ 2.1 สารมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมเกี่ยวกับรถของสถานีบริการน้ำมัน (Ratpakdi, 2002) (ต่อ)

กิจกรรม	ของเสีย	ไฮโดรคาร์บอน	โลหะหนัก	PAHs	CFCs	ตะกอน	น้ำมัน/ไขมัน	กรด	อัลคาไล	ปิโตรเลียมกลิ่น	สารประกอบคลอรีน	ตะกั่ว	แร่ใยหิน	ตัวทำละลาย	เอธิลีน/โพรพิลีนไกลคอล
การถอดหรือขึ้นส่วน	น้ำมันเครื่อง ใส	X	X	X											
	กรองน้ำมันเครื่อง														
	น้ำมันหล่อลื่น														
	สารทำความสะอาด				X										
การเปลี่ยนขึ้นส่วน	การรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง	X	X	X											
	สารลดการกัดกร่อน		X			X									
	สายพาน	X													
	ยางรถ		X	X											
	แบตเตอรี่							X				X			
	ผ้าเบรก ก้ามเบรก		X										X		
ปั๊ม และเครื่องยนต์	อะไหล่		X				X								
			X				X								

ตารางที่ 2.1 สารมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมเกี่ยวกับรถของสถานีบริการน้ำมัน (Ratpakdi, 2002) (ต่อ)

กิจกรรม	ของเสีย	ไฮโดรคาร์บอน	โลหะหนัก	PAHs	CFCs	ตะกอน	น้ำมัน/ไขมัน	กรด	อัลคาไล	ปิโตรเลียมกลั่น	สารประกอบคลอรีน	ตะกั่ว	แรโยหิน	ตัวทำละลาย	เอธิลีน/โพรพิลีนไกลคอล
การทำ	ตัวทำละลาย	X	X			X			X	X					
ความสะอาด	สารทำความสะอาดสูบน้ำ	X				X	X	X							
การทำ	ผ้าเบรค และกำมเบรค	X											X		
ความสะอาดเบรคและคลัช	สนิมเบรค	X											X		
ร้านล้างรถ	ผ้า และวัสดุชุบสิ่งสกปรก	X				X								X	
	น้ำเสียจากการล้างพื้น	X				X		X							
	ตะกอนจากเครื่องแยกน้ำและน้ำมัน	X				X									

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากการล้างรถ

น้ำเสียจากการทำความสะอาดรถประกอบด้วยของแข็งแขวนลอย อิมัลซิไฟเออร์ และน้ำมัน ซึ่งมักพบน้ำมันหล่อลื่น (lubricant oil) อยู่ในรูปของอิมัลชันระหว่างน้ำมันกับสารอิมัลซิไฟเออร์ และน้ำ และเรียกลักษณะแบบนี้ว่า อิมัลชันเสถียร (stabilized emulsion) โดยลักษณะของอิมัลชันที่พบในน้ำเสียสถานีบริการน้ำมันเป็นแบบ oil-in-water (OW) คือ การมีหยดน้ำมันขนาดเล็กลอยอยู่ในมวลน้ำ (Panpanit, 2001) อิมัลซิไฟเออร์ประกอบด้วยโมเลกุลของส่วนชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างสองพื้นผิวที่ประจันกัน (interfacial tension) ส่งผลให้หยดน้ำมันมีขนาดเล็กลง (Alther, 1998)

อิมัลซิไฟเออร์เป็นองค์ประกอบหลักในแชมพูล้างรถ โดยมากกว่า 90% ของน้ำเสียในอุตสาหกรรมพบว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ไร้ประจุ (nonionic emulsifiers) (Alther, 1998) นอกจากนี้ อิมัลซิไฟเออร์บางชนิดยังคงทนต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งขึ้นกับโครงสร้างทางเคมี ทำให้น้ำมีค่าซีโอดี (COD) สูงขึ้น (Panpanit, 2001)

ปัจจัยสำคัญต่อความเสถียรของอิมัลชันคือ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ อิมัลชันของน้ำและน้ำมันที่มีอิมัลซิไฟเออร์ปรากฏอยู่ด้วย จะมีขนาดเล็กถึง 5 ไมโครเมตร ในขณะที่การมีสารอิมัลซิไฟเออร์ร่วม (co-emulsifier) อย่างเช่น โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol) ยิ่งช่วยให้อิมัลชันมีความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ การที่อิมัลซิไฟเออร์ประกอบด้วยโมเลกุลสองส่วนที่ชอบ และไม่ชอบน้ำ เมื่อเข้าไปอยู่ในพื้นผิวที่ประจันกันของน้ำ และน้ำมัน อิมัลซิไฟเออร์จะไปล้อมรอบหยดน้ำมันไว้ เกิดเป็นชั้นที่ป้องกันไม่ให้หยดน้ำมันมารวมตัวกัน ส่งผลให้น้ำเสียเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธี conventional gravity separator ได้ ดังนั้น น้ำเสียจากการล้างรถที่ไม่ได้รับการบำบัดก่อน จึงก่อปัญหาต่อแหล่งน้ำสาธารณะได้ (Alther, 1998; Tri และคณะ, 2006)

2.1.3 ความเป็นพิษของน้ำเสียจากการล้างรถ

น้ำเสียจากการล้างรถมีความเป็นพิษ เนื่องจากมีปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนผสมอยู่ มักพบในรูปของน้ำมันหล่อลื่นกับสารอิมัลซิไฟเออร์ น้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลมากกว่าร้อยละ เช่น พาราฟินสายสั้น (short-chain paraffins) ไกลคอลอีเทอร์ (glycol ethers) แพลลเตต (phthalates) ไตรบิวทิลฟอสเฟต (tributyl phosphate) สารประกอบไบ และพอลิไซคลิกอะโรมาติก (bi and polycyclic aromatic compounds) เช่น แนพทาลีน (naphthalene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene) และโนนิลฟีนอล (nonylphenol)

นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นยังมีความคงทนต่อการออกซิเดชัน (high oxidation stability) ในการบำบัดทางเคมีและชีวภาพสูง (Paxéus, 1996; Panpanit, 2001) ตัวอย่างความเข้มข้นของสารมลพิษจากน้ำเสียจากการล้างรถ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องแสดงในตาราง 2.3 และ 2.4

สำหรับประเทศไทย ได้มีการกำหนดมาตรฐานของน้ำเสียสถานประกอบการน้ำมันก่อนที่จะระบายทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานประกอบการน้ำมันเชื้อเพลิง (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรด-ด่าง	5.5-9.0
ซีโอดี	ไม่เกิน 200 มก.ต่อลิตร
สารแขวนลอย	ไม่เกิน 60 มก.ต่อลิตร
น้ำมัน และไขมัน	ไม่เกิน 15 มก.ต่อลิตร

สถานประกอบการน้ำมันแต่ละแห่งจึงควรมีกระบวนการบำบัดน้ำมันที่เหมาะสม เพื่อให้ปริมาณสารเจือปนในน้ำเสียอยู่ในระดับมาตรฐาน ไม่สร้างความเสียหายกับสิ่งแวดล้อม และแหล่งน้ำสาธารณะ

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของสารมลพิษจากน้ำเสียจากการล้างรถ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์	การล้างรถ (ประเทศไทย) ^ก	ที่จอดรถ (สหรัฐอเมริกา) ^ข	ร้านซ่อมหม้อน้ำ (สหรัฐอเมริกา) ^ข	สถานีบริการน้ำมัน (ประเทศไทย) ^ข
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	ก่อนบำบัด	ค่าเฉลี่ย
ความเป็นกรด-ด่าง	7.05 (0.27)	6.4 (0.4)	-	7.5 (0.4)
บีโอดี (มก.ต่อลิตร)	54.2 (20.73)	-	192	112 (90)
ซีโอดี (มก.ต่อลิตร)	122.75 (41.68)	171.7 (205.0)	-	239 (153)
ดีโอดี (มก.ต่อลิตร)	-	40.1 (57.1)	-	-
สารอินทรีย์คาร์บอน (มก.ต่อลิตร)	-	-	-	-
ไฮโดรคาร์บอน (มก.ต่อลิตร)	-	-	-	-
น้ำมัน และไขมัน (มก.ต่อลิตร)	5693.25 (8389.20)	7.4 (10.3)	17	36 (34)
ของแข็งแขวนลอย (มก.ต่อลิตร)	516.75 (440.39)	55.1 (71.6)	160	176 (189)
ของแข็งแขวนลอยระเหย ง่าย (มก.ต่อลิตร)	-	38.6 (60.5)	-	-
ฟอสฟอรัส (มก.ต่อลิตร)	2.76 (1.70)	-	-	-
ไนเตรต (มก.ต่อลิตร)	-	1.0 (0.2)	-	-
อะลูมิเนียม	-	2235	-	-
แคดเมียม	-	-	-	-
โครเมียม	-	-	-	-
ทองแดง	-	103	192	-
ตะกั่ว	-	45	287	-
นิกเกิล	-	75	-	-
สังกะสี	-	2601	232	-

หมายเหตุ :- ไม่มีข้อมูล

ก: ปรับจาก สุเมธ ชวเดช (2541),

ข: จาก Ratpakdi (2002)

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียจากเครื่องล้างรถอัตโนมัติในประเทศสวีเดน
(Paxéus, 1996)

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสีย (มก.ต่อลิตร)					
	รถยนต์ทั่วไป			รถยนต์ขนาดใหญ่		
	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ช่วง
น้ำมันทั้งหมด	291	242	10-1750	550	460	65-1200
ซีโอดี	1263	1180	120-4200	4600	4500	1700-7500
อะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน						
C8-C16	29	22	1-139	103.86	76.72	41-220
C17-C-30	0.6	0.4	<0.1-3	1.84	1.87	0.9-3.0
อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน						
เบนซีน	0.01	0.01	<0.01-0.2	0.02	0.02	0.02-0.03
โทลูอีน	0.08	0.05	<0.01-0.6	0.10	0.08	0.03-0.2
แนฟทาลีน	0.17	0.13	<0.001-0.7	1.1	0.75	0.3-3
ไบฟีนิล	0.015	0.005	<0.001-0.1	0.12	0.11	0.04-0.2
ไดเบนโซฟีวเรน	0.001	0.002	<0.001-0.03	0.011	0.011	0.009-0.012
ฟีนันทริน	0.005	0.004	<0.001-0.03	0.021	<0.023	0.005-0.03
ไพรีน	0.003	0.002	<0.001-0.01	0.009	<0.009	0.01-0.02
ฟลูออแรนทีน	0.003	0.002	<0.001-0.01	0.004	<0.005	0.002-0.006
สารเสริมสภาพพลาสติก						
ไดเอทิล-แธลเลต	0.005	0.01	0.002-0.06	0.01	0.01	0.01-0.02
ไดเอทิล-แธลลีน	0.05	0.03	<0.001-0.15	0.30	0.21	<0.001-0.7
ไดเอทิลเฮกซิล-แธลเลต	0.52	0.38	0.02-4.1	1.50	1.30	0.4-3
สารชะล้าง						
โนนิลฟีนอล	0.60	0.26	0.01-4	0.43	0.41	0.1-0.8
2-บิวทอกซีเอทานอล	25	15	<0.001-270	15	17	<0.001-27

2.2 น้ำมันหล่อลื่น (lubricants)

น้ำมันหล่อลื่นมีสารประกอบหลักเป็นสารประกอบอะลิฟาติก เช่น พาราฟิน (paraffin), ไซโคลพาราฟิน (cycloparaffins) สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่เป็นพิษในน้ำมัน และโอเลฟิน (olefin) โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีคาร์บอน 25 ถึง 40 อะตอม คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่น คือ ระเหยกลายเป็นไอต่ำภายใต้สภาวะปกติ ละลายน้ำได้น้อย มีความคงทนต่อการบำบัดทั้งทางเคมี และทางชีวภาพ (Panpanit, 2001) มีความเป็นพิษ สามารถก่อการกลายพันธุ์ (mutation) และก่อมะเร็งได้ (Cerniglia, 1993)

2.2.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น

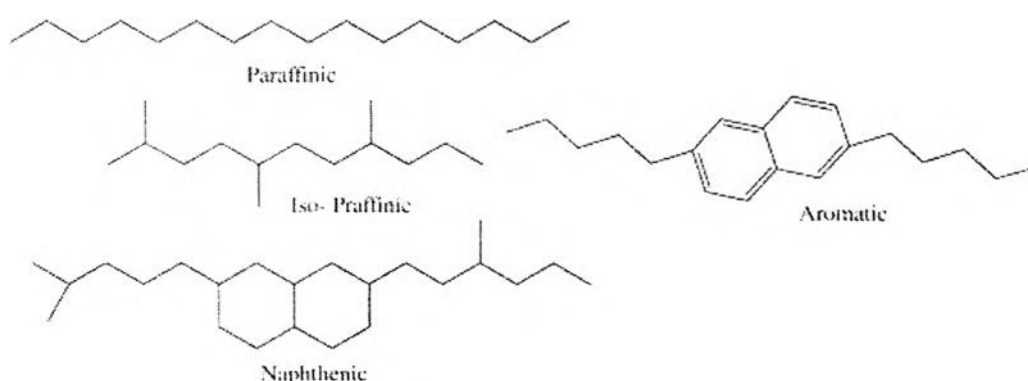
น้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยสารพื้นฐาน (base fluids) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีมากกว่า 95% ของน้ำหนักโดยเฉลี่ย และส่วนที่เหลือคือ สารเติมแต่ง (additives) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์แตกต่างกันตามสูตรของน้ำมันหล่อลื่น (Miang และ Dresel, 2007) โดยทั่วไปแล้ว น้ำมันหล่อลื่นจะมีอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบประมาณ 73-80% โมโนอะโรมาติกประมาณ 11-15% ไดอะโรมาติก 2-5% และพอลิอะโรมาติกกับส่วนที่มีซัลเฟอร์ประมาณ 4-8% ของน้ำหนักน้ำมัน (Vazquez-Duhalt, 1989) สารพื้นฐาน (base fluids) มาจาก 3 แหล่ง คือ ชีวภาพ (biological oil) ปิโตรเลียม (mineral oil) และสังเคราะห์ (synthetic oil) ซึ่งแต่ละแบบมีคุณสมบัติต่างกัน และเหมาะกับการใช้งานคนละแบบ เช่น ชีวภาพ เหมาะกับงานทางอาหาร และยา เป็นต้น (Stachowiak และ Batchelor, 2005)

2.2.1.1 สารพื้นฐาน

1) สารพื้นฐานปิโตรเลียม (mineral base fluids)

ผลิตได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (crude oil) ซึ่งเป็นของผสมที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ น้ำมันหล่อลื่นจะถูกกลั่นแยกออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 350-530 °C โดยกระบวนการผลิตจะแตกต่างกันตามคุณภาพของน้ำมันดิบ และคุณภาพของสารพื้นฐานที่ต้องการ (Mang และ Dresel, 2007; Pettersson, 2007) น้ำมันดิบมีองค์ประกอบแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งกำเนิด เช่น น้ำมันดิบจากอเมริกาใต้มักพบสารพวกแนฟทีน (naphthenic) ในขณะที่

น้ำมันดิบจากแถบตะวันออกกลาง มักพบสารที่มีโครงสร้างเป็นพาราฟิน (paraffinic) สารพื้นฐานแร่ธาตุ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามพันธะเคมีหลักที่พบในองค์ประกอบ ได้แก่ แนฟทีน อะโรมาติก และพาราฟิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่พบในสารหล่อลื่นพื้นฐาน (Pettersson, 2007)

2) สารพื้นฐานสังเคราะห์ (synthetic base fluids)

สารพื้นฐานสังเคราะห์นำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1931 หลังจากมีการค้นพบการสังเคราะห์โอเลฟินพอลิเมอร์ (synthetic polymerized olefins) สารพื้นฐานสังเคราะห์มีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้น้ำมันหล่อลื่นคือ พอลิแอลฟาโอเลฟิน (polyalphaolefin, PAO) และเอสเทอร์สังเคราะห์ (synthetic esters, SEs) ต่างๆ นอกจากนี้ ยังมีสารสังเคราะห์อีกหลายชนิดที่นำมาใช้น้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ พอลิแอลคิลีนไกลคอล (polyalkylene glycols, PAG), ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters) และพอลิไอโซบิวทิลีน (polyisobutylene, PIB)

ข้อดีอย่างหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ (synthetic lubricants) คือ ทราบองค์ประกอบที่แน่นอน ทำให้ควบคุมไม่ให้มีสารพอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polyaromatic hydrocarbon) ได้ ดังนั้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์สามารถได้รับการออกแบบ และผลิตให้มีคุณสมบัติตามต้องการได้ เช่น ย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ได้ง่าย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ จึงถูกนำไปใช้ในหลายรูปแบบเพิ่มมากขึ้น (Wright และ คณะ, 1993)

Stachowiak และ Batchelor (2005) ได้แบ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันออกเป็น 3 แบบ คือ

1. ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthetic hydrocarbon) ให้คุณสมบัติดีกว่าปิโตรเลียมในราคาเท่ากัน

2. ซิลิคอนอนาล็อกของไฮโดรคาร์บอน (silicon analogues of hydrocarbon) ทำให้น้ำมันหล่อลื่นทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และภาวะสูญญากาศ แต่ไม่ทนต่อแรงกดสูง และมีราคาแพง

3. ออกาโนฮาโลเจน (organohalogen) ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ทนต่อแรงกด และปฏิกิริยาเคมี แต่มีราคาแพง

3) เอสเทอร์สังเคราะห์ (synthetic esters)

เป็นกลุ่มสำคัญในไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์กับกรดอินทรีย์หรือกรดอนินทรีย์ ซึ่งในน้ำมันหล่อลื่นจะนิยมใช้กรดอินทรีย์ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทนต่อการออกซิเดชัน และอุณหภูมิสูง (Stachowiak และ Batchelor, 2005) เนื่องจาก เอสเทอร์สังเคราะห์ เกิดจากแอลกอฮอล์ และกรดไขมันซึ่งมีความหลากหลาย คุณสมบัติของเอสเทอร์สังเคราะห์ จึงมีความแตกต่างขึ้นกับผู้ผลิตที่ต้องการให้น้ำมันหล่อลื่นเหมาะกับงานประเภทต่างๆ นอกจากนี้เอสเทอร์สังเคราะห์ ยังไม่เป็นพิษ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี จึงมีความต้องการนำมาใช้ในน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น (Pettersson, 2007)

4) น้ำมันพืช (vegetable oils) (Pettersson, 2007)

น้ำมันพืชมีต้นทุนต่ำ ปัจจุบันยังคงใช้บ้างในผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น สีทาบ้าน และน้ำมันชักเงา

2.2.1.2 สารเติมแต่ง (additives)

สารเติมแต่ง คือ สารเคมีสังเคราะห์ที่เติมลงไปน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านกายภาพ และเคมีที่ต้องการ หรือลดคุณสมบัติที่ไม่ต้องการ ทำให้

น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Mang และ Dresel, 2007) สารเติมแต่งสามารถแบ่งได้หลายประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทของสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น (Vazquez-Duhalt, 1989)

ผลทางด้านเคมี	ผลทางด้านกายภาพ
สารเติมแต่งการเกาะติดผิว (Boundary lubrication additives)	สารปรับปรุงความหนืด (Viscosity modifiers)
สารยับยั้งการสึกหรอ (Wear inhibitors)	สารเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)
สารลดแรงเสียดทาน (Friction modifiers)	สารอุ้มน้ำมัน (Thickeners)
สารเพิ่มความหล่อลื่น (Lubricity agents)	สารช่วยลดจุดไหลเท (Pour point depressants)
สารรับแรงกดสูง (Extreme pressure agents)	สารช่วยให้น้ำมันเข้ากับน้ำ (Emulsion modifiers)
สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)	สารลดฟอง (Foam decomposers)
สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)	สารเพิ่มความเหนียว (Tackiness agents)
สารชะล้างเขม่า และสารช่วยย่อยเขม่า (Detergents and dispersants)	สีย้อม (Dyes)

ตัวอย่างสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ (Mang และ Dresel, 2007)

1. สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน เช่น สารประกอบออกาโนซัลเฟอร์ (organosulfur compounds) สารพวกอะโรมาติกเอมีน (aromatic amines) เป็นต้น
2. สารชะล้างเขม่า และสารช่วยย่อยเขม่า (detergents and dispersants) เช่น สารประกอบที่มีโลหะ (metal-containing compounds) ฟีนเตต (phenates) ซัลโฟเนต (sulfonates) เป็นต้น
3. สารยับยั้งการสึกหรอ (antiwear additives) เช่น สารประกอบจำพวก คลอรีน และซัลเฟอร์ (chlorine and sulfur compounds)
4. สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion inhibitors) เช่น ซัลโฟเนต (sulfonates) เป็นต้น
5. สารลดฟอง (antifoam agents) ซึ่งอาจมีหรือไม่มีซิลิคอนเป็นส่วนผสม เช่น พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxanes) เป็นต้น

โดยสารเติมแต่งอาจพบมากถึง 20% ในน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งสารที่สำคัญที่สุด ได้แก่ สารชะล้างเขม่า และสารช่วยย่อยเขม่า ซึ่งพบได้ประมาณ 2-15% ของน้ำหนักน้ำมันหล่อลื่น มีสารเติมแต่งหลายชนิด ที่ทราบกันดีว่ามีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compounds) เป็นต้น (Vazquez-Duhalt, 1989)

ปัญหาหลักของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารพื้นฐานปิโตรเลียมเป็นองค์ประกอบ คือ พอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polyaromatic hydrocarbon) ที่มีประมาณ 4-8% ซึ่งสารนี้เป็นสารก่อมะเร็ง (Wright และคณะ, 1993)

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ พบว่าสารเติมแต่งนี้คงทนต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพมากกว่าสารพื้นฐานในน้ำมัน นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จะมีระดับของพอลิไซคลิกอะโรมาติกสูงกว่าผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังนั้น น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงอาจมีความแตกต่างของสภาพรับไว้ได้ (susceptibility) ต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Powell และคณะ, 2005)

2.3 วิธีการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (นวลพรรณ ณ ระนอง และมงคล เพ็ญสายใจ, 2544)

- 1) การบำบัดขั้นต้น (primary treatment) เป็นการบำบัดสารแขวนลอย ของแข็งขนาดใหญ่ ด้วยการตกตะกอน และการกรอง
- 2) การบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปที่ละลายและไม่ละลายในน้ำเสีย และสารแขวนลอยขนาดเล็ก
- 3) การบำบัดขั้นที่สาม (tertiary treatment) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิด เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส สารพิษต่างๆ เช่น โลหะหนัก เป็นต้น

สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันก็มีขั้นตอนดังที่กล่าวมาเช่นกัน เริ่มจากการบำบัดขั้นต้น โดย gravity separator เพื่อแยกน้ำ และน้ำมันออกจากกัน แต่ขั้นตอนนี้จะมีประสิทธิภาพกับน้ำมันอิสระเท่านั้น และถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงโดยใช้เป็นระบบ corrugated plate interceptors (CPI) ซึ่งใช้แผ่น (plate) ที่ลาดเอียงอยู่ภายใน ช่วยให้น้ำมันรวมตัวกัน และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ แต่ก็ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ดีเมื่อใช้กับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน จึงมีการพัฒนาวิธีการบำบัดในขั้นที่สอง และขั้นที่สาม ดังนี้ (Panpanit, 2001)

1) การทำให้ตะกอนลอยด้วยการเป่าอากาศ (air flotation)

กระบวนการทำให้ตะกอนลอยการเป่าอากาศ ที่พบส่วนใหญ่แบ่งได้ 2 แบบ คือ การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF) และการทำให้ลอยด้วยอากาศ (Induced Air Flotation, IAF) ทั้งสองแบบมีหลักการคล้ายกัน คือ การให้ฟองอากาศเป็นตัวพา น้ำมัน และตะกอนต่างๆ ในน้ำ ลอยสู่ผิวหน้า แล้วจึงกวาดเอาตะกอนดังกล่าวออกจากระบบ (Tin และ Cheng, 1995) ต่างกันเล็กน้อยตรงที่ระบบ DAF ทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศละลาย ฟองอากาศจึงมีขนาดเล็ก และมีความดันมากกว่า (Alther, 1998)

บางครั้งอาจมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยเร่งการตกตะกอน เช่น ปูนขาว อะลูมิเนียมซัลเฟต เพอริกคลอไรด์ เป็นต้น ทำให้กระบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียเกิดขึ้น และใช้เวลา น้อยลง ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสีย คือ กากตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวกับสารก่อการจับก้อน (coagulant) จะกำจัดได้ยาก มีค่าลงทุน และค่าดูแลระบบสูง ควบคุมดูแลยาก ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการดูแลระบบ (Panpanit, 2001)

2) โคอะเลสเซอร์ (coalescer)

วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ต่ำ วิธีการคือ แยกน้ำเสียอิมัลชันซึ่งมีของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน โดยให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลาง เช่น ไฟเบอร์ น้ำมันจะถูกดักจับ ติดอยู่บนผิวของตัวกลาง เมื่อน้ำเสียไหลผ่านมากขึ้น น้ำมันที่ถูกดักจับ ก็จะมีมากขึ้น เกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นน้ำมันจะหลุดออกจากตัวกลาง และแยกออกจากน้ำ ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ หากปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solid) ความหนืดของน้ำมัน และความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของตัวกลางจะลดลง นอกจากนี้ ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบด้วย

3) การดูดซับ (adsorption)

เป็นขั้นตอนที่กำจัดน้ำมัน และอิมัลซิไฟเออร์ที่หลงเหลืออยู่ เป็นปรากฏการณ์ (phenomenon) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวที่ประจันกัน โดยน้ำมันจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ (adsorbent) แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นชั้นบางๆ กระบวนการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น แรงยึดติด

(adhesive force) ที่ยึดอนุภาคต่างชนิดกันไว้ด้วยกัน แรงเชื่อมแน่น (cohesive force) ที่ยึดอนุภาคชนิดเดียวกันไว้ด้วยกัน แรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrical force) และแรงตึงผิว (surface tension) เป็นต้น (Tin และ Cheng, 1995) แม้ว่า การใช้ตัวดูดซับจะเสียค่าลงทุนต่ำ แต่ตัวดูดซับจะทำงานได้ถึงจุดๆ หนึ่งเท่านั้น จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลง ต้องมีการเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ จึงเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบสูง และยากในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้เมื่อใช้น้ำเสียที่มีปริมาณน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวมาก ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง (Panpanit, 2001)

โดยทั่วไป การบำบัดน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมันมักพบระบบที่ใช้บ่อดักไขมัน (grease trap) ที่อาศัยแรงโน้มถ่วง โดยจะมีการพักน้ำเสียในบ่อดักไขมัน เพื่อให้ไขมันรวมตัวกันอยู่บนผิวน้ำ เมื่อปริมาณไขมัน และน้ำมันสะสมมากขึ้นต้องตักออกไปกำจัด จากนั้นจึงปล่อยน้ำเสียด้านล่างที่ปราศจากไขมันออกสู่สิ่งแวดล้อม (Jönsson และ Jönsson, 1995) บ่อดักไขมันนี้จะให้ประสิทธิภาพดีกับน้ำมันอิสระที่หยดน้ำมันมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 150 ไมโครเมตร (Tin และ Cheng, 1995) และตะกอนแขวนลอย แต่บ่อดักไขมันจะไม่สามารถกำจัดน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันระหว่างน้ำและน้ำมันได้ เนื่องจากน้ำมันในรูปนี้สามารถกระจายตัว และมีเสถียรภาพกว่าน้ำมันอิสระ (Alther, 1998) ดังนั้นการใช้บ่อดักไขมันจึงไม่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมันที่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน

2.4 การบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ (bioremediation)

หมายถึง การใช้จุลินทรีย์หรือกระบวนการที่เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์ เพื่อกำจัดหรือลดความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม (Boopathy, 2000) ซึ่งเกิดได้ทั้งภาวะที่มี และไม่มีอากาศ จุลินทรีย์จะใช้สารมลพิษนั้นเป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน โดยคาดว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารพิษได้อย่างสมบูรณ์ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Van Hamme และคณะ, 2003; Sarkar และคณะ, 2005)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพสามารถแบ่งประเภทได้ ดังนี้ (Perelo, 2010)

1) Natural Attenuation หรือ Monitored natural recovery (MNR) เป็นการปล่อยให้กระบวนการบำบัดเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยอาศัยจุลินทรีย์ในพื้นที่ร่วมกับกระบวนการทางกายภาพ และเคมี

2) Biostimulation คือ การเร่งความสามารถของจุลินทรีย์ในพื้นที่ โดยการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต และการเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์

3) Bioaugmentation คือ การเติมจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารปนเปื้อนนั่นลงไปในพื้นที่ โดยจุลินทรีย์อาจคัดแยกได้จากแหล่งปนเปื้อน หรือจากแหล่งอื่นที่พบว่า มีประสิทธิภาพ (Sarkar และคณะ, 2005)

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ

ประสิทธิภาพของการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ขึ้นกับ 1) ธรรมชาติของสารปนเปื้อน เช่น สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability) ของสาร 2) ภาวะแวดล้อม และ 3) ลักษณะของประชากรจุลินทรีย์ที่ปรากฏ (Van Hamme และคณะ, 2003) โดย Leahy และ Colwell (1990) ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนโดยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพไว้ ดังนี้

2.4.1.1 ปัจจัยทางกายภาพ และเคมี

1) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอน

โดยทั่วไป สารไฮโดรคาร์บอนกลุ่มต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปิโตรเลียมจะมีความแตกต่างของสภาพรับไว้ได้ต่อจุลินทรีย์น้อยลงตามลำดับ ดังนี้
แอลเคนไซตรง > แอลเคนไซกิ่ง > แอลคีนไซกิ่ง > แอลคิลอะโรมาติกมวลโมเลกุลต่ำ > โมโนอะโรมาติก > แอลเคนวงแหวน > พอลิไซคลิกอะโรมาติก >> แอสฟัลทีน สำหรับอัตราการย่อยสลายพบว่า แซททูเรท (saturates) มีอัตราถูกย่อยสลายสูงสุด รองลงมาคือ อะโรมาติกมวลโมเลกุลต่ำ และอะโรมาติกมวลโมเลกุลสูง ส่วนสารประกอบที่มีซัลฟิวร์มีอัตราการย่อยสลายต่ำมาก (Leahy และ Colwell, 1990)

2) ภาวะทางกายภาพของน้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอน

เมื่อมีการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่แหล่งน้ำ น้ำมันจะแผ่กระจาย และก่อตัวเป็นชั้นบางๆ ลมและคลื่นในสิ่งแวดล้อมก็อาจก่อให้เกิดอิมัลชันได้ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ช่วยเพิ่มการย่อยสลายน้ำมันของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามหากอิมัลชันรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มาก พื้นที่ผิวก็จะน้อยลงจุลินทรีย์จึงย่อยสลายได้ลดลงด้วย

3) ความเข้มข้นของน้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอน

อัตราการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น เว้นแต่อะโรมาติกมวลโมเลกุลสูงที่อัตราการย่อยสลายสัมพันธ์กับการละลายได้ในน้ำของสารมากกว่า น้ำมันที่มีความเข้มข้นสูงนั้น อาจก่อตัวเป็นชั้นหนา จำกัดการละลายของออกซิเจนสู่แหล่งน้ำ หรือสร้างภาวะไม่สมดุลของสารอาหารได้

4) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากไปมีผลต่อลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำมัน อัตราเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ และองค์ประกอบในกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ โดยทั่วไป การย่อยสลายทางชีวภาพจะมีอัตราลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากการลดลงของแอกทิวิตีของเอนไซม์ และแม้ว่าอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้น แต่ก็มีขีดจำกัดเช่นกัน

5) ออกซิเจน

ขั้นแรกของการย่อยสลายสารอะลิฟาติก และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยแบคทีเรีย และรา คือ การออกซิไดส์สารดังกล่าวโดยเอนไซม์ตระกูลออกซิจีเนส (oxygenases) ซึ่งต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยา ดังนั้น ภาวะมีอากาศ (aerobic conditions) จึงสำคัญต่อการออกซิเดชันไฮโดรคาร์บอนของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม มีรายงานเกี่ยวกับการย่อยสลายภายใต้ภาวะไร้อากาศแต่เกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำมาก

6) สารอาหาร

การมีไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารอินทรีย์ต่ำ มักจะก่อให้เกิดภาวะไม่สมดุลของสารอาหาร จึงต้องมีการปรับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ด้วยการเติมไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในรูปแบบต่างๆ เพื่อไปกระตุ้นการย่อยสลายของจุลินทรีย์

7) ความเป็นกรด-ด่าง

แบคทีเรียที่ได้อาหารจากสารอินทรีย์ (Heterotrophic bacteria) และราชอบความเป็นกรด-ด่างที่ใกล้เคียงความเป็นกลาง โดยราจะมีความทนต่อภาวะที่เป็นกรดมากกว่าความเป็นกรด-ด่างที่สุดขีด จะส่งผลด้านลบต่อการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน

2.4.1.2 ปัจจัยทางชีวภาพ

การสัมผัสน้ำมันของจุลินทรีย์ ไม่ว่าจะเป็นการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ หรือการมีอยู่แล้วตามธรรมชาติ จะส่งผลให้จุลินทรีย์มีการปรับตัว โดยเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์ไฮโดรคาร์บอนได้ นี่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้ว่าน้ำมันที่ปนเปื้อนนั้น จะถูกย่อยสลายได้เร็วเพียงใด การปรับตัวของจุลินทรีย์อาจเกิดจาก

1. การชักนำให้เกิด หรือการกดไม่ให้เกิดเอนไซม์
2. การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ส่งผลให้เกิดความสามารถในการย่อยสลายแบบใหม่ได้
3. การคัดเลือกตามธรรมชาติ ทำให้จุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนเท่านั้นที่อยู่รอดได้

นอกจากนี้ พลาสมิดก็อาจมีความสำคัญต่อปรับตัวทางพันธุกรรม เนื่องจากสามารถเคลื่อนเข้าสู่จุลินทรีย์ได้ ก่อให้เกิดความสามารถในการย่อยสลายสารปนเปื้อนในสายพันธุ์นั้นได้

2.4.2 ข้อดีของการบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ

ข้อดีของการบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ คือ เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีอื่น สร้างความเสียหายให้กับพื้นที่ต่ำ กำจัดสารมลพิษได้อย่างสมบูรณ์ ถาวร และใช้ในระยะเวลาได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับวิธีการบำบัดแบบกายภาพ และเคมีได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีข้อจำกัดเช่นกัน นั่นคือ กระบวนการบำบัดอาจใช้เวลานาน และคาดการณ์ได้ยาก นอกจากนี้ สารบางชนิดไม่สามารถกำจัดโดยวิธีนี้ได้ เช่น โลหะหนัก สารกัมมันตรังสี (radionuclide) สารประกอบคลอรีนบางชนิด และบางครั้งกระบวนการย่อยสลายสารก็สร้างสารเมแทบอลิต์ที่เป็นพิษขึ้นมา การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นวิธีที่เหมาะสมกับบางสถานที่เท่านั้น ดังนั้น จึงต้องมีการทำการทดลองก่อนจะใช้กับสถานที่จริง เพื่อตอบคำถามบางประการก่อน เช่น สารนั้นย่อยสลายทางชีวภาพได้หรือไม่ การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดได้ตามธรรมชาติหรือไม่ สภาพแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อการย่อยสลายทางชีวภาพหรือไม่ เป็นต้น (Boopathy, 2000; Perelo, 2010)

2.5 การย่อยสลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนโดยจุลินทรีย์

จากรายงานที่ผ่านมา พบจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน
ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนได้

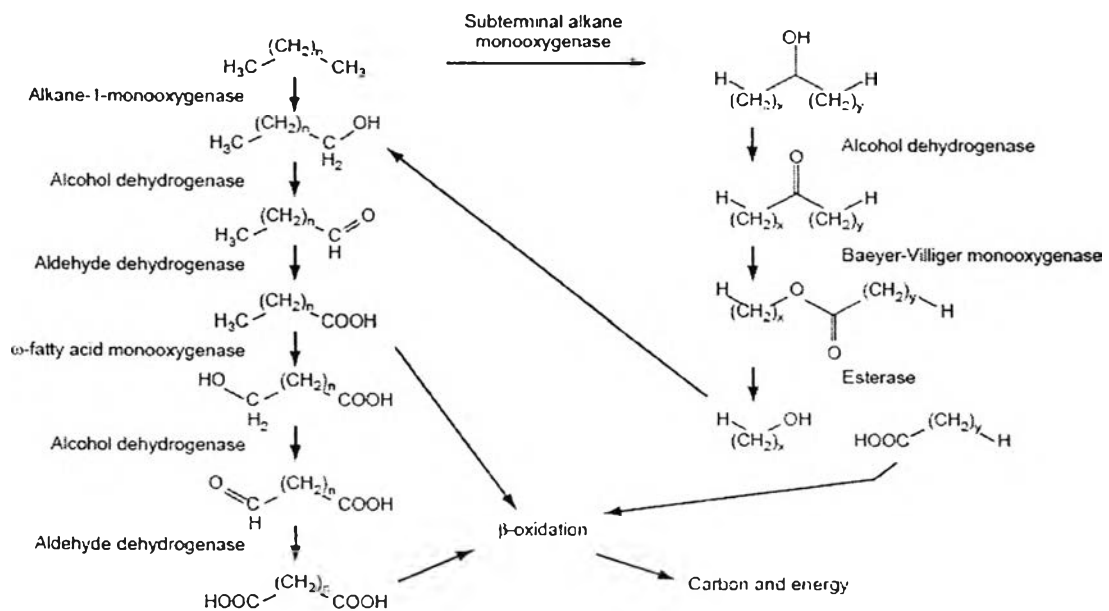
จุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
แบคทีเรีย	
<i>Pseudomonas putida</i> PB4	Nakamura และคณะ, 1996
<i>Achromobacter anthropi</i>	Richard และ Vogel, 1999
<i>Acinetobacter</i> sp.	Koma และคณะ, 2001
<i>Corynebacterium</i> sp.	Rahman และคณะ, 2002
<i>Nocardia</i> sp.	Jirasripongpun, 2002
<i>Cycloclasticus pugetii</i>	Maruyama และคณะ, 2003
<i>Brevundimonas</i> sp. HU2	นภดล สว่างนาวิณ, 2547
<i>Bacillus</i> sp. 113i	Ghazali และคณะ, 2004
<i>Micrococcus</i> sp.	Ghazali และคณะ, 2004
<i>Pseudomonas</i> sp.	Radwan และคณะ, 2005
<i>Flavobacterium</i> sp.	Lu และคณะ, 2006
<i>Rhodococcus</i> sp.	Lu และคณะ, 2006
ยีสต์	
<i>Candida</i> sp.	Okpokwasili และ Amanchukwu, 1988; Ekundayo และ Obuekwe, 2000
<i>Endomycopsis</i> sp.	Ekundayo และ Obuekwe, 2000
<i>Debaryomyces</i> sp.	Jirasripongpun, 2002
รา	
<i>Penicillium</i> sp.	Kim และ Lee, 2007

น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นของผสมที่ซับซ้อนของสารไฮโดรคาร์บอนหลาย
ชนิด เช่น แอลเคนแบบโซ่ตรง โซ่กิ่ง อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน รวมถึงสารประกอบโลหะอินทรีย์ ที่

มีนิกเกิล และวานาเดียมเป็นหมู่แทนที่ เป็นต้น (Atlas, 1981; Van Hamme และคณะ, 2003) ดังนั้น วิธีการย่อยสลายมีความแตกต่างกันตามสารที่เป็นองค์ประกอบ

2.5.1 วิธีการย่อยสลายสารอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโดยแบคทีเรีย

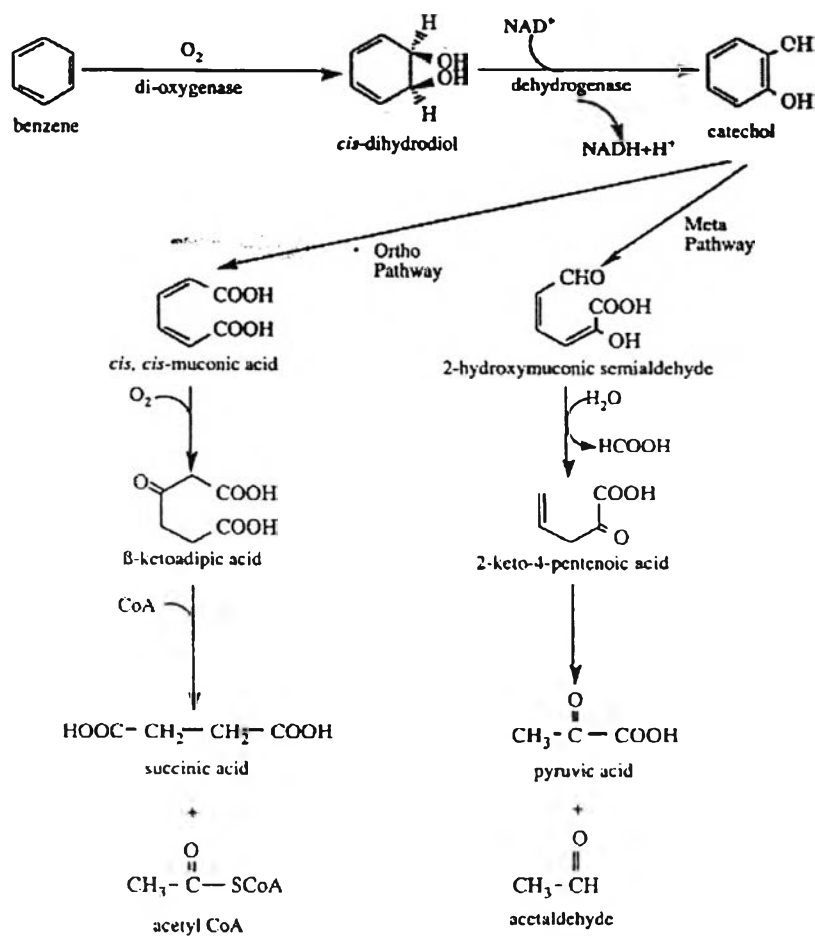
กระบวนการย่อยสลายแอลเคนโดยแบคทีเรีย (รูปที่ 2.2) เริ่มต้นจากการเติมออกซิเจนที่ตำแหน่งปลาย (terminal) หรือตำแหน่งถัดจากปลาย (subterminal) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลกอฮอล์ โดยอาศัยเอนไซม์แอลเคนโมโนออกซิจีเนส (*n*-alkane monooxygenase) จากนั้น จะเปลี่ยนเป็นแอลดีไฮด์โดยเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase) และแอลดีไฮด์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันโดยเอนไซม์แอลดีไฮด์ดีไฮโดรจีเนส (aldehyde dehydrogenase) แล้วเข้าสู่วัฏจักรเบตาออกซิเดชัน (β -oxidation cycle) ต่อไป เกิดการย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลเซลล์ (Van beilen และคณะ, 2003; Fritsche และ Hofrichter, 2008)



รูปที่ 2.2 วิธีการย่อยสลายสารอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโดยแบคทีเรีย (Van beilen และคณะ, 2003)

2.5.2 วิธีการย่อยสลายสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยแบคทีเรีย

ขั้นแรกของการย่อยสลายสารกลุ่มอะโรมาติกโดยแบคทีเรีย คือ การเติมออกซิเจนแก่คาร์บอนอะตอมในวงเบนซีน โดยเอนไซม์ไดออกซิจีเนส (dioxygenase) ได้เป็น ซิส-ไดไฮโดรไดอล (*cis*-dihydrodiol) จากนั้น จะถูกย่อยสลายต่อได้เป็นคาทีคอล (catechol) โดยเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส ซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการแตกวงอะโรมาติก ที่เกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือวิธีเมตา (*meta* pathway) และวิธีออร์โธ (*ortho* pathway) แล้วเข้าสู่ TCA-cycle ต่อไป (Juhasz และ Naidu, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วิธีการย่อยสลายสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยแบคทีเรีย (Juhasz และ Naidu, 2000)

การย่อยสลายสารที่มีองค์ประกอบซับซ้อนให้ได้สมบูรณ์ ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของ จุลินทรีย์มากกว่าหนึ่งชนิด เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถย่อยสลายสารได้อย่างจำกัด ดังนั้นการใช้กลุ่มจุลินทรีย์ซึ่งมีเอนไซม์หลากหลายจึงช่วยเพิ่มอัตรา และขอบเขตของการย่อยสลายได้ ความสามารถที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจเกิดจากการทำงานเสริมกันของจุลินทรีย์ภายในกลุ่ม เป็นไปได้ว่าจุลินทรีย์ในกลุ่มช่วยกำจัดสารมัธยันตร์ที่อาจขัดขวางกิจกรรมของจุลินทรีย์อื่น หรือ จุลินทรีย์ชนิดที่ 2 สามารถย่อยสลายสารที่จุลินทรีย์ชนิดที่ 1 ย่อยได้บางส่วน (Ghazali และคณะ, 2004) โดยส่วนใหญ่ จุลินทรีย์ที่มาจากบริเวณที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเป็นเวลานานจะมีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีกว่า (Braddock และคณะ, 1995)

Nakamura และคณะ (1996) นำจุลินทรีย์ 4 ชนิดมาสร้างเป็นกลุ่มจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลาย น้ำมันดิบอะราเบียเนียนชนิดเบา (Arabian light crude oil) ได้แก่ *Acinetobacter* sp. T4 และ *Rhodococcus* sp. PR4 ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายแอลเคนหลายชนิด *Pseudomonas putida* PB4 ย่อยสลายเบนซีน และแอลคิลเบนซีนได้ และ *Sphingomonas* sp. AJ1 ที่มีความสามารถในการย่อยสลายแนพทาลีน และพีแนทรีน พบว่ากลุ่มจุลินทรีย์สามารถย่อยสลาย ส่วนแซททูเรท และอะโรมาติกได้ 40% และ 21% ตามลำดับ โดย *Acinetobacter* sp. T4 และ *Pseudomonas putida* PB4 มีการเจริญอย่างชัดเจนต่างจาก 2 ชนิดที่เหลือ เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มจุลินทรีย์ที่มี 4 ชนิดกับกลุ่มจุลินทรีย์ที่ประกอบด้วย *Acinetobacter* sp. T4 และ *Pseudomonas putida* PB4 พบว่ามีการย่อยสลายใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยกล่าวว่า *Acinetobacter* sp. T4 จะย่อยสลายแอลเคน และสารไฮโดรคาร์บอน ได้สารที่ *Pseudomonas putida* PB4 นำไปใช้ในการเจริญ และย่อยสลายส่วนอะโรมาติกต่อไป

Richard และ Vogel (1999) คัดแยกกลุ่มจุลินทรีย์จากดินที่ปนเปื้อนตัวทำละลายในสีทาบ้าน นำมาทดสอบการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ พบว่ากลุ่มจุลินทรีย์ประกอบด้วย แบคทีเรีย 7 ชนิด โดยมีเพียง 3 ชนิดที่ชอบย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน อีก 4 ชนิดที่เหลือพบว่า ไม่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนใดๆ ที่นำมาทดสอบ กลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วยแบคทีเรียในสกุล *Pseudomonas* sp. และ *Achromobacter* sp. จากนั้นผู้วิจัยได้เปรียบเทียบการย่อยสลายน้ำมันดีเซลในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวระหว่างกลุ่มแบคทีเรีย และแบคทีเรียบริสุทธิ์ พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 50 วัน กลุ่มแบคทีเรียย่อยสลายน้ำมันดีเซลได้ถึง 90% ซึ่งสูงกว่าแบคทีเรียบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังพบว่า แบคทีเรียที่ไม่ย่อยไฮโดรคาร์บอนสามารถเจริญได้ อาจเป็นไปได้ว่าแบคทีเรียเหล่านี้ ใช้สารมัธยันตร์จากการย่อยสลายของแบคทีเรียกลุ่มแรกในการเจริญ ผู้วิจัยจึงสร้างกลุ่มแบคทีเรียขึ้นใหม่ซึ่งมีเฉพาะแบคทีเรีย 3 ชนิดที่ชอบย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน แล้วเปรียบเทียบการย่อยสลายน้ำมันดีเซลในดินกับกลุ่มแบคทีเรียเดิม และ

แบคทีเรียบริสุทธิ์ 3 ชนิด พบว่ากลุ่มแบคทีเรียเดิมมีอัตราการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า ซึ่งให้เห็นว่าการมีแบคทีเรียเหล่านี้ช่วยให้การย่อยสลายเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

Zouboulis และ Avranas (2000) ทดลองบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน ด้วยวิธีการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารเคมีที่ช่วยให้ตะกอนจับตัวกันได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากออกเทน จากนั้น ได้แปรผันปัจจัยต่างๆ ในระหว่างทดลอง เช่น การเติมทวิน-80 ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของอิมัลชัน เป็นต้น พบว่า ในภาวะที่มีความเหมาะสม ระบบนี้สามารถกำจัดน้ำมันได้มากกว่า 95% โดยความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น คือ 500 มก.ต่อลิตร

Rahman และคณะ (2002) ได้คัดแยกแบคทีเรียจากดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงบริเวณสถานีบริการน้ำมันโดยใช้น้ำมันดิบเป็นแหล่งคาร์บอน พบแบคทีเรียที่ย่อยสลายน้ำมันดิบจำนวนมาก แต่นำแบคทีเรีย 5 ชนิดที่ย่อยสลายได้สูงสุดมาเตรียมเป็นกลุ่มแบคทีเรีย ประกอบด้วยแบคทีเรียในสกุล *Micrococcus* sp. *Bacillus* sp. *Corynebacterium* sp. *Flavobacterium* sp. และ *Pseudomonas* sp. และเปรียบเทียบการย่อยสลายน้ำมันดิบในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวที่ความเข้มข้นต่างๆ กับแบคทีเรียบริสุทธิ์ พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 20 วัน กลุ่มแบคทีเรียย่อยสลายน้ำมันดิบได้ดีกว่าแบคทีเรียบริสุทธิ์ที่ทุกความเข้มข้น โดยย่อยสลายได้ถึง 78% ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 1% (ปริมาตรต่อปริมาตร) ภาวะที่เกิดการย่อยสลายสูงสุด คือ ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 1% ความเป็นกรด-ด่าง 7.5 และอุณหภูมิ 30 °ซ

Ghazali และคณะ (2004) ศึกษาการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในดินที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 3 และ 6 สายพันธุ์ ตามลำดับ พบว่า จุลินทรีย์กลุ่มที่ 2 สามารถลดปริมาณของแอลเคนไฮยาวได้ดีกว่ากลุ่มที่ 1 ทั้งในดินที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น

ทิมากร แสงดำ (2547) คัดแยกกลุ่มแบคทีเรีย STK จากปุ๋ยหมักใบมะขามโดยใช้ไพรีนเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า แบคทีเรียกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายไพรีน และยังสามารถย่อยสลายพีแนนทริน อะซีแนพริลีน ไดเบนซิฟิวแรน อะซีแนพริน นอกจากนี้ เมื่อเติมน้ำมันดีเซลลงไปเป็นซับสเตรทร่วมในอาหารเลี้ยงเชื้อ กลุ่มแบคทีเรียสามารถย่อยสลายเบนโซ [เอ] ไพรีนได้ กลุ่มแบคทีเรียประกอบด้วย *Zoogloea* sp. *Stenotrophomonas* sp. และ *Mesorhizobium* sp. ซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิกสูงทั้งสามสายพันธุ์

Lu และคณะ (2006) คัดแยกแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายน้ำมันเชื้อเพลิงจากดินที่อยู่ใกล้กับสถานีบริการน้ำมัน ประกอบด้วยแบคทีเรีย 3 สกุล ได้แก่ *Pseudomonas* sp.

Flavobacterium sp. และ *Rhodococcus* sp. โดยพบว่ากลุ่มแบคทีเรียนี้สามารถย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้หลายชนิด ได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซล เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน ซึ่งกลุ่มแบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีกว่าแบคทีเรียเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ *Pseudomonas* sp. สามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวได้อีกด้วย

Lee และคณะ (2007) ศึกษาการประสิทธิผลของยอยสลายน้ำมันหล่อลื่นในดินที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่างกัน โดยติดตามจากปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ลดลง จำนวน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สัมพันธ์กับการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ คาทาเลส และดีไฮโดรจีเนสแอกทิวิตี เมื่อเวลาผ่านไป 105 วัน พบว่า การเติมสารอาหารในดิน จะเกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารเพิ่ม คือ จากไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้นประมาณ 9,320 มก.ต่อกิโลกรัมของดิน ลดลงไป 42-51% ขณะที่ไม่เติมสารอาหารลดลง 18% เท่านั้น โดยเกิดการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนได้สูงสุดที่อัตราส่วนของ C : N : P เป็น 500 : 10 : 1

Vieira และคณะ (2007) ศึกษาการย่อยสลายน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันดีเซล และน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้จุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากตะกอนของทะเลสาบซึ่งมีการปล่อยน้ำที่มีน้ำมันปนเปื้อนลงไป จุลินทรีย์กลุ่มแรกได้จากผิวหน้าของก้นทะเลสาบ ขณะที่อีกกลุ่มได้จากระดับต่ำกว่าก้นทะเลสาบ 1 ฟุต ผู้วิจัยมุ่งศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมัน ไนโตรเจน และชนิดของจุลินทรีย์ ผลการศึกษาพบว่า จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มสามารถย่อยสลายน้ำมันได้ที่หลายความเข้มข้น โดยจุลินทรีย์กลุ่มแรกมีความสามารถในการย่อยสลายมากกว่า เนื่องจาก ได้สัมผัสกับน้ำมันที่มีความเข้มข้นมากกว่า จุลินทรีย์จึงมีการปรับตัวได้ดีกว่า จุลินทรีย์กลุ่มแรกประกอบด้วยแบคทีเรียในสกุล *Pseudomonas* sp. *Serratia* sp. *Klebsiella* sp. และ *Bacillus* sp. ภาวะที่เกิดการย่อยสลายดีที่สุดคือที่ปริมาณน้ำมัน 4% (ปริมาตรต่อปริมาตร) ไนโตรเจน 550 มก.ต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 49 วัน ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนลดลงถึง 90%