การใช้หลักการของ Exergy ในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศไทย

สัณห์ โอพาพิริยกุล*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำหลักการทางอุณหพลศาสตร์ของเอ็กเซอร์จี (Exergy) มาใช้ในการประเมินการใช้ทรัพยากรของประเทศไทย ทรัพยากรชนิดต่างๆที่โดยทั่วไปอยู่ในหน่วยของน้ำหนักหรือหน่วยของพลังงานถูกนำมารวมกันภายใต้หน่วยของ Exergy การใช้ Exergy เป็นหน่วยกลางนั้นมีความสมเหตุสมผลเนื่องจากปริมาณ Exergy ของทรัพยากรนั้นหมายถึงศักยภาพในการก่อให้เกิดงานที่มีประโยชน์หรือปริมาณงานขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการได้มาซึ่งทรัพยากร ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของการอนุรักษ์ทรัพยากรประเภทต่างๆผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อการจัดทำแผนการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติอย่างบูรณาการและมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้น ค่าการใช้ Exergy ระดับชาติที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าการใช้ Exergy ในระดับองค์กรหรือบุคคลอีกด้วย นอกจากนี้ บทความนี้ยังมุ่งที่จะให้ข้อมูลที่ช่วยให้นักวิจัยได้มีความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับหลักการของ Exergy และการประยุกต์ใช้หลักการของ Exergy ในด้านต่างๆโดยเฉพาะในด้านดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : เอ็กเซอร์จี, พลังงาน, ผลกระทบสิ่งแวดล้อม, ความยั่งยืน, การวิเคราะห์การใช้ทรัพยากร

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
*ผู้ติดต่อ, อีเมล์: exergyfootprint@yahoo.com รับเมื่อ 20 เมษายน 2555 ตอบรับเมื่อ 10 สิงหาคม 2555

The Use of Exergy Concept in Natural Resource Accounting for Thailand

Sun Olapiriyakul*

Abstract

This paper aims to use the Thermodynamic concept of Exergy in performing national resource accounting for Thailand. Various types of resources generally expressed in the units of weight or energy are converted into the unit of exergy. The use of exergy concept in resource accounting is rational because the exergy content of resources can be referred to as their potential to do useful work or minimum required work to acquire such resources. The studying results can be used in setting natural resources conservation priorities. It also serves as useful information in developing a comprehensive and efficient natural resource management plan. Moreover, the calculated national exergy consumption can serve as a reference value that can be used to compare against organizational or individual exergy consumption. In addition, this paper aims to provide information that help researchers to better understand the concept of exergy and its potential applications especially in the field of environmental performance indices.

Keywords : Exergy, Energy, Environmental Impacts, Sustainability, Resource Accounting

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.
*Corresponding author, E-mail: exergyfootprint@yahoo.com Received 20 April 2012, Accepted 10 August 2012

1. บทนำ

เป็นที่รู้กันว่า หลักการของ Exergy นั้นได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการทางอุตสาหกรรมตั้งแต่กระบวนการผลิต [1-3] จนถึงกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ [4,5] การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวมักถูกเรียกว่าการวิเคราะห์ตามกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ ผลการวิเคราะห์โดยใช้ Exergy (Exergy Analysis) มักให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบตลอดจนการระบุถึงขนาดและจุดที่เกิดการสูญเสียในระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการใช้การวิเคราะห์พลังงาน (Energy Analysis) โดยลำพัง หลังจากที่หลักการของ Exergy ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและระบบต่างๆ ฐานข้อมูลของค่า Exergy ของ สาร เชื้อเพลิง และ วัสดุชนิดต่างๆซึ่งหมายถึงศักยภาพในการก่อให้เกิดงานที่เป็นประโยชน์ของสิ่งเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงและรวบรวมจนมีความครบถ้วนสมบูรณ์ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งหลักการของ Exergy ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากร (Resource Accounting Tools) ของประเทศต่างๆตามที่ระบุในงานของ Ertesvag [6] โดยปริมาณการใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆถูกวิเคราะห์ภายใต้หน่วยเดียวกันคือหน่วยของ Exergy การใช้หลักการของ Exergy ในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรในงานวิจัยส่วนมาก [7-12] เป็นการทำเพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้ Exergy ในระดับประเทศ งานวิจัยเหล่านี้วิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้ Exergy การสูญเสีย Exergy และประสิทธิภาพการใช้ Exergy ของภาคส่วนต่างๆ ในขณะเดียวกัน งานวิจัยบางส่วน [13, 14] มุ่งเน้นในการวิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้ Exergy ในระดับประเทศเพื่อนำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการเทียบสม-รถนะ (Benchmarking)

นอกจากการใช้หลักการของ Exergy ในการวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว Exergy ยังได้ถูกกล่าวไว้โดยงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [15,16] ว่าเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการประเมินปริมาณของเสียและมลพิษที่กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากค่า Exergy ของของเสียและมลพิษในที่นี้เป็นศักยภาพในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม กิจกรรมที่สูญเสีย Exergy สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมากในรูปของของเสียและมลพิษย่อมเป็นกิจกรรมส่งผลกระทบที่รุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม จนกระทั่งในช่วงเวลาที่ผ่านมาเร็วๆนี้ ลักษณะการนำ Exergy มาใช้เป็นดัชนีชี้วัดด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมขององค์กรได้ถูกนำเสนอภายใต้ชื่อ Exergy Footprint [13] โดยวิธีดังกล่าวเป็นการประเมินปริมาณการใช้ทรัพยากรขององค์กร แล้วนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้ทรัพยากรอ้างอิงซึ่งอาจเป็นปริมาณการใช้ทรัพยากรในระดับภาคส่วนอุตสาหกรรม ระดับภูมิภาค หรือ ในระดับประเทศ

หลักการของ Exergy เป็นที่ยอมรับและถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยเนื่องจากเป็นหลักการที่อยู่บนพื้นฐานของวิชาอุณหพลศาสตร์ การใช้หน่วยของ Exergy เป็นหน่วยกลางของทรัพยากรชนิดต่างๆ ยังทำให้ผลการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรและผลกระทบสิ่งแวดล้อมเป็นไปอย่างบูรณาการโดยไม่ต้องอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighting) ซึ่งเป็นขั้นตอนของการประเมินวัฏจักรชีวิตที่ทำเพื่อรวมผลกระทบสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆให้เป็นค่าผลกระทบสุดท้ายค่าเดียว อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคนทั่วไปมักยังไม่มีความคุ้นเคยมากนักกับคำว่า Exergy สิ่งนี้เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำหลักการ Exergy มาปรับใช้เป็นดัชนีชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมที่สามารถสื่อให้คนทั่วไปเข้าใจได้ และ ที่ผ่านมา ยังไม่มีการคำนวณปริมาณการใช้ทรัพยากรของประเทศไทยด้วยหลักการของ Exergy มาก่อน ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการได้แก่ 1) เพื่ออธิบายถึงความหมายของ Exergy ในด้านต่างๆ ตลอดจน แสดงถึงการนำหลักการ Exergy มาใช้ในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากร นอกจากนี้บทความนี้ยังรวบรวมแหล่งข้อมูลค่า Exergy ของทรัพยากรประเภทต่างๆเพื่อให้นักวิจัยได้มีความรู้ความเข้าใจและสามารถนำหลักการ Exergy ไปปรับใช้กับงานวิจัยในแขนงอื่นๆได้ และ 2) เพื่อทำการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศไทยโดยใช้หลักการของ Exergy ทั้งนี้การวิเคราะห์จะบ่งบอกถึงปริมาณ Exergy ของทรัพยากรที่ใช้ในประเทศไทยทั้งในภาพรวมและตามประเภทของทรัพยากร ค่าการใช้

Exergy ของประเทศไทยที่คำนวณได้สามารถนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้ทรัพยากรในระดับต่างๆ เช่น การใช้ทรัพยากรของภาคอุตสาหกรรม การใช้ทรัพยากรของจังหวัด การใช้ทรัพยากรขององค์กร และ การใช้ทรัพยากรของบุคคลต่อไป

ทั้งนี้ ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยนี้จะครอบคลุมเฉพาะปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรขาเข้าของประเทศ โดยไม่รวมถึงการวิเคราะห์ค่า Exergy ของผลผลิตประเทศ และประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรหรือการใช้ Exergy ในภาคส่วนต่างๆของประเทศ

2. ความเป็นมาและความหมายของ Exergy

คำว่า Exergy เป็นคำที่ถูกบัญญัติขึ้นภายหลังโดย Zoran Rant ในปี ค.ศ.1956 แต่หลักการของ Exergy นั้นถูกคิดค้นขึ้นมานานแล้วโดย J. Willard Gibbs ในปี ค.ศ. 1873 ตามที่ถูกระบุไว้ในกฎข้อที่ 2 ของอณุพลศาสตร์ (The 2nd Law of Thermodynsmics) โดยคำที่มีความหมายเหมือนกันที่ถูกใช้มาก่อนหน้านี้ตามหลักการของ Gibbs ได้แก่ Availability หรือ Available Energy ข้อแตกต่างระหว่าง Exergy และหลักการด้านพลังงานของ Gibbs มีเพียงสภาพแวดล้อมอ้างอิงที่แตกต่างกัน โดยในกรณีของ Gibbs (Gibbs Free Energy Analysis) ตัวแปรของสภาพแวดล้อมซึ่งรวมถึงความดัน และ อุณหภูมิ จะคงที่ ส่วนค่า Exergy ของพลังงานและสสารต่างๆสามารถเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมที่ถูกเลือกมาเป็นสภาพแวดล้อมอ้างอิง

ตามกฎข้อที่ 1 ของอณุพลศาสตร์และกฎการคงมวลของสสาร พลังงานและสสารต่างๆบนโลกนี้ไม่มีวันสูญหายหรือเกิดขึ้นเองได้ แต่พลังงานและสสารสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบอื่นได้และทุกครั้งที่พลังงานหรือสสารมีการเปลี่ยนรูปแบบในกรณีของระบบปิด Exergy ซึ่งหมายถึงศักยภาพในการก่อให้เกิดงานที่มีประโยชน์ของพลังงานหรือสสารดังกล่าวจะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์เมื่อพลังงานหรือสสารนั้นเข้าสู่สมดุลกับสภาพแวดล้อมอ้างอิง การลดลงของ Exergy นี้สวนทางกับปริมาณของ Entropy ในระบบที่เพิ่มขึ้น Szargut [17] ได้ให้คำจำกัดความอย่างเป็นทางการของ Exergy ไว้ว่า "Exergy คือปริมาณงานสูงสุดที่สามารถผลิตขึ้นได้จาก ระบบ/สสาร/พลังงาน เมื่อสิ่งต่างๆเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลกับสภาพแวดล้อมอ้างอิง"

Exergy อาจถูกมองเป็นความแตกต่าง โดยความแตกต่างในที่นี้หมายถึงความแตกต่างระหว่างสถานะภาพของพลังงานหรือสสารกับสถานะภาพของสภาพแวดล้อมที่ใช้อ้างอิงนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของกระแสน้ำที่ไหลจากระดับที่สูงลงสู่แอ่งน้ำที่อยู่ในระดับต่ำกว่า ความแตกต่างในที่นี้คือความแตกต่างของระดับของกระแสน้ำกับระดับของแอ่งน้ำที่อยู่ด้านล่าง ยิ่งความแตกต่างมีมากกระแสน้ำดังกล่าวก็มีศักยภาพในการก่อให้เกิดงานที่มีประโยชน์สูงโดยอาจทำการควบคุมให้ไหลผ่านกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นต้น โดยทั่วไป ความแตกต่างสามารถแบ่งได้เป็น ความแตกต่างของระดับในแนวตั้ง (Potential Exergy) ความเร็วในการเคลื่อนที่ (Kinetic Exergy) ความดันและอุณหภูมิ (Physical Exergy) และ ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Exergy) ยกตัวอย่างในกรณีของอุณหภูมิ เช่น พลังงานความร้อนที่ 2000 °C มีศักยภาพในการก่อให้เกิดงานทางกลสูงสุดที่มากกว่าพลังงานความร้อนที่ 200 °C ถึงแม้พลังงานทั้งสองจะมีอยู่ในปริมาณที่เท่ากัน เพราะพลังงานความร้อนที่ 2000 °C มีค่าความแตกต่างจากอุณหภูมิอ้างอิง(อุณหภูมิห้อง) มากกว่า

นอกจากนี้ Exergy อาจถูกมองเป็นศักยภาพในการเปลี่ยนรูปแบบ สสารหรือพลังงานที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบต่างๆได้หลากหลายย่อมมีศักยภาพในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้สูงกว่าและมีค่า Exergy ที่สูง พลังงานที่มีสัดส่วนของ Exergy สูงเช่นพลังงานไฟฟ้ามีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เพราะสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆได้หลากหลาย เราเรียกพลังงานไฟฟ้าและพลังงานรูปแบบอื่นที่มีค่า Exergy สูงว่าเป็นพลังงานคุณภาพสูงและพลังงานที่มีค่า Exergy ต่ำเช่นพลังงานความร้อนว่าเป็นพลังงานคุณภาพต่ำเพราะมีศักยภาพหรือโอกาสในการนำไปใช้ประโยชน์ที่ค่อนข้างจำกัด ดังที่กล่าวไว้ว่าค่า Exergy จะลดลงเมื่อพลังงานมีการเปลี่ยนรูปแบบ การลดลงของค่า Exergy นี้ขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของพลังงานที่เปลี่ยนไปด้วย พลังงานไฟฟ้าสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลได้เกือบ 100% เนื่องจากพลังงานทั้งสองประเภทเป็นพลังงานคุณภาพสูง

นอกจากนี้ ในการใช้พลังงานให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น พลังงานที่ใช้จะต้องมีระดับคุณภาพของพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยก่อให้เกิดปริมาณการสูญเสีย Exergy (Exergy Loss) ที่น้อยที่สุด เช่น เราสามารถเลือกใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) ที่ 70 ºC ในการทำน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 40 ºC แทนการใช้พลังงานไฟฟ้า

โดยทั่วไป หลักการของ Exergy นี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากร โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ที่มีต่อทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยทรัพยากรประเภทต่างๆที่ถูกนำมาใช้เพื่อสนองความต้องการในการบริโภคและการจัดการกับของเสียและมลพิษที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ 1.ทรัพยากรวัตถุดิบ (Raw Materials) และ 2.ทรัพยากรพลังงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นในการรวมทรัพยากรทั้งสองประเภทเข้าด้วยกันคือหน่วยที่แตกต่างกันของทรัพยากรทั้งสองประเภท หน่วยที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับทรัพยากรวัตถุดิบคือ หน่วยน้ำหนัก ในขณะที่พลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น Watt หรือ Joules การใช้หน่วยเงินซึ่งเป็นราคาของทรัพยากรทั้ง 2 ประเภทเป็นหน่วยกลางสามารถทำได้ [18] แต่การพิจารณาเฉพาะราคาเพียงอย่างเดียวอาจทำให้การแก้ไขปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติเป็นไปในทิศทางที่ไม่สอดคล้องกับปริมาณทรัพยากรที่คงเหลืออยู่บนโลกที่มนุษย์สามารถเข้าถึงได้เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นๆเช่นปัจจัยทางเศรษฐกิจและสังคมอีกมากมายที่ส่งผลต่อราคาของทรัพยากรประเภทต่างๆ

การใช้ Exergy เป็นหน่วยกลางสามารถทำให้การแสดงผลการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรโดยการรวมทรัพยากรพลังงานและทรัพยากรวัตถุดิบต่างๆเข้าด้วยกันสามารถกระทำได้ หลักการคำนวณค่า Exergy ของทรัพยากรประเภทต่างๆนั้นแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ของทรัพยากรแต่ละประเภท อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้ว การวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรพิจารณาถึงค่า Chemical Exergy ของทรัพยากรซึ่งหมายถึงความแตกต่างในด้านส่วนประกอบทางเคมีระหว่างทรัพยากรและสภาพแวดล้อมอ้างอิง หรือ ศักยภาพทางเคมีของทรัพยากรประเภทต่างๆนั่นเอง ทรัพยากรทุกอย่างบนโลกนี้ ไม่ว่าจะเป็น โลหะ แร่ธาตุ หิน ดิน ทราย หรือ พลังงานที่อยู่ในรูปแบบต่างๆ ล้วนมีค่า Chemical Exergy เป็นของตัวเอง โดยสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (1) และ (2) ดังต่อไปนี้

$$Chemical\ Exergy = \sum_i m_i\ Ex_{ch,I} \quad (1)$$

$$Ex_{ch,} = \sum_j n_j\ ex_{ch,j} \quad (2)$$

m_i = น้ำหนักของสาร $\boldsymbol{i}$ (Kg)

$Ex_{ch,i}$ = ค่า Exergy ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสาร $\boldsymbol{I}$(KJ/Kg)

n_j = จำนวนโมลของสาร j ในหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (Kg) ของสาร

ex_{ch} = ค่า Exergy มาตรฐานต่อ 1 โมลของสาร ซึ่งสามารถสืบค้นได้จากข้อมูลของงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [19-22]

สมการที่ 1 และ 2 ถูกใช้ในในงานวิจัยนี้ในการคำนวณค่าปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบในตารางที่ 5

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศไทยในเชิงปริมาณโดยใช้หน่วยของ Exergy ซึ่งเป็นหน่วยเดียวกันกับหน่วยของพลังงานคือ จูล (Joule) ข้อมูลปริมาณการใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลล่าสุดที่สืบค้นได้จากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือต่างๆ โดยอาจไม่ได้เป็นปริมาณการใช้ทรัพยากรในปีเดียวกันทั้งหมด

การวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรในระดับประเทศโดยใช้หลักการและหน่วยของ Exergy ที่มีมาก่อนหน้านี้ล้วนตั้งอยู่บนหลักการวิเคราะห์ของ Reistad [23] และ Wall [8] โดยวิธีการวิเคราะห์ของ Reistad เป็นการพิจารณาเฉพาะในส่วนของพลังงาน โดยแบ่งการใช้พลังงานออกตามภาคส่วนของผู้ใช้พลังงานได้แก่ ภาคอุตสาหกรรม ภาคขนส่ง ภาคครัวเรือน และ ภาคธุรกิจ ส่วนวิธีการวิเคราะห์ของ Wall นั้นครอบคลุมทั้งในส่วนของพลังงานและทรัพยากรวัตถุดิบ ในการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศไทยของงานวิจัยนี้จะอิงตามวิธีของ Wall

สมมุติฐานที่สำคัญของการศึกษานี้ได้แก่ 1) เนื่องจากไม่มีแหล่งข้อมูลที่สมบูรณ์สำหรับค่า Exergy ของทรัพยากรต่างๆที่ใช้ในประเทศไทย การศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลค่า Exergy

ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของทรัพยากรต่างๆ จากหลายแหล่งข้อมูล และ สมมุติว่าค่าเหล่านี้สามารถใช้คำนวณค่า Exergy ของทรัพยากรที่ใช้ในประเทศไทยได้โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ ค่า Exergy ของทรัพยากรจากแหล่งข้อมูลต่างๆล้วนมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นค่า Chemical Exergy ที่มีสภาพแวดล้อมอ้างอิงที่เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกัน และ 2) ปริมาณการใช้ทรัพยากรและพลังงานของประเทศไทยที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลล่าสุดซึ่งอาจไม่ได้เป็นข้อมูลในปีเดียวกันทั้งหมด แต่ก็มาจากช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันและสามารถนำมาใช้เพื่อสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณการบริโภค Exergy ของประเทศไทยในยุคปัจจุบันได้

3.1 ทรัพยากรพลังงาน

ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วยหลักการ Exergy โดยทั่วไป เราแบ่งพลังงานที่อยู่ในรูปแบบต่างๆออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1.พลังงานไฟฟ้า 2.พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) และ 3.เชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานที่อยู่ในรูปแบบต่างๆเหล่านี้มีศักยภาพในการเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นที่แตกต่างกัน เราเรียกพลังงานที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นโดยไม่เกิดการสูญเสียหรือเกิดในปริมาณที่น้อยว่าเป็นพลังงานที่มีคุณภาพสูงดังที่ได้กล่าวไว้ในช่วงต้นของบทความ ตัวชี้วัดคุณภาพของพลังงาน (Quality Factor) คือสัดส่วนร้อยละของปริมาณ Exergy จากปริมาณพลังงานทั้งหมด โดยที่ Exergy ในที่นี้หมายถึงส่วนของพลังงานที่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีคุณภาพสูงและมีค่า Quality Factor เท่ากับ 1 ในขณะเดียวกัน พลังงานประเภทอื่นๆที่มีคุณภาพลดหลั่นลงมาได้แก่ พลังงานหมุนเวียนประเภทต่างๆ และ พลังงานความร้อน เช่น ความร้อนจากไอน้ำ พลังงานใต้พิภพ ความร้อนที่คงเหลือในไอเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการอุตสาหกรรม และ ความร้อนที่แผ่ออกจากผิวโลก ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Quality Factor ของพลังงานหมุนเวียน

Energy Carriers	Quality Factor	Ref.
Electrical Energy	1	[10]
Hydropower	1	[24]
Nuclear Energy	0.95	[10]
Solar/PV	0.93	[24]
Hot steam (600 ºC)	0.60	[9]
Geothermal	0.29	[24]
District heat (90 ºC)	0.2-0.3	[9]
Heat Radiation from the Earth	0	[9]

ในการคำนวณหาค่า Exergy ค่า Quality Factor จะถูกนำมาคูณกับปริมาณพลังงานเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar) 4 MJ จะมีค่า Exergy เท่ากับ 4*0.93 หรือ 3.72 MJ ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆได้

ในส่วนของเชื้อเพลิงฟอสซิล ค่า Exergy สามารถคำนวณได้โดยการนำค่าความร้อน (Heating Value) มาคูณกับค่า Quality Factor ของเชื้อเพลิงดังที่แสดงในตารางที่ 2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสามารถแบ่งเป็น ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value หรือ Gross Heating Value) และ ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value หรือ Net Heating Value) ค่าความร้อนทั้ง 2 เป็นปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้เหมือนกัน เพียงแต่ค่าความร้อนสูงนั้นครอบคลุมถึงปริมาณความร้อนแฝงที่ปล่อยออกมาในระหว่างการระเหยกลายเป็นไอของน้ำที่เป็นส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำไม่ครอบคลุมถึงความร้อนแฝงดังกล่าว ในการวิเคราะห์ค่า Exergy ของเชื้อเพลิงในที่นี้ใช้ค่าความร้อนต่ำตามวิธีการคำนวณของ Wall โดยที่ค่า Quality Factor คือสัดส่วนระหว่างค่า Exergy กับค่าความร้อน ค่า Quality Factor ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆอาจมีค่าต่ำหรือสูงกว่า 1 เล็กน้อยขึ้นอยู่กับขอบเขตของระบบและสภาวะสุดท้ายเมื่อเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ 2 ค่า Quality Factor ของเชื้อเพลิงฟอสซิล

Fossil Fuels	Quality Factor*	Lower Heating Value (KJ/Kg)**	Exergy (KJ/Kg)
Petroleum (Fuel Oil)	1.06	39,500	41,870
Bituminous Coal	1.03	29,100	29,973
Lignite	1.04	16,975	17,654
Natural Gas	0.92	44,000	40,480

* Reference: [25]

** average value

ที่กล่าวมานี้เป็นหลักการคำนวณค่า Exergy ของทรัพยากรพลังงาน ในส่วนของการวิเคราะห์การใช้พลังงานของประเทศไทย ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานในปี ค.ศ. 2010 จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2011 [26] ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณการใช้ Exergy พลังงานที่ใช้ประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงชนิดต่างๆซึ่งถูกใช้ในภาคอุตสาหกรรมและภาคส่วนต่างๆรวมถึงการใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศ นอกจากนี้ ประเทศไทยยังใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตด้วยพลังน้ำและที่นำเข้าจากลาว การคำนวณค่า Exergy ซึ่งทำโดยการนำค่า Quality Factor มาคูณกับปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆของประเทศไทยถูกแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรพลังงาน

Energy Carriers	Quality Factor	Consumption (GJ)	Exergy (GJ)
Oil	1.06	1,394,924,530	1,478,620,001
Natural Gas	0.92	1,677,332,563	1,543,145,958
Coal	1.03	451,424,963	464,967,712
Lignite	1.04	211,806,025	220,278,266
Hydroelectric Power/Imported Electricity	1	77,020,373	77,020,373
Total		3,812,508,454	3,784,032,310

3.2 ทรัพยากร โลหะ แร่ธาตุ และ พลาสติก

ปริมาณการใช้โลหะในปี ค.ศ. 2009 [27] ปริมาณการใช้แร่ธาตุในปี ค.ศ. 2011 [28] และ ปริมาณการใช้พลาสติกในปี ค.ศ. 2002 ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณการใช้ Exergy ตามวิธีของ Wall ค่า Exergy ของ โลหะ แร่ธาตุ และ พลาสติก ที่ใช้ในการคำนวณคือค่า Chemical Exergy โดยระดับค่า Chemical Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบมีความสูงต่ำแตกต่างกันไปตามคุณลักษณะของทรัพยากร 2 ประการซึ่งได้แก่ 1.ความสามารถในการก่อให้เกิดปฏิกิริยา (Reactivity) และ 2.ความเข้มข้นของสาร (Concentration) ทรัพยากรที่ไวต่อปฏิกิริยาหรือมีความสามารถในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีสูงย่อมมี Exergy สูงอันเนื่องจากมีสภาพทางเคมีแตกต่างจากสภาวะสมดุลทางเคมีมากในขณะที่อยู่ในสภาพแวดล้อมอ้างอิง ในขณะเดียวกัน

ทรัพยากรที่มีความเข้มข้นหรือความ บริสุทธิ์มาก ไม่มีสิ่งเจือปน เป็นทรัพยากรที่มี Exergy สูง ยกตัวอย่างเช่น โลหะที่ผ่านขั้นตอนการสกัด หลอม และ ขึ้นรูป จนกลายเป็นแท่งโลหะแล้วย่อมมี Exergy สูงกว่าแร่โลหะ (Ore) ที่อยู่ในชั้นใต้ดินเนื่องจากแท่งโลหะมีความเข้มข้นทางส่วนประกอบทางเคมีที่สูงกว่าตัวแร่ จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่า Exergy ในตัวทรัพยากรสามารถเกิดขึ้นได้กระบวนการแปรรูปเปลี่ยนแร่ให้เป็นแท่งโลหะที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้นและมีค่า Exergy สูงขึ้น แต่ Exergy ในปริมาณที่เท่ากันกับค่า Exergy ของโลหะที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างน้อยจะต้องถูกใช้ไปในกระบวนการผลิตแท่งโลหะซึ่งถ้ามองภาพรวมแล้ว Exergy ในระดับระบบจะลดลง

ในกรณีเช่นนี้ ค่า Exergy ของทรัพยากรอาจถูกมองเป็นปริมาณของ Exergy ขั้นต่ำที่ต้องใช้ไปในกระบวนการต่างๆ

เพื่อให้ได้มาซึ่งทรัพยากรแต่ละชนิดดังเช่นปริมาณ Exergy ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแท่งโลหะดังกล่าว

นอกจากนี้ ทรัพยากรที่มีค่า Exergy สูงอาจถูกมองว่าเป็นทรัพยากรที่อยู่ในรูปแบบที่ขาดแคลนและควรอนุรักษ์ก็ได้ลักษณะและความหมายของ Exergy ต่างๆเหล่านี้ล้วนสนับสนุนแนวคิดการใช้ Exergy เป็นหน่วยกลางในการวิเคราะห์การใช้ทรัพากร และ การนำผลที่วิเคราะห์ได้ไปใช้เพื่อการบริหารจัดการเพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของค่า Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบแสดงอยู่ในตารางที่ 4 ส่วนปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบชนิดต่างๆซึ่งรวมถึงโลหะ แร่ธาตุ และพลาสติก ของประเทศไทยถูกแสดงในตารางที่ 5 ร่วมกับปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรไม้และกระดาษ

ตารางที่ 4 ค่า Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบ

Materials	Exergy (MJ/Kg)	Ref.
Sand and gravel	0.31	[17]
Concrete	0.64	[17]
Asphalt	2.29	[17]
Copper	2.11	[29]
Steel	7.10	[29]
Tin	4.65	[19]
Limestone	0.16	[19]
Gypsum	0.14	[19]
Dolomite	0.11	[19]
Iron and steel crap	7.04	[19]
Iron Oxide	2.19	[19]
Iron Ore	0.42	[19]

3.3 ทรัพยากรไม้และกระดาษ

ค่า Exergy ของไม้ ซึ่งหมายถึงศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการนำไม้ไปใช้งาน โดยไม้สามารถแบ่งได้เป็น ไม้เชื้อเพลิง ไม้ก่อสร้าง กระดาษ ไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมีค่า Exergy เท่ากับ 10.44 GJ/m^3 [8] ไม้เชื้อเพลิงนี้ถูกสมมุติให้มีค่าความชื้นเท่ากับ 20% และมีความหนาแน่นเท่ากับ 750 Kg/m^3 ส่วนไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้างนั้นมีค่า Exergy เท่ากับ 8 GJ/m^3 โดยที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 450 Kg/m^3 ส่วนกระดาษมีค่า Exergy เท่ากับ 17 GJ/ ton ค่า Exergy ของไม้ก่อสร้างและกระดาษดังกล่าวเป็นค่ามาตรฐานที่ถูกใช้ในงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศนอร์เวย์โดย Estesvag [7] ประเทศไทยมีปริมาณการใช้ไม้ในปี ค.ศ. 2004 กว่า 2 แสน 4 หมื่นลูกบาศก์เมตร ตามข้อมูลของกรมป่าไม้ [30] โดยสมมุติให้ไม้จำนวนดังกล่าวเป็นไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้าง ในส่วนของกระดาษ ในปี ค.ศ. 2006 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้กระดาษเท่ากับ 3,513 พันตัน [31] ค่า Exergy ของปริมาณการใช้ทรัพยากรไม้และกระดาษถูกแสดงอยู่ในตอนท้ายของตารางที่ 5

3.4 ทรัพยากรน้ำ

ปริมาณการใช้น้ำของประเทศไทยถูกแบ่งเป็น การใช้น้ำภาคครัวเรือน การใช้น้ำภาคอุตสาหกรรมและการค้า และการใช้น้ำภาคเกษตรกรรม ซึ่งมีปริมาณทั้งหมดกว่า 5 หมื่นล้านลูกบาศก์เมตรในปี 2007 [32] โดยเป็นการใช้น้ำในภาคเกษตรกรรมกว่า 90% ค่า Exergy ของน้ำที่นำมาใช้ในการคำนวณคือค่า Exergy ของน้ำจืดซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 MJ ต่อลูกบาศก์เมตร [17] โดยมีน้ำทะเลเป็นสภาวะอ้างอิง ค่า Exergy ของปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 6

3.5 ทรัพยากรอาหาร

ค่า Exergy ของอาหารคือคุณค่าทางโภชนาการ หรือความสามารถในการให้พลังงานแก่ประชากรในประเทศนั่นเอง ค่าที่ใช้แทนค่าดังกล่าวคือปริมาณแคลอรี่ของอาหารประเภทต่างๆที่ถูกจัดหาเพื่อการบริโภคโดยประชากร อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับการเข้าถึงข้อมูลสถิติของประเทศไทยเกี่ยวกับปริมาณอาหารประเภทต่างๆ ซึ่งรวมถึง ไข่ เนื้อสัตว์ นม ผัก ผลไม้ ข้าวและเมล็ดพืช น้ำตาล เกลือ น้ำมัน ไขมัน และ เครื่องดื่มต่างๆ การวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรอาหารจึงนำค่าพลังงานที่ประชากรของประเทศต้องการซึ่งเท่ากับ 2,529 แคลอรี่ต่อคนต่อวันในช่วงปี ค.ศ. 2005 ถึง 2007 [33] มาใช้ในการคำนวณค่า Exergy ของการใช้ทรัพยากรอาหารใน

ระดับประเทศซึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ 64,076,033 คน ในปี ค.ศ. 2011 ตามประกาศสำนักทะเบียน กรมการปกครอง [34]

การใช้เฉพาะค่าปริมาณแคลอรี่ที่ประชากรต้องการต่อวันนี้แทนปริมาณ Exergy ของทรัพยากรอาหารที่ใช้ในประเทศเป็นการประเมินปริมาณ Exergy ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง งานวิจัยนี้จึงทำตามวิธีการประเมินทรัพยากรอาหารของ Wall โดยปริมาณ Exergy ที่ทำการประเมินของทรัพยากรอาหารจะรวมถึงปริมาณ Exergy ของเศษซากพืชผลทางการเกษตรที่ไม่สามารถบริโภคได้ (Residues) ซึ่งรวมถึงความสูญเสียในการเก็บเกี่ยว โดยปริมาณ Exergy ดังกล่าวสมมุติให้เป็นอีกเท่านึงของปริมาณ Exergy ของทรัพยากรอาหารที่บริโภค ดังที่แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 5 ปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรวัตถุดิบ

Materials		Exergy (KJ/Kg)	Consumption (Ton)	Exergy (GJ)
Metals	Aluminium	29,491	383,644	11,313,883
	Copper	2,110	204,982	432,512
	Iron and Steel	8,750	7,605,967	66,552,211
	Lead	1,122	132,518	148,641
	Tin	4,649	11,908	55,362
	Zinc	5,187	78,992	409,758
Minerals	Limestone	654	114,122,823	74,614,822
	Granite	68	4,865,279	330,839
	Other Rocks	68	15,179,105	1,032,179
	Gypsum	149	2,363,350	352,139
	Calcite	186	477,732	88,858
	Dolomite	126	778,773	98,125
	Kaolin	57	606,386	34,564
Plastic	PE	46,500	937,000	43,570,500
	PP	46,400	879,000	40,785,600
	PVC	19,700	540,000	10,638,000
	PS	42,000	286,000	12,012,000
	PET	23,800	115,000	2,737,000
	Others	35,680*	1,014,000	36,179,520
Forestry	Paper	17,000	3,513,000	59,721,000
	Woods	8,000 MJ/CUM	241,300 CUM	1,930,400
Total			262,680,459	363,037,915

*average value

ตารางที่ 6 ปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรน้ำ

Water	Exergy (MJ/CUM)	Consumption (million CUM)	Exergy (GJ)
Domestic Consumption	50	3,101	155,050,000
Industrial and Commercial		1,738	86,900,000
Agriculture		46,654	2,332,700,000
Total		51,493	2,574,650,000

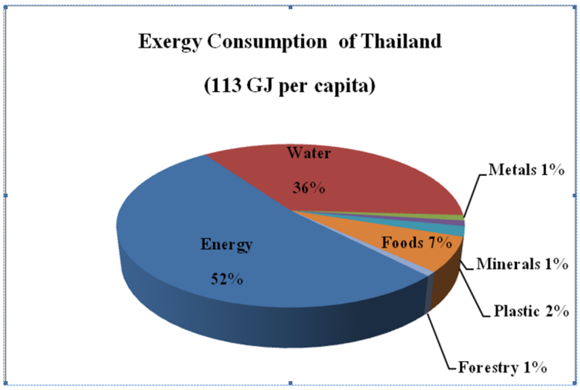
ตารางที่ 7 ปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรอาหาร

Food	Consumption (Cal/Person/Day)	Population	Exergy (GJ)
Net Consumption	2,529	63,878,267	493,631,980
Assumed Amount of Residues	2,529		

4. อภิปรายผล

ปริมาณ Exergy ทั้งหมดที่ถูกใช้ในประเทศไทยมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณ Exergy ที่ใช้ในหมวดหมู่ทรัพยากรต่างๆซึ่งรวมถึง พลังงาน (3,784 PJ) ทรัพยากรวัตถุดิบ (363 PJ) ทรัพยากรน้ำ (2,575 PJ) และ อาหาร (494 PJ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7,215 PJ หรือ 113 GJ per capita (GJ ต่อคน) โดยประมาณดังที่แสดงในรูปที่ 1

เนื่องจากขอบเขตของการวิจัยนี้จำกัดอยู่ที่การประเมินค่า Exergy ของทรัพยากรที่ใช้เท่านั้นโดยแบ่งตามประเภททรัพยากร ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถชี้ให้เห็นถึงประเภทของ



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรของประเทศไทยด้วยหลักการ Exergy

ทรัพยากรที่ควรให้ความสนใจในการนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพได้ในเบื้องต้น โดยไม่ได้นำไปสู่ข้อแนะนำต่างๆในระดับภาคส่วนของประเทศ หรือ นโยบายในแต่ละภาคส่วนแต่อย่างใด

ผลการวิเคราะห์สามารถบอกในภาพรวมภายใต้มิติของ Exergy ว่าทรัพยากรที่ควรให้ความสำคัญในการอนุรักษ์หรือการนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นลำดับต้นๆ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในภาคเกษตรกรรม ก๊าซธรรมชาติ และ น้ำมัน เนื่องจากปริมาณ Exergy ของทรัพยากรเหล่านี้ที่ใช้ไปมีปริมาณมากถึง 33% 22% และ 21% ตามลำดับของปริมาณ Exergy ที่ใช้ทั้งหมดในระดับประเทศ ในส่วนของทรัพยากรประเภทวัตถุดิบซึ่งมีปริมาณการใช้ Exergy คิดเป็นเพียงประมาณ 5% ของปริมาณ Exergy ที่ใช้ทั้งหมดในระดับประเทศ เหล็ก หินปูน พลาสติก และ กระดาษ เป็นทรัพยากรกลุ่มแรกที่ควรให้ความสนใจในการอนุรักษ์หรือการนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากข้อมูลจะเห็นได้ว่า ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้ Exergy ในส่วนของทรัพยากรน้ำที่สูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆที่มีการศึกษาการใช้ทรัพยากรด้วยหลักการ Exergy ทั้งนี้ เนื่องจากประเทศไทยมีความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำและยังเป็นประเทศเกษตรกรรม นอกจากการพัฒนาภาคเกษตรกรรมในด้านการใช้น้ำให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่นำมาใช้ภายในประเทศซึ่งเป็นพลังงานน้ำเพียงไม่เกินประมาณ 2% จากปริมาณ Exergy ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ ดังนั้น ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณ Exergy ของแหล่งน้ำในประเทศในด้านศักยภาพในการนำไปผลิตพลังงาน ว่ามีปริมาณเท่าไรและอยู่ในส่วนใดของประเทศ เพื่อที่จะเป็นข้อมูลประกอบกับปัจจัยด้านอื่นๆในการพัฒนาแหล่งผลิตพลังงานน้ำในประเทศทั้งในส่วนของโครงการไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กและขนาดใหญ่

เนื่องจากการที่งานวิจัยนี้ใช้น้ำทะเลเป็นจุดอ้างอิงในการคำนวณค่าการใช้ Exergy ของทรัพยากรน้ำถึงแม้น้ำทะเลจะถูกใช้เป็นจุดอ้างอิงสากลในการคำนวณค่าการใช้ Exergy ของทรัพยากรน้ำ แต่ถ้าจุดอ้างอิงในการประเมินค่าการใช้ Exergy ของน้ำถูกเปลี่ยนจากน้ำทะเลเป็นน้ำจืดตามธรรมชาติ (Freshwater) ค่าการใช้ Exergy ของทรัพยากรน้ำที่ประเมินได้จะลดลงอย่างมากเนื่องจากน้ำเกือบทั้งหมดเป็นน้ำที่ใช้ในภาคเกษตรกรรมซึ่งเป็นน้ำที่มาจากน้ำฝนและแหล่งน้ำทางธรรมชาติ เมื่อทำการแยกปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรน้ำออกมาและพิจารณาเฉพาะในส่วนของทรัพยากรที่เหลือจะพบว่า สัดส่วนของการใช้ Exergy ของทรัพยากรพลังงานจะเพิ่มมาอยู่ที่ 87% สัดส่วนของปริมาณการใช้ Exergy ของทรัพยากรพลังงานที่สูงของประเทศไทยนี้มีความสอดคล้องกับสัดส่วนการใช้ทรัพยากรของประเทศอื่นๆซึ่งมีการวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรโดยหลักการของ Exergy มาก่อนโดยมีปริมาณการใช้ Exergy ดังต่อไปนี้ สหรัฐอเมริกา (448 GJ per capita) [13] นอร์เวย์ (278 GJ per capita) [7] สวีเดน (310 GJ per capita) [8]อิตาลี (140 GJ per capita) [9] ญี่ปุ่น (150 GJ per capita) [10] จีน (100 GJ per capita) [14] อังกฤษ (275 GJ per capita) [11] และ ซาอุดีอาระเบีย (400 GJ per capita) [12]

5. บทสรุปผลวิจัย

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินการใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆของประเทศไทยให้อยู่ในหน่วยของ Exergy เพื่อให้นำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้ทรัพยากรในระดับต่างๆภายในประเทศ เช่น ในระดับองค์กร ระดับภาคส่วน และ ระดับจังหวัด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่ทำการวิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้ทรัพยากรของประเทศไทยด้วยหลักการของ Exergy และในขณะเดียวกันก็ได้อธิบายถึงหลักการของ Exergy ตลอดจนหลักการที่ใช้ในการประเมินค่า Exergy ของทรัพยากรประเภทต่างๆ และที่สำคัญ ยังเป็นการรวบรวมแหล่งข้อมูลของค่า Exergy ของทรัพยากรประเภทต่างๆ ซึ่งการสืบค้นแหล่งข้อมูลของค่า Exergy ที่เหมาะสมกับทรัพยากรของประเทศไทยนับเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับนักวิจัยในการนำหลักการ Exergy ไปใช้เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีฐานข้อมูล Exergy ที่สมบูรณ์ให้ใช้เหมือนกับฐานข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA)

ทรัพยากรประเภทต่างๆที่ใช้ในประเทศถูกนำมาวิเคราะห์โดยถูกจัดให้อยู่ในหน่วยของ Exergy ซึ่งในที่นี้หมายถึงศักยภาพในการนำทรัพยากรเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปสู่ข้อสังเกตุและผลการวิเคราะห์ดังที่แสดงอยู่ในส่วนของการอภิปรายผล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อสรุปดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของปริมาณ Exergy ของทรัพยากรที่ใช้ไปเท่านั้น การที่จะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างแท้จริงนั้น การดำเนินงานวิจัยในอนาคตควรจะต้องทำการวิเคราะห์การใช้ Exergy โดยพิจารณาถึง ลักษณะการนำทรัพยากรต่างๆไปใช้ การใช้ทรัพยากรแบ่งตามภาคส่วนต่างๆ ผลผลิตจากการใช้ Exergy ของภาคส่วนต่างๆ ปริมาณของ Exergy Loss และ ผลการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และ กฎข้อที่ 2 ของอณุพลศาสตร์ นอกจากนี้ เนื่องจากประเด็นต่างๆเกี่ยวกับการใช้ทรัพยากรในระดับประเทศเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนและมีปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องมากมาย การพิจารณาเพียงดัชนีชี้วัดตัวใดตัวนึงหรือข้อมูลด้านใดด้านนึง เช่น Exergy เพียงลำพังอาจนำไปสู่การกำหนดนโยบายที่ผิดพลาดได้ อย่างเช่นเมื่อพิจารณาถึงราคาและค่า Exergy ของทรัพยากร จะเห็นได้ว่าทรัพยากรบางชนิดมีทิศทางของราคาในท้องตลาดและค่า Exergy ที่ไม่สอดคล้องกัน เช่นในกรณีของอลูมิเนียมและทองแดง อลูมิเนียมมีค่า Exergy ต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าค่าของทองแดงถึงเกือบ 14 เท่าแต่ว่ามีราคาต่อหน่วยน้ำหนักเพียงประมาณ 1 ใน 4 ของราคาทองแดง เพราะฉนั้น ในการ

วิเคราะห์เพื่อกำหนดนโยบายเกี่ยวกับการใช้ทรัพยากรจะต้องกระทำโดยการพิจารณาตัวชี้วัดหรือปัจจัยที่อยู่ในมิติต่างๆเช่น เศรษฐศาสตร์ และ สิ่งแวดล้อม ควบคู่ไปกับการพิจารณาในมิติของ Exergy ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S.C. Kaushik, V.S. Reddy, S.K. Tyagi, "Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (4), pp. 1857-1872, 2011.

[2] M.A. Rosen, "Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy 20 (7), pp. 547-553, 1995.

[3] R. Prommas, C. Chaktranond, P. Ratanadecho "Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Multilayer Porous Media Using Hot Air", The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiangmai, Thailand, 4-7 Nov 2009. (in Thai)

[4] S. Olapiriyakul, R.J. Caudill, "Thermodynamic Analysis to Assess the Environmental Impact of End-of-life Recovery Processing for Nanotechnology Products," *Environmental Science and Technology* 43 (21), pp. 8140-8146, 2009.

[5] B. Klaasen, P.T. Jones, D. Durinck, J. Dewulf, P. Wollants, B. Blanpain, "Exergy-based efficiency analysis of pyrometallurgical processes", Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science 41 (6) , pp. 1205-1219, 2010.

[6] I.S. Ertesvag, "Society exergy analysis: a comparison of different societies," Energy 26 , pp. 253-270, 2001. M. Young, Energy 26 (3) , pp. 253-270, 2001.

[7] I.S. Ertesvag, M. Mielnik, "Exergy analysis of the Norwegian society," Energy 25 (10), pp. 957-973, 2000.C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Lab., Boulder, CO, private communication, May 1995.

[8] G. Wall, "Exergy use in the Swedish society 1994", Proceedings of the International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, TAIES'97 , pp. 403-413, 1997.

[9] G. Wall, E. Sciubba, V. Naso, "Exergy use in the Italian society," Energy 19 (12), pp. 1267-1274, 1994.

[10] G. Wall, "Exergy conversion in the Japanese society", Energy 15 (5), pp. 435-444, 1990.

[11] Gasparatos, A., El-Haram, M., Horner, M., "Assessing the sustainability of the UK society using thermodynamic concepts: Part 2," Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (5), pp. 956-970, 2009.

[12] Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., "Analysis of sectoral energy and exergy use of Saudi Arabia," International Journal of Energy Research 28 (3), pp. 205-243, 2004.

[13] R.J. Caudill, S. Olapiriyakul, B. Seale, "An exergy footprint metric normalized to US exergy consumption per capita", Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST 2010 , art. no. 5507746, 2010.

[14] Chen, G.Q., Chen, B., "Extended-exergy analysis of the Chinese society," Energy 34 (9), pp. 1127-1144, 2009. S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 4, pp. 570–578, Jul. 1993.

[15] M.A . Rosen, I. Dincer, "Exergy analysis of waste emissions", International Journal of Energy Research 23 (13), pp. 1153-1163, 1999.

[16] M.A . Rosen, I. Dincer, M. Kanoglu, "Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact", Energy Policy 36 (1) , pp. 128-137, 2008.

[17] J. Szargut, D. R. Morris, F. R. Steward, "Exergy Analysis of Thermal Chemical and Metallurgical Processes", Hemisphere Publishing Corp. and Springer-Verlag: New York, 1988.

[18] R. Costanza, R. D'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton, M. Van Den Belt, "The value of the world's ecosystem services and natural capital", Nature 387 (6630) , pp. 253-260, 1997.

[19] J. Szargut, "Chemical exergies of the elements", Applied Energy 32 (4), pp. 269-286, 1989.

[20] W. Van Gool, "Thermodynamics of chemical references for exergy analysis", Energy Conversion and Management, 39 (16-18), pp. 1719-1728, 1998.

[21] R. Rivero, M. Garfias, "Standard chemical exergy of elements updated", Energy 31 (15) , pp. 3310-3326, 2006.

[22] D.R. Morris, J. Szargut, "Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth", Energy 11 (8), pp. 733-755, 1986.

[23] G.M. Reistad, "Available energy conversion and utilization in the United States," Journal of Engineering
for Power ASME 97 Ser A (3), pp. 429-434, 1975.H. Poor, *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. New York: Springer-Verlag, 1985.

[24] Ileri, A., Gurer, T., "Energy and exergy utilization in Turkey during 1995", Energy 23 (12), pp. 1099-1106, 1998.

[25] J. Szargut, "Exergy Method: Technical and ecological applications" WIT Press, Southampton, 2005.

[26] Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand, "Energy Statistics of Thailand 2011", Available: http://www.eppo.go.th, 13 April 2012.

[27] Bureau of Primary Industries, Department of Primary Industries and Mines, "Thailand Metal Statistics Year 2009" Available: http://www.dpim.go.th/articles /article?catid=125&articleid=3272, 13 April 2012.

[28] Bureau of Economics and International Cooperation, Statistics Group, "Mineral Consumption of Thailand (Fiscal Year) 2010-2011" Available: http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=129&articleid=3705, 13 April 2012.

[29] R.U., Ayres, L.W. Ayres, "Industrial Ecology. Towards chosing the material cycle EDS" Edwar Elgar Publishing Ltd. UK, p. 379, 1996.

[30] Royal Forest Department, Ministry of Natural Resources and Environment, "Percentage change of domestic forest product consumption (1988-2004)", Available: http://www.thaienvimonitor.net/Database/forest.htm, 13 April 2012. (in Thai)

[31] 2007-2009 Directory of the Thai Pulp and Paper Industries Association , "Thai Pulp and Paper Industry: Facts and Figures", Available: http://www.fao.org/ forestry/150360f9bacd407795d3983c0042fc409 eba2a.pdf,13 April 2012.

[32] S. Koontanakulvong, "The Water Situation in Thailand in 2007", Available: http://project-twre.eng. chula.ac.th/watercu_eng/sites/default/files/publication/water_situation_50.pdf, 13 April 2012. (in Thai)

[33] Statistics Division FAO 2010, "FAO Statistical Yearbook 2010, Dietary energy protein and fat consumption",Available:http://www.fao.org/economic/ess/ess-publications/ess-yearbook/ess-yearbook2010/yearbook2010-consumption/en/,13 April 2012.

[34] Department of Provincial Administration, Ministry of Interior, "Office of Central Registration, Department of Provincial Administration, 's announcement on National Population based on Registration Data released on 31 December 2011", Available: http://stat.bora.dopa.go.th/stat/y_stat54.html, 10 April 2012. (in Thai)