การศึกษาผลกระทบของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อสภาพภูมิอากาศการใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ของประเทศไทย

A Study of Impacts of Biofuel Production on Climate, Land-use, Energy, and Water for Thailand

บัญชา วัฒนะ [1] ยงยุทธ ชนบดีเฉลิมรุ่ง [1,2] สุพรรณนิกา วัฒนะ [1,2] และประพิธาริ์ ธนารักษ์ [3]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก Email: buncha_w@hotmail.com

[2] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก

Email: chonbyy@yahoo.com, supannikayo@nu.ac.th

[3]วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก E-mail: prapitat@nu.ac.th

บทคัดย่อ **- เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่จะช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ เสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจในภาคการเกษตร ด้วยเหตุนี้รัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งทำให้เกิดการขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงานอย่างมากเพื่อเพิ่มผลผลิต ทั้งนี้หากพิจารณาวัฏจักรการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแล้วจะพบว่ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรธรรมชาติหลายด้าน ทั้งการใช้ที่ดิน น้ำ และพลังงาน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาผลกระทบของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อการใช้ทรัพยากรดังกล่าว ซึ่งพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาถึงผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรด้านใดด้านหนึ่ง โดยยังขาดการพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ที่มีต่อกันของทรัพยากรดังกล่าว ซึ่งจะส่งผลให้การวางแผนการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพยังขาดการประเมินผลกระทบต่อความสมดุลของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้ ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนากรอบการศึกษาถึงความสัมพันธ์และวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อการใช้ทรัพยากรธรรมชาติแบบบูรณาการ (integrated framework) เพื่อให้การวางแผนพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นไปอย่างยั่งยืน**

คำสำคัญ - เชื้อเพลิงชีวภาพ สภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ การประเมินวัฏจักรชีวิต

Abstract **- Biofuels are renewable energy sources that can help reduce oil import dependency, enhance the security of energy, help mitigate green house gas emissions, and promote economic development in the agricultural sector. Consequently, the Thai government has a policy to promote biofuel production. Such a policy has resulted in substantial expansion of agricultural land for increasing energy crop production. Considering the life cycle of biofuel production, it appears that biofuel production has an effect on the use of natural resources such as land, water, and energy, including an impact on climate change. This paper presents a review of study of the impacts of biofuel production on the use of natural resources. A review reveals that most studies focused on a limited perspective by looking at each system separately. Such a limited perspective did not take into consideration the implications**

arising from the interdependencies between resources. As a result, biofuel development planning appears to lack of an assessment of the impacts on balancing the use of natural resources. There is, therefore, a need to develop an integrated framework for analysing the implications of biofuel production on the use of natural resources in order to achieve a sustainable development of biofuel planning.

Keywords - Biofuels, Climate, Land Use, Water Footprint, Life Cycle Assessment

1. บทนำ

ในปัจจุบันสถานการณ์ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกมีความผันผวนและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ประเทศไทยซึ่งพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศเป็นหลัก ได้รับผลกระทบเป็นอย่างมาก เพื่อให้เกิดความมั่นคงทางด้านพลังงาน รัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนโดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuels) ในภาคขนส่ง ซึ่งเป็นภาคที่มีสัดส่วนการใช้น้ำมันมากที่สุดถึงร้อยละ 90 และมีสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายถึงร้อยละ 36 โดยมีเป้าหมายเพื่อทดแทนปริมาณการใช้น้ำมันให้ได้ร้อยละ 44 ภายในปี พ.ศ. 2564 [1] ซึ่งนอกจากจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในการนำเข้าน้ำมันได้แล้ว การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การทำการเกษตร มีทรัพยากรธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ ทำให้มีศักยภาพในการเพาะปลูกพืชเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ (feedstock) ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ สำหรับพืชพลังงานที่นิยมปลูกกันมากในประเทศไทยได้แก่ อ้อยและมันสำปะหลัง เพื่อใช้สำหรับผลิตเป็นไบโอเอทานอล และปาล์มใช้สำหรับผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยได้มีการปรับปรุงและพัฒนาพันธุ์เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของดินในแต่ละพื้นที่ รวมถึงเทคนิคการปลูกและการให้น้ำอย่างเหมาะสม เพื่อทำให้ได้ผลผลิตต่อไร่ (yield) สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามการส่งเสริมการปลูกพืชพลังงานในปริมาณที่มาก (large scale) ในระดับที่สามารถทดแทนน้ำมันได้ตามเป้าหมายนั้น นอกจากจะต้องใช้ทรัพยากรที่ดินและน้ำในการเพาะปลูกเพิ่มขึ้นแล้ว ยังต้องมีการใช้พลังงาน เช่น น้ำมันดีเซลในการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน และการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการแปรรูปวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานฟอสซิลและทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) บทความนี้จึงได้ทำการศึกษา รวบรวม และทบทวนวรรณกรรมที่ได้มีการศึกษาวิจัยมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ เพื่อให้เกิดแนวทางการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างยั่งยืน

2. สถานการณ์พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพของประเทศไทย

สถานการณ์พลังงานเชื้อเพลิงของประเทศไทย จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย พ.ศ. 2554 [2] ดังตารางที่ 1 พบว่าในปี พ.ศ. 2554 มีปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินออกเทน 95 เฉลี่ยวันละ 0.11 ล้านลิตร น้ำมันแก๊ซโซฮอล์ (รวม E10 E20 และ E85) เฉลี่ยวันละ 11.54 ล้านลิตร น้ำมันดีเซลเฉลี่ยวันละ 50.64 ล้านลิตร และ น้ำมันไบโอดีเซล B5 เฉลี่ยวันละ 1.9 ล้านลิตร (ทั้งนี้เนื่องจากสถานการณ์การขาดแคลนน้ำมันปาล์มอย่างรุนแรงในช่วงปลายปี พ.ศ. 2553 จนถึง พ.ศ. 2554 ทำให้ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลลดลงเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2552 และพ.ศ. 2553 ที่มีการใช้น้ำมันไบโอดีเซล B5 เฉลี่ยวันละ 22.35 และ 19.32 ล้านลิตรตามลำดับ)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินออกเทน 95 มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีราคาแพง และรถรุ่นเก่าที่ไม่รองรับน้ำมันแก๊สโซฮอล์หันไปติดตั้งก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) หรือก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (NGV) ซึ่งพบว่าตั้งแต่ พ.ศ. 2551 จนถึงพ.ศ. 2554 มีปริมาณการใช้ก๊าซ LPG และ NGV เพิ่มขึ้นร้อยละ 24 และ 240 ตามลำดับ [2] ในส่วนของปริมาณการใช้น้ำมันแก๊ซโซฮอล์เกือบทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยกเว้นน้ำมันแก๊ซโซฮอล์ 95 เนื่องจากมีราคาสูงกว่าแก๊ซโซฮอล์ชนิดอื่นๆ และรถรุ่นใหม่ๆสามารถใช้น้ำมันแก๊ซโซฮอล์ชนิดอื่นซึ่งมีราคาถูกกว่าได้ แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนของการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพต่อเชื้อเพลิงฟอสซิลยังถือว่าน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากปริมาณการใช้น้ำมันน้ำมันแก๊ซโซฮอล์ E20 และ E85 ซึ่งเป็นน้ำมันเบนซินที่มีส่วนผสมของเอทานอลร้อยละ 20 และ 85 โดยปริมาตร ตามลำดับ ยังมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ

น้ำมันแก๊ซโซฮอล์ 91 และ 95 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย พ.ศ.2555 [3]

เนื่องจากความกังวลต่อสถานการณ์ราคาน้ำมันในตลาดโลกและความมั่นคงทางด้านพลังงาน รัฐบาลจึงได้มีนโยบายจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (พ.ศ. 2555-2564) หรือ Alternative Energy Delvelopment Plan (AEDP: 2012-2021) ขึ้นในปี พ.ศ. 2553 โดยกำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนคิดเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดภายใน 10 ปี ซึ่งในส่วนของการใช้พลังงานทดแทนในภาคขนส่งได้กำหนดเป้าหมายที่จะผลิตไบโอเอทานอลให้ได้ 9 ล้านลิตรต่อวัน และไบโอดีเซล (B100) 5.97 ล้านลิตรต่อวัน รวมถึงเชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซล 25 ล้านลิตรต่อวัน ภายในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งต่อมาในปี พ.ศ. 2556 คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ได้มีมติปรับเป้าหมายแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกใหม่ [4] โดยในส่วนของเชื้อเพลิงชีวภาพได้ปรับเพิ่มเป้าหมายการผลิตไบโอดีเซลเป็น 7.20 ล้านลิตร ต่อวันและปรับเป้าหมายเชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลหรือไบโอไฮโดรจีเนตเต็ดดีเซล (Bio-Hydrogenated-Diesel: BHD) ลงเป็น 3 ล้านลิตรต่อวัน ดังนั้น เพื่อให้สามารถผลิตได้ตามเป้าหมายดังกล่าว จะต้องเพิ่มการผลิตไบโอเอทานอลและไบโอดีเซลเฉลี่ยร้อยละ 21 และ 16 ต่อปี ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปริมาณการผลิตในปัจจุบัน (พ.ศ. 2554) ดังตารางที่ 2

จะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อให้ได้ตามแผนนั้นต้องมีการเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิต (yield) เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่เพียงพอ แต่การขยายตัวของพื้นที่สำหรับเพาะปลูกพืชพลังงานนั้น นอกจากจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ปลูกพืชอาหารแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ทั้งการใช้ที่ดิน น้ำ พลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์และประเมินผลกระทบดังกล่าว เพื่อให้สามารถบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2554 (หน่วย: ล้านลิตร) [2]

ชนิดเชื้อเพลิง	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554
เบนซิน ออกเทน 91	4,551	4,633	4,333	4,465	4,468	3,388	2,877	2,957	3,077
เบนซิน ออกเทน 95	3,082	2,970	2,241	1,471	1,107	341	177	77	41
แก๊ซโซฮอล์ 91 (E10)	-	-	30	96	244	924	1,415	1,552	1,860
แก๊ซโซฮอล์ 95 (E10)	3	61	645	1,186	1,520	2,439	2,972	2,691	2,122
แก๊ซโซฮอล์ E20	-	-	-	-	-	29	83	137	222
แก๊ซโซฮอล์ E85	-	-	-	-	-	-	-	2	9
ดีเซล	17,408	19,412	19,424	18,225	18,017	13,813	10,293	11,404	18,484
ดีเซล B5	-	-	5	43	627	3,780	8,156	7,053	690

ตารางที่ 2 ปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ.2554 (หน่วย: ล้านลิตร) [2]

ชนิดเชื้อเพลิง	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554
ไบโอเอทานอล	-	5.37	68	104	192	322	401	426	510
ไบโอดีเซล B100	-	-	-	2.3	70	448	560	600	625
เชื้อเพลิงชนิดใหม่	-	-	-	-	-	-	-	-	-

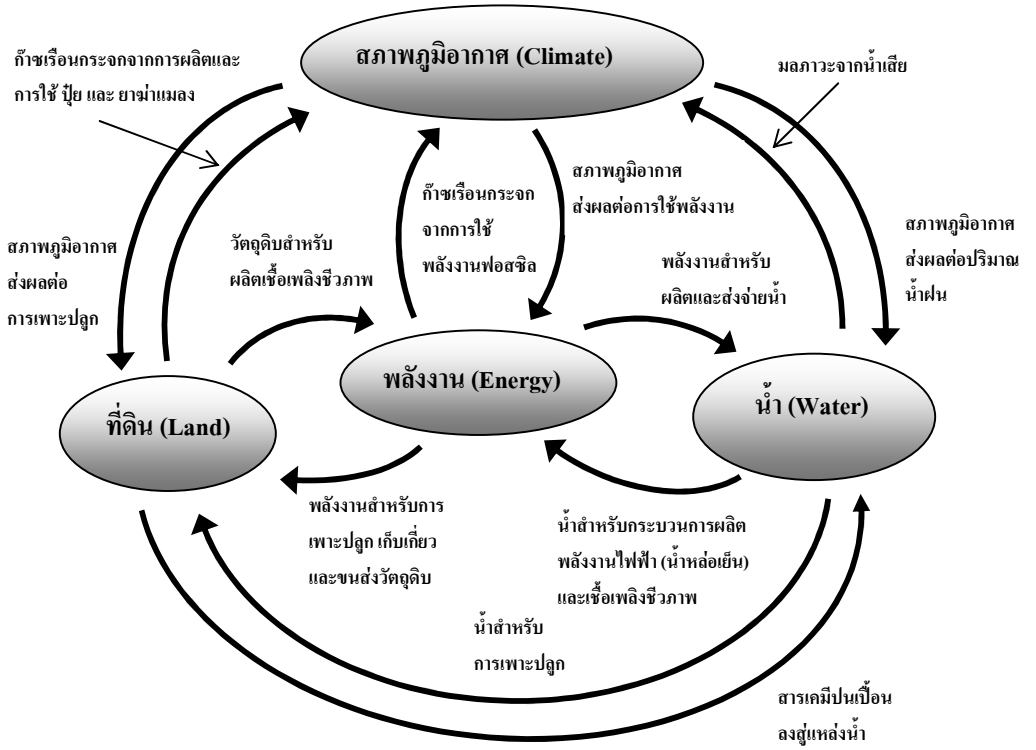
3. ผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อ สภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงชีวภาพกับสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ และผลกระทบที่มีต่อกันจากงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาในประเทศไทย

3.1 ความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงชีวภาพกับสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ

เนื่องจากวัฏจักรการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจำเป็นที่จะต้องมีการใช้ทรัพยากรที่ดิน พลังงาน น้ำ และสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชพลังงาน การขนส่งวัตถุดิบและกระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในโรงงานจำเป็นต้องอาศัยพลังงานและน้ำในการผลิต ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ดังในรูปที่ 1 จะเห็นว่ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจะเริ่มจากการใช้ที่ดินสำหรับเพาะปลูกพืชพลังงาน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ (feedstock) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน โดยจะต้องมีการใช้น้ำและพลังงาน และในขั้นตอนการเพาะปลูกมักจะมีการใช้สารเคมี เช่น ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งนอกจากจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตแล้วยังส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย และหากมีการใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่สูงเกินความต้องการของพืชจะทำให้เกิดการตกค้างและถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำได้เช่นกัน นอกจากนี้กระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในโรงงานจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานฟอสซิลและทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการใช้น้ำในกระบวนการต่างๆทำให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ การใช้ดิน น้ำและพลังงาน ซึ่งการศึกษาและการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะทำให้เราสามารถประเมินผลกระทบต่างๆที่จะเกิดขึ้นได้อย่างรอบด้าน



รูปที่ 1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ

3.1 งานวิจัยที่ได้มีการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพต่อสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่ได้มีการศึกษาผลกระทบของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว เช่น การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Land Use Change: LUC) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเป้าหมายการใช้ประโยชน์ที่ดิน การประเมินปริมาณการใช้น้ำต่อหน่วยผลิต ซึ่งเป็นวิธีที่เรียกว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint: WF) [15] หรือการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งผู้เขียนได้รวบรวมผลการศึกษาและจำแนกประเด็นผลกระทบดังแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพต่อการใช้น้ำนั้น จะใช้วิธีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ซึ่งเป็นวิธีการคำนวนหาปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรของการผลิต รวมถึงปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อบำบัดของเสียที่เกิดขึ้น โดยปริมาณการใช้น้ำส่วนใหญ่จะใช้ในกระบวนการเพาะปลูกพืช ซึ่งจะมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ลักษณะของดิน และชนิดของพืช ดังจะเห็นได้จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยของปาล์มน้ำมันที่ปลูกทางภาคเหนือจะมีค่ามากกว่าปาล์มน้ำมันที่ปลูกทางภาคใต้ของประเทศไทย [5] และมันสำปะหลังจะมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยมากกว่าอ้อย[6],[7] โดยมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง อ้อย และกากน้ำตาล เท่ากับ 2,582 1,708 และ 2,410 ลิตรน้ำ/ลิตรเอทานอล ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในโรงงานผลิตนั้น พบว่ามีปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (มันเส้น) และกากน้ำตาลอยู่ระหว่าง 8.3-18.97 และ 11.42-23.54 ลิตรน้ำ/ลิตรเอทานอล ตามลำดับ [8] ทั้งนี้เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว พบว่าการผลิตพลังงานจากชีวมวลจะใช้น้ำมากกว่าการผลิตพลังงานจากฟอสซิล 70-400 เท่า [16] และนอกจากนี้ยังพบว่าการขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงานและการเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ยจะส่งผลกระทบต่อสมดุลของการใช้น้ำและคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำอีกด้วย [9] เนื่องจากในกระบวนการเพาะปลูกพืชหากมีการใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่สูงเกินความต้องการของพืชและการใช้ยาฆ่าแมลงเกินขนาดที่กำหนดจะทำให้เกิดการตกค้างและซึมลงสู่น้ำใต้ดินหรือถูกชะล้างทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

การศึกษาผลกระทบทางด้านการใช้ที่ดินอันเนื่องมาจากการขยายตัวของการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่เพียงพอต่อความต้องการทำให้เกิดการขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงาน โดยจากการศึกษาผลกระทบของการปลูกพืชพลังงานต่อการใช้ที่ดินทางการเกษตรของประเทศไทย [10] พบว่า หากไม่มีนโยบายรักษาขนาดพื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงาน ซึ่งได้แก่ อ้อยและมันสำปะหลังไว้อย่างละ 7 ล้านไร่ [1] จะทำให้พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.1 ต่อปี ในขณะที่พื้นที่เพาะปลูกอ้อย ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วมีแนวโน้มลดลง แต่หากมีการรักษาขนาดพื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงานไม่ให้เกิน 7 ล้านไร่ จะทำให้พื้นที่เพาะปลูกข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินดังกล่าวนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินทางตรง (Direct Land Use Change: DLUC) โดยเป็นการเปลี่ยนพื้นที่เพาะปลูกจากพืชอาหารมาเป็นพืชพลังงาน ทำให้พื้นที่เพาะปลูกพืชอาหารลดลง ส่งผลให้ผลผลิตอาหารลดลง ราคาอาหารสูงขึ้น และอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหารได้ แต่ในบางกรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอาจส่งผลกระทบในด้านบวก เช่น การเปลี่ยนพื้นที่รกร้างว่างเปล่าซึ่งมีสภาพดินไม่เหมาะสมต่อการปลูกพืชอาหารมาปลูกพืชพลังงานซึ่งได้ผลผลิตดีกว่า และผลจากการเปลี่ยนพื้นที่รกร้างว่างเปล่ามาปลูกพืชทดแทน ช่วยทำให้การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ในอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อสภาพภูมิอากาศ [11] ทั้งนี้นอกจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินทางตรงแล้ว ยังมีผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินทางอ้อม (Indirect Land Use Change: ILUC) เช่น การบุกรุกและเผาทำลายป่าเพื่อเปลี่ยนเป็นฟาร์มเลี้ยงสัตว์หรือปลูกพืชชนิดอื่นๆ เนื่องจากพื้นที่เดิมถูกเปลี่ยนไปปลูกพืชพลังงาน [17] ทำให้เกิดผลกระทบด้านลบต่อระบบนิเวศน์และความหลากหลายทางชีวภาพ (Biodiversity) และนอกจากนี้การปลูกพืชเชิงเดี่ยว (Monoculture) รวมถึงการใช้สารเคมี เช่น ปุ๋ย

และยาฆ่าแมลงในปริมาณมากเป็นสาเหตุทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลงและเกิดสภาพดินเสื่อมโทรมได้

สำหรับผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อพลังงานและสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าการใช้น้ำมันแก๊ซโซฮอล์ E10 จะช่วยลดการใช้น้ำมันฟอสซิลลงร้อยละ 6.3 ลดการปล่อย CO_2 CH_4 CO และ NO_x ลงร้อยละ 6.4 6.2 15.4 และ 15.8 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเบนซิน [13] แต่หากพิจารณาถึงวัฏจักรการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแล้ว พบว่ามีการใช้พลังงานฟอสซิลในปริมาณสูง โดยเฉพาะในกระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในโรงงานผลิตจะมีสัดส่วนการใช้พลังงานมากที่สุด จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบจากมันสำปะหลังเป็นไบโอเอทานอลและจากปาล์มน้ำมันเป็นไบโอดีเซล มีสัดส่วนการใช้พลังงาน 77.7 % และ 58% ของการใช้พลังงานตลอดวัฏจักร ตามลำดับ [14] และยังพบว่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการผลิตไบโอเอทานอลจากมันสำปะหลังมีค่าอัตราส่วนพลังงานที่ได้รับต่อพลังงานที่ใช้ในการผลิต (Net Energy Ratio: NER)น้อยกว่า 1 แสดงว่า มีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตมากกว่าพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียพลังงานสุทธินั่นเอง ในขณะที่การผลิต ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีค่า NER เท่ากับ 2.5 แสดงว่าได้พลังงานสุทธิเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้หากมีการนำเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากวัตถุดิบ (co-product) มาผลิตเป็นพลังงานเพื่อชดเชยการใช้พลังงานฟอสซิลจะทำให้ได้พลังงานสุทธิเพิ่มขึ้น เช่น การนำพลังงานที่ได้จากส่วนประกอบของปาล์ม เช่น ไขมันกลีเซอรอล (glycerol) เมล็ดปาล์ม (palm kernel) และ เปลือก (shell) มาชดเชยการใช้พลังงานฟอสซิล จะทำให้ได้ค่า NER เท่ากับ 3.8 ซึ่งมากกว่าในกรณีที่ไม่นำส่วนประกอบดังกล่าวมาผลิตเป็นพลังงานซึ่งจะมีค่า NER เท่ากับ 2.42 [18] ดังนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชพลังงานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และนอกจากนี้การผลิตพลังงานที่ได้จากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากวัตถุดิบเพื่อใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อีกด้วย

ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อ สภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ในประเทศไทย

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์และวิธีการที่ใช้	ประเด็นผลกระทบที่ศึกษา				ผลการศึกษา
		สภาพภูมิอากาศ	ที่ดิน	พลังงาน	น้ำ	
ลักขณา เจริญสุข และคณะ [5]	• ประเมินปริมาณการใช้น้ำของปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลในเขตภาคเหนือ และภาคใต้ของประเทศไทย • วิธี Water Footprint				✓	ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของปาล์มน้ำมันที่ปลูกในภาคเหนือเท่ากับ 5,538 ลบ.ม./ตัน ภาคใต้เท่ากับ 1,399 ลบ.ม./ตัน และเฉลี่ยทั้งสองภาคเท่ากับ 2,139 ลบ.ม./ตัน
Rattikarn Kongboon and Sate Sampattagul [6]	• ประเมินปริมาณการใช้น้ำของอ้อย และมันสำปะหลังในเขตภาคเหนือของประเทศไทย • วิธี Water Footprint				✓	ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของอ้อยเท่ากับ 202 ลบ.ม./ตัน และมันสำปะหลังเท่ากับ 509 ลบ.ม./ตัน
Shabbir H. Gheewala et al. [7]	• ประเมินปริมาณการใช้น้ำของกระบวนการผลิตเอทานอลจาก มันสำปะหลัง อ้อย และกากน้ำตาลของประเทศไทย • วิธี Water footprint				✓	ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของมันสำปะหลัง อ้อย และกากน้ำตาล เท่ากับ 2,582 1,708 และ 2,410 ลิตรน้ำ/ลิตรเอทานอล ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อ สภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ในประเทศไทย (ต่อ)

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์และวิธีการที่ใช้	ประเด็นผลกระทบที่ศึกษา				ผลการศึกษา
		สภาพภูมิอากาศ	ที่ดิน	พลังงาน	น้ำ	
Aweewan Mangmee-chai and Prasert Pavasant [8]	• ประเมินปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง และกากน้ำตาลของประเทศไทย • วิธี Water footprint				✓	ปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเอทานอลของกากน้ำตาลจะอยู่ระหว่าง 1,510-1,990 ลิตรน้ำ/ลิตรเอทานอล และมันสำปะหลังจะอยู่ระหว่าง 2,300-2,820 ลิตรน้ำ/ลิตรเอทานอล
M.S. Babel et al. [9]	• ผลกระทบของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อลุ่มน้ำคลองโพธิ์ ทั้งในด้านการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การใช้น้ำ และคุณภาพน้ำ • วิธี Water footprint และวิธีประเมินผลกระทบของการการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อแหล่งน้ำและคุณภาพน้ำ		✓		✓	ปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจาก ปาล์ม มันสำปะหลัง และอ้อย เท่ากับ 177 103 และ 140 ลบ.ม.ต่อ GJ ตามลำดับ และการขยายพื้นที่เพาะปลูกส่งผลกระทบต่อสมดุลของการใช้น้ำ และการเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ยจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำอีกด้วย
ขาลวิภา สุกใส และ เออวดี เปรมัษเฐียร [10]	• ประเมินผลกระทบของการผลิตพืชพลังงานต่อการใช้ที่ดินทางการเกษตรของประเทศไทย • วิธี Seeming Unrelated Regression (SUR)		✓			พื้นที่ปลูกมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.1 ต่อปี แต่พื้นที่ปลูกอ้อย ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วมีแนวโน้มลดลง แต่หากมีการใช้นโยบายรักษาขนาดพื้นที่เพาะปลูกอ้อยและมันสำปะหลังไว้อย่างละ 7 ล้านไร่ต่อปี จะส่งผลให้พื้นที่เพาะปลูกข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และถั่วเพิ่มขึ้น
Sorawit Siangjaeo et al. [11]	• ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของการผลิตไบโอดีเซลต่อวัฏจักรการปล่อยก๊าซเรือนกระจก • วิธี Life Cycle Assessment	✓	✓			การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน 3 แห่ง โดยจากเดิม แห่งที่ 1 ปลูกยางพารา แห่งที่ 2 ปลูกมันสำปะหลัง และแห่งที่ 3 เป็นพื้นที่รกร้างว่างเปล่า เปลี่ยนมาปลูกปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลทั้ง 3 แห่ง พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงได้
Thapat Silalertruksa and Shabbir H. Gheewala [12]	• ประเมินผลกระทบของกระบวนการผลิตไบโอเอทา-นอลต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมของประเทศไทย • วิธี Life Cycle Assessment และ Input-Ouput Analysis	✓	✓			กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากมันสำปะหลังและกากน้ำตาลจะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ระหว่าง 27-91 g CO_2eq. และ 28-119 g CO_2eq. ตามลำดับ แต่อาจเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า เมื่อคิดรวมผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีต่อ สภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน พลังงาน และน้ำ ในประเทศไทย (ต่อ)

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์และวิธีการที่ใช้	ประเด็นผลกระทบที่ศึกษา				ผลการศึกษา
		สภาพภูมิอากาศ	ที่ดิน	พลังงาน	น้ำ	
Thu Lan T. Nguyen and Shabbir H. Gheewala [13]	• ศึกษาผลกระทบของการใช้เอทานอลเป็นส่วนผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงในภาคขนส่งต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงาน • วิธี Life Cycle Assessment	✓		✓		การใช้น้ำมันแก๊ซโซฮอล์ E10 ช่วยลดการใช้น้ำมันฟอสซิลลงร้อยละ 6.3 และลดการปล่อย CO_2 CH_4 CO และ NO_x ลงร้อยละ 6.4 6.2 15.4 และ 15.8 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเบนซิน
Pomthong Malakul et al. [14]	• ศึกษาประสิทธิภาพเชิงพลังงานและสิ่งแวดล้อมของกระบวน – การผลิตไบโอเอทานอล จากมันสำปะหลัง และไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม • วิธี Life Cycle Assessment	✓		✓		การผลิตไบโอเอทานอลจากมันสำปะหลัง มีค่าอัตราส่วนพลังงานที่ได้รับต่อพลังงาน ที่ใช้ (Net Energy Ratio: NER) น้อยกว่า 1 และการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม มีค่า NER เท่ากับ 2.5 ในขณะที่การผลิต ไบโอเอทานอล 1 ลิตร และไบโอดีเซล 1 ลิตร จะเกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 2.86 และ 1.42 kg CO_2eq. ตามลำดับ

4. แนวทางการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างยั่งยืน

จากการศึกษาผลงานวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นว่าการศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงชีวภาพของประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นการประเมินผลกระทบในลักษณะที่มุ่งเน้นพิจารณาเฉพาะด้าน ซึ่งยังไม่ครอบคลุมทุกด้าน เนื่องจากหากพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ตั้งแต่การปลูกพืชพลังงาน การขนส่ง การแปลงสภาพวัตถุดิบเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ จนถึงการนำไปใช้ ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ การใช้ที่ดิน น้ำ และพลังงาน ดังนั้น เพื่อให้เกิดแนวทางการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างยั่งยืน จึงควรมีกรอบการศึกษาถึงความสัมพันธ์และประเมินผลกระทบที่มีต่อกันอย่างบูรณาการ (Integrated framework) ดังนี้

• ประเมินศักยภาพของพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกพืชพลังงาน โดยพิจารณาจากสภาพภูมิอากาศ ความเหมาะสมของดิน พร้อมทั้งจัดแบ่งเขตเหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก (zoning) ให้ชัดเจน เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกพืชอาหาร รวมถึงพื้นที่อนุรักษ์และป่าไม้

• ประเมินความสมดุลของน้ำในพื้นที่ โดยพิจารณาปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ ปริมาณน้ำฝน และความต้องการน้ำทั้งในด้านการอุปโภคบริโภคและด้านการเกษตร พร้อมทั้งพัฒนาระบบชลประทานให้ทั่วถึง เพื่อให้สามารถบริหารจัดการน้ำได้อย่างเหมาะสม

• ประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

• ประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งหาแนวทางการแก้ไข เช่น การให้ความรู้ ความเข้าใจ และสนับสนุนให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอินทรีย์แทนการใช้สารเคมี และการนำน้ำเสียจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

การศึกษาถึงความสัมพันธ์และผลกระทบที่มีต่อกันอย่างบูรณาการในต่างประเทศนั้น Gopalakrishnan et al.[19] ได้ทำการศึกษา การปลูกพืชพลังงานในเขตพื้นที่เสื่อมโทรม (marginal land) โดยเน้นการใช้ทรัพยากรที่ดินและน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และมีการนำน้ำเสียในพื้นที่มาผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อใช้เป็นสารอาหารให้กับพืช พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิต

ได้สูงสุดถึง 22% ของความต้องการพลังงานในพื้นที่ เมื่อเทียบกับในปัจจุบันซึ่งผลิตได้เพียง 2% และยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Hermann et al.[20] ได้ทำการศึกษาพื้นที่สำหรับปลูกพืชพลังงานในประเทศ Burkina Faso ทวีปแอฟริกา ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่มีสภาพแห้งแล้งและดินขาดความอุดมสมบูรณ์ แต่หากมีการปรับปรุงสภาพดินโดยใช้ปุ๋ยอย่างเหมาะสม และพัฒนาระบบชลประทานอย่างทั่วถึงแล้ว จะทำให้ได้ผลผลิตของพืชพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังช่วยลดการบุกรุกทำลายป่าได้อีกด้วย

5. สรุป

นโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อทดแทนการใช้น้ำมันฟอสซิล ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของการเพาะปลูกพืชพลังงานทั่วประเทศ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรธรรมชาติหลายด้านทั้ง การใช้ที่ดิน น้ำ และพลังงาน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาถึงผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรด้านใดด้านหนึ่ง โดยยังขาดการพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ที่มีต่อกันของทรัพยากรดังกล่าว ซึ่งจะส่งผลให้การวางแผนการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพยังขาดการประเมินผลกระทบต่อความสมดุลของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ความขัดแย้งของการใช้ที่ดินและน้ำระหว่างพืชอาหารกับพืชพลังงาน หรือความมั่นคงทางด้านอาหารกับความมั่นคงทางด้านพลังงาน เป็นต้น ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนากรอบการศึกษาความสัมพันธ์และวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าวแบบบูรณาการ เพื่อให้เกิดการพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/dede_aedp_2012_2021.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล 30 มิถุนายน 2555).

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2554.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=1841:2010-09-22-07-02-07&catid=128. (วันที่ค้นข้อมูล 15 กันยายน 2555).

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2555. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:http://www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/Alternative_1012/thailand%20alternative%20energy%20situation%202012.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล 16 มิถุนายน 2555).

[4] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 2/2556 (ครั้งที่ 145). กรุงเทพฯ

[5] ลักขณา เจริญสุข, รัตชยุดา กองบุญ และ เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, “การวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย,” *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม นวัตกรรมและการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 1 ประจำปี 2555*. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: http://dpru.pnru1.com/doc/dprudoc 00000100.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล 11 กรกฎาคม 2556).

[6] Rattikarn Kongboon and Sate Sampattagul, “The water footprint of sugarcan and cassava in northern Thailand”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 40 (2012) 451-460.

[7] Gheewala, S.H., et al., “Implications of the biofuels policy mandate in Thailand on water: The case of bioethanol,” *Bioresour. Technol*, (2013). [Online]. Available:http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.052.

[8] Aweewan Mangmeechai and Prasert Pavasant, “Water Footprints of Cassava- and Molasses-Based Ethanol Production in Thailand”, *Natural Resources Reserch,* (2013). [Online]. Available: http://link. springer.com/ article/10.1007%2Fs11053-013-9214-8#page-1.

[9] M.S. Babel, B. Shrestha, and S.R. Perret, “Hydrological impact of biofuel production: A case study of the Khlong Phlo Watershed in Thailand”, *Agricultural Water Management*: 101 (2011) 8-26.

[10] ขาลวิภา สุขใส และ เออวดี เปรมัษเฐียร, “ผลกระทบของการผลิตพืชพลังงานต่อการใช้ที่ดินทางการเกษตรของไทย”, *การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 13*. (2556). ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[11] Sorawit Siangjaeo, Shabbir H. Gheewala, Kittinun Unnanon, and Amnat Chidthaisong, “Implications of land use change on the life cycle greenhouse gas emissions from palm biodiesel production in Thailand,” *Energy for Sustainable Development*, 15 (2011) 1-7.

[12] Thapat Silalertruksa and Shabbir H. Gheewala, “Security of feedstocks supply for future bio-ethanol production in Thailand,” *Energy Policy*, 38 (2010) 7476-7486.

[13] Thu Lan T. Nguyen and Shabbir H. Gheewala, “Fossil energy, environmental and cost performance of ethanol in Thailand,” *Journal of Cleaner Production*, 16 (2008) 1814-1821.

[14] Pomthong Malakul, Seksan Papong, Tassaneewan Chom-In, and Soottiwan Noksa-nga. 2554. “Life-cycle energy and environmental analysis of biofuels production in Thailand,” *วิศวกรรมสาร มก*. 24 (75): 25-40.

[15] Hoektra, A.Y., Chapagain, A.k., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M.,” The water footprint assessment manual: setting the global standard,” *Water footprint Network*. (2011). The Netherlands.

[16] P.W. Gerbens-Leenes, A.Y. Hoekstra, and Th. Van der Meer,” The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply” *Ecological Economics*: 68 (2009) 1052-1060

[17] Saori Miyaki, Marguerite Renouf, Ann Peterson, Clive McAlpine, and Carl Smith,” Land-use and environmental pressures resulting from current and future bioenergy crop expansion: A review,” Journal of Rural Studies: 28 (2012) 650-658

[18] Somporn Pleanjai and Shabbir H. Gheewala.,” Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand,” *Applied Energy*: 86 (2009) S209-S214.

[19] Gopalakrishnan, G., Negri, M. C., Wang, M.,Wu, M., Snyder, S.W., Lafreniere, L., “Biofuels, Land, and Water: A Systems Approach to Sustainability,” Environ. Sci. Technol. (2009). 43: 6094-6100.

[20] Hermann, S., Welsch, M., Segerstrom, R., Howells, M., Young, C., Alfstad, T., Rogner, H., Steduto, P., “Climate, land, energy, and water (CLEW) interlinkages in Burkina Faso: An analysis of agricultural intensification and bioenergy production,” Natural Resources Forum. (2012). 36: 245-262.