

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รถจักรยานยนต์

คำจำกัดความของรถจักรยานยนต์ คือ พาหนะที่ถูกออกแบบให้ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ และเคลื่อนที่ไปด้วยล้อที่สัมผัสพื้นผิวทางจำนวนไม่เกิน 3 ล้อ โดยมีน้ำหนักไม่เกิน 680 กิโลกรัม โดยทั่วไปสามารถจำแนกรถจักรยานยนต์ตามขนาดของเครื่องยนต์ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ขนาดเล็ก มีกระบอกสูบตั้งแต่ 50 ถึง 169 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ขนาดกลาง มีกระบอกสูบตั้งแต่ 170 ถึง 279 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ขนาดใหญ่ มีกระบอกสู่มากกว่า 280 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ซึ่งแต่ละขนาดสามารถจำแนกตามชนิดของเครื่องยนต์ออกได้อีกเป็น เครื่องยนต์ 2 จังหวะ และเครื่องยนต์ 4 จังหวะ สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในรถจักรยานยนต์นั้นเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบที่ใช้หัวเทียนช่วยในการจุดระเบิด

2.1.1 ชนิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1. แบบโรตารี หรือที่เรียกกันว่า เครื่อง Wankel ซึ่งมีสูบเป็นรูปสามเหลี่ยม และเสื่อสูบเป็นรูป Epitrocloid การเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ เพราะเชื้อเพลิงที่เผาไหม้เป็น fluidized เนื่องจากการหมุนของ Rotor รูปร่างและปริมาตรของสูบจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การสันดาปเริ่มที่หัวเทียนและลามไปจนนำหน้าส่วนผสมที่ยังไม่ได้จุด แล้วจะลามย้อนกลับมาหาเปลวที่จุดแล้ว แม้จะพยายามใช้หัวเทียน 2 หัวแล้ว ก็ยังไม่สามารถปรับปรุงการสันดาปให้สมบูรณ์ได้ เป็นเหตุให้เกิดสารมลพิษ เช่น HC และ CO มาก สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง แต่ค่า NO_x ต่ำ ปัจจุบันอยู่ระหว่างการพัฒนาทั้งความคงทนของเครื่องยนต์ การกินน้ำมันเชื้อเพลิง และการควบคุมมลพิษ

2. แบบลูกสูบ เป็นแบบที่นิยมใช้กัน มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ กระบอกสูบ ลูกสูบ ก้านสูบ ข้อเหวี่ยงและอื่นๆ ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนมีหน้าที่และความสำคัญต่างกัน

เครื่องยนต์แบบลูกสูบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เครื่องยนต์แบบ SI (Spark Ignition) คือ เครื่องยนต์ที่มีหัวเทียนช่วยในการจุดระเบิด และใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง จึงมักเรียกกันว่า “เครื่องยนต์เบนซิน”

2. เครื่องยนต์แบบ CI (Compression Ignition) คือ เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยตัวเอง มีบี้มและหัวฉีดช่วยในการฉีดน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้ และใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง จึงมักเรียกกันว่า “เครื่องยนต์ดีเซล”

ความแตกต่างของเครื่องยนต์ทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างเครื่องยนต์แบบ SI และ CI (พูลพร, 2537)

เครื่องยนต์แบบ SI	เครื่องยนต์แบบ CI
1. ใช้น้ำมันก๊าดโซลีน (เบนซิน)	1. ใช้น้ำมันดีเซล
2. C.R. ต่ำ ประมาณ 6-11	2. C.R. สูง ประมาณ 11-20
3. ใช้หัวเทียนช่วยในการจุดไฟ	3. ติดไฟเองเนื่องจากการอัดตัวของอากาศในกระบอกสูบ
4. มีคาร์บูเรเตอร์ช่วยผสมอากาศให้เป็นสัดส่วนกับน้ำมันตามที่เครื่องต้องการ (ปัจจุบันอาจใช้บี้มและหัวฉีด)	4. มีบี้มและหัวฉีด เพื่อฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยเข้ากระบอกสูบ
5. ดูดสารผสมในจังหวะดูด	5. ดูดอากาศอย่างเดียว
6. น้ำหนักเบากว่า	6. น้ำหนักมากกว่า และแข็งแรงกว่า
7. เชื้อเพลิงราคาแพง	7. เชื้อเพลิงราคาถูก
8. ต้นทุนถูก	8. ต้นทุนแพงกว่ามาก
9. ใช้เมื่อต้องการกำลังน้อย	9. ใช้ตลอดเวลาและต้องการกำลังมาก
10. ค่าบำรุงรักษาถูกกว่า	10. ค่าบำรุงรักษาแพงกว่า

2.1.2 วัฏจักรของเครื่องยนต์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. เครื่องยนต์ 4 จังหวะ โดยมีจังหวะการทำงานดังนี้

1. **ดูด** (Induction) สมมติให้ลูกสูบอยู่ที่ TDC (Top Dead Center) ในจังหวะดูดลูกสูบจะเคลื่อนที่จาก TDC ลงมา BDC (Bottom Dead Center) เป็น 1 จังหวะ แล้ววาล์วไอดีก็จะเปิด จะสังเกตเห็นว่า เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ 1 จังหวะนั้น ข้อเหวี่ยงหมุนไปครึ่งรอบเท่านั้น

2. **อัด** (Compression) ลูกสูบเคลื่อนที่จาก BDC ไป TDC ทำให้การผสมในกระบอกสูบถูกอัดตัว ความดันและอุณหภูมิในจังหวะนี้จึงสูงขึ้นเรื่อยๆจนเกือบจะถึง TDC ประกายไฟจากหัวเทียนก็จะจุดไฟทันที

3. ระเบิด (Power หรือ Expansion) หลังจากหัวเทียนจุดไฟแล้ว ก็จะเกิดการสันดาปของเชื้อเพลิงกับอากาศ ก๊าซจะขยายตัวดันลูกสูบจาก TDC ลงมา BDC เป็นจังหวะที่ได้พลังงานกลมา

4. คาย (Exhaust) เมื่อได้พลังงานมาใช้แล้ว ก่อนที่จะเริ่มวัฏจักรใหม่ต้องไล่ไอเสียในกระบอกสูบออกเสียก่อน มิฉะนั้นจะไม่มีที่สำหรับไอดีเข้ามา ในจังหวะนี้จึงต้องเปิดวาล์วไอเสีย ลูกสูบจะเคลื่อนที่จาก BDC ถึง TDC เอาไอเสียออกไปตามท่อไอเสีย

จากจังหวะการทำงานดังอธิบายข้างต้น จะเห็นว่าการทำงานครบ 1 วัฏจักรของเครื่องยนต์ ลูกสูบต้องเคลื่อนที่ขึ้นลง 4 จังหวะด้วยกัน ในขณะที่ข้อเหวี่ยงจะหมุน 2 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

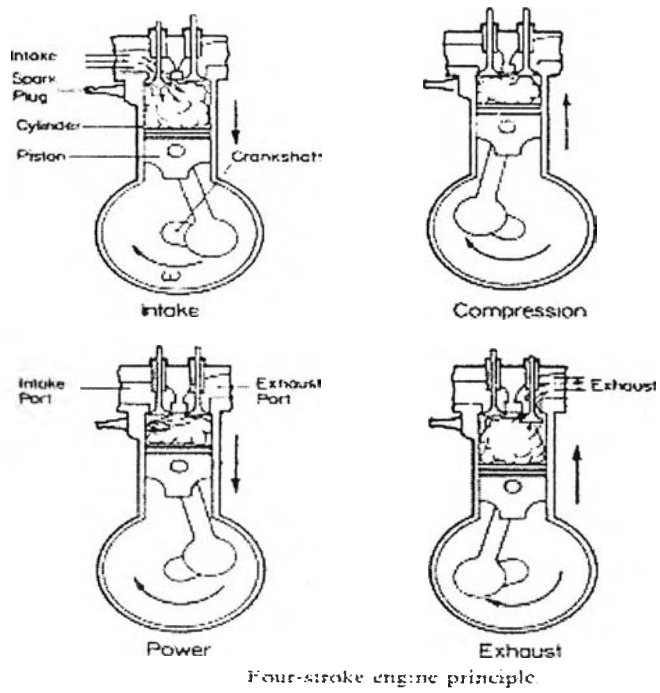
ข. เครื่องยนต์ 2 จังหวะ

การทำงานของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ ก็มีการดูดอัด ระเบิด และคายเช่นกัน โดยมีจังหวะการทำงานดังนี้ สมมติให้ลูกสูบอยู่ที่ BDC จะเป็นการเปิดช่องไอดี ซึ่งไอดีจะถูกดูดเข้าไปในกระบอกสูบ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นไปเล็กน้อยยังไม่ถึง 1 จังหวะก็จะปิดช่องไอดี และลูกสูบจะเคลื่อนที่ต่อไป ก็จะเป็นจังหวะอัด ในจังหวะของการอัดนี้ จะเปิดช่องไอดีในตอนล่างของลูกสูบ ดูดไอดีเข้าไปในห้องข้อเหวี่ยง ลูกสูบจะเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อยๆจนถึง TDC จะเห็นว่าใน 1 จังหวะจะทำหน้าที่ทั้งดูดและอัด เมื่อถึง TDC แล้วในเครื่อง SI หัวเทียนก็จะช่วยจุดระเบิด ในเครื่อง CI หัวฉีดก็จะฉีดน้ำมันเข้ามา แล้วก็จุดระเบิด ลูกสูบจะเคลื่อนที่ลงมา ซึ่งเป็นจังหวะระเบิดและได้กำลังมาใช้ พอเคลื่อนที่ลงมาอีกเล็กน้อยก็จะเปิดช่องไอเสีย ไอเสียก็จะระบายออกไป ในขณะที่ไอเสียระบายออกเกือบหมดนั้นก็เปิดช่องไอดีที่กำลังอัดอยู่ในห้องข้อเหวี่ยงเข้าห้องเผาไหม้ จะเห็นว่าในการดูดและอัดนั้น เครื่องยนต์ 2 จังหวะใช้เวลาเพียง 1 จังหวะ ข้อเหวี่ยงหมุนไป $\frac{1}{2}$ รอบ รวมเป็น 2 จังหวะ 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

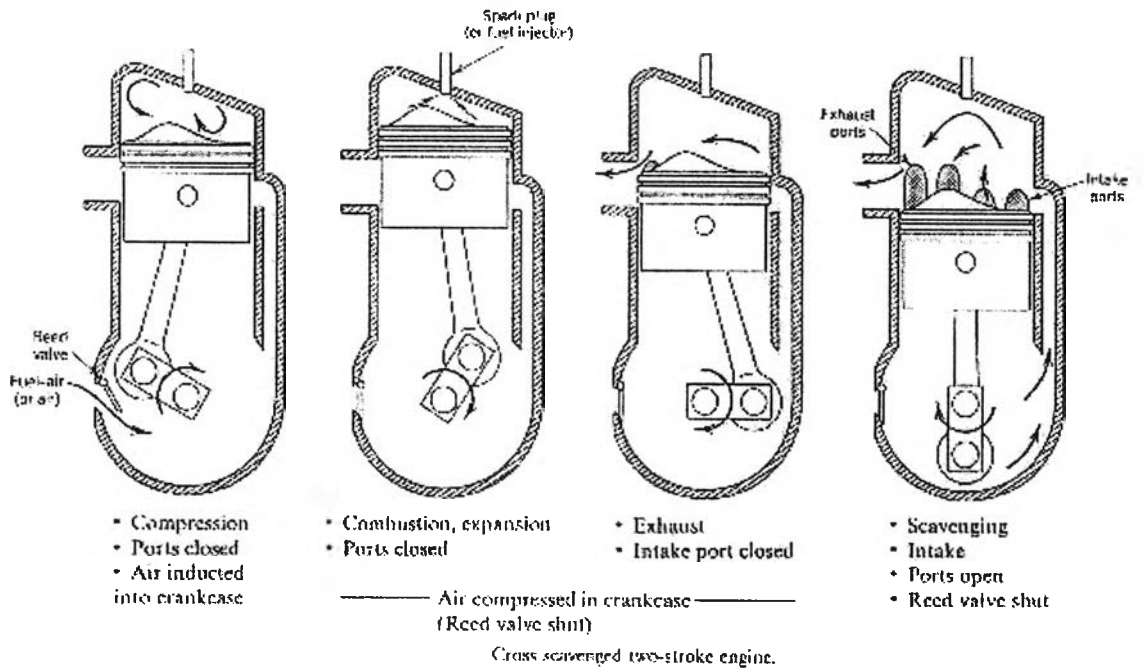
จากการทำงานของเครื่องยนต์ 2 จังหวะดังอธิบายข้างต้น จะเห็นว่ามีโอกาสที่ไอดีบางส่วนจะไหลออกทางช่องไอเสียในช่วงสุดท้ายก่อนที่ลิ้นไอเสียจะปิด ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกทางท่อไอเสียประกอบด้วยส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง จึงมีไฮโดรคาร์บอนที่ปล่อยออกมาพร้อมกับไอเสียเป็นจำนวนมาก

2.1.3 ระบบหล่อลื่น

ระบบหล่อลื่นของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ จะแตกต่างจากระบบหล่อลื่นของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ โดยสิ้นเชิง โดยระบบหล่อลื่นแบบ 4 จังหวะ น้ำมันหล่อลื่นจะถูกเก็บไว้ในอ่างน้ำมัน



ภาพที่ 2.1 การทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ



ภาพที่ 2.2 การทำงานของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ

หล่อลื่นซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างของเพลลาข้อเหวี่ยง (Oil Sump) ขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน น้ำมันหล่อลื่นจะถูกปั๊มส่งไปหล่อลื่นชิ้นส่วนที่ต้องการหล่อลื่น และไหลกลับมารวมกันที่อ่างน้ำมันหล่อลื่นเป็นวัฏจักร และเมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งน้ำมันหล่อลื่นจะเสื่อมคุณภาพ จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายตามกำหนด

สำหรับระบบหล่อลื่นแบบ 2 จังหวะนั้น เป็นไปแบบ Dry Sump คือ อ่างน้ำมันหล่อลื่นจะไม่มีน้ำมันหล่อลื่นอยู่เลย เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นจะแยกไว้ในถังต่างหาก และจะถูกฉีดไปผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงในคาร์บูเรเตอร์ในสัดส่วนที่เหมาะสม และถูกดูดเข้าไปสำรองไว้ในห้องเพลลาข้อเหวี่ยงเพื่อรอการส่งผ่านไปยังห้องเผาไหม้ทาง Transfer Port เพื่อทำการเผาไหม้ต่อไป

กระบวนการหล่อลื่น จะเป็นไปดังนี้ เมื่อส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นถูกผสมกับอากาศในคาร์บูเรเตอร์แล้ว จะถูกดูดเข้าไปเก็บไว้ในห้องเพลลาข้อเหวี่ยงในจังหวะที่ลูกสูบเลื่อนขึ้น (จังหวะดูดและจังหวะอัด) ในช่วงนี้น้ำมันหล่อลื่นที่เป็นละอองอยู่ก็จะจับเป็นฟิล์มบริเวณผิวของชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวต่างๆ ซึ่งคือลักษณะการหล่อลื่นในส่วนของห้องเพลลาข้อเหวี่ยง และเมื่อลูกสูบเลื่อนลง (จังหวะกำลังและจังหวะคายไอเสีย) ส่วนผสมซึ่งอยู่ในห้องเพลลาข้อเหวี่ยงก็จะถูกอัดผ่าน Transfer Port เข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งละอองของน้ำมันหล่อลื่นก็จะทำหน้าที่หล่อลื่นผนังกระบอกสูบและแหวน ก่อนที่หัวเทียนจะจุดระเบิดเพื่อเผาไหม้ส่วนผสมทั้งหมด (อากาศ/เชื้อเพลิง/น้ำมันหล่อลื่น) และไล่ไอเสียออกไปทางช่อง ไอเสียซึ่งจะสังเกตเห็นว่าน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะจะถูกฉีดเข้าไปหล่อลื่น และถูกเผาไหม้ไปกับเชื้อเพลิงทุกจังหวะของการเผาไหม้ จึงมักเรียก ระบบหล่อลื่น 2 จังหวะนี้ว่า ออโต้ลูบ (Auto Lube) ซึ่งระบบหล่อลื่นแบบ 2 จังหวะที่ใช้อยู่ทั่วไปพอจะแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

- 1.) ระบบหล่อลื่นแบบ Pre-Mixed หมายถึง นำน้ำมันหล่อลื่นผสมเข้าไปในถังเชื้อเพลิงโดยตรงซึ่งสัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับน้ำมันหล่อลื่นอาจอยู่ระหว่าง 15-20 ต่อ 1 แล้วแต่คุณภาพของน้ำมันหล่อลื่น และความรุนแรงในการใช้งานตลอดจนเทคโนโลยีของรถ ซึ่งระบบหล่อลื่นแบบนี้เคยเป็นที่นิยมมากในอดีตเนื่องจากลดปัญหาการดูแลได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ อัตราการใช้ น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับความเร็วยรอบและภาระของเครื่องยนต์ ในปัจจุบันระบบการหล่อลื่นแบบนี้ยังมีใช้อยู่บ้างในรถจักรยานยนต์รุ่นเก่าๆซึ่งส่วนใหญ่ใช้งานตามต่างจังหวัด
- 2.) ระบบหล่อลื่นแบบใช้ Injection Pump ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ระบบหล่อลื่นแบบนี้จะมีถังพักหล่อลื่นแยกออกมาต่างหาก เรียกว่า ถังออโต้ลูบ ซึ่งปั๊มออโต้ลูบจะทำหน้าที่ดูด

น้ำมันจากถังพักและจ่ายน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการควบคุมของสายคันเร่ง ซึ่งหากเร่งเครื่องยนต์มากน้ำมันหล่อลื่นก็จะจ่ายมากตามไปด้วย ระบบนี้อัตราส่วนเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น (Fuel/Oil Ratio) จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วยรอบและภาระของเครื่องยนต์มากขึ้น ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของระบบหล่อลื่นแบบ Injection คือ สามารถปรับอัตราส่วนของเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นให้สูงขึ้นหรือต่ำลงตามสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปได้โดยการปรับความตึงของสายควบคุมปั๊มอัดได้ดูบ

- 3.) ระบบ Electronic Injection Pump ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ระบบหล่อลื่นแบบนี้เป็นเทคโนโลยีล่าสุดที่นำเข้ามาใช้ในประเทศ ซึ่งใช้วิธีคำนวณอัตราความต้องการน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คอยตรวจวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และสั่งให้ปั๊มจ่ายน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการของเครื่องยนต์ ข้อดีของระบบหล่อลื่นแบบนี้ คือ สามารถประหยัดการใช้น้ำมันหล่อลื่นลงได้ในอัตราสูง และมีส่วนช่วยลดควันขาวลงได้มาก

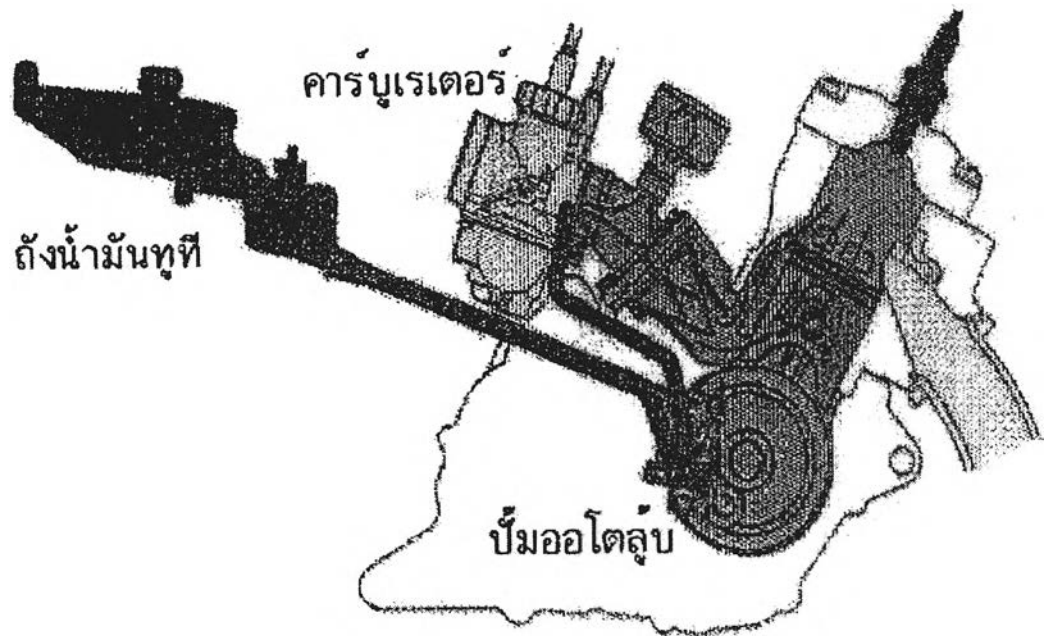
สมบัติของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ

- 1.) สมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ตามมาตรฐาน มอก. 1040 – 2534

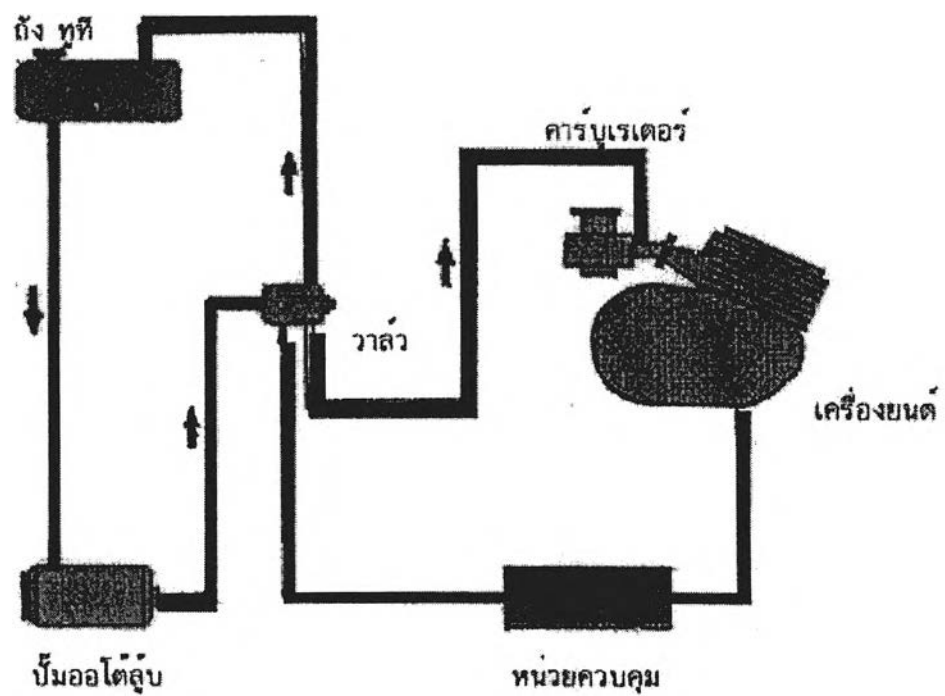
ความหนืด @ 100 °C (centistoke) =	5.6 – 16.3
ดัชนีความหนืด ไม่น้อยกว่า =	95
จุดวาบไฟ (°C) ไม่นต่ำกว่า =	70
จุดไหลเท (°C) ไม่เกิน =	-5
เถ้าซัลเฟต (°C) ไม่เกิน =	0.5
โลหะหนัก =	ต้องแจ้งชนิดและปริมาณ

- 2.) สมบัติในการใช้งาน เนื่องจากเทคโนโลยีและระบบหล่อลื่นของเครื่องยนต์ 2 จังหวะเป็นเทคโนโลยีเฉพาะ และเครื่องยนต์ 2 จังหวะส่วนใหญ่ระบายความร้อนด้วยอากาศ สมบัติการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นจึงแบ่งออกเป็น

2.1) สมบัติด้านการหล่อลื่น (Lubricity) เป็นสมบัติที่มีหน้าที่ด้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ป้องกันการครูดคร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวย เช่น ลูกสูบและผนังกระบอกสูบ และยังมีส่วนช่วยลดความตึงเป็ลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์



ภาพที่ 2.3 ระบบหล่อลื่นของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ



ภาพที่ 2.4 วงจรการจ่ายน้ำมันแบบ YCLS
(Yamaha Computerized Lubricating System)

ลักษณะการหล่อลื่นของเครื่องยนต์ 2 จังหวะแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ สภาพะในการทำงานของเครื่องยนต์จะรุนแรงมาก โดยรอบของเครื่องยนต์อาจสูงถึง 10,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณเสื้อสูบและฝาสูบอาจสูงกว่า 200 °C ฟิล์มน้ำมันที่ใช้ในการหล่อลื่นจะได้จากละอองน้ำมันที่ผสมอยู่ในไอคิโนสัดส่วนที่บางมาก (Fuel/Oil Ratio ประมาณ 20:1) ฉะนั้น ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นจะต้องมีสมบัติที่ดีเป็นพิเศษ จึงจะสามารถรองรับการทำงานในสภาวะที่รุนแรงนี้ได้ ซึ่งสมบัติด้านการหล่อลื่นนี้ ในน้ำมันชั้นคุณภาพสูงๆอาจมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพพิเศษ หรือส่วนผสมพิเศษนอกเหนือจากน้ำมันพื้นฐานปกติ เพื่อช่วยเสริมสมบัติทางด้านการหล่อลื่นให้สูงพอที่จะผ่านการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นอาจต้องมีการคัดเลือกส่วนผสมกันอย่างละเอียด เนื่องจากส่วนผสมหลายชนิดเมื่อนำมาใช้เพิ่มสมบัติด้านการหล่อลื่น อาจมีผลกระทบทำให้สมบัติด้านอื่นๆลดลง ส่วนผสมที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน อาจได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น Bright Stock หรือได้จากสารสังเคราะห์ เช่น PIB (POLY-ISOBUTYLENE) , PAO และ เอสเทอร์ (Ester) เป็นต้น

การตรวจสอบสมบัติด้านการหล่อลื่น มีการพัฒนาวิธีการทดสอบอยู่หลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบแบบ In-house Test และใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของตนเองเท่านั้น ในที่สุด ASTM ได้พัฒนาการทดสอบ โดยใช้เทคนิค Torque Drop และ API ได้ประกาศเป็นมาตรฐานในการกำหนดคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ เรียกว่า มาตรฐาน API-TC ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ทั่วโลกยอมรับ และให้ความแม่นยำในการตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้ในระดับสูง ซึ่งในเวลาต่อมา JASO ได้นำมาประยุกต์ใช้กับมาตรฐาน JASO และอยู่ในขั้นตอนเสนอเป็นมาตรฐานโลก (ISO Standard) ในปัจจุบัน

2.2) สมบัติด้านความสะอาด (Detergency) คือ สมบัติในการต่อต้านการสะสมของสิ่งสกปรกบนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เช่น ลูกสูบ กระบอกสูบ และต่อต้านการติดตายของแหวนล้างสกปรกเหล่านี้จะเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องยนต์ต่ำลง การสึกหรอสูงขึ้น เนื่องจากการระบายความร้อนทำได้ไม่สมบูรณ์ การติดตายบางส่วนของแหวนจะทำให้กำลังของเครื่องยนต์ตกลงกว่าค่ามาตรฐาน สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น และอาจเป็นสาเหตุของการเพิ่มมลพิษในไอเสีย

น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีสมบัติต่อต้านสิ่งสกปรกได้ดีทั้งประเภท Soft Deposit ซึ่งจะก่อปัญหาคราบเหนียวๆ (Oily) และ หัวเทียนบอด (Spark Plug Fouling) ซึ่งจะเกิดที่รอบและภาวะต่ำๆ ส่วนคราบเขม่า (Carbon) หรือ คราบจับ (Varnish) ซึ่งเป็น Hard Deposit จะเกิดในสภาวะรอบและภาวะสูงๆ

การทดสอบสมบัติทางด้านความสะอาดโดยทั่วไปจะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ เดินเครื่องยนต์ทดสอบด้วยน้ำมันตัวอย่างตามวิธีที่มาตรฐานกำหนดและถอดชิ้นส่วนสำคัญ เช่น ลูกสูบ เสื้อสูบ แหวน ฯลฯ มาประเมินผลความสะอาดด้วยระบบ Merit Rating ซึ่งอาจใช้สเกลและวิธีการประเมินผลของ CRC หรือ JPI แล้วแต่มาตรฐานจะกำหนด สำหรับแหวนจะวัดเป็นองศาของแหวนที่ติดตายอยู่กับร่องแหวนเทียบกับค่าที่มาตรฐานกำหนด

2.3) สมบัติทางการอุดตันที่ช่องระบายไอเสีย (Exhaust Port Blocking) ในเครื่องยนต์ 2 จังหวะ จะระบายไอเสียออกจากช่องไอเสีย ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพต่ำมักก่อปัญหาสิ่งสกปรกอุดตันทางช่องไอเสีย ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำลง สิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นจะมี 2 ลักษณะ คือ Soft Deposit ซึ่งเป็นสาเหตุของหัวเทียนบอดและท่อไอเสียอุดตัน และอีกลักษณะหนึ่ง ได้แก่ Hard Deposit ซึ่งมักพบที่รอบและอุณหภูมิจากเครื่องยนต์สูงมากๆ สิ่งสกปรกในส่วนนี้จะทำให้กำลังของเครื่องยนต์ตกลง (Power Drop) จากค่ามาตรฐานภายในระยะเวลาอันสั้น จากผลการศึกษาพบว่า สิ่งสกปรกประเภท Hard Deposit มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณ Bright Stock ที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น และอุณหภูมิของเครื่องยนต์ ซึ่งทำให้มีการพิจารณาใช้ PIB แทน Bright Stock ในเวลาต่อมา

การตรวจสอบสมบัติในการต่อต้านการอุดตันของระบบช่องไอเสียมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะต้องทดสอบด้วยเครื่องยนต์มาตรฐานและประเมินผลตามมาตรฐานกำหนด มาตรฐาน API-TC ได้กำหนดให้ใช้วิธีวัดพื้นที่ทั้งหมดของช่องไอเสีย ซึ่งถูกอุดตันด้วยสิ่งสกปรกภายหลังทำการทดสอบด้วยเครื่องยนต์ตามวิธีมาตรฐานครบ 20 ชั่วโมง และนำผลการอุดตันเทียบกับผลการทดสอบน้ำมันอ้างอิง ซึ่งผลการอุดตันจะวัดเป็นร้อยละของพื้นที่หน้าตัดช่องไอเสียที่ถูกอุดตัน ซึ่งมาตรฐานของ สมอ. ก็ใช้แนวทางเดียวกันนี้

สำหรับมาตรฐาน JASO นั้นจะวัดสมบัติในด้านการต่อต้านการอุดตันของระบบช่องไอเสีย โดยการเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันทดสอบในเครื่องยนต์มาตรฐานจนกระทั่งสิ่งสกปรกในระบบไอเสียทำให้ความดันในระบบไอเสียสูงขึ้นถึง 2 kPa บันทึกเวลาที่ใช้ทดสอบทั้งหมดเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันอ้างอิง JATRE-1 จนกระทั่งความดันในระบบไอเสียมีค่า 2 kPa เท่ากัน

2.4) สมบัติทางการลดควันขาว (White Smoke) ควันขาวเป็นมลพิษหลักตัวหนึ่งของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ มีลักษณะเป็นละอองน้ำมันซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ ซึ่งลักษณะของควันขาวจะเป็นละอองของไฮโดรคาร์บอน ชนิดที่เป็นปฏิกิริยาถูกโซ่ จึง

ทำให้เป็นเรื่องยากมากที่จะเก็บตัวอย่างควันขาวไปวิเคราะห์ส่วนประกอบและวิจัยถึงระดับความเป็นพิษ การศึกษาเรื่องควันขาวได้เริ่มต้นมากกว่า 10 ปี และมีการศึกษาพบว่าควันขาวจะเกิดขึ้นมากเนื่องจากสาเหตุต่างๆมากมาย เช่น เหนือน้ำมันมีส่วนผสมซึ่งทำให้มีค่าพลังงานปฏิกิริยา (Reaction Energy) สูง เช่น น้ำมันที่มีส่วนผสมของ Bright Stock และสารสังเคราะห์บางชนิด อัตราการใช้ น้ำมันหล่อลื่นสูงเกินไป (Fuel/Oil Ratioต่ำ) อุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ต่ำ หรือแม้กระทั่งการออกแบบเครื่องยนต์ก็มีส่วนต่อการเพิ่มหรือลดปริมาณควันขาวเช่นกัน

การควบคุมปริมาณควันขาวที่กระทำทั้งในอดีตและในปัจจุบัน ได้แก่ การพัฒนาสูตรน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ ให้มีสมบัติด้านพลังงานปฏิกิริยาค่าต่ำลง เช่น ผสมสาร PIB หรือ สารสังเคราะห์บางตัวลงไป ในน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ ในสัดส่วนที่สูง ขณะเดียวกันความพยายามที่จะเพิ่มสมบัติในการหล่อลื่นของน้ำมันให้สูงขึ้น เพื่อที่จะสามารถใช้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นบางลง (Fuel/Oil Ratioสูง) ก็มีผู้นำมาใช้แต่ยังไม่แพร่หลายนัก

การทดสอบสมบัติด้านควันขาว นิยมใช้วิธี Opacity Method เป็นส่วนใหญ่ โดยเดินเครื่องยนต์ในเงื่อนไขที่กำหนด และวัดความเข้มสูงสุดของควันขาวด้วยเครื่องมือ Opacimeter ชนิดดูดกลืนแสง ซึ่งมาตรฐาน สมอ. ระบุให้วัดปริมาณควันขาวเป็นร้อยละของควันขาวที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือดังกล่าว สำหรับมาตรฐาน JASO นั้นจะวัดปริมาณควันขาวของน้ำมัน ตัวอย่างเปรียบเทียบกับควันขาวของน้ำมันอ้างอิง JATRE-1

2.2 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆกัน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนนี้ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบปิโตรเลียม ซึ่งสามารถแบ่งน้ำมันดิบเป็น 2 ชนิด คือ พวกวาราฟิน (Paraffin Base) หรือ พวกแนฟทา (Naphtha Base) ในการกลั่นแยกส่วนต่างๆออกจากกันนั้นอาศัยจุดเดือดที่ต่างกันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารเบาที่มีจุดเดือดต่ำกว่า เช่น บิวเทน (C_4H_{10}) โพรเพน (C_3H_8) และ อีเทน (C_2H_6) จะแยกออกมาก่อน แล้วต่อมาก็จะเป็นพวกเบนซิน แนฟทา คีโรซีน ดีเซล น้ำมันหล่อลื่น และซีฟู้ด หรือยางมะตอย

2.2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน

1.) ค่าความร้อน (Heating Value) คือ ปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงให้หลังจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ซึ่งอาจหาได้โดยใช้ Gas Calorimeter หรือ Bomb Calorimeter ก็ได้ ค่าความร้อน

ที่ทดลองได้จาก Calorimeter จะเป็นค่าความร้อนที่สูงกว่า สำหรับในการทำงานมักจะใช้ค่าความร้อนต่ำกว่ามาใช้ในการคำนวณ

ค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงอาจจะคำนวณได้จากสูตร

$$\text{GCV} = (33800 \times \text{C}) + (144000 \times \text{H}) + (9300 \times \text{S}) \quad \text{kJ/kg} \quad (1)$$

เมื่อ GCV เป็นค่าความร้อนทั้งหมด (Gross Calorific Value)

1 kg C เผาเป็น CO_2 หอมจะให้ความร้อน = 33800 kJ

1 kg H_2 ผสมกับ O_2 กลายเป็นไอน้ำให้ความร้อน = 144000 kJ

1 kg S ผสมกับ O_2 กลายเป็น SO_2 ให้ความร้อน = 9300 kJ

2.) ความสามารถในการระเหย (Volatility) คือความสามารถในการระเหยต่ออุณหภูมิของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน คุณสมบัติของการระเหยต่ออุณหภูมินี้มีความสำคัญต่อการใช้งาน คือ เชื้อเพลิงส่วนที่ระเหยเท่านั้นจึงจะเกิดการสันดาป อุณหภูมิในการใช้งานของเครื่องยนต์มีค่าต่างๆ กัน จึงจำเป็นต้องเลือกเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับอุณหภูมินั้นๆ เพื่อให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์

3.) ค่าออกเทน (Octane Number) คือ ตัวเลขบอกความต้านทานต่ออุณหภูมิ และความดันในการติดไฟ ถ้าความดันและอุณหภูมิสูงเชื้อเพลิงยังไม่ติดไฟก็เรียกว่า เชื้อเพลิงนั้นมีค่าออกเทนสูง โดยเทียบกับเชื้อเพลิงไอโซออกเทน (C_8H_{18}) ซึ่งมีค่าออกเทนเท่ากับ 100 และเชื้อเพลิงนอร์มัลเฮพเทน (C_7H_{16}) ซึ่งมีค่าออกเทนเท่ากับ 0

ในการทำให้น้ำมันเบนซินมีค่าออกเทนสูงขึ้นมักจะใช้สารตัวเติมเตตราเอทิลเลด (TEL, Tetra Ethyl Lead ($\text{C}_8\text{H}_{20}\text{Pb}$)) ปริมาณที่เติมต้องไม่เกิน 4 ลบ.ซม. ต่อแกลลอน เพราะถ้าเติมมากเกินไปจะไม่เพิ่มค่าออกเทน แต่กลับก่อให้เกิดมลพิษจากไอตะกั่วหลังการเผาไหม้อีกด้วย

หลังจากวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2539 ประเทศไทยได้รณรงค์ให้ใช้น้ำมันไร้สารตะกั่ว ดังนั้นจึงมีการใช้ MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ในการเพิ่มค่าออกเทนแทน TEL แต่ในปัจจุบันนี้พบว่า MTBE เองก็สามารถสร้างมลพิษที่ทำให้เกิดมะเร็งได้ จึงได้มีการรณรงค์ให้ใช้เอทานอลมาใช้เป็นตัวเติมออกซิเจนเพื่อเพิ่มค่าออกเทนให้กับน้ำมันเชื้อเพลิงแทน MTBE

4.) ค่าซีเทน (Cetane Number) คือ ตัวเลขที่บอกว่าในความดันและอุณหภูมิหนึ่งนั้น เชื้อเพลิงสามารถจะติดไฟได้เร็วแค่ไหน โดยเฉพาะน้ำมันดีเซล โดยเทียบกับน้ำมันซีเทน ($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$) ซึ่งมีค่าซีเทนเท่ากับ 100 และน้ำมันอัลฟาเมทิลแนฟทาลิน ($\text{C}_{11}\text{H}_{20}$) ซึ่งมีค่าซีเทนเท่ากับ 0

5.) จุดวาบไฟ (Flash Point) คือ อุณหภูมิที่เชื้อเพลิงสามารถจะให้ไอและติดไฟวาบขึ้นได้

6.) จุดติดไฟ (Fire Point) คือ อุณหภูมิที่เชื้อเพลิงสามารถจะให้ไอและติดไฟต่อไปได้เอง

7.) ความถ่วงจำเพาะ คือ น้ำหนักของน้ำมันต่อปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยทั่วไปนิยมใช้เป็น API (American Petroleum Institute) Gravity ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\text{API Gravity} = \frac{141.5}{\text{Sp.gr.at60}^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}} - 131.5 \quad (2)$$

โดยทั่วไป ถ้า API Gravity สูง น้ำมันนั้นจะมีค่าซีเทนสูงด้วย

8.) ปริมาณกำมะถัน คือ ปริมาณกำมะถันที่มีในเชื้อเพลิง ถ้าปริมาณกำมะถันมากจะให้โทษกับเครื่องยนต์ โดยกำมะถันจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำ กลายเป็นกรดกำมะถันซึ่งจะกัดโลหะให้ผุกร่อนไป

9.) ปริมาณคาร์บอนคงเหลือ (Carbon Residue) ภายหลังจากการเผาไหม้อาจจะเป็นเพราะปริมาณอากาศ หรือออกซิเจนไม่พอ หรือเพราะสภาวะการเผาไหม้ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ และจะมีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่ จะเป็น ในรูปของคาร์บอนหรือสารประกอบก็ได้

10.) ขี้เถ้า (Ash) คือ ขี้เถ้าที่เหลือหลังจากเผาเชื้อเพลิงแล้ว ถ้าเชื้อเพลิงใดมีขี้เถ้ามากก็ต้องมีกระบวนการขจัดขี้เถ้า ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

2.2.2 โครงสร้างของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน

เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลวและก๊าซนั้น จะประกอบด้วยสารผสมของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น ในน้ำมันเบนซิน จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ ปนอยู่ด้วยเกือบ 40 ชนิด (แต่มีปริมาณน้อยมาก) ในการแยกว่าเป็นไฮโดรคาร์บอนชนิดไหนนั้น แบ่งออกเป็นตระกูลต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทุกสารเป็นสารประกอบอินทรีย์ ยกเว้น ออกไซด์ของคาร์บอน คาร์ไบด์ และ คาร์บอนเนต ลักษณะการกลายเป็นไอของไฮโดรคาร์บอนนั้นสามารถประมาณได้จากจำนวนคาร์บอน หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ สถานะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุล ดังนี้

1.) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ได้แก่ อัลเคนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 1-4 อะตอมรวมถึงอัลคีนและอัลไคน์ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จะมี สถานะก๊าซ

2.) อัลเคนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 5-17 อะตอม อัลคีนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 5-19 อะตอม และอัลไคน์ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 5-18 อะตอม จะมี สถานะของเหลว

3.) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าหรือมีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่าที่กล่าวมาข้างต้นจะมีสถานะเป็น ของแข็ง

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง(พลพร, 2537)

ตระกูล	สูตร	โครงสร้าง	การอิมตัว
พาราฟิน (Paraffin) หรือ อัลเคน (Alkanes)	C_nH_{2n+2}	โซ่	อิมตัว
โอเลฟิน (Olefin) หรือ อัลคีน (Alkenes)	C_nH_{2n}	โซ่	ไม่อิมตัว
ไดโอเลฟิน (Diolefin)	C_nH_{2n-2}	โซ่	ไม่อิมตัว
แนฟทีน (Naphthene)	C_nH_{2n}	วงแหวน	อิมตัว
แอโรมาติก (Aromatic)			ไม่อิมตัว
เบนซีน (Benzene)	C_nH_{2n-6}	วงแหวน	ไม่อิมตัว
แนฟทาลีน (Naphthalene)	C_nH_{2n-12}	วงแหวน	ไม่อิมตัว
แอลกอฮอล์ (Alcohols)*	$C_nH_{2n+1}-OH$	โซ่	อิมตัว

* เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ (Oxygenated Hydrocarbon) ธรรมดา จะไม่รวมอยู่ในน้ำมันดิบ แบ่งออกเป็น 4 จำพวก ได้แก่ เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ โพรพิลแอลกอฮอล์ และ บิวทิลแอลกอฮอล์

2.2.3 กระบวนการเผาไหม้

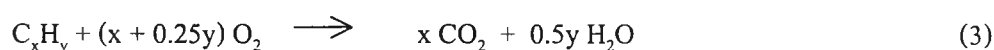
ในการเกิดการสันดาป หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อแปลงเป็นพลังงานรูปอื่นตามต้องการ นั้น เป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสาร ซึ่งมี 2 แบบ คือ

(1.) Exothermic Reaction คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้วมีการคายหรือจ่ายพลังงานออกจากกระบวนการ

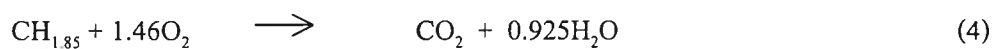
(2.) Endothermic Reaction คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยมีการดูดพลังงานความร้อนเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา

ในกระบวนการสันดาปนั้น ต้องหาวิธีที่ทำให้ง่าย หลังสันดาปแล้วให้พลังงานมาก และสามารถควบคุมพลังงานที่เกิดขึ้นได้

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง จะต้องใช้ออกซิเจนปริมาณที่แน่นอนในการสันดาปอย่างสมบูรณ์ ดังสมการ



น้ำมันเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไป มีอัตราส่วนไฮโดรคาร์บอน 1 อะตอม ต่อไฮโดรเจน 1.85 อะตอม ดังนั้น สำหรับ $x = 1, y = 1.85$



ส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิง (Air/Fuel, A/F ratio) ซึ่งเผาไหม้หมดพอดีตามทฤษฎี และไม่มียกซิเจนเหลือ เรียกว่า Stoichiometric mixture ซึ่งมีอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยน้ำหนักประมาณ 14.6 ถ้าหากส่วนผสมน้อยกว่านี้จะเป็นส่วนผสมที่เข้มข้น (Rich mixture) และถ้าหากส่วนผสมมากกว่าอัตราส่วนนี้จะเป็นส่วนผสมที่เจือจาง (Lean mixture) อัตราส่วนผสมของอากาศต่อเชื้อเพลิงนี้เป็นดัชนีที่สำคัญของสภาพการสันดาป

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อมลพิษจากเครื่องยนต์เบนซิน

1.) อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง โดยทั่วไปความเข้มข้นของมลพิษต่างๆที่ออกมาจากไอเสียจะแปรตาม A/F ratio ดังนี้

- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะแปรตาม A/F ratio โดยตรง โดยที่ปัจจัยอื่นจะมีผลต่อ CO น้อยมาก
- ปริมาณไฮโดรคาร์บอน (HC) และอัตราเชื้อเพลิงจำเพาะจะเพิ่มขึ้นถ้า A/F ratio บางไป เนื่องจากการลามของเปลวไม่สมบูรณ์ และการเผาไหม้ที่ผิดเวลา
- ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะสูงสุดที่ A/F ratio เท่ากับ 16 และจะลดลงอย่างรวดเร็วหากส่วนผสมหมดหรือบางกว่านี้

2.) เวลาจุดระเบิด ที่เวลาจุดระเบิดต่ำ ความเข้มข้นของ NO_x จะลดลงอย่างรวดเร็วที่อัตราส่วนผสมพอดี นอกจากนี้การตั้งเวลาการจุดระเบิดเข้าไปก็ทำให้ความเข้มข้นและอัตราการเกิดของ NO_x ลดลงเช่นกัน แต่จะทำให้กำลังขาออกของเครื่องยนต์ลดลงด้วย การจุดระเบิดต่ำจะลดปริมาณ HC ด้วย เนื่องจากการเผาไหม้ไม่ทัน ทำให้ต้องเผาต่อไปในจังหวะคายและอาจเผาต่อไปในท่อไอเสีย อุณหภูมิไอเสียอาจเพิ่มขึ้น ดังนั้น แม้ว่า A/F ratio บาง ปริมาณ HC จะน้อย หากการจุดระเบิดต่ำไป

3.) สภาวะไอดี ที่อุณหภูมิไอดีสูงจะทำให้ปริมาณ NO_x เพิ่มขึ้นและทำให้อากาศเข้าห้องเผาไหม้บางลง ซึ่งทำให้กำลังเครื่องยนต์ตกลงด้วย สำหรับผลกระทบของอุณหภูมิไอดีต่อ HC นั้นน้อยมาก แต่ที่ความดันไอดีต่ำจะลดปริมาณ NO_x และเพิ่มปริมาณ HC นอกจากนี้ เมื่อความชื้นในอากาศมากจะมีผลทำให้ปริมาณ NO_x ลดลง เนื่องจากความชื้นทำให้อุณหภูมิเปลวต่ำลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดขึ้นหากส่วนผสมบาง

4.) *ก๊าซค้าง* หากมีก๊าซค้างในกระบอกสูบมากจะทำให้อุณหภูมิที่เผาไหม้ต่ำลง ปริมาณ HC จะเพิ่มขึ้น และเกิด NO_x น้อย ในเครื่องยนต์ 2 จังหวะจะสังเกตเห็นว่ามีปริมาณ NO_x น้อย เพราะก๊าซค้างจะมีมากในกระบอกสูบอยู่แล้ว

5.) *ความดันกลับจากไอเสีย* เมื่อไอเสียออกไม่สะดวกหรือออกไม่ทันจะทำให้เกิดความดันกลับขึ้น และเกิดก๊าซค้างในกระบอกสูบมากขึ้น มีผลให้ปริมาณ NO_x ลดลง แต่มีผลต่อปริมาณไฮโดรคาร์บอนน้อยมาก

6.) *อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น* เมื่อน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ออกมาพร้อมกับไอเสียได้เล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ปริมาณ NO_x เพิ่มขึ้น

7.) *ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์* โดยทั่วไป รูปแบบห้องเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวของผนังต่อปริมาตรห้องเผาไหม้ (S/V Ratio) น้อย จะทำให้ปริมาณ HC น้อย แต่ปริมาณ NO_x มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางของหัวเทียนด้วย

อัตราส่วนกำลังอัดสูง จะให้กำลังดีและมีประสิทธิภาพสูง บางกรณีอัตราส่วนกำลังอัดสูงจะเพิ่มปริมาณ HC และลดปริมาณ NO_x แต่หากใช้อัตราส่วนผสมบางปริมาณ NO_x จะเพิ่มขึ้น

8.) *สภาพการใช้งาน* ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีผลต่อปริมาณ CO, HC และ NO_x น้อยมาก โดยที่อัตราภาระสูงจะให้ NO_x มาก แต่ที่อัตราภาระต่ำ รอบต่ำ จะให้ HC และ CO สูง โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของ NO_x จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบและกำลังเพลานอกจากนี้ยังแปรตามอัตราส่วนผสมและเวลาจุดระเบิดด้วย

9.) *ชนิดของเชื้อเพลิง* ในไอเสียจากเครื่องยนต์เบนซินที่ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง จะมีปริมาณ HC ที่ต่ำกว่า แต่มีปริมาณ NO_x ที่สูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซิน ทั้งนี้เพราะ LPG สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับอากาศได้ดี จึงเกิดการลุกไหม้ที่สมบูรณ์กว่า ทำให้ปริมาณ HC เหลือไม่มากนัก แต่การเผาไหม้ที่ดีจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่เผาไหม้ ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณ NO_x สูงขึ้น

2.3 บทบาทของไฮโดรคาร์บอนต่อชีวอนามัยและการเกิดก๊าซโอโซน

2.3.1 ผลกระทบต่อชีวอนามัย

สารประกอบอินทรีย์ระเหยได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดระหว่าง 50-250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสภาพเป็นไอระเหยเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้อง สารประกอบอินทรีย์ระเหยได้หลายชนิดมีบทบาทที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ และสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้บางชนิดในกลุ่มเอโรมาติก เช่น เบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน ซึ่งเป็นชนิดที่จะทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ นั้น สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง เมื่อได้รับการสัมผัสโดยตรงในปริมาณที่มากพอและมีระยะเวลาสัมผัสที่นานพอ

ผลกระทบต่อทางด้านชีวอนามัยของเบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน ได้มีผู้ให้ความสนใจทำการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

- 1.) เบนซิน เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็ง เมื่อร่างกายได้รับสัมผัสไอระเหยของเบนซินอย่างรุนแรงจะทำให้เกิดอาการชักกระตุก สลบ เป็นอัมพาต จนถึงหัวใจล้มเหลวได้ และเมื่อได้รับสัมผัสในปริมาณที่ลดลง พบว่ามีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เกิดอาการวิงเวียน คลื่นเหียน ปวดศีรษะ และหมดสติได้ นอกจากนี้ในระยะยาวอาจทำให้สมองบวม น้ำ เกิดอาการตกเลือดตามเนื้อเยื่อต่างๆ รวมถึงการผิดปกติของไขกระดูกและไตได้
- 2.) โทลูอิน เมื่อร่างกายได้รับสัมผัสไอระเหยของโทลูอินโดยมากจะเกิดผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง และทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ แต่ไม่มีผลต่อการทำลายระบบการทำงานของอวัยวะต่างๆ
- 3.) เอทิลเบนซิน เป็นสารที่สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งโดยการหายใจ การกิน และการสัมผัสผ่านผิวหนัง ซึ่งก่อให้เกิดอาการระคายเคืองตา ผิวหนัง และระบบทางเดินหายใจได้
- 4.) ไซลีน เมื่อร่างกายได้รับสัมผัสไอระเหยของไซลีนในปริมาณที่สูงมากจะทำให้เกิดอาการขาดน้ำ ขาดไขมัน ผิวหนังเป็นแผลพุพอง เกิดการระคายเคืองเยื่อโพรงจมูก และมีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เกิดอาการวิงเวียน เหนื่อยล้า มึนงง และหมดสติ

2.3.2 ปฏิกิริยาการเกิดโฟโตเคมีคัลสม็อก

ปฏิกิริยาการเกิดโฟโตเคมีคัลสม็อก เป็นการรวมตัวกันของสารโฟโตเคมีคัลออกซิแดนท์กับก๊าซอันตรายอื่นๆ และอนุภาคมลพิษต่างๆ (Dimitriadis, 1999: 831) ปฏิกิริยาการเกิดโฟโตเคมีคัลสม็อกได้รับความสนใจเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1944 ที่เมืองลอสแอนเจลิส ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากก่อให้เกิดความเสียหายต่อการเจริญเติบโตของพืช สร้างความระคายเคืองต่อสายตา และลดประสิทธิภาพในการมองเห็น ต่อมาในตอนต้นทศวรรษที่ 50 นาย เอ เจ ฮาเกน สมิท (A.J. Haagen Smit) ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าการฉายรังสีลงบน ส่วนผสมระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจน(NO_x) และไฮโดรคาร์บอน(HC) จะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับโฟโตเคมีคัลสม็อกที่อยู่ในบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้ NO_x และ HC จึงถูกเรียกว่าเป็นสารตั้งต้นในการเกิดโฟโตเคมีคัลออกซิแดนท์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม

สำหรับพื้นที่ที่เคยประสบกับปัญหามลภาวะอากาศทางโฟโตเคมีคัลแล้ว แหล่งกำเนิดที่สำคัญที่สุดของ HC และ NO_x ก็คือกิจกรรมของมนุษย์

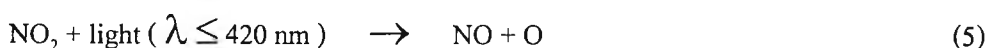
2.3.3 โฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์

กลุ่มสารประกอบโฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์ ได้แก่ ก๊าซโอโซน เปอร์ออกซีเอซิลไนเตรท (Peroxyacyl nitrates, PAN) สารในกลุ่มอัลดีไฮด์ และกลุ่มลอะองไอของซัลเฟตและไนเตรท เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเมื่อก้าวถึงสารโฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์ เรามักจะหมายถึงก๊าซโอโซน เพราะมีปริมาณมากถึง 90% ขององค์ประกอบทั้งหมดของสารโฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์ในอากาศ ด้วยเหตุนี้ ในบางครั้งจึง สามารถที่จะใช้คำว่า “ก๊าซโอโซน” แทนคำว่า “โฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์” ได้

2.3.4 กลไกการเกิดก๊าซโอโซน (O_3)

สำหรับกลไกการเกิดก๊าซโอโซนในบรรยากาศ สามารถแสดงได้ดังนี้

เริ่มด้วยปฏิกิริยาการดูดซับแสงอาทิตย์ของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ดังสมการที่ (5)



เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นของแสง

อะตอมอิสระของออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (5) จะเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับก๊าซออกซิเจนในอากาศเพื่อสร้างก๊าซโอโซน ดังแสดงในสมการที่ (6)



อย่างไรก็ตาม ไนตริกออกไซด์ (NO) ก็จะเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับก๊าซโอโซนเพื่อสร้างก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อีกครั้งเช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ (7)



ในบรรยากาศซึ่งปราศจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะไม่มีการผลิตก๊าซโอโซนเกิดขึ้นมากนัก อย่างไรก็ตาม ถ้ามีอนุภาคของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์

ประกอบในบรรยากาศ ไนตริกออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในสมการที่ (8)



ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดการสะสมก๊าซโอโซนขึ้น

ความแตกต่างอันซับซ้อนของสารจะเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา และความจริงที่ว่าก๊าซโอโซนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากมาอย่างเหลือเฟือและค่อนข้างง่ายต่อการวัด เป็นเหตุผลที่เรามักใช้ก๊าซโอโซนเป็นดัชนีในการวัดความรุนแรงของมลภาวะทางโฟโตเคมีคัล

ผลิตภัณฑ์อื่นที่มีจำนวนน้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่น PAN เกิดขึ้นจากอนุมูลแอซิลเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ (9)



2.4 ผลกระทบของก๊าซโอโซน

ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่มีสีหรือมีสีฟ้าอ่อน มีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้เล็กน้อย (เพียง 0.49 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิ 0 °C) มีค่าครึ่งชีวิตในบรรยากาศ 12 ชั่วโมง และในน้ำกลั่น 20-30 นาที ณ อุณหภูมิ 20 °C จึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และเป็นออกซิไดเซอร์ชนิดรุนแรงสามารถก่อให้เกิดระเบิดได้เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

ก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ (ช่วงระดับความสูงประมาณ 15–50 กิโลเมตร) จะทำหน้าที่ป้องกันโลกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่ในทางตรงกันข้ามก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (ช่วงระดับความสูงประมาณ 15 กิโลเมตร) กลับเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

2.4.1 ผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อสุขภาพ

ก๊าซโอโซนก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างมากต่อตา ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจส่วนต้น ตลอดจนเยื่อและเยื่อเมือกต่างๆ ถ้าวางกายได้รับก๊าซโอโซนเข้าไปเพียงปริมาณน้อยกว่า 0.5 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ก็อาจแสดงอาการเป็นพิษและมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของปอด เนื่องจาก

คุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อยของก๊าซโอโซน เมื่อถูกหายใจหรือสูดดมเข้าสู่ร่างกายจึงเกิดการทำลายระบบทางเดินหายใจส่วนปลาย โดยปกติแล้ว ในการหายใจครั้งหนึ่งจะมีการหายใจเอาก๊าซโอโซนเข้าไปในบริเวณทางเดินหายใจส่วนต้น (Nasopharynx) ประมาณ 40-50% โดยที่ 90% ของก๊าซโอโซนจะอยู่ในบริเวณทางเดินหายใจส่วนปลาย ได้แก่ เนื้อเยื่อบริเวณซั้วปอด (Alveolus Parenchyma) และถุงลม (Alveolus) จึงถูกดูดซึมเข้าสู่เส้นเลือดได้ดี

จากการศึกษาพบว่าผู้ที่ได้รับก๊าซโอโซนจากการประกอบอาชีพจะมีปริมาณคอลลาเจน (Collagen) ในเนื้อเยื่อปอดมากกว่าคนปกติ และเนื้อเยื่อปอดจะหนาขึ้น จำนวนเซลล์ชนิด Type 2 สูงขึ้น และมีระดับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ที่เยื่อผนังซั้วปอด โดยเซลล์ชนิด (Type 1) ซึ่งเป็นชนิด Ciliated cell ทำหน้าที่ขับไล่สิ่งแปลกปลอมออกจากร่างกายได้ จะถูกทำลายและแทนที่โดย Non-ciliated cell ซึ่งไม่สามารถขับไล่สิ่งแปลกปลอมออกจากร่างกายได้

เมื่อร่างกายได้รับก๊าซโอโซนปริมาณมากๆ จะทำให้เกิดภาวะปอดอักเสบ และมีการซึมผ่านผนังเซลล์ง่ายขึ้น โดยจะพบ โปรตีนเม็ดเลือดขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์จำพวก Polymorphonuclear Leukocytes ในบริเวณช่องปอดและเนื้อเยื่อปอด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในกระต่ายซึ่งได้รับก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 0.1 ppm เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 6 วัน จะทำให้ปอดอักเสบ และผนังเซลล์ยอมให้มีการซึมผ่านเข้าปอดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ถ้าร่างกายได้รับก๊าซโอโซนในปริมาณที่สูงมาก จะทำให้กลไกการป้องกันของระบบหายใจเปลี่ยนแปลงไป ทำให้การทำงานของ Alveolar Macrophage ลดน้อยลง เป็นผลให้ภูมิคุ้มกันต่อแบคทีเรียลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดภาวะติดเชื้อได้ง่าย

กลไกการออกฤทธิ์ความเป็นพิษของก๊าซโอโซนเกิดขึ้นโดยทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนและหมู่ซัลโฟดริลในเอนไซม์และโปรตีน นอกจากนี้ก๊าซโอโซนยังทำปฏิกิริยากับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวให้กลายเป็นกรดไขมันเปอร์ออกไซด์ ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งทำลายเนื้อเยื่อของเซลล์ที่มีองค์ประกอบไขมัน อิ่มตัวและฟอสโฟไลปิดอย่างต่อเนื่อง กระบวนการที่เกิดขึ้นเรียกว่าไลปิดเปอร์ออกซิเดชัน ซึ่งทำให้คุณสมบัติของเนื้อเยื่อเซลล์เปลี่ยนแปลงไป โดยยอมให้มีการผ่านเข้าเนื้อเยื่อของเซลล์ได้ง่ายขึ้น เกิดการรั่วไหลของอิเล็กโตรไลต์และเอนไซม์ระหว่างเซลล์ กระบวนการเมตาบอลิซึมถูกยับยั้ง มีการบวมและย่อยสลายของไมโทคอนเดรีย ไลโซโซมและองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์ (Organelles) ในที่สุดเซลล์จะเน่าและสลายตัว

ความเป็นพิษต่อสุขภาพจากการสัมผัสกับก๊าซโอโซนสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ พิษเฉียบพลัน และพิษเรื้อรัง อย่างไรก็ตามสำหรับผู้ที่ประกอบอาชีพซึ่งได้สัมผัสและรับก๊าซโอโซน

เข้าสู่ร่างกายโดยทางผิวหนัง การสูดดมหรือหายใจ ก็อาจมีอาการแสดงพิษทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของก๊าซโอโซนทางด้านชีวอนามัย (บริษัทแอร์แอนด์เวสต์ เทคโนโลยี, 2542)

ความเข้มข้น (ppm)	ผลกระทบ
0.25	ไม่มี
0.3-0.8	ระคายเคืองลำคอ
0.9 peak	ระคายเคืองลำคอ อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ
0.8-1.7	ปากและคอแห้ง ระคายเคืองจมูกและตา แน่นหน้าอก
0.47	ระคายเคืองเยื่อ (Mucous Membrane)
0.1-0.6	เจ็บบริเวณใต้ลิ้นปี่ ไอ ระคายเคืองเยื่อ ผนังเซลล์และเยื่อเมือก

2.4.1.1 พิษเฉียบพลัน

ผู้ที่สัมผัสกับก๊าซโอโซนจะเกิดอาการระคายเคืองต่ออวัยวะตา แห้ง เยื่อเมือกที่จมูกและลำคอ จะแห้ง มีอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ไอ เจ็บแปลบๆ ในขณะที่หายใจลึก แน่นหน้าอก เจ็บคอ หายใจลำบาก และหายใจเป็นช่วงสั้นๆ นอกจากนี้ยังพบอาการที่ไม่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ ได้แก่ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ ครั่นเนื้อครั่นตัว ความรุนแรงของความเป็นพิษจะมีมากขึ้นถ้าได้รับโอโซนในระยะเวลาที่นานขึ้น หรือมีอัตราการไหลเวียนของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นถึงแม้ว่าจะหายใจเอาก๊าซโอโซนในระดับมาตรฐานที่อนุญาตให้มีได้ในอากาศ คือ 0.12 ppm ต่อ 1 ชั่วโมง ก็อาจจะก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคนซึ่งมีภาวะภูมิแพ้ทางระบบทางเดินหายใจ หรือเป็นโรคหืดหอบ ก็จะมีอาการแสดงพิษเสริมและรุนแรงกว่าในคนปกติ

Type 1 pneumocyte ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการแลกเปลี่ยนก๊าซ ในเซลล์จะถูกทำลายเมื่อได้รับก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 0.8 ppm เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และถูกแทนที่โดยเซลล์ชนิด Type 2 ซึ่งมีความหนาของผนังเซลล์มากกว่า เนื่องจากการสะสมตัวของ Collagen และการผลิตไขมันที่มากกว่า

จากการทดลองพบว่า โอโซนมีผลต่อการทำงานของปอด โดยจะเพิ่มความต้านทานของทางเดินหายใจ ลดอัตราการไหลของลมหายใจออก และลดสัดส่วนของ FEV1/FVC โดยลดค่า FVC,

FEV(1.0) และ FEV(3.0) อย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับก๊าซ โอโซนปริมาณ 0.45 ppm หลังจากที่ได้รับมาก่อนหน้านี้ 2 วัน จึงสรุปได้ว่า อาการเฉียบพลันของระบบทางเดินหายใจอาจแสดงให้เห็นนานถึง 48 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าการนำของเซลล์ภายในปอดของหนูซึ่งได้รับก๊าซโอโซนระหว่างการออกกำลังกายมากกว่าและรุนแรงกว่าหนูที่อยู่เฉยๆ

สำหรับผู้ประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับก๊าซ โอโซนนั้น จะมีอาการแสดงพิษรุนแรงกว่าผู้ที่หายใจเอาก๊าซ โอโซนในอากาศทั่วไป กล่าวคือ รู้สึกง่วงนอนแต่นอนไม่หลับ เมื่อยล้าอย่างรุนแรง ความตั้งใจทำงานลดน้อยลง มีภาวะตัวเขียวเนื่องจากเนื้อเยื่อขาดออกซิเจน ปอดบวม การรับรสและกลิ่นไม่ดี และระคายเคืองตา จากการทดลองในสัตว์ทดลองพบว่าเมื่อให้สัตว์ทดลองอยู่ในบริเวณที่มีก๊าซโอโซนความเข้มข้นสูงระหว่าง 3.1-12 ppm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สัตว์จะตายเนื่องจากปอดบวม และมีเลือดคั่งในปอด

2.4.1.2 พิษเรื้อรัง

จากการทดลองในสัตว์ทดลอง เช่น หนูตะเภาและหนูขาว โดยให้รับก๊าซโอโซนในระดับความเข้มข้น 1.0 ppm เป็นเวลา 268 วัน จะเกิดอาการข้ออักเสบเรื้อรัง มีเส้นใยพังพืดที่ข้ออักเสบ ข้ออักเสบ และถุงลมโป่งพอง จากการทดลองในลิงพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเยื่อหุ้มช่องจมูกและระบบทางเดินหายใจ มีอาการอักเสบของเซลล์บุผนัง ผนังเซลล์หนาขึ้น และมีการเพิ่มจำนวนเซลล์ของ Non-ciliated Cuboidal Cells ในเนื้อเยื่อของข้ออักเสบ ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มปอด และข้ออักเสบ ถูกทำลายและเนื้อเยื่อนำสลายจากระบวนการไลโปโปรออกซิเดชันของอนุมูลอิสระซึ่งแตกตัวจากโมเลกุลของโอโซน

ถ้าได้รับก๊าซ โอโซนในปริมาณความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานๆ จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดภาวะบกพร่องของระบบคุ้มกันของทางเดินหายใจรุนแรงกว่าอาการที่แสดงในพิษเฉียบพลัน

2.4.2 ผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อสิ่งแวดล้อม

2.4.2.1 ผลกระทบต่อพืชและระบบนิเวศน์วิทยาเกษตร

ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ทำให้พืชพรรณได้รับความเสียหายมากที่สุด เมื่อพืชได้รับสัมผัสก๊าซโอโซนจะเกิดภาวะเครียด (Stress) ผ่านทางปากใบของพืช ถ้ามีปริมาณมากพอและเข้าถึงบริเวณที่

ไวต่อการรับสัมผัสก็จะเกิดผลกระทบต่อกระบวนการทางชีวเคมีและการควบคุมทางสรีระวิทยาของพืช แต่หากมีปริมาณน้อย พืชสามารถกำจัดหรือแก้ไขสถานะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ หากพืชไม่สามารถปรับสมดุลได้ ก็จะเกิดการตอบสนองของเซลล์โดยจะไปยับยั้งอัตราการสังเคราะห์แสง ลดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนและการสร้างคาร์โบไฮเดรต ตลอดจนการเจริญเติบโตของ Mycorrhizae ที่รากซึ่งมีผลต่อการดูดน้ำและอาหารของพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตช้า รวมทั้งส่งผลกระทบต่อความต้านทานแมลงและเชื้อโรคต่างๆของพืชด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของพืช

การตอบสนองของพืชต่อโอโซนนั้นได้รับอิทธิพลมาจากปัจจัยต่างๆ ทั้งทางด้านชีววิทยาเคมีและกายภาพ ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบของการรับสัมผัสก๊าซโอโซน จึงต้องพิจารณาทั้งอิทธิพลจากปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และผลกระทบของก๊าซโอโซนที่มีต่อการตอบสนองของพืช

ปัจจัยทางด้านชีวภาพที่มีอิทธิพลต่อภาวะเครียดของพืช ประกอบด้วย องค์ประกอบทางพันธุกรรม ระยะของการพัฒนา และรูปแบบการเปิดปากใบใน 1 วัน พันธุกรรมในพืชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการตอบสนองของพืชต่อก๊าซโอโซนซึ่งทำให้พืชมีความอ่อนแอ และมีความต้านทานต่อแมลงและเชื้อโรคต่างๆได้น้อยลง

ดัชนีบ่งชี้ถึงผลกระทบจากการรับสัมผัสก๊าซโอโซน

นักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมได้พยายามที่จะบ่งชี้และคำนวณปริมาณการรับสัมผัสก๊าซโอโซนในช่วงเวลาที่ต่าง ๆ กัน โดยใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซโอโซนเป็นฤดูกาล รายเดือน รายสัปดาห์ รายวัน หรือค่าเฉลี่ยในชั่วโมงที่สูงที่สุด การใช้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานจะถือเสมือนว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีผลต่อการตอบสนองของพืชเท่าเทียมกัน และเป็นการลดการตอบสนองของพืชต่อช่วงที่มีการรับสัมผัสก๊าซโอโซนสูงสุด ผลกระทบของก๊าซโอโซนจะเป็นผลกระทบสะสมและมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ช่วงเวลาในการรับสัมผัสก๊าซโอโซนถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตอบสนองของพืช เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีค่าต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ผลกระทบที่มีต่อพืชจะเกิดมากที่สุดในเวลาที่มีปากใบเปิดมากที่สุด เพราะมีการนำพาก๊าซโอโซนเข้าสู่ใบของพืชมากที่สุด การนำพาของอากาศมีผลต่อการตอบสนองของพืชอย่างรุนแรง เพราะก๊าซโอโซนจะต้องมีการสัมผัสกับผิวของใบจึงจะถูกนำเข้าสู่พืชได้ ผลกระทบที่มีต่อพืชจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของมลพิษที่พืชได้รับนั้นมากเกินไปกว่าความสามารถของพืชในการซ่อมแซมหรือปรับตัวต่อมลพิษนั้น การได้รับก๊าซโอโซนมากขึ้นจะยับยั้งการสังเคราะห์

แสงและลดผลผลิตของพืช ดัชนีที่ใช้บ่งชี้การรับสัมผัสในบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชรวมถึงการได้รับทางตรงหรือทางอ้อม อิทธิพลของสิ่งแวดล้อม (เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความชื้นของดิน) และพลศาสตร์ของการรับสัมผัส ดัชนีบ่งชี้ ณ ความเข้มข้นสูงสุด (Peak Indices) หมายถึง การได้รับสารที่ระดับความเข้มข้นสูงๆเพียงครั้งเดียว (1 หรือ 8 ชั่วโมง) ในช่วง 70-120 วันของฤดูกาลเจริญเติบโต ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการลดลงของผลผลิตหรือการเจริญเติบโต ในขณะที่ดัชนีเฉลี่ย (Mean Indices) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่ได้รับสารนั้นไม่มีความสำคัญ และทุกๆความเข้มข้นมีผลต่อพืชเท่ากัน เช่น 7 ชั่วโมงเฉลี่ยตลอดฤดูกาล ดัชนีที่รวมความเข้มข้นรายชั่วโมงระหว่างฤดูกาล และให้น้ำหนักความสำคัญต่อความเข้มข้นที่สูงๆ จะเป็นดัชนีที่มีความเหมาะสมในการพิจารณาความสัมพันธ์ของการรับสัมผัสในบรรยากาศกับผลกระทบทางด้านการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิต

การศึกษาทดลองจะให้น้ำหนักความสำคัญกับพืชที่มีคุณค่าในเชิงเศรษฐกิจ และต้นไม้ที่เพิ่งงอกออกมาใหม่ๆ พืชที่ใช้มักเป็นพืชชนิดเดียวกัน (Monocultures) ที่ได้รับการใส่ปุ๋ยและรดน้ำแล้วค่าจำกัด (Limiting Values) ซึ่งนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการสรุปถึงความเสียหายและการถูกทำลายของใบไม้ที่มองเห็นได้ ค่าจำกัด หมายถึง ค่าความเข้มข้นและระยะเวลาที่พืชได้รับสัมผัสก๊าซโอโซนที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่มองเห็นได้ ทั้งนี้ค่าจำกัดของก๊าซโอโซนมีค่า 0.05 ppm ในระยะเวลาหลายชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลามากกว่า 16 วัน เมื่อระยะเวลาที่รับสัมผัสก๊าซโอโซนลดลงเหลือ 10 วัน ค่าจำกัดของก๊าซโอโซนจะมีค่า 0.1 ppm และในระยะเวลาสั้น 6 วัน ค่าจำกัด 0.30 ppm โดยปกติค่าจำกัดของความเสียหายของใบของต้นไม้ และไม้พุ่มมีค่าระหว่าง 0.06-0.10 ppm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2.4.2.2 ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยาธรรมชาติ

โดยปกติพืชจะเก็บสะสมและใช้พลังงานในรูปสารประกอบคาร์บอน (น้ำตาล) ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างโครงสร้างต่างๆ และรักษากระบวนการทางสรีระวิทยาที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตเอาไว้ การเคลื่อนย้ายคาร์บอนสู่ลำต้นและใบนั้นเกิดขึ้นตลอดช่วงชีวิตของพืชซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาวะแวดล้อม และจะส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืช ต้นไม้ใหญ่ที่มีการเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีอัตราการหายใจมากกว่าการสังเคราะห์แสง ทั้งนี้เพื่อสร้างเนื้อเยื่อ การลดการสังเคราะห์แสงจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนย้ายคาร์บอนเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตไปเป็นใช้เพื่อการซ่อมแซมแทน ส่วนอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เกิดภาวะสมดุลในธรรมชาติ

ในป่าผสม ฅ ภูเขา San Bernardino บริเวณทางใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบอันรุนแรงต่อระบบนิเวศน์จากการเปลี่ยนแปลงของก๊าซโอโซนอย่างต่อเนื่องตลอด 5 ปีหรือนานกว่านั้น จากข้อมูลระหว่างปี 1968-1972 บ่งชี้ว่าในช่วงเวลา 5 เดือนของทุกๆปี ต้นไม้จะได้รับก๊าซโอโซนในระดับความเข้มข้นมากกว่า 0.08 ppm และนานกว่า 1,300 ชั่วโมง และแทบไม่พบก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.05 ppm เลยที่บริเวณใกล้เคียงเขาซึ่งสูงประมาณ 5,500 ฟุต นอกจากนี้ระหว่างปี 1973-1978 ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของปริมาณก๊าซโอโซนเข้มข้นต่ำสุด 0.03-0.04 ppm (ทางด้านตะวันออกของภูเขา) ถึงจุดสูงสุด คือ 0.10-0.12 ppm (ทางด้านตะวันตกของภูเขา) ตลอดเดือนพฤษภาคม-กันยายน ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์จากการเปลี่ยนแปลงของก๊าซโอโซนนี้ แสดงนัยสำคัญให้เห็นว่าก๊าซโอโซนสามารถส่งผลกระทบต่อการสะสมและใช้พลังงานในรูปสารประกอบคาร์บอน น้ำ ตลอดจนการลำเลียงเคลื่อนย้ายธาตุอาหาร

การเปลี่ยนแปลงในการสังเคราะห์แสงหรือการเคลื่อนย้ายของคาร์บอนเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อโครงสร้างของป่าได้อย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยใดๆในประชากรพืช แม้เพียงเล็กน้อยก็ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์โดยรวมได้ ปัจจัยต่างๆนั้นเริ่มต้นเกิดขึ้นในระดับของโมเลกุลจากภายในใบ แล้วขยายออกไปจนถึงกิ่งก้าน ลำต้น และราก

ผลกระทบขั้นต้นของก๊าซโอโซนที่เห็นได้ในต้นสน Ponderosa และ Jeffrey ซึ่งเป็นพืชที่พบในป่าผสม ฅ ภูเขา San Bernardino เพราะเป็นต้นไม้ที่มีความไวต่อผลกระทบจากก๊าซโอโซน ทำให้พืชดังกล่าวไม่สามารถทนการแก่งแย่งธาตุอาหาร น้ำ แสง และที่อยู่อาศัยได้นานนัก ดังนั้นพืชชนิดอื่นจึงขึ้นมาทดแทน จึงสรุปได้ว่าถ้าประชากรเด่นๆในระบบนิเวศน์สูญพันธุ์ไปก็สามารถมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง กระบวนการถ่ายเทพลังงาน และระบบหมุนเวียนของธาตุอาหารได้

นอกจากนี้ยังพบความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อต้นไม้ และพืชผักชนิดที่ไวต่อก๊าซโอโซนซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่า 0.06 ppm ในบริเวณภูเขา Sierra Nevada และภูเขา Appalachian จากรัฐจอร์เจียถึงรัฐ Maine ในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ความเสียหายดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์เหมือนที่เกิดกับภูเขา San Bernardino เนื่องจากป่ามีพัฒนาการด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันมาก ชนิดของพืชพันธุ์ที่เป็นส่วนประกอบของป่านี้ๆก็มีความทนทานและความสามารถในการฟื้นฟูจากการทำลายที่แตกต่างกัน

2.4.2.3 ผลกระทบต่อเกษตรกรรม ป่าไม้ ระบบนิเวศน์ และเศรษฐกิจ

การประเมินผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อผลผลิตเกษตรกรรมทำได้โดยใช้ National Crop Loss Assessment Network (NCLAN) เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตทางเกษตรกรรม แม้ว่าจะในแต่ละการศึกษาจะใช้วิธีการที่แตกต่างกัน แต่ผลลัพธ์ที่ได้ของแต่ละวิธีต่างก็แสดงให้เห็นถึงระดับการสูญเสียของผลผลิตหลักเป็นจำนวนกว่า 1 พันล้านบาท จากการได้รับสัมผัสก๊าซโอโซน ความเข้มข้นสูงในอากาศ ในการศึกษายังได้ประเมินคุณค่าทางเศรษฐกิจ และความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยรูปแบบการประเมินทางเศรษฐกิจนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้หาค่าผลผลิตในอนาคตที่มีผลกระทบจากก๊าซโอโซนได้

2.4.3 ผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อวัสดุ

ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง จากการวิจัยพบว่า ก๊าซโอโซนสามารถทำลายวัสดุต่างๆ ได้ เช่น ฝ้าย ย้อม ยางธรรมชาติ Elastomer และ โพลีเมอร์สังเคราะห์ของ Butadiene, Isoproprene และ Styrene ซึ่งใช้ในยางรถยนต์ และท่อหุ้มสายไฟ นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซโอโซนทำให้สีในวัสดุจำพวกไนลอนซีดเร็วกว่าปกติ และทำให้ผ้าฝ้าย ไนลอน และ Acrylic Fiber เปื่อยยุ่ยเร็วกว่าปกติ แต่สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ เช่น Modacrylic และ Polymer จะค่อนข้างทนทานและไม่ถูกทำลายโดยก๊าซโอโซน

2.5 มาตรฐานในการควบคุมปริมาณโอโซนในบรรยากาศ

2.5.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศของไทย

มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย เป็นไปตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 และฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2538) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.5.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศของสหรัฐอเมริกา

มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของสหรัฐอเมริกา (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยสำนักงานพิทักษ์รักษาสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency, EPA) ภายใต้กฎหมายอากาศสะอาด (Clean Air Act 1990) ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- 1.) *มาตรฐานขั้นต้น (Primary Standard)* เป็นการกำหนดขีดจำกัดเพื่อป้องกันสุขภาพของสาธารณชน รวมถึงสุขภาพของประชาชนที่ไวต่อการรับสัมผัส เช่น เด็กและคนชราที่เป็นโรคหืด
- 2.) *มาตรฐานขั้นที่สอง (Secondary Standard)* เป็นการกำหนดขีดจำกัดเพื่อป้องกันสวัสดิภาพของสาธารณชน รวมถึงการมองเห็น สัตว์ พืชผล ผัก และอาคารต่างๆ

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2538)

ชนิดของก๊าซหรือสาร	ค่ามาตรฐาน	วิธีการวัด
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 30 สนล. (34.2 มก./ม ³) เฉลี่ย 8 ชั่วโมง ไม่เกิน 9 สนล. (10.26 มก./ม ³)	Non-dispersive Infrared Detection
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.17 สนล. (0.32 มก./ม ³)	Chemiluminescence
ก๊าซโอโซน (O ₃)	เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.10 สนล. (0.20 มก./ม ³)	Chemiluminescence
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.30 สนล. (0.78 มก./ม ³)* เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.11 สนล. (0.11 มก./ม ³) เฉลี่ย 1 ปี ไม่เกิน 0.04 สนล. (0.10 มก./ม ³)	Pararosaniline
ตะกั่ว (Pb)	เฉลี่ย 1 เดือนไม่เกิน 1.5 มคก./ม ³	Atomic Absorption Spectrometer
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10)	เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.12 มก./ม ³ เฉลี่ย 1 ปี ไม่เกิน 0.05 มก./ม ³	Gravimetric
ฝุ่นละอองรวม (TSP)	เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.33 มก./ม ³ เฉลี่ย 1 ปี ไม่เกิน 0.10 มก./ม ³	Gravimetric

* เฉพาะพื้นที่ที่กำหนดในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ต้องไม่เกิน 0.50 สนล. (1.3 มก./ลบ.ม.)

ทั้งนี้ คำนวณค่าความเข้มข้นของก๊าซเทียบที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ย 1 ปี เป็นค่ามัธยัมเรขาคณิต (Geometric Mean)

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของสหรัฐอเมริกา (Clean Air Act 1990)

สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน		ชนิดของมาตรฐาน
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)			
ค่าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง	9 สนล.	(10 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้น
ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง	35 สนล.	(40 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้น
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)			
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต 1 ปี	0.053 สนล.	(100 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ก๊าซโอโซน (O ₃)			
ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง*	0.12 สนล.	(235 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ค่าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง	0.08 สนล.	(157 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ตะกั่ว (Pb)			
ค่าเฉลี่ย 3 เดือน		1.5 มก./ลบ.ม.	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
อนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM ₁₀)			
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต 1 ปี		50 มก./ลบ.ม.	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง		150 มก./ลบ.ม.	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
อนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM _{2.5})			
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต 1 ปี		15 มก./ลบ.ม.	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง		65 มก./ลบ.ม.	ขั้นต้นและขั้นที่สอง
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)			
ค่าเฉลี่ยเลขคณิต 1 ปี	0.03 สนล.	(80 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้น
ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง	0.14 สนล.	(365 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นต้น
ค่าเฉลี่ย 3 ชั่วโมง	0.50 สนล.	(1300 มก./ลบ.ม.)**	ขั้นที่สอง

* ค่ามาตรฐานก๊าซโอโซน 1 ชั่วโมง ใช้กับพื้นที่ที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน (Non-attainment Area) ส่วนค่ามาตรฐาน 8 ชั่วโมง ถูกนำมาใช้ในปี ค.ศ. 1997

** ค่าในวงเล็บเป็นค่าความเข้มข้นเทียบเท่าโดยประมาณ

2.5.3 มาตรฐานสารมลพิษจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์

สำหรับรถจักรยานยนต์ทั่วไปที่ใช้งานอยู่บนท้องถนน

- 1.) ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ขณะเดินเบา ต้องไม่เกินร้อยละ 4.5 โดยปริมาตรที่วัดได้ด้วยเครื่องมือที่ทำงานด้วยระบบนั้ดิสเปอร์ซีฟอินฟราเรด (NON-DISPERSIVE INFRARED) หรือ NDIR
- 2.) ค่าก๊าซไฮโดรคาร์บอนจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ขณะเดินเบา ต้องไม่เกินปริมาณ 10.000 ส่วนในล้านส่วนที่วัดได้ด้วยเครื่องมือที่ทำงานด้วยระบบนั้ดิสเปอร์ซีฟอินฟราเรด (NON-DISPERSIVE INFRARED) หรือ NDIR
- 3.) ปริมาณควันขาวจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ขณะเร่งเครื่องที่ $\frac{3}{4}$ ของความเร็วรอบสูงสุด ต้องไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดระบบ Full-Flow Opacity

สำหรับรถจักรยานยนต์ใหม่ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานสารมลพิษจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ใหม่ (มอก.1360-2539)

รายการ	ระดับที่ 3	ระดับที่ 4
1. ระดับมลพิษ การทดสอบลักษณะที่ 1 : แบบการขับจั้งจริง	CO = 13 กรัม/กม. HC = 5 กรัม/กม.	CO = 4.5 กรัม/กม. HC+NO _x = 3 กรัม/กม.
การทดสอบลักษณะที่ 2 : แบบเดินเบา	CO = 4.5 % HC = 10,000 สนล.	ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
2. การทดสอบความทนทาน	-	ทดสอบการวิ่งที่ 6,000 กม. รับประกันที่ 12,000 กม.
3. ระดับควันขาว	-	15%
4. ระดับการระเหย	-	2 กรัมต่อการทดสอบ สำหรับ เครื่องยนต์ขนาดมากกว่า 150 ซี.ซี.
5. เริ่มบังคับใช้	≤ 110 ซี.ซี. 1 ก.ค. 2538 ≤ 125 ซี.ซี. 1 ก.ค. 2539 ทุกขนาด 1 ก.ค. 2540	≤ 110 ซี.ซี. 1 ก.ค. 2542 ≤ 125 ซี.ซี. 1 ก.ค. 2543 ทุกขนาด 1 ก.ค. 2544

2.6 การศึกษาที่ผ่านมา

SAGIURA และ KAGAYA (2520) (อ้างถึง โดย สมร มุตตามระ และคณะ, 2537) เชื่อว่าควันขาวเป็นส่วนของน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ถูกเผาไหม้ และมีมากถึง 95% ของฝุ่นละอองทั้งหมดที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์

Yashiro (1987) (อ้างถึง โดย สัจญา ปานน้อย และ พรรณทวี ธรรมธราธาร, 2540) ได้กล่าวว่า ควันขาว (White Smoke) เกิดจากส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ ที่ไม่ถูกเผาไหม้ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ในจังหวะกำลัง (Power Stroke) โดยในจังหวะกำลังซึ่งเกิดการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบนั้น น้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะส่วนหนึ่งจะได้รับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอน้ำมัน (Oil Vapor) เมื่อไอน้ำมันนี้ถูกไล่ปะปนออกมากับไอเสียในจังหวะคาย ไอเสียจะเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศ เกิดการเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นละอองของเหลว (Oil Mist) ซึ่งมองเห็นเป็นกลุ่มควันสีขาวออกมาจากท่อไอเสีย

Yashiro ได้ทำการทดลองพบว่า ปริมาณควันขาวจะมีค่าน้อยสัมพันธ์กับค่าพลังงานปฏิกิริยา (พลังงานทางความร้อนที่จ่ายออกมาจากน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ ภายหลังจากที่น้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะได้รับและเก็บความร้อนไว้ในตัวเองโดยกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำมัน โดยสมบูรณ์ และช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำมันนี้อยู่ระหว่าง 180-570 °C) ที่วัดได้ของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ เมื่อนำไปวัดด้วยเครื่องมือ DSC (Differential Scanning Calorimeter)

สมร และคณะ (2537) ได้ทำการตรวจวัดมลพิษจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ 2 จังหวะ จำนวน 32 คัน เมื่อมีการเติมน้ำมันหล่อลื่นแบบธรรมดา และแบบลดควันขาว (ผสมสาร Polyisobutylene : PIB) แล้วพบว่า

- (1.) ปริมาณ CO ที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ที่มีการเติมน้ำมันหล่อลื่นแบบธรรมดา และแบบลดควันขาว เท่ากับ 3.734% และ 3.642% ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นแบบลดควันขาวไม่ช่วยทำให้ปริมาณ CO ลดลง
- (2.) ค่าเฉลี่ยปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ที่มีการเติมน้ำมันหล่อลื่นแบบธรรมดา และแบบลดควันขาว เท่ากับ 11,705 ส่วนในล้านส่วน และ 10,263 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นแบบลดควันขาวช่วยทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ปล่อยออกมาลดลง
- (3.) ค่าเฉลี่ยปริมาณ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ที่มีการเติมน้ำมันหล่อลื่นแบบธรรมดา และแบบลดควันขาว เท่ากับ 0.881 ส่วนในล้านส่วน และ 0.739 ส่วนในล้าน

ส่วน ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นแบบลดควันขาวไม่ช่วยลดการปล่อย NO_x

(4.) จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของควันขาวด้วยเครื่อง GC/MS พบว่าสารที่วิเคราะห์ได้เกือบทั้งหมดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มเบนซีน และอนุพันธ์ของเบนซีน

(5.) จากการวิเคราะห์แนวโน้มของการปล่อยมลพิษเมื่อรถจักรยานยนต์มีระยะทางการวิ่งใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยวิธี Regression Analysis พบว่า แนวโน้มการปล่อยมลพิษแต่ละชนิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อาจคงที่ เพิ่มขึ้น หรือลดลง ก็ได้ ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของผู้ขับขี่ และการบำรุงรักษาเครื่องยนต์

สัญญา และ พรรณทวี (2540) กล่าวว่า ส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะทั่วไปจะมีอยู่ด้วยกัน 3-5 ชนิด ได้แก่ น้ำมันพื้นฐานจากปิโตรเลียม (Mineral Base Oil) น้ำมันพื้นฐานสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) ส่วนผสมที่มีสมบัติลดควันขาว ตัวทำละลาย (Solvent) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additive Package) ทั้งนี้ ประเภท ชนิด และปริมาณของส่วนผสมที่ใช้จะขึ้นกับสมบัติทางเคมีและกายภาพที่กำหนดตลอดจนสมบัติของน้ำมันที่ต้องการเมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐานหรือนำไปใช้งานจริงในรถจักรยานยนต์

สัญญา และ พรรณทวี ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนผสมในน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะที่มีต่อระดับควันขาวที่ปล่อยออกมาจากรถจักรยานยนต์ โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานปฏิกิริยาของสาร 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวทำละลาย กลุ่มที่มีสมบัติลดควันขาว และกลุ่มที่มีสมบัติในการหล่อลื่นสูง พบว่า

(1.) การใช้สารตัวทำละลายเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ นอกจากไม่ทำให้ควันขาวเพิ่มขึ้นแล้วน่าจะมีส่วนช่วยทำให้ควันขาวลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายใช้ผสมในน้ำมันหล่อลื่น 2 จังหวะ เพื่อปรับความหนืดและจุดวาบไฟให้เหมาะสม ฉะนั้น Parameter ที่ใช้ควบคุมปริมาณการใช้ตัวทำละลายก็คือ ค่าความหนืด และจุดวาบไฟนั่นเอง

(2.) สาร PIB 950 ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารที่มีสมบัติลดควันขาว มีแนวโน้มช่วยลดควันขาวได้มากกว่าส่วนผสมชนิดอื่น

(3.) สารในกลุ่มที่มีสมบัติด้านการหล่อลื่นสูงจะมีค่าพลังงานปฏิกิริยาดำสุด ซึ่งอาจมีส่วนทำให้ควันขาวในไอเสียสูงขึ้น

Paul V. Doskey และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดต่างๆของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่รวมมีเทน (Nonmethane Organic Compounds; NMOCs) ในบรรยากาศของกรุงไคโร ประเทศอียิปต์ และได้จำแนกแหล่งกำเนิดต่างๆไว้ดังนี้

- (1.) จากยานพาหนะ
- (2.) จากน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ได้แก่ ก๊าซโซลีน, LPG และก๊าซธรรมชาติ
- (3.) จากโรงกลั่นน้ำมัน

(4.) โรงงานหลอมและหล่อเหล็ก

สารไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 100 ชนิด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ได้ถูกจำแนกและหาปริมาณด้วยเครื่อง GC/FID และศึกษาถึงความเกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดต่างๆด้วย Chemical mass-balance (CMB) source-reconciliation model แล้วพบว่า

- ไอระเหยของก๊าซโซลีนสามารถจำแนกออกจากไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นได้ โดยพิจารณาจากปริมาณความเข้มข้นที่สูงของไฮโดรคาร์บอนอิมตัวที่มี 5 และ 6 อะตอมคาร์บอน
- NMOCs ที่ปล่อยออกมาจากยานพาหนะจะคล้ายคลึงกับไอระเหยของก๊าซโซลีน แต่จะมีความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิมตัว และแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนสูงกว่า
- NMOCs ที่ปล่อยออกมาจากโรงกลั่นน้ำมันจะมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนอิมตัวที่มี 2 ถึง 4 อะตอมคาร์บอนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง n-butane
- NMOCs ที่ปล่อยออกมาจากโรงงานหลอมและหล่อเหล็กจะคล้ายคลึงกับโรงกลั่นน้ำมัน แต่จะมีปริมาณความเข้มข้นของเบนซิน และโทลูอิน สูงกว่า
- NMOCs จากไอระเหยของ LPG และก๊าซธรรมชาติ จะมีปริมาณความเข้มข้นของ n-butane และ ethane สูง ตามลำดับ

Doskey และคณะ (1999) กล่าวว่า โพรไฟล์แหล่งกำเนิด NMOCs ของกรุงไคโรนั้นแตกต่างจากของสหรัฐอเมริกาอย่างสิ้นเชิง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโพรไฟล์แหล่งกำเนิด NMOCs นั้นขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละพื้นที่

Tom R. Thijssse และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดต่างๆที่มีผลต่อสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds; VOCs) ในบรรยากาศของกรุงเบอร์ลิน ประเทศเยอรมัน โดยทำการวิเคราะห์ VOCs ที่อยู่ในช่วง C_1 - C_{14} รวมทั้ง อัลคิลไฮด์ และ คีโตน

พื้นที่ที่เก็บตัวอย่างอากาศ ได้แก่ แถบชานเมือง (เพื่อใช้เป็น Background) และตามแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัย และถนนหนทางต่างๆในตัวเมือง (ซึ่งคาดว่าจะเป็แหล่งกำเนิด VOCs ที่มีความเกี่ยวข้องกับ VOCs ในบรรยากาศ)

ในการเก็บตัวอย่างอากาศได้ทำการเก็บ 4 ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ กลางคืน, ชั่วโมงเร่งด่วนในตอนเช้า, กลางวัน และชั่วโมงเร่งด่วนในตอนกลางคืน โดยในแต่ละช่วงเวลาทำการเก็บตัวอย่างอากาศ 2 ชั่วโมงต่อวัน

ในการประเมินแหล่งกำเนิดชนิดต่างๆ กระทำโดยใช้เทคนิค CMB modelling

ผลการศึกษาพบว่า ;

- ความเข้มข้นของ VOCs จากพื้นที่ชุมชนที่อยู่อาศัย และถนนภายในตัวเมืองชั้นในมากกว่า แถบชานเมือง 3 และ 7 เท่า ตามลำดับ

- ไอเสียจากการจราจรมีปริมาณความเข้มข้น NMOCs ประมาณ 80-90 % ในตัวเมืองชั้นใน และ 60% ในแถบชานเมือง
- ไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิง คิดเป็นปริมาณประมาณ 7% ของทุกพื้นที่
- การรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติก็เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญเช่นกัน จากการสังเกตพบว่ามีปริมาณประมาณ 5-10% ในเขตตัวเมืองชั้นใน และประมาณ 30% สำหรับพื้นที่ชานเมือง
- แหล่งกำเนิดอื่นๆที่มีปริมาณน้อยมาก ได้แก่ ร้านซักแห้ง การใช้ตัวทำละลาย และการปล่อยออกมาจากสิ่งมีชีวิต (Biogenic emissions)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2535) ได้ทำการศึกษาระบบฐานข้อมูลของแหล่งกำเนิดอากาศเสียในกรุงเทพฯและปริมณฑล เสนอต่อกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม โดยได้ทำการศึกษาถึงปริมาณของมลพิษชนิดต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง, SO₂, CO, NO_x, ตะกั่ว และ VOCs เป็นต้น จากแหล่งกำเนิดต่างๆ อันได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า พาณิชยกรรม ที่อยู่อาศัย การจราจรทางถนน และการคมนาคมอื่นๆ ผลการศึกษาในส่วนของ VOCs แสดงให้เห็นว่า การจราจรบนท้องถนนเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญในการปล่อย VOCs ออกสู่บรรยากาศ โดยเมื่อจำแนกตามประเภทของยานพาหนะ พบว่า จักรยานยนต์ปล่อย VOCs ออกสู่บรรยากาศมากเป็นอันดับที่สอง ในกลุ่มของยานพาหนะ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และ 2.8

ตารางที่ 2.7 ปริมาณมลพิษจากการจราจรทางถนน พ.ศ. 2535 (หน่วย : ตัน/ปี)

(คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535)

ประเภทรถ	ปริมาณการปล่อยมลพิษ					
	NO _x	SO ₂	CO	SPM	HC	Pb
ขนาดเล็ก	117.45	31.49	3,718.98	164.57	470.95	0.594
ขนาดกลาง	34.70	16.39	42.33	94.16	16.73	0
ขนาดใหญ่	223.83	24.00	141.80	125.10	42.10	0
จักรยานยนต์	5.18	5.08	778.89	253.84	452.92	0
รวม	381	77	4,682	638	983	0.594

Patyk and Hopfner (1995) (อ้างถึง โดย C. Nicholas Hewitt, 1999) ได้ทำการศึกษาถึงชนิดของ VOCs ที่เกิดจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน ผลการศึกษาแสดงให้เห็น ดังตารางที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นว่า ในเครื่องยนต์ 4 จังหวะ และ 2 จังหวะ แบบไม่มี Catalyst จะปล่อย VOCs ในกลุ่มอัลคีน ได้แก่ Ethene (หรือ Ethylene) และในกลุ่มเอโรมาติก ได้แก่ Benzene, Toluene, Xylene และ C₉ aromatics ออกมาพร้อมกับไอเสียมากกว่า VOCs ชนิดอื่น

ตารางที่ 2.8 ปริมาณมลพิษจากการจราจรทางถนน พ.ศ. 2535 (หน่วย : %)
(คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535)

ประเภทรถ	ปริมาณการปล่อยมลพิษ					
	NO _x	SO ₂	CO	SPM	HC	Pb
ขนาดเล็ก	30.81	40.91	79.43	25.81	47.93	100.00
ขนาดกลาง	9.10	21.30	0.90	14.77	1.70	0
ขนาดใหญ่	58.73	31.19	3.03	19.62	4.28	0
จักรยานยนต์	1.36	6.60	16.64	39.80	46.09	0
รวม	100	100	100	100	100	100

ตารางที่ 2.9 ส่วนประกอบของ VOCs ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน
(Patyk and Hopfner, 1995)

	Otto engine, four stroke, without catalyst	Otto engine, four stroke, 3-way catalyst	Otto engine, two stroke, without catalyst	Diesel engine
Paraffins				
Methane	4.0	14.0	7.0	2.4
Ethane	0.8	2.0	1.0	
Propane	0.3	0.5		
Butane	3.0	6.0	2.0	
Isobutane	2.0	3.0	0.3	
Pentane	2.0	2.5	3.0	
Isopentane	5.0	7.5	4.0	
Olefins				
Ethene	7.0	4.5	5.0	12.2
Propene	4.0	2.5	2.0	4.7
1-Butene	0.4	0.1		
Isobutene	2.5	1.5		0.8
cis-2-Butene	0.2	0.2	0.4	0.8
trans-2-Butene	0.8	0.6	0.2	0.7
1,3-Butadiene	0.6	0.4		1.1

ตารางที่ 2.9 ส่วนประกอบของ VOCs ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน (ต่อ)

	Otto engine, four stroke, without catalyst	Otto engine, four stroke, 3-way catalyst	Otto engine, two stroke, without catalyst	Diesel engine
Pentene	1.1	0.7		
Alkynes				
Ethyne	5.5	3.0	4.0	2.8
Aromatic hydrocarbons				
Benzene	5.0	6.0	5.0	1.9
Toluene	11.5	10.0	12.1	0.8
Xylene	10.0	9.0	11.0	0.8
Ethylbenzene	2.5	2.0	2.8	0.3
C ₉ aromatics	7.5	6.0	8.3	
Aldehydes				
Formaldehyde	1.5	1.0	0.6	8.1
Acetaldehyde	0.7	0.6	0.2	4.2
Acrolein	0.4	0.2	0.0	2.1
Benzaldehyde	0.3	0.2	0.2	1.8
Tolualdehyde	0.5	0.4	0.2	1.0
Ketones				
Acetone	0.6	0.5	0.1	1.5
Other VOCs	20.3	15.1	30.6	52.0

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่แสดงเป็นค่าร้อยละ โดยน้ำหนัก

Martin Hooper (2000) กล่าวว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มอัลคีน (หรือโอลิฟิน) เป็นกลุ่มที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในการเกิดโฟโตเคมีคัลสมีอกมากที่สุด และจำแนก VOCs ออกเป็น 5 ลำดับชั้น ตามค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยแต่ละชั้นขนาดต่างกัน 5 เท่า ดังนี้

ลำดับที่ 1 Methane

ลำดับที่ 2 Ethane

ลำดับที่ 3 Propane , Iso-pentane , Ethene , Benzene , Toluene

ลำดับที่ 4	p-Xylene , Propene , 1,3-Butadiene , β -Pinene
ลำดับที่ 5	d-Limonene

จูติมา (2543) ได้ทำการศึกษาระดับความเข้มข้นของ BTX (เบนซีน โทลูอิน และไซลีน) ในไอเสียของรถจักรยานยนต์ จำนวน 44 คัน ที่สภาวะรอบเครื่องเดินเบา (Idle Test) โดยพิจารณาถึงชนิดของเครื่องยนต์ (2 จังหวะและ 4 จังหวะ) และอายุของเครื่องยนต์ (รถใหม่ อายุน้อยกว่า 5 ปี, รถกลางเก่า กลางใหม่อายุ 5-10 ปี และรถเก่า อายุมากกว่า 10 ปี) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.10 พบว่า

- 1.) เครื่องยนต์ 2 จังหวะปล่อย BTX ออกมาปริมาณมากกว่าเครื่องยนต์ 4 จังหวะ
- 2.) อายุของเครื่องยนต์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BTX ที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์อย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 2.10 ปริมาณความเข้มข้นของ BTX ที่ปล่อยออกมาไอเสียรถจักรยานยนต์ (จูติมา, 2543)

ชนิดเครื่องยนต์	อายุเครื่องยนต์	ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)		
		Benzene	Toluene	Xylene
2 จังหวะ	<5	83.22	192.82	29.90
	5-10	108.55	219.75	30.57
	>10	116.15	261.73	39.21
4 จังหวะ	<5	11.74	29.00	7.59
	5-10	30.55	45.55	7.86
	>10	32.85	93.18	21.45

กรมควบคุมมลพิษ (2543) ได้ว่าจ้างบริษัทซีคอตให้ดำเนินโครงการปรับปรุงฐานข้อมูลแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ และประเมินผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เนื่องจากฐานข้อมูลเดิมได้จัดทำไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 สารมลพิษที่ทำการศึกษาประกอบด้วย NO_x , SO_2 , CO, VOC, และฝุ่นละออง ผลการศึกษาในส่วนของ NO_x และ VOC แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 อัตราการระบายสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดชนิดต่างๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

แหล่งกำเนิด	อัตราการระบายสารมลพิษในปี พ.ศ. 2540 (ตัน/ปี)		
	NO _x	VOC	HC
เฉพาะตำแหน่ง	56,002	2,005	-
ชนิดพื้นที่	8,511	33,904	-
ชนิดเคลื่อนที่	264,648	-	232,973
รวม	329,161	35,909	232,973

ค่า HC จากตารางที่ 2.11 ก็คือค่า VOC นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องวัดระบบ CVS จากห้องปฏิบัติการตรวจวัดมลพิษจากยานพาหนะของกรมควบคุมมลพิษจะแสดงผลออกมาในรูปของปริมาณไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (Total Hydrocarbon, THC) ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า แหล่งกำเนิดชนิดเคลื่อนที่เป็นแหล่งกำเนิดที่ปล่อย VOC ออกสู่บรรยากาศมากที่สุด และเมื่อพิจารณาตามประเภทของยานพาหนะจะเห็นว่า จักรยานยนต์เป็นพาหนะที่ปล่อย VOC ออกมามากที่สุด ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 อัตราการระบายสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดชนิดเคลื่อนที่ จำแนกตามประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

แหล่งกำเนิด	อัตราการระบายสารมลพิษในปี พ.ศ. 2540 (ตัน/ปี)	
	NO _x	HC
รถยนต์เครื่องยนต์เบนซิน	34,133	35,886
รถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	65,836	15,739
รถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่	163,703	17,671
รถจักรยานยนต์	976	163,677
รวม	264,648	232,973