รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงให้มีความหลากหลาย สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในรถยนต์ 4 ล้อ

Development of Alternative Fuel for Diesel Engine Using in 4 Wheels Car

ผู้วิจัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาริสา จินะศิษฐ์

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
งบประมาณผลประโยชน์ ปี พ.ศ. 2550
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงให้มีความหลากหลาย สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในรถยนต์ 4 ล้อ

Development of Alternative Fuel for Diesel Engine Using in 4 Wheels Car

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาริสา จินะดิษฐ์

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณผลประโยชน์ ปี พ.ศ. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติน้ำมันดีเซลให้มีความเหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันพืช โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นเอสเทอร์ (Esterificattion) และใช้แอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์เป็นผลิตผลที่สามารถผลิตได้ในประเทศ ในการวิจัยได้ใช้น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าวเป็นตัวแทนของน้ำมันพืช และใช้เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เป็นสารตัวช่วยการเผาไหม้ดีเซลให้สมบูรณ์ จากสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันดีเซลผสมที่ได้ สามารถออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และอุปกรณ์ป้อนแอลกอฮอล์สำหรับทดสอบการทำงานร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซล รวมทั้งอุปกรณ์ทดสอบลักษณะการเกิดการกระจายตัวของละอองน้ำมันผสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันพืชร่วมกับแอลกอฮอล์ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง ผลการทดสอบการทำงานในสภาพการใช้งานจริงเป็นระยะทางมากกว่า 100,000 กิโลเมตร พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลระบบป้อนน้ำมันด้วยหัวฉีดแบบกลไกสามารถใช้น้ำมันพืชร่วมกับน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์ได้ โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์แต่อย่างใด สำหรับเครื่องยนต์ระบบคอมมอนเรล (Commonrail) พบว่าการใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันพืชนั้นไม่เหมาะที่นำมาใช้กับเครื่องยนต์ แต่การใช้แอลกอฮอล์ร่วมกับน้ำมันดีเซลส่งผลทำให้การทำงานของเครื่องยนต์ระบบคอมมอนเรลดีขึ้นกว่าเดิมโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ เทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถช่วยให้ผู้บริโภคสามารถมีทางเลือกในการใช้น้ำมันดีเซล น้ำมันพืชร่วมกับแอลกอฮอล์ได้หลากหลายตามสภาพของตลาดได้อย่างเหมาะสมต่อไป

Abstract

The objective of the research was to develop the technology of non-transesterified triglyceride-diesel mixtures using alcohol as a combustion assisted materials as an alternative fuels for compressed ignition (diesel) engine. Three types of vegetable oils, and three types of alcohols were selected for the testing materials. Both mechanical pump engine and commonrail engine were selected as tested engines. The tests were performed both on engine test bed and on real traffic road. After test run over 100,000 kilometers, the results shown that there were no significant different in engine damage due to the present of non-transesterified triglycerides and alcohols in the intake manifolds and combustion engine. The results also indicated that the vegetable oils diesel mixtures using alcohols as combustion assist were appropriated with the mechanical-pump diesel engine whereas the commonrail engine was not. There was a positive evidence that alcohol was potential decreased in fuels consumption in the case of the commonrail engine. The technology developed from the research breeds not only to the alternative choices of fuels for the medium-speed and low-speed diesel engine type but also to perform enhancement of diesel engines using alcohols as combustion assist material.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณผลประโยชน์ประจำปี 2550 ในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ขอขอบคุณผู้จัดการส่วนควบคุมคุณภาพบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือทดสอบน้ำมันดีเซล

ท้ายนี้ขอขอบคุณคุณอรุณ ไชยพันธุ์ วิศวกรผู้ทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์

สารบัญ

สารบัญตาราง

หน้า

สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้ระบุถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาทางด้านพลังงานและเชื้อเพลิงนั้น เป็นปัญหาสำคัญทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยที่กำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน วิกฤติพลังงานที่เกิดขึ้นทำให้ต้องตระหนักถึงความสำคัญและการมองหาพลังงานทดแทนเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ น้ำมันจะไม่เพียงพอต่อความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น พลังงานทดแทนที่นิยมมาใช้ในเครื่องยนต์ ได้แก่ แก๊สโซฮอล์ แก๊สธรรมชาติ และไบโอดีเซล เป็นต้น ประเทศต่างๆ ทั่วโลกได้ทำการศึกษาแนวทางเพื่อรองรับวิกฤติการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้นี้ นอกจากปัญหาราคาที่สูงขึ้นของน้ำมันดีเซลแล้ว ยังมีปัญหามลพิษจากไอเสียเนื่องจากน้ำมันดีเซลมีโมเลกุลใหญ่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ เขม่า แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นสารที่เกิดอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องหาวิธีพึ่งพาตนเองในการดำเนินธุรกิจเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องหาทางออก ด้วยการแปรรูปการใช้งานจากน้ำมันที่มีอยู่บางชนิด มาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลให้ได้มากที่สุด เพื่อเป็นการลดรายจ่ายด้านเชื้อเพลิงลง

ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยมี 3 ประเภท คือ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ ไบโอดีเซลลูกผสม และไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ การนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงเป็นวิธีการที่ได้น้ำมันในราคาถูก โดยเฉพาะการนำน้ำมันพืชที่ยังไม่ผ่านการแปรสภาพเป็นเอสเทอร์มาใช้ แต่จะเกิดผลเสียต่อเครื่องยนต์หากขาดความรู้และความชำนาญในการปรับแต่ง และตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์ อีกแนวทางหนึ่งคือการผสมน้ำมันพืชต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้สามารถนำไปใช้กับรถยนต์ดีเซลซึ่งคาดว่าจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำมันดีเซลลงได้ 20 -30 % เป็นอย่างน้อย น้ำมันที่นิยมนำมาใช้ เช่น น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันปาล์ม เป็นต้น แต่ที่น่าสนใจศึกษาคือ น้ำมันปาล์ม เหตุผลเนื่องจากน้ำมันปาล์มราคาถูก หาง่าย และเป็นพืชเศรษฐกิจที่รัฐบาลส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกในปัจจุบัน

จากแนวคิดข้างต้นหากนำน้ำมันพืช หรือน้ำมันพืชที่ใช้งานแล้วผสมกับสารเคมีบางชนิดในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้น้ำมันพืชเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้เมื่อทำการอัดเข้าไปในเครื่องยนต์ดีเซล ดังนั้นเชื้อเพลิงผสมนี้ก็ไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการแปรรูปให้อยู่ในสภาพเอสเทอร์ก่อนทำให้ค่าใช้จ่ายยิ่งลดลงไปอีก เป็นการลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงผสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล
2. ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการเผาไหม้ที่ดีและเหมาะสมกับการใช้งาน
3. เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ของเชื้อเพลิงผสมกับน้ำมันดีเซล

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำมันพืชและสารช่วยการเผาไหม้ (แอลกอฮอล์) โดยกำหนดร้อยละโดยปริมาณของสารช่วยการเผาไหม้เป็น 5%,10%, 20% และ 40%
2. ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงผสม
3. ทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลในสภาพการใช้งานจริง
4. เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (กิโลเมตรต่อลิตร) ระหว่างน้ำมันดีเซลในท้องตลาด และเชื้อเพลิงผสมที่พัฒนาขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เชื้อเพลิงผสมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าน้ำมันดีเซล แต่มีราคาถูกกว่า สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลชนิด 4 ล้อ ทำให้สามารถใช้ผลผลิตที่มีในประเทศได้อย่างคุ้มค่า และเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรอีกทางหนึ่ง

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

น้ำมันปิโตรเลียม เป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของทุกประเทศ หลังจากวิกฤติการณ์น้ำมันซึ่งมีผลกระทบทางเศรษฐกิจอย่างรุนแรงต่อประเทศต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อประเทศที่กำลังพัฒนาซึ่งไม่มีแหล่งน้ำมันของตนเอง ก่อนที่จะมีการพบแหล่งแก๊สธรรมชาติ ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบต่อการเพิ่มราคาน้ำมันดิบของกลุ่มโอเปคเป็นอย่างมาก เนื่องจากแหล่งน้ำมันดิบที่พบในประเทศไทยมีไม่เพียงพอ จำต้องพึ่งการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ในขณะเดียวกันก็ได้ให้ความสนใจแก่พลังงานแหล่งอื่นๆ เช่น พลังงานทดแทน (Renewable Energy) ประเภทต่างๆ ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงแดด พลังงานน้ำ และแหล่งพลังงานที่ได้จากการแปรรูปวัตสุที่เหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรม พลังงานอย่างหนึ่งที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งมีพื้นฐานทางการเกษตรคือพลังงานจากแอลกอฮอล์ (Alcohol) โดยที่ความสนใจนั้นส่วนใหญ่มุ่งไปที่การนำเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) ไปใช้ผสมน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เรียกว่าแก๊สโซฮอล์ โดยที่รัฐบาลมีแนวโน้มจะให้มีการจำหน่ายแก๊สโซฮอล์ 95 ทั้งหมด ในปี พ.ศ. 2551 และรัฐบาลชุดปัจจุบันยังให้ความสำคัญในการผลิตไบโอดีเซล[2] เป็นอย่างมาก โดยมีการนำเอทิลแอลกอฮอล์ หรือเมทิลแอลกอฮอล์มาใช้ร่วมกับน้ำมันดีเซล เพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) ประเภทจุดระเบิด (Spark ignition) และอัดระเบิด (Compression ignition)[6]

นับเป็นเวลานานมาแล้วที่รัฐบาลทุกยุคทุกสมัย มุ่งส่งเสริมการพึ่งพาตนเองด้านพลังงาน โดยการนำพลังงานสะอาดมาใช้พร้อมทั้งออกมาตรการต่างๆ มากมายเพื่อให้เกิดการแข่งขัน การพัฒนา การสร้างแรงจูงใจ และดำเนินการลดมลพิษต่างๆ ที่มาจากการเผาไหม้ น้ำมันเพื่อให้สิ่งแวดล้อมและความเป็นอยู่ของประชากรดีขึ้น และจากการที่ภาคการคมนาคมขนส่งของประเทศเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนสูง และนับวันจะมีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จึงเป็นแรงผลักดันที่สำคัญในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลโดยเฉพาะเครื่องยนต์เก่า และผ่านการใช้งานนานจะพบปัญหา คือควันดำ ซึ่งมีบุคคลและคณะบุคคลได้พยายามศึกษาค้นคว้าและวิจัย หาวิธีลดปริมาณควันดำซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกันแต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรเมื่อนำมาใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะปัญหามลภาวะจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับมลภาวะทางอากาศเป็นอย่างมาก

การเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันอย่างต่อเนื่อง และไม่มีทีท่าว่าจะหยุด ทำให้ไบโอดีเซลได้รับความสนใจอีกครั้ง หลังจากเคยได้รับการส่งเสริมอยู่พักหนึ่ง แต่ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร แต่ในปัจจุบัน ไบโอดีเซล[5] ได้กลายเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์ชาติไปแล้ว ไบโอดีเซลสามารถทำมาจากน้ำมันพืชได้หลายชนิด น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นต้น หรือแม้แต่น้ำมันจากสัตว์ก็สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้ ในความเป็นจริง คำว่า "ไบโอดีเซล" เป็นศัพท์ที่บัญญัติขึ้นเพื่อใช้เรียกเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) หรือที่เรียกกันง่ายๆ ว่า กระบวนการทำให้เป็นเอสเทอร์ของน้ำมันพืช ไขสัตว์ โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (หรือที่เรียกว่าเอทิลแอลกอฮอล์) เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืช ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด นำมาใช้แทนดีเซล หรือเติมเป็นส่วนผสมในดีเซล ทั้งนี้สามารถแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมันที่นำมาใช้ได้ออก เป็น 3 ประเภทคือ

1. น้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ ไบโอดีเซลประเภทนี้คือน้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู ฯลฯ นำมาใช้โดยไม่มีการผสมหรือเติมสารเคมีใดๆ หรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเอสเทอร์

2. ไบโอดีเซลแบบลูกผสม เป็นสารระหว่างน้ำมันพืช หรือสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะได้ไบโอดีเซลที่มีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้ได้ เช่น โคโคดีเซลที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันดีเซล หรือปาล์มดีเซลเป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล เป็นต้น

3. ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นชนิดที่ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศ เช่น ในเยอรมันนี สหรัฐอเมริกา หรือแม้แต่ในมาเลเซีย ไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ สามารถนำมาใช้รับรถยนต์ได้ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะนี้ คือ ต้นทุนการผลิตที่แพงขึ้น เนื่องจากรัฐได้มีการส่งเสริมให้มีการผลิตและการใช้แก๊สโซฮอล์ ทำให้ปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ขาด และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้เกิดการผลิตไบโอดีเซลได้รับผลกระทบไปด้วย

2.2 เครื่องยนต์ดีเซล

วัฏจักรดีเซลเป็นวัฏจักรที่คิดค้นขึ้นโดยชาวเยอรมันที่ชื่อ รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolph Diesel) ระหว่างปี ค.ศ. 1858-1913 เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้หัวฉีด (Injector) กระบวนการทำงานจะประกอบด้วย 4 กระบวนการ จริงๆ แล้ววัฏจักรส่วนใหญ่จะเหมือนกับวัฏจักรออตโต แต่จะแตกต่างกันตรงที่วัฏจักรดีเซลกระบวนการป้อนความร้อนเป็นแบบความดันคงที่ ซึ่งกระบวนการนี้ของวัฏจักรออตโตจะเป็นแบบปริมาตรคงที่

จะเห็นว่ากระบวนการเผาไหม้ของวัฏจักรดีเซลใช้ระยะเวลามากขึ้น เนื่องจากเมื่อลูกสูบเลื่อนถึงจุดศูนย์ตายบน หัวฉีดจะฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อกระทบกับอากาศอัดที่ร้อนจะเกิดการรุกไหม้ การเผาไหม้จะดำเนินการต่อไปในขณะที่ลูกสูบเลื่อนลง จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อหัวฉีดหยุดฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง การเกิดการเผาไหม้ขณะที่ลูกสูบเลื่อนลงมีผลทำให้ความดันในห้องเผาไหม้คงที่

กระบวนการเผาไหม้ของส่วนผสมของน้ำมันและอากาศ ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อ กำลัง ประสิทธิภาพ และปริมาณแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ระหว่างการเผาไหม้จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะเข้าใจการทำงานของเครื่องยนต์

การเผาไหม้ คือการทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงออกซิเจนและเกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic combustion) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอนที่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ (Product) ที่ได้จากปฏิกิริยาจะประกอบด้วยน้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แต่ถ้าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกมาด้วย

ตัวอย่างสมการสำหรับการเผาไหม้

เชื้อเพลิงโพรเพน (C_3H_8) 1 โมล ทำปฏิกิริยากับ O_2 ในอากาศ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการ

$$\underset{\text{สารตั้งต้น}}{C_3H_8 + 5\,O_2} \longrightarrow \underset{\text{ผลิตภัณฑ์}}{3\,CO_2 + 4\,H_2O} \qquad (1)$$

ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (หรือ O_2) ก่อนทำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเรียกว่า สารตั้งต้น (Reactants) หลังทำปฏิกิริยาเรียกว่าผลิตภัณฑ์

สำหรับปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วๆ ไป คือ C_aH_b ทำปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งประกอบด้วย N_2 3.76 โมล ต่อ O_2 1 โมล จะได้สมการดังนี้

$$C_aH_b + \left(a + \frac{b}{4}\right) O_2 \longrightarrow a\,CO_2 + \frac{b}{2}\,H_2O \qquad (2)$$

สมการข้างต้นนี้ เป็นสมการการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างถูกต้องตามทฤษฎี ซึ่งเรียกสมการนี้ว่า “สมการมวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometric equation)”

จะเห็นว่าสมการทางเคมีข้างต้น จำนวนโมลของสารที่ทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน a และ b เท่านั้น

นิยามของสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ $(F/A)_s$ ตามสมการมวลสารสัมพันธ์มีค่า

$(F/A)_s$ = มวลของเชื้อเพลิง/มวลของอากาศ (3)

ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าตามทฤษฎีก็ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ ถ้าหากส่วนผสมมีอากาศมากกว่าทางทฤษฎี คือมีอากาศส่วนเกินเรียกว่า สารผสมบาง (Fuel lean) อากาศส่วนเกินนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและเหลือออกมากับไอเสีย และการเผาไหม้ที่มีส่วนผสมอากาศน้อยกว่าค่าตามทฤษฎีเรียกว่า สารผสมหนา (Fuel rich)

โดยปกติแล้วค่า F/A เมื่อใช้งานจริงของเครื่องยนต์ดีเซลจะมีค่าประมาณอยู่ระหว่าง $0.014 \leq F/A \leq 0.056$

เนื่องจากส่วนประกอบของสารที่ได้จากการเผาไหม้ จะแตกต่างกันสำหรับสารผสมบางและสารผสมหนา และเนื่องจากอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศพอดีจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิงดังนั้น จึงมีการกำหนดส่วนประกอบของสารผสมในรูปของอัตราส่วนของ อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศจริง / อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศพอดีซึ่งได้แก่

อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง / อากาศ (Fuel / Air equivalence ratio, $\varnothing$)

$$\varnothing = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)} \quad (4)$$

สำหรับสารผสมบาง : $\varnothing < 1$

สำหรับสารผสมตามทฤษฎี : $\varnothing = 1$

สำหรับสารผสมหนา : $\varnothing > 1$

ช่วงในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้การเผาไหม้ จะต้องใช้อากาศและเชื้อเพลิงมาทำปฏิกิริยากันโดยอากาศแห้งประกอบด้วยส่วนผสมของแก๊สหลายชนิดได้แก่ออกซิเจน (O_2) ร้อยละ 21 ไนโตรเจน (N_2) ร้อยละ 78 อาร์กอน (Ar) ร้อยละ 0.94 โดยปริมาณและแก๊สที่เหลือเป็นแก๊สอื่นๆ แต่ในอากาศนั้นตามปกติจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ซึ่งปริมาณของไอน้ำ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์เป็นอัตราส่วนที่ใช้วัดปริมาณไอน้ำในอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนของความดันย่อยของไอน้ำที่มีในอากาศชื้นต่อความดันอิ่มตัว ปริมาณไอน้ำในอากาศหาได้จากแผนภูมิไซโครเมตริค (Psychometric charts) อุณหภูมิอากาศแห้ง (Dry bulb) และอุณหภูมิอากาศเปียก (Wet bulb)

2.2.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์

ปัจจุบันเครื่องยนต์ดีเซลกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย สำหรับใช้เป็นต้นกำเนิดกำลัง ทั้งนี้เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพทางความร้อนได้ทุกขนาดแรงม้า อาจจะได้ตั้งแต่ 5 แรงม้า จนถึงกว่า 10,000 แรงม้า ประสิทธิภาพของเครื่องในขณะที่รับภาระก็สูงกว่าเครื่องชนิดอื่นด้วย แม้แต่เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดความเร็วรอบสูง ก็กำลังเข้ามาใช้งานแทนเครื่องยนต์เบนซิน จะเห็นได้ว่ามีไม่น้อยที่รถยนต์นั่งและรถบรรทุกได้ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากน้ำมันและค่าบำรุงรักษา ราคาถูก ให้กำลังงานออกมาสูง ถือว่าเป็นสมรรถนะที่ดีของเครื่องสมรรถนะของเครื่องยนต์จะแสดงออกได้โดย ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบที่สำคัญๆ คือกำลังของเครื่องยนต์ทอร์คหรือแรงบิด ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ความสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ช่วยให้ทราบถึงคุณลักษณะเฉพาะตัวของเครื่อง เพื่อใช้เป็นข้อเปรียบ เทียบของเครื่องยนต์ดังนั้นจึงพบว่าบริษัทที่ผลิตและจำหน่ายเครื่องยนต์จะบอกให้ทราบถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์นั้นๆ ด้วย

2.2.2 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล

กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์เบนซิน แตกต่างกันมาก ในเครื่องยนต์เบนซิน สารผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงจะถูกดูดเข้าในจังหวะดูด และสารผสมนี้จะถูกอัดจนลูกสูบเคลื่อนที่จนเกือบถึงจุดศูนย์ตายบน หัวเทียนจะช่วยจุดไฟเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ สารผสมนี้ต้องไม่ติดไฟเอง ไม่ว่าก่อนหรือหลังหัวเทียนจุด มิฉะนั้นจะเกิดอาการน็อกขึ้น ซึ่งทำให้เครื่องเสียกำลังประสิทธิภาพตก ส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นในจังหวะดูด จะดูดเอาแต่อากาศเพียงอย่างเดียว แล้วอากาศนี้จะถูกอัดจนลูกสูบเกือบถึงศูนย์ตายบน อากาศนี้จะมีอุณหภูมิสูง เมื่อน้ำมันถูกฉีดเข้ามา หยดของน้ำมันที่มีขนาดไม่เท่ากัน ก็จะได้รับความร้อนและผิวของหยดน้ำมันจะระเหยออกไป ไอของน้ำมันจะผสมกับอากาศที่อัดนั้น และเกิดเป็นสารผสมขึ้น สารผสมที่เกิดขึ้นในลูกสูบนี้จะมีอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงต่างกันไป ในแต่ละแห่ง และแต่ละเวลา การเผาไหม้เกิดขึ้นเองเมื่ออุณหภูมิและอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงพอดีกัน ธรรมดาหยดน้ำมันขนาดต่างๆ ที่ถูกฉีดเข้ามากระจายไปทั่วกระบอกสูบ และในกระบอกสูบอากาศก็จะหมุนเวียนวนไปทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้นได้หลายๆ แห่งไม่แน่นอนแต่ทั่วๆ ไปจะติดหลายๆ จุด รอบๆ บริเวณที่ฉีดน้ำมัน

2.3 น้ำมันดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน จึงมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันดีเซลแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงๆ สำหรับในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ได้แบ่ง

ชนิดของน้ำมันดีเซลไว้หลายชนิด และมีหลายสถาบันที่ทำงานเกี่ยวข้องกับด้านเชื้อเพลิงหรืองานด้านอุตสาหกรรมได้กำหนดชนิดของน้ำมันดีเซลไว้หลายชนิด ในประเทศไทยมีอยู่ 2 ประเภท

1. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบเร็ว (Automotive diesel oil)

น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบเร็วมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น โซล่า ADO ดีโซลีน ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบเกิน 1000 รอบต่อนาทีขึ้นไป ได้แก่ รถยนต์เครื่องดีเซล รถบรรทุก รถแทรกเตอร์ เรือประมง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

2. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบช้า (Industrial diesel oil)

น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบช้า ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีจำนวนรอบต่ำกว่า 1000 รอบต่อนาที อาจเรียกว่าน้ำมันขี้โล้ หรือ IDO หรือ แสตนดีเซล (Standiesel) ซึ่งจะมีสีเข้มกว่า ADO เนื่องจากป้องกันการปลอมปนของน้ำมันทั้งสองชนิด นิยมใช้ในอุตสาหกรรมและเรือขนาดใหญ่ น้ำมันชนิดนี้บริษัทจำหน่ายมักขายโดยตรงแก่โรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ตามข้อกำหนดกรมธุรกิจพลังงาน

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	เกณฑ์กำหนด	วิธีทดสอบ
1. ความถ่วง API ณ อุณหภูมิ15.6/15.6°C	ไม่ต่ำกว่า	25.72	ASTM D 1298
	ไม่สูงกว่า	41.16	
2. ค่าซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	47	ASTM D 976
3. ความหนืดจลน์, ที่ 40°C (cSt)	ไม่ต่ำกว่า	1.8	ASTM D 445
	ไม่สูงกว่า	4.1	
4. จุดไหลเท (°C)	ไม่สูงกว่า	10	ASTM D 97
5. ปริมาณกำมะถัน (% น้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.035	ASTM D 5453
6. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	1	ASTM D 130
7. ปริมาณกากคาร์บอน (% ปริมาตร)	ไม่สูงกว่า	0.05	ASTM D 4530
8. ปริมาณเถ้า (% น้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.01	ASTM D 482
9. จุดวาบไฟ (°C)	ไม่ต่ำกว่า	52	ASTM D 93
10. การกลั่น อุณหภูมิการระเหย 90% (°C)	ไม่สูงกว่า	357	ASTM D 86
11. สี	ไม่สูงกว่า	4	ASTM D 1500

2.3.1 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value of Fuel)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้จากปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับออกซิเจนที่เกิดขึ้น โดยการสันดาป ไฮโดรเจนที่เป็นส่วนประกอบของเชื้อเพลิงเมื่อรวมกับออกซิเจนจะกลายเป็นน้ำที่อยู่ในรูปของไอน้ำ ถ้ามีโอกาสกลั่นเป็นหยดน้ำก็จะมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเกิดขึ้น ไอน้ำนี้จะออกไปกับไอเสีย ดังนั้น ความร้อนจึงสูญเสียไปกับไอเสียในรูปแบบของความร้อนแฝงด้วย ส่วนที่เหลือจากการสูญเสีย คือ ส่วนเราได้มาเป็นกำลังงาน ซึ่งจะมีค่าความร้อนต่ำกว่าค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการสันดาปของเชื้อเพลิงค่าความร้อนนี้จึงเรียกว่า ความร้อนต่ำ ส่วนค่าความร้อนรวมทั้งหมดของเชื้อเพลิงเรียกว่าค่ารวมซึ่งมีค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนที่นำมาใช้งานนั้นมีค่าความร้อนต่ำซึ่งถือว่าเป็นค่าสุทธิ โดยทั่วไปน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลจะมีค่าความต้านทานรวมทั้งหมดประมาณ 10560 ถึง 10900 kcal/kg และค่าความร้อนสุทธิจะต่ำกว่าค่าความร้อนประมาณ 612 ถึง 723 kcal

2.3.2 สมบัติที่สำคัญของน้ำมันดีเซล

ในการเลือกใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซล จะต้องพิจารณาถึงสมบัติสำคัญๆ ต่อไปนี้

1. ความสามารถในการติดไฟ (Ignition quality) หมายถึง ความสามารถในการติดไฟของน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าที่ใช้บอกความสามารถในการติดไฟของน้ำมัน เรียกว่าค่าซีเทน (Cetane number) หรือ ดัชนีซีเทน (Cetane index) น้ำมันดีเซลในปัจจุบันมีค่าซีเทนประมาณ 40-60 น้ำมันที่ติดไฟง่ายที่สุด คือ น้ำมันซีเทน ($C_{16}H_{34}$) กำหนดให้มีค่าซีเทนเท่ากับ 100 และน้ำมันที่ติดไฟยากที่สุดคือ แอลฟาเมทิลแนฟทาลีน (Alpha methyl naphthalene) มีสูตรทางเคมีเป็น $C_{10}H_7$–CH_3 ให้มีค่าซีเทนเท่ากับ 0

ส่วนค่าซีเทนอื่นๆ เป็นเปอร์เซ็นต์ของซีเทนโดยปริมาตร ในน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันซีเทนกับแอลฟาเมทิลแนฟทาลีน เครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่าซีเทนเป็นเครื่องยนต์มาตรฐานชนิดสูบเดียว สามารถปรับอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ได้ วิธีทดสอบจะใช้ความล่าช้าในการจุดระเบิดเป็นหลัก คือระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้น ระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิดนี้วัดจากการฉีดน้ำมันของหัวฉีดจนกระทั่งน้ำมันเกิดการเผาไหม้กำลังดันในกระบอกสูบสูงขึ้น การทดลองจะใช้น้ำมันที่มีเปอร์เซ็นต์ของซีเทนปริมาณต่างๆ กันมาทำให้เกิดการเผาไหม้ในกระบอกสูบที่อัตราส่วนการอัดต่างๆ กัน ถ้าการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อัตราส่วนการอัดต่ำ แสดงว่าน้ำมันมีค่าซีเทนสูง ถ้าการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อัตราส่วนการอัดสูงแสดงว่าน้ำมันมีค่าซีเทนต่ำ น้ำมันที่มีค่าซีเทนสูง ความสามารถในการติดไฟจะดีถึงแม้ว่าอุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำ

น้ำมันที่มีค่าซีเทนต่ำกว่า 40 เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดควันมาก สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและกำลังที่ผลิตได้จะน้อยกว่าปกติ

การจุดระเบิด (Ignition point) คือ อุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ และเมื่อไอนี้ถูกเปลวไฟจะติดไฟอยู่เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วินาที ที่ความดัน 760 มม.ปรอท.ซึ่งโดยทั่วไปจุดติดไฟจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 5-35°C ซึ่งจะเกิดได้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยประเภทนอร์มอลพาราฟิน (n-Paraffin) จะติดไฟได้เร็วที่สุดหรือมีระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิด (Ignition delay) ต่ำมาก ตรงข้ามกับพวกอะโรมาติกจะติดไฟได้ช้าโดยเฉพาะอะโรมาติกที่มีจำนวนวงแหวนมาก ไฮโดรคาร์บอนประเภทอื่นก็มีสมบัติอยู่ปานกลาง

การติดไฟเป็นสมบัติของน้ำมันดีเซล จะแสดงถึงความสามารถในการติดเครื่องยนต์ได้เร็วเมื่อเครื่องยนต์มีอุณหภูมิต่ำ การป้องกันการน็อกในเครื่องยนต์ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบ การเผาไหม้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง สมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถแสดงเป็นค่าซีเทนหรือค่าดัชนีซีเทน

2. แอนนิลีน (Aniline) คือสารประกอบจำพวกอะโรมาติก (Aromatic Compound) ละลายได้ในน้ำมันจำพวกพาราฟินที่มีอุณหภูมิสูงและละลายได้ในน้ำมันจำพวกอะโรมาติก ที่อุณหภูมิต่ำ

จุดแอนนิลีน (Aniline Point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สารแอนนิลีนละลายในน้ำมันที่มีปริมาตรเท่ากันได้หมด น้ำมันดีเซลที่มีคุณภาพดี จุดแอนนิลีนจะต้องสูงกว่า 21°C

3. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) หมายถึง มวลของน้ำมันในหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อมวลของน้ำในปริมาณที่เท่ากัน ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานเอ.พี.ไอ. (API : American Petroleum Institute) จะวัดที่อุณหภูมิ 15.5° C (289 K) ทั้งของน้ำมันเชื้อเพลิง และน้ำ สามารถหาได้จาก

$$\text{API} = \frac{141.5}{SG@15.5^{o}C/15.5^{o}C} - 131.5 \qquad (5)$$

โดยทั่วไปตัวเลขจากสมการนี้จะบอกค่าซีเทนในน้ำมัน ถ้าตัวเลขสูงแสดงว่าน้ำมันมีค่าซีเทนสูง

4. ความหนืด (Viscosity) คือความต้านทานในการไหลของน้ำมัน ความหนืดมีอิทธิพลต่อรูปร่างลักษณะของลำน้ำมันที่ฉีด (Spray) เข้าไปในห้องเผาไหม้น้ำมันที่มีความหนืดสูงการแตกตัวเป็นละอองเล็กๆ จะเกิดขึ้นยากและน้ำมันจะฉีดทะลุทะลวงไปได้ไกล ส่วนน้ำมันที่มีค่าความหนืดต่ำการฉีดจะแผ่กระจายบริเวณใกล้ๆ หัวฉีดทำให้น้ำมันกระจายไม่ทั่วห้องเผาไหม้ และ

น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลมีค่าความหนืดประมาณ 35-40- เอสยูเอส (SUS : Saybolt universal second) เครื่องมือวัดความหนืดโดยทั่วๆ ไปเรียกว่า เซโบลท์วิสโคมิเตอร์ (Saybolt viscometer)

5. จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash pint and Fire point) จุดวาบไฟ หมายถึง จุดที่น้ำมันมีอุณหภูมิต่ำที่สุดที่เกิดไอระเหยขึ้น และเมื่อนำเปลวไฟเข้าใกล้จะเกิดการลุกไหม้ขึ้นวูบหนึ่งแล้วดับหายไป น้ำมันที่มีจุดวาบไฟต่ำจะเป็นอันตรายต่อการเก็บรักษาเนื่องจากติดไฟง่าย น้ำมันดีเซลโดยทั่วๆ ไปจะมีจุดวาบไฟประมาณ 65^{0}C และจุดติดไฟหมายถึงจุดที่น้ำมันมีอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดไอระเหยขึ้น และเมื่อนำเปลวไฟเข้าใกล้จะติดไฟขึ้นอย่างต่อเนื่องนานอย่างน้อย 5 วินาที น้ำมันดีเซลปกติ จะมีอุณหภูมิจุดติดไฟประมาณ 70-85^{0}C

6. จุดแข็งตัว (Cloud point) หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดที่ไข หรือขี้ผึ้ง (Wax) แยกตัวออกเป็นของแข็ง ไขหรือขี้ผึ้งนี้ก็จะไปอุดทางเดินในระบบน้ำมันเชื้อเพลิง

7. จุดไหลเท (Pour point) หมายถึง จุดที่น้ำมันแข็งตัวหรือหยุดไหล มีความสำคัญมากในขณะสตาร์ทเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำๆ น้ำมันจะไหลจากถังเก็บไปยังเครื่องยนต์ยาก ทำให้สตาร์ทเครื่องยนต์ไม่ติด โดยทั่วๆ ไปจุดไหลเทจะต่ำกว่าจุดแข็งตัวประมาณ 5-10^{0}C

8. ระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิด (Ignition delay)

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ต้องใช้เวลาเล็กน้อยในการระเหยและผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ด้วยตัวเอง (Self-ignition) ช่วงเวลานี้เรียกว่าระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิด ในขณะที่น้ำมันยังถูกฉีดเข้ามาตลอดเวลา ทำให้ในช่วงนี้มีการสะสมของน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดการลุกไหม้จึงมีการเผาไหม้อย่างรุนแรง ทำให้ในช่วงนี้มีการสะสมของน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง การเผาไหม้จะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องลดระยะเวลาหน่วงในการจุดระเบิดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งกระทำได้โดยเลือกความดันของหัวฉีดน้ำมันและการออกแบบห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม และสิ่งที่สำคัญคือคุณภาพของน้ำมันดีเซล

ความล่าช้าในการจุดระเบิดเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

8.1 ทางฟิสิกส์หรือกายภาพ เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อน้ำมัน ชนิดของห้องเผาไหม้ความดันของน้ำมันที่หัวฉีด คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง และการตั้งเวลาการฉีด (Timing)

8.2 ทางเคมี เกิดจากอุณหภูมิและความดันขณะน้ำมันเพลิงเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน

9. ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur) เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้เป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะไปรวมกับความชื้นในอากาศทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) กรดนี้จะกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ให้สึกหรอ และเมื่อรวมตัว

กับน้ำมันหล่อลื่น จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพเกิดยางเหนียวๆ (Gum) จับตามกระบอกสูบและชิ้นส่วนต่างๆ ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ตามมาตรฐานจะกำหนดซัลเฟอร์ในน้ำมันดีเซลไม่ควรเกิน 0.25%

ปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันดีเซลจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่นและกระบวนการที่ใช้ ซึ่งซัลเฟอร์สามารถอยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น เมอร์แคปแทน ไดซัลไฟด์หรือสารประกอบเฮเทอร์โรไซคลิก

10. ความสะอาด (Cleanliness)

ความสะอาดเป็นสมบัติที่สำคัญ ซึ่งน้ำมันจะต้องมีความสะอาดทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ เช่น จะต้องมีตะกอน น้ำ กากคาร์บอน หรือเขม่าน้อยที่สุด สำหรับน้ำมันดีเซลเนื่องจากระบบเครื่องยนต์ดีเซลจะต้องใช้ปั๊มและหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

11. การกระจายเป็นฝอย (Fluidity-automization)

สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับความหนืดหรือความข้นใสของน้ำมันดีเซล ความหนืดที่พอเหมาะจะทำให้กระจายเป็นฝอยได้ดี ในขณะที่หัวฉีดได้ฉีดน้ำมันในช่วงเริ่มการเผาไหม้ ความหนืดมีผลต่อระบบปั๊มของน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะน้ำมันดีเซลจะทำหน้าที่หล่อลื่นลูกสูบปั๊ม (Plunger) ไปในตัวด้วย

12. ค่าซีเทน หรือค่าดัชนีซีเทน

ค่าซีเทนแสดงคุณภาพในการติดไฟของน้ำมันดีเซล หาได้จากค่าความถ่วง API และอุณหภูมิของการกลั่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์หรือจุดกลางของการเดือด (Middle boiling point)

13. การระเหยของน้ำมันดีเซล (Volatility)

น้ำมันดีเซลจะมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยเร็ว ปานกลาง และช้ารวมอยู่ด้วยกัน ความสามารถในการระเหยของน้ำมันดีเซลวัดได้จากการกลั่น โดยวิธีของ ASTM D 86 หรือ IP123 ช่วงจุดเดือดของน้ำมันดีเซลมีค่าประมาณ 280-725 °F (138-385 °C) การระเหยตัวของน้ำมันดีเซล มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีรอบสูงและปานกลาง หากน้ำมันระเหยช้าจะทำให้น้ำมันฉีดเป็นฝอยได้ไม่ดี แต่หากระเหยง่ายเกินไปจะเกิดเวเพอร์ล็อกในระบบน้ำมันเชื้อเพลิง

14. กากถ่านหรือกากคาร์บอน (Carbon residue)

กากถ่านเป็นสิ่งตกค้างที่ต้องคำนึงถึง เพราะถ้ามีมากกว่าที่กำหนดจะมีแนวโน้มว่าจะเกิดเขม่าสะสมในห้องเผาไหม้มาก การเผาไหม้จะไม่สะอาด และควันไอเสียก็จะมีมากด้วย ซึ่งจะต้องมีความสะอาดทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ เช่น จะต้องมีตะกอน น้ำ กากคาร์บอน หรือเขม่าน้อยที่สุดเพราะกากคาร์บอนที่แหลมคมเพียงเล็กน้อยอาจจะเป็นอันตราย สำหรับระบบเครื่องยนต์ดีเซล

ที่ต้องใช้ปั๊มและหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้มากกว่ากากคาร์บอนจำนวนมากที่นิ่ม เนื่องจากกากคาร์บอนที่นิ่มมักจะหลุดออกไปกับไอเสียเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้น

15. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)

การกัดกร่อนแผ่นทองแดงต้องมีค่าไม่สูงกว่าหมายเลข 1 เพราะเป็นผลโดยตรงจากปริมาณซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ถ้าสูงเกินกว่าหมายเลข 1 แสดงว่ามีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่ากำหนด การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงจะทดลองกับโลหะชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็กที่มีอยู่ในระบบน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ทองแดง ทองเหลือง การทดลองโดยทั่วๆ ไปใช้วิธีจุ่มแผ่นทองแดง ซึ่งขัดเป็นเงาลงไปในน้ำมันดีเซลประมาณ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 212 °F

ผลการทดสอบแบ่งได้เป็น 4 ระดับ คือ

หมายเลข 1	มัวเล็กน้อย
หมายเลข 2	มัวปานกลาง
หมายเลข 3	มัวมาก
หมายเลข 4	กัดกร่อน

16. เถ้า (Ash)

เถ้าเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic matter) ที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน น้ำมันที่ได้รับการกลั่นอย่างดีแทบจะไม่มีเถ้าอยู่เลย เว้นแต่จะมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีส่วนผสมของโลหะลงไป หรือมีสิ่งสกปรกอื่นๆ ปนอยู่ เช่น ฝุ่น สนิม ฯลฯ เถ้าในน้ำมันดีเซลอาจอยู่ในรูปของแข็งหรือสบู่ที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (Metallic soap) ที่ละลายได้ในน้ำมัน ซึ่งสามารถขูดขีดโลหะในระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง เกิดการสึกหรอในเครื่องยนต์ ยิ่งไปกว่านั้นสารเหล่านี้ยังทำให้ธรรมชาติของตะกอนเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เป็นอันตรายมากขึ้น

2.4 น้ำมันพืช[15]

น้ำมันพืช (Vegetable oil) หมายถึง น้ำมันที่สกัดได้จากพืชชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการบริโภค โดยเป็นส่วนประกอบการปรุงอาหารและใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมผลิตสบู่ เนยเทียม นมข้นหวาน ยาขัดเงา เป็นต้น อุตสาหกรรมน้ำมันพืชเป็นอุตสาหกรรมการเกษตร (Agroindustry) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัตถุดิบทางการเกษตรเป็นหลัก ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง มะพร้าว เมล็ดนุ่น เมล็ดฝ้าย งา ปาล์มน้ำมัน ละหุ่ง รำข้าว ทานตะวัน เมล็ดยางพารา เป็นต้น เมล็ดพืชเหล่านี้หลังจากการสกัดแล้ว กากที่เหลือยังมีคุณค่าทางโภชนาการสำหรับเป็นอาหารสัตว์ เพราะอุดมไปด้วยโปรตีนและยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยได้อีก น้ำมันพืชโดยทั่วไปประกอบด้วยสารกลีเซอไรด์ ซึ่งมีกรดไขมัน (Fatty acid) มากกว่าหนึ่งชนิด โดยทั่วไปน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์มีความหนืดสูง ซึ่งมีองค์ประกอบชนิด

ต่างๆ กัน และมีปริมาณไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ น้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีชนิดของกรดและปริมาณไขมันแตกต่างกัน ซึ่งทำให้สมบัติของน้ำมันพืชแตกต่างกัน

การแบ่งน้ำมันพืชตามลักษณะการใช้ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. น้ำมันพืชสำหรับใช้บริโภค (Edible oil) ได้แก่ น้ำมันพืชที่ได้จากเมล็ดพืช เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง นุ่น ฝ้าย งา ทานตะวัน ดอกคำฝอย รำข้าว เป็นต้น

2. น้ำมันพืชสำหรับใช้ทั้งในการบริโภคและในอุตสาหกรรม (Edible and industrial oil) ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม เป็นต้น

3. น้ำมันที่ใช้ในการอุตสาหกรรม (Industrial oil) ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันลินสีด น้ำมันตังอิ๊ว (Tung oil) น้ำมันเมล็ดยางพารา เป็นต้น

น้ำมันพืชแบ่งตามคุณภาพและการแปรรูปเป็น 2 ชนิด

1. น้ำมันดิบ (Crude oil) ได้จากการสกัดหรือการบีบขั้นต้น น้ำมันชนิดนี้มีความเป็นกรด มีสารเจือปน ได้แก่ยางเหนียวและไขหรือขี้ผึ้ง (Gum and wax) ตลอดจนกลิ่น สี เศษผง และกาก บางชนิดมีสารที่มีพิษซึ่งมีอยู่ในเมล็ดตามธรรมชาติ จึงไม่สามารถนำน้ำมันดิบมาใช้บริโภคได้ และไม่เหมาะในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอื่นๆ

2. น้ำมันบริสุทธิ์ (Purified oil) ได้จากการนำน้ำมันดิบมาผ่านกระบวนการทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ โดยจะต้องแยกสารเจือปนออก การทำให้น้ำมันเป็นกลาง การกำจัดสี กำจัดกลิ่นให้ได้มาตรฐานที่กำหนดไว้

2.4.1 การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง

เนื่องจากน้ำมันพืชมีสมบัติโดยรวมใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากกว่าน้ำมันเบนซิน จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลมากกว่าเครื่องยนต์เบนซิน โดยมักใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีรอบต่ำ เช่น เครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม และการประมง น้ำมันพืชแต่ละชนิดให้ค่าความร้อนแตกต่างกันไป โดยมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักประมาณร้อยละ 83-85 ของน้ำมันดีเซล และมีความหนืดสูงกว่าถึง 10 เท่า ทำให้หัวฉีดอุดตัน การสันดาปจึงไม่สมบูรณ์ เกิดคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์วภายหลังการเผาไหม้ และเมื่ออุณหภูมิต่ำก็อาจเกิดเป็นไขขึ้นได้ นับว่าเป็นปัญหาต่อระบบการจ่ายเชื้อเพลิง และการใช้งานในฤดูหนาวที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้การที่น้ำมันพืชระเหยได้ช้า ทำให้จุดระเบิดได้ช้า และยังระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบสูง ซึ่งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชนิดต่างๆ เทียบกับน้ำมันดีเซลได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชนิดต่างๆ เทียบกับน้ำมันดีเซล

ชนิดของน้ำมัน	ค่าความหนาแน่น (g/ml) ที่ 21°C	ความหนืด (cSt)°C	ค่าความร้อน (kJ/kg)
น้ำมันถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
น้ำมันดอกทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
น้ำมันมะพร้าว	0.915	51.9	37,540
น้ำมันถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
น้ำมันปาล์ม	0.898	88.6	39,550
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	39,720
น้ำมันเมล็ดในสบู่ดำ	0.915	36.9	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

2.4.2 พืชที่ให้น้ำมัน[1]

1. ถั่วเหลือง

มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Gycine max L.* เดิมใช้ทำผลิตภัณฑ์อาหาร ต่อมาขยายการใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นวัตถุดิบในการทำน้ำมันบริโภค ปัจจุบันประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นแหล่งปลูกและผลิตน้ำมันถั่วเหลืองที่ใหญ่ที่สุด ในประเทศไทยมีการปลูกถั่วเหลืองทั่วทุกภาคของประเทศ โดยปลูกมากในแถบภาคกลางและภาคเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดสุโขทัย เลย เชียงใหม่ กำแพงเพชร ลพบุรี ตาก เป็นต้น ถั่วเหลืองมีน้ำมันประมาณร้อยละ 18-20 สามารถสกัดโดยใช้สารทำละลาย น้ำมันถั่วเหลืองประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 13-15 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 80-85 ของกรดไขมันทั้งหมด มีลักษณะเด่นคือมีกรดลิโนเลนิกร้อยละ 6-9 สูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติเมื่อเก็บรักษาไว้นาน

2. มะพร้าว

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera L.* ในประเทศไทยใช้เป็นส่วนประกอบของกะทิ แหล่งที่มีการปลูกมะพร้าว คือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ ชลบุรี เป็นต้น น้ำมันมะพร้าวได้จากส่วนเนื้อซึ่งมีน้ำมันสูงถึงร้อยละ 60-65 (ต่อน้ำหนักแห้ง) ก่อนการสกัดน้ำมันต้องทำให้อยู่ในรูปมะพร้าวแห้งก่อน โดยการผ่าซีกมะพร้าววางหงายตากแดดจนเนื้อมะพร้าวล่อนหลุดได้ง่าย น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 95 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 5

3. ถั่วลิสง

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Arachis hypogaea L.* มีน้ำมันร้อยละ 45-55 การผลิตใช้วิธีการบีบอัด น้ำมันที่ได้มีสีเหลืองซีดและมีกลิ่นเฉพาะ นิยมใช้บริโภคโดยไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ น้ำมันถั่วลิสงประกอบด้วยไขมันอิ่มตัวร้อยละ 25 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 75

4. เมล็ดทานตะวัน

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annuus L.* เป็นแหล่งน้ำมันใหม่ของประเทศไทย มีน้ำมันร้อยละ 22-40 สามารถสกัดโดยวิธีการบีบอัด หรือใช้สารทำละลายสกัด น้ำมันที่ได้มีสีอ่อนและมีกลิ่นเฉพาะ ประกอบด้วยไขมันอิ่มตัวร้อยละ 9 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 91

5. เมล็ดฝ้าย

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Gossypium herbaceum L.* มีน้ำมันร้อยละ 15-24 เมล็ดฝ้ายที่กะเทาะเปลือกออกแล้วมีน้ำมันสูงถึงร้อยละ 30-38 น้ำมันมีสีน้ำตาลแดงเข้มเพราะมีเม็ดสี แต่เมื่อผ่านการฟอกสีจะทำให้สีอ่อนลงได้ ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 30 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 70

6. เมล็ดนุ่น

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ceiba pentandra,Gearth* มีน้ำมันร้อยละ 20-25 ในน้ำมันเมล็ดนุ่นประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 34 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 66 น้ำมันเมล็ดนุ่นมีกรดไขมันที่แตกต่างจากน้ำมันชนิดอื่น คือ กรดมาลวาลิก (Malvalic acid) และกรดสเตียคิวลิก (Stearculic acid) กรดทั้งสองชนิดจะขัดขวางการสร้างเอนไซม์ (Enzyme inhibitor) ในร่างกายสัตว์แต่จะถูกทำลายไปบ้างบางส่วนเมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

ตารางที่ 2.3 ค่ากรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในพืชและสัตว์

	ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว (%)				ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว (%)	
	C12	C14	C16	C18	C18	C18
แหล่งที่มา	Lauric	Myristic	Palmitic	Stearic	Oleic	Linoleic
<u>ไขมันจากสัตว์</u>						
สุกร		1	25	15	50	6
เนย	2	10	25	10	25	5
มนุษย์	1	3	25	8	46	10
ปลาวาฬ		8	12	3	35	10
<u>ไขมันจากพืช</u>						
มะพร้าว	50	18	8	2	6	1
ข้าวโพด		1	10	4	35	45
มะกอก		1	5	5	80	7
ถั่ว			7	5	60	20

7. ปาล์มน้ำมัน [6]

สำหรับคุณค่าทางโภชนาการนั้น น้ำมันปาล์มมีอยู่ไม่น้อยกว่าพืชชนิดอื่น กล่าวคือในน้ำมันปาล์ม 1 กรัม ประกอบด้วย

- พลังงาน 9 cal
- โคเลสเตอรอล 0 cal
- วิตามินไลโนเลอิก 1,150 ppm (มากกว่าน้ำมันชนิดอื่น)
- วิตามิน เอ 500-700 ppm (มากกว่าแครอท 15 เท่า)
- วิตามินอีในน้ำมันปาล์มช่วยควบคุมโคเลสเตอรอลในเลือด ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งโดยเฉพาะมะเร็งเต้านม ป้องกันผิวจากรังสีอัลตราไวโอเลต ชะลอริ้วรอย และความเหี่ยวย่นของผิว
- วิตามินเอ แคโรทีนอยด์ และเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์ม เป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำลายอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นตัวการที่จะทำลายส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ และเป็นต้นเหตุของโรคมะเร็ง

นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังประกอบด้วยสัดส่วนของกรดไขมันที่ใกล้เคียงกัน คือ กรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 49 เช่นกรดปาล์มมิติกร้อยละ 44 และกรดสเตียริกร้อยละ 5 กรดไขมันไม่อิ่มตัว

ร้อยละ 51 กรดโอเลอิคร้อยละ 40 และกรดไลโนเลอิกร้อยละ 10 ซึ่งกรดปาล์มมิติก และกรดโอเลอิก เป็นสารที่ร่างกายต้องการขณะเดียวกัน น้ำมันปาล์มมีจุดเยือกแข็งต่ำ ทนความร้อนได้ดี เกิดควันน้อย หมายถึง โอกาสที่โมเลกุลแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระน้อยกว่าน้ำมันชนิดอื่น

จากคุณค่าทางโภชนาการของน้ำมันปาล์มดังกล่าว พบว่า การบริโภคน้ำมันปาล์มไม่ทำให้ระดับไขมันในเส้นเลือดหรือโคเลสเตอรอลเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มระดับ HDL-C (High Density Lipoprotein-Cholesterol) และลดระดับ LDL-C (Low Density Lipoprotein-Cholesterol) ซึ่ง HDL-C นี้เป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดโรคหัวใจ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ทั้งด้านการผลิตและการตลาด ส่วนแบ่งการผลิตน้ำมันปาล์มต่อน้ำมันพืชของโลก มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ในช่วงปี 2519-2543 ร้อยละ 11.7 และในช่วงปี 2544-2548 เพิ่มเป็นร้อยละ 27.5 และคาดว่าในช่วงปี 2559-2563 จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 31.2 โดยมีประเทศผู้ผลิตที่สำคัญคือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นที่ทนทานต่อผลกระทบจากภัยธรรมชาติมากกว่าพืชอายุสั้นอื่นๆ ลงทุนเพียงครั้งเดียวก็สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นาน 20 ปี และที่น่าสนใจคือ พื้นที่ปลูกที่เหมาะสมในโลกจะอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 20 องศาเหนือ-ใต้ ส่วนใหญ่พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นพื้นที่ประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย สองประเทศนี้รวมกันมีพื้นที่ปลูกที่ให้ผลผลิตแล้วจำนวน 37.04 ล้านไร่ และมีผลผลิตน้ำมันปาล์มร้อยละ 83 ส่งออกน้ำมันปาล์มร้อยละ 90 และน้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งการตลาดน้ำมันร้อยละ 48 ของตลาดน้ำมันโลก (น้ำมันพืชและสัตว์) ปาล์มน้ำมันมีศักยภาพอันดับต้นๆ ในสถานการณ์ปัจจุบันเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ผลผลิตต่อพื้นที่สูง ราคาซื้อขายในตลาดไม่สูง เสี่ยงต่อการเสียหายจากภัยธรรมชาติน้อย สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชที่อนุรักษ์สภาพแวดล้อม (Ecofriendly crop) เมื่อปลูกปาล์มน้ำมันเป็นระยะยาวนานจะทำให้สภาพนิเวศที่เสียหายไปกลับคืนสู่สภาพธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดองค์ประกอบจากน้ำมันปาล์มได้แก่ กรดไขมันหลายชนิด วิตามินอี และวิตามินเอ นำมาใช้ประโยชน์และใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และพลังงานทดแทนรวมทั้งพืชที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคเพราะไม่มีการตัดแต่งพันธุกรรม (GMOs)

ผลปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตน้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ได้จากการสกัดเนื้อปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) สกัดจากเมล็ดปาล์ม

ผลปาล์ม 1 ผล จะมีน้ำมันปาล์ม 9 ส่วน และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 1 ส่วน น้ำมันที่สกัดจากผลปาล์มสดจะมีเบตาแคโรทีน (Beta-Carotene) โปรวิตามินเอ (Pro vitamin A) และวิตามินอี (Vitamin E) ในปริมาณสูง

น้ำมันปาล์ม ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันที่อิ่มตัวในสัดส่วนที่สมดุล และด้วยเหตุที่มีวิตามินอีสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพสูง สำหรับกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยว (Mono-unsaturated oleic acid) เช่นกรดโอเลอิคร้อยละ 40 ขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวประกอบด้วย กรดปาล์มมิติกร้อยละ 44 และกรดสเตรียริคร้อยละ 5 ด้วยสัดส่วนของส่วนผสมดังกล่าว ทำให้น้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติพิเศษเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท

สมบัติอีกประการหนึ่งของน้ำมันปาล์ม คือ สามารถใช้ผลิตเป็นไขมันพืชที่มีสภาพเป็นของแข็ง (Solid-fat) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation process) เป็นการหลีกเลี่ยงการก่อตัวของกรดไขมันทรานส์ (Trans fatty acids) ที่เกิดจากกระบวนการซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

สมบัติพิเศษของน้ำมันปาล์มจึงนำไปใช้ในการปรุงอาหารได้หลากหลาย โดยปราศจากโคเลสเตอรอล และเป็นแหล่งพลังงานของร่างกาย นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้จากน้ำมันปาล์ม ในการนำไปเป็นส่วนผสมของเนยเหลือง หรือมาการีน ว่ากันว่าอาหารที่ทอดด้วยน้ำมันปาล์มจะกรอบอร่อยให้รสชาติที่แท้จริงของอาหารและเก็บได้นาน ผลพลอยได้อื่นๆ ยังมีอีกมากมาย โดยเฉพาะใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ยา ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรม

น้ำมันปาล์มแดงที่สกัดออกในกระบวนการกลั่น ยังมีปริมาณแคโรทีนสูงถึง 80% และมีวิตามินอีในสัดส่วนที่สูงมาก จากผลการวิจัยพบว่ามีคุณสมบัติในการป้องกันการเหี่ยวย่นของเซลล์ผิวหนังโรคหัวใจ และโรคมะเร็ง จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น วิตามินแคปซูลสำเร็จรูป อาหารเสริม เครื่องสำอาง เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำมันปาล์มในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เช่นการใช้ประโยชน์จากสมบัติทางเคมี ซึ่งเป็นการสกัดสารเคมีจากไขมันพืชและสัตว์ คล้ายกับสารปิโตรเคมี (Petrochemical) ซึ่งเป็นการสกัดสารเคมีจากน้ำมันปิโตรเลียม โดยสารเคมีพื้นฐานที่สามารถสกัดได้ คือ กรดไขมัน (Fatty acids) เอสเทอร์ไขมัน (Fatty ester) เช่นเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) แอลกอฮอล์ไขมัน (Fatty alcohol) เอมีนไขมัน (Fatty amine) และ กลีเซอรอล (Glycerol)

ประโยชน์ของน้ำมันปาล์มทางกายภาพ และทางเคมีในอุตสาหกรรม

1. ใช้แทนน้ำมันดีเซลในรถยนต์ โดยดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กน้อย ควันที่เกิดขึ้นจะไม่มีซัลเฟอร์ และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งเป็นสารพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2. อุตสาหกรรมขุดเจาะ ใช้เป็นตัวหล่อลื่น เนื่องจากมีจุดสันดาปสูงกว่าดีเซลและไม่เป็นพิษ

3. อุตสาหกรรมสบู่ เนื่องจากองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม มีสมบัติในการเกิดฟอง และชำระล้างใกล้เคียงกับไขมันสัตว์ และน้ำมันมะพร้าว

4. อุตสาหกรรมเคลือบผิว มีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต และให้ความเงา

5. อุตสาหกรรมสีทาบ้าน ทำให้สีติดทนทาน ไม่หลุดลอกง่าย

6. อุตสาหกรรมยาสระผม สามารถใช้เป็นส่วนผสมของยาสระผม

7. อุตสาหกรรมเหล็ก มีสารป้องกันสนิมสูงกว่าไขมันที่สกัดจากไขมันสัตว์

8. อุตสาหกรรมยาเป็นตัวทำลายช่วยให้เนื้อยาเข้ากันรวมถึงเพิ่มปริมาณเนื้อยาเนื่องจากเป็นสารไม่มีโทษ และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ง่าย

9. อุตสาหกรรมพอลิเอสเตอร์ ใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัว และถ่ายเทความร้อนได้ดี และยังสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นในการผลิตพอลิเอสเตอร์

10. เทียนไข มีระยะเวลาการติดไฟนาน มีควัน และน้ำตาเทียนน้อยกว่าเทียนไขที่ทำจากไขปิโตรเลียม

11. อุตสาหกรรมผลิตยาง ช่วยในกระบวนการผลิต นอกจากเป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการแล้วยังทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

2.4.3 ยุทธศาสตร์ปาล์มน้ำมัน[16]

เมื่อเดือนพฤษภาคม 2547 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ได้จัดทำยุทธศาสตร์ปาล์มน้ำมันขึ้น โดยมีเป้าหมายที่จะขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันให้ได้ 10 ล้านไร่ ภายในปีพ.ศ. 2572 เพื่อให้มีปริมาณผลผลิตปาล์มสด 25 ล้านตัน หรือผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบ 4.50 ล้านตัน โดยจะเพิ่มผลผลิตปาล์มน้ำมันต่อไร่ให้ได้เฉลี่ยไร่ละ 2.8 ตัน และรักษาคุณภาพผลปาล์มสดให้มีอัตราน้ำมันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 18 ขณะเดียวกันจะดำเนินการเพิ่มมูลค่าผลปาล์มจากการแปรรูปอย่างง่าย เป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง โดยจัดตั้งเมืองอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มครบวงจร โดยจัดตั้งเมืองอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มครบวงจร ภายใต้วิสัยทัศน์ที่กำหนดไว้ว่า “มุ่งสู่การเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกน้ำมันปาล์มเคียงคู่ผู้นำในระดับโลก และเป็นแหล่งพลังงานของประเทศที่ยั่งยืน”

2.4.4 เป้าหมายการดำเนินงานในช่วง 5 ปีแรก (2548-2552) มีดังนี้

1. พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 3.67 ล้านไร่ ผลปาล์มสด 6.18 ล้านตัน หรือ 1.11 ล้านตันน้ำมันปาล์มดิบ โดยขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันใหม่ 1.5 ล้านไร่ ในเขตนาร้าง 0.88 ล้านไร่ ไร่ร้าง 0.15 ล้านไร่ ปลูกแทนยางพาราในเขตไม่เหมาะสม ปลูกยางพารา 0.46 ล้านไร่

2. ปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดีทดแทนสวนปาล์มเก่า 0.50 ล้านไร่ ในเขต 4 จังหวัด คือ ชุมพร 0.08 ล้านไร่ สุราษฎร์ธานี 0.15 ล้านไร่ กระบี่ 0.2 ล้านไร่ และสตูล 0.07 ล้านไร่

3. พัฒนาและปรับปรุงสวนปาล์มน้ำมันเดิมที่ยังไม่ถึงอายุขัยปลูกทดแทนด้วยการใส่ปุ๋ยและการเก็บเกี่ยวที่ถูกต้อง

4. สนับสนุนการจัดตั้งอุตสาหกรรมต่อเนื่อง และอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม

5. จัดตั้งคณะกรรมการปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มแห่งชาติ

6. ศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งเมืองปาล์มน้ำมัน

2.4.5 ปัจจัยสู่ความสำเร็จตามที่ระบุในยุทธศาสตร์มีดังนี้

1. มีความชัดเจนและแน่นอนของนโยบายการใช้น้ำมันปาล์มทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงซึ่งต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามผู้บริหารประเทศ

2. มีหน่วยงานอิสระเฉพาะเพื่อกำกับดูแล และควบคุมการดำเนินงานให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งระบบ

3. มีงบประมาณสนับสนุนที่ต่อเนื่อง ในการปฏิบัติตามแผนมีเกษตรกรและผู้ประกอบการเข้าร่วมโครงการถ้าการดำเนินการตามยุทธศาสตร์ดังกล่าว เป็นไปตามที่กำหนดไว้ คาดว่าผลประโยชน์ที่จะได้รับคือ

3.1 ระบบนิเวศที่เสียหายกลับคืนสู่สภาพสมดุลทางธรรมชาติ เมื่อปลูกปาล์มน้ำมันได้ระยะหนึ่ง และรักษาความสมดุลระบบนิเวศให้เกิดขึ้นอย่างยั่งยืน

3.2 ลดความผันผวนของราคาผลปาล์มและผลิตภัณฑ์ เมื่ออุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมิได้อยู่บนพื้นฐานของการบริโภคเพื่อเป็นอาหารอย่างเดียว

3.3 ลดการสูญเสียเงินตามต่างประเทศ จากการนำน้ำมันปาล์มไปใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงอย่างน้อยปีละ 18,000 ล้านบาท

3.4 เพิ่มมูลค่าอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจาก 50,000 ล้านบาทในปัจจุบันเป็น 231,492 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2572 ยุทธศาสตร์นี้ยังอยู่ระหว่างการพิจารณาของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

2.5 เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ที่มีส่วนของออกซิเจนรวมอยู่ในสารประกอบอิ่มตัวที่มีลักษณะโครงสร้างแบบลูกโซ่ แอลกอฮอล์สามารถผลิตขึ้นจากชีวมวล (Biomass) และจากสารไฮโดรคาร์บอน (น้ำมันหรือแก๊ส) ชนิดของแอลกอฮอล์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.5.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือที่เรียกว่าเอทานอล (Ethanol) มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH ผลิตได้จากผลิตผลทางการเกษตร

2.5.2 เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) หรือที่เรียกว่าเมทานอล (Methanol) มีสูตรทางเคมีคือ CH_3OH

เมทิลแอลกอฮอล์เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี มีอุณหภูมิในการจุดระเบิด (Ignition temperature) สูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 1 เท่าตัว มีค่าความร้อนประมาณ 22,700 kJ/kg ต่ำกว่าเอทิลแอลกอฮอล์และน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด เป็นต้น

เมทิลแอลกอฮอล์จะให้ความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล การเผาไหม้จะเกิดควันน้อย แต่มีกลิ่นรุนแรง ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ มีพิษ ไม่สามารถรับประทานได้และเป็นอันตรายต่อผิวหนัง มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง

2.6 ไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซล

ในเครื่องยนต์ดีเซลสารมลพิษจากเครื่องยนต์ที่มีปริมาณมากที่สุดจากไอเสียคือ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และอนุภาคของแข็ง (ควันดำ) มีไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) บ้างแล้วแต่กรณี นอกจากนั้นภาวะมลพิษที่ถือว่าร้ายแรงอีกคือกลิ่นและเสียง และแอลดีไฮด์ จะเห็นว่าแตกต่างจากเครื่องยนต์เบนซิน ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทำงานการสันดาปภายในกระบอกสูบและสมบัติของเชื้อเพลิง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงในอดีต ได้มีการริเริ่มมาในหลายๆ ประเทศ นับตั้งแต่กระทรวงเกษตรของสหรัฐในปี พ.ศ. 2450 (ค.ศ. 1907) ได้จัดพิมพ์รายงานการวิจัย "การใช้แอลกอฮอล์และน้ำมันในเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเกษตร" และต่อมาในปี พ.ศ. 2469 (ค.ศ. 1926) สหราชอาณาจักร โดยนาย Ross และ Ormaudy ได้รายงานผลการวิจัย การใช้แอลกอฮอล์ในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน และประเทศบราซิลมีการสนับสนุนให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์อย่างจริงจังภายใต้การสนับสนุนจากรัฐบาล ทำให้ต้นทุนการผลิตและแอลกอฮอล์ลดลงไปเรื่อยๆ ปีละประมาณร้อยละ 3 ปัจจุบันมีการลดต้นทุนกว่าร้อยละ 75 ส่งผลให้ให้ราคาแอลกอฮอล์ใกล้กับราคา

น้ำมันมากขึ้นเป็นลำดับ ทำให้มีความเป็นไปได้มากขึ้นในการนำแอลกอฮอล์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

ในปี พ.ศ. 2528 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ได้มีพระราชกระแสให้มีการศึกษาต้นทุนการผลิตแอลกอฮอล์จากอ้อย เนื่องจากน้ำมันมีการขาดแคลนและมีราคาแพง และทรงให้มีการแปรรูปอ้อยให้เป็นแอลกอฮอล์ และในปี พ.ศ. 2529 ก็เริ่มผลิตเอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 91 ในอัตรา 2.8 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ต้นทุน 56 บาท/ลิตร แต่หากใช้กากน้ำตาลของโรงงานกรมสรรพสามิตจะได้เอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95 ที่ราคา 24 บาท/ลิตร

ในปี พ.ศ. 2533 ทางฝ่ายเทคนิคของกลุ่มบริษัทสุราทิพย์ ก็ได้ช่วยกันปรับปรุงหอกลั่นจนสามารถผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในอัตรา 5 ลิตร/ชั่วโมง โดยใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ในราคาประมาณ 35 บาท/ลิตร ต่อมาในปี พ.ศ.2538 สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาสยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินทรงเปิดโรงงานผลิตแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงที่บริษัทสุราทิพย์น้อมเกล้าฯ ถวาย และดำเนินการกลั่นตลอดมาจนปัจจุบัน กำลังผลิต 25 ลิตร/ชั่วโมง หรือ 600 ลิตร/วัน ต้นทุนแบบธุรกิจ 32 บาท/ลิตร ถ้าไม่คิดต้นทุนจะมีค่าผลิต 12 บาท/ลิตร สำหรับเอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95

ในปี พ.ศ. 2524 สมศักดิ์ สินประเสริฐ[16] ได้ทำการวิจัย เรื่องสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้เมทิลแอลกอฮอล์และน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยได้ศึกษาผลของการใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว อัตราส่วนการอัด 21:1 ในการทดลองได้เดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวก่อนที่ความเร็วของเครื่องยนต์คงที่ค่าต่างๆ คือ 1000, 1500, 2000, 2500 และ 3000 รอบต่อนาที ต่อจากนั้นจึงเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงร่วมที่ความเร็วเดียวกัน และระหว่างเดินเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมนี้ได้มีการเปลี่ยนอัตราส่วนของเมทิลแอลกอฮอล์ในค่าต่างๆ กัน เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองมิได้มีการปรับแต่งแก้ไข เพียงแต่ได้ติดตั้งคาร์บูเรเตอร์เพื่อใช้สำหรับป้อนเมทิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นบริเวณท่อไอดี ทำให้การป้อนเชื้อเพลิงทั้งสองแยกกันอย่างอิสระ จากผลการทดลองได้พิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะไอเสียจากเครื่องยนต์ และสมดุลพลังงานของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวอัตราส่วนการอัด 21:1 ในการทดลองได้เดินเครื่องยนต์ผลการทดลองปรากฏว่า การใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลสามารถจะใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองก็เพิ่มขึ้นด้วย ไอเสียจากเครื่องยนต์มีควันน้อยลง แต่จะเกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน และแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ลดลงเล็กน้อย

ในปี พ.ศ. 2527 โกวิท ศตวุฒิ [4] ได้ศึกษาวิจัยเพื่อทดสอบหาสมบัติของแอลกอฮอล์ 2 ชนิดคือไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) หรือโพรพานอล (Propanol) และไอโซบิวทิลแอลกอฮอล์ (Isobutyl alcohol) หรือบิวทานอล (Butanol) เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลที่เลือกไว้คือเครื่องยนต์ขนาดเล็กกำลังเครื่องประมาณ 8 แรงม้าที่นิยมใช้กันทั่วไปในภาคเกษตรกรรม ยี่ห้อมิตซูบิชิ (Mitsubishi) ผลปรากฏว่าแอลกอฮอล์ทั้งสองผสมกับน้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันดีเซลได้เป็นอย่างดี ปราศจากการแยกตัว สำหรับเครื่องยนต์เบนซินพบว่าแอลกอฮอล์ทั้งสองเป็นตัวเพิ่มคุณสมบัติด้านค่าออกเทน (Octane rating) ตัวอย่างเช่นที่ส่วนผสมร้อยละ 20 จะเพิ่มค่าออกเทนประมาณ5-6 หน่วย ในด้านสมรรถนะเชื้อเพลิงผสมแอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 15 ให้กำลังเครื่องยนต์เบนซินสูงสุดและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยลงโดยไม่ต้องปรับตั้งคาร์บูเรเตอร์ใหม่ ส่วนบิวทานอลนั้นเมื่อผสมตามการทดลองถึงร้อยละ 40 ยังปรากฏว่าให้กำลังสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว ซ้ำยังสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยลงอีกถึงประมาณร้อยละ 12 เมื่อส่วนผสมบิวทานอล ถึงร้อยละ 40 ในด้านการสึกหรอในเครื่องยนต์ดีเซลที่ทดสอบโดยใช้บิวทานอล ปรากฏว่าการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ลดลง

ในปี พ.ศ. 2531 จิรศักดิ์ จิระวารี[5] ได้ทำวิจัยเรื่องการใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ คือเอทิลแอลกอฮอล์ผสมกับสารเพิ่มคุณภาพคือไอโซบิวทิลไนเทรต (Isobutyl nitrate) และน้ำมันละหุ่งร้อยละ 1 เพื่อช่วยหล่อลื่นระบบเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ที่ใช้เป็นเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ในกิจการการเกษตรของยันมาร์ (Yanmar) รุ่น SA 80 L สี่จังหวะสูบเดียว ไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ ผลการทดสอบปรากฏว่าหากมีไอโซบิวทิลไนเทรตประมาณร้อยละ 23 โดยปริมาตร เครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะเริ่มเดินเครื่องได้ และถ้ามีถึงร้อยละ 27 โดยปริมาตร เครื่องยนต์เดินเครื่องได้ดี และให้สมรรถนะดีโดยไม่อาการน็อค (Knock) จากนั้นได้ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ต่างๆ และแปรเปลี่ยนภาระงาน (Load) พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้สารผสมเอทิลแอลกอฮอล์ ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลไอเสียมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ในไอเสียมีค่าใกล้เคียงกัน และเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ (Unburned hydrocarbon) มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมาก ในด้านเศรษฐกิจการใช้สารสารผสมเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายประมาณ 4 เท่าของการใช้น้ำมันดีเซล ทั้งนี้โดยเปรียบเทียบราคาต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน

ในปี พ.ศ. 2531 บุรินทร์ วงษ์ศิริ[9] ได้ทำการวิจัยการใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยการวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เอทิลแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยป้อนเอทิลแอลกอฮอล์เข้าคาร์บูเรเตอร์และผสมกับอากาศ ส่วนน้ำมันดีเซลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านหัวฉีดตามปกติ ใช้อัตราส่วนระหว่างเอทิลแอลกอฮอล์และน้ำมันดีเซลต่างๆ

กัน แล้วเปรียบเทียบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วยของงาน ตลอดจนไอเสียและค่าใช้จ่ายกับกรณีใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว

โวล์ฟกัง เบลาบ์[12] สังกัดทีมของออโต้บิลด์ (AUTO BILD) ได้ทดสอบน้ำมันพืชโดยนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าปราศจากปัญหา โดยทำการเปรียบเทียบค่าต่างๆ ของน้ำมัน 3 ชนิด คือ ดีเซล ไบโอดีเซล น้ำมันพืช ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 2.4 เนื่องจากแรงจูงใจในความแตกต่างของราคาน้ำมันพืชต่อน้ำมันดีเซล เพราะน้ำมันพืชไม่ได้ถูกเก็บภาษีในอัตราน้ำมันเชื้อเพลิง ปราศจากซัลเฟอร์และช่วยลดมลพิษทางอากาศ

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบน้ำมันชนิดต่างๆ

	ดีเซล	ไบโอดีเซล	น้ำมันพืช
ค่าซีเทน (DIN51)	53.6	56.3	39.3
ความหนาแน่นที่ 15 °C	836.5	883.6	920.2
ปริมาณซัลเฟอร์ (มก./ก.)	276	4	2
ค่าสะเทิน (มก./ก.)	<0.08	0.41	0.31

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ได้ร่วมกับโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา[14] ทำการวิจัยพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพสูตรผสมของน้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซล ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อผสมน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกลั่นจากโรงกลั่นน้ำมันพืช (Refined palm oil) ไม่เกินร้อยละ 10 เข้ากับน้ำมันดีเซล เป็นน้ำมันดีเซล-ปาล์ม (บริสุทธิ์) สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลได้ โดยมีคุณภาพเทียบกับน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ทุกประการ

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)[15] ได้ทำการวิจัยโดยใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันปาล์มดิบในส่วนผสมน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันปาล์มต่อน้ำมันก๊าด (ร้อยละโดยปริมาตร) ดังนี้ 90:10:0, 75:20:5, 85:15:0 โดยนำไปทดสอบสมบัติน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM และ นำไปทดสอบในเครื่องยนต์คูโบต้าแบบอินไดเรกอินเจกชัน ได้ผลการทดลอง คือ ส่วนผสม 85:15:0 สามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ได้ โดยไม่มีผลกระทบที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลมากนัก ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ใช้จะต้องผ่านการกรองเอาไขออกก่อน และการปัญหาไส้กรองอุดตันควรเลือกน้ำมันปาล์มที่ไม่ข้นมากนัก

ในปี พ.ศ. 2548 อรุณ ไชยพันธุ์[20] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นส่วนผสม โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) และเปอร์เซ็นต์ควันดำ เมื่อป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 0%, 0.8%, 1.6%, 3.2% และ 6.4% ของน้ำมันดีเซลโดยปริมาตร โดยใช้ความเร็วรอบของ

เครื่องยนต์ (Engine speed) 850, 1200, 1500, 2000 และ 2500 rpm และใช้แรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque) ที่ 50, 100 และ 150 นิวตันเมตร (N.m) และปรับองศาฉีดน้ำมันจากองศาปกติ (12 องศาก่อนศูนย์ตายบน) เป็น 9 องศา และ15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าแอลกอฮอล์ชนิดเอทิลแอลกอฮอล์ และ เมทิลแอลกอฮอล์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลได้ โดยการผสมร่วมกับเชื้อเพลิง หรือแยกกันป้อนเข้าเครื่องยนต์ แต่ในการทดสอบขั้นต้นยังขาดข้อมูลในเชิงลึก ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้แอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดและไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ได้ประสิทธิผลที่ดีสุด โดยวิธีป้อนเข้าทางท่อร่วมไอดี ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ แต่เนื่องจากในปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการตั้งโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สโซฮอล์ และดีโซฮอล์ ดังนั้นจึงเป็นที่คาดได้ว่าเอทิลแอลกอฮอล์จะสามารถหาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพง ซึ่งน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการใช้เป็นสารผสมกับน้ำมันดีเซล

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ระบุถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัย (Ethereal & Method) การออกแบบการวิจัย (Research Design) และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.1 กิจกรรมการดำเนินการวิจัย/เก็บข้อมูล

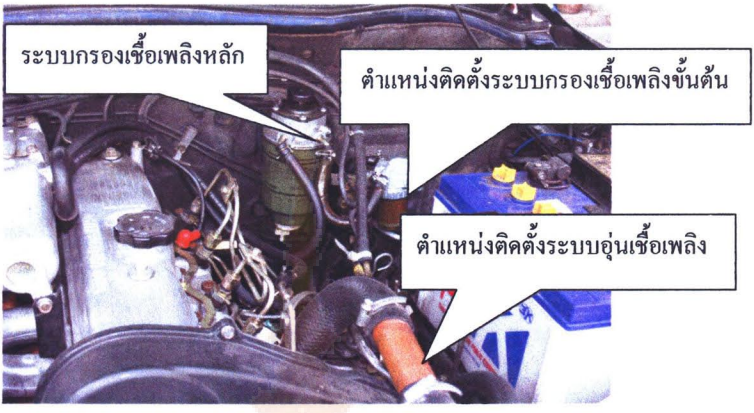
ในการทำวิจัยได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงผสมเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซล

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เสริมเพื่อติดตั้งเข้ากับระบบป้อนเชื้อเพลิง

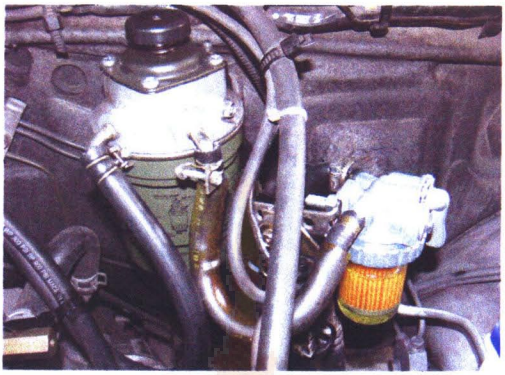
ประกอบด้วย

1. ระบบกรองเชื้อเพลิงขั้นต้น (Primary fuel filter) เพื่อดักจับสิ่งสกปรกและไขที่อาจปนเปื้อนเข้าปั๊มจ่ายเชื้อเพลิงหลัก (Main fuel injection pump)
2. ระบบอุ่นเชื้อเพลิง (Preheat unit) เพื่อป้องกันการอุดตันเนื่องจากการแข็งตัวของไขและลดความหนืดของเชื้อเพลิงผสมและเพื่อยืดอายุการใช้งานของระบบกรองเชื้อเพลิงหลัก (Main fuel filter)



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งระบบกรองเชื้อเพลิงหลัก
และระบบอุ่นเชื้อเพลิงเข้ากับระบบป้อนเชื้อเพลิง

เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 90 แรงม้า 4 D 56 มิตซูบิชิ



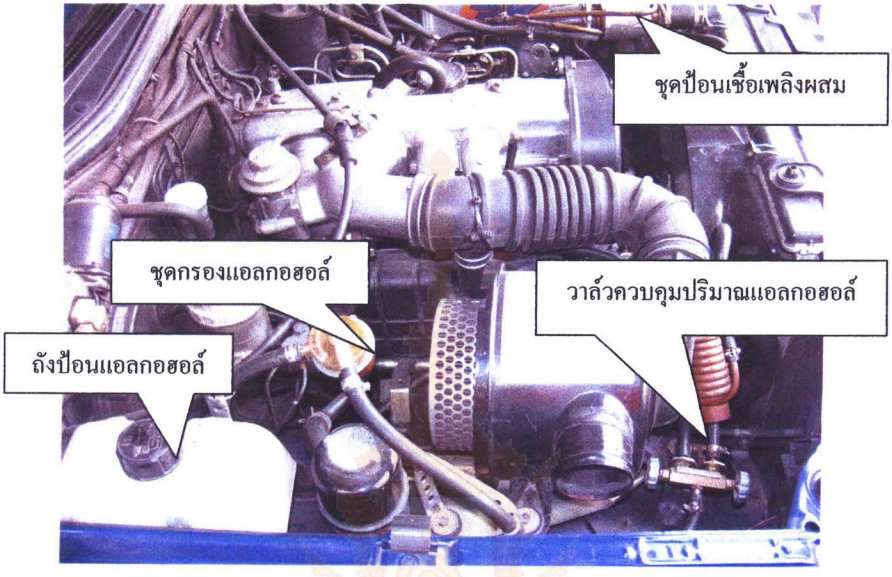
(ก) เริ่มใช้งาน

(ข) หลังจากใช้งาน 5,000 กิโลเมตร

รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานระบบกรองเชื้อเพลิงขั้นต้นทำหน้าที่กำจัดเศษสิ่งสกปรกและไขที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันดีเซล/ดีเซลผสมน้ำมันพืช

ก) เริ่มใช้งาน

ข) เมื่อผ่านการใช้งาน 5,000 กิโลเมตรเริ่มมีสิ่งสกปรกและไขจับที่บริเวณผิวหน้าฟิลเตอร์ (ต้องทำการเปลี่ยนฟิลเตอร์ก่อนที่จะเกิดอาการสะดุดของเครื่องยนต์)



รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ป้อนสารช่วยการเผาไหม้เข้าที่ช่องดูดอากาศ

3.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำมันพืชและสารช่วยการเผาไหม้

3.2.1 ตัวอย่างน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว สุ่มตัวอย่างโดยการซื้อจากสถานีบริการทั่วไป เช่น ปตท. เชลล์ คาลเท็กซ์ บางจาก เอสโซ่ เพื่อใช้เป็นตัวแทนแบบสุ่ม (Random sampling)

3.2.2 ตัวอย่างน้ำมันพืชสุ่มจากการซื้อในท้องตลาด โดยใช้น้ำมันพืชที่ได้มาจากวัตถุดิบสามชนิดด้วยกันคือ

1. น้ำมันปาล์มยี่ห้อแอโร่ และโอเลอีน
2. น้ำมันถั่วเหลืองยี่ห้อชิม
3. น้ำมันรำข้าวยี่ห้อชิม
4. น้ำมันพืชผสมที่ได้จากการนำเอาน้ำมันทั้งสามชนิดมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:1:1 (v/v) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของน้ำมันพืชผสมแปรรูปทั่วไป

3.2.3 สารช่วยการเผาไหม้ในการทดลองได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ เมทิลแอลกอฮอล์, และแอลกอฮอล์ผสมระหว่างเอทิลแอลกอฮอล์กับเมทิลแอลกอฮอล์ ด้วยอัตราส่วนผสม 1:1 (v/v) เป็นตัวอย่างของแอลกอฮอล์ผสมทั่วไป

3.2.4 อัตราส่วนผสมระหว่างดีเซลกับน้ำมันพืช (v/v) มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100

3.2.5 อัตราส่วนการป้อนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน (หรือน้ำมันดีเซลผสมน้ำมันพืช) อยู่ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 5

3.2.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบน้ำมัน (ดีเซล) ในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. ASTM-D 93 Standard Test Methods for Flash-Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester
2. ASTM-D 130 Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test
3. ASTM-D 240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter
4. ASTM-D 445-01 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids the Calculation of Dynamic Viscosity
5. ASTM-D 4052-96 Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquid by Digital Density Meter

3.3 ทดสอบผลการใช้เชื้อเพลิงผสมในการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลในสภาพการใช้งานจริง

การทดสอบจะกระทำใน 3 ลักษณะ ได้แก่

3.3.1 ลักษณะการจราจรในช่วงเช้าและช่วงเย็นในกรุงเทพมหานครอัตราเร็วเฉลี่ย 20-40 กม./ชม. เป็นตัวอย่างของการจราจรติดขัดมากถึงติดขัดน้อย ทำการทดสอบครั้งละประมาณสองถึงสามชั่วโมง เก็บเฉพาะข้อมูลที่อยู่ในย่านที่กำหนด (ตัดข้อมูลที่ความเร็วต่ำกว่า 20 กม./ชม.และที่สูงกว่า 40 กม./ชม. ทิ้งไป) ระยะทางทดสอบทั้งหมด 20,000 กม. สำหรับกรณีที่ไม่ได้ป้อนแอลกอฮอล์ และ อีก 20,000 กม. สำหรับกรณีป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.0 ที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์ (Air intake manifolds)

3.3.2 ระยะทางประมาณ 200 กม. (ไป/กลับ) รอบกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ที่สามารถรักษาอัตราเร็วเฉลี่ยไว้ได้ที่ 50-60 กม./ชม. (ตัดข้อมูลที่ความเร็วต่ำกว่า 50 กม./ชม.และที่สูงกว่า 60 กม./ชม. ทิ้งไป) ระยะทางทดสอบทั้งหมด 20,000 กม. สำหรับกรณีที่ไม่ได้ป้อนแอลกอฮอล์ และ อีก 20,000 กม. สำหรับกรณีป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.0 ที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์

3.3.3 ระยะทางประมาณ 600 กม. (ไป/กลับ) จากกรุงเทพมหานครที่สามารถรักษาอัตราเร็วเฉลี่ยไว้ได้ที่ 70-90 กม./ชม.(ตัดข้อมูลที่ความเร็วต่ำกว่า 70 กม./ชม.และที่สูงกว่า

90 กม./ชม. ทิ้งไป) ระยะทางทดสอบทั้งหมด 20,000 กม. สำหรับกรณีที่ไม่ได้ป้อนแอลกอฮอล์ และอีก 20,000 กม. สำหรับกรณีป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.0 ที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์

สภาวะแวดล้อมการทดสอบ

1. ไม่มีฝนตกฝนฟ้าคะนอง
2. อุณหภูมิอากาศภายนอก 30-35 ^{o}C
3. น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยขณะทดสอบ 250 กก.
4. เปิดเครื่องอำนวยความสะดวกในห้องโดยสารตามปกติของการใช้งานทั่วไป
5. ค่าทดสอบได้จากการเก็บข้อมูลของผู้ขับรถ สองคน นำมาเฉลี่ยร่วมกัน

การดูแลซ่อมบำรุง

1. เปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ น้ำมันหล่อลื่นระบบ ทุกๆระยะทางการทดสอบ 10,000 กม.
2. ตรวจซ่อมบำรุงตามคู่มือการซ่อมบำรุงของผู้ผลิต เช่น การเปลี่ยนไส้กรองอากาศ ชุดกรองน้ำมัน น้ำมันเครื่อง เป็นต้น
3. สภาพของเครื่องยนต์หลังการทดสอบสิ้นสุดที่ระยะทาง 100,000 กม. พบว่าไม่มีการชำรุดหรือผิดปกติของการทำงานของปั๊มจ่ายน้ำมัน หัวฉีด จนต้องมีการซ่อมบำรุงแต่อย่างใด ซึ่งระยะทางดังกล่าวเป็นระยะทางที่ต้องมีการซ่อมบำรุงตามปกติของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป

3.4 การทดสอบคุณภาพของไอเสียและการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล

การทดสอบอาศัยข้อมูลจากการทดสอบการใช้เมทิลแอลกอฮอล์ ป้อนร่วมช่วยการเผาไหม้ โดยอาศัยความร่วมมือจากห้องปฏิบัติการทดสอบวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยคุณอรุณ ไชยพันธุ์ ทำหน้าที่เป็นวิศวกรทดสอบ โดยใช้เครื่องยนต์ IZUZU มังกรทองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพเป็นเครื่องยนต์ทดสอบ ทำการทดสอบบนแท่นทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

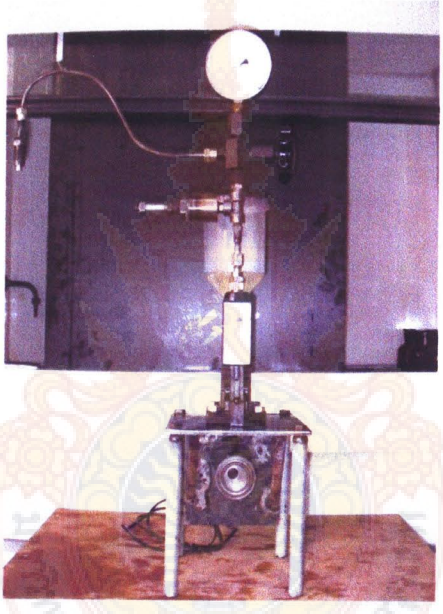
3.4.1 การทดสอบเมื่อครบอายุการใช้งานสารหล่อลื่นได้ทำการถอดชิ้นส่วนเครื่องยนต์มาตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์

3.4.2 การทดสอบการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันปาล์มร่วมกับดีเซลที่อัตราส่วนผสมน้ำมันปาล์มไม่เกินร้อยละห้าสิบกับเครื่องยนต์หัวลากยี่ห้อ HINO ขนาด 280 แรงม้า (ได้รับความร่วมมือจาก บริษัท T-Line) พบว่าสามารถใช้งานได้ดีบนการทดสอบบนเส้นทางบางนา-แหลมฉบัง

3.5 การทดสอบการทำงานของหัวฉีดและลักษณะของละอองน้ำมัน

การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบหัวฉีดทดสอบการกระจายตัวของน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันพืช ได้รับความร่วมมือจากห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทำการออกแบบ ติดตั้ง และทดสอบ

การออกแบบทำโดยใช้มอเตอร์ต่อเข้ากับชุดทดสอบหัวฉีดมีลูกเบี้ยวเป็นตัวอัดแรงดัน ใช้หัวฉีดแบบเดือยให้ฉีดพ่นน้ำมันออกมาเป็นละอองฝอย ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบหัวฉีด

บทที่ 4

ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

การทดสอบสมบัติต่างๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐานสากล (ASTM) ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันดีเซล ในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. ASTM-D 93 Standard Test Methods for Flash-Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester ค่าที่รายงาน ^{o}C ค่าที่ยอมรับได้ สูงกว่า 52°C
2. ASTM-D 130 Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test ค่าที่ยอมรับได้ไม่สูงกว่า 1a
3. ASTM-D 240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter ค่าที่รายงาน Gross Heating Value (MJ/kg) reproducibility 0.40 MJ/kg ค่าที่ยอมรับได้ 42.5-44.8 MJ/kg (HV)
4. ASTM-D 445-01 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids the Calculation of Dynamic Viscosity ค่าที่รายงานมีหน่วยเป็น cSt ที่ 40, 50, 100 องศาเซลเซียส ค่าที่ยอมรับได้ 1.8-4.1 (40 ^{o}C)
5. ASTM-D 4052-96 Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquid by Digital Density Meter ค่าที่รายงาน g/ml Reproducibility 0.005 ที่ย่านการวัด 0.68-0.97 g/ml ค่าที่ยอมรับได้ 0.81-0.87 g/ml

ผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบน้ำมันผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน กับน้ำมันดีเซลได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงผสม

	ชนิดของน้ำมัน	HV MJ/kg	DENSITY g/ml	API	FP °C	VIS 40 cSt	VIS 50 cSt	VIS 100 cSt	COPPER
1	PO-00-REF ดีเซลอ้างอิง	44.30	0.8681	36.52	65.5	3.10	2.85	1.245	1a
2	PO-25-ARO ปาล์มแอโร่ 25%	42.80	0.8610	32.76	70.5	5.97	4.87	2.06	1a
3	PO-25-OLE ปาล์มโอเลอิน 25%	42.76	0.8608	32.79	69.5	5.97	4.87	2.06	1a
4	PO-50-ARO ปาล์มแอโร่ 50%	41.35	0.8791	29.37	75.5	11.22	8.76	3.31	1a
5	PO-50-OLE ปาล์มโอเลอิน 50%	41.23	0.8790	29.38	76.5	11.28	9.22	3.28	1a
6	PO-75-ARO ปาล์มแอโร่ 75%	40.18	0.8975	26.07	88.5	21.18	15.73	5.25	1a
7	PO-75-OLE ปาล์มโอเลอิน 75%	40.17	0.8970	26.08	89.5	21.18	16.54	5.28	1a
8	PO-100-ARO ปาล์มแอโร่ 100%	39.21	0.9158	22.92	> 100	39.95	28.30	8.39	1a
9	SB-25 น้ำมันถั่วเหลือง(ซิม) 25%	43.86	0.8518	34.53	67.5	5.51	4.43	1.99	1a
10	SB-50 น้ำมันถั่วเหลือง(ซิม) 50%	42.00	0.8749	30.14	71.5	9.83	7.65	3.13	1a
11	SB-75 น้ำมันถั่วเหลือง(ซิม) 75%	40.57	0.8996	25.71	85.5	17.77	13.52	4.97	1a
12	SB-100 น้ำมันถั่วเหลือง(ซิม) 100%	39.29	0.9231	21.69	>100	31.54	22.96	7.63	1a
13	PRO-25 น้ำมันรำข้าว(ซิม) 25%	43.03	0.8511	34.66	70.5	5.78	4.54	2.02	1a
14	PRO-50 น้ำมันรำข้าว(ซิม) 50%	41.67	0.8738	30.34	77.5	10.71	8.21	3.26	1a
15	PRO-75 น้ำมันรำข้าว(ซิม) 75%	40.27	0.8977	26.05	88.5	20.37	15.14	5.27	1a
16	PRO-100 น้ำมันรำข้าว(ซิม) 100%	38.54	0.9205	22.13	>100	37.72	27.07	8.32	1a
17	PO-OLE-PRO-SB-25 น้ำมันพืชผสม(1:1:1) 25%	43.91	0.8509	34.7	69.5	5.72	4.53	2.01	1a
18	PO-OLE-PRO-SB-50 น้ำมันพืชผสม(1:1:1) 50%	42.03	0.8734	30.42	75.5	10.53	8.08	3.22	1a
19	PO-OLE-PRO-SB-75 น้ำมันพืชผสม(1:1:1) 75%	40.83	0.8961	26.32	88.5	19.36	14.32	5.09	1a

คำอธิบาย HV คือค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ API คือความถ่วงเอ.พี.ไอ. FP คือจุดวาบไฟ

VIS 40, VIS 50, VIS 100 คือค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40, 50, และ 100 °C ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.1 สามารถอธิบายสมบัติของน้ำมันผสมได้ดังต่อไปนี้คือ

4.1 ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (Heating value, HV)

เนื่องจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว ให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำกว่าดีเซลประมาณร้อยละ 11 ถึงร้อยละ 13 ดังนั้นการนำเอาน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสมที่ได้มีค่าลดลงเป็นสัดส่วนตามปริมาณของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า Gross heating value (MJ/kg) ของน้ำมันดีเซลเมื่อมีน้ำมันพืชเป็นส่วนผสม

ร้อยละของดีเซล	0	25	50	75	100
ถั่วเหลือง	39.29	40.57	42.00	43.86	44.30
ปาล์ม	39.21	40.18	41.30	42.78	44.30
รำข้าว	38.54	40.27	41.67	43.00	44.30

จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ส่วนผสมน้ำมันพืชไม่เกินร้อยละห้าสิบแล้ว ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมจะลดลงไม่เกินร้อยละ 5.2 เท่านั้น ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมจะเป็นเท่าใดนั้นจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านราคาตลาดซื้อขายในขณะนั้นเป็นสำคัญ

4.2 ค่าความหนาแน่นของน้ำมันผสม

น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว มีผลทำให้ความหนาแน่นของน้ำมันผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของดีเซลเมื่อมีน้ำมันพืชเป็นส่วนผสม

ร้อยละของดีเซล	0	25	50	75	100
ถั่วเหลือง	0.9231	0.8996	0.8749	0.8518	0.8681
ปาล์ม	0.9158	0.8973	0.8791	0.8609	0.8681
รำข้าว	0.9205	0.8977	0.8738	0.8511	0.8681

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจาก ค่าความแม่นยำ (Reproducibility) ของวิธีการวัด (จาก ASTM-D 4052-96 มีค่าเท่ากับ 0.005) และค่าที่ยอมรับได้สำหรับเกณฑ์มาตรฐานดีเซลคือ 0.81-0.87 จะเห็นว่าสำหรับส่วนผสมดีเซลที่มีปริมาณน้ำมันพืชผสมไม่เกินร้อยละห้าสิบ ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการใช้งาน หรือหมายความว่าปริมาณของเชื้อเพลิงที่จะต้องป้อนเข้าสู่ลูกสูบ (Engine cylinder) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่หัวฉีด (Fuel nozzle) ได้ถูก

ออกแบบเอาไว้ ดังนั้นในการทดสอบการใช้งานจริง และการทดสอบภาคสนาม จึงใช้ส่วนผสมของน้ำมันพืชในน้ำมันดีเซลไม่เกินร้อยละห้าสิบเป็นหลักในการทดลองต่อไป นอกจากนี้การใช้ส่วนผสมไม่เกินร้อยละห้าสิบ อาจถือได้ว่าค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการทำงานของปั๊มป้อนเชื้อเพลิง (Injection pump) ของเครื่องยนต์อีกด้วย (เนื่องจากค่าที่ได้ยังอยู่ในย่านที่มาตรฐานกำหนดไว้)

4.3 ความปลอดภัยของการใช้งาน

พิจารณาค่าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลผสมน้ำมันพืชพบว่าน้ำมันผสมมีค่าจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล (FP ของดีเซลเท่ากับ 65.5°C) และสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด (สูงกว่า 52 °C) ดังนั้นน้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของน้ำมันพืชจึงมีความปลอดภัยจากการเกิดอุบัติเหตุจากประกายไฟในสถานที่กักเก็บ ดังนั้นน้ำมันดีเซลผสมจึงมีความปลอดภัยในการใช้งานกามเกณฑ์ที่กำหนด

4.4 ค่าความหนืดของน้ำมันผสม

น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว มีผลทำให้ความหนืดของน้ำมันผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดของดีเซลที่เปลี่ยนไป (40-100 °C) เมื่อมีน้ำมันพืชเป็นส่วนผสม

ร้อยละของดีเซล	0	25	50	75	100
ถั่วเหลือง	31.54-7.6	17.77-4.97	9.83-3.13	5.51-1.99	3.10-1.25
ปาล์ม	39.95-8.39	21.18-5.28	11.25-3.30	5.97-2.06	3.10-1.25
รำข้าว	37.72-8.32	20.37-5.27	10.71-3.26	5.78-2.02	3.10-1.25

ค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานคือ 1.8-4.1 (ที่อุณหภูมิ 40 °C)

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดจะเห็นได้ว่าน้ำมันดีเซลเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิใช้งานจริงในห้องเครื่องยนต์ (30-100 °C) มีค่าความหนืดระหว่าง 3.1-1.25 cSt ในขณะที่น้ำมันดีเซลที่มีน้ำมันพืชผสมมีค่าความหนืดสูงเกินย่านที่ยอมรับได้ แต่ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันผสมให้สูงระหว่าง 50-100°C จะทำให้ความหนืดของน้ำมันผสมลดลงมาอยู่ในย่านที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับส่วนผสมน้ำมันดีเซลที่มีน้ำมันพืชผสมไม่เกินร้อยละห้าสิบโดยประมาณ ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบอุ่นน้ำมัน โดยอาศัยการระบายความร้อนจากระบบหล่อเย็นเครื่องยนต์เพื่อทำให้น้ำมันผสมมีความหนืดอยู่ในย่านที่กำหนดเหมาะกับการทำงานของปั๊มส่งจ่ายน้ำมัน ดังนั้นส่วนผสมที่สอดคล้องกับการใช้งานจึงควรใช้ส่วนผสมของน้ำมันพืชไม่เกินร้อยละห้าสิบ

4.5 การกัดกร่อน (Corrosion)

การกัดกร่อนต่อระบบการทำงานของเครื่องยนต์ สามารถพิจารณาได้จากผลการทดสอบตาม ASTM-D 130 หรือการทดสอบด้วยแผ่นทองแดง (Copper corrosion test) พบว่าน้ำมันดีเซลผสมทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานการใช้งานและการกัดกร่อนทุกรายการ

ผลการทดสอบอื่นๆ ได้แก่

4.6 ผลการทดสอบการเข้ากันได้ระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันพืช

จากการทดสอบพบว่า น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว สามารถผสมเป็นของผสมเนื้อเดียวกันได้กับน้ำมันดีเซลได้ในทุกๆ อัตราส่วน และไม่มีการเปลี่ยนแปลงแยกชั้นหลังจากการเก็บรักษาไว้ในภาชนะปิดเป็นระยะเวลา 2 ปี ซึ่งขณะนี้ยังเก็บอยู่ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ดีเซลผสมโดยใช้น้ำมันพืชเป็นส่วนผสมสามารถเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานานเพียงพอสำหรับการจัดจำหน่ายในสถานีบริการดังแสดงในรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันพืชที่ใช้ในการวิจัยที่เก็บไว้เป็นเวลา 2 ปี (เริ่มบรรจุขวดวันที่ 21 มิถุนายน 2549 บันทึกภาพเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2551)

4.7 ทดสอบผลการใช้เชื้อเพลิงผสมในการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลในสภาพการใช้งานจริง

ผลการทดสอบใน 3 ลักษณะ ได้ข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นไปดังตารางที่ 4.5 ตัวเลขในตารางแสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง กม./ลิตร (ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าความสิ้นเปลืองเมื่อมีการป้อนแอลกอฮอล์ 1% ร่วมกับเชื้อเพลิง)

ตารางที่ 4.5 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันกับเครื่องยนต์ดีเซล 4D 56 ระบบหัวฉีดแบบกลไก

ร้อยละของดีเซล	100	90	80	70
20-40 กม./ชม.	8.0-9.0 (8.0-9.0)	8.0-9.0 (8.0-9.0)	8.0-9.0 (8.0-9.0)	8.0-9.0 (8.0-9.0)
59-60 กม./ชม.	9.5-10.5 (9.5-10.50)	9.5-10.5 (9.5-10.50)	9.5-10.5 (9.5-10.50)	9.5-10.5 (9.5-10.50)
70-90 กม./ชม.	10.0-12.5 (10.5-13.0)	10.0-12.0 (10.5-12.5)	10.0-11.5 (10.5-12.5)	10.0-11.0 (10.5-12.0)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ แสดงค่าเมื่อมีแอลกอฮอล์ร้อยละ 1 ร่วมกับดีเซล

สภาพของเครื่องยนต์หลังการทดสอบสิ้นสุดที่ระยะทาง 100,000 กม. พบว่าไม่มีการชำรุดหรือผิดปกติ ของการทำงานของปั๊มจ่ายน้ำมัน หัวฉีด จนต้องมีการซ่อมบำรุงแต่อย่างใด (ดูภาพในภาคผนวก ก)ซึ่งระยะทางดังกล่าวเป็นระยะทางที่ต้องมีการซ่อมบำรุงตามปกติของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป

ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันใน เครื่องยนต์ดีเซล 4D 56 ระบบหัวฉีดแบบคอมมอนเรลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (กม./ลิตร) กับเครื่องยนต์ดีเซล 4D 56 ระบบหัวฉีดแบบคอมมอนเรล

ดีเซล	ร้อยละ 100	ร้อยละ 90
20-40 กม./ชม.	10.0-11.0 (10.5-12.0)	ใช้ไม่ได้
59-60 กม./ชม.	12.0-13.5 (13.0-14.5)	ใช้ไม่ได้
70-90 กม./ชม.	14.0-15.5 (15.0-17.0)	ใช้ไม่ได้

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ แสดงค่าเมื่อมีแอลกอฮอล์ร้อยละ 1 ร่วมกับดีเซล

4.8 การทดสอบคุณภาพของไอเสียและการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล

การทดสอบอาศัยข้อมูลจาก การทดสอบการใช้เมทิลแอลกอฮอล์ ป้อนร่วมช่วยการเผาไหม้ โดยอาศัยความร่มมือจากห้องปฏิบัติการทดสอบวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมสาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ โดยคุณอรุณ ไชยพันธุ์ ทำหน้าที่เป็นวิศวกรทดสอบ โดยใช้เครื่องยนต์ IZUZU มังกรทองของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพเป็นเครื่องยนต์ทดสอบ ทำการทดสอบบนแท่น ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์มีข้อสรุปที่สำคัญได้แก่

4.8.1 การใช้เมทิลแอลกอฮอล์ ป้อนร่วมกับอากาศที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์ ช่วยให้สมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปริมาณควันดำลดจาก ร้อยละห้าสิบ เหลือใกล้เคียงร้อยละหนึ่ง

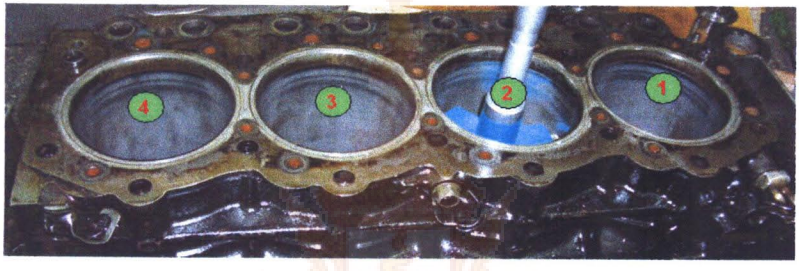
4.8.2 ปริมาณที่เหมาะสมที่ใช้ป้อนแอลกอฮอล์ควรใช้ ประมาณร้อยละ 1 ถึง 1.5 เมื่อเพิ่มปริมาณ ของแอลกอฮอล์สูงกว่านี้ก็ไม่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงที่อย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าปริมาณแอลกอฮอล์สูงเกินกว่า ร้อยละ 6 เครื่องยนต์ทดสอบจะเกิดอาการสะดุด (Knock)

4.8.3 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการ ใช้ เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ หรือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นการเลือกใช้แอลกอฮอล์ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ ขึ้นอยู่กับราคาและแหล่งที่มา ตามความเหมาะสม ดังนั้น ในการทดสอบภาคสนาม จึงเลือกใช้ เมทิลแอลกอฮอล์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ เป็นตัวทดสอบ เนื่องจาก ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ มิได้มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป เนื่องจากเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม อีกทั้งมีราคาแพงกว่าแอลกอฮอล์ทั้ง 2 ชนิดที่ผู้วิจัยเลือกใช้

รายละเอียดของผลการทดสอบอยู่ในภาคผนวก ก

4.8.4 การทดสอบเมื่อครบอายุการใช้งานสารหล่อลื่นได้ทำการถอดชิ้นส่วนเครื่องยนต์มาตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ปรากฏว่าไม่ปรากฏความผิดปกติเนื่องจากการใช้แอลกอฮอล์ร่วมในการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้แก่ ขนาดของกระบอกสูบ แหวนลูกสูบ และความดันในกระบอกสูบ โดยการวัดขนาดของกระบอกสูบ น้ำหนักของแหวนลูกสูบ และการวัดความดันกระบอกสูบ ทั้งก่อนและหลังการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการสึกหรอ ดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และในตารางที่ 4.7, 4.8, และ 4.9



รูปที่ 4.2 การวัดขนาดของกระบอกสูบก่อนและหลังการทดสอบ

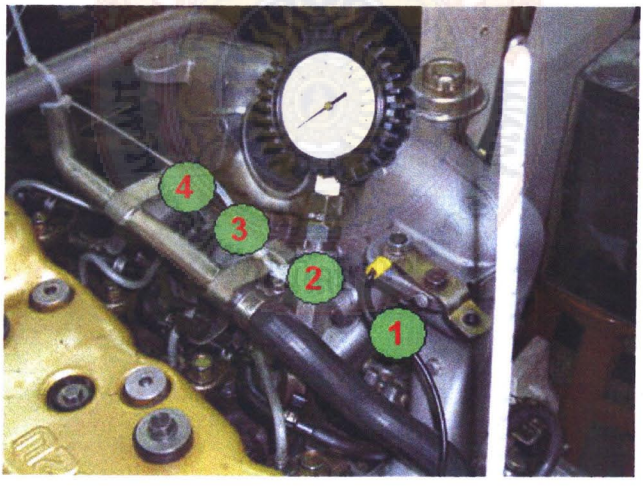
ตารางที่ 4.7 ขนาดของกระบอกสูบก่อนและหลังการทดสอบ

ช่วงการทดสอบ	ขนาดของกระบอกสูบ (เส้นผ่านศูนย์กลาง) เฉลี่ย (มม.)			
	4	3	2	1
ก่อนการทดสอบ	93.038	93.043	93.038	93.041
หลังการทดสอบ	93.040	93.044	93.038	93.042

รูปที่ 4.3 แหวนลูกสูบ

ตารางที่ 4.8 น้ำหนักของแหวนลูกสูบก่อนและหลังการทดสอบ

ช่วงการทดสอบ	น้ำหนักของแหวนลูกสูบ (กรัม)			
	ลูกสูบที่ 4	ลูกสูบที่ 3	ลูกสูบที่ 2	ลูกสูบที่ 1
ก่อนการทดสอบ	46.3	45.9	46.1	46.2
หลังการทดสอบ	46.2	45.9	46.0	46.1



รูปที่ 4.4 การวัดความดันกระบอกสูบก่อนและหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.9 ความดันกระบอกสูบก่อนการทดสอบ และทุก 100 ชั่วโมง

ช่วงการทดสอบ	ความดันกระบอกสูบ (บาร์)			
	กระบอกสูบที่ 4	กระบอกสูบที่ 3	กระบอกสูบที่ 2	กระบอกสูบที่ 1
ก่อนการทดสอบ	15	14	16	14
หลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง	15	14	16	14
หลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง	15	14	16	14
หลังการทดสอบ 300 ชั่วโมง	15	14	16	14

จะเห็นได้ว่าการใช้แอลกอฮอล์ร่วมกับเชื้อเพลิงดีเซลเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ไม่ส่งผลต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนห้องเผาไหม้แต่อย่างใด

4.8.5 การทดสอบการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันปาล์มร่วมกับดีเซลที่อัตราส่วนผสมน้ำมันปาล์มไม่เกินร้อยละห้าสิบกับเครื่องยนต์หัวลากยี่ห้อ HINO ขนาด 280 แรงม้า โดยได้รับความร่วมมือจาก บริษัท T-Line พบว่าสามารถใช้งานได้ดีบนการทดสอบบนเส้นทาง บางนา-แหลมฉบัง แต่มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้ดีเซลประมาณ ร้อยละ8

4.9 การทดสอบการทำงานของหัวฉีดและลักษณะของละอองน้ำมัน

จากการทดสอบพบว่าการเกิดละอองฝอยของดีเซลปาล์ม เมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มในน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวลดลง และการกระจายตัวจะมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ และพบว่าที่อัตราส่วนน้ำมันปาล์มในน้ำมันดีเซล 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีการกระจายตัวใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล จากบริษัท ปตท. มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.5

(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 ลักษณะการเกิดละอองฝอยน้ำมัน

(ก) ดีเซล ปตท. ผสมน้ำมันพืช (ข) น้ำมันดีเซล ปตท.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปเกี่ยวกับเรื่องราวในการวิจัยพร้อมทั้งเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป ตลอดจนประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลงานวิจัยที่ได้

5.1 ข้อสรุปที่ได้จากการทดสอบ

1. การใช้น้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสมไม่เกิน 30% ไม่ทำให้น้ำมันที่ได้มีผลกระทบต่อความเสียหายต่อเครื่องยนต์ และไม่พบความแตกต่างระหว่างน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว

2. การใช้น้ำมันพืชผสมที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 1ทำให้คุณภาพของไอเสียดีขึ้นกว่าเดิม โดยเฉพาะควันดำ

3. อัตราความสิ้นเปลืองระหว่างดีเซลกับดีเซลที่ผสมกับน้ำมันพืชมีค่าใกล้เคียงกัน (ไม่สามารถบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ) แต่ที่อัตราเร็วในย่าน 70-90 กม./ชม. มีแนวโน้มว่าน้ำมันผสมสิ้นเปลืองกว่าเล็กน้อย

4. การป้อนแอลกอฮอล์ร่วมกับดีเซลทำให้คุณภาพไอเสียดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าอัตราการสิ้นเปลืองที่อัตราเร็ว 70-90 กม./ชม. ดีขึ้นกว่าเมื่อไม่ใช้แอลกอฮอล์ร่วมกับดีเซล

5. ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการใช้ เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ รวมทั้ง แอลกอฮอล์ผสมระหว่างเอทิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์

6. เครื่องยนต์ดีเซลที่จ่ายน้ำมันด้วยระบบคอมมอนเรล ไม่สามารถใช้น้ำมันผสมระหว่างดีเซลและน้ำมันพืช หรือแม้แต่ดีเซลที่ผสมกับไบโอดีเซล (Biodiesel:B5) ได้ กล่าวคือต้องมีการปรับแต่งระบบป้อนเชื้อเพลิงและระบบควบคุมใหม่

7. เครื่องยนต์ดีเซลที่จ่ายน้ำมันด้วยระบบคอมมอนเรล สามารถใช้แอลกอฮอล์ร่วมกับดีเซลปกติได้และให้ผลดี กล่าวคืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีขึ้นกว่าเมื่อไม่ใช้แอลกอฮอล์ โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์แต่อย่างใด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบทดสอบการทำงานโดยใช้วิธีการป้อนแอลกอฮอล์ร่วมกับอากาศที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากอาจเกิดการน็อกที่เครื่องยนต์เมื่อเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ ดังนั้นควรหาวิธีป้อนแอลกอฮอล์ร่วมกับเชื้อเพลิงโดยตรงแทนการป้อนที่ช่องทางดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์

2. การใช้น้ำมันปาล์มร่วมกับดีเซลให้ผลดีกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบกลไก แต่ไม่เหมาะกับเครื่องยนต์ระบบคอมมอนเรล ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงเหมาะกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบกลางกับรอบต่ำ เช่นเรือประมง เครื่องปั่นไฟฟ้า รถแทรกเตอร์ เครื่องจักรกลการเกษตร และถ้าใช้แอลกอฮอล์ร่วมกับดีเซลจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น (ควันดำลดลงอย่างมาก) ทำให้ลดการเกิดมลพิษในอากาศ

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่การนำเอาน้ำมันปาล์มผสมกับดีเซล ให้ผลการทดสอบที่พบว่าไม่เหมาะกับเครื่องยนต์ระบบคอมมอนเรล ซึ่งอาศัยการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยไม่สามารถจัดหาโปรแกรมในการปรับแต่งและควบคุมการทำงานของผู้ผลิตมาใช้ในการปรับการทำงานของระบบคอมมอนเรลได้ อย่างไรก็ตามหากมีการปรับข้อมูลการจ่ายเชื้อเพลิงที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบคอมมอนเรลแล้ว การใช้น้ำมันผสมดังกล่าวยังมีความเป็นไปได้

ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชผสมในน้ำมันดีเซล นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลงได้ ซึ่งจะลดลงได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับราคาน้ำมันได้ขณะนั้น และยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย ทั้งนี้รัฐบาลต้องมีนโยบายในการส่งเสริมการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากภาคเกษตรกรรมอย่างจริงจังและให้เพียงพอต่อการบริโภคภายในประเทศ

บรรณานุกรม

กรมเชื้อเพลิง. **พืชที่ให้น้ำมัน.** [Online] Available://www.dmf.go.th/service/board/show_board [2006 July 23]. [1]

กรมทรัพยากรธรณี. (2547). *น้ำมันไบโอดีเซล.* แหล่งที่มา : http://www.dmr.go.th วันสืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2549. [2]

กัญจนา บุณยเกียรติ. (2544). **เชื้อเพลิงและการเผาไหม้.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [3]

โกวิท ศตวุฒิ. (2527). *การวิจัยเพื่อนำแอลกอฮอล์หมักมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน.* โครงงานวิจัย เลขที่ 15G-IE-2525 : สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [4]

จิรศักดิ์ จิระวารี. (2530). *การใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.(วิศวกรรมเครื่องกล).กรุงเทพฯ.: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (ถ่ายเอกสาร). [5]

จุมพล เหมะคีรินทร์. *ปาล์มน้ำมัน* [Online]. Available://www.oae.go.th [2006 July 23]. [6]

ชลฎา ทิพย์เดโช. (2544). *ไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล-ปาล์มบริสุทธิ์.* คลื่นวิจัย ปีที่ 5 ฉบับที่ 2. [7]

ธำรง โชตะมังสา และ สุจิตต์ สนองคุณ. (2538). **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น.** วิทยาลัยสารพัดช่างพระนคร. หจก.เม็ดทรายพริ้นติ้ง. [8]

บุรินทร์ วงษ์ศิริ. (2531). *การใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.(วิศวกรรมเครื่องกล).กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. [9]

ประเสริฐ เทียนนิมิตร ขวัญชัย สินทรัพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร. (2540). **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น.** บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). [10]

ปรัชญา รัศมีธรรมวงศ์. (2537). **ปาล์มน้ำมันพืชพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนแห่งอนาคต.** สำนักพิมพ์เพชรกะรัต จำกัด. [11]

มาร์ติน เจมส์. (2006). *ประหยัดค่าเชื้อเพลิงด้วยน้ำมันพืช.* ออโต้บิลด์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 8 หน้า 48 – 49. [12]

พรชัย เหลืองอาภาพงศ์. (2548). *เปิดโลกเกษตรกับ ดร.พรชัย โดยละเอียด.* แหล่งที่มา : http://www.kasetcity.com . วันที่สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2549. [13]

พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล. *ไบโอดีเซล ดีเซล : พลังงานทางเลือก*. ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ก.ย. - ธ.ค. 2544. [14]

พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล. *ไบโอดีเซล* [Online]. Available:http://www.pttplc.com/th/ptt_core [2006, July 23]. [15]

วิทยา ผาสุก. *น้ำมันพืช* [Online]. Available://www.navy.mith [2006 July 23]. [16]

สมนึก จรูญจิตเสถียร. (2544). *บทสรุปการวิจัยการใช้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันปาล์มดิบกับเครื่องยนต์เกษตร*. คลื่นวิจัย ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 หน้า 3 - 9. [17]

สมศักดิ์ สินประเสริฐ. (2524). *สมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้เมธานอลและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.(วิศวกรรมเครื่องกล).กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [18]

สุรกิตติ มรีกุล. *อนาคตไบโอดีเซล* [Online]. Available://www.scisoc.or.th [2006 July 23]. [19]

สุรเชษฐ์ ขวัญเมือง. (2549). **การปลูกปาล์มน้ำมัน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์เกษตรสาสน์ หน้า 20 – 30. [20]

สำนักงานหลังงานภูมิภาคที่ 9 (พิษณุโลก). (2548). *ดีเซลจากพืช ทางเลือกใหม่* แหล่งที่มา : http://www.region9.m-energy.go.th. วันที่สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2549. [21]

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2543). *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยจากอดีตสู่อนาคต* กรุงเทพมหานคร. [22]

อรุณ ไชยพันธุ์. (2548). *การปรับปรุงสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นส่วนผสม*. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) นครนายก : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. [23]

Annual Book of ASTM Standards 2006, V. 05 02. (2006). West Conshohocken, PA:American Society for Testing and Material. [24]

Update Magazine on Line. (2544). *ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพแห่งยุคสมัย*. แหล่งที่มา : http://update.se-ed.com/168/biodiesel.htm. วันสืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2549. [25]

John B. Heywood. (1988). **Internal Combustion Engine Fundamental**. Singapore : McGraw-Hill book Company. [26]

Kenneth Wark; Cecil F. Warner, & Wayne T. David. (1998). **Air Pollution, its origin and control.**. *3th edition.* Adition-Wesley. [27]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการทำงานเครื่องยนต์

สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการทดสอบยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
วิศวกรผู้ทำการทดสอบ	นายอรุณ ไชยพันธุ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)
เครื่องยนต์ที่ใช้	ISUZU มังกรทอง 90 แรงม้า ได้รับความอนุเคราะห์จากสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

แท่นทดสอบมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ ขนาด 450 แรงม้า

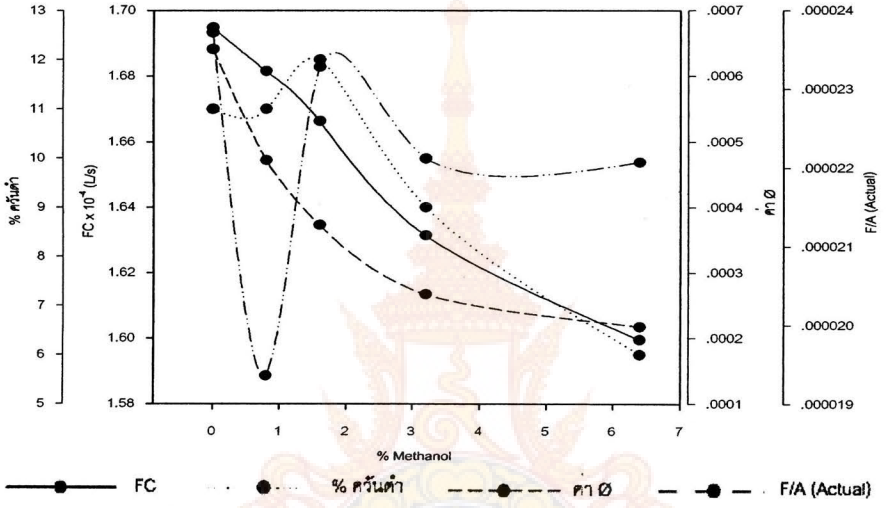
รายงานผลการทดสอบ

วัดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption L/s) อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ (Ø) อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง (F/A Actual) และร้อยละของปริมาณควันดำ เมื่อป้อนแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วน ร้อยละ 0, 0.8, 1.6, 3.2 และ 6.4 ต่อน้ำมันดีเซลโดยปริมาตร ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine speed) 850, 1200, 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาที และใช้แรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque) ที่ 50, 100 และ 150 N.m และทำการปรับองศาฉีดน้ำมันจากองศาปกติ (12 องศาก่อนศูนย์ตายบน) เป็น 9 องศา และ15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน

แสดงผลการทดสอบกิจกรรมต่างๆดังนี้

1. ผลการทดสอบที่รอบเดินเบา ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 850 รอบต่อนาที (Idle speed) ในภาวะปกติ (No load)
2. ผลการทดสอบในภาวะปกติ เมื่อปรับเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ที่องศาฉีดน้ำมัน 9, 12 และ 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน
3. ผลการทดสอบในภาวะมีภาระงาน ที่องศาฉีดน้ำมัน 9, 12 และ 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 50,100,130,150 N.m

1 ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ (ร้อยละ) อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง ที่ความเร็วรอบขอเครื่องยนต์ 850 รอบต่อนาที ในภาวะปกติ องศาการฉีดน้ำมัน ตามมาตรฐานเดิมของผู้ผลิต (12 องศา ก่อนศูนย์ตายบน)



รูปที่ 1 ผลของปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ต่อการทำงานของเครื่องยนต์

เมื่อทำการทดสอบเครื่องยนต์ เพื่อศึกษาผลของแอลกอฮอล์ที่เข้าทางท่อร่วมไอดีในปริมาณอัตราส่วนต่างๆ คือร้อยละ 0.8, 1.6, 3.2 และ 6.4 ของน้ำมันดีเซล พบว่า

1. ที่อัตราการป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 0.8-1.6 ไม่มีผลต่อการทำงานเครื่องยนต์แต่ที่อัตราการป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 3.2 เครื่องยนต์เริ่มจะทำงานไม่ปกติ (Knock) และที่แอลกอฮอล์ร้อยละ 6.4 เป็นอัตราการป้อนสูงสุดที่เครื่องยนต์ยังสามารถทำงานได้

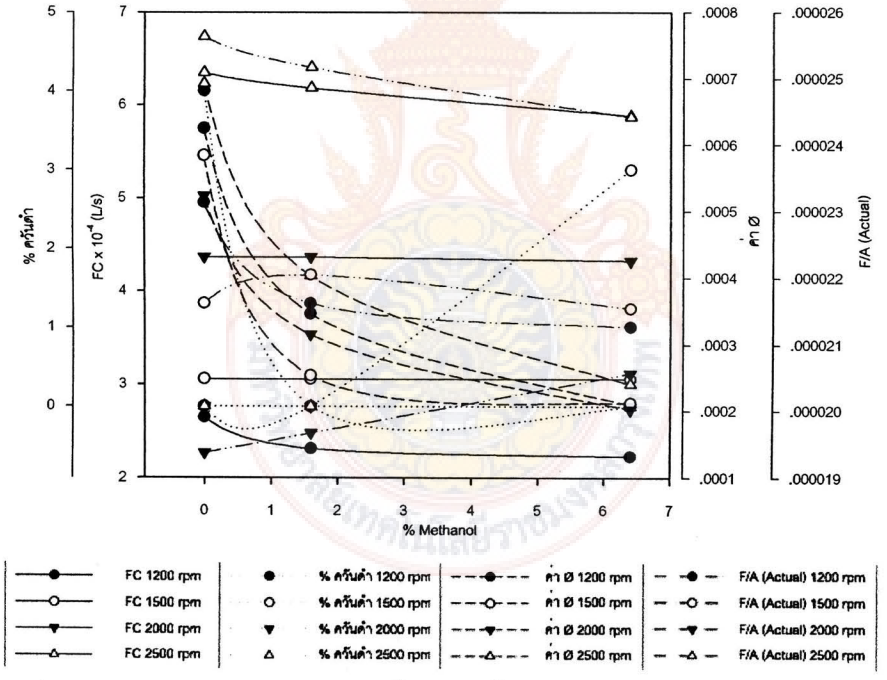
ในการทดสอบนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการทำงานเครื่องยนต์ ระหว่างการใช้เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นในการทดสอบต่อๆ ไปจึงใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวแทนของการทดสอบ

2. การใช้แอลกอฮอล์มีผลช่วยทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ทำการป้อนแอลกอฮอล์ โดยมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงเล็กน้อย

3. การป้อนแอลกอฮอล์มีผลช่วยทำให้ปริมาณควันดำมีแนวโน้มลดลงแสดงว่าแอลกอฮอล์มีผลทางบวกต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้น

4. การป้อนแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่ง $Ø < 1$ หรือเป็น ส่วนผสมบาง และ การป้อนแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับค่าอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

2 ผลการทดสอบการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง ในภาวะปกติ เมื่อปรับเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ที่องศาฉีดน้ำมัน 9, 12 และ 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน

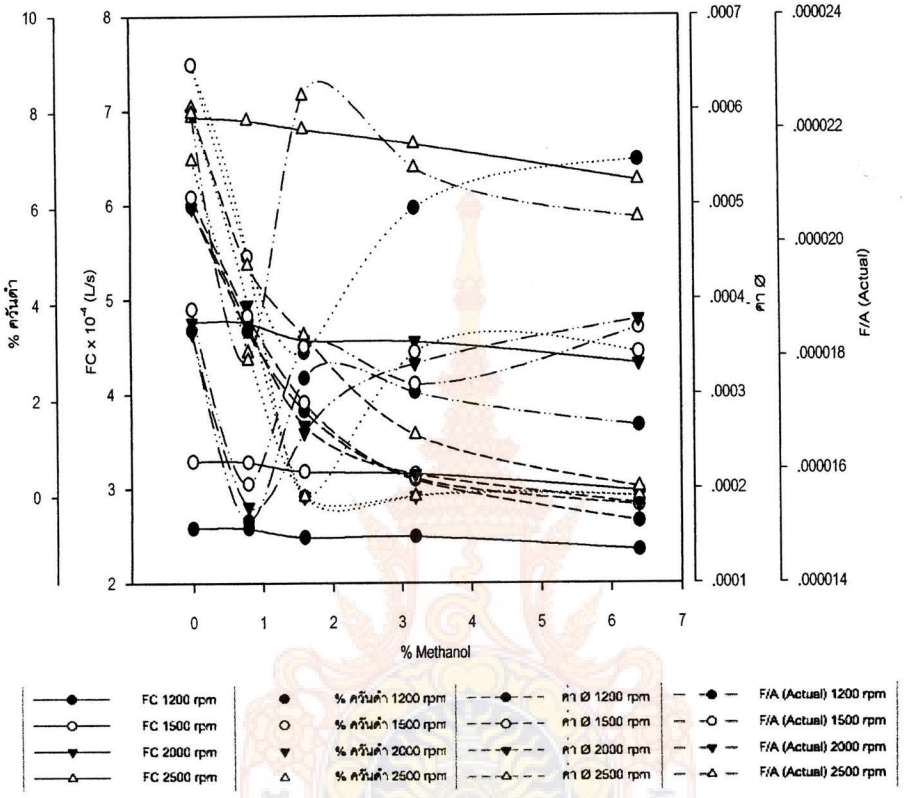


รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 9 องศา ก่อนศูนย์ตายบนและที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่างกัน

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง พบว่าปริมาณเมทิลแอลกอฮอล์ที่ทำการป้อนเข้าทางท่อร่วมไอดียังคงมีผลช่วยให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงใกล้เคียงกัน ตามปริมาณอัตราส่วนของเมทิล-แอลกอฮอล์ ที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าแอลกอฮอล์ช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้น แม้เครื่องยนต์จะมีความเร็วรอบที่สูงขึ้น และองศาฉีดน้ำมันที่ลดลง

ปริมาณควันดำ พบว่าการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์มีผลช่วยทำให้ปริมาณควันดำมีแนวโน้มลดลง ทุกความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และทุกอัตราการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ แต่ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 รอบต่อนาที ที่อัตราการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 6.4 มีปริมาณควันดำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณแอลกอฮอล์สูงใกล้ขีดจำกัด และเครื่องยนต์เกิดการสะดุดหรือน็อก

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนแอลกอฮอล์ส่งผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)



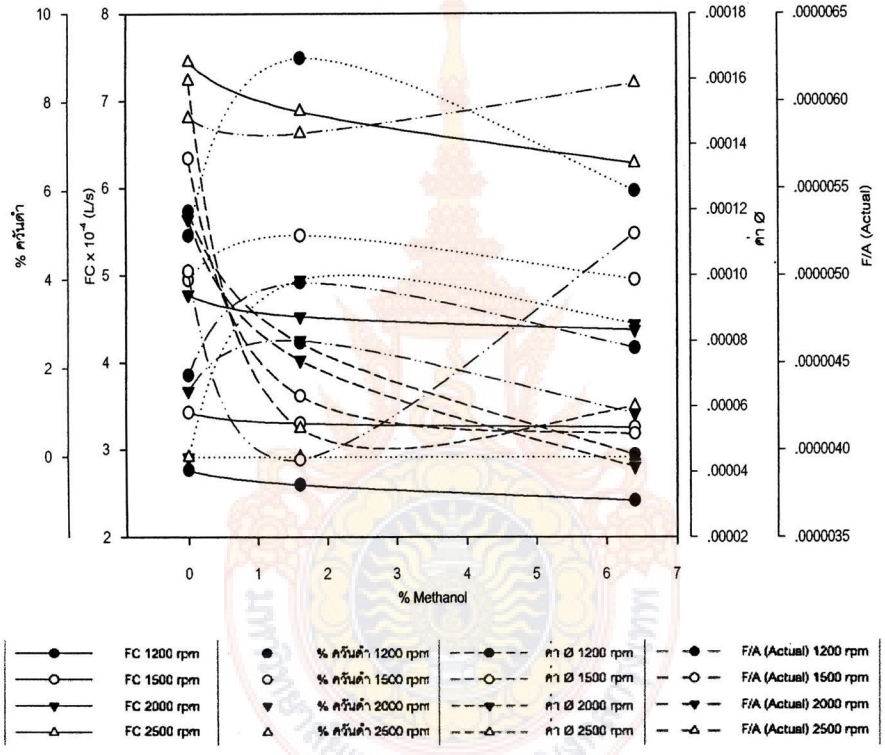
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 12 องศา ก่อนศูนย์ตายบนและที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่างกัน

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่า ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ มีผลช่วยให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงใกล้เคียงกัน ตามปริมาณอัตราส่วนของการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่า การป้อนแอลกอฮอล์มีผลช่วยให้ควันดำลดลงเป็นอย่างมากตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1.6 ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงใกล้ศูนย์ และที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3.2 ที่ความเร็วรอบ 2000 และ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงใกล้ศูนย์เช่นกัน และ

เมื่อปริมาณแอลกอฮอล์สูงถึงร้อยละ 6.4 ที่ความเร็วรอบ 2000 และ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงใกล้ศูนย์เช่นกัน

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนเมทิลแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มลดลง และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี (0.014 $\leq$ F/A $\leq$ 0.056)



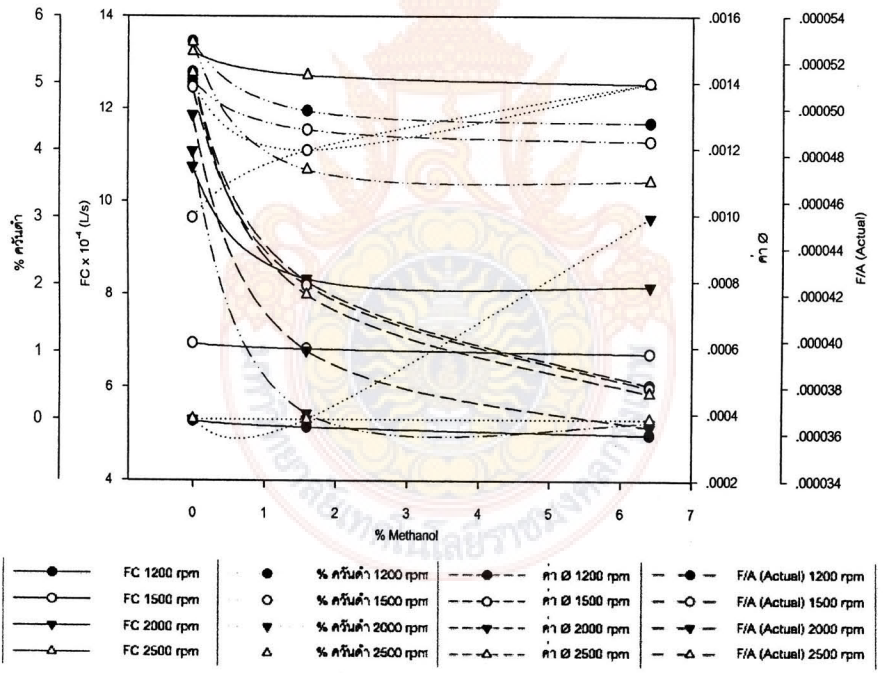
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบนและที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่างกัน

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ที่ป้อนเข้าทางท่อร่วมไอดี ยังคงมีผลช่วยให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงใกล้เคียงกันตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น แม้เครื่องยนต์จะมีความเร็วรอบที่สูงขึ้น และองศาฉีดน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200, 1500 และ 2000 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำเพิ่มขึ้น เมื่อป้อนแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1.6 หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้นเป็น 2500 รอบต่อนาที และอัตราป้อนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6.4 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ องศาฉีดน้ำมันที่เพิ่มขึ้นต้องมีอัตราการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้ปริมาณควันดำลดลง

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

3. ผลการทดสอบในภาวะมีภาระงาน (Load) ที่องศาฉีดน้ำมัน 9, 12 และ 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 50,100,130,150 N.m

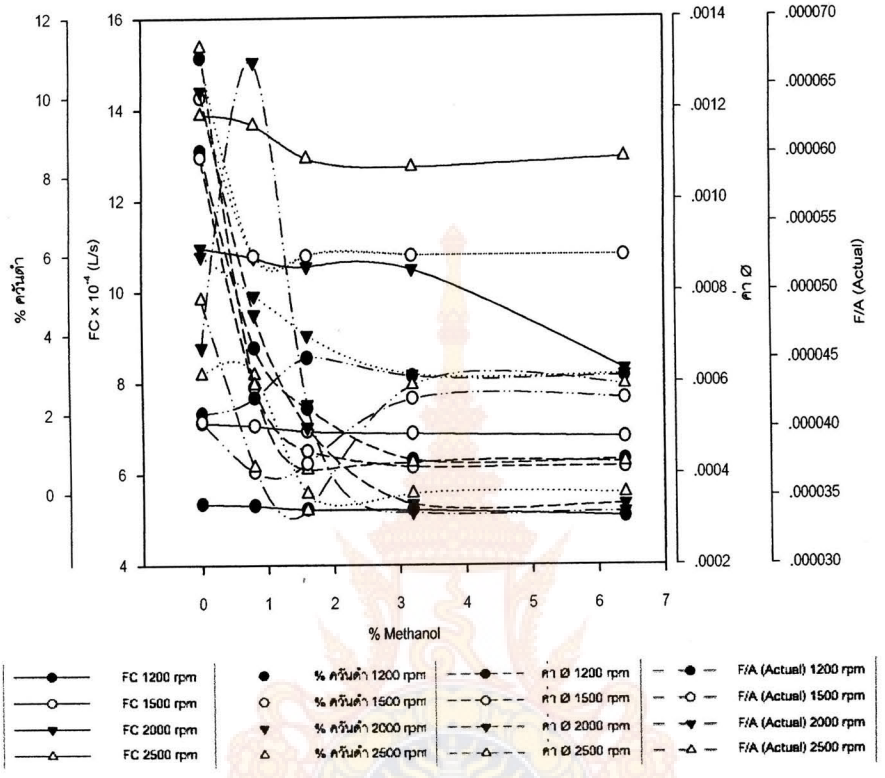


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 9 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และแรงบิดของเครื่องยนต์ 50 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง แอลกอฮอล์มีผลช่วยลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงตามสัดส่วนส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนร้อยละ 0–1.6 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงชัดเจน แสดงว่าที่อัตราส่วนแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.6 เหมาะสมกับภาระงาน 50 n.m

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่า ควันดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200, 1500 และ 2000 รอบต่อนาที แต่ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ควันดำลดลงใกล้ศูนย์ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนเมทิลแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

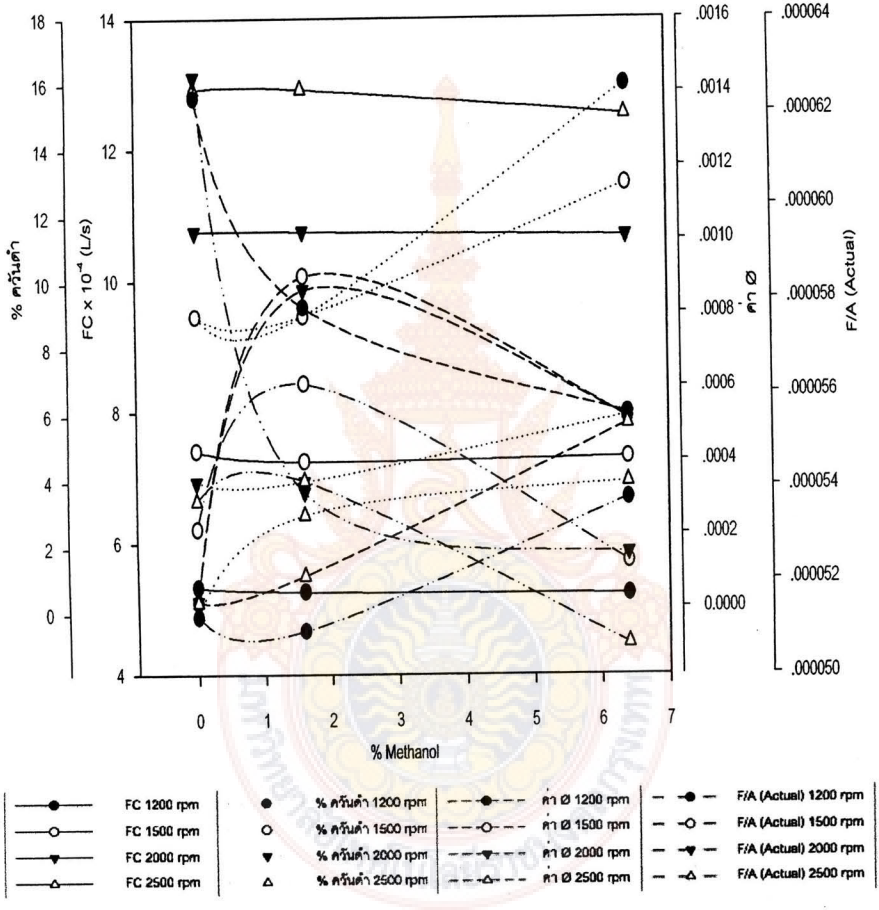


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 12 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์รอบต่อนาทีต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 50 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยโดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที มีแนวโน้มลดลงที่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ปริมาณการป้อนเมทิลแอลกอฮอล์ และองศาฉีดน้ำมัน 12 องศา มีความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับภาระ

ปริมาณควันดำที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200 และ 1500 รอบต่อนาที ไม่เห็นความแตกต่างของควันดำ แต่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ควันดำมีแนวโน้มลดลง แต่ที่เร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงใกล้ศูนย์แสดงว่า การฉีดน้ำมันที่ 12 องศา เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และอัตราการป้อนแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ควันดำลดลงเป็นอย่างมาก

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนเมทิลแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

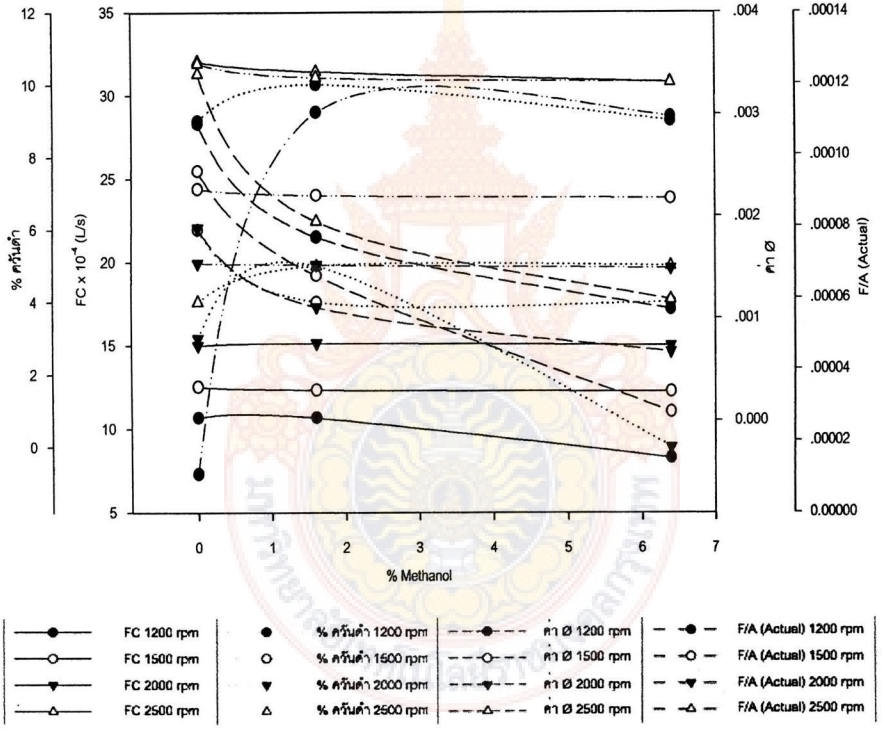


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงเทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รอบต่อนาที)ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 50 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่า การป้อนแอลกอฮอล์ มีผลช่วยให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง

ปริมาณควันดำ ร้อยละของควันดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ องศาฉีดน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทำให้ควันดำเพิ่มขึ้น

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า การป้อนแอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$) ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ภาระ 50 N.m เครื่องยนต์ทำงานเหมาะสมกับการฉีดน้ำมันที่ 15 องศา เนื่องจากค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง

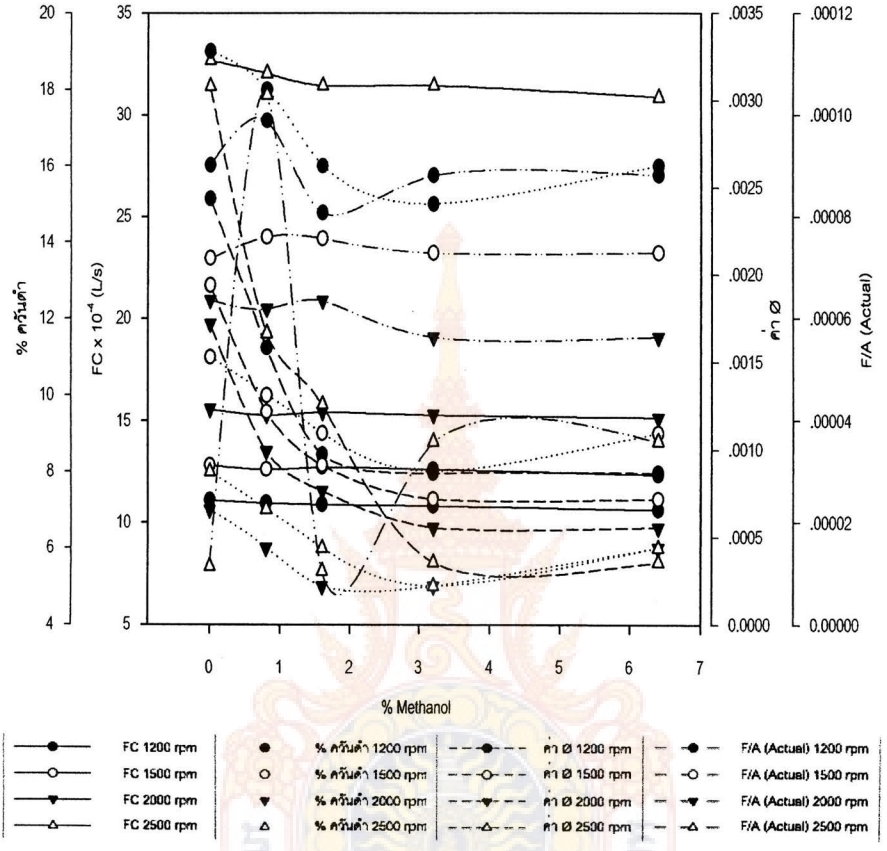


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน9 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที) ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 100 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 และ 2000 รอบต่อนาทีมีผลช่วยให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วรอบ 1200 และ 2500 รอบต่อนาที มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ องศาฉีดน้ำมัน 9 องศา มีความเหมาะสมกับภาระบางความเร็วรอบเท่านั้น

ปริมาณควันดำ ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200, 2000 และ 2500 รอบต่อนาที ควันดำเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 รอบต่อนาที ควันดำลดลง และมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการปรับลดองศาฉีดน้ำมัน ทำให้การเผาไหม้เกิดเร็วขึ้น

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ปริมาณการป้อนร้อยละ 1.6 และมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที น้อยเกินไป สำหรับภาระ 100 N.m ซึ่งอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

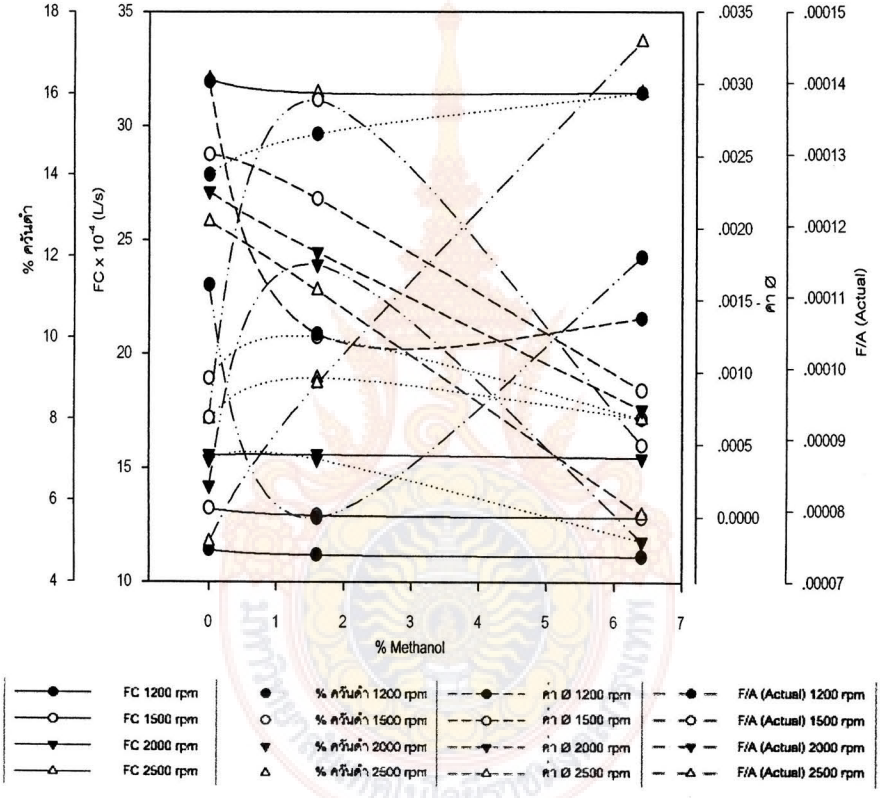


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงเทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 12 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รอบต่อนาทีต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 100 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น ทุกช่วงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 0.8, 1.6 และ 3.2 มีผลช่วยให้ร้อยละควันดำมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ร้อยละ 6.4 ควันดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง แอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$) แต่ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มไม่คงที่



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที) ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 100 N.m

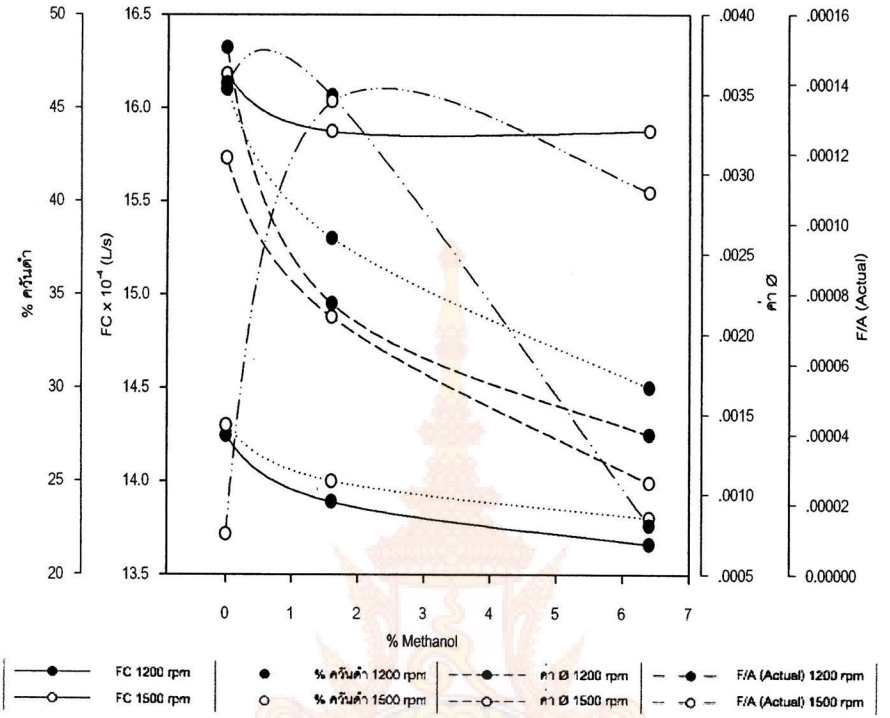
การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่า การฉีดน้ำมันที่ 15 องศาแอลกอฮอล์มีผลต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยมาก

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200, 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาที ควันดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนป้อนร้อยละ 1.6 และมีแนวโน้มลดลงที่ร้อยละ 6.4

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 และ 2000 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่การป้อนแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.6 จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง

ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณการป้อนร้อยละ 1.6 จากนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยต่อเนื่อง โดยรวมแล้วอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

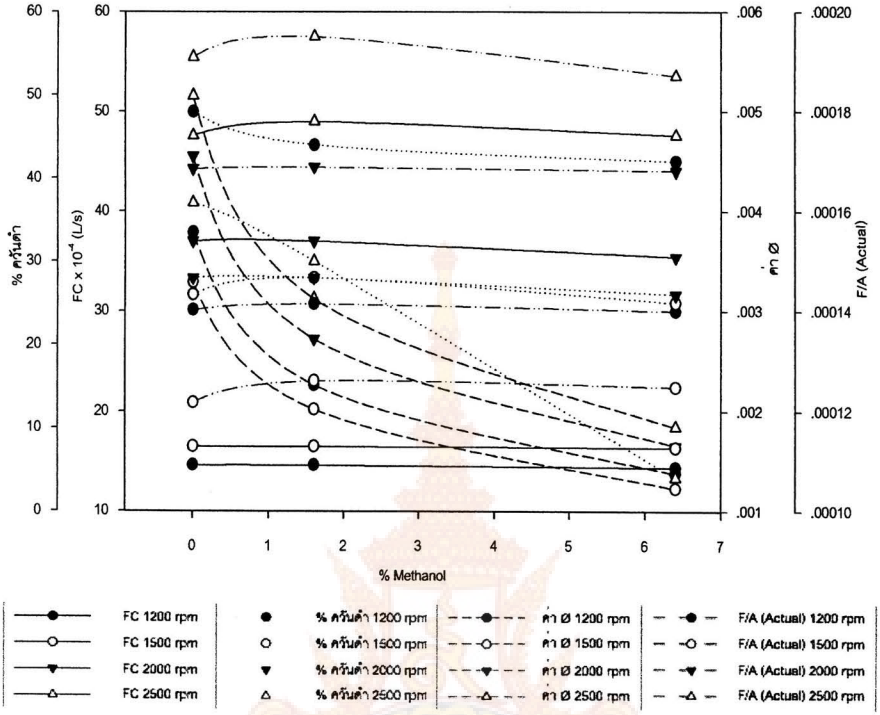


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รอบต่อนาที)ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 130 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น แต่จากการทดสอบสามารถบันทึกผลได้ที่ช่วงความเร็วรอบของเครื่อง 1200 – 1500 รอบต่อนาที เท่านั้น เนื่องจากเครื่องยนต์สะดุด

ปริมาณควันดำ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น แต่จะบันทึกค่าได้เพียงช่วงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1200 – 1500 รอบต่อนาที

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ปริมาณการป้อนร้อยละ 1.6 จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ องศาฉีดน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

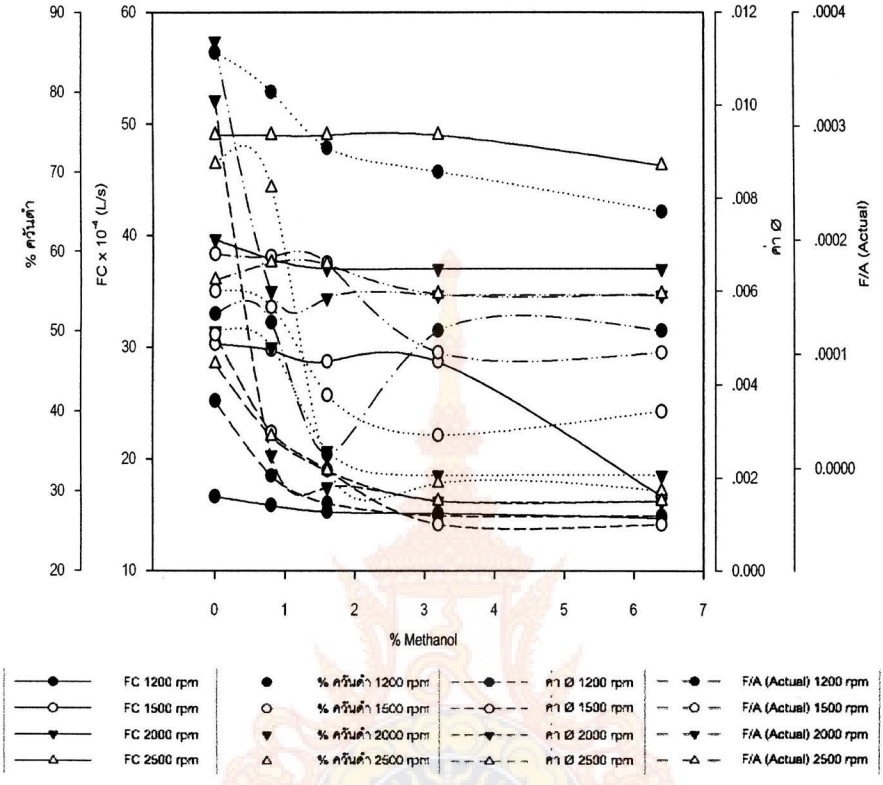


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน 9 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์รอบต่อนาที) ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 150 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1200 และ 1500 รอบต่อนาที การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ความเร็วรอบ 2000 และ 2500 รอบต่อนาที การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ องศาการฉีดน้ำมันที่ 9 องศา มีผลต่อการสิ้นเปลืองเพลิงเล็กน้อย

ปริมาณควันดำ จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 และ 2000 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำลดลงอย่างต่อเนื่องที่อัตราป้อนร้อยละ 1.6 และที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ควันดำมีแนวโน้มลดลงเป็นอย่างมาก

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง แอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

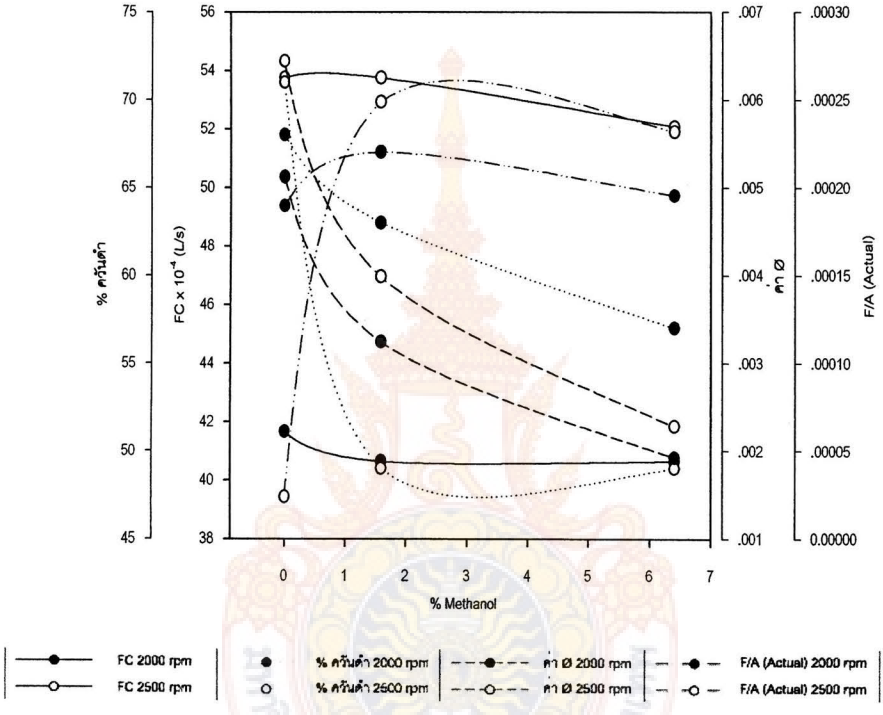


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ (ร้อยละ) อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน12 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รอบต่อนาที)ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 150 N.m

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1500 รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนการป้อน ร้อยละ 3.2 - ร้อยละ 6.4 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงมาก แสดงว่า ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที องศาฉีดน้ำมัน 12 องศา เหมาะสมกับภาระที่ 150 N.m

ปริมาณควันดำ ปริมาณร้อยละของควันดำมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำมีแนวโน้มลดลงเป็นอย่างมาก ที่อัตราส่วนการป้อนร้อยละ 0.8 - ร้อยละ1.6 แสดงว่า แอลกอฮอล์ยังส่งผลทางบวกต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง แอลกอฮอล์มีผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริงมีแนวโน้มสิ้นเปลืองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ปริมาณควันดำ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง เทียบกับ ปริมาณการป้อนแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่องศาฉีดน้ำมัน15 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที) ต่างกัน และแรงบิดของเครื่องยนต์ 150 N.m

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ยังลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น แต่จากการทดสอบสามารถบันทึกผลได้ที่ช่วงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2000 – 2500 รอบต่อนาทีเท่านั้น เนื่องจากที่ความเร็วรอบ 1200 – 1500 รอบต่อนาที เครื่องยนต์สะดุด

ปริมาณควันดำที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2500 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำมีแนวโน้มลดลงเป็นอย่างมาก ที่การป้อนร้อยละ 1.6 จากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ปริมาณควันดำยังลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงอิทธิพลทางบวกของแอลกอฮอล์ที่มีต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลในเครื่องยนต์

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2500 รอบต่อนาที อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่อัตราส่วนผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.6 จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศใช้งานจริง ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี ($0.014 \leq F/A \leq 0.056$)

ภาคผนวก ข

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

หน้า ๑๔
เล่ม ๑๒๒ ตอนพิเศษ ๗๐ ง ราชกิจจานุเบกษา ๒๔ สิงหาคม ๒๕๔๘

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

(ฉบับที่ ๓)

พ.ศ. ๒๕๔๘

โดยที่เป็นการสมควรแก้ไขปรับปรุงข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ให้ครอบคลุมถึงน้ำมันดีเซลที่มีการผสมไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน เพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการนำไบโอดีเซลมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๒๕ วรรคหนึ่ง แห่งพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. ๒๕๔๓ อธิบดีกรมธุรกิจพลังงานออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ประกาศนี้เรียกว่า "ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ ๓) พ.ศ. ๒๕๔๘"

ข้อ ๒ ประกาศนี้ให้ใช้บังคับเมื่อพ้นกำหนดสามสิบวันนับแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ข้อ ๓ ให้ยกเลิกประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ ๒) พ.ศ. ๒๕๔๗

ข้อ ๔ ประกาศนี้มิให้ใช้บังคับกับน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายหรือมีไว้เพื่อจำหน่ายไปนอกราชอาณาจักรโดยการขนส่งทางทะเล

ข้อ ๕ ให้กำหนดน้ำมันดีเซล เป็น ๒ ประเภท คือ

(๑) น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว แยกเป็น ๒ ชนิด ดังนี้

(๑.๑) น้ำมันดีเซลหมุนเร็วธรรมดา ได้แก่ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่ไม่ผสมไบโอดีเซล

(๑.๒) น้ำมันดีเซลหมุนเร็วบี ๕ ได้แก่ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่ผสมกับไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน ในสัดส่วน ๙๕ ต่อ ๕ โดยปริมาตร

(๒) น้ำมันดีเซลหมุนช้า

ข้อ ๖ ภายใต้บังคับของข้อ ๗ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ให้เป็นไปตามรายละเอียดแนบท้ายประกาศนี้

การเติมสารเติมแต่งในน้ำมันดีเซล ให้ผู้ค้าน้ำมันแจ้งขอความเห็นชอบและต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงานก่อน จึงจะดำเนินการได้

ข้อ ๗ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลที่ผู้ค้าน้ำมันจำหน่าย หรือมีไว้เพื่อจำหน่าย ดังต่อไปนี้จะไม่เป็นไปตามที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายประกาศนี้ก็ได้ แต่ผู้ค้าน้ำมันต้องแจ้งลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดังกล่าวเฉพาะส่วนที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้าย เพื่อขอความเห็นชอบและต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงานก่อน

(๑) น้ำมันดีเซลสำหรับการส่งออกไปนอกราชอาณาจักร นอกจากการขนส่งทางทะเล

(๒) น้ำมันดีเซลสำหรับการนำไปใช้กับยานพาหนะที่ออกไปนอกราชอาณาจักร

(๓) น้ำมันดีเซลสำหรับการนำไปใช้ในการอื่นนอกเหนือจากการใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล

(๔) น้ำมันดีเซลสำหรับการนำไปใช้ตามโครงการหรือนโยบายของรัฐบาล หรืองานวิจัย

น้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามโครงการจำหน่ายน้ำมันดีเซลสำหรับชาวประมงในเขตต่อเนื่องของราชอาณาจักร และโครงการช่วยเหลือน้ำมันให้ชาวประมง จะมีลักษณะและคุณภาพไม่เป็นไปตามประกาศกำหนดได้เฉพาะข้อกำหนด ดังต่อไปนี้

(ก) ปริมาณกำมะถัน แต่ทั้งนี้ต้องไม่สูงกว่าร้อยละ ๐.๗ โดยน้ำหนัก

(ข) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละเก้าสิบ แต่ทั้งนี้ต้องไม่สูงกว่า ๓๗๐ องศาเซลเซียส

(ค) สี

น้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามโครงการจำหน่ายน้ำมันดีเซลสำหรับชาวประมงในเขตต่อเนื่องของราชอาณาจักร ต้องเป็นสีเขียว เทียบเท่าสีมาตรฐานที่ได้จากการใช้น้ำมันดีเซลที่มีความเข้มข้นของสีตามมาตรฐาน ASTM D 1500 ไม่สูงกว่า ๐.๕ ผสมกับสารประกอบพวก 1,4 - dialkylamino anthraquinone และ 1,3 benzenediol 2,4 - bis [(alkylphenyl) azo-] ในอัตราส่วน 9:1 โดยน้ำหนัก ปริมาณเนื้อสีที่ใช้ไม่น้อยกว่า ๑๒ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือใช้อัตราส่วนแตกต่างจากสีที่กำหนดก็ได้ แต่ต้องมีความเข้มของสีเทียบเท่าสีเขียวมาตรฐานที่กำหนดไว้ข้างต้น

น้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามโครงการช่วยเหลือน้ำมันให้ชาวประมง ต้องเป็นสีม่วง เทียบเท่าสีมาตรฐานที่ได้จากการใช้น้ำมันดีเซลที่มีความเข้มข้นของสีตามมาตรฐาน ASTM D 1500 ไม่สูงกว่า ๐.๕ ผสมกับสารประกอบพวก 1,4 - dialkylamino anthraquinone และ 2 Naphthalenol [(phenylazo) phenyl] azo alkyl derivatives ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ปริมาณเนื้อสีที่ใช้ไม่น้อยกว่า ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือใช้อัตราส่วนแตกต่างจากสีที่กำหนดก็ได้ แต่ต้องมีความเข้มของสีเทียบเท่าสีม่วงมาตรฐานที่กำหนดไว้ข้างต้น

(๕) น้ำมันดีเซลหมุนเร็วสำหรับเตรียมไว้เพื่อจำหน่ายเฉพาะในข้อกำหนด เรื่อง คุณสมบัติการหล่อลื่น

(๖) น้ำมันดีเซลที่ผู้ค้าน้ำมันตามมาตรา ๗ นำเข้ามาในราชอาณาจักร สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

(๗) น้ำมันดีเซลสำหรับการจำหน่ายให้ผู้ค้าน้ำมันตามมาตรา ๗ เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

(๘) น้ำมันดีเซลสำหรับการจำหน่ายให้แก่ผู้ค้าน้ำมันเพื่อวัตถุประสงค์ตาม (๑)

(๙) น้ำมันดีเซลสำหรับการจำหน่ายให้แก่ผู้ค้าน้ำมันตามมาตรา ๗ เพื่อวัตถุประสงค์ตาม (๒) (๓) (๔) และ (๕)

ข้อ ๘ การขอและการให้ความเห็นชอบตามข้อ ๖ วรรคสอง และข้อ ๗ ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขที่อธิบดีกรมธุรกิจพลังงานกำหนด

ข้อ ๙ ประกาศนี้ไม่กระทบกระเทือนการให้ความเห็นชอบการเติมสารเติมแต่งในน้ำมันดีเซล หรือลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ที่ได้ให้ความเห็นชอบไปแล้วก่อนวันที่ประกาศนี้มีผลใช้บังคับ

ประกาศ ณ วันที่ ๑๑ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๔๘

วิโรจน์ คลังบุญครอง

อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน

ภาคผนวก ค

วิธีการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันตามมาตรฐานสากล (ASTM)

ประกอบด้วย

1. **ASTM D 93 – 90** Standard Test Methods for Flash-Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester
2. **ASTM D 130 – 94** Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test
3. **ASTM D 240 – 00** Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels Bomb Calorimeter
4. **ASTM D 445 – 01** Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity)
5. **ASTM D 4052 – 96** Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter

Designation: D 93 – 00

An American National Standard

Designation: D 34/99

Standard Test Methods for Flash-Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester[1]

This standard is issued under the fixed designation D 93; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

INTRODUCTION

This flash point test method is a dynamic test method and depends on definite rates of temperature increases to control the precision of the test method. The rate of heating may not in all cases give the precision quoted in the test method because of the low thermal conductivity of certain materials. To improve the prediction of flammability, Test Method D 3941, an equilibrium method, was developed in which the heating rate is slower. This allows the vapor above the test specimen and the test specimen to be at about the same temperature. If your specification requires Test Method D 93, do not substitute Test Method D 3941 or any other test method without obtaining comparative data and agreement from the specifier.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the flash point of petroleum products in the temperature range from 40 to 360°C by a manual Pensky-Martens closed-cup apparatus or an automated Pensky-Martens closed-cup apparatus.

NOTE 1—Flash point determination as above 250°C can be performed, however, the precisions have not been determined above this temperature. For residual fuels, precisions have not been determined for flash points above 100°C.

1.2 Procedure A is applicable to distillate fuels (diesel, kerosene, heating oil, turbine fuels), new lubricating oils, and other homogeneous petroleum liquids not included in the scope of Procedure B.

1.3 Procedure B is applicable to residual fuel oils, cutback residua, used lubricating oils, mixtures of petroleum liquids with solids, petroleum liquids that tend to form a surface film under test conditions, or are petroleum liquids of such kinematic viscosity that they are not uniformly heated under the stirring and heating conditions of Procedure A.

NOTE 2—Liquids having kinematic viscosities less than 5.5 mm 2/s (cSt) at 40°C (104°F), do not contain suspended solids, or do not have a tendency to form a surface film while under test conditions, can be tested in accordance with Test Method D 56.

1.4 This test method is applicable for the detection of contamination of relatively nonvolatile or nonflammable materials with volatile or flammable materials.

1.5 The values stated in SI units shall be regarded as the standard. The values given in parentheses are provided for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific hazards statements, see 6.4, 7.1, 9.3, 9.4, 11.1.2, 11.1.4, and 12.1.2.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 56 Test Methods for Flash Point by Tag Closed Tester[2]

D 3941 Test Method for Flash Point by the Equilibrium Method with a Closed-Cup Apparatus[3]

D 4057 Practice for Manual Sampling for Petroleum and Petroleum Products[4]

D 4177 Practice for Automatic Sampling of Petroleum and Petroleum Products[4]

E 1 Specification for ASTM Thermometers[5]

E 300 Practice for Sampling Industrial Chemicals[6]

[1] These test methods are under the joint jurisdiction of ASTM Committee D02 on Petroleum Products and Lubricants and are the direct responsibility of Subcommittee D02.08 on Volatility. In the IP, these test methods are under the jurisdiction of the Standardization Committee.

Current edition approved Aug. 10, 2000. Published October 2000. Originally published as D 93 – 21 T. Last previous edition D 93 – 99c.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 06.01.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.02.

[5] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

[6] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

E 502 Test Method for Selection and Use of ASTM Standards for the Determination of Flash Point of Chemicals by Closed Cup Methods[7]

2.2 *ISO Standards*[8]

Guide 34 Quality Systems Guidelines for the Production of Reference Materials

Guide 35 Certification of Reference Material—General and Statistical Principles

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *flash point, n—in petroleum products*, the lowest temperature corrected to a barometric pressure of 101.3 kPa (760 mm Hg), at which application of an ignition source causes the vapors of a specimen of the sample to ignite under specified conditions of test.

3.1.1.1 *Discussion*—The test specimen is deemed to have flashed when a flame appears and instantaneously propagates itself over the entire surface of the test specimen.

3.1.1.2 *Discussion*—When the ignition source is a test flame, the application of the test flame may cause a blue halo or an enlarged flame prior to the actual flash point. This is not a flash point and shall be ignored.

3.1.2 *dynamic, adj—in petroleum products*—the condition where the vapor above the test specimen and the test specimen are not in temperature equilibrium at the time that the ignition source is applied.

3.1.2.1 *Discussion*—This is primarily caused by the heating of the test specimen at the constant prescribed rate with the vapor temperature lagging behind the test specimen temperature.

3.1.3 *equilibrium, n—in petroleum products*—the condition where the vapor above the test specimen and the test specimen are at the same temperature at the time the ignition source is applied.

3.1.3.1 *Discussion*—This condition may not be fully achieved in practice, since the temperature may not be uniform throughout the test specimen, and the test cover and shutter on the apparatus can be cooler.

4. Summary of Test Method

4.1 A brass test cup of specified dimensions, filled to the inside mark with test specimen and fitted with a cover of specified dimensions, is heated and the specimen stirred at specified rates, by either of two defined procedures (A or B). An ignition source is directed into the test cup at regular intervals with simultaneous interruption of the stirring, until a flash is detected (see 3.1.1.1).The flash point is reported as defined in 3.1.1.

5. Significance and Use

5.1 The flash point temperature is one measure of the tendency of the test specimen to form a flammable mixture with air under controlled laboratory conditions. It is only one of a number of properties which must be considered in assessing the overall flammability hazard of a material.

5.2 Flash point is used in shipping and safety regulations to define *flammable* and *combustible* materials. One should consult the particular regulation involved for precise definitions of these classifications.

NOTE 3—The U.S. Department of Transportation (DOT)[9] and U.S. Department of Labor (OSHA) have established that liquids with a flash point under 37.8°C (100°F) are flammable, as determined by this test method, for those liquids which have a kinematic viscosity of 5.8 mm 2/s (cSt) or more at 37.8°C or 9.5 mm 2/s (cSt) or more at 25°C (77°F), or that contain suspended solids, or have a tendency to form a surface film while under test. Other classification flash points have been established by these departments for liquids using this test method.

5.3 This test method should be used to measure and describe the properties of materials, products, or assemblies in response to heat and an ignition source under controlled laboratory conditions and should not be used to describe or appraise the fire hazard or fire risk of materials, products, or assemblies under actual fire conditions. However, results of this test method may be used as elements of a fire risk assessment which takes into account all of the factors which are pertinent to an assessment of the fire hazard of a particular end use.

5.4 This test method provides the only closed cup flash point test procedures for temperatures up to 370°C (698°F).

6. Apparatus

6.1 *Pensky-Martens Closed Cup Apparatus (manual)*—This apparatus consists of the test cup, test cover and shutter, stirring device, heating source, ignition source device, air bath, and top plate described in detail in Annex A1. The assembled manual apparatus, test cup, test cup cover, and test cup assembly are illustrated in Fig. A1.1, Fig. A1.2, Fig. A1.3, and Fig. A1.4, respectively. Dimensions are listed respectively.

6.2 *Pensky-Martens Closed Cup Apparatus (automated)*—This apparatus is an automated flash point instrument that is capable of performing the test in accordance with Section 11, Procedure A, and Section 12, Procedure B, of this test method. The apparatus shall use the test cup, test cover and shutter, stirring device, heating source, and ignition source device described in detail in Annex A1.

6.3 *Temperature Measuring Device*—Is a thermometer having a range as shown as follows and conforming to the requirements prescribed in Specification E 1 or in Annex A3, or an electronic temperature measuring device, such as resistance thermometers or thermocouples. The device shall exhibit the same temperature response as the mercury thermometers.

	Thermometer Number	
Temperature Range	ASTM	IP
−5 to + 110°C	9C	15C
(20 to 230°F)	(9F)	
+ 10 to 200°C	88C	101C
(50 to 392°F)	(88F)	
+ 90 to 370°C	10C	16C

[7] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

[8] Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

[9] For information on U.S. Department of Transportation regulations, see Codes of U.S. Regulations 49 CFR Chapter 1 and the U.S. Department of Labor, see 29 CFR Chapter XVII. Each of these items is revised annually and may be procured from the Superintendent of Documents, Government Printing Office, Washington, DC 20402.

(200 to 700°F) (10F)

6.4 *Ignition Source*—Natural gas flame, bottled gas flame, and electric ignitors (hot wire) have been found acceptable for use as the ignition source. The gas flame device described in detailed in Fig. A1.4 requires the use of the pilot flame described in A1.1.2.3. The electric ignitors shall be of the hot-wire type and shall position the heated section of the ignitor in the aperture of the test cover in the same manner as the gas flame device. **Warning**—Gas pressure supplied to the apparatus should not be allowed to exceed 3 kPa (12 in.) of water pressure.

7. Reagents and Materials

7.1 *Cleaning Solvents*—Use suitable solvent capable of cleaning out the specimen from the test cup and drying the test cup and cover. Some commonly used solvents are toluene and acetone. **Warning**—Toluene, acetone, and many solvents are flammable and a health hazard. Dispose of solvents and waste material in accordance with local regulations.

8. Sampling

8.1 Obtain a sample in accordance with instructions given in Practices D 4057, D 4177, or E 300.

8.2 At least 75 mL of sample is required for each test. Refer to Practice D 4057. When obtaining a sample of residual fuel oil, the sample container shall be from 85 to 95 % full. For other types of samples, the size of the container shall be chosen such that the container is not more than 85 % full or less than 50 % full prior to any sample aliquot being taken.

8.3 Successive test specimens can be taken from the same sample container. Repeat tests have been shown to be within the precisions of the method when the second specimen is taken with the sample container at least 50 % filled. The results of flash point determinations can be affected if the sample volume is less than 50 % of sample container capacity.

8.4 Erroneously high flash points may be obtained if precautions are not taken to avoid the loss of volatile material. Do not open containers unnecessarily, to prevent loss of volatile material or possible introduction of moisture, or both. Avoid storage of samples at temperatures in excess of 35°C or 95°F. Samples for storage shall be capped tightly with inner seals. Do not make a transfer unless the sample temperature is at least the equivalent of 18°C or 32°F below the expected flash point.

8.5 Do not store samples in gas-permeable containers, since volatile material may diffuse through the walls of the enclosure. Samples in leaky containers are suspect and not a source of valid results.

8.6 Samples of very viscous materials shall be heated in their containers, with lid/cap slightly loosened to avoid build-up of dangerous pressure, at the lowest temperature adequate to liquify any solids, not exceeding 28°C or 50°F below the expected flash point, for 30 min. If the sample is then not completely liquified, extend the heating period for additional 30 min periods as necessary. Then gently agitate the sample to provide mixing, such as orbiting the container horizontally, before transferring to the specimen cup. No sample shall be heated and transferred unless its temperatures is more than 18°C or 32°F below its expected flash point. When the sample has been heated above this temperature, allow the sample to cool until its temperature is at least 18°C or 32°F below the expected flash point before transferring.

NOTE 4—Volatile vapors can escape during heating when the sample container is not properly sealed.

NOTE 5—Some viscous samples may not completely liquify even after prolonged periods of heating. Care should be exercised when increasing the heating temperature to avoid unnecessary loss of volatile vapors, or heating the sample too close to the flash point.

8.7 Samples containing dissolved or free water may be dehydrated with calcium chloride or by filtering through a qualitative filter paper or a loose plug of dry absorbent cotton. Warming the sample is permitted, but it shall not be heated for prolonged periods or greater than a temperature of 18°C 32°F below its expected flash point.

NOTE 6—If the sample is suspected of containing volatile contaminants, the treatment described in 8.6 and 8.7 should be omitted.

9. Preparation of Apparatus

9.1 Support the manual or automated apparatus on a level steady surface, such as a table.

9.2 Tests are to be performed in a draft-free room or compartment. Tests made in a laboratory hood or in any location where drafts occur are not reliable.

NOTE 7—A shield, of the approximate dimensions 460 mm (18 in.) square and 610 mm (24 in.) high, or other suitable dimensions, and having an open front is recommended to prevent drafts from disturbing the vapors above the test cup.

NOTE 8—With some samples whose vapors or products of pyrolysis are objectionable, it is permissible to place the apparatus along with a draft shield in a ventilation hood, the draft of which is adjustable so that vapors can be withdrawn without causing air currents over the test cup during the ignition source application period.

9.3 Prepare the manual apparatus or the automated apparatus for operation in accordance with the manufacturer's instructions for calibrating, checking, and operating the equipment. **Warning**—Gas pressure should not be allowed to exceed 3 kPa (12 in.) of water pressure.

9.4 Thoroughly clean and dry all parts of the test cup and its accessories before starting the test, to ensure the removal of any solvent which had been used to clean the apparatus.

NOTE 9—Use suitable solvent capable of removing all of the specimen from the test cup and drying the test cup and cover. Some commonly used solvents are toluene and acetone. **Warning**—Toluene, acetone, and many solvents are flammable. Health hazard. Dispose of solvents and waste material in accordance with local regulations.

10. Verification of Apparatus

10.1 Adjust the automated flash point detection system (when used) in accordance with the manufacturer's instructions.

10.2 Verify that the temperature measuring device is in accordance with 6.3.

10.3 Verify the performance of the manual apparatus or the automated apparatus at least once per year by determining the flash point of a certified reference material (CRM) such as those listed in Annex A4, which is reasonably close to the expected temperature range of the samples to be tested. The material shall be tested according to Procedure A of this test method and the observed flash point obtained in 11.1.8 or

11.2.2 shall be corrected for barometric pressure (see Section 13). The flash point obtained shall be within the limits stated in Table A4.1 for the identified CRM or within the limits calculated for an unlisted CRM (see Annex A4).

10.4 Once the performance of the apparatus has been verified, the flash point of secondary working standards (SWSs) can be determined along with their control limits. These secondary materials can then be utilized for more frequent performance checks (see Annex A4).

10.5 When the flash point obtained is not within the limits stated in 10.3 or 10.4, check the condition and operation of the apparatus to ensure conformity with the details listed in Annex A1, especially with regard to tightness of the lid (A1.1.2.2), the action of the shutter, the position of the ignition source (A1.1.2.3), and the angle and position of the temperature measuring device (A1.1.2.4). After any adjustment, repeat the test in 10.3 using a fresh test specimen, with special attention to the procedural details prescribed in this test method.

PROCEDURE A—(See 1.2.)

11. Procedure

11.1 *Manual Apparatus*:

11.1.1 Ensure that the sample container is filled to the volume capacity requirement specified in 8.2. Fill the test cup with the test specimen to the filling mark inside of the test cup. The temperature of the test cup and test specimen shall be at least 18°C or 32°F below the expected flash point. If too much test specimen has been added to the test cup, remove the excess using a syringe or similar device for withdrawal of fluid. Place the test cover on the test cup and place the assembly into the apparatus. Be sure the locating or locking device is properly engaged. Insert the temperature measuring device into its holder.

11.1.2 Light the test flame, and adjust it to a diameter of 3.2 to 4.8 mm (0.126 to 0.189 in.), or switch on the electric igniter and adjust the intensity in accordance with the manufacturer's instructions. **Warning**—Gas pressure should not be allowed to exceed 3 kPa (12 in.) of water pressure. **Warning**—Exercise care when using a gas test flame. If it should be extinguished it will not ignite the vapors in the test cup, and the gas for the test flame that then enters the vapor space can influence the result. **Warning**—The operator should exercise and take appropriate safety precautions during the initial application of the ignition source, since test specimens containing low-flash material can give an abnormally strong flash when the ignition source is first applied. **Warning**—The operator should exercise and take appropriate safety precautions during the performance of this test method. The temperatures attained during this test method, up to 370°C (698°F), are considered hazardous.

11.1.3 Apply the heat at such a rate that the temperature, as indicated by the temperature measuring device, increases 5 to 6°C (9 to 11°F)/min.

11.1.4 Turn the stirring device at 90 to 120 rpm, stirring in a downward direction. **Warning**—Meticulous attention to all details relating to the ignition source, size of test flame or intensity of the electric ignitor, rate of temperature increase, and rate of dipping the ignition source into the vapor of the test specimen is desirable for good results.

11.1.5 *Application of Ignition Source*:

11.1.5.1 If the test specimen is expected to have a flash point of 110°C or 230°F or below, apply the ignition source when the temperature of the test specimen is 23 ± 5°C or 41 ± 9°F below the expected flash point and each time thereafter at a temperature reading that is a multiple of 1°C or 2°F. Discontinue the stirring of the test specimen and apply the ignition source by operating the mechanism on the test cover which controls the shutter so that the ignition source is lowered into the vapor space of the test cup in 0.5 s, left in its lowered position for 1 s, and quickly raised to its upward position.

11.1.5.2 If the test specimen is expected to have a flash point above 110°C or 230°F, apply the ignition source in the manner described in 11.1.5.1 at each temperature increase of 2°C or 5°F, beginning at a temperature of 23 ± 5°C or 41 ± 9°F below the expected flash point.

11.1.6 When testing materials to determine if volatile material contamination is present, it is not necessary to adhere to the temperature limits for initial ignition source application as stated in 11.1.5.

11.1.7 When testing materials where the expected flash point temperature is not known, bring the material to be tested and the tester to a temperature of 15 ± 5°C or 60 ± 10°F. When the material is known to be very viscous at this temperature, heat the specimen to a starting temperature as described in 8.6. Apply the ignition source, in the manner described in 11.1.5.1, beginning at least 5°C or 10°F higher than the starting temperature.

NOTE 10—Flash Point results determined in an "unknown expected flash point mode" should be considered approximate. This value can be used as the expected flash point when a fresh specimen is tested in the standard mode of operation.

11.1.8 Record as the observed flash point the reading on the temperature measuring device at the time ignition source application causes a distinct flash in the interior of the test cup.

NOTE 11—The sample is deemed to have flashed when a large flame appears and instantaneously propagates itself over the entire surface of the test specimen. **Warning**—For certain mixtures containing halogenated hydrocarbons, such as, methylene chloride or trichloroethylene, no distinct flash, as defined, is observed. Instead a significant enlargement of the test flame (not halo effect) and change in color of the test flame from blue to yellowish-orange occurs. Continued heating and testing of these samples above ambient temperature can result in significant burning of vapors outside the test cup, and can be a potential fire hazard. See Appendix X1 and Appendix X2 for more information.

11.1.9 When the ignition source is a test flame, the application of the test flame may cause a blue halo or an enlarged flame prior to the actual flash point. This is not a flash and shall be ignored.

11.1.10 When a flash point is detected on the first application, the test shall be discontinued, the result discarded, and the test repeated with a fresh test specimen. The first application of

the ignition source with the fresh test specimen shall be 23 ± 5°C or 41 ± 9°F below the temperature at which a flash point was detected on the first application.

11.1.11 When a flash point is detected at a temperature which is greater than 28°C or 50°F above the temperature of the first application of the ignition source, or when a flash point is detected at a temperature which is less than 18°C or 32°F above the temperature of the first application of the ignition source, the result shall be considered approximate, and the test repeated with a fresh test specimen. Adjust the expected flash point for this next test to the temperature of the approximate result. The first application of the ignition source with the fresh test specimen shall be 23 ± 5°C or 41± 9°F below the temperature at which the approximate result was found.

11.1.12 When the apparatus has cooled down to a safe handling temperature, less than 55°C (130°F), remove the test cover and the test cup and clean the apparatus as recommended by the manufacturer.

NOTE 12—Exercise care when cleaning and positioning the lid assembly so not to damage or dislocate the flash detection system or temperature measuring device. See the manufacturer's instructions for proper care and maintenance.

11.2 *Automated Apparatus*:

11.2.1 The automated apparatus shall be capable of performing the procedure as described in 11.1, including control of the heating rate, stirring of the test specimen, application of the ignition source, detection of the flash point, and recording the flash point.

11.2.2 Start the automated apparatus in accordance with the manufacturer's instructions. The apparatus shall follow the procedural details described in 11.1.3 through 11.1.8.

PROCEDURE B—(See 1.3.)

12. Procedure

12.1 *Manual Apparatus*:

12.1.1 Ensure that the sample container is filled to the volume capacity requirement specified in 8.2. Fill the test cup with the test specimen to the filling mark inside of the test cup. The temperature of the test cup and test specimen shall be at least 18°C or 32°F below the expected flash point. If too much test specimen has been added to the test cup, remove the excess using a syringe or similar device for withdrawal of fluid. Place the test cover on the test cup and place the assembly into the apparatus. Be sure the locating or locking device is properly engaged. Insert the temperature measuring device into its holder.

12.1.2 Light the test flame and adjust it to a diameter of 3.2 to 4.8 mm (0.126 to 0.189 in.), or switch on the electric igniter and adjust the intensity in accordance with the manufacturer's instructions. **Warning**—Gas pressure should not be allowed to exceed 3 kPa (12 in.) of water pressure. **Warning**—Exercise care when using a gas test flame. If it should be extinguished it will not ignite the vapors in the test cup and the gas for the test flame that then enters the vapor space can influence the result. **Warning**—The operator should exercise and take appropriate safety precautions during the initial application of the ignition source, since test specimens containing low-flash material may give an abnormally strong flash when the ignition source is first applied. **Warning**—The operator should exercise and take appropriate safety precautions during the performance of this test method. The temperatures attained during this test method, up to 370°C (698°F), are considered hazardous.

12.1.3 Turn the stirring device at 250 ± 10 rpm, stirring in a downward direction.

12.1.4 Apply the heat at such a rate that the temperature as indicated by the temperature measuring device increases 1 to 1.6°C (2 to 3°F)/min.

12.1.5 Proceed as prescribed in Section 11, with the exception of the preceding requirements for rates of stirring and heating.

12.2 *Automated Apparatus*:

12.2.1 The automated apparatus shall be capable of performing the procedure as described in 12.1, including control of the heating rate, stirring of the test specimen, application of the ignition source, detection of the flash point, and recording the flash point.

12.2.2 Start the automated apparatus in accordance with the manufacturer's instructions. The apparatus shall follow the procedural details in accordance with 12.1.3 through 12.1.5.

PRECISION, CALCULATION, AND REPORT FOR PROCEDURES A AND B

13. Calculation

13.1 Observe and record the ambient barometric pressure (See Note 25) at the time of the test. When the pressure differs from 101.3 kPa (760 mm Hg), correct the flash point as follows:

$$\text{Corrected flash point} = C + 0.25\,(101.3 - K) \quad (1)$$

$$\text{Corrected flash point} = F + 0.06\,(760 - P) \quad (2)$$

$$\text{Corrected flash point} = C + 0.033\,(760 - P) \quad (3)$$

where:
C = observed flash point, °C,
F = observed flash point, °F,
P = ambient barometric pressure, mm Hg, and
K = ambient barometric pressure, kPa.

NOTE 13—The barometric pressure used in this calculation is the ambient pressure for the laboratory at the time of the test. Many aneroid barometers, such as those used at weather stations and airports, are precorrected to give sea level readings and would not give the correct reading for this test.

13.2 After correction for barometric pressure, round the temperature to the nearest 0.5 °C and record.

14. Report

14.1 Report the corrected flash point as the ASTM D 93 – IP 34, Procedure A or Procedure B Pensky-Martens Closed Cup Flash Point of the test specimen.

15. Precision and Bias

15.1 *Precision—Procedure A*—The precision of this procedure as determined by the statistical examination of the interlaboratory test results, is as follows:

15.1.1 *Repeatability*—The difference between successive results, obtained by the same operator with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values in 1 case in 20.

$$r = AX, \quad (4)$$

$$A = 0.029,$$

X = mean result in °C, and

r = repeatability.

15.1.2 *Reproducibility*—The difference between two single and independent results, obtained by different operators working in different laboratories on identical material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values only in 1 case in 20.

$$R = BX, \quad (5)$$

$$B = 0.071,$$

X = mean result in °C, and

R = reproducibility.

15.1.3 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for the procedure in this test method, bias has not been determined.

15.1.4 *Relative Bias*—Statistical evaluation of the data did not detect any significant difference between the reproducibility variances of manual and automated Pensky-Martens flash point results for the samples studied. Evaluation of the data did not detect any significant difference between averages of manual and automated Pensky-Martens flash point for the samples studied with the exception of cycle oil and fuel oil which showed some bias. In any case of dispute, the manual procedure shall be considered the referee test.

NOTE 14—The precision statements were derived on clear liquids only. Refer to the research report[10] for information regarding relative bias and types of samples. Additional studies are in progress concerning relative bias.

15.1.5 The precision data were developed from a combined 1991 ASTM cooperative test program[10] using 5 samples of fuel and lubricating oils (Twelve laboratories participated with the manual apparatus and 21 laboratories participated with the automated equipment) and a 1994 IP cooperative test program using 12 fuel samples and 4 pure chemicals. (Twenty-six laboratories participated with manual and automated equipment. The apparatus used either a gas test flame or an electric resistance (hot wire) device for the ignition source. Information on the type of samples and their average flash point are in the research report available at ASTM Headquarters.[10]

15.2 *Precision—Procedure B*—The precision of this procedure as determined by the statistical examination of the interlaboratory test results, is as follows:

15.2.1 *Repeatability*—The difference between successive results obtained by the same operator with the same apparatus under constant operating conditions on identical test materials would, in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following value in 1 case in 20:

Residual fuel oil 2 °C (5 °F)
Other types 5 °C (9°F) (6)

15.2.2 *Reproducibility*—The difference between two single and independent results obtained by different operators working in different laboratories on identical material would, in the long run, exceed the following value only in 1 case in 20.

Residual fuel oil 6 °C (12 °F)
Other types 10 °C (18°F) (7)

15.2.3 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for the procedure in this test method, bias has not been determined.

15.2.4 The precision data for residual fuel oils were developed in a 1996 cooperative test program conducted by the IP using 12 samples of residual fuel and 40 laboratories worldwide using both the manual and automated apparatus. Informaiton on the type of samples and their average flash point are in the research report.

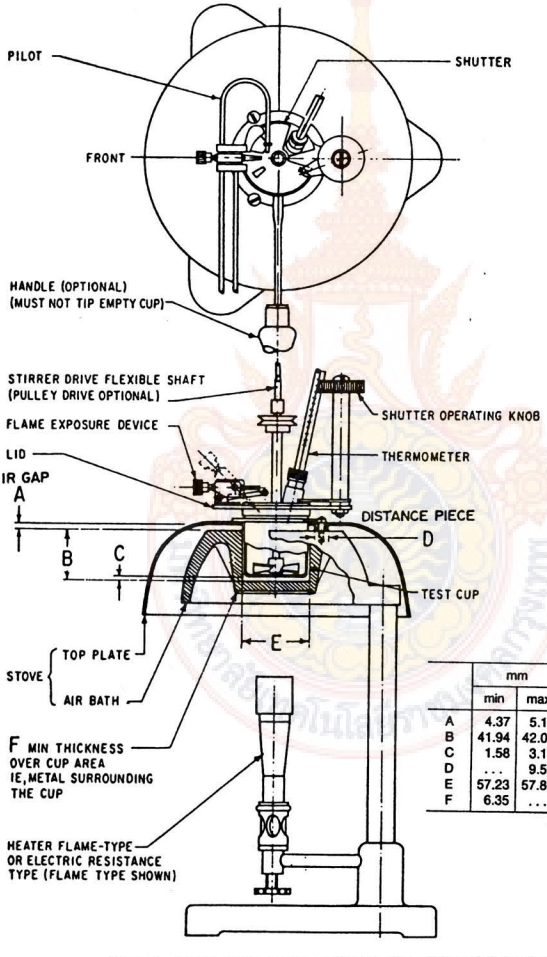
15.2.5 The precision data for other sample types in Procedure B is not known to have been developed in accordance with RR: D02–1007.

NOTE 15—Procedure B was not tested in the 1991 interlaboratory program.

[10] The results of the 1991 interlaboratory cooperative test program are available from ASTM Headquarters. Request ASTM RR: S15 – 1008.

16. Keywords

16.1 automated flash point; automated Pensky-Martens closed cup; flammability; flash point; Pensky-Martens closed cup



	mm		in.	
	min	max	min	max
A	4.37	5.16	0.172	0.203
B	41.94	42.06	1.651	1.656
C	1.58	3.18	0.062	0.125
D	...	9.52	...	0.375
E	57.23	57.86	2.253	2.278
F	6.35	...	0.25	...

NOTE 1—Lid assembly can be positioned either right or left-handed.

FIG. A1.1 Pensky-Martens Closed Flash Tester

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. APPARATUS SPECIFICATIONS

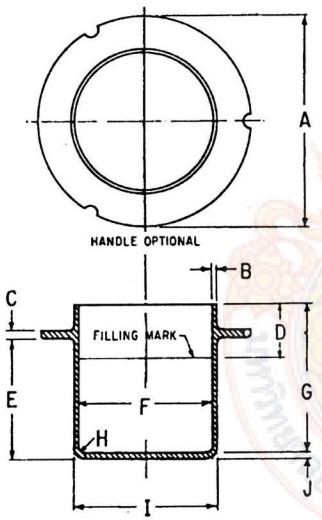
A1.1 A typical assembly of the apparatus, gas heated, is shown in Fig. A1.1. The apparatus shall consist of a test cup, cover, and stove conforming to the following requirements:

A1.1.1 *Cup*—The cup shall be of brass, or other nonrusting metal of equivalent heat conductivity, and shall conform to the dimensional requirements in Fig. A1.2. The flange shall be equipped with devices for locating the position of the cup in the stove. A handle attached to the flange of the cup is a desirable accessory. The handle shall not be so heavy as to tip over the empty cup.

A1.1.2 *Cover*:

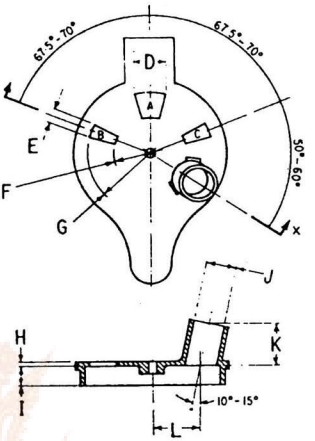
A1.1.2.1 *Cover Proper*— The cover shown in Fig. A1.3 shall be of brass (A1.1.1) and shall have a rim projecting downward almost to the flange of the cup. The rim shall fit the outside of the cup with a clearance not exceeding 0.36 mm (0.014 in.) on the diameter. There shall be a locating or locking device, or both, engaging with a corresponding device on the cup. The four openings in the cover, *A*, *B*, *C*, and *D*, are shown in Fig. A1.3. The upper edge of the cup shall be in close contact with the inner face of the cover throughout its circumference.

A1.1.2.2 *Shutter*—The cover shall be equipped with a brass (Section 3) shutter (Fig. A1.4), approximately 2.4 mm (3/32 in.) thick, operating on the plane of the upper surface of the cover. The shutter shall be so shaped and mounted that it rotates on the axis of the horizontal center of the cover between two stops, so placed, that when in one extreme position, the openings *A*, *B*, and *C* in the cover are completely closed, and when in the other extreme position, these openings are completely opened. The mechanism operating the shutter should be of the spring type and constructed so that when at rest the



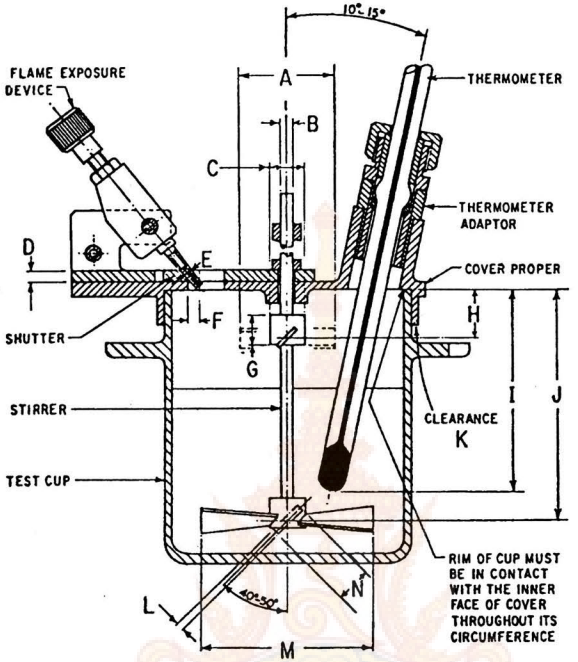
	mm		(in.)	
	min	max	(min)	(max)
A	79.0	79.8	(3.11)	(3.14)
B	1.0	...	(0.04)	(...)
C	2.8	3.6	(0.11)	(0.14)
D	21.72	21.84	(0.855)	(0.860)
E	45.47	45.72	(1.790)	(1.800)
F	50.72	50.85	(1.997)	(2.002)
G	55.75	56.00	(2.195)	(2.205)
H	3.8	4.0	(0.15)	(0.16)
I	53.90	54.02	(2.122)	(2.127)
J	2.29	2.54	(0.090)	(0.100)

FIG. A1.2 Test Cup



	mm		(in.)	
	min	max	(min)	(max)
D	12.7	13.5	(0.50)	(0.53)
E	4.8	5.6	(0.19)	(0.22)
F	13.5	14.3	(0.53)	(0.56)
G	23.8	24.6	(0.94)	(0.97)
H	1.2	2.0	(0.05)	(0.08)
I	7.9	...	(0.31)	(...)
J	12.00	12.32	(0.472)	(0.485)
K	16.38	17.00	(0.645)	(0.669)
L	18.65	19.45	(0.734)	(0.766)

FIG. A1.3 Cover Proper



	mm		(in.)	
	min	max	(min)	(max)
A	18.3	19.8	(0.72)	(0.78)
B	2.38	3.18	(0.094)	(0.125)
C	7.6	8.4	(0.30)	(0.33)
D	2.0	2.8	(0.08)	(0.11)
E	0.69	0.79	(0.027)	(0.031)
F	2.0	2.8	(0.08)	(0.11)
G	6.4	10.4	(0.25)	(0.41)
H	9.6	11.2	(0.38)	(0.44)
I[A]	43.0	46.0	(1.69)	(1.81)
J	50.0	51.6	(1.97)	(2.03)
K	...	0.36	(...)	(0.014)
L	1.22	2.06	(0.048)	(0.08)
M	31.8	44.4	(1.25)	(1.75)
N	7.6	8.4	(0.30)	(0.33)

[A]Includes tolerance for length of thermometer given in Specification E 1.

FIG. A1.4 Test Cup and Cover Assembly

shutter shall exactly close the three openings. When operated to the other extreme, the three cover openings shall be exactly open and the tip of the exposure tube shall be fully depressed.

A1.1.2.3 *Flame-Ignition Device*—The flame-ignition device (Fig. A1.4) shall have a tip with an opening 0.69 to 0.79 mm (0.027 to 0.031 in.) in diameter. This tip shall be made preferably of stainless steel, although it may be fabricated of other suitable metals. The flame-exposure device shall be equipped with an operating mechanism which, when the shutter is in the open position, depresses the tip so that the center of the orifice is between the planes of the under and upper surfaces of the cover proper at a point on a radius passing through the center of the larger opening *A* (Fig. A1.3). An electric ignitor is also suitable. The electric ignitors shall be of the electric resistance (hot-wire) type and shall position the heated section of the ignitor in the aperture of the test cover in the same manner as the gas flame device.

A1.1.2.4 *Pilot Flame*—A pilot flame shall be provided for automatic relighting of the exposure flame. A bead 4 mm (5/32in.) in diameter can be mounted on the cover so that the

size of the test flame can be regulated by comparison. The tip of the pilot flame shall have an opening the same size as the tip of the flame exposure device (0.69 to 0.79 mm (0.027 to 0.031 in.) in diameter).

A1.1.2.5 *Stirring Device*—The cover shall be equipped with a stirring device (Fig. A1.4) mounted in the center of the cover and carrying two 2-bladed metal propellers. In Fig. A1.4 lower propeller is designated by the letters *L*, *M*, and *N*. This propeller shall measure approximately 38 mm from tip to tip, with each of its two blades 8 mm in width with a pitch of 45°. The upper propeller is designated by the letters *A*, *C*, and *G*. This propeller measures approximately 19 mm, tip to tip, each of its two blades is also 8 mm in width with a pitch of 45°. Both propellers are located on the stirrer shaft in such a manner that, when viewed from the bottom of the stirrer, the blades of one propeller are at 0 and 180° while the blades of the other propeller are at 90 and 270°. A stirrer shaft may be coupled to the motor by a flexible shaft or a suitable arrangement of pulleys.

A1.1.2.6 *Stove*—Heat shall be supplied to the cup by means of a properly designed stove which is equivalent to an air bath. The stove shall consist of an air bath and a top plate on which the flange of the cup rests.

A1.1.2.7 *Air Bath*—The air bath shall have a cylindrical interior and shall conform to the dimensional requirements in Fig. A1.1. The air bath may be either a flame or electrically heated metal casting (A1.1.2.8), or an electric-resistance element (A1.1.2.9). In either case, the air bath must be suitable for use at the temperatures to which it will be subjected without deformation.

A1.1.2.8 *Heater, Flame or Electric*—If the heating element is a flame or an electric heater, it shall be so designed and used that the temperatures of the bottom and the walls are approximately the same. In order that the air bath internal surfaces should be at a uniform temperature, it should not be less than 6.4 mm (¼ in.) in thickness unless the heating element is designed to give equal heat flux densities over all the wall and bottom surfaces.

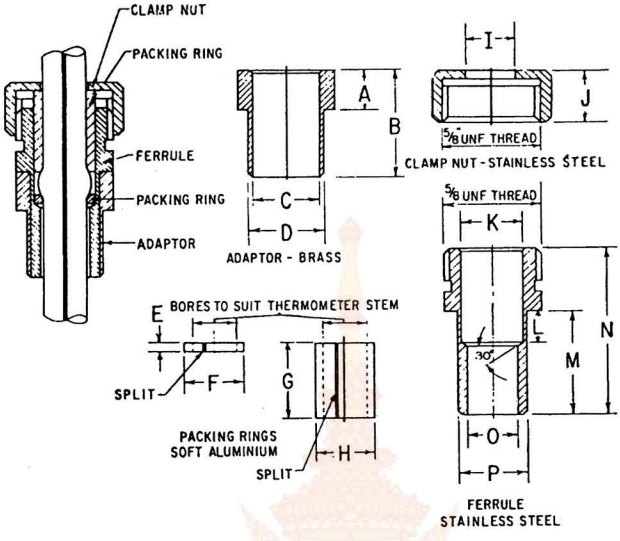
A1.1.2.9 *Heater, Electric Resistance*—If the heater is of the electric resistance type, it shall be constructed so that all parts of the interior surface are heated uniformly. The wall and bottom of the air bath shall not be less than 6.4 mm (¼ in.) in thickness unless the resistance heating elements are distributed over at least 80 % of the wall and all the bottom of the air bath. A heater having such a distribution of the heating elements positioned at least 4.0 mm (5/32 in.) away from the internal surface of the heating unit can be used in conjunction with a minimum thickness of 1.58 mm (1/16 in.) for the wall and bottom of the air bath.

A1.1.2.10 *Top Plate*—The top plate shall be of metal, and shall be mounted with an air gap between it and the air bath. It may be attached to the air bath by means of three screws and spacing bushings. The bushings should be of proper thickness to define an air gap of 4.8 mm (3/16in.), and they shall be not more than 9.5 mm (⅜ in.) in diameter.

A2. MANUFACTURING STANDARDIZATION OF THERMOMETER AND FERRULE

A2.1 The low-range thermometer, which conforms also to the specification for the cup thermometer in the tag closed tester (Test Method D 56) and which frequently is fitted with a metal ferrule intended to fit the collar on the cover of the tag flash tester, can be supplemented by an adapter (Fig. A2.1) to be used in the larger diameter collar of the PenskyMartens apparatus. Differences in dimensions of these collars, which do not affect test results, are a source of unnecessary trouble to manufacturers and suppliers of instruments, as well as to users.

A2.2 Dimensional requirements are shown in Fig. A2.1. Conformity to these requirements is not mandatory, but is desirable to users as well as suppliers of Pensky-Martens testers.



	mm		(in.)	
	min	max	(min)	(max)
A	6.20	6.50	(0.244)	(0.256)
B	17.0	18.0	(0.67)	(0.71)
C	9.80	9.85	(0.386)	(0.388)
D	11.92	12.24	(0.469)	(0.482)
E	1.40	1.65	(0.055)	(0.065)
F	8.56	8.61	(0.337)	(0.339)
G	12.4	13.0	(0.49)	(0.57)
H	8.56	8.61	(0.337)	(0.339)
I	8.1	8.6	(0.32)	(0.34)
J	9.9	10.7	(0.39)	(0.42)
K	8.64	8.69	(0.340)	(0.342)
L	5.1	5.6	(0.20)	(0.22)
M	17.0	17.5	(0.67)	(0.69)
N	27.4	28.2	(1.08)	(1.11)
O	7.11	7.16	(0.280)	(0.282)
P	9.73	9.78	(0.383)	(0.385)

FIG. A2.1 Dimensions for Thermometer Adapter, Ferrule, and Packing Ring

A3. THERMOMETER SPECIFICATIONS

A3.1 Fig. A3.1, Table A3.1, Table A3.2, Table A3.3 and Table A3.4 provide information on thermometer specifications.

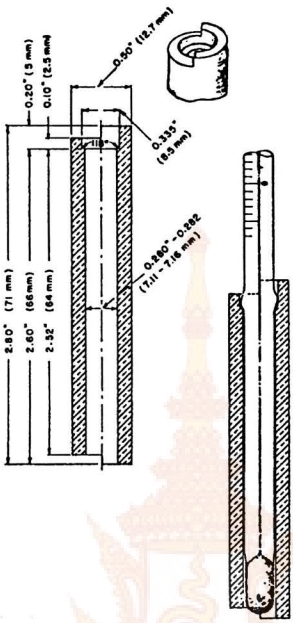


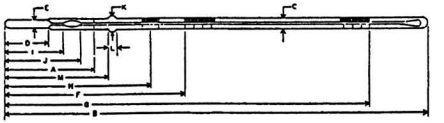
FIG. A3.1 Test Gage for Checking Enlargements on Thermometers

TABLE A3.1 IP Thermometer Specifications

NOTE 1—The stem shall be made with an enlargement having a diameter of 1.5 to 2.0 mm greater than the stem and a length of 3 to 5 mm, the bottom of the enlargement being 64 to 66 mm from the bottom of the bulb. These dimensions shall be measured with the test gage shown in Fig. A3.1.

Name	IP 15C	IP 16C	IP 101C
	Pensky-Martens Low	Pensky-Martens High	Pensky-Martens Medium
Range	−5 to + 110°C	90 to 370°C	20 to 150°C
Graduation	0.5°C	2°C	1°C
Immersion, mm	57	57	57
Overall length ±5 mm	290	280 ± 10	290
Stem diameter, mm	6.0 to 7.0	6.0 to 7.0	6.0 to 7.0
Bulb shape	cylindrical	cylindrical	cylindrical
Bulb length, mm	9 to 13	7 to 10	9 to 13
Bulb diameter, mm	not less than 5.5 and not greater than stem	not less than 4.5 and not greater than stem	not less than 5.5 and not greater than stem
Length of graduated portion, mm	140 to 175	143 to 180	140 to 175
Distance bottom of bulb to, mm	0°C 85 to 95	90°C 80 to 90	20°C 85 to 95
Longer lines at each	1 and 5°C	10 and 20°C	5°C
Figured at each	5°C	20°C	5°C
Expansion chamber	required	required	required
Top finish	ring	ring	ring
Scale error not to exceed±	0.5°C	1 to 260°C 2°C above 260°C	1°C
See notes	1 and Table A3.3 for emergent stem temperatures	1 and Table A3.3 for emergent stem temperatures	1 and Table A3.3 for emergent stem temperatures

TABLE A3.2 Specifications for ASTM Thermometers
All dimensions are in millimetres.
See Table A3.3 for Standardization Temperature.



ASTM Number and Name	Range	For Test at	Immersion	Graduations: Subdivisions	Graduations: Long Lines at Each	Graduations: Number at Each	Scale Error, max	Special Inscription	Expansion Chamber: Permit Heating to	Total Length ±5 (B)	Stem OD (C)	Bulb: Length (D)	Bulb: OD (E)	Scale Location: Bottom of Bulb to Line at	Scale Location: Distance (F)	Scale Location: Bottom of Bulb to Line at	Scale Location: Distance (G)	Ice Point Scale: Range (H)	Ice Point Scale: Bottom of Bulb to Ice Point	Contraction Chamber: Distance to Bottom, min (I)	Contraction Chamber: Distance to Top, max (J)	Stem Enlargement: OD (K)	Stem Enlargement: Length (L)	Stem Enlargement: Distance to Bottom (M)
9C-62 Pensky-Martens Low-Range Tag Closed Tester 9F-62	–5 to +110°C (20 to 230°F)		57	0.5°C 1°F	1°C 5°F	5°C 10°F	0.5°C 1°F	ASTM 9C or 9F 57 mm IMM	160°C 320°F	287	6.0 to 7.0	9.0 to 13	not greater than stem	0°C 32°F	85 to 98	100°C 212°F	221 to 237					7.5 to 8.5	2.5 to 5.0[A]	64 to 66
10C-62 Pensky-Martens, High-Range 10F-62	90 to 370°C (200 to 700°F)		57	2°C 5°F	10°C 25°F	20°C 50°F	[B] [D]	ASTM 10C or 10F 57mm IMM	[C]	287	6.0 to 7.0	8.0 to 10.0	4.5 to 6.0	110°C 230°F	86 to 99	360°C 680°F	227 to 245					7.5 to 8.5	2.5 to 5.0[A]	64 to 66

[A] The length of the enlargement, and the distance from the bottom of the enlargement to the bottom of the bulb shall be measured with the test gage shown in Fig. A3.1.
[B] Scale error: 1°C up tp 260°C; 2°C over 260°C.
[C] An expansion chamber is provided for relief of gas pressure to avoid distortion of the bulb at higher temperatures. It is not for the purpose of joining mercury separations; and under no circumstances should the thermometer be heated above the highest temperature reading.
[D] Scale error: 2.5°F up tp 500°F; 3.5°F over 500°F.

TABLE A3.3 Standardization Temperatures

NOTE 1—The emergent column temperatures are those attained when using the thermometers in the test equipment for which the thermometers were originally designed. In some cases these temperatures are markedly different from those realized during standardization.

Temperature	Average Temperature of Emergent Column	Temperature	Average Temperature of Emergent Column	Temperature	Average Temperature of Emergent Column	Temperature	Average Temperature of Emergent Column
Thermometer 9C (−5 to + 100°C)		Thermometer 9F (20 to 230°F)		Thermometer 10C (90 to 370°C)		Thermometer 10F (200 to 700°F)	
0°C	19°C	32°F	66°F	100°C	61°C	212°F	141°F
35°C	28°C	100°F	86°F	200°C	71°C	390°F	159°F
70°C	40°C	160°F	106°F	300°C	87°C	570°F	180°F
105°C	50°C	220°F	123°F	370°C	104°C	700°F	220°F
IP 15C (−7 to 110°C)		IP 15F (20 to 230°F)		IP 16C (90 to 370°C)		IP 16F (20 to 700°F)	
0°C	19°C	32°F	66°F	100°C	61°C	200°F	140°F
20°C	20°C	70°F	70°F	150°C	65°C	300°F	149°F
40°C	31°C	100°F	86°F	200°C	71°C	400°F	160°F
70°C	40°C	150°F	104°F	250°C	78°C	500°F	175°F
100°C	48°C	212°F	118°F	300°C	87°C	600°F	195°F
				350°C	99°C	700°F	220°F

TABLE A3.4 Specifications for Medium-Range Pensky-Martens

ASTM No. 88F (88C) Vegetable Oil Flash Thermometer			
Name		Medium-Range Pensky-Martens	
Reference Fig. No.		5	
Range	10–200°C		50–392°F
For test at			
Immersion, mm		57	
Graduations:			
Subdivisions	0.5°C		1°F
Long lines at each	1°C and 5°C		5°F
Numbers at each	5°C		10°F
Scale error, max	0.5°C		1°F
Special inscription		ASTM 88F(88C) 57 mm IMM	
Expansion chamber:			
Permit heating to	205°C		400°F
Total length, mm		285 to 295	
Stem OD, mm		6.0 to 7.0	
Bulb length, mm		8.0 to 12.0	
Bulb OD, mm		>4.5 and <stem[A]	
Scale location:			
Bottom of bulb to line at	20°C		68°F
Distance, mm		80 to 90	
Length of graduated portion, mm		145 to 180	
Ice-point scale:			
Range			
Bottom of bulb to ice-point, mm			
Contraction chamber:			
Distance to bottom, min, mm			
Distance to top, max, mm			
Stem enlargement:			
OD, mm		7.5 to 8.5	
Length, mm		2.5 to 5.0[A]	
Distance to bottom, mm		64 to 66	

[A] Bulb OD shall be greater than 4.5 mm and less than the outside diameter of the stem (C).

A4. VERIFICATION OF APPARATUS PERFORMANCE

A4.1 *Certified Reference Material (CRM)*—CRM is a stable, pure (99 + mole % purity) hydrocarbon or other stable petroleum product with a method-specific flash point established by a method-specific interlaboratory study following ASTM RR:D02-1007 guidelines or ISO Guide 34 and 35.

A4.1.1 Values of the flash point corrected for barometric pressure for some reference materials and their typical limits are given in Table A4.1 (see Note A4.1). Suppliers of CRMs will provide certificates stating the method-specific flash point for each material of the current production batch. Calculation

TABLE A4.1 D 93 Typical Flash Point Values and Typical Limits for CRM

NOTE 1—Supporting data for the interlaboratory study to generate the flash point in Table A4.1 can be found in research report RR:S15-1010.

Hydrocarbon	Purity, mole %	Flash Point,[a] °C	Limits, °C
n-decane	99 +	52.8	±2.3
n-undecane	99 +	68.7	±3.0
n-tetradecane	99 +	109.3	±4.8
n-hexadecane	99 +	133.9	±5.9

of the limits for these other CRMs can be determined from the reproducibility value of this test method, reduced by interlaboratory effect and then multiplied by 0.7. See Research Report RR:S15-1008.

NOTE A4.1—Materials, purities, flash point values, and limits stated in Table A4.1 were developed in an ASTM interlaboratory program to determine suitability of use for verification fluids in flash point test methods. Other materials, purities, flash point values, and limits can be suitable when produced according to the practices of ASTM RR:D02-1007 or ISO Guides 34 and 35. Certificates of performance of such materials should be consulted before use, as the flashpoint value will vary dependent on the composition of each CRM batch.

A4.2 *Secondary Working Standard (SWS)*—SWS is a stable, pure (99 + mole % purity) hydrocarbon, or other petroleum product whose composition is known to remain appreciably stable.

A4.2.1 Establish the mean flash point and the statistical control limits (3σ) for the SWS using standard statistical techniques. See ASTM MNL 7).[11]

[11] *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis, ASTM MNL*, 6th ed., ASTM, 1990.

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. FLASH POINT MASKING PHENOMENON

X1.1 A condition during flash point testing can occur with certain mixtures whereby the non-flammable component of the sample tends to inert the vapor space above the liquid, thus preventing a flash. Under this condition, the flash point of the material is masked resulting in the reporting of incorrect high flash point or no flash point.

X1.2 This flash point masking phenomenon most frequently occurs with ignitable liquids that contain certain halogenated hydrocarbons such as dichloromethane (methylene chloride) and trichloroethylene.

X1.3 Under this condition, no distinct flash as defined in 3.1.1 of this test method is observed. Instead a significant enlargement of the test flame and a change in the color of the test flame from blue to yellow-orange laminar flame is observed.

X1.4 Under this condition, continued heating and testing for flash point at temperatures above ambient temperature, have resulted in significant burning of the ignitable vapor outside the test cup, often above the test flame. This can be a potential fire hazard if not recognized.

X1.5 It is recommended that if this condition is encountered during the flash point testing of these type of materials, testing should be discontinued.

X1.6 Further commentaries regarding flash point test and flammability of mixtures can be found in Test Method E 502.

X2. FLASH POINT TEST AND FLAMMABILITY OF MIXTURES

X2.1 While the flash point can be used to indicate the flammability of liquid materials for certain end uses, flash point does not represent the minimum temperature at which a material can evolve flammable vapors.

X2.2 There are instances with pure materials where the absence of a flash point does not ensure freedom from flammability. Included in this category are materials that require large diameters for flash propagation, such as trichloroethylene. This material will not propagate a flame in apparatus the size of a flash point tester, however, its vapors are flammable and will burn when ignited in apparatus of adequate size.

X2.3 When a liquid contains flammable and non-flammable components, there are cases where this liquid can evolve flammable vapors under certain conditions and yet will not exhibit a close-cup flash point. This phenomenon is noted when a non-flammable component is sufficiently volatile and present in sufficient quantity to inert the vapor space of the closed cup, thus preventing a flash. In addition, there are certain instances where an appreciable quantity of the non-flammable component will be present in the vapor, and the material will exhibit no flash point.

X2.4 Liquids containing a highly volatile non-flammable component or impurity, which exhibit no flash point because of the influence of the nonflammable material, may form flammable mixtures if totally flash vaporized in air in the proper proportions.

SUMMARY OF CHANGES

Subcommittee D02.08 has identified the location of selected changes to this standard since the 1999 issue that may impact the use of this standard.

') Paragraph 8.2 was revised to describe the different volnes required in the containers for each sample type.

') Paragraph 8.3 was added allowing successive specimens om the sample container and a minimum sample container olume.

f) Paragraph 11.1.1 was revised to ensure that the sample ontainer volumes are as specified in 8.2.

f) Paragraph 12.1.1 was revised to ensure that the sample container volumes are as specified in 8.2.

(*5*) A warning note was added about halogenated hydrocarbons and the flash point interference.

(*6*) Appendix X1 Flash Point Masking Phenomenon was added.

(*7*) Appendix X2 Flash Point Test and Flammability of Mixtures was added.

Designation: D 130 – 94 (Reapproved 2000)$^{\epsilon 1}$

Designation: 154/93

An American National Standard
Federation of Societies for
Paint Technology Standard No. Dt-28-65
British Standard 4351

Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test[1]

This standard is issued under the fixed designation D 130; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval. This is also a standard of the Institute of Petroleum issued under the fixed designation IP 154. The final number indicated the year of last revision.

This test method has been approved by the sponsoring committees and accepted by the cooperating societies in accordance with established procedures.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

ϵ^1 NOTE—The warning statement were placed in the text editorially in August 2000.

1. Scope

1.1 This test method covers the detection of the corrosiveness to copper of aviation gasoline, aviation turbine fuel, automotive gasoline, natural gasoline or other hydrocarbons having a Reid vapor pressure no greater than 18 psi (124 kPa), cleaners (Stoddard) solvent, kerosine, diesel fuel, distillate fuel oil, lubricating oil, and certain other petroleum products. (**Warning**—Some products, particularly natural gasoline, may have a much higher vapor pressure than would normally be characteristic of automotive or aviation gasolines. For this reason, extreme caution must be exercised to ensure that the test bomb containing natural gasoline or other products of high vapor pressure are not placed in the 100°C (212°F) bath. Samples having Reid vapor pressures in excess of 18 psi (124 kPa) may develop sufficient pressure at 100°C to cause rupture of the test bomb. For any sample having a Reid vapor pressure above 18 psi (124 kPa), use Test Method D 1838. Also, see Annex A2.)

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific hazard statements, see 1.1, 6.1, and Annex A2.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 396 Specification for Fuel Oils[2]
D 975 Specification for Diesel Fuel Oils[2]
D 1655 Specification for Aviation Turbine Fuels[2]
D 1838 Test Method for Copper Strip Corrosion by Liquefied Petroleum (LP) Gases[2]

2.2 ASTM Adjuncts:ASTM Copper Strip Corrosion Standard[3]

3. Summary of Test Method

3.1 A polished copper strip is immersed in a given quantity of sample and heated at a temperature and for a time characteristic of the material being tested. At the end of this period the copper strip is removed, washed, and compared with the ASTM Copper Strip Corrosion Standards.

4. Significance and Use

4.1 Crude petroleum contains sulfur compounds, most of which are removed during refining. However, of the sulfur compounds remaining in the petroleum product, some can have a corroding action on various metals and this corrosivity is not necessarily related directly to the total sulfur content. The effect can vary according to the chemical types of sulfur compounds present. The copper strip corrosion test is designed to assess the relative degree of corrosivity of a petroleum product.

5. Apparatus

5.1 *Test Tubes*, 25 by 150-mm.

5.1.1 Provide a bath capable of being maintained at a constant temperature of 50 ± 1°C (122 ± 2°F) or 100± 1°C

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-2 on Petroleum Products and Lubricantsand is the direct responsibility of Subcommittee D02.05 on Physical Analysis of Fuels and Light Distillates.

In the IP, this test method is under the jurisdiction of the Standardization Committee.

Current edition approved Feb. 15, 1994. Published April 1994. Originally published as D 130 – 22 T, replacing former D 89. Last previous edition D 130 – 88.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

[3] Available from ASTM Headquarters. Request Adjunct No. ADJD0130.

Names of suppliers in the United Kingdom can be obtained from the Institute of Petroleum. Two master standards are held by the IP for reference.

(212 ± 2°F), or both, and having suitable supports to hold the test tubes in a vertical position and immersed to a depth of about 100 mm (4 in.). Either water, oil, or aluminum block baths are suitable.

5.2 *Copper Strip Corrosion Test Bomb*, constructed of stainless steel according to the dimensions as given in Fig. 1, and capable of withstanding a test pressure of 100 psi (689 kPa). Alternative designs for the bomb cap and synthetic rubber gasket may be used provided that the internal dimensions of the bomb are the same as those shown in Fig. 1. Provide a 25 by 150-mm test tube as a liner for holding the sample.

5.2.1 Provide liquid baths capable of being maintained at 40 ± 1°C (104 ± 2°F) or 100 ± 1°C (212± 2°F), or both, and having suitable supports to hold the test bomb in a vertical position. The bath must be deep enough so that the entire bomb will be submerged during the test. As the bath medium, use water or any other liquid which can be satisfactorily controlled at the specified test temperature.

5.3 *Thermometers*, total immersion, for indicating the required test temperature, with smallest graduations of 1°C (2°F) or less. No more than 25 mm (1 in.) of the mercury thread should extend above the surface of the bath at the test temperature. The ASTM 12C (12F) or IP 64C (64F) thermometer is suitable.

5.4 *Polishing Vise*, for holding the copper strip firmly without marring the edges while polishing. Any convenient type of holder (see Appendix) may be used provided that the strip is held tightly and that the surface of the strip being polished is supported above the surface of the holder.

5.5 *Viewing Test Tubes*, flat glass test tubes, are convenient for protecting corroded strip for close inspection or storage (see Appendix).

6. Materials

6.1 *Wash Solvent*—Any volatile, sulfur-free hydrocarbon solvent may be used provided that it shows no tarnish at all when tested at 50°C (122°F). Knock test grade *iso*octane is a suitable solvent and should be used in case of dispute. (**Warning**—Extremely flammable, see A2.1.)

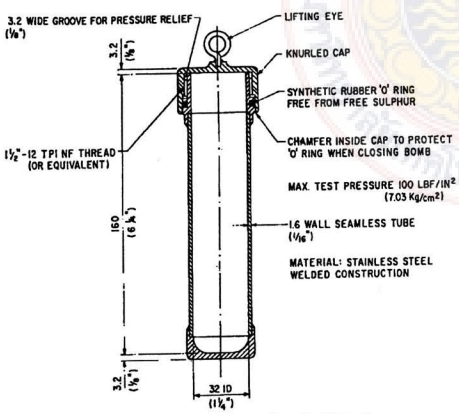


FIG. 1 Copper Strip Corrosion Test Bomb

6.2 *Polishing Materials*—Silicon carbide grit paper of varying degrees of fineness including 65-µm (240-grit) paper or cloth; also a supply of 105-µm (150-mesh) silicon carbide grain and pharmaceutical grade absorbent cotton (cotton wool).

6.3 *Copper Strips*:

6.3.1 *Specification*—Use strips 12.5 mm (½ in.) wide, 1.5 to 3.0 mm (1/16 to ⅛ in.) thick, cut 75 mm (3 in.) long from smooth-surfaced, hard-temper, cold-finished copper of 99.9 + % purity; electrical bus bar stock is generally suitable (see Appendix). The strips may be used repeatedly but should be discarded when the surfaces become deformed on handling.

6.3.2 *Surface Preparation*—Remove all surface blemishes from all six sides of the strip with silicon carbide paper of such degrees of fineness as are needed to accomplish the desired results efficiently. Finish with 65-µm (240-grit) silicon carbide paper or cloth, removing all marks that may have been made by other grades of paper used previously. Immerse the strip in wash solvent from which it can be withdrawn immediately for final preparation (polishing) or in which it can be stored for future use.

6.3.2.1 As a practical manual procedure for surface preparation, place a sheet of the paper on a flat surface, moisten it with kerosine or wash solvent, and rub the strip against the paper with a rotary motion, protecting the strip from contact with the fingers with an ashless filter paper. Alternatively, the surface of the strip can be prepared by use of motor-driven machines using appropriate grades of dry paper or cloth.

6.3.3 *Final Preparation*—Remove a strip from the wash solvent. Holding it in the fingers protected with ashless filter paper, polish first the ends and then the sides with the 105-µm (150-mesh) silicon carbide grains picked up from a clean glass plate with a pad of cotton (cotton wool) moistened with a drop of wash solvent. Wipe vigorously with fresh pads of cotton (cotton wool) and subsequently handle only with stainless steel forceps; *do not touch with the fingers.* Clamp in a vise and polish the main surfaces with silicon-carbide grains on absorbent cotton. Do not polish in a circular motion. Rub in the direction of the long axis of the strip, carrying the stroke beyond the end of the strip before reversing the direction. Clean all metal dust from the strip by rubbing vigorously with clean pads of absorbent cotton until a fresh pad remains unsoiled. When the strip is clean, immediately immerse it in the prepared sample.

6.3.3.1 It is important to polish the whole surface of the strip uniformly to obtain a uniformly stained strip. If the edges show wear (surface elliptical) they will likely show more corrosion than the center. The use of a vise (see Appendix) will facilitate uniform polishing.

6.3.3.2 It is important to follow the order of preparation with the correctly sized silicon carbide material as described in 6.3.2 and 6.3.3. The final preparation is with 105-µm silicon carbide grains. This is a larger grain size than the 65 micron paper used in the surface preparation stage. The reason for this use of larger silicon carbide grains in the final preparation is to produce asperities (controlled roughness) on the surface of the

copper which acts as sites for the initiation of corrosion reactions.

7. Corrosion Standards

7.1 *ASTM Copper Strip Corrosion Standards*[4] consist of reproductions in color of typical test strips representing increasing degrees of tarnish and corrosion, the reproductions being encased in plastic in the form of a plaque.

7.1.1 Keep the plastic-encased printed ASTM Copper Strip Corrosion Standards protected from light to avoid the possibility of fading. Inspect for fading by comparing two different plaques, one of which has been carefully protected from light (new). Observe both sets in diffused daylight (or equivalent) first from a point directly above and then from an angle of 45°. When any evidence of fading is observed, particularly at the left-hand end of the plaque, it is suggested that the one that is the more faded with respect to the other be discarded.

7.1.1.1 Alternatively, place a 20-mm (¾-in.) opaque strip (masking tape) across the top of the colored portion of the plaque when initially purchased. At intervals remove the opaque strip and observe. When there is any evidence of fading of the exposed portion, it is suggested that the standards be replaced.

7.1.1.2 These plaques are full-color reproductions of typical strips. They have been printed on aluminum sheets by a 4-color process and are encased in plastic for protection. Directions for their use are given on the reverse side of each plaque.

7.1.2 If the surface of the plastic cover shows excessive scratching it is suggested that the plaque be replaced.

8. Samples

8.1 It is particularly important that all types of fuel samples, which pass a low-tarnish strip classification, be collected in clean, dark glass bottles, plastic bottles, or other suitable containers that will not affect the corrosive properties of the fuel. Avoid the use of tin plate containers for collection of samples, since experience has shown that they may contribute to the corrosiveness of the sample.

8.2 Fill the containers as completely as possible and close them immediately after taking the sample. Take care during sampling to protect the samples from exposure to direct sunlight or even diffused daylight. Make the test as soon as possible after receipt in the laboratory and immediately after opening the container.

8.3 When suspended water (haze) is observed in the sample, dry by filtering a sufficient volume of sample through a medium rapid qualitative filter, into the prescribed clean, dry test tube. Carry out this operation in a darkened room or under a light-protected shield.

8.3.1 Contact of the copper strip with water before, during, or after the completion of the test run, will cause staining, making it difficult to evaluate the strips.

9. Procedure

9.1 Those product classes, to which given procedural variations are intended to be applied, are listed below. Some product classes, being quite broad, may be tested by more than one set of conditions; in such cases the copper strip quality requirement for a given product should be limited to a single set of conditions. The conditions of time and temperature given below are those most commonly used and are quoted in the ASTM specifications for these products where such specifications exist. However, other conditions can also be used as and when required by specifications or by agreement between parties.

9.1.1 *For aviation gasoline, and aviation turbine fuel*—Place 30 mL of sample, completely clear and free of any suspended or entrained water (see 8.3) into a chemically clean, dry 25 by 150-mm test tube, and within 1 min after completing the final preparation (polishing), slide the copper strip into the sample tube. Carefully slide the sample tube into the test bomb (Fig. 1) and screw the lid on tight. Completely immerse the bomb in a boiling water bath at 100 ± 1°C (212 ± 2°F). After 2 h ± 5 min in the bath, withdraw the bomb and immerse for a few minutes in tap water. Open the bomb, withdraw the test tube and examine the strip as described in 9.2.

9.1.2 *For natural gasoline*—Carry out the test exactly as described in 9.1.1 but at 40°C (104°F) and for 3 h ± 5 min.

9.1.3 *For diesel fuel, fuel oil, automotive gasoline*—Place 30 mL of sample, completely clear and free of any suspended or entrained water (see 8.3), into a chemically clean, dry 25 by 150-mm test tube and, within 1 min after completing the final preparation (polishing), slide the copper strip into the sample tube. Stopper with a vented cork and place in a bath maintained at 50 ± 1°C (122 ± 2°F) (see 5.1.1). Protect the contents of the test tube from strong light during the test. After 3 h ± 5 min in the bath, examine the strip as described in 9.2. For tests on fuel oil and diesel fuel, to specifications other than Specifications D 396 and D 975, a temperature of 100°C (212°F) for 3 h is often used as an alternative set of conditions.

9.1.4 *For cleaners (Stoddard) solvent and kerosine*—Carry out the test exactly as described in 9.1.3 but at 100 ± 1°C (212 ± 2°F).

9.1.5 *For lubricating oil*—Tests can be carried out for varying times and at elevated temperatures other than 100°C (212°F). For the sake of uniformity, it is suggested that even increments of 50°F beginning with 250°F (or Celsius equivalents to the nearest whole degree) be used.

9.2 *Strip Examination*:

9.2.1 Empty the contents of the test tube into a 150-mL tall-form beaker, letting the strip slide in gently so as to avoid breaking the beaker. Immediately withdraw the strip with stainless steel forceps and immerse in wash solvent. Withdraw the strip at once, dry with quantitative filter paper (by blotting and not by wiping), and inspect for evidences of tarnishing or corrosion by comparison with the Copper Strip Corrosion Standards. Hold both the test strip and the standard strip plaque in such a manner that light reflected from them at an angle of approximately 45° will be observed.

9.2.2 In handling the test strip during the inspection and comparison, the danger of marking or staining can be avoided if it is inserted in a flat glass tube (see Appendix X1) which can be stoppered with absorbent cotton.

[4] Conforming to Copper Development Assn. (CDA), United States of America No. 110, or to British Standard (BS) 1036: 1952, which have proper quality.

TABLE 1 Copper Strip Classifications

Classification	Designation	Description[A]
Freshly polished strip	...	[B]
1	slight tarnish	a. Light orange, almost the same as freshly polished strip
		b. Dark orange
2	moderate tarnish	a. Claret red
	...	b. Lavender
	...	c. Multicolored with lavender blue or silver, or both, overlaid on claret red
	...	d. Silvery
	...	e. Brassy or gold
3	dark tarnish	a. Magenta overcast on brassy strip
	...	b. Multicolored with red and green showing (peacock), but no gray
4	corrosion	a. Transparent black, dark gray or brown with peacock green barely showing
	...	b. Graphite or lusterless black
	...	c. Glossy or jet black

[A]The ASTM Copper Strip Corrosion Standard is a colored reproduction of strips characteristic of these descriptions.
[B]The freshly polished strip is included in the series only as an indication of the appearance of a properly polished strip before a test run; it is not possible to duplicate this appearance after a test even with a completely noncorrosive sample.

10. Interpretation

10.1 Interpret the corrosiveness of the sample accordingly as the appearance of the test strip agrees with one of the strips of the ASTM Copper Strip Corrosion Standards.

10.1.1 When a strip is in the obvious transition state between that indicated by any two adjacent standard strips, judge the sample by the more tarnished Standard Strip. Should a strip appear to have a darker orange color than Standard Strip 1*b*, consider the observed strip as still belonging in Classification 1; however, if any evidence of red color is observed, the observed strip belongs in Classification 2.

10.1.2 A claret red strip in Classification 2 can be mistaken for a magenta overcast on brassy strip in Classification 3 if the brassy underlay of the latter is completely masked by a magenta overtone. To distinguish, immerse the strip in wash solvent; the former will appear as a dark orange strip while the latter will not change.

10.1.3 To distinguish multicolored strips in Classifications 2 and 3, place a test strip in a 20 by 150-mm test tube and bring to a temperature of 315 to 370°C (600 to 700°F) in 4 to 6 min with the tube lying on a hot plate. Adjust to temperature by observing a high distillation thermometer inserted into a second test tube. If the strip belongs in Classification 2, it will assume the color of a silver and then a gold strip, if in Classification 3 it will take on the appearance of a transparent black, etc., as described in Classification 4.

10.1.4 Repeat the test if blemishes due to finger prints are observed, or due to spots from any particles of water droplets that may have touched the test strip during the digestion period.

10.1.5 Repeat the test also if the sharp edges along the flat faces of the strip appear to be in a classification higher than the greater portion of the strip; in this case it is likely that the edges were burnished during preparation (polishing).

11. Report

11.1 Report the corrosiveness in accordance with one of the classifications listed in Table 1. State the duration of the test and the test temperature.

12. Precision and Bias

12.1 In the case of pass/fail data no generally accepted method for determining precision or bias is currently available.

13. Keywords

13.1 automotive gasoline; aviation gasoline; aviation turbine fuel; copper corrosion; copper strip finish; corrosiveness to copper; natural gasoline

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. COPPER QUALITY

A1.1 Copper Quality

A1.1.1 Hard-temper, cold-finished type-(ETP) electrolytic tough pitch copper.[4]

A2. PRECAUTIONARY STATEMENT

A2.1 Isooctane

Harmful if inhaled. Vapors may cause flash fire.
Keep away from heat, sparks, and open flame.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid build-up of vapors and eliminate all sources of ignition, especially nonexplosion proof electrical apparatus and heaters.
Avoid prolonged breathing of vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated skin contact.

A2.2 Aviation Turbine Fuel (Jet A or A-1, see Specification D 1655)

Keep away from heat, sparks, and open flames.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid breathing vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated contact with skin.

A2.3 Gasoline (Containing Lead)

Keep away from heat, sparks, and open flame.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid build-up of vapors and eliminate all sources of ignition, especially nonexplosion-proof electrical apparatus and heaters.
Avoid prolonged breathing of vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated skin contact.

A2.4 Gasoline (White or Unleaded)

Keep away from heat, sparks, and open flame.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid build-up of vapors and eliminate all sources of ignition, especially nonexplosion-proof electrical apparatus and heaters.
Avoid prolonged breathing of vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated skin contact.

A2.5 Kerosine

Keep away from heat, sparks, and open flame.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid breathing vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated contact with skin.

A2.6 Stoddard Solvent

Keep away from heat, sparks, and open flame.
Keep container closed.
Use with adequate ventilation.
Avoid breathing vapor or spray mist.
Avoid prolonged or repeated contact with skin.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. OPTIONAL USEFUL EQUIPMENT

X1.1 Viewing Tube

X1.1.1 A useful flat glass test tube for holding tarnished copper strips for inspection or for storage for later inspection is illustrated and dimensioned in Fig. X1.1.

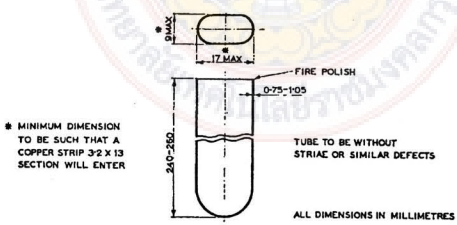


FIG. X1.1 Flat Glass Test Tube

X1.2 Strip Vise

X1.2.1 A useful and convenient vise for holding up to four copper strips during final polishing is illustrated and dimensioned in Fig. X1.2.

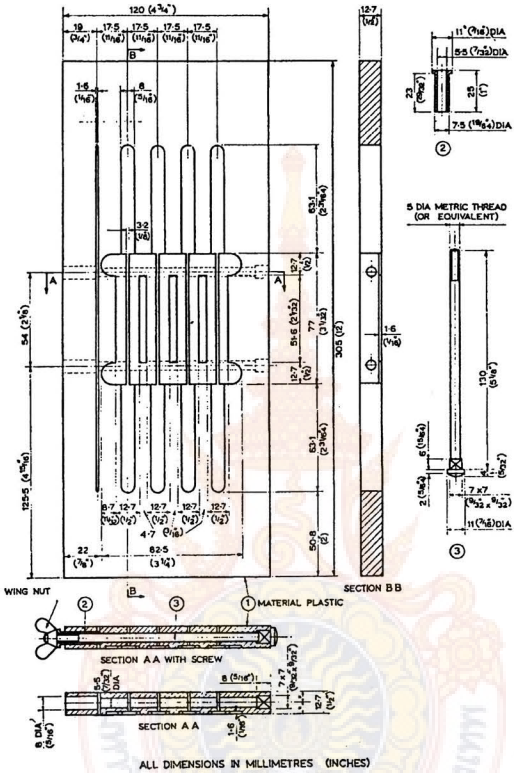


FIG. X1.2 Multistrip Vise

Designation: D 240 – 00

An American National Standard

Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter[1]

This standard is issued under the fixed designation D 240; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been adopted for use by government agencies to replace Method 2502 of Federal Test Method Standard No. 791b.

1. Scope

1.1 This test method[2] covers the determination of the heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels ranging in volatility from that of light distillates to that of residual fuels.

1.2 Under normal conditions, this test method is directly applicable to such fuels as gasolines, kerosines, Nos. 1 and 2 fuel oil, Nos. 1-D and 2-D diesel fuel and Nos. 0-GT, 1-GT, and 2-GT gas turbine fuels.

1.3 This test method is not as repeatable and not as reproducible as Test Method D 4809.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific hazard statements, see Sections 7 and 9 and A1.10 and Annex A3.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 129 Test Method for Sulfur in Petroleum Products (General Bomb Method)[2]

D 1018 Test Method for Hydrogen in Petroleum Fractions[2]

D 3701 Test Method for Hydrogen Content of Aviation Turbine Fuels by Low Resolution Nuclear Magnetic Resonance Spectrometry[3]

D 4809 Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Intermediate Precision Method)[3]

E 1 Specification for ASTM Thermometers[4]

E 200 Practice for Preparation, Standardization, and Storage of Standard Solutions for Chemical Analysis[5]

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *gross heat of combustion, Qg (MJ/kg)*—the quantity of energy released when a unit mass of fuel is burned in a constant volume enclosure, with the products being gaseous, other than water that is condensed to the liquid state.

3.1.1.1 *Discussion*—The fuel can be either liquid or solid, and contain only the elements carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur. The products of combustion, in oxygen, are gaseous carbon dioxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide, and liquid water. In this procedure, 25°C is the initial temperature of the fuel and the oxygen, and the final temperature of the products of combustion.

3.1.2 *net heat of combustion, Qn (MJ/kg)*—the quantity of energy released when a unit mass of fuel is burned at constant pressure, with all of the products, including water, being gaseous.

3.1.2.1 *Discussion*—The fuel can be either liquid or solid, and contain only the elements carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulfur. The products of combustion, in oxygen, are carbon dioxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide, and water, all in the gaseous state. In this procedure, the combustion takes place at a constant pressure of 0.1012 MPa (1 atm), and 25°C is the initial temperature of the fuel and the oxygen, and the final temperature of the products of combustion.

3.1.3 The following relationships may be used for converting to other units (conversion factor is exact only for Btu):

1 cal (International Table calorie) = 4.1868 J
1 Btu (British thermal unit) = 1055.06 J
1 cal (I.T.)/g = 0.0041868 MJ/kg
1 Btu/lb = 0.002326 MJ/kg

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *energy equivalent*—(effective heat capacity or water equivalent) of the calorimeter is the energy required to raise the temperature 1° expressed as MJ/°C.

$$1 \text{ MJ/kg} = 1000 \text{ J/g} \quad (1)$$

In SI the unit of heat of combustion has the dimension J/kg, but for practical use a multiple is more convenient. The MJ/kg is customarily used for the representation of heats of combustion of petroleum fuels.

NOTE 1—The energy unit of measurement employed in this test method

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-2 on Petroleum Products and Lubricants and is the direct responsibility of Subcommittee D02.05 on Properties of Fuels, Petroleum, Coke and Oil Shale.

Current edition approved Dec. 10, 2000. Published January 2001. Originally published as D 240 – 57 T. Last previous edition D 240 – 87 (1997)ε2.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.02.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

[5] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

is the joule with the heat of combustion reported in megajoules per kilogram.

3.3 *Symbols*:

3.3.1 The net heat of combustion is represented by the symbol Q_n and is related to the gross heat of combustion by the following equation:

$$Q_n \text{ (net, 25°C)} = Q_g \text{ (gross, 25°C)} - 0.2122 \times H \quad (2)$$

where:

Q_n (net, 25°C) = net heat of combustion at constant pressure, MJ/kg

Q_g (gross, 25°C) = gross heat of combustion at constant volume, MJ/kg

H = mass % of hydrogen in the sample.[6]

4. Summary of Test Method

4.1 Heat of combustion is determined in this test method by burning a weighed sample in an oxygen bomb calorimeter under controlled conditions. The heat of combustion is computed from temperature observations before, during, and after combustion, with proper allowance for thermochemical and heat transfer corrections. Either isothermal or adiabatic calorimeter jackets can be used.

4.1.1 Temperatures can be measured in Celsius degrees.

4.1.1.1 Temperatures can be recorded in either Fahrenheit degrees or ohms or other units when using electric thermometers. Use the same units in all calculations, including standardization.

4.1.2 Time is expressed in calculations in minutes and decimal fractions thereof. It may be measured in minutes and seconds.

4.1.3 Masses are measured in grams and no buoyancy corrections are applied.

5. Significance and Use

5.1 The heat of combustion is a measure of the energy available from a fuel. A knowledge of this value is essential when considering the thermal efficiency of equipment for producing either power or heat.

5.2 The heat of combustion as determined by this test method is designated as one of the chemical and physical requirements of both commercial and military turbine fuels and aviation gasolines.

5.3 The mass heat of combustion, the heat of combustion per unit mass of fuel, is a critical property of fuels intended for use in weight-limited craft such as airplanes, surface effect vehicles, and hydrofoils. The range of such craft between refueling is a direct function of the heat of combustion and density of the fuel.

6. Apparatus

6.1 *Test Room, Bomb, Calorimeter, Jacket, Thermometers, and Accessories*, as described in Annex A1.

[6] Derivation of equations have been filed at ASTM Headquarters. Request RR: D02-1346.

7. Reagents

7.1 *Benzoic Acid, Standard*[7]—Benzoic acid powder must be compressed into a tablet or pellet before weighing. Benzoic acid pellets for which the heat of combustion has been determined by comparison with the National Bureau of Standards sample are obtainable commercially for those laboratories not equipped to pellet benzoic acid.

7.2 *Gelatin Capsules*.

7.3 *Methyl Orange or Methyl Red Indicator*.

7.4 *Mineral Oil*.

7.5 *Oxygen*—Commerical oxygen produced from liquid air can be used without purification. If purification is necessary see A1.11 (**Warning**—Oxygen vigorously accelerates combustion. See Annex A3.2.).

7.6 *Pressure-Sensitive Tape*—Cellophane tape 38 mm (1½in.) wide, free of chlorine and sulfur.

7.7 *Alkali, Standard Solution*:

7.7.1 *Sodium Hydroxide Solution* (0.0866 mol/l)—Dissolve 3.5 g of sodium hydroxide (NaOH) in water and dilute to 1 L. Standardize with potassium acid phthalate and adjust to 0.0866 mol/l as described in Method E 200 (**Warning**—Corrosive. Can cause severe burns or blindness. Evolution of heat produces a violent reaction or eruption upon too rapid mixture with water. See Annex A3.1.).

7.7.2 *Sodium Carbonate Solution* (0.03625 mol/l)—Dissolve 3.84 g of Na_2CO_3 in water and dilute to 1 L. Standardize with potassium acid phthalate and adjust to 0.03625 mol/l as described in Practice E 200.

7.8 *2,2,4-Trimethylpentane* (*iso*octane), *Standard*[8]—(**Warning**—Extremely flammable. Harmful if inhaled. Vapors may cause flash fire. See Annex A3.3.).

8. Standardization

8.1 *Determine the Energy Equivalent of the Calorimeter*—Average not less than six tests using standard benzoic acid.[9] These tests should be spaced over a period of not less than three days. Use not less than 0.9 g nor more than 1.1 g of standard benzoic acid (C_6H_6COOH). Make each determination according to the procedure described in Section 9 and compute the corrected temperature rise, t, as described in 10.1 or 10.2. Determine the corrections for nitric acid (HNO_3) and firing wire as described in 10.3 and substitute in the following equation:

$$W = (Q \times g + e_1 + e_2)/t \quad (3)$$

where:

W = energy equivalent of calorimeter, MJ/°C,

Q = heat of combustion of standard benzoic acid, MJ/g, calculated from the certified value,

g = weight of standard benzoic acid sample, g,

[7] Obtainable from the National Institute of Standards Technology, Gaithersburg, MD 20899 as standard sample No. 39.

[8] Obtainable from the National Institute of Standards Technology, Gaithersburg, MD 20899 as standard sample No. 217b.

[9] See Jessup, R. S., "Precise Measurement of Heat of Combustion with a Bomb Calorimeter," *NBS Monograph 7*, U. S. Government Printing Office.

t = corrected temperature rise, as calculated in 10.1 or 10.2,° C,
e_1 = correction for heat of formation of nitric acid, MJ, and
e_2 = correction for heat of combustion of firing wire, MJ.

8.1.1 Repeat the standardization tests after changing any part of the calorimeter and occasionally as a check on both calorimeter and operating technique.

8.2 *Checking the Calorimeter for Use with Volatile Fuels*—Use *2,2,4-trimethylpentane* to determine whether the results obtained agree with the certified value (47.788 MJ/kg, weight in air) within the repeatability of the test method. If results do not come within this range, the technique of handling the sample may have to be changed (Annex A1.8). If this is not possible or does not correct the error, run a series of tests using *2,2,4-trimethylpentane* to establish the energy equivalent for use with volatile fuels.

8.3 *Heat of Combustion of Pressure-Sensitive Tape or Gelatin/Mineral Oil*—Determine the heat of combustion of either the pressure-sensitive tape or 0.5 g gelatin capsule/mineral oil in accordance with Section 9 using about 1.2 g of tape or 0.5 g gelatin capsule/mineral oil and omitting the sample. Make at least three determinations and calculate the heat of combustion as follows:

$$Q_{pst} = (\Delta t \times W - e_1)/1000\,a \quad (4)$$

where:
Q_{pst} = heat of combustion of the pressure-sensitive tape or mineral oil, MJ/kg,
Δt = corrected temperature rise, as calculated in accordance with 10.1 or 10.2,° C,
W = energy equivalent of the calorimeter, MJ/°C,
e_1 = correction for the heat of formation of HNO_3, MJ, and
a = mass of the pressure-sensitive tape or gelatin capsule/mineral oil, g.

Average the determinations, and redetermine the heat of combustion of the tape or gelatin capsule/mineral oil whenever a new roll or batch is started.

9. Procedure

9.1 *Weight of Sample*—Control the weight of sample (including any auxiliary fuel) so that the temperature rise produced by its combustion will be equal to that of 0.9 to 1.1 g of benzoic acid (Note 2). Weigh the sample to the nearest 0.1 mg.

NOTE 2—If the approximate heat of combustion of the sample is known, the required weight can be estimated as follows:

$$g = 26.454/Q_s \quad (5)$$

where:
g = mass of sample, g, and
Q_s = MJ/kg.

Some fuels contain water and particulate matter (ash) that will degrade calorimetric values. If the heat of combustion is required on a clean fuel, filter the sample to remove free water and insoluble ash before testing.

9.1.1 For highly volatile fluids, reduce loss with use of tape[10] or gelatin capsule mineral oil.

9.1.2 *Tape*—Place a piece of pressure-sensitive tape across the top of the cup, trim around the edge with a razor blade, and seal tightly. Place 3 by 12-mm strip of tape creased in the middle and sealed by one edge in the center of the tape disk to give a flap arrangement. Weigh the cup and tape. Remove from the balance with forceps. Fill a hypodermic syringe with the sample. The volume of sample can be estimated as follows:

$$V = (W \times 0.00032)/(Q \times D) \quad (6)$$

where:
V = volume of sample to be used, mL,
W = energy equivalent of calorimeter, J/°C,
Q = approximate heat of combustion of the sample, MJ/kg, and
D = density, kg/m^3, of the sample.

9.1.2.1 Add the sample to the cup by inserting the tip of the needle through the tape disk at a point so that the flap of tape will cover the puncture upon removal of the needle. Seal down the flap by pressing lightly with a metal spatula. Reweigh the cup with the tape and sample. Take care throughout the weighing and filling operation to avoid contacting the tape or cup with bare fingers. Place the cup in the curved electrode and arrange the fuse wire so that the central portion of the loop presses down on the center of the tape disk.

9.1.3 *Gelatin/Mineral Oil*—Weigh the cup and gelatin capsule. The capsule should only be handled with forceps. Add the sample to the capsule. Reweigh the cup with capsule and sample. If poor combustion is expected with the capsule, add several drops of mineral oil on the capsule and reweigh the cup and contents. Place the cup in the curved electrode and arrange the fuse wire so that the central portion of the loop contacts the capsule and oil.

9.2 *Water in Bomb*—Add 1.0 mL of water to the bomb from a pipet.

9.3 *Oxygen*—With the test sample and fuse in place, slowly charge the bomb with oxygen to 3.0-MPa (30-atm) gage pressure at room temperature (9.3.1). Do *not* purge the bomb to remove entrapped air (**Warning**—Be careful not to overcharge the bomb. If, by accident, the oxygen introduced into the bomb should exceed 4.0 MPa, *do not* proceed with the combustion. An explosion might occur with possible violent rupture of the bomb. Detach the filling connection and exhaust the bomb in the usual manner. Discard the sample, unless it has lost no weight, as shown by reweighing.).

9.3.1 Lower or higher initial oxygen pressures can be used within the range from 2.5 to 3.5 MPa, provided the same pressure is used for all tests, including standardization.

9.4 *Calorimeter Water*—Adjust the calorimeter water temperature before weighing as follows:

Isothermal jacket method	1.6 to 2.0°C below jacket temperature
Adiabatic jacket method	1.0 to 1.4°C below room temperature.

[10] Acceptable procedures for handling volatile liquids include those described in the reports referenced at the end of this test method. References (1-6) describe glass sample holders: (7) describes a metal sample holder: (8) describes a gelatin sample holder.

This initial adjustment will ensure a final temperature slightly above that of the jacket for calorimeters having an energy equivalent of approximately 10.2 kJ/°C. Some operators prefer a lower initial temperature so that the final temperature is slightly below that of the jacket. This procedure is acceptable, provided it is used in all tests, including standardization.

9.4.1 Use the same amount (±0.5 g) of distilled or deionized water in the calorimeter vessel for each test. The amount of water (2000 g is usual) can be most satisfactorily determined by weighing the calorimeter vessel and water together on a balance. The water can be measured volumetrically if it is measured always at the same temperature.

9.5 *Observations, Isothermal Jacket Method*—Assemble the calorimeter in the jacket and start the stirrer. Allow 5 min for attainment of equilibrium, then record the calorimeter temperatures (Note 3) at 1-min intervals for 5 min. Fire the charge at the start of the sixth minute and record the time and temperature, t_a. Add to this temperature 60 % of the expected temperature rise, and record the time at which the 60 % point is reached (Note 4). After the rapid rise period (about 4 to 5 min), record temperatures at 1-min intervals on the minute until the *difference* between successive readings has been constant for 5 min.

NOTE 3—Use a magnifier and estimate all readings (except those during the rapid rise period) to the nearest 0.002°C when using ASTM Bomb Calorimeter Thermometer 56C. Estimate Beckmann thermometer readings to the nearest 0.001°C and 25-Ω resistance thermometer readings to the nearest 0.0001 Ω. Tap mercurial thermometers with a pencil just before reading to avoid errors caused by mercury sticking to the walls of the capillary.

NOTE 4—When the approximate expected rise is unknown, the time at which the temperature reaches 60 % of the total can be determined by recording temperatures at 45, 60, 75, 90, and 105 s after firing and interpolating.

9.6 *Observations, Adiabatic Jacket Method* (Note 5)—Assemble the calorimeter in the jacket and start the stirrers. Adjust the jacket temperature to be equal to or slightly lower than the calorimeter, and run for 5 min to obtain equilibrium. Adjust the jacket temperature to match the calorimeter within ±0.01°C and hold for 3 min. Record the initial temperature and fire the charge. Adjust the jacket temperature to match that of the calorimeter during the period of rise, keeping the two temperatures as nearly equal as possible during the rapid rise, and adjusting to within ±0.01°C when approaching the final equilibrium temperature. Take calorimeter readings at 1-min intervals until the *same* temperature is observed in three successive readings. Record this as the final temperature. Time intervals are not recorded as they are not critical in the adiabatic method.

NOTE 5—These instructions supersede the instructions given in 9.5 when using jackets equipped for adiabatic temperature control.

9.7 *Analysis of Bomb Contents*—Remove the bomb and release the pressure at a uniform rate such that the operation will require not less than 1 min. Examine the bomb interior for evidence of incomplete combustion. Discard the test if unburned sample or sooty deposits are found.

9.7.1 Wash the interior of the bomb, including the electrodes and sample holder, with a fine jet of water and quantitatively collect the washings in a beaker. Use a minimum of wash water, preferably less than 350 mL. Titrate the washings with standard alkali solution, using methyl orange or methyl red indicator.

9.7.2 Remove and measure the combined pieces of unburned firing wire, and subtract from the original length. Record the difference as *wire consumed.*

9.7.3 Determine the sulfur content of the sample if it exceeds 0.1 %. Determine sulfur by analyzing the bomb washings remaining after the acid titration, using the procedure described in Test Method D 129.

10. Calculation

10.1 *Temperature Rise in Isothermal Jacket Calorimeter*—Using data obtained as prescribed in 9.5, compute the temperature rise, t, in an isothermal jacket calorimeter as follows:

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (7)$$

where:

t = corrected temperature rise,
a = time of firing,
b = time (to nearest 0.1 min) when the temperature rise reaches 60 % of total,
c = time at beginning of period in which the rate of temperature change with time has become constant (after combustion),
t_a = temperature at time of firing, corrected for thermometer error (10.1.1),
t_c = temperature at time, c, corrected for thermometer error (10.1.1),
r_1 = rate (temperature units per minute) at which temperature was rising during 5-min period before firing, and
r_2 = rate (temperature units per minute) at which temperature was rising during the 5-min period after time c. If the temperature is falling, r_2 is negative and the quantity $-r_2(c - b)$ *is positive.*

10.1.1 All mercury-in-glass thermometers shall be corrected for scale error, using data from the thermometer certificate prescribed in Annex A1, A1.5.1, or A1.5.2. Beckmann thermometers also require a setting correction and an emergent stem correction (Annex A2, A2.1.2). Solid-stem ASTM Thermometers 56F and 56C do not require emergent stem corrections if all tests, including standardization are performed within the same 5.5°C interval. If operating temperatures exceed this limit, apply a differential emergent stem correction (Annex A2, A2.1.1) to the correct temperature rise, t, in all tests, including standardization.

10.2 *Temperature Rise in Adiabatic Jacket Calorimeter*—Using data obtained as prescribed in 9.6, compute the temperature rise, t, in an adiabatic jacket calorimeter as follows:

$$t = t_f - t_a \quad (8)$$

where:

t = corrected temperature rise,
t_a = temperature when charge was fired, corrected for thermometer error (10.1.1), and
t_f = final equilibrium temperature, corrected for the thermometer error (10.1.1).

10.3 *Thermochemical Corrections* (Annex A2)—Compute the following for each test:

e_1 = correction for heat of formation of nitric acid (HNO_3), MJ = cm^3 of standard (0.0866 *N*) NaOH solution used in titration × $5/10^6$, (9)

e_2 = correction for heat of formation of sulfuric acid (H_2SO_4). MJ = 58.6 × percentage of sulfur in sample × mass of sample/10^6, (10)

e_3 = correction for heat of combustion of firing wire, MJ, (11)

= 1.13 × millimetres of iron wire consumed/10^6,

= 0.96 × millimetres of Chromel C wire consumed/10^6, and

e_4 = correction for heat of combustion of pressure-sensitive tape or gelatin capsule and mineral oil, MJ = mass of tape or capsule oil, *g* × heat of combustion of tape or capsule/oil, MJ/kg/10^6. (12)

10.4 *Gross Heat of Combustion*—Compute the gross heat of combustion by substituting in the following equation:

$$Q_g = (tW - e_1 - e_2 - e_3 - e_4)/1000\,g \quad (9)$$

where:

Q_g = gross heat of combustion, at constant volume expressed as MJ/kg,

t = corrected temperature rise (10.1 or 10.2), °C,

W = energy equivalent of calorimeter, MJ/°C (8.1),

e_1, e_2, e_3, e_4 = corrections as prescribed in 10.3, and

g = weight of sample, g.

NOTE 6—The gross heat of combustion at constant pressure may be calculated as follows:

$$Q_{gp} = Q_g + 0.006145H \quad (10)$$

where:

Q_{gp} = gross heat of combustion at constant pressure, MJ/kg, and

H = hydrogen content, mass %.

10.5 *Net Heat of Combustion*:

10.5.1 If the percentage of hydrogen, *H*, in the sample is known, the net heat of combustion may be calculated as follows:

$$Q_n = Q_g - 0.2122 \times H \quad (11)$$

where:

Q_n = net heat of combustion at constant pressure, MJ/kg,

Q_g = gross heat of combustion at constant volume, MJ/kg, and

H = mass percent of hydrogen in the sample.

When the percentage of hydrogen is not known, determine the hydrogen in accordance with Test Methods D 1018 or D 3701.

10.5.2 If the percentage of hydrogen in aviation gasoline and turbine fuel samples is not known, the net heat of combustion may be calculated as follows:[11]

$$Q_n = 10.025 + (0.7195)Q_g \quad (12)$$

where:

Q_n = net heat of combustion at constant pressure, MJ/kg,

Q_g = gross heat of combustion at constant volume, MJ/kg.

11. Report

11.1 Net heat of combustion is the quantity required in practical applications. The net heat should be reported to the nearest 0.005 MJ/kg.

NOTE 7—Usually the gross heat of combustion is reported for fuel oils in preference to net heat of combustion to the nearest 0.005 MJ/kg.

11.2 To obtain the gross or net heat of combustion in cal (I.T.)/g or Btu/lb divide by the appropriate factor reporting to the nearest 0.5 cal/g or 1 Btu/lb.

$$Q_{Btu}/\text{lb} = (Q, \text{MJ/kg})/0.002326 \quad (13)$$

$$Q_{cal}/\text{g} = (Q, \text{MJ/kg})/0.0041868 \quad (14)$$

12. Precision and Bias [12]

12.1 *Precision*—The precision of this test method as obtained by statistical examination of interlaboratory test results is as follows:

12.1.1 *Repeatability*—The difference between successive test results obtained by the same operator with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the values shown in the following table only in one case in twenty.

Repeatability	0.13 MJ/kg

12.1.2 *Reproducibility*—The difference between two single and independent results, obtained by different operators working in different laboratories on identical test material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the values shown in the following table only in one case in twenty.

Reproducibility	0.40 MJ/kg

12.2 *Bias*—No general statement is made on bias for the standard since comparison with accepted reference materials (covering the range of values expected when the method is used) is not available.

13. Keywords

13.1 bomb calorimeter methods; gross heat of combustion; heat of combustion; heating tests; net heat of combustion

[11] Equation 16 is recommended only if the percentage of hydrogen is not known. It is based in Eq 15 and an empirical relation between Q_n and the percentage of hydrogen in aviation gasolines and turbine fuels, developed from data by R. S. Jessup and C. S. Cragos, "Net Heat of Combustion of AN-F-28 Aviation Gasolines," Nat. Advisory Committee for Aeronautics, *Technical Note No. 996*, June 1945, and Joseph A. Cogliano and Ralph S. Jessup, "Relation Between Net Heat of Combustion and Aniline-Gravity Product of Aircraft Fuels," Nat. Institute of Standards Technology *Report 2348*, March 1953.

[12] The summary of cooperative test data from which these repeatability and reproducibility values were calculated was published for information as Appendix XII to the 1957 Report of Committee D-2 on Petroleum Products and Lubricants. The summary of test data was also published from 1958 to 1966, inclusive, as Appendix III to ASTM Method D 240. The data are now filed at ASTM Headquarters as Research Report No. RR D-2-38.

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. APPARATUS FOR HEAT OF COMBUSTION TEST

A1.1 *Test Room*—The room in which the calorimeter is operated must be free from drafts and not subject to sudden temperature changes. The direct rays of the sun shall not strike the jacket or thermometers. Adequate facilities for lighting, heating, and ventilating shall be provided. Thermostatic control of room temperature, and controlled relative humidity are desirable.

A1.2 *Oxygen Bomb*—The oxygen bomb is to have an internal volume of 350± 50 mL. All parts are to be constructed of materials which are not affected by the combustion process or products sufficiently to introduce measurable heat input or alteration of end products. If the bomb is lined with platinum or gold, all openings shall be sealed to prevent combustion products from reaching the base metal. The bomb must be designed so that all liquid combustion products can be completely recovered by washing the inner surfaces. There must be no gas leakage during a test. The bomb must be capable of withstanding a hydrostatic pressure test to a gage pressure of 3000 psi (20 MPa) at room temperature, without stressing any part beyond its elastic limit.[10]

A1.3 *Calorimeter*—The calorimeter (Note A1.1) vessel shall be made of metal (preferably copper or brass) with a tarnish-resistant coating, and with all outer surfaces highly polished. Its size shall be such that the bomb will be completely immersed in water when the calorimeter is assembled. It shall have a device for stirring the water thoroughly and at a uniform rate, but with minimum heat input. Continuous stirring for 10 min shall not raise the calorimeter temperature more than 0.01°C starting with identical temperatures in the calorimeter, room, and jacket. The immersed portion of the stirrer shall be coupled to the outside through a material of low heat conductivity.

NOTE A1.1—As used in this test method, the term *calorimeter* designates the bomb, the vessel with stirrer, and the water in which the bomb is immersed.

A1.4 *Jacket*—The calorimeter shall be completely enclosed within a stirred water jacket and supported so that its sides, top, and bottom are approximately 10 mm from the jacket wall. The jacket can be arranged so as to remain at substantially constant temperature, or with provision for rapidly adjusting the jacket temperature to equal that of the calorimeter for adiabatic operation. It must be constructed so that any water evaporating from the jacket will not condense on the calorimeter.[13]

A1.4.1 A double-walled jacket with a dead-air insulation space may be substituted for the constant-temperature water jacket if the calorimeter is operated in a constant-temperature (±2°F) (±1°C) room. The same ambient conditions must be maintained for all experiments, including standardization.

A1.5 *Thermometers*—Temperatures in the calorimeter and jacket shall be measured with the following thermometers or combinations thereof:

A1.5.1 *Etched Stem, Mercury-in-Glass, ASTM Bomb Calorimeter Thermometer* having a range from 66 to 95°F or 19 to 35°C, 18.9 to 25.1°C, or 23.9 to 30.1°C, as specified, and conforming to the requirements for Thermometer 56F, 56C, 116C, or 117C, respectively, as prescribed in Specification E 1. Each of these thermometers shall have been tested for accuracy at intervals no larger than 2.5°F or 2.0°C over the entire graduated scale. Corrections shall be reported to 0.005°F or 0.002°C, respectively, for each test point.

A1.5.2 *Beckmann Differential Thermometer*, range 6°C reading upward as specified and conforming to the requirements for Thermometer 115C as prescribed in Specification E 1. Each of these thermometers shall be tested for accuracy at intervals no larger than 1°C over the entire graduated scale and corrections reported to 0.001°C for each test point.

A1.5.3 *Calorimetric Type Platinum Resistance Thermometer*, 25·Ω.

A1.6 *Thermometer Accessories*—A magnifier is required for reading mercury-in-glass thermometers to one tenth of the smallest scale division. This shall have a lens and holder designed so as not to introduce significant errors due to parallax.

A1.6.1 A Wheatstone bridge and galvanometer capable of measuring resistance of 0.0001 Ω are necessary for use with resistance thermometers.

A1.7 *Timing Device*—A watch or other timing device capable of measuring time to 1 s is required for use with the isothermal jacket calorimeter.

A1.8 *Sample Holder*—Nonvolatile samples shall be burned in an open crucible of platinum (preferred), quartz or acceptable base metal alloy. Base metal alloy crucibles are acceptable if after a few preliminary firings the weight does not change significantly between tests.

A1.9 *Firing Wire*—Use a 100-mm length of No. 34 B & S gage iron wire or Chromel C resistance wire. Shorter lengths may be used if the same length is employed in all tests, including standardization tests. Platinum wire may be used if the ignition energy is small and reproducible.

A1.10 *Firing Circuit*—A 6 to 16-V alternating or direct

[13] The sole source of supply of the apparatus known to the committee at this time is Parr Instrument Co., 211 Fifty-Third St., Moline, IL 61265. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee,[1] which you may attend.

current is required for ignition purposes with an ammeter or pilot light in the circuit to indicate when current is flowing. A step-down transformer connected to a 115-V 50/60 Hz lighting circuit of storage batteries can be used (**Warning**—The ignition circuit switch shall be of the momentary contact type, normally open, except when held closed by the operator.).

A1.11 *Oxygen Purifying Device*—Commercial oxygen produced from liquid air can generally be used without purification. Oxygen prepared by electrolysis of water should not be used without purification, as it can contain enough hydrogen to affect results by 1 % or more. Combustible impurities can be removed from oxygen by passing it over copper oxide (CuO) at about 500°C.

A2. CORRECTIONS

A2.1 Thermometer Corrections[14]

A2.1.1 The differential emergent stem correction for solid stem calorimetric thermometers (56F and 56C) may be computed from the following equation:

$$\text{Differential stem correction} = K(t_c - t_a)(t_a + t_c - L - T) \quad \text{(A2.1)}$$

where:

K = differential expansion coefficient of mercury in glass = 0.00016 for Celsius thermometers or 0.00009 for Fahrenheit thermometers.
L = scale reading to which the thermometer was immersed,
T = mean temperature of emergent stem,
t_a = initial temperature reading, and
t_c = final temperature reading.

A2.1.2 Differential emergent stem correction for a Beckman thermometer immersed to the zero of the scale may be computed as follows:

$$\text{Differential stem correction} = K(t_c - t_a)(S + t_c + t_a - T) \quad \text{(A2.2)}$$

where:

S = setting (temperature at zero reading) of the thermometer.

K, T, t_c and t_a as defined in A2.1.1.

A2.1.3 Setting correction for a Beckmann thermometer may be computed as follows:

$$\text{Setting correction} = \text{factor} \times (t_c - t_a) \quad \text{(A2.3)}$$

where:

Factor is obtained from Table A2.1 and
t_c and t_a as defined in A2.1.1.

TABLE A2.1 Correction Factors

Setting	Factor
15	−0.0015
20	0.0000
25	+0.0015
30	+0.0029
35	+0.0043
40	+0.0056

A2.2 Thermochemical Corrections

A2.2.1 *Heat of Formation of Nitric Acid*—A correction of 5 J is applied for each cubic centimetre of standard (0.0866 mol/l) NaOH solution used in the acid titration. This is based on the assumption that (1) all of the acid titrated is HNO_3 and (2) the heat of formation of 0.1 *M* HNO_3 under the test conditions is 57.8 kJ/mole. When H_2SO_4 is also present, part of the correction for H_2SO_4 is contained in the e_1 correction, and the remainder in the e_2 correction.

A2.2.2 *Heat of Formation of Sulfuric Acid*—A correction of 5.80 kJ is applied to each gram of sulfur in the sample. This is based upon the heat of formation of 0.17 *M* H_2SO_4, which is − 301.4 kJ/mole. But, a correction equal to 2 × 57.8 kJ/mole of sulfur was applied for H_2SO_4 in the e_1 correction. Thus, the additional correction necessary is:

$$301.4 - (2 \times 57.8) = 185.8 \text{ kJ/mole or } 5.80 \text{ kJ/g of sulfur} \quad \text{(A2.4)}$$

A2.2.2.1 The value of 5.80 kJ/g of sulfur is based on a fuel oil containing a relatively large amount of sulfur since as the percentage of sulfur decreases, the correction decreases and consequently a larger error can be tolerated. For this calculation 0.8 % S, 99.2 % CH_2 was taken as the empirical composition of fuel oil. If a 0.6-g sample of such a fuel oil is burned in a bomb containing 1 cm^3 of water, the H_2SO_4 formed will be approximately 0.17 *N*.

A2.2.2.2 Using data from National Institute of Standards Technology *Circular No. 500*, the heat of reaction $SO_2(g) + ½O_2(g) + 651\ H_2O\ (l) - H_2SO_4 \cdot 650\ H_2O\ (l)$ at constant volume and 3 MPa is − 301.4 kJ/mole.

A2.2.3 *Heat of Combustion of Fuse Wire*—The following heats of combustion are accepted:

Iron wire, No. 34 B & S gage	=	1.13 J/mm
Chromel C wire No. 34 B & S gage	=	0.96 J/mm

A2.2.4 *Heat of Combustion of Pressure-Sensitive Tape*—The correction for the heat of combustion of the tape (as determined in accordance with 8.3) assumes complete combustion of the tape.

[14] For a complete discussion of those corrections see the American Institute of Physics Symposium, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Reishold Publishing Corp., New York, NY 1941.

A3. PRECAUTIONARY STATEMENTS

A3.1 Sodium Hydroxide

Warning—Corrosive. Can cause severe burns or blindness. Evolution of heat produces a violent reaction or eruption upon too rapid mixture with water.

Before using, secure information on procedures and protective measures for safe handling.

Do not get in eyes, on skin, on clothing.

Avoid breathing dusts or mists.

Do not take internally.

When handling, use chemical safety goggles or face shield, protective gloves, boots and clothing.

When mixing with water, add slowly to surface of solution to avoid violent spattering. In the preparation of solutions do not use hot water, limit temperature rise, with agitation, to 10°C/min or limit solution temperature to a maximum of 90°C. No single addition should cause a concentration increase greater than 5 %.

A3.2 Oxygen

Warning—Oxygen vigorously accelerates combustion.

Do not exceed the sample size limits.

Do not use oil or grease on regulators, gages, or control equipment.

Use only with equipment conditioned for oxygen service by carefully cleaning to remove oil, grease, and other combustibles.

Keep combustibles away from oxygen and eliminate ignition sources.

Keep surfaces clean to prevent ignition or explosion, or both, on contact with oxygen.

Always use a pressure regulator. Release regulator tension before opening cylinder valve.

All equipment and containers used must be suitable and recommended for oxygen service.

Never attempt to transfer oxygen from cylinder in which it is received to any other cylinder.

Do not mix gases in cylinders.

Do not drop cylinder. Make sure cylinder is secured at all times.

Keep cylinder valve closed when not in use.

Stand away from outlet when opening cylinder valve.

Keep cylinder out of sun and away from heat.

Keep cylinder from corrosive environment.

Do not use cylinder without label.

Do not use dented or damaged cylinders.

For technical use only. Do not use for inhalation purposes.

Use only in well-ventilated area.

See compressed gas association booklets G-4 and G-4.1 for details of safe practice in the use of oxygen.

A3.3 2,2,4-Trimethylpentane

Warning—Extremely flammable. Harmful if inhaled.

Vapors may cause flash fire.

Keep away from heat, sparks, and open flame.

Keep container closed.

Use with adequate ventilation.

Avoid buildup of vapors and eliminate all sources of ignition, especially nonexplosion-proof electrical apparatus and heaters.

Avoid prolonged breathing of vapor or spray mist.

Avoid prolonged or repeated skin contact.

REFERENCES

(1) Gross, M. E., Gutherie, G. B., Hubbard, W. N., Katz, C., McCullough, J. P., Waddington, G., and Williamson, K. D.," Thermodynamic Properties of Furan," *Journal*, Am. Chemical Soc., Vol 74, No. 18, Sept. 23, 1952, pp. 4662–4669.

(2) Jessup, R. S., "Heats of Combustion of the Liquid Normal Paraffin Hydrocarbons from Hexane to Dodecane," *Journal of Research*, Nat. Bureau Standards, Vol 18, No. 12, February 1937, pp. 115–128.

(3) Prosen, E. J. R., and Rossini, F. D., "Heats of Isomerization of the Five Hexanes," *Journal of Research*, Nat. Bureau Standards, Vol 27, No. 3, September 1941, pp. 289–310. (Research Paper *RP 1420*).

(4) Barry, F., and Richards, T. W., "Heat of Combustion of Aromatic Hydrocarbons and Hexamethylene," *Journal*, Am. Chemical Soc., Vol 37, No. 5, May 1915, pp. 993–1020.

(5) Coops, J., and Verkade, P. E., "A New Method for the Determination of the Heats of Combustion of Volatile Substances in the Calorimetric Bomb," *Recueil traveus chimique*, Vol 45, 1926, pp. 545–551.

(6) Hubbard, W. N., Huffman, H. M., Knowlton, J. W., Oliver, G. D., Scott, D. W., Smith, J. C., Todd, S. S., and Waddington G., "Thermodynamic Properties of Thiophene," *Journal*, Am. Chemical Soc., Vol 71, No. 3, March 1949, pp. 797–808.

(7) LeTourneau, R. L., and Matteson, R.," Measurement of Heat of Combustion of Volatile Hydrocarbons," *Analytical Chemistry*, Vol 20, No. 7, July 1948, pp. 663–664.

(8) Dean, E. W., Fisher, N. E., and Williams, A. A., "Operating Procedure for Determining the Heat of Combustion of Gasoline," *Industrial and Engineering Chemistry*, Analytical Edition, Vol 16, No. 3, March 1944, pp. 182–184.

(9) Prosen, E. J., and Rossini, F. D., "Heats of Combustion of Eight Normal Paraffin Hydrocarbons in the Liquid State," *Journal of Research*, Nat. Bureau of Standards, Vol 33, No. 4, October 1944, pp. 255–272. (Research Paper *RP 1607*).

D 240

Designation: D 445 – 01

An American National Standard
British Standard 2000: Part 71:1990

Designation: 71/1/97

Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity)[1]

This standard is issued under the fixed designation D 445; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved by the sponsoring committee and accepted by the Cooperating Societies in accordance with established procedures.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method specifies a procedure for the determination of the kinematic viscosity, ν, of liquid petroleum products, both transparent and opaque, by measuring the time for a volume of liquid to flow under gravity through a calibrated glass capillary viscometer. The dynamic viscosity, η, can be obtained by multiplying the kinematic viscosity, ν, by the density, ρ, of the liquid.

NOTE 1—For the measurement of the kinematic viscosity and viscosity of bitumens, see also Test Methods D 2170 and D 2171.

1.2 The result obtained from this test method is dependent upon the behavior of the sample and is intended for application to liquids for which primarily the shear stress and shear rates are proportional (Newtonian flow behavior). If, however, the viscosity varies significantly with the rate of shear, different results may be obtained from viscometers of different capillary diameters. The procedure and precision values for residual fuel oils, which under some conditions exhibit non-Newtonian behavior, have been included.

1.3 The range of kinematic viscosities covered by this test method is from 0.2 to 300 000 mm^2/s (see Table A1.1) at all temperatures (see 6.3 and 6.4). The precision has only been determined for those materials, kinematic viscosity ranges and temperatures as shown in the footnotes to the precision section.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 446 Specifications and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers[2]

D 1193 Specification for Reagent Water[3]

D 1217 Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer[2]

D 1480 Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Viscous Materials by Bingham Pycnometer[2]

D 1481 Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Viscous Materials by Lipkin Bicapillary Pycnometer[2]

D 2170 Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)[4]

D 2171 Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer[4]

D 6074 Guide for Characterizing Hydrocarbon Lubricant Base Oils[5]

E 1 Specification for ASTM Thermometers[6]

E 77 Test Method for the Inspection and Verification of Thermometers[6]

2.2 *ISO Standards:*[7]

ISO Guide 25—General Requirements for the Calibration and Testing Laboratories

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D02 on Petroleum Products and Lubricants and is the direct responsibility of Subcommittee D02.07 on Flow Properties.

Current edition approved Jan. 10, 2001. Published March 2001. Originally published as D 445 – 37T. Last previous edition D 445 – 97.

In the IP, this test method is under the jurisdiction of the Standardization Committee.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

[5] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.03.

[6] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

[7] Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

ISO 3104 Petroleum Products—Transparent and Opaque Liquids—Determination of Kinematic Viscosity and Calculation of Dynamic Viscosity
ISO 3105 Glass Capillary Kinematic Viscometers—Specification and Operating Instructions
ISO 3696 Water for Analytical Laboratory Use—Specification and Test Methods
ISO 9000 Quality Management and Quality Assurance Standards—Guidelines for Selection and Use

3. Terminology

3.1 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.1.1 *automated viscometer, n*—apparatus which, in part or in whole, has mechanized one or more of the procedural steps indicated in 10 or 11 without changing the principle or technique of the basic manual apparatus. The essential elements of the apparatus in respect to dimensions, design and operational characteristics are not changed. The measured result from the apparatus does not require correction to bring it into correlation with the basic manual apparatus. The precision of the apparatus shall be of statistical equivalence to, or better (has less variability) than the manual apparatus.

3.1.1.1 *Discussion*—Automated viscometers have the capability to mimic some operation of the test method while reducing or removing the need for manual intervention or interpretation. Apparatus which determine kinematic viscosity by physical techniques that are different than those used in this test method are not considered to be Automated Viscometers.

3.1.2 *density, n*—the mass per unit volume of a substance at a given temperature.

3.1.3 *dynamic viscosity, n*—the ratio between the applied shear stress and rate of shear of a liquid.

3.1.3.1 *Discussion*—It is sometimes called the coefficient of dynamic viscosity or, simply, viscosity. Thus dynamic viscosity is a measure of the resistance to flow or deformation of a liquid.

3.1.3.2 *Discussion*—The term dynamic viscosity can also be used in a different context to denote a frequency-dependent quantity in which shear stress and shear rate have a sinusodial time dependence.

3.1.4 *kinematic viscosity, n*—the resistance to flow of a fluid under gravity.

3.1.4.1 *Discussion*—For gravity flow under a given hydrostatic head, the pressure head of a liquid is proportional to its density, ρ. For any particular viscometer, the time of flow of a fixed volume of fluid is directly proportional to its kinematic viscosity, ν, where $\nu = \eta/\rho$, and η is the dynamic viscosity coefficient.

4. Summary of Test Method

4.1 The time is measured for a fixed volume of liquid to flow under gravity through the capillary of a calibrated viscometer under a reproducible driving head and at a closely controlled and known temperature. The kinematic viscosity is the product of the measured flow time and the calibration constant of the viscometer.

5. Significance and Use

5.1 Many petroleum products, and some non-petroleum materials, are used as lubricants, and the correct operation of the equipment depends upon the appropriate viscosity of the liquid being used. In addition, the viscosity of many petroleum fuels is important for the estimation of optimum storage, handling, and operational conditions. Thus, the accurate determination of viscosity is essential to many product specifications.

6. Apparatus

6.1 *Viscometers*—Use only calibrated viscometers of the glass capillary type, capable of being used to determine kinematic viscosity within the limits of the precision given in the precision section.

6.1.1 Viscometers listed in Table A1.1, whose specifications meet those given in Specifications D 446 and in ISO 3105 meet these requirements. It is not intended to restrict this test method to the use of only those viscometers listed in Table A1.1. Annex A1 gives further guidance.

6.1.2 *Automation Viscometers*—Automated apparatus may be used as long as they mimic the physical conditions, operations or processes of the manual apparatus they replace. Any viscometer, temperature measuring device, temperature control, temperature controlled bath or timing device incorporated in the automated apparatus shall conform to the specification for these components as stated in 6 of this test method. The automated apparatus shall be capable of determining kinematic viscosity of a certified reference material within the limits stated in 8.2.1.

6.2 *Viscometer Holders*—Use viscometer holders to enable all viscometers which have the upper meniscus directly above the lower meniscus to be suspended vertically within 1° in all directions. Those viscometers whose upper meniscus is offset from directly above the lower meniscus shall be suspended vertically within 0.3° in all directions (see Specifications D 446 and ISO 3105).

6.2.1 Viscometers shall be mounted in the constant temperature bath in the same manner as when calibrated and stated on the certificate of calibration. See Specifications D 446, see Operating Instructions in Annex A1, Annex A2, and Annex A3. For those viscometers which have Tube L (see Specifications D 446) held vertical, vertical alignment shall be confirmed by using (*1*) a holder ensured to hold Tube L vertical, or (*2*) a bubble level mounted on a rod designed to fit into Tube L, or (*3*) a plumb line suspended from the center of Tube L, or (*4*) other internal means of support provided in the constant temperature bath.

6.3 *Temperature-Controlled Bath*—Use a transparent liquid bath of sufficient depth such, that at no time during the measurement of flow time, any portion of the sample in the viscometer is less than 20 mm below the surface of the bath liquid or less than 20 mm above the bottom of the bath.

6.3.1 *Temperature Control*—For each series of flow time measurements, the temperature control of the bath liquid shall be such that within the range from 15 to 100°C, the temperature of the bath medium does not vary by more than ±0.02°C of the selected temperature over the length of the viscometer, or between the position of each viscometer, or at the location of the thermometer. For temperatures outside this range, the

deviation from the desired temperature must not exceed± 0.05°C.

6.4 *Temperature Measuring Device in the Range from 0 to 100°C*—Use either calibrated liquid-in-glass thermometers (Annex A2) of an accuracy after correction of ±0.02°C or better, or any other thermometric device of equal or better accuracy.

6.4.1 If calibrated liquid-in-glass thermometers are used, the use of two thermometers is recommended. The two thermometers shall agree within 0.04°C.

6.4.2 Outside the range from 0 to 100°C, use either calibrated liquid-in-glass thermometers of an accuracy after correction of ± 0.05°C or better, or any other thermometric device of equal or better accuracy. When two temperature measuring devices are used in the same bath, they shall agree within ±0.1°C.

6.4.3 When using liquid-in-glass thermometers, such as those in Table A2.2, use a magnifying device to read the thermometer to the nearest ⅕ division (for example, 0.01°C or 0.02°F) to ensure that the required test temperature and temperature control capabilities are met (see 9.1). It is recommended that thermometer readings (and any corrections supplied on the certificates of calibrations for the thermometers) be recorded on a periodic basis to demonstrate compliance with the test method requirements. This information can be quite useful, especially when investigating issues or causes relating to testing accuracy and precision.

6.5 *Timing Device*—Use any timing device that is capable of taking readings with a discrimination of 0.1 s or better, and has an accuracy within ±0.07 % (see Annex A3) of the reading when tested over intervals of 200 and 900 s.

6.5.1 Electrical timing devices may be used if the current frequency is controlled to an accuracy of 0.05 % or better. Alternating currents, as provided by some public power systems, are intermittently rather than continuously controlled. When used to actuate electrical timing devices, such control can cause large errors in kinematic viscosity flow time measurements.

7. Reagents and Materials

7.1 *Chromic Acid Cleaning Solution*, or a nonchromium-containing, strongly oxidizing acid cleaning solution. (**Warning**—Chromic acid is a health hazard. It is toxic, a recognized carcinogen, highly corrosive, and potentially hazardous in contact with organic materials. If used, wear a full face-shield and full-length protective clothing including suitable gloves. Avoid breathing vapor. Dispose of used chromic acid carefully as it remains hazardous. Nonchromium-containing, strongly oxidizing acid cleaning solutions are also highly corrosive and potentially hazardous in contact with organic materials, but do not contain chromium which has special disposal problems.)

7.2 *Sample Solvent*, completely miscible with the sample. Filter before use.

7.2.1 For most samples a volatile petroleum spirit or naphtha is suitable. For residual fuels, a prewash with an aromatic solvent such as toluene or xylene may be necessary to remove asphaltenic material.

7.3 *Drying Solvent*, a volatile solvent miscible with the sample solvent (see 7.2) and water (see 7.4). Filter before use.

7.3.1 Acetone is suitable.

7.4 *Water*, deionized or distilled and conforming to Specification D 1193 or Grade 3 of ISO 3696. Filter before use.

8. Calibration and Verification

8.1 *Viscometers*—Use only calibrated viscometers, thermometers, and timers as described in Section 6.

8.2 *Certified Viscosity Reference Standards*[8] *(Table A1.2)*—These are for use as confirmatory checks on the procedure in the laboratory.

8.2.1 If the determined kinematic viscosity does not agree within ± 0.35 % of the certified value, recheck each step in the procedure, including thermometer and viscometer calibration, to locate the source of error. Annex A1 gives details of standards available.

8.2.2 The most common sources of error are caused by particles of dust lodged in the capillary bore and temperature measurement errors. It must be appreciated that a correct result obtained on a standard oil does not preclude the possibility of a counterbalancing combination of the possible sources of error.

8.3 The calibration constant, C, is dependent upon the gravitational acceleration at the place of calibration and this must, therefore, be supplied by the standardization laboratory together with the instrument constant. Where the acceleration of gravity, g, differs by more that 0.1 %, correct the calibration constant as follows:

$$C_2 = (g_2/g_1) \times C_1 \quad (1)$$

where the subscripts 1 and 2 indicate, respectively, the standardization laboratory and the testing laboratory.

9. General Procedure for Kinematic Viscosity

9.1 Adjust and maintain the viscometer bath at the required test temperature within the limits given in 6.3.1 taking account of the conditions given in Annex A2 and of the corrections supplied on the certificates of calibration for the thermometers.

9.1.1 Thermometers shall be held in an upright position under the same conditions of immersion as when calibrated.

9.1.2 In order to obtain the most reliable temperature measurement, it is recommended that two thermometers with valid calibration certificates be used (see 6.4).

9.1.3 They should be viewed with a lens assembly giving approximately five times magnification and be arranged to eliminate parallax errors.

9.2 Select a clean, dry, calibrated viscometer having a range covering the estimated kinematic viscosity (that is, a wide capillary for a very viscous liquid and a narrower capillary for a more fluid liquid). The flow time shall not be less than 200 s or the longer time noted in Specifications D 446.

9.2.1 The specific details of operation vary for the different types of viscometers listed in Table A1.1. The operating instructions for the different types of viscometers are given in Specifications D 446.

[8] The ASTM Viscosity Oil Standards are available in 1-pt (0.47 L) containers. Purchase orders should be addressed to the Cannon Instrument Co., P.O. Box 16, State College, PA 16804. Shipment will be made as specified or by best means.

9.2.2 When the test temperature is below the dew point, fill the viscometer in the normal manner as required in 10.1. To ensure that moisture does not condense or freeze on the walls of the capillary, draw the test portion into the working capillary and timing bulb, place rubber stoppers into the tubes to hold the test portion in place, and insert the viscometer into the bath. After insertion, allow the viscometer to reach bath temperature, and the remove the stoppers. When performing manual viscosity determinations, do not use those viscometers which cannot be removed from the constant temperature bath for charging the sample portion.

9.2.2.1 The use of loosely packed drying tubes affixed to the open ends of the viscometer is permitted, but not required. If used, the drying tubes shall fit the design of the viscometer and not restrict the flow of the sample by pressures created in the instrument.

9.2.3 Viscometers used for silicone fluids, fluorocarbons, and other liquids which are difficult to remove by the use of a cleaning agent, shall be reserved for the exclusive use of those fluids except during their calibration. Subject such viscometers to calibration checks at frequent intervals. The solvent washings from these viscometers shall not be used for the cleaning of other viscometers.

10. Procedure for Transparent Liquids

10.1 Charge the viscometer in the manner dictated by the design of the instrument, this operation being in conformity with that employed when the instrument was calibrated. If the sample contains solid particles, filter during charging through a (75-µm) filter (see Specifications D 446). If the sample is thought or known to contain fibers or solid particles, filter through a 75 µm screen, either prior to or during charging (see Specifications D 446).

NOTE 2—To minimize the potential of particles passing through the filter from aggregating, it is recommended that the time lapse between filtering and charging be kept to a minimum.

10.1.1 In general, the viscometers used for transparent liquids are of the type listed in Table A1.1, A and B.

10.1.2 With certain products which exhibit *gel-like* behavior, exercise care that flow time measurements are made at sufficiently high temperatures for such materials to flow freely, so that similar kinematic viscosity results are obtained in viscometers of different capillary diameters.

10.1.3 Allow the charged viscometer to remain in the bath long enough to reach the test temperature. Where one bath is used to accommodate several viscometers, never add or withdraw a viscometer while any other viscometer is in use for measuring a flow time.

10.1.4 Because this time will vary for different instruments, for different temperatures, and for different kinematic viscosities, establish a safe equilibrium time by trial.

10.1.4.1 Thirty minutes should be sufficient except for the highest kinematic viscosities.

10.1.5 Where the design of the viscometer requires it, adjust the volume of the sample to the mark after the sample has reached temperature equilibrium.

10.2 Use suction (if the sample contains no volatile constituents) or pressure to adjust the head level of the test sample to a position in the capillary arm of the instrument about 7 mm above the first timing mark, unless any other value is stated in the operating instructions for the viscometer. With the sample flowing freely, measure, in seconds to within 0.1 s, the time required for the meniscus to pass from the first to the second timing mark. If this flow time is less than the specified minimum (see 9.2), select a viscometer with a capillary of smaller diameter and repeat the operation.

10.2.1 Repeat the procedure described in 10.2 to make a second measurement of flow time. Record both measurements.

10.2.2 If the two determinations of kinematic viscosity, calculated from the flow time measurements, agree within the stated determinability figure (see 16.1) for the product, use the average of these determinations to calculate the kinematic viscosity result to be reported. Record the result. If the determinations of kinematic viscosity do not agree within the stated determinability, repeat the measurements of flow times after thorough cleaning and drying of the viscometers and filtering (where required, see 10.1) of the sample. If the material or temperature, or both, is not listed in 16.1, for temperatures between 15 and 100°C use as an estimate of the determinability 0.20 %, and 0.35 % for temperatures outside this range.

11. Procedure for Opaque Liquids

11.1 For steam-refined cylinder oils and black lubricating oils, proceed to 11.3 ensuring a thoroughly representative sample is used. The kinematic viscosity of residual fuel oils and similar waxy products can be affected by the previous thermal history and the following procedure described in 11.1.1-11.2.2 shall be followed to minimize this.

11.1.1 In general, the viscometers used for opaque liquids are of the reverse-flow type listed in Table A1.1, C.

11.1.2 Heat in the original container, in an oven, at 60 ± 2°C for 1 h.

11.1.3 Thoroughly stir the sample with a suitable rod of sufficient length to reach the bottom of the container. Continue stirring until there is no sludge or wax adhering to the rod.

11.1.4 Recap the container tightly and shake vigorously for 1 min to complete the mixing.

11.1.4.1 With samples of a very waxy nature or oils of high kinematic viscosity, it may be necessary to increase the heating temperature above 60°C to achieve proper mixing. The sample should be sufficiently fluid for ease of stirring and shaking.

11.2 Immediately after completing 11.1.4, pour sufficient sample to fill two viscometers into a 100-mL glass flask and loosely stopper.

11.2.1 Immerse the flask in a bath of boiling water for 30 min. (**Warning**—Exercise care as vigorous boil-over can occur when opaque liquids which contain high levels of water are heated to high temperatures.)

11.2.2 Remove the flask from the bath, stopper tightly, and shake for 60 s.

11.3 Charge two viscometers in the manner dictated by the design of the instrument. For example, for the cross-arm or the BS U-tube viscometers for opaque liquids, filter the sample through a 75-µm filter into two viscometers previously placed in the bath. For samples subjected to heat treatment, use a

preheated filter to prevent the sample coagulating during the filtration.

11.3.1 Viscometers which are charged before being inserted into the bath may need to be preheated in an oven prior to charging the sample. This is to ensure that the sample will not be cooled below test temperature.

11.3.2 After 10 min, adjust the volume of the sample (where the design of the viscometer requires) to coincide with the filling marks as in the viscometer specifications (see Specifications D 446).

11.3.3 Allow the charged viscometers enough time to reach the test temperature (see 11.3.1). Where one bath is used to accommodate several viscometers, never add or withdraw a viscometer while any other viscometer is in use for measuring flow time.

11.4 With the sample flowing freely, measure in seconds to within 0.1 s, the time required for the advancing ring of contact to pass from the first timing mark to the second. Record the measurement.

11.4.1 In the case of samples requiring heat treatment described in 11.1 through 11.2.1, complete the measurements of flow time within 1 h of completing 11.2.2. Record the measured flow times.

11.5 Calculate kinematic viscosity, ν, in mm ^{2}/s, from each measured flow time.

11.5.1 For residual fuel oils, if the two determinations of kinematic viscosity agree within the stated determinability figure (see 16.1), use the average of these determinations to calculate the kinematic viscosity result to be reported. Record the result. If the calculated kinematic viscosities do not agree, repeat the measurements of flow times after thorough cleaning and drying of the viscometers and filtering of the sample. If the material or temperature, or both, is not listed in 16.1, for temperatures between 15 and 100°C use as an estimate of the determinability 1.0 %, and 1.5 % for temperatures outside this range; it must be realized that these materials can be non-Newtonian, and can contain solids which can come out of solution as the flow time is being measured.

11.5.2 For other opaque liquids, no precision data is available.

12. Cleaning of Viscometer

12.1 Between successive determinations of kinematic viscosity, clean the viscometer thoroughly by several rinsings with the sample solvent, followed by the drying solvent (see 7.3). Dry the tube by passing a slow stream of filtered dry air through the viscometer for 2 min or until the last trace of solvent is removed.

12.2 Periodically clean the viscometer with the cleaning solution (**Warning**—see 7.1), for several hours to remove residual traces of organic deposits, rinse thoroughly with water (7.4) and drying solvent (see 7.3), and dry with filtered dry air or a vacuum line. Remove any inorganic deposits by hydrochloric acid treatment before the use of cleaning acid, particularly if the presence of barium salts is suspected. (**Warning**—It is essential that alkaline cleaning solutions are not used as changes in the viscometer calibration can occur.)

13. Calculation

13.1 Calculate the kinematic viscosity, ν, from the measured flow time, t, and the viscometer constant, C, by means of the following equation:

$$\nu = C \cdot t \tag{2}$$

where:

ν = kinematic viscosity, mm^2/s,
C = calibration constant of the viscometer, (mm^2/s)/s, and
t = mean flow time, s.

13.2 Calculate the dynamic viscosity, η, from the calculated kinematic viscosity, ν, and the density, ρ, by means of the following equation:

$$\eta = \nu \times \rho \times 10^{-3} \tag{3}$$

where:

η = dynamic viscosity, mPa·s,
ρ = density, kg/m^3, at the same temperature used for the determination of the kinematic viscosity, and
ν = kinematic viscosity, mm^2/s.

13.2.1 The density of the sample can be determined at the test temperature of the kinematic viscosity determination by an appropriate method such as Test Methods D 1217, D 1480, or D 1481.

14. Expression of Results

14.1 Report the test results for the kinematic or dynamic viscosity, or both, to four significant figures, together with the test temperature.

15. Report

15.1 Report the following information:

15.1.1 Type and identification of the product tested,

15.1.2 Reference to this test method or a corresponding international standard,

15.1.3 Result of the test (see Section 14),

15.1.4 Any deviation, by agreement or otherwise, from the procedure specified,

15.1.5 Date of the test, and

15.1.6 Name and address of the test laboratory.

16. Precision

16.1 *Determinability (d)*—The difference between successive determinations obtained by the same operator in the same laboratory using the same apparatus for a series of operations leading to a single result, would in the long run, in the normal and correct operation of this test method, exceed the values indicated only in one case in twenty:[9,10,11,12,13,14,15,16]

[9] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from six mineral oils (base oils without additive package) in the range from 8 to 1005 mm^2/s at 40°C and from 2 to 43 mm ^{2}/s at 100°C, and were first published in 1989. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1331 and RR:D02-1132. See Guide D 6074.

[10] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from seven fully formulated engine oils in the range from 36 to 340 mm^2/s at 40°C and from 6 to 25 mm ^{2}/s at 100°C, and were first published in 1991. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1332. See Guide D 6071.

Base oils at 40 and 100°C[9]	0.0020 y	(0.20 %)
Formulated oils at 40 and 100°C[10]	0.0013 y	(0.13 %)
Formulated oils at 150°C[11]	0.015 y	(1.5 %)
Petroleum wax at 100°C[12]	0.0080 y	(0.80 %)
Residual fuel oils at 80 and 100°C[13]	0.011 (y + 8)	
Residual fuel oils at 50°C[13]	0.017 y	(1.7 %)
Additives at 100°C[14]	0.00106 $y^{1.1}$	
Gas oils at 40°C[15]	0.0013 (y+1)	
Jet fuels at –20°C[16]	0.0018 y	(0.18 %)

where: y is the average of determinations being compared.

16.2 *Repeatability (r)*—The difference between successive results obtained by the same operator in the same laboratory with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material would, in the long run, in the normal and correct operation of this test method, exceed the values indicated only in one case in twenty:[9,10,11,12,13,14,15,16]

Base oils at 40 and 100°C[9]	0.0011 x	(0.11 %)
Formulated oils at 40 and 100°C[10]	0.0026 x	(0.26 %)
Formulated oils at 150°C[11]	0.0056 x	(0.56 %)
Petroleum wax at 100°C[12]	0.0141 $x^{1.2}$	
Residual fuel oils at 80 and 100°C[13]	0.013 (x + 8)	
Residual oils at 50°C[13]	0.015 x	(1.5 %)
Additives at 100°C[14]	0.00192 $x^{1.1}$	
Gas oils at 40°C[15]	0.0043 (x+1)	
Jet fuels at –20°C[16]	0.007 x	(0.7 %)

where: x is the average of results being compared.

16.3 *Reproducibility (R)*—The difference between two single and independent results obtained by different operators working in different laboratories on nominally identical test material would, in the long run, in the normal and correct operation of this test method, exceed the values indicated below only in one case in twenty.[9,10,11,12,13,14,15,16]

Base oils at 40 and 100°C[9]	0.0065 x	(0.65 %)
Formulated oils at 40 and 100°C	0.0076 x	(0.76 %)
Formulated oils at 150°C[11]	0.018 x	(1.8 %)
Petroleum wax at 100°C[12]	0.0366 $x^{1.2}$	
Residual fuel oils at 80 and 100°C[13]	0.04 (x + 8)	
Residual oils at 50°C[13]	0.074 x	(7.4 %)
Additives at 100°C[14]	0.00862 $x^{1.1}$	
Gas oils at 40°C[15]	0.0082 (x+1)	
Jet fuels at –20°C[16]	0.019 x	(1.9 %)

where: x is the average of results being compared.

16.4 The precision for used oils has not been determined but is expected to be poorer than that for formulated oils. Because of the extreme variability of such used oils, it is not anticipated that the precision of used oils will be determined.

16.5 The precision for specific automated viscometers has not been determined. However, an analysis has been made of a large data set including both automated and manual viscometers over the temperature range of 40 to 100°C. The reproducibility of automated viscometer data is not statistically significantly different than the reproducibility of manual viscometer data. It is also shown that there is no bias of the automated data in comparison to the manual data.[17]

17. Keywords

17.1 dynamic viscosity; kinematic viscosity; viscometer; viscosity

[11] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results for eight fully formulated engine oils in the range from 7 to 19 mm²/s at 150°C, and first published in 1991. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1333. See Guide D 6074.

[12] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from five petroleum waxes in the range from 3 to 16 mm²/s at 100°C, and were first published in 1988. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1334.

[13] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from fourteen residual fuel oils in the range from 30 to 1300 mm²/s at 50°C and from 5 to 170 mm²/s at 80 and 100°C, and were first published in 1984. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1198.

[14] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from eight additives in the range from 145 to 1500 mm²/s at 100°C and were first available in 1997. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1421.

[15] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from eight gas oils in the range from 1 to 13 mm²/s at 40°C and were first available in 1997. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1422.

[16] These precision values were obtained by statistical examination of interlaboratory results from nine jet fuels in the range from 4.3 to 5.6 mm²/s at– 20°C and were first available in 1997. Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1420.

[17] Precision data available from ASTM Headquarters. Request RR: D02–1498.

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. VISCOMETER TYPES, CALIBRATION, AND VERIFICATION

A1.1 Viscometer Types

A1.1.1 Table A1.1 lists capillary viscometers commonly in use for viscosity determinations on petroleum products. For specifications and operating instructions, refer to Specifications D 446.

A1.2 Calibration

A1.2.1 Calibrate working standard viscometers against master viscometers having a certificate of calibration traceable to a national standard. Viscometers used for analysis shall be calibrated in comparison with working standard viscometers or master viscometers, or by the procedures given in Specifications D 446 or ISO 3105. Viscometer constants shall be measured and expressed to the nearest 0.1 % of their value.

A1.3 Verification

A1.3.1 Viscometer constants shall either be verified by a similar procedure to A1.2, or conveniently checked by means of certified viscosity oils.

A1.3.2 These oils can be used for confirmatory checks on the procedure in a laboratory. If the measured viscosity does not agree within ± 0.35 % of the certified value, recheck each step in the procedure including thermometer, timer, and viscometer calibration to locate the source of error. It should be

TABLE A1.1 Viscometer Types

Viscometer Identification	Kinematic Viscosity Range,[A] mm²/s
A. Ostwald Types for Transparent Liquids	
Cannon-Fenske routine[B]	0.5 to 20 000
Zeitfuchs	0.6 to 3 000
BS/U-tube[B]	0.9 to 10 000
BS/U/M miniature	0.2 to 100
SIL[B]	0.6 to 10 000
Cannon-Manning semi-micro	0.4 to 20 000
Pinkevitch[B]	0.6 to 17 000
B. Suspended-level Types for Transparent Liquids	
BS/IP/SL[B]	3.5 to 100 000
BS/IP/SL(S)[B]	1.05 to 10 000
BS/IP/MSL	0.6 to 3 000
Ubbelohde[B]	0.3 to 100 000
FitzSimons	0.6 to 1 200
Atlantic[B]	0.75 to 5 000
Cannon-Ubbelohde(A), Cannon Ubbelohde dilution[B](B)	0.5 to 100 000
Cannon-Ubbelohde semi-micro	0.4 to 20 000
C. Reverse-flow Types for Transparent and Opaque Liquids	
Cannon-Fenske opaque	0.4 to 20 000
Zeitfuchs cross-arm	0.6 to 100 000
BS/IP/RF U-tube reverse-flow	0.6 to 300 000
Lantz-Zeitfuchs type reverse-flow	60 to 100 000

[A] Each range quoted requires a series of viscometers. To avoid the necessity of making a kinetic energy correction, these viscometers are designed for a flow time in excess of 200 s except where noted in Specifications D 446.

[B] In each of these series, the minimum flow time for the viscometers with lowest constants exceeds 200 s.

TABLE A1.2 Viscosity Oil Standards[A]

Designation	Approximate Kinematic Viscosity, mm²/s					
	−40°C	20°C	25°C	40°C	50°C	100°C
S3	80	4.6	4.0	2.9	...	1.2
S6	...	11	8.9	5.7	...	1.8
S20	...	44	34	18	...	3.9
S60	...	170	120	54	...	7.2
S200	...	640	450	180	...	17
S600	...	2 400	1 600	520	280	32
S2 000	...	8 700	5 600	1 700	...	75
S8 000	...	37 000	23 000	6 700	...	...
S30 000	...	...	81 000	23 000	11 000	...

[A] The actual values for these standards are established and annually reaffirmed by cooperative tests. In 1991, tests were made using 15 different types of viscometers in 28 laboratories located in 14 countries.

[B] Kinematic viscosities may also be supplied at 100°F.

[C] Kinematic viscosities may also be supplied at 210°F.

appreciated that a correct result obtained on a certified oil does not preclude the possibility of a counterbalancing combination of the possible sources of error.

A1.3.2.1 A range of viscosity oil standards is commercially available, and each oil carries a certification of the measured value established by multiple testing. Table A1.2 gives the standard range of oils, together with the approximate viscosities over a range of temperatures.

A2. KINEMATIC VISCOSITY TEST THERMOMETERS

A2.1 Short-Range Specialized Thermometer

A2.1.1 Use a short-range specialized thermometer conforming to the generic specification given in Table A2.1 and Table A2.2 and to one of the designs shown in Fig. A2.1.

A2.1.2 The difference in the designs rests mainly in the position of the ice point scale. In Design A, the ice point is within the scale range, in Design B, the ice point is below the scale range, and in Design C, the ice point is above the scale range.

A2.2 Calibration

A2.2.1 Use liquid-in-glass thermometers with an accuracy after correction of 0.02°C or better, calibrated by a laboratory meeting the requirements of ISO 9000 or ISO 25, and carrying certificates confirming that the calibration is traceable to a national standard. As an alternative, use thermometric devices such as platinum resistance thermometers, of equal or better accuracy, with the same certification requirements.

A2.2.2 The scale correction of liquid-in-glass thermometers

TABLE A2.1 General Specification for Thermometers

NOTE 1—Table A2.2 gives a range of ASTM, IP, and ASTM/IP thermometers that comply with the specification in Table A2.1, together with their designated test temperatures. See Specification E 1 and Test Method E 77.

Immersion		Total
Scale marks:		
Subdivisions	°C	0.05
Long lines at each	°C	0.1 and 0.5
Numbers at each	°C	1
Maximum line width	mm	0.10
Scale error at test temperature, max	°C	0.1
Expansion chamber:		
Permit heating to	°C	105 up to 90, 120 between 90 and 95 130 between 95 and 105, 170 above 105
Total length	mm	300 to 310
Stem outside diameter	mm	6.0 to 8.0
Bulb length	mm	45 to 55
Bulb outside diameter	mm	no greater than stem
Length of scale range	mm	40 to 90

TABLE A2.2 Complying Thermometers

Thermometer No.	Test Temperature °C	Test Temperature °F	Thermometer No.	Test Temperature °C	Test Temperature °F
ASTM 132C, IP 102C	150		ASTM 128C, F/IP 33C	0	32
ASTM 110C, F/IP 93C	135	275	ASTM 72C, F/IP 67C	−17.8	0
ASTM 121C/IP 32C	98.9, 100	210, 212	ASTM 127C/IP 99C	−20	−4
			ASTM 126C, F/IP 71C	−26.1	−20
ASTM 129C, F/IP 36C	93.3	200	ASTM 73C, F/IP 68C	−40	−40
ASTM 48C, F/IP 90C	82.2	180	ASTM 74C, F/IP 69C	−53.9	−65
IP 100C	80				
ASTM 47C, F/IP 35C	60	140			
ASTM 29C, F/IP 34C	54.4	130			
ASTM 46C F/IP 66C	50	122			
ASTM 120C/IP 92C	40				
ASTM 28C, F/IP 31C	37.8	100			
ASTM 118C, F	30	86			
ASTM 45C, F/IP 30C	25	77			
ASTM 44C, F/IP 29C	20	68			

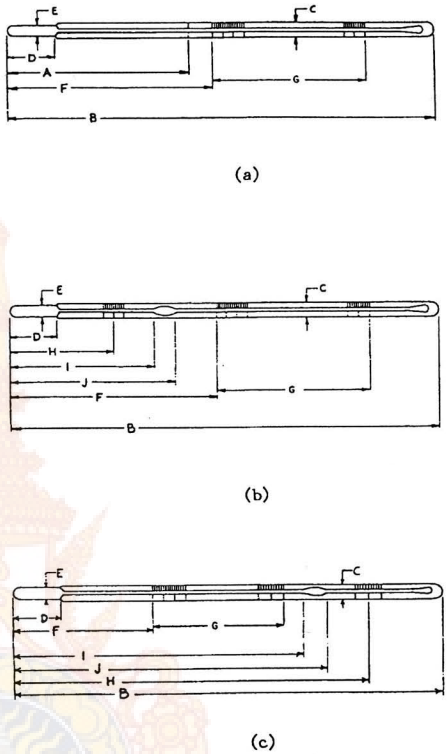


FIG. A2.1 Thermometer Designs

can change during storage and use, and therefore regular re-calibration is required. This is most conveniently achieved in a working laboratory by means of a re-calibration of the ice point, and all of the main scale corrections altered for the change seen in the ice point.

A2.2.2.1 It is recommended that the interval for ice-point checking be not greater than six months, but for new thermometers, monthly checking for the first six months is recommended. A complete new re-calibration of the thermometer, while permitted, is not necessary in order to meet the accuracy ascribed to this design thermometer until the ice-point change from the last full calibration amounts to one scale division, or more than five years have elapsed since the last full calibration.

A2.2.2.2 Other thermometric devices, if used, will also require periodic recalibration. Keep records of all re-calibration.

A2.2.3 *Procedure for Ice-point Re-calibration of Liquid-in-glass Thermometers.*

A2.2.3.1 Unless otherwise listed on the certificate of calibration, the re-calibration of calibrated kinematic viscosity thermometers requires that the ice-point reading shall be taken within 60 min after being at test temperature for not less than 3 min.

A2.2.3.2 Select clear pieces of ice, preferably made from distilled or pure water. Discard any cloudy or unsound portions. Rinse the ice with distilled water and shave or crush into small pieces, avoiding direct contact with the hands or any chemically unclean objects. Fill the Dewar vessel with the crushed ice and add sufficient water to form a slush, but not enough to float the ice. As the ice melts, drain off some of the water and add more crushed ice. Insert the thermometer, and pack the ice gently about the stem, to a depth approximately one scale division below the 0°C graduation.

A2.2.3.3 After at least 3 min have elapsed, tap the thermometer gently and repeatedly at right angles to its axis while making observations. Successive readings taken at least 1 min apart shall agree within 0.005°C.

A2.2.3.4 Record the ice-point readings and determine the thermometer correction at this temperature from the mean reading. If the correction is found to be higher or lower than that corresponding to a previous calibration, change the correction at all other temperatures by the same value.

A2.2.3.5 During the procedure, apply the following conditions:

(*a*) The thermometer shall be supported vertically.

(*b*) View the thermometer with an optical aid that gives a magnification of approximately five and also eliminates parallax.

(*c*) Express the ice-point reading to the nearest 0.005°C.

A2.2.4 When in use, immerse the thermometric device to the same depth as when it was fully calibrated. For example, if a liquid-in-glass thermometer was calibrated at the normal total immersion condition, it shall be immersed to the top of the mercury column with the remainder of the stem and the expansion volume at the uppermost end exposed to room temperature and pressure. In practice, this means that the top of the mercury column shall be within a length equivalent to four scale divisions of the surface of the medium whose temperature is being measured.

A2.2.4.1 If this condition cannot be met, then an extra correction may be necessary.

A3. TIMER ACCURACY

A3.1 Regularly check timers for accuracy and maintain records of such checks.

A3.1.1 Time signals as broadcast by the National Institute of Standards and Technology are a convenient and primary standard reference for calibrating timing devices. The following can be used to an accuracy of 0.1 s:

WWV	Fort Collins, CO	2.5, 5, 10, 15, 20 MHz
WWVH	Kauai, HI	2.5, 5, 10, 15, MHz
CHU	Ottawa, Canada	3.33, 7.335, 14.67 MHz

A3.1.2 Radio broadcast of voice and audio on a telephone line at phone 303-499-7111. Additional time services are available from the National Institute of Standards and Technology.

Designation: D 4052 – 96

An American National Standard

Designation: 365/84(86)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter[1]

This standard is issued under the fixed designation D 4052; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This method was adopted as a joint ASTM-IP standard in 1984.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the density or relative density of petroleum distillates and viscous oils that can be handled in a normal fashion as liquids at test temperatures between 15 and 35°C. Its application is restricted to liquids with vapor pressures below 600 mm Hg (80 kPa) and viscosities below about 15 000 cSt (mm^2/s) at the temperature of test.

1.2 This test method should not be applied to samples so dark in color that the absence of air bubbles in the sample cell cannot be established with certainty. For the determination of density in crude oil samples use Test Method D 5002.

1.3 The accepted units of measure for density are grams per millilitre or kilograms per cubic metre.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific hazard statements, see Note 1 and Note 2.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 1193 Specification for Reagent Water[2]

D 1250 Guide for Petroleum Measurement Tables[3]

D 4057 Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products[4]

D 4177 Practice for Automatic Sampling of Petroleum and Petroleum Products[4]

D 4377 Test Method for Water in Crude Oils by Potentiometric Karl Fischer Titration[4]

D 5002 Test Method for Density and Relative Density of Crude Oils by Digital Density Analyzer[5]

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *density*—mass per unit volume at a specified temperature.

3.1.2 *relative density*—the ratio of the density of a material at a stated temperature to the density of water at a stated temperature.

4. Summary of Test Method

4.1 A small volume (approximately 0.7 mL) of liquid sample is introduced into an oscillating sample tube and the change in oscillating frequency caused by the change in the mass of the tube is used in conjunction with calibration data to determine the density of the sample.

5. Significance and Use

5.1 Density is a fundamental physical property that can be used in conjunction with other properties to characterize both the light and heavy fractions of petroleum and petroleum products.

5.2 Determination of the density or relative density of petroleum and its products is necessary for the conversion of measured volumes to volumes at the standard temperature of 15°C.

6. Apparatus

6.1 *Digital Density Analyzer*—A digital analyzer consisting of a U-shaped, oscillating sample tube and a system for electronic excitation, frequency counting, and display. The analyzer must accommodate the accurate measurement of the sample temperature during measurement or must control the sample temperature as described in 6.2. The instrument shall be capable of meeting the precision requirements described in this test method.

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-2 on Petroleum Products and Lubricantsand is the direct responsibility of Subcommittee D02.04 on Hydrocarbon Analysis.

Current edition approved Apr. 10, 1996. Published June 1996. Originally published as D 4052 – 81. Last previous edition D 4052 – 95.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.02.

[5] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.03.

6.2 *Circulating Constant-Temperature Bath*, (optional) capable of maintaining the temperature of the circulating liquid constant to ±0.05°C in the desired range. Temperature control can be maintained as part of the density analyzer instrument package.

6.3 *Syringes*, at least 2 mL in volume with a tip or an adapter tip that will fit the opening of the oscillating tube.

6.4 *Flow-Through or Pressure Adapter*, for use as an alternative means of introducing the sample into the density analyzer either by a pump or by vacuum.

6.5 *Thermometer*, calibrated and graduated to 0.1°C, and a thermometer holder that can be attached to the instrument for setting and observing the test temperature. In calibrating the thermometer, the ice point and bore connections should be estimated to the nearest 0.05°C.

7. Reagents and Materials

7.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents shall conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society, where such specifications are available.[6] Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

7.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type II of Specification D 1193.

7.3 *Water*, redistilled, freshly boiled and cooled reagent water for use as a primary calibration standard.

7.4 *Petroleum Naphtha*[7] for flushing viscous petroleum samples from the sample tube.

NOTE 1—Extremely flammable.

7.5 *Acetone*, for flushing and drying the sample tube.

NOTE 2—**Warning:** Extremely flammable.

7.6 *Dry Air*—for blowing the oscillator tube.

8. Sampling, Test Specimens, and Test Units

8.1 Sampling is defined as all the steps required to obtain an aliquot of the contents of any pipe, tank, or other system, and to place the sample into the laboratory test container. The laboratory test container and sample volume shall be of sufficient capacity to mix the sample and obtain a homogeneous sample for analysis.

8.2 *Laboratory Sample*—Use only representative samples obtained as specified in Practices D 4057 or D 4177 for this test method.

8.3 *Test Specimen*—A portion or volume of sample obtained from the laboratory sample and delivered to the density analyzer sample tube. The test specimen is obtained as follows:

8.3.1 Mix the sample if required to homogenize. The mixing may be accomplished as described in Practice D 4177 (Section 11) or Test Method D 4377 (A.1). Mixing at room temperature in an open container can result in the loss of volatile material, so mixing in closed, pressurized containers or at sub-ambient temperatures is recommended.

8.3.2 Draw the test specimen from a properly mixed laboratory sample using an appropriate syringe. Alternatively, if the proper density analyzer attachments and connecting tubes are used then the test specimen can be delivered directly to the analyzer's sample tube from the mixing container.

9. Preparation of Apparatus

9.1 Set up the density analyzer and constant temperature bath following the manufacturer's instructions. Adjust the bath or internal temperature control so that the desired test temperature is established and maintained in the sample compartment of the analyzer. Calibrate the instrument at the same temperature at which the density of the sample is to be measured.

NOTE 3—**Caution:** Precise setting and control of the test temperature in the sample tube is extremely important. An error of 0.1°C can result in a change in density of one in the fourth decimal.

10. Calibration of Apparatus

10.1 Calibrate the instrument when first set up and whenever the test temperature is changed. Thereafter, conduct calibration checks at weekly intervals during routine operation.

10.2 Initial calibration, or calibration after a change in test temperature, necessitates calculation of the values of the constants A and B from the periods of oscillation (T) observed when the sample cell contains air and redistilled, freshly boiled and cooled reagent water. Other calibrating materials such as *n*-nonane, *n*-tridecane, cyclohexane, and *n*-hexadecane (for high temperature applications) can also be used as appropriate.

10.2.1 While monitoring the oscillator period, T, flush the sample tube with petroleum naphtha, followed with an acetone flush and dry with dry air. Contaminated or humid air can affect the calibration. When these conditions exist in the laboratory, pass the air used for calibration through a suitable purification and drying train. In addition, the inlet and outlet ports for the U-tube must be plugged during measurement of the calibration air to prevent ingress of moist air.

10.2.2 Allow the dry air in the U-tube to come to thermal equilibrium with the test temperature and record the T-value for air.

10.2.3 Introduce a small volume (about 0.7 mL) of redistilled, freshly boiled and cooled reagent water into the sample tube from the bottom opening using a suitable syringe. The test portion must be homogeneous and free of even the smallest air or gas bubbles. The sample tube does not have to be completely full as long as the liquid meniscus is beyond the suspension point. Allow the display to reach a steady reading and record the T-value for water.

10.2.4 Calculate the density of air at the temperature of test using the following equation:

$$d_a, \text{ g/mL} = 0.001293[273.15/T][P/760] \quad (1)$$

where:

[6] *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Analar Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmaceutical Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

[7] Suitable solvent naphthas are marketed under various designations such as "Petroleum Ether," "Ligroine," or "Precipitation Naphtha."

T = temperature, K, and
P = barometric pressure, torr.

10.2.5 Determine the density of water at the temperature of test by reference to Table 1.

10.2.6 Using the observed T-values and the reference values for water and air, calculate the values of the Constants A and B using the following equations:

$$A = [T_w^2 - T_a^2]/[d_w - d_a] \quad (2)$$

$$B = T_a^2 - (A \times d_a) \quad (3)$$

T_w = observed period of oscillation for cell containing water,
T_a = observed period of oscillation for cell containing air,
d_w = density of water at test temperature, and
d_a = density of air at test temperature.

Alternatively, use the T and d values for the other reference liquid if one is used.

10.2.7 If the instrument is equipped to calculate density from the constants A and B and the observed T-value from the sample, then enter the constants in the instrument memory in accordance with the manufacturer's instructions.

10.2.8 Check the calibration and adjust if needed by performing the routine calibration check described in 10.3.

10.2.9 To calibrate the instrument to display relative density, that is, the density of the sample at a given temperature referred to the density of water at the same temperature, follow 10.2.1-10.2.7, but substitute 1.000 for d_w in performing the calculations described in 10.2.6.

10.3 Weekly calibration adjustments to constants A and B can be made if required, without repeating the calculation procedure.

NOTE 4—The need for a change in calibration is generally attributable to deposits in the sample tube that are not removed by the routine flushing procedure. Although this condition can be compensated for by adjusting A and B, it is good practice to clean the tube with warm chromic acid solution (**Warning**—Causes severe burns. A recognized carcinogen.) whenever a major adjustment is required. Chromic acid solution is the most effective cleaning agent; however, surfactant cleaning fluids have also been used successfully.

10.3.1 Flush and dry the sample tube as described in 10.2.1 and allow the display to reach a steady reading. If the display does not exhibit the correct density for air at the temperature of test, repeat the cleaning procedure or adjust the value of constant B commencing with the last decimal place until the correct density is displayed.

10.3.2 If adjustment to constant B was necessary in 10.3.1 then continue the recalibration by introducing redistilled, freshly boiled and cooled reagent water into the sample tube as described in 10.2.3 and allow the display to reach a steady reading. If the instrument has been calibrated to display the density, adjust the reading to the correct value for water at the test temperature (Table 1) by changing the value of constant A, commencing with the last decimal place. If the instrument has been calibrated to display the relative density, adjust the reading to the value 1.0000.

NOTE 5—In applying this weekly calibration procedure, it can be found that more than one value each for A and B, differing in the fourth decimal place, will yield the correct density reading for the density of air and water. The setting chosen would then be dependent upon whether it was approached from a higher or lower value. The setting selected by this method could have the effect of altering the fourth place of the reading obtained for a sample.

10.4 Some analyzer models are designed to display the measured period of oscillation only (T-values) and their calibration requires the determination of an instrument constant K, which must be used to calculate the density or relative density from the observed data.

10.4.1 Flush and dry the sample tube as described in 10.2.1 and allow the display to reach a steady reading. Record the T-value for air.

10.4.2 Introduce redistilled, freshly boiled and cooled reagent water into the sample tube as described in 10.2.3, allow the display to reach a steady reading and record the T-value for water.

10.4.3 Using the observed T-values and the reference values for water and air (10.2.4 and 10.2.5), calculate the instrument constant K using the following equations:

For density:

$$K_1 = [d_w - d_a]/[T_w^2 - T_a^2] \quad (4)$$

For relative density:

$$K_2 = [1.0000 - d_a]/[T_w^2 - T_a^2] \quad (5)$$

where:
T_w = observed period of oscillation for cell containing water,
T_a = observed period of oscillation for cell containing air,
d_w = density of water at test temperature, and
d_a = density of air at test temperature.

TABLE 1 Density of Water[A]

Temperature, °C	Density, g/mL	Temperature, °C	Density, g/mL	Temperature, °C	Density, g/mL
0.0	0.999840	21.0	0.997991	40.0	0.992212
3.0	0.999964	22.0	0.997769	45.0	0.990208
4.0	0.999972	23.0	0.997537	50.0	0.988030
5.0	0.999964	24.0	0.997295	55.0	0.985688
10.0	0.999699	25.0	0.997043	60.0	0.983191
15.0	0.999099	26.0	0.996782	65.0	0.980546
15.56	0.999012	27.0	0.996511	70.0	0.977759
16.0	0.998943	28.0	0.996231	75.0	0.974837
17.0	0.998774	29.0	0.995943	80.0	0.971785
18.0	0.998595	30.0	0.995645	85.0	0.968606
19.0	0.998404	35.0	0.994029	90.0	0.965305
20.0	0.998203	37.78	0.993042	100	0.958345

[A]Densities conforming to the International Temperature Scale 1990 (ITS 90) were extracted from Appendix G, *Standard Methods for Analysis of Petroleum and Related Products 1991*, Institute of Petroleum, London.

11. Procedure

11.1 Introduce a small amount (about 0.7 mL) of sample into the clean, dry sample tube of the instrument using a suitable syringe.

11.2 The sample can also be introduced by siphoning. Plug the external TFE-fluorocarbon capillary tube into the lower entry port of the sample tube. Immerse the other end of the capillary in the sample and apply suction to the upper entry port using a syringe or vacuum line until the sample tube is properly filled.

11.3 Turn on the illumination light and examine the sample

tube carefully. Make sure that no bubbles are trapped in the tube, and that it is filled to just beyond the suspension point on the right-hand side. The sample must be homogeneous and free of even the smallest bubbles.

NOTE 6—If the sample is too dark in color to determine the absence of bubbles with certainty, the density cannot be measured within the stated precision limits of Section 14.

11.4 Turn the illumination light off immediately after sample introduction, because the heat generated can affect the measurement temperature.

11.5 After the instrument displays a steady reading to four significant figures for density and five for *T*-values, indicating that temperature equilibrium has been reached, record the density or *T*-value.

12. Calculation

12.1 *Calculating Density Analyzers*—The recorded value is the final result, expressed either as density in g/mL, kg/m^3 or as relative density. Note that kg/m^3 = 1000 × g/mL.

12.2 *Noncalculating Density Analyzers*—Using the observed *T*-value for the sample and the *T*-value for water and appropriate instrument constants determined in 10.4.3, calculate the density or relative density using Eq 6 and Eq 7. Carry out all calculations to six significant figures and round the final results to four.

For density:

$$\text{density, g/mL (kg/dm}^3\text{) at } t = d_w + K_1(T_s^2 - T_w^2) \quad (6)$$

For relative density:

$$\text{relative density, } t/t = 1 + K_2(T_s^2 - T_w^2) \quad (7)$$

where:

T_w = observed period of oscillation for cell containing water,
T_s = observed period of oscillation for cell containing sample,
d_w = density of water at test temperature,
K_1 = instrument constant for density,
K_2 = instrument constant for relative density, and
t = temperature of test,° C.

12.3 If it is necessary to convert a result obtained using the density meter to a density or relative density at another temperature, Guide D 1250 can be used only if the glass expansion factor has been excluded.

13. Report

13.1 In reporting density, give the test temperature and the units (for example: density at 20°C = 0.8765 g/mL or 876.5 kg/m^3).

13.2 In reporting relative density, give both the test temperature and the reference temperature, but no units (for example: relative density, 20/20°C = 0.xxxx).

13.3 Report the final result to the fourth decimal place.

14. Precision and Bias [8]

14.1 The precision of the method as obtained by statistical examination of interlaboratory test results at test temperatures of 15 and 20°C is as follows:

14.1.1 *Repeatability*—The difference between successive test results obtained by the same operator with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following value only in one case in twenty:

Range	Repeatability
0.68–0.97 g/mL	0.0001

14.1.2 *Reproducibility*—The difference between two single and independent results, obtained by different operators working in different laboratories on identical test material, would in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values only in one case in twenty:

Range	Reproducibility
0.68–0.97 g/mL	0.0005

14.2 *Bias*—After suggestions of its existence from literature[9], a study has been performed which has confirmed the presence of a bias between known density values for reference materials and from values determined according to this test method on the same reference materials. The matrix for this bias study comprised 15 participants, each analyzing four reference oils with certified density values, established by the Netherlands Meet Instituut (NMI), by pyknometry, covering densities in the range of 747 to 927 kg/m^3 at 20°C, with viscosities between 1 and 5 000 mPa.s (also at 20°C). This study is documented in ASTM Research Report RR-D02-1387. Method users should, therefore, be aware that results obtained by this test method can be biased by as much as 0.6 kg/m^3 (0.0006 g/mL).

15. Keywords

15.1 density; digital density analyzer; petroleum distillates; petroleum products; relative density

[8] Statistical data is available as a research report from ASTM Headquarters. Request RR:D02-1387.

[9] Fitzgerald, H. and D., "An Assessment of Laboratory Density Meters," *Petroleum Review*, November 1992, pp. 544–549.

ประวัตินักวิจัย

1. **ชื่อ – นามสกุล** (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาริสา จินะดิษฐ์

   ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assistant Professor Dr. Marisa Chinadit

2. **ตำแหน่งปัจจุบัน** ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. **หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail**

   สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

   เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กทม. 10120

   โทรศัพท์ 0 2286 3991 ถึง 5 ต่อ 1201 และ 02 287 9600 ต่อ 1210

   โทรสาร 02 287 9600 ต่อ 1210 และ 02 287 9734

   e-mail : marisa.c@rmutk.ac.th, marisachinadit@hotmail.com

4. **ประวัติการศึกษา**

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2525	เอก	Docteur de Troisième Cycle	Sciences et Techniques des Procédés Chimiques	Université Paul Sabatier, Toulouse	ฝรั่งเศส
2518	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย
2516	อนุปริญญา	ป.ค.	เคมีปฏิบัติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย

5. **สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ**

   สาขาเคมีวิเคราะห์

6. **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ : ระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละเรื่อง**

   6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

   มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, "การผลิตกระถางต้นไม้จากเศษใบไม้" (หัวหน้าโครงการวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2549

   มาริสา จินะดิษฐ์ "การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงให้มีความหลากหลายสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในรถยนต์ 4 ล้อ" (หัวหน้าโครงการวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2550

6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อเรื่อง ปีที่พิมพ์ และสถานภาพในการทำวิจัย

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, สุรัตน์ บุญพึ่ง และจิรพล กลิ่นบุญ, "การพัฒนากระถางต้นไม้จากใยมะพร้าว" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเครือข่ายภูมิภาคกลางตอนล่าง ปีงบประมาณ 2547

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, สุรัตน์ บุญพึ่ง และวราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์, "การผลิตกระถางเพาะชำจากธรรมชาติ" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, สุรัตน์ บุญพึ่ง, วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์, ไชยยันต์ ไชยยะ และ ฉันทมณี วังสะจันทานนท์ "กระถางต้นไม้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินปี 2548

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, โสริยา ชิโนคม, สุรัตน์ บุญพึ่ง, ไชยยันต์ ไชยยะ และ ฉันทมณี วังสะจันทานนท์ "กระถางต้นไม้ชำร่วยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, "การผลิตกระถางต้นไม้จากเศษใบไม้" (หัวหน้าโครงการวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2549

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, "การสกัดสารออกฤทธิ์ทางยาจากฟ้าทะลายโจรด้วยคาร์บอนไอออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2549

มาริสา จินะดิษฐ์, ไชยยันต์ ไชยยะ, และวราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ "การแยกโลหะหนักออกจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้หอดูดซับแบบชั้นตรึง" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2549

มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, ไชยยันต์ ไชยยะ, และชัชวาลย์ สุขมั่น "การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากไม้กฤษณา" (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี 2550

มาริสา จินะดิษฐ์ "การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงให้มีความหลากหลายสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในรถยนต์ 4 ล้อ" (หัวหน้าโครงการวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2550

****