บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. สบู่ดำ

"สบู่ดำ" มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas Linn* เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา Euphobiaceae เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร ลำต้นมีลักษณะเกลี้ยงเกลา มีใบเรียบ 4 แฉก คล้ายใบละหุ่ง แต่มีหยักตื้นกว่าใบที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีขนาดเท่าฝ่ามือ ลำต้น ใบ ผล และเมล็ด มีสาร Hydrocyanic สังเกตได้เมื่อหักลำต้น ส่วนยอดหรือก้านใบจะมียางสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนมไหลออกมามีกลิ่นเหม็นเขียว ต้นสบู่ดำออกดอกเป็นช่อกระจุกที่ส่วนข้อส่วนปลายของยอดมีขนาดดอกเล็กสีเหลืองมีกลิ่นหอมอ่อนๆ มีดอกตัวผู้จำนวนมากและดอกตัวเมียอยู่จำนวนน้อยอยู่บนต้นเดียวกัน เมื่อติดผลแล้วมีสีเขียวอ่อนเกลี้ยงเกลาเป็นช่อพวงมีหลายผล เวลาสุกแก่จัดมีสีเหลืองคล้ายลูกจัน รูปผลมีลักษณะทรงกลมขนาดปานกลาง เปลือกหนาปานกลาง มีปลูกทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ ผลหนึ่งส่วนมากมี 3 พู โดยแต่ละพูทำหน้าที่หุ้มเมล็ดไว้เมล็ดสีดำขนาดเล็กกว่าเล็ดละหุ่งพันธุ์ลายขาวดำเล็กน้อย สีตรงปลายเมล็ดมีจุดสีขาวเล็กๆ ติดอยู่ เมื่อเก็บไว้นานจุดนี้จะหดตัวและเหี่ยวแห้งลง ขนาดของเมล็ดเฉลี่ยความยาว 1.7-1.9 เซนติเมตร หนา 0.8-0.9 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 69.8 กรัม เมื่อแกะเปลือกนอกสีดำจะเห็นเนื้อในสีขาว

การปลูกสบู่ดำสามารถปลูกได้ทั้งจากต้นกล้า การเพาะเมล็ด และกิ่งปักชำโดยที่ได้จากการเพาะเมล็ด (ต้นกล้าจากการเพาะเมล็ด 2 เดือน) จะให้ผลผลิตเก็บได้ประมาร 7-10 เดือนหลังปลูก ส่วนต้นที่ปลูกจากกิ่งปักชำ (หลังปักชำประมาณ 2 เดือน) จะให้ผลผลิตประมาณ 6-8 เดือนหลังปลูก สำหรับระยะปลูกที่ใช้ควรจะใช้ระยะปลูก 3x3 เมตรขึ้นไป ซึ่งจะได้ประมาณ 170 ต้นต่อไร่ ไม่ควรปลูกถี่จนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตได้ เนื่องจากสบู่ดำเป็นพืชที่เจริญเติบโตค่อนข้างเร็วและเป็นไม้ที่มีทรงพุ่มค่อนข้างใหญ่ ส่วนฤดูปลูกที่เหมาะสมควรจะเป็นช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคมหรือช่วงต้นฤดูฝนเช่นเดียวกับพืชชนิดอื่นเพื่อประหยัดการให้น้ำแต่ต้องระวังให้ต้นสบู่ดำเจริญเติบโตก่อนที่จะเข้าช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกชุกมากๆเพราะอาจจะทำให้น้ำท่วมแปลงปลูกสบู่ดำและทำให้ต้นตายได้หากสบู่ดำยังมีขนาดเล็ก พื้นที่ปลูกสบู่ดำควรเลือกพื้นที่ดอน น้ำไม่ท่วมขัง อยู่กลางแจ้งแสงแดดจัด เช่น คันนา นาดอนจัด หัวไร่ ปลายนา ริมรั้วบ้าน

2. การสกัดน้ำมันสบู่ดำ

ผลสบู่ดำ 1 ผล จะมี 3 เมล็ด ผลสบู่ดำ 1 กิโลกรัม มีประมาณ 85-90 ผล 1 ผลสด 1 กิโลกรัม เมื่อนำมากะเทาะเปลือกออกแล้ว จะได้เมล็ดสบู่ดำประมาณ 260-270 เมล็ด สบู่ดำ 1 เมล็ดหนัก 1.1 กรัม น้ำมันในเมล็ดของสบู่ดำมีอยู่ประมารร้อยละ 35 ของน้ำหนักเมล็ด ซึ่งเมล็ดสบู่ดำจำนวน 4 กิโลกรัม จะสามารถสกัดน้ำมันได้ 1 กิโลกรัม หรือประมาณ 1 ลิตรและที่เหลือเป็นกากสบู่ดำ 3 กิโลกรัม และเมื่อนำออกมาจากเครื่องสกัดทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 1-2 วัน สามารถนำไปใช้แทนน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องสูบเดี่ยวของเกษตรกรได้โดยไม่ต้องผสมส่วนผสมใดๆ อีก

ปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในเมล็ดสบู่ดำสามารถสกัดออกมาได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือและวิธีการในการสกัดซึ่งการสกัดน้ำมันสบู่ดำสามารถสกัดได้โดยวิธีการดังนี้

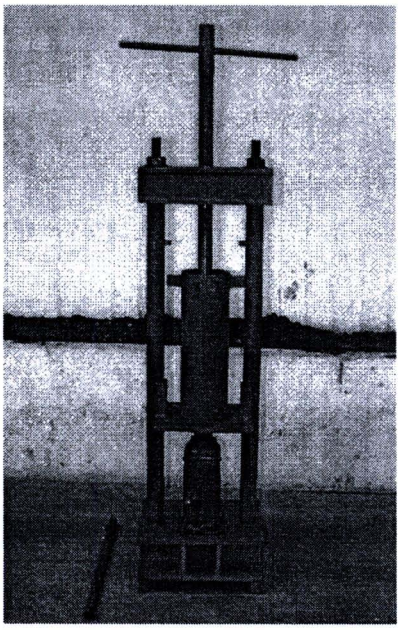
2.1 การสกัดในห้องปฏิบัติการ

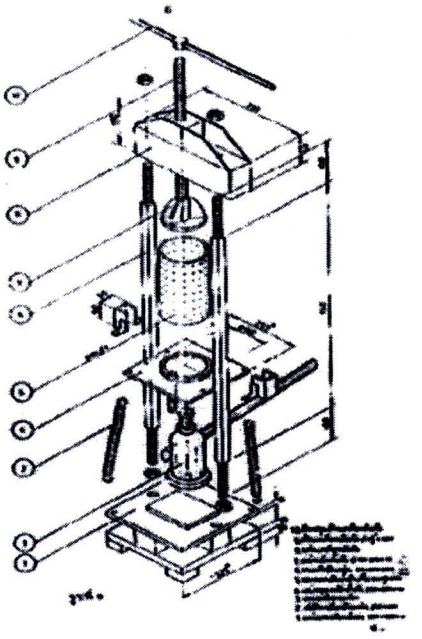
การสกัดในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีบดให้ละเอียดแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้นำน้ำมัน 34.96% จากเมล็ดรวมเปลือก และ 54.68% จากเนื้อเมล็ด

2.2 การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก

การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก จะได้น้ำมันประมาณ 25-30% มีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15% เครื่องสกัดแบบไฮดรอลิกเป็นเครื่องขนาดเล็กแบบง่ายๆ ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีขนาดเล็กใช้ง่าย ประสิทธิภาพในการบีบดี ที่สำคัญคือราคาไม่แพง

เครื่องบีบแบบไฮดรอลิกใช้แรงงานจากแม่แรงโดยใช้แรงงานคน ตัวเครื่องประกอบด้วยกระบอกอัดน้ำมันที่เจาะรูขนาดเล็กเอาไว้โดยรอบเพื่อให้น้ำมันไหลออกมา เมล็ดพืชถูกอัดด้วยแผ่นอัดน้ำมันที่ยึดติดกับเกลียวบังคับและก้านเกลียวบังคับ กระบอกอัดวางอยู่บนแท่นรองอัดน้ำมัน ซึ่งแท่นรองอัดน้ำมันจะเคลื่อนขึ้นลงได้โดยแรงยกของแม่แรงที่วางอยู่ใต้แท่นรองอัดน้ำมัน





ภาพที่ 2.1 เครื่องบีบน้ำมันสบู่ดำด้วยไฮดรอลิก

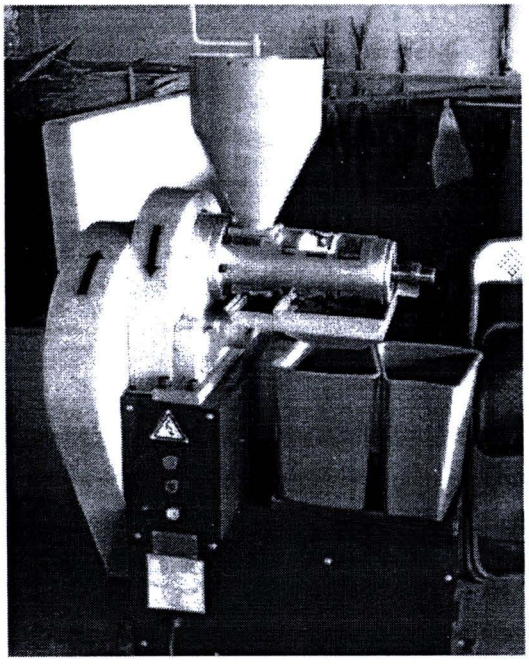
2.3 การสกัดด้วยเครื่องบีบแบบสกรูเพรส

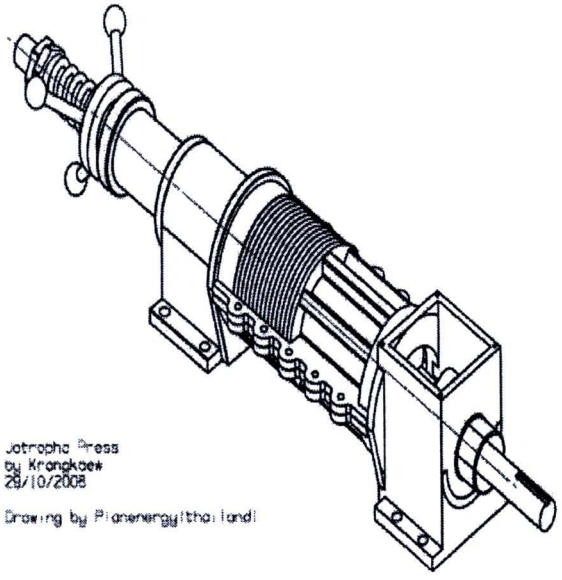
การสกัดด้วยเครื่องบีบแบบสกรูเพรส จะให้น้ำมันประมาณ 25-30% มีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15% เครื่องสกัดแบบสกรูเพรส นิยมใช้ในการนำมาสกัดน้ำมันจากพืชทั่วไป สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งจึงสามารถใช้กับเครื่องบีบแบบสกรูเพรสได้เช่นกัน เครื่องบีบประเภทนี้ประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องบีบแบบไฮดรอลิก โดยสามารถบีบได้เปอร์เซ็นต์น้ำมันมากกว่า มีน้ำมันเหลือตกค้างในกากน้อยกว่า อีกทั้งยังมีความสะดวกในการใช้

งานมากกว่า เนื่องจากเดินเครื่องด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก มีน้ำหนักน้อย ดังนั้นราคาของเครื่องจึงมีราคาแพง

เครื่องบีบแบบสกรูเพรสโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยส่วนประกอบใหญ่ๆสองส่วน คือ ส่วนบีบอัดน้ำมันกับส่วนที่ให้กำลังแก่เครื่อง โดยส่วนบีบอัดน้ำมันจะประกอบด้วยเกลียวอัดที่มีลักษณะเป็นลูกสกรูสวมอยู่ในเสื้อหรือปอกอัดสกรู ซึ่งทำหน้าที่พาเอาวัตถุดิบเข้าไปในปลอกอัด เกลียวของลูกสกรูจะพาเอาเมล็ดของสบู่ดำเข้าไปในด้านในเครื่อง ซึ่งแกนของสกรูด้านในจะใหญ่กว่าสกรูด้านนอก เพื่อลดช่องว่างภายในปลอกอัด ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ทำให้เมล็ดสบู่ดำถูกอัดกับผนังเสื้อ น้ำมันจะถูกบีบออกจากเมล็ดและส่งไปยังด้านในสุดของลูกสกรู วัตถุดิบหลังจากถูกบีบอัดแล้วไหลออกมา

การสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกและแบบเพรสนั้น จะต้องนำเมล็ดมาทุบพอแตกก่อนแล้วจึงนำไปเพิ่มความร้อนโดยการนำไปตากแดดหรือนึ่งนำเข้าตู้อบ ก่อนนำเข้าเครื่องสกัดเพื่อให้การสกัดน้ำมันทำได้ง่ายขึ้น น้ำมันที่ได้จากการสกัดจะต้องนำไปกรองสิ่งสกปกออก หรือทิ้งให้ตกตะกอนก่อนนำไปใช้งาน





ภาพที่ 2.2 เครื่องบีบน้ำมันสบู่ดำแบบสกรูเพรส

3. ประเภทของไบโอดีเซลและการพัฒนาไบโอดีเซล

3.1 ประเภทของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถแบ่งตามประเภทของน้ำมัน ที่นำมาใช้ได้ออกเป็น 3 ประเภท

3.1.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้ คือ น้ำมันพืชแท้ๆ (เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง) หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ (เช่นน้ำมันหมู) ซึ่งเราสามารถเอามาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลยโดย

ไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใดหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน

3.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

3.1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นไบโอดีเซลแท้จริงซึ่งมีการใช้ทั่วไปในต่างประเทศ อย่างเช่นในเยอรมัน สหรัฐ อเมริกา หรือแม้กระทั่งมาเลเซีย ดังนั้นถ้าจะพูดถึงคำว่า "ไบโอดีเซล" ในความหมายของสากลก็จะหมายถึงไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ ซึ่งไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานซ์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterrification) เสียก่อน นั้นคือการเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยการใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ เราสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ แต่มีปัญหาที่ต้นทุนการผลิตที่แพงนั่นเอง

3.2 การพัฒนาไบโอดีเซล

จากความพยายามของประเทศไทยที่จะแก้ปัญหาเรื่อง น้ำมัน หลังจากได้รับผลกระทบจากภาวะราคาน้ำมันที่ปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยหันไปให้ความสนใจกับการพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชโดยเฉพาะ "ไบโอดีเซล" เพื่อเป็นทางออกหนึ่งของการแก้ปัญหา ซึ่งที่ผ่านมาประเทศไทยเรามีพืชน้ำมันหลายชนิดที่สามารถผลิตไปเป็นไบโอดีเซลได้ อาทิ ถั่วเหลือง ทานตะวัน มะพร้าว ถั่วลิสง ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ ฯลฯ แต่จากตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันพืชชนิดต่างๆต่อไปนี้จะบอกถึงเหตุผลว่าทำไมเราจึงเลือกที่จะมองไปที่สบู่ดำเพื่อใช้ในการนี้ มากกว่าพืชอื่น

ตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นๆยกเว้นสบู่ดำเท่าที่มีการปลูกกันในเมืองไทยส่วนใหญ่จะเน้นประโยชน์ในเรื่องของการใช้เพื่อบริโภคเป็นหลัก และนอกจากนี้ยังพบว่าผลผลิตที่ได้ ณ ปัจจุบันยังใช้เพื่อการณ์ดังกล่าวไม่เพียงพอ จนต้องมีการสั่งนำเข้าจากต่างประเทศเพิ่มเติมด้วยในแต่ละปี เช่น น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น เพราะฉะนั้นการจะนำมาใช้ไบโอดีเซลประเทศไทยคงต้องยอมรับกับภาระการนำเข้าสำหรับส่วนนี้เพิ่มขึ้นอีกเรื่องหรือไม่ต้องมีการวางแผนการผลิต ขณะเดียวกันต้องออกนโยบายมารองรับอย่างชัดเจน นอกจากนี้คุณสมบัติที่แตกต่างอีกอย่างของสบู่ดำคือเรื่องความหนืดของน้ำมันที่พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากกว่าพืชอื่น ดังนั้นด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมาสบู่ดำจึงมีความเหมาะสมต่อการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่า และเพื่อเป็นการสนับสนุนต่อแนวคิดดังกล่าวให้มองเห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ต่อไปนี้เป็นผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพที่สำคัญในการเป็นเชื้อเพลิงของสบู่ดำเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

น้ำมัน	ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/มล.)	ความหนืด (เซนติพอยซ์)	ค่าความร้อน (กิโลจูล/กก.)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.978	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
เมล็ดน้ำมันปาล์ม	0.904	66.3	39,720
เมล็ดสบู่ดำ	0.915	36.9	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

ที่มา: พิศมัย เจนวนิชปัญจกุล (2524)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ

4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2526 วัฒนา เสถียรสวัสดิ์ ศรีวนา นิมูลชาติ และ เรณู เอี่ยมธนาภรณ์ ได้ศึกษาเรื่องการเตรียมน้ำมันสบู่ดำสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติ ที่สำคัญในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันสบู่ดำ กับ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วไว้ดังนี้

จุดวาบไฟ (Flash Point) เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันระเหยเป็นไอและเริ่มติดไฟ โดยน้ำมันสบู่ดำมีจุดวาบไฟที่อุณหภูมิ 295 °C ซึ่งสูงกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลที่ 52 °C มาก ดังนั้น จึงเป็นข้อได้เปรียบในแง่ของการเก็บรักษาและขนย้ายน้ำมันสามารถทำได้ปลอดภัยจากเพลิงไหม้มากกว่าน้ำมันดีเซล

กำมะถัน (Sulfur Content) เมื่อเผาไหม้จะกลายเป็น SO_2 & SO_3 (สาร Sulfur Dioxide) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นจะกลายเป็นกรดกำมะถันกัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ให้สึกกร่อน น้ำมันสบู่ดำมีค่ากำมะถัน 0.09 ขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่าสูงสุด 1.0 และมาตรฐานกำหนดไว้ที่ 0.80 จะเห็นได้ว่าน้ำมันสบู่ดำมีค่ากำมะถันต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้มาก ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำจะมีปัญหาสึกร่อนน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลหรือแทบไม่มีเลย

ค่าซีเทน (Cetane Index) ของน้ำมันสบู่ดำประมาณ 36 ขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่าซีเทนต่ำสุด 50 และมาตรฐานอยู่ที่ 58 ในทางทฤษฎีมีผลให้คุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition Quality) ของน้ำมันสบู่ดำต่ำ ยังส่งผลทำให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดยากขณะน้ำมันเย็น เครื่องยนต์อาจสะอึกเกิดควันขาว และน็อคเมื่อเครื่องยนต์หมุนรอบจัด ถ้าค่าซีเทนของน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 51 จะไม่มีปัญหาในการเดินเครื่องแต่อย่างใด

กากคาร์บอน (Carbon Res Idue) ที่เกิดขึ้นเมื่อส่วนที่ระเหยได้เผาไหม้ไปแล้ว น้ำมันสบู่ดำมีกากคาร์บอน 0.347 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งมีกากคาร์บอน 0.05 และยังสูงกว่ามาตรฐานที่ระบุให้มีกากคาร์บอนได้ไม่เกิน 0.005 ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดเขม่าคาร์บอนในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์มากกว่าน้ำมันดีเซล

ความหนืด (Viscosity) ที่อุณหภูมิ 40°C น้ำมันสบู่ดำมีความหนืดที่ 35.20 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันดีเซลที่มีความหนืด 1.8-5 และสูงกว่ามาตรฐานกำหนดค่าความหนืดไว้ 4.8 การที่น้ำมันมีลักษณะข้นทำให้การไหลและการฉีดละอองฝอย (Atom Ization) เกิดได้ไม่ดี ถึงแม้ความหนืดของน้ำมันสบู่ดำลดลงเมื่อเครื่องยนต์ร้อนก็ตาม แต่โมเลกุลยังใหญ่กว่าน้ำมันดีเซลมาก อันเป็นผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมของคาร์บอน (Coke Up) ที่หัวฉีดและห้องเผาไหม้ทำให้หัวฉีดอุดตันและปั๊มต้องทำงานหนักขึ้นกว่าปกติ ทำให้สึกหรอเร็วขึ้น

จุดไหลเท (Pour Point) หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุด ที่น้ำมันไหล (Flow) เข้าระบบเครื่องยนต์ได้ ฉะนั้นจุดไหลเทยิ่งต่ำยิ่งดีโดยเฉพาะในช่วงฤดูหนาวเมื่ออากาศเย็นจัดน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำจะยังทำงานได้ดี แต่น้ำมันที่มีจุดไหลเทสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศจะมีปัญหาน้ำมันไม่ไหลเข้าระบบเครื่องยนต์ จุดไหลเทของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นที่ 30°F น้ำมันดีเซลเริ่มต้นที่ 40°F จุดไหลเทของน้ำมันสบู่ดำเริ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนับว่าเป็นข้อได้เปรียบสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเมื่ออากาศเย็นขึ้น (อุณหภูมิต่ำลง)ส่วนผสมที่เหมาะสมต้องไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณภาพที่สำคัญในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

ลำดับที่	ค่า	น้ำมันสบู่ดำ	น้ำมันดีเซล		มาตรฐาน
			ต่ำสุด	สูงสุด	
1	Pour Point °F (จุดไหลเท)	30	40	50	40
2	Flash Point°C (จุดวาบไฟ)	295	52	-	66
3	Sulfur Content wt% (กำมะถัน)	0.09	-	1	0.8
4	Cetane Index (Colc)(ค่าซีเทน)	36	50	-	58
5	Carbon Residue wt% (กากคาร์บอน)	0.347	-	0.05	0.005
6	Viscosity 40°C cst (gum หรือความหนืด)	35.2	1.8	5	4.8

ที่มา: วัฒนา เสถียรสวัสดิ์ และคณะ (2526)

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

น้ำมันเบนซิน	10,600	กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม
น้ำมันดีเซล	10,170	กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม
น้ำมันสบู่ดำ	9,470	กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม
เอทิลแอลกอฮอล์	6,400	กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม

ที่มา: วัฒนา เสถียรสวัสดิ์ และคณะ (2526)

4.2 คุณสมบัติของสบู่ดำ

ในปี ค.ศ. 2004 F.K. Forson, Oduro, E.K. Oduro and Hammond Donkoh ได้ทดสอบการใช้น้ำมันสบู่ดำในสัดส่วนต่าง ๆ กับเครื่องยนต์กระบอกสูบเดี่ยวซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำแบบฉีดตรง โดยน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันสบู่ดำ (Diesel : Jateropha Oil) ในสัดส่วนต่าง ๆ กันคือ 97.4:2.6, 80:20 และ50:50 โดยปริมาตร แล้วพบว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 สัดส่วนจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสัดส่วน 97.4:2.6 โดยปริมาตร จะพบว่าเกิดมลภาวะทางอากาศต่ำที่สุด ส่วนปริมาณของกาซคาร์บอนมอนนอกไซด์ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกันเช่นกัน แต่น้ำมันดีเซลจะปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาน้อยกว่าชนิดอื่นเพียงเล็กน้อย ไม่มีนัยสำคัญ ผลการทดสอบให้เห็นว่าการใช้น้ำมันสบู่ดำสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ และนอกจากนี้การทดสอบยังให้เห็นว่าการใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ มีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนกำลังของเครื่องยนต์มากขึ้น แต่มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ลดลง ซึ่งสัดส่วน 97.4:2.6 นี้จะมีค่าของกำลัง และประสิทธิภาพทางความร้อนมากที่สุด และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีค่าซีเทนสูงอีกด้วย และสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ดีกว่าน้ำมันดีเซลปกติด้วย ซึ่งให้เห็นว่าน้ำมันสบู่ดำสามารถใช้ และเติมลงไปในน้ำมันดีเซลเพื่อช่วยเป็นตัวเร่งในการเผาไหม้ได้ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

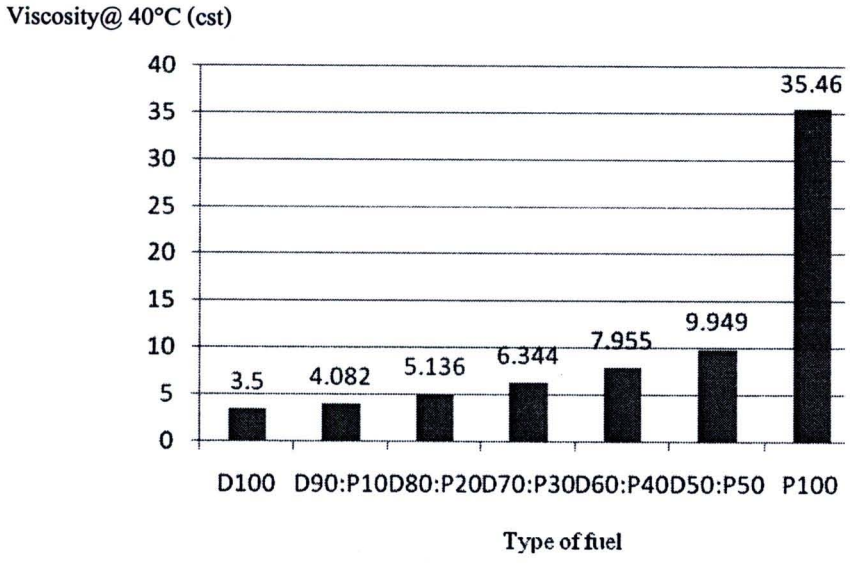
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางเคมี – ฟิสิกส์ของน้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลในสูตรต่างๆ

Property	Unit	Fuel					Tor limits
		0/100	50/50	80/20	97.4/2.6	100/0	
Density at 15 °C	Kg/m^3	917.7	891.7	876.9	868.4	866.9	870
Evaporated at 360 °C	Vol%	-	-	87	83	87	85 min.
Total sulphur	Wt%	-	-	-	-	-	1.1 max.
Colour		30	2.0	2.0	2.0	2.0	3 max.
Flash point	°C	99	94	90	88	8.6	55 min.
Kinematic viscosity at	cSt	36.9	14.6	8.2	5.9	5.7	6.5 max.
Pour point	°C	-3	+6	+12	+15	+15	+15
Total acid number	Mg KOH/g	-	-	-	0.462	0.146	1 max.
Ash	Wt%	-	-	-	-	-	0.1 max.
Diesel index	-	-	27	41	50	49	48 min.
Specificgravity	-	0.918	0.892	0.877	0.869	0.867	-
API gravity	-	22.7	27.1	28.8	31.4	31.7	-
Aniline point	°C	-	38	58.8	71	68.1	-
Calorific value	MJ/kg	42.048	43.099	44.15	45.202	45.90	-

ที่มา: Forson et al. (2004)

ในปี ค.ศ. 2004 H. Rahman และคณะได้ทำการศึกษาโดยนำ Karanja มาผลิตเป็นไบโอดีเซลและนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนผสม 20 % และ 80% ไปทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษ ผลปรากฏว่าสมรรถนะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีการลดลงของของค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะส่วนมลพิษมีค่าลดลง

ในปี พ.ศ. 2549 ชุมสันติ แสนทวีสุข และคณะ ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเพื่อให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงที่สุดต่อหนึ่งรอบการผลิต การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในการวิจัยนี้มีขั้นตอนดังนี้คือ นำน้ำมันสบู่ดำมาทำปฏิกิริยากับเมาทานอล ด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานเอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแปรที่ศึกษาครั้งนี้คือปริมาณเมทานอลโดยกำหนดสัดส่วนเชิงโมลเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 4:1, 4.5:1, 5:1 และ 6:1 โดยครั้งนี้ใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% อุณหภูมิระหว่างทำปฏิกิริยากำหนดให้อยู่ในช่วงระว่าง 60 – 65 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำอยู่ที่ 5.5:1 ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ 81% และค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้คือ 97.5% เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็กในระยะสั้นเพื่อทดสอบถึงสมรรถนะและการปล่อยปริมาณควันดำของเครื่องยนต์ พบว่าเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิง เครื่องยนต์เดินได้อย่างปกติไม่มีปัญหาเครื่องยนต์สะดุด การทดสอบสมรรถนะพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซลโดยที่ค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ต่ำกว่าเล็กน้อย และการปล่อยควันดำของเครื่องยนต์มีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 2.3 ค่าความหนืดของน้ำมันในสัดส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นค่าความหนืดของน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ได้ผสมกับน้ำมันดีเซล มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า

จากการศึกษาของกองเกษตรเคมี พบว่าน้ำมันสบู่ดำมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.9816 และของน้ำมันดีเซลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.82-6.64 ค่า Volatility ของน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 0.13 น้ำมันดีเซล 1.2 น้ำมันที่สกัดจากพืชส่วนมากมีข้อดีที่ปราศจากสารจำพวกกำมะถันและตะกั่วเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะไม่มีควันที่เป็นพิษเหมือนน้ำมันปิโตรเลียม

กรมวิทยาศาสตร์บริการกับสถาบันสิ่งแวดล้อมแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทดสอบร่วมกันปรากฏว่าน้ำมันจากสบู่ดำไม่มีซัลเฟอร์ไดออกไซน์ที่ทำให้สภาพแวดล้อมเป็นพิษ ดังนั้นหากได้รับการสนับสนุนที่ดี เกษตรกรสามารถปลูกสบู่ดำและผลิตน้ำมันใช้เอง

คณะวิทยาศาสตร์ กองเกษตรเคมี กรมวิชาการการเกษตร ได้วิเคราะห์น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ (ทวีศักดิ์ อุ่นจิติกุล, 2548)

1. การหาปริมาณน้ำมันในเมล็ดสบู่ดำโดยใช้วิธีบดเมล็ดสบู่ดำทั้งเปลือกและเนื้อในแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียม อีเทอร์ได้ผลดังนี้

- ความชื้น 7.13 %
- น้ำมันทั้งเมล็ด 34.76%
- น้ำมันเนื้อในเมล็ด 54.68%

แต่จากรายงานต่างประเทศซึ่งวิเคราะห์เมล็ดสบู่ดำที่ปลูกในต่างประเทศพบว่าเมล็ดสบู่ดำทั้งเปลือกมีน้ำมัน 38% ส่วนเนื้อในเมล็ดมี 62%

2. การหาองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันมาตรฐาน IUPAC ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตรการฟฟี่ของ JEOL model JGC – 20 K รากฏว่า ได้กรดไขมันทั้งอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

- กรดปาล์มมิติค (Palmitic Acid) 16.17%
- กรดสเตียริก (Stearic Acid) 21.28%
- กรดโอลิอิค (Oleic Acid) 44.88%
- กรดลิโนลิอิค (Linoleic Acid) 33.84%
- รวมกรดไขมันอิ่มตัว 78.72%

การที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณมากนี้ ซึ่งคุณสมบัติไม่แข็งตัวเมื่ออากาศเย็น จากรายงานการศึกษาน้ำมันสบู่ดำ พบว่าน้ำมันสบู่ดำยังคงใสที่อุณหภูมิต่ำ และแข็งตัวที่อุณหภูมิ -7°C ว่าสามารถใช้น้ำมันนี้เมื่อมีอากาศหนาวได้ดี

3. การหาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีของน้ำมันสบู่ดำด้วยวิธีมาตรฐาน AOCS ยกเว้นค่าความหนืดวิเคราะห์โดยวิธี Garder ปรากฏผลดังนี้

- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ที่ 25 °C 0.9136
- ดัชนีหักเห (Refractive Index) ที่ 25 °C 1.4670
- ค่ากรด (Free Fatly Acid, As Oleic) 4.80
- ค่าสปอนนิฟิเคชั่น (Saponification) 197.13
- ค่าไอโอดีน (Lodine Value, Wijs) 97.08
- ปริมาณน้ำและสิ่งที่ระเหยได้ที่ 105 °C (Water .107 & Volatile Maiter) 0.107

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

- ค่าความหนืด (Viscosity) ที่ 25 °C (Gerder) 50 CS

5. การใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยการใช้น้ำมันสบู่ดำอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิต โดยการนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก ซึ่งผลการศึกษาจำนวนมาก ชี้ให้เห็นว่า ผลผลิตน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลของรถไถเดินตามได้ โดยไม่ต้องปรับปรุงเครื่องยนต์ (ชุมสันติ แสนทวีสุข และคณะ, 2548; สมพงษ์ เจษฎาธรรมสถิต และคณะ, 2551; Forson et al., 2004; D. Agarwal and A.K. Agarwal. 2007; Kaul et al., 2007)

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาข้างต้น เป็นผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการวัดความสามารถด้านพลังงานของน้ำมันสบู่ดำโดยตรง หรือใช้วิธีการวัดผ่านความสามารถของเครื่องยนต์เป็นค่าแรงบิดและกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันสบู่ดำน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง แม้ว่าผลการทดสอบค่าแรงบิดและกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์ดังกล่าว จะช่วยให้นักวิจัยสามารถอนุมานหรือคาดคะเนต่อไปได้ว่า สามารถนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้กับรถไถเดินตามซึ่งใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวเป็นต้นกำลังได้ แต่จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ยังไม่พบผลการทดสอบการใช้น้ำมันสบู่ดำในรถไถเดินตามในแปลงเกษตรกรรม แม้ว่าจะมีเกษตรกรทดลองใช้กันเองส่วนบุคคล ดังปรากฏตามข่าวในหนังสือพิมพ์ แต่ก็ไม่มีการเก็บข้อมูลการทดลองใช้อย่างเป็นระบบ เช่นที่ปฏิบัติในงานวิจัย ทำให้ยังมีประเด็นข้อสงสัย ไม่แน่ใจ สำหรับเกษตรกรผู้ที่สนใจจะใช้น้ำมันสบู่ดำในรถไถเดินตาม

5.1 การทดสอบน้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว

กนกอร รจนากิจ และคณะ (2546) ได้นำน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันมะพร้าวมาผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลนั้นนำไบโอดีเซลที่อัตราส่วนผสม 10% 50% 60% 90% และ 100% ไปใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลในระยะสั้นผลการทดลองพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์ได้โดยไม่เกิดปัญหาต่อเครื่องยนต์ ซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและควันดำมากกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย

Mahoamad et al. (2002) ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วทดสอบโดยการนำไบโอดีเซลมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 75% 50% 25% และไบโอดีเซล 100% เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ในส่วนของประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และการปล่อยไอเสีย ผลการทดสอบพบว่าน้ำมันดีเซลผสมมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานที่น้อยกว่าให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สูง เครื่องยนต์เดินเรียบไม่มีปัญหาต่อเครื่องยนต์ และยังมีคาร์บอนมอนนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนต่ำอีกด้วย

วัชรพล ปุณขันธ์ (2550) ได้ศึกษาหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันสบู่ดำสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วพบว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วแรงบิดและกำลังเฉลี่ยที่ส่งออกมาจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันผสมไบโอดีเซลมีค่ามากกว่าน้ำมันผสมสบู่ดำประมาณ 2.3% หากพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ความเร็วรอบใช้งานพบว่าการใช้น้ำมันผสมไบโอดีเซลมีน้อยกว่าการใช้น้ำมันผสมสบู่ดำ ส่วนค่าของประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบใช้งานพบว่าการใช้น้ำมันผสมสบู่ดำมีค่ามากกว่าน้ำมันผสมไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 2.5

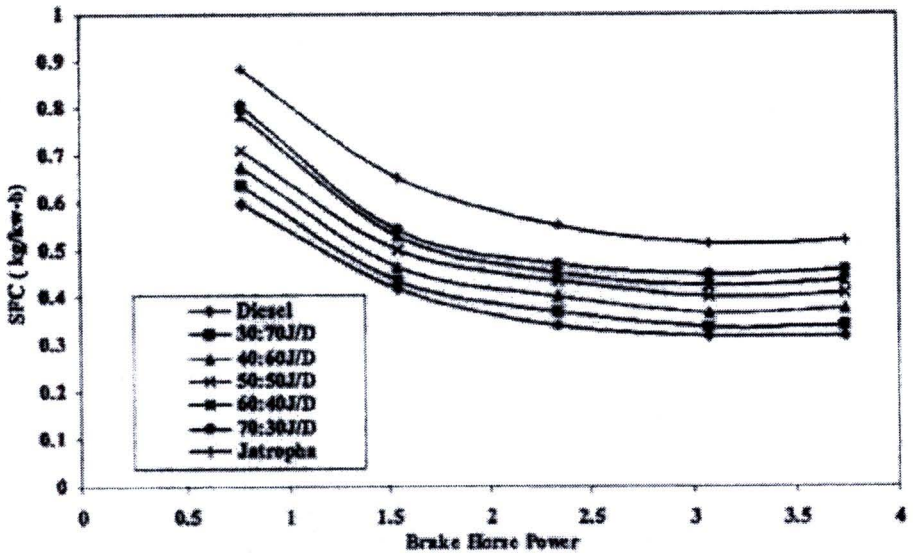
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 13 ก.ย. 2555
เลขทะเบียน 249575

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันผสมไบโอดีเซลและน้ำมันผสมสบู่ดำ

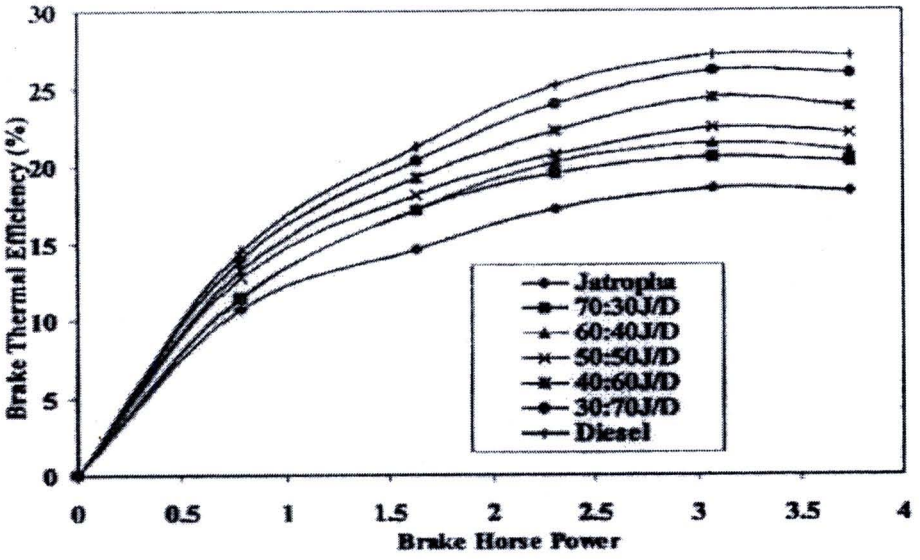
ลำดับ	ข้อมูลเปรียบเทียบ	ผลการเปรียบเทียบ
1	แรงบิด	น้ำมันผสมไบโอดีเซล > น้ำมันผสมสบู่ดำ
2	กำลัง	น้ำมันผสมไบโอดีเซล > น้ำมันผสมสบู่ดำ
3	อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะ	น้ำมันผสมไบโอดีเซล < น้ำมันผสมสบู่ดำ
4	ประสิทธิภาพทางความร้อน	น้ำมันผสมไบโอดีเซล < น้ำมันผสมสบู่ดำ

5.2 การทดสอบน้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์สูบเดียว

Pramanik (2003) ได้ทดสอบการใช้น้ำมันจากสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ ซึ่งโดยปกติน้ำมันสบู่ดำจะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลแต่สามารถทำให้มีความหนืดลดลงได้หากนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนที่เหมาะสม จากการทดสอบพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอุณหภูมิแก๊สไอเสียมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดของสบู่ดำลดลงจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่วนประสิทธิภาพทางความร้อนเมื่อใช้สัดส่วนของน้ำมันสบู่ดำที่มากกว่า 50% โดยปริมาตร จะให้ผลของประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าน้ำมันสบู่ดำสัดส่วน 40 – 50% สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์ใดๆ หรือสามารถลดความหนืดของน้ำมันสบู่ดำโดยทำให้น้ำมันร้อนก่อนผสม ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สามารถได้ดังแสดงในภาพ 2.4 และ 2.5



ภาพที่ 2.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับแรงม้าของเครื่องยนต์



ภาพที่ 2.5 ประสิทธิภาพทางความร้อนกับแรงม้าของเครื่อง

จากภาพที่ 2.4 พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันสบู่ดำมีค่ามากว่าน้ำมันดีเซลทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมันสบู่ดำมีค่าความร้อนที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล และจากภาพที่ 2.5 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของน้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ ณ แรงม้าเดียวกันอีกด้วย และจากการทดสอบใช้น้ำมันจากสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลกระบอกสูบเดียวแบบฉีดตรงซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ โดยได้ทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันให้กับหัวฉีดจะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น และลดปริมาณไฮโดรคาร์บอน รวมถึงปริมาณของควันดำน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่หากมีการเพิ่มการหมุนเวียนอากาศจะมีผลต่อการต่อการปล่อยแก๊สไอเสียเพียงเล็กน้อย และเมื่อทดสอบที่สภาวะเดียวกันพบว่าน้ำมันจากสบู่ดำเผาไหม้ช้ากว่าน้ำมันดีเซล หากเพิ่มอัตราการฉีดเชื้อเพลิงจะพบว่าการปล่อยแก๊สไอเสียเมื่อใช้น้ำมันสบู่ดำจะต่ำกว่าในน้ำมันดีเซล และที่สภาวะ Full Output พบว่าการปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ของน้ำมันสบู่ดำมีค่า 532 ppm ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 798 ppm ส่วนค่าของไนตริกออกไซด์ และควันดำของน้ำมันสบู่ดำมีค่า 1162.5 ppm และ 2 BSU ตามลำดับ ในขณะที่ที่น้ำมันดีเซลมีค่า 1760 ppm และ 2.7 BSU ตามลำดับโดยจะเห็นว่าจุดเด่นของน้ำมันจากสบู่ดำจะมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าน้ำมันดีเซลอย่างเห็นได้ชัด ทำให้น้ำมันจากสบู่ดำเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าน้ำมันดีเซล

Senthil Kumar et al. (2003) ได้ทำการศึกษาวิธีต่างๆ จากการใช้น้ำมันพืช (น้ำมันสบู่ดำ) และเมทานอล เช่นวิธีการผสม และวิธีการที่ผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันซึ่งทั้ง 2 เชื้อเพลิงถูกนำมาศึกษาในการทดลองนี้ โดยใช้เครื่องยนต์กระบอกสูบเดียวแบบฉีดตรง แล้วนำมาทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 1,500 rpm โดยแปรตามกำลังที่ส่งออก พบว่าการใช้ระบบเชื้อเพลิงแบบ 2 ชนิดเชื้อเพลิงจะใช้เมทานอลต่อสบู่ดำสัดส่วน 3/7 โดยปริมาตร ซึ่งใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ใช้เตรียมสารตั้งต้นทำเอสเตอร์ของน้ำมันสบู่ดำ ส่วนประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบเชื้อเพลิง 2 ชนิด และแบบเอสเตอร์ดีกว่าเชื้อเพลิงแบบผสม โดยเพิ่มจาก 27.4% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางความร้อนของน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ได้ผสม ส่วนประสิทธิภาพทางความร้อน 29% เป็นของน้ำมันเอ

สเตอร์และประสิทธิภาพทางความร้อน 28.7% เป็นของระบบเชื้อเพลิงแบบ 2 ชนิด ซึ่งมีปริมาณควันดำลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ได้ผสมอะไร ซึ่งค่าของปริมาณควันดำที่ปล่อยออกมามีค่า 4.4 Bosch Smoke Unit (BSU) เป็นของน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ได้ผสม 4.1 BSU เป็นของเชื้อเพลิงผสม, 4 BSU เป็นของเอสเตอร์สบู่ดำ และ 3.5 BSU เป็นของระบบเชื้อเพลิงแบบ 2 ชนิด ส่วนระดับไนตริกซ์ออกไซด์ของดีเซลต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันสบู่ดำและจะลดลงอีกเมื่อใช้ระบบเชื้อเพลิง 2 ชนิด และผสมกับเมทานอล นอกจากนี้ระบบเชื้อเพลิง 2 เชื้อเพลิงจะมี HC และ CO สูงกว่าเชื้อเพลิงเอสเตอร์ละเชื้อเพลิงผสม และการหน่วงการจุดระเบิดจะสูงมากเมื่อใช้น้ำมันสบู่ดำไม่ผสม โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เชื้อเพลิง 2 ระบบ และจะลดลงหากใช้เอสเตอร์ ส่วนความดันสูงสุดอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในทุกชนิดเชื้อเพลิงสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ได้ผสมอะไร ซึ่งน้ำมันสบู่ดำและเอสเตอร์มีการแพร่ของการเผาไหม้สูงกว่าเมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงระบบ 2 เชื้อเพลิงให้ผลการเผาไหม้ก่อนมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการทรานเอสเตอร์ริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำและเมทานอลสามารถนำมาเพิ่มสมรรถนะเพื่อเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลให้ใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงได้

ชุมสันติ แสนทวีสุข และคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยได้นำสบู่ดำ 100 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซล 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 และ 50:50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบ 1 สูบ การศึกษาคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง เทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดได้แก่ ค่าซีเทนนัมเบอร์ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อน ปริมาณกากคาร์บอน จุดวาบไฟ ค่าความหนืด ได้จากรายงานผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่ แรงบิด กำลังงานของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน อุณหภูมิของไอเสีย จากการศึกษานี้พบว่าน้ำมันสบู่ดำมีสมบัติทางกายภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและยังสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำมันดีเซล ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบหาค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์กับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าเครื่องยนต์ให้ค่าสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล

ชุมสันติ แสนทวีสุข และคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำน้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล ชนิด 1 สูบ ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้แก่แรงบิดกำลังงานเบรกเครื่องยนต์ได้แก่แรงบิด กำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ตรวจวัดปริมาณควันดำ ศึกษาสมบัติทางกายภาพเทียบกับน้ำมันดีเซลจำหน่ายตามท้องตลาด ได้แก่ ค่าดัชนีซีเทน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อน จุดวาบไฟ ค่าความหนืด ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบหาค่ารสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่าเครื่องยนต์ให้ค่าสมรรถนะใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล ปริมาณการปล่อยควันดำในไอเสียมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ทางราชการกำหนดและน้ำมันสบู่ดำมีสมบัติทางกายภาพการเป็นเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำมันดีเซล

การทดสอบน้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์คูโบต้า 1 สูบ แบบลูกสูบนอน ระบบ 4 จังหวะขนาด 7 แรงม้า เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลด้วยการทำงานรอบต่อนาทีเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

การทำงานของเครื่องยนต์ (รอบ/นาที)	อัตราการกินน้ำมันสบู่ดำ (ซีซี/ชม.)	อัตราการกินน้ำมันดีเซล (ซีซี/ชม.)
1500	498	500
1600	494	498
1700	528	540
1800	576	586
1900	614	629
2000	665	696
2100	720	758
2200	770	804
2300	852	869

ที่มา: ทวีศักดิ์ อุ่นจิตติกุล (2548)

จากการทดสอบโดยการใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กคูโบต้า ET 70 ปรากฏว่าเครื่องยนต์เดินเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีการน็อค สามารถเร่งเครื่องยนต์ได้ตามปกติและการใช้น้ำมันสบู่ดำสิ้นเปลืองน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย

ตารางที่ 2.7 การทดสอบและวิเคราะห์ไอเสียเครื่องยนต์น้ำมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

เครื่องยนต์	รอบ/นาที	น้ำมันสบู่ดำ		น้ำมันดีเซล	
		ควันดำ(%)	คาร์บอนมอนน็อกไซน์(ppm)	ควันดำ(%)	คาร์บอนมอนน็อกไซน์(ppm)
คูโบต้า 7 แรงม้า	840	12	550	10.5	650
	2160	13	450	14.5	750
	2600	12	725	12.5	500
ยันม่า 18 แรงม้า	1000	11.5	500	10	500
	1600	14.5	650	15.5	500
	2200	18.5	650	19	600
เฉลี่ย	1733	13.42	587	13.67	583

ที่มา: ทวีศักดิ์ อุ่นจิตติกุล (2548)

การทดสอบไอเสียจากเครื่องยนต์ จากการทดสอบและวิเคราะห์ไอเสียของเครื่องยนต์ทั้ง 2 เครื่อง พบว่า ค่าควันดำของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำ เฉลี่ย 13.42% ดีเซล 13.67% ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 40% ส่วนคาร์บอนมอนน็อกไซด์ จากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำเฉลี่ย 587 ppm ดีเซล 583 ppm ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 6% หรือ 60,000 ppm ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซน์ สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำไม่พบ ในขณะที่น้ำมันดีเซลพบ 125 ppm

ผลการตรวจสอบหาความสึกหรอของเครื่องยนต์เมื่อเดินเครื่องครบ 1,000 ชั่วโมง เจ้าหน้าที่บริษัท สยามคูโบต้าดีเซล จำกัด ซึ่งเป็นเจ้าของเครื่องยนต์คูโบต้า ได้ถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ อาทิ เสื้อสูบ ลูกสูบ แหวน ลิ้นหัวฉีด ฯลฯ ออกมาตรวจสภาพ ผลปรากฏว่าการสึกหรอของชิ้นส่วนอยู่ในเกณฑ์ปรกติตามมาตรฐานและยังไม่มียางเหนียวจับอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การตรวจสอบชิ้นส่วนสำคัญของเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า ET 70 – 026159

ชื่อชิ้นส่วน	ค่ามาตรฐาน (มิลิเมตร)	
		0.22
1. Cylinder Head (I.D of Valve Guide	7	0.01
		0.025
2. Valve (O.D. of valve stem)	7	0.04
		0.016
3. Rocker Arm Shaft (O.D of Shaft)	7	0.027
		0.05
4. Rocker Arm (I.D. of Rocker Arm Bushings	14	0.002
		0.016
5. Tappet (O.D. of Tappet Stem)	12	0.034
		0.019
6. Cylinder liner (I.D. of Cylinder Liner)	38	0
7. Piston (O.D of Piston Pin)	38	0
		0.011
8. Piston Pin (O.D. of Piston Pin)	25	0.022
		0.04
9. Connecting Rod (I.D. of Small End Bushing)	25	0.025
10. Piston Ring (RingGap) 1st	0.2	0.2
2nd		0
3rd		0.2
4th(oil Ring)		0
		0.025
11. Crack Shappt (O.D. of Crank Pin)	44	0.041
		0.013
(O.D. of Crank Shaft Journals)	40	0.002
		0.025
12. Oil Filler Ring (I.D. of filler Ring)	40	0

ที่มา: ทวีศักดิ์ อุ่นจิตติกุล (2548)

6. งานวิจัยด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสบู่ดำ

การปลูกสบู่ดำ เมล็ดสบู่ดำที่แก่เต็มที่ไม่มีการพักตัว เมื่อนำไปเพาะในดินจะงอกทันที ดังนั้นการเพาะปลูกหรือการขยายพันธุ์สบู่ดำจึงใช้เมล็ดได้ ส่วนการปักชำก็สามารถทำได้ เพราะสบู่ดำมีการแตกรากได้ง่าย การปลูกสบู่ดำทำได้ 3 แบบคือการเพาะเมล็ด การปักชำกิ่ง และการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ เกษตรกรสามารถทำได้ทั้ง 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยควรปลูกในฤดูฝน เพื่อให้ตั้งตัวได้ในช่วงแรก ระยะปลูกที่เหมาะสมมีมีขนาดเริ่มต้นที่ 2 x 2 เมตร ถึง 3 x 3 เมตร หรือ 4 x 4 เมตร ในทางปฏิบัติ ไม่มีความต้องการให้สบู่ดำมีความสูงมากนัก เพราะเก็บเกี่ยวผลผลิตลำบาก จึงนิยมให้มีระยะระหว่างต้นกว้างและใช้วิธีการตัดแต่งให้มีการแตกกิ่งก้านสาขาเมื่ออายุของสบู่ดำ 3–4 เดือน สบู่ดำสามารถออกดอกและผลิตเมล็ดได้ โดยเฉพาะการปลูกจากกิ่งปักชำจะให้ดอกเร็วกว่าการปลูกจากเมล็ด

รายงานการศึกษาของชำนาญพบว่าหากปลูกสบู่ดำตามธรรมชาติ ในปีแรกจะให้ผลผลิต 40-80 กิโลกรัมต่อไร่ และปีที่2 ได้ผลผลิตประมาณ 200 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ ความอุดมสมบูรณ์ของดินและสภาพแวดล้อมการดูแลรักษา ทำให้สามารถเก็บผลผลิตไปได้เรื่อยๆ เพราะสบู่ดำเป็นไม้ยืนต้น มีอายุ 50-60 ปี สามารถปลูกสบู่ดำเป็นสวนป่าสร้างความชุ่มชื้นให้ผืนดินที่แห้งแล้งได้ เนื้อไม้ก็ยังใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างอีกด้วยและสกัดเมล็ดสบู่ดำแห้ง 4 กิโลกรัม ได้น้ำมันประมาณ 1 ลิตร หรือ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเมล็ด

สำหรับการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการวิจัยคัดเลือกพันธุ์สบู่ดำเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งดำเนินการโดยสมาคมนิสิตเก่ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในพระราชูปถัมภ์ จนถึงเดือนกรกฎาคมพ.ศ.2548 ในพื้นที่ 5 แห่ง 3 จังหวัด คือ สุรินทร์ สกลนคร และขอนแก่น นั้น ปรากฏว่า การปลูกสบู่ดำในทั้ง 5 พื้นที่เปรียบเทียบกับแปลงของเกษตรกรที่จังหวัดเพชรบูรณ์ 2 ราย 2 พื้นที่ พบว่า สบู่ดำอายุประมาณ 1 ปี ผลผลิตยังไม่ชัดเจน มีเพียง 2 พื้นที่ที่เริ่มให้ผลผลิต คือ สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรที่ 3 ตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น และสำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 3 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

เมื่อพิจารณาทางด้านต้นทุน การผลิตเมล็ดสบู่ดำต่อไร่ต่อปีของปีที่ 1 ปรากฏว่ามีต้นทุนการผลิตตามรายการที่ต้องการข้อมูล ดังนี้

ต้นทุนการผลิต

1. ต้นทุนคงที่

1) ค่าใช้ที่ดิน
2) ค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือและอุปกรณ์

2. ต้นทุนผันแปร

1) ค่าเตรียมดิน (ไถ) รวมค่าน้ำมันเชื้อเพลิง
2) ค่าเตรียมพันธุ์และปลูก
3) ค่าดูแลรักษา (ใส่ปุ๋ย ตัดแต่งกิ่ง ดายหญ้า ให้น้ำ)
4) ค่าเก็บเกี่ยว
5) ค่าขนย้ายผลผลิต
6) ค่าวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ พันธุ์ (ไม่เป็นเงินสด) ปุ๋ย สารควบคุมศัตรูพืชและวัชพืช น้ำมันเชื้อเพลิงและหล่อลื่น

7) ค่าอาหารสำหรับคนงาน

8) ค่าซ่อมแซมอุปกรณ์การเกษตร

9) ค่าอื่นๆ (ระบุ) ได้แก่ ถุงชำ แกลบดำ

10) ค่าเสียโอกาสของเงินทุน ไม่เป็นเงินสด (1 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนผันแปรรวมที่เป็นเงินสด)

นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้รวบรวมข้อมูลต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำของแปลงทดสอบทั้ง 7 แปลง ในปี พ.ศ. 2548 (ตารางที่ 2.9) ดังนี้

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำของแปลงทดสอบทั้ง 7 แปลงในปี พ.ศ. 2548

สถานที่	ต้นทุนการผลิต (บาท)
1. มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	7,939.28
2 . สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 3 ตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	5,974.63
3. ศูนย์วิจัยพืชไร่จังหวัดขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	3,733.56
4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ตำบลนอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์	5,701.46
5. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร อำเภอเมืองจังหวัดสกลนคร	3,867.41
6. นายมงคล ปิ่นทวาย อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์	1,361.57
7. นายชโลม พันธุ์ประเสริฐ์ อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์	2,210.94

ในการปลูกสบู่ดำของเกษตรกรตัวอย่าง 2 ราย ในตำบลภูน้ำหยดอำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเพิ่งปลูกเมื่อเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2548 นั้น มีต้นทุนการผลิตทั้งหมดประมาณ 1,362 และ 2,211 บาทต่อไร่โดยต้นทุนส่วนใหญ่ ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์เป็นต้นทุนผันแปร (ตารางที่ 2.9)

ต้นทุนผันแปร มีรายการที่สำคัญๆ คือ ค่าปุ๋ย ค่าดูแลรักษา ค่าเตรียมดิน ค่าเตรียมพันธุ์และค่าปลูก ต้นทุนการผลิตที่ไม่เป็นเงินสดมีเพียงค่าเสื่อมราคา เครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าพันธุ์ซึ่งได้มาฟรี และค่าเสียโอกาสของเงินทุน คิดเป็นเพียงไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนทั้งหมด ส่วนรายได้จากผลการผลิตยังไม่มีเพราะสบู่ดำปลูกได้เพียง 2 เดือน ยังไม่ได้ผลผลิต

จากการศึกษาต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำต่อไร่ต่อปีของส่วนราชการใน 5 พื้นที่ ของเกษตรกรตัวอย่าง 2 ราย (ตารางที่ 2.9) สามารถนำมาคำนวณหาระดับผลการผลิตคุ้มทุนและระดับราคาคุ้มทุน โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{ระดับต้นทุน} = \frac{\text{ต้นทุนการผลิตรวมต่อไร่ (บาท)}}{\text{ราคาผลผลิตต่อกิโลกรัม (บาท)}}$$

$$\text{ระดับราคาคุ้มทุน} = \frac{\text{ต้นทุนการผลิตรวมต่อไร่ (บาท)}}{\text{ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)}}$$

ระดับผลผลิตคุ้มทุน หมายถึง ระดับผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ที่ทำให้ผู้ผลิตมีรายได้จากการผลิตเท่ากับต้นทุนในการผลิต ผลการคำนวณระดับผลผลิตคุ้มทุน ปรากฏในตารางที่ 2.10 แสดงข้อมูลต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำและระดับผลผลิตคุ้มทุนของแปลงทดสอบทั้ง 7 แปลง ในปี พ.ศ. 2548

ระดับราคาคุ้มทุน หมายถึง ระดับผลผลิตเฉลี่ยต่อกิโลกรัมที่ผู้ผลิตขายได้แล้วทำให้ผู้ผลิตได้รับรายได้เท่ากับต้นทุนในการผลิต จึงยังไม่ได้รายงานในครั้งนี้ แต่ถึงอย่าไร หากเกษตรกรใช้พันธุ์หรือสายพันธุ์ที่ได้จากการทดสอบแล้วว่าให้ผลผลิตสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ (ชำนาญ ฉัตรแก้ว และชาญวิทย์ ม่วงมิตร, 2549) มาปลูกทำให้ผลผลิตเกินต้นทุน หรือได้กำไร

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำและระดับผลผลิตคุ้มทุนของแปลงทดสอบทั้ง 7 แปลง (พ.ศ.2548)

สถานที่	ต้นทุนการผลิต รวม (บาท/ไร่)	ต้นทุนคงที่ (บาท/ไร่)	ต้นทุนผันแปร (บาท/ไร่)	ระดับผลผลิตคุ้มทุน (กก.ไร่)
1. มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	5,701.46	203.60	5,497.86	814.49
2. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 3 ตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	3,867.41	165.86	3,701.55	552.49
3. ศูนย์วิจัยพืชไร่จังหวัดขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	5,974.63	392.85	5,681.78	853.52
4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ตำบลนอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์	3,733.56	31.00	3,702.56	533.36
5. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร	7,393.28	48.54	7,344.74	1,056.18
6. นายมงคล ปิ่นทวาย อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์	1,361.57	5.00	1,356.57	194.51
7. นายชโลม พันธุ์ประเสริฐ์ อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์	2,210.94	5.00	2,205.94	315.85

หมายเหตุ : ราคาผลผลิตเมล็ดสบู่ดำ กิโลกรัมละ 7 บาท