SWU Engineering Journal (2012) 7(2), 15-24 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ.2555

ดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะของกระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์มพลาสติก PET

Specific Energy Consumption (SEC) of PET – Preform Injection Molding

สุติมาฆ์ แจ่มเหมือน[1] วีรศักดิ์ หมู่เจริญ[2] และ ชวลิต แสงสวัสดิ์[3]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: sangswasd@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ของกระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์มพลาสติก PET การศึกษานี้กระทำโดยการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์มที่สภาวะการผลิตที่เหมาะสม และใช้โปรแกรมคำนวณค่า SECเพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Benchmarking) ของกระทรวงพลังงาน จากผลการทดลองพบว่าถ้าอุณหภูมิการผลิตลดลง 5 องศาเซลเซียส การใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจะลดลงจากเดิมเป็น 12 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง โดยที่หลอดพรีฟอร์มยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าอ้างอิง ของกระทรวงพลังงานร้อยละ 16.44

คำสำคัญ: การวัดเปรียบเทียบสมรรถนะพลังงาน การบริโภคพลังงานจำเพาะ หลอดพรีฟอร์ม ขวดพีอีที

ABSTRACT

The objective of this project was to evaluate the specific energy consumption, SEC of PET-preform injection molding. This work was carried out by collecting the electrical consumption data of a preform injection machine at optimum process condition. After that the SEC of this process was calculated by using the Site Energy Use Calculator Program to compare with the benchmarking of the Ministry of Energy. The results obtained showed that the 5°C dropped from the normally melting temperature that using by the factory would reduce the average electrical consumption to 12 kilowalts per hour. Moreover, the results from the mechanical test showed that the preforms produced form this condition till maintained the standard quality. For the SEC it was found that the 16.44 % lower than benchmarking could be received.

Keyword: benchmarking, SEC, preform, PET, injection

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตขวดพลาสติก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นโรงงานที่ใช้พลังงานค่อนข้างมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากการผลิตขวด PET ต้องใช้ทั้งความดันลมและอุณหภูมิสูง บริษัท เพชรแพค จำกัดเป็นโรงงานของคนไทยที่ผลิตหลอดพรีฟอร์ม และ ขวด PET ป้อนเข้าสู่ตลาดทั้งในและต่างประเทศ ก็มีการจัดทำข้อมูลรวมเกี่ยวกับปริมาณ

การใช้พลังงานของโรงงาน เป็นรายวัน รายเดือน และรายปี แต่ยังไม่มีการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์การใช้พลังงานแยกตามกระบวนการผลิตโดยตรง ดังนั้นทางบริษัทและผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาประเมินข้างต้นไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่อยู่บรรทัดฐานเดียวกัน[1] ทั้งนี้คณะทำงานเลือกที่จะศึกษากระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์มเป็นตัวอย่าง เนื่องด้วยทางบริษัทมีอยู่หลายสายการผลิต สามารถพักรอหรือใช้ทดลองงานได้ อย่างไรก็ตามการแยกแยะข้อมูลการใช้พลังงาน และการผลิตนั้น ถึงแม้ว่าจะกระทำได้ไม่ยากจากการบันทึกและจากการจัดการรอบการจ่ายไฟฟ้า แต่ก็ต้องอาศัยความเข้าใจทางวิศวกรรมและระบบการผลิตที่ถูกต้อง ดังนั้นในการทำงานในครั้งนี้ทางผู้ดำเนินงานวิจัยจะอาศัยการศึกษาตัวแปรการผลิตในเรื่องของอุณหภูมิที่มีผลต่อหลอดพรีฟอร์ม โดยจะทดลองกับพลาสติก PET สำหรับเป่าขวดน้ำดื่มเพื่อหาสภาวะการผลิตที่ถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้ได้หลอดพรีฟอร์มมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเป็นที่ยอมรับได้ หลังจากนั้นจะนำข้อมูล SEC ไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่อยู่บรรทัดฐานเดียวกันต่อไป

2. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)

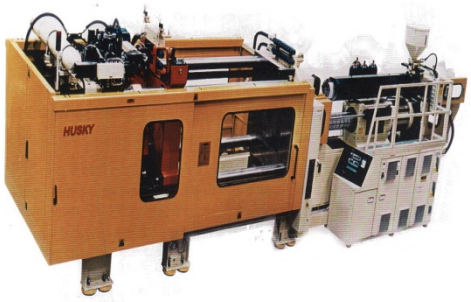
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แบบควบแน่นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเกิดจากปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ (Esterification) โดยใช้กรดเทเรฟทาลิก (Terepthalic acid, TPA) และ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) เป็นสารตั้งต้น เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แล้ว จะได้พอลิเมอร์ที่มีปริมาณผลึกและจุดหลอมเหลวสูง เรียกว่าเกรดโฮโมพอลิเมอร์ สำหรับเกรดโคพอลิเมอร์การสังเคราะห์จะมีการใช้มอโนเมอร์ตัวอื่นร่วมด้วยเช่น กรดไอโซพาทาลิก (Isophthalic acid, IPA) ร้อยละ 1.5 ทำให้พอลิเมอร์มีปริมาณผลึก และจุดหลอมเหลวต่ำลง แต่มีความใสเพิ่มขึ้น มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,Tg) เท่ากับ 67 ถึง 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature,Tm) เท่ากับ 265 องศาเซลเซียส[2] พอลิเมอร์หรือเรซินที่ใช้ในการเป่ายืดขวด PET ในท้องตลาดส่วนมากจะเป็นเกรดโคพอลิเมอร์[3] PET เป็นตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของพอลิเมอร์ที่ผลึกควบคุมได้จากกระบวนการผลิต ดังเช่นกระบวนการเป่ายืด พอลิเมอร์ที่มีผลึกชนิดอื่น เช่น พอลิแอซีทัล ไนลอน ผลึกจะเกิดขึ้นโดยตัวเอง และดังนั้นไม่สามารถผลิตโดยกระบวนการนี้ได้[4] PET เหมาะที่จะใช้ผลิตเป็นขวดบรรจุน้ำอัดลม เนื่องด้วยมีสมบัติต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี

Morton-Jones, D.H.(1989) ได้รายงานไว้ว่าถ้าเริ่มต้นหลอม PET ในช่วงอุณหภูมิ 250-280 องศาเซลเซียส แล้วหล่อเย็นอย่างรวดเร็วก็จะได้ของแข็งอสัณฐาน วัสดุนี้จะมีจุด Tg เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และเริ่มอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิเหนือกว่าจุดนี้ แต่ถ้า PET หลอมเหลวถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ก็จะได้ผลึกสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ขนาดใหญ่ที่แข็งและมีลักษณะทึบแสง มีจุดหลอมเหลว(Tm) เท่ากับ 265 องศาเซลเซียส ถ้าของแข็งอสัญฐานได้รับการให้ความร้อนซ้ำอีกจนกระทั่งเหนือจุด Tg (90-100 องศาเซลเซียส) และจากนั้นทำการดึงยืด อย่างเช่น การเป่ายืด ความเค้นก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกลาเมลลา (Lamella) ผลึกนี้จะมีขนาดเล็ก และโปร่งใส วัสดุจะมีความทนทานต่อการแตกหัก และมีความแข็งแรงเหนือกว่าทั้งอสัญฐานและผลึกสเฟียรูไลต์ ดังนั้นเมื่อนำ PET ไปใช้ในกระบวนการเป่ายืดจึงต้องทำการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วเพื่อให้กลายเป็นของแข็งอสัญฐาน และจากนั้นให้ความร้อนซ้ำจนเหนือจุด Tg แล้วทำการดึงยืด เพื่อเอื้อให้ความเค้นเหนี่ยวนำจนกระทั่งผลึกลาเมลลาก่อเกิด อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการหล่อเย็นช้าผลึกสเฟียรูไลต์จะเกิดขึ้นขณะทำการหล่อเย็น กระบวนการเป่ายืดจะไม่พัฒนาเกิดความเค้นเหนี่ยวนำเกิดผลึกขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความโปร่งใสลดลง ไม่เป็นที่ยอมรับในการผลิตขวด

3. กระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์ม

กระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์ม เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการนำเม็ด PET มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 140 ถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ถึง

8 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรด และความชื้นที่อยู่ในเม็ด PET หลังการอบเม็ดจะต้องมีความชื้นต่ำกว่า ร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก เม็ดจะถูกส่งเข้าเครื่องฉีดพลาสติก (ดูรูปที่ 1) โดยชุดหลอมพลาสติกจะทำหน้าที่หลอมเม็ด และรักษาอุณหภูมิให้ร้อนตลอดเวลา และชุดฉีดจะทำหน้าที่ดันพอลิเมอร์หลอมเข้าสู่คาวิตี้(Cavity) ของแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ทางวิ่งร้อน (Hot runner) และในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักจะใช้หุ่นยนต์ช่วยในการปลดชิ้นงาน[5]



รูปที่ 1 เครื่องฉีดพลาสติกยี่ห้อ HUSKY ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์ 300 ตัน

4. การประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ

สำหรับการประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะสามารถดูได้จากประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมทั้งโรงงาน หรือแยกตามกระบวนการผลิตโดยตรงจากค่าค่าเดียวคือ การบริโภคพลังงานต่อหน่วยผลผลิตก็ได้ ค่าดัชนีการใช้พลังงานจะมีประโยชน์อย่างมากในการติดตามและควบคุมการใช้พลังงาน และยังสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้พลังงานมาตรฐานของกระทรวงพลังงาน เพื่อประเมินว่ามีการใช้พลังงานอยู่ในระดับใดได้อีกด้วย ปกติแล้วค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน สามารถคำนวณจากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในปีนั้นหารด้วยปริมาณผลผลิตทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกันดังนี้[6]

$$\text{ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{การใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งปี(kWh)}}{\text{ผลผลิตที่ได้ทั้งปี(kg)}} \quad (1)$$

ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานสามารถใช้โปรแกรม “Site Energy Use Calculator” ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปภาษาไทยของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งสาธารณชนขอใช้งานได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย[1] คำนวณหาได้ โปรแกรมจะทำการพล็อตค่า SEC ลงไปบนกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงาน ถ้าค่า SECที่พล็อตลงไปอยู่เหนือเส้นกราฟ หมายความว่าโรงงานนี้ยังมีศักยภาพในการสร้างผลประหยัดได้ด้วยวิธีการลดใช้พลังงาน แต่ถ้าหากค่า SEC ที่พล็อตลงไปนั้นอยู่ใกล้กับเส้นกราฟ หมายความว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในระดับกลางๆ ซึ่งยังคงสามารถหาทางลดการใช้พลังงานลงได้อีก แต่ถ้าหากค่า SEC ที่พล็อตลงไปอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟ แสดงว่าโรงงานมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีอยู่แล้ว

สำหรับการหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องจักรในกระบวนการฉีดพลาสติก สามารถทำได้โดยใช้มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าเพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าในขณะที่เครื่องจักรกำลังผลิตอยู่ แม้ว่าโหลดในส่วนที่ใช้ทำความร้อนจะมีค่าเปลี่ยนไปตามการตัดต่อของฮีทเตอร์แต่ละตัวแต่ก็สามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากการวัดค่าในช่วง 10 ถึง 15 นาที การวัดค่าแยกในแต่ละส่วนนั้นมักจะวัดจากตู้ควบคุม ส่วนการวัดค่าโดยรวมของเครื่องฉีดนั้นให้วัดที่แผงจ่ายไฟย่อยจะทำได้สะดวกกว่า

5. การคำนวณเกี่ยวกับการเป่าภาชนะกลวง

Norman,C.L.(1990) ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการคำนวณการเป่าภาชนะกลวงไว้ว่า กระบวนเป่ายืดจะนำอัตราส่วน 2 ชนิด ของหลอดพรีฟอร์มต่อผลิตภัณฑ์มาใช้อย่างแรกคืออัตราส่วนแนววงแหวน (Hoop ratio, H) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่กว้างที่สุดของชิ้นงานเป่า(D_1) หารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหลอดพรีฟอร์ม(D_2) ก่อนที่จะเป่าแสดงไว้ดังนี้

$$H = \frac{D_1}{D_2} \quad (2)$$

อีกชนิดคืออัตราส่วนแนวแกน (Axial ratio, A) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่วัดภายในจากจุดเริ่มต้นของการดึงยืดลงสู่ก้นภาชนะกลวง (L_1) หารด้วยความยาวที่วัดภายในจากจุดเริ่มต้นของการดึงยืดลงสู่ก้นหลอดพรีฟอร์ม (L_2) นั่นคือ

$$A = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

สำหรับอัตราส่วนการพองตัวรวม (Total blow up ratio, BUR) จะเท่ากับอัตราส่วนแนววงแหวนคูณด้วยอัตราส่วนแนวแกน ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$BUR = H \times A = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{L_1}{L_2} \quad (4)$$

ในการออกแบบภาชนะทนความดัน ตัวอย่างเช่นขวดน้ำอัดลม BURควรมีค่าประมาณ 10 หรือมากกว่า ในขณะที่อัตราส่วนแนววงแหวนจะอยู่ในช่วง 4-7 และอัตราส่วนแนวแกนอยู่ในช่วง 1.4 - 2.6

การควบคุมกระบวนการเป่ายืดภาชนะกลวงสามารถใช้ความรู้เกี่ยวกับอัตราส่วนการดึงยืดมาใช้งาน ผลลัพธ์สามารถตรวจสอบได้จากห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่น ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นทดสอบจากวัตถุดิบเริ่มต้น PET ซึ่งมีความหนืดอินทรินสิก (Intrinsic viscosity,IV) เท่ากับ 0.72 แล้วตัดไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงควรมีค่าประมาณ 6,700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใกล้เคียงกับรายละเอียดจำเพาะ (Specification) ที่ผู้ผลิตให้มา สิ่งนี้คือข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดหาค่าการจัดเรียงตัว (Orientation) ที่เกิดขึ้นในภาชนะกลวง และถ้าตัดชิ้นงานสี่เหลี่ยมบางออกจากขวดใน 2 ทิศทาง ทั้งแนววงแหวนและแนวแกน จากนั้นนำชิ้นงานทั้งคู่ไปทดสอบหาความต้านทานแรงดึง บันทึกผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นไว้ ผลลัพธ์ที่ได้เหล่านี้ควรจะเท่ากับอัตราส่วนของทั้งแนววงแหวนและแนวแกนคูณกับค่าความต้านทานแรงดึงวัตถุดิบตอนเริ่มต้น ดังนั้นสำหรับพลาสติก PET ชนิด 0.72 IV ถ้ามีค่าอัตราส่วนแนววงแหวน (D_1/D_2) เท่ากับ 5 ก็ควรมีค่าความต้านทานแรงดึง 5 คูณด้วย 6,700 เท่ากับ 33,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างในแนววงแหวนควรจะใกล้เคียงกับ 33,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วด้วย สำหรับอัตราส่วนแนวแกน (L_1/L_2) ก็สามารถตรวจสอบได้โดยใช้วิธีเดียวกับชิ้นงานตัวอย่างซึ่งตัดออกมาตามแนววงแหวน[7] ในอีกด้านหนึ่งจึงพอกล่าวได้ว่า สำหรับการเป่ายืดขวดพลาสติก PET แล้ว อัตราส่วนความต้านทานแรงดึงทั้งแนวแกนและแนววงแหวนหารด้วยความต้านทานแรงดึงของวัสดุ PET ตอนเริ่มต้น ควรมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนแนวแกน (L_1/L_2) และแนววงแหวน (D_1/D_2) ตามลำดับซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาจใช้แทนกันได้

6. วิธีการทดสอบ

6.1 วัสดุและเครื่องมือ

1) เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (0.80 IV) ยี่ห้อชินเพชร บริษัทไทยชินกง จำกัด เกรดโคพอลิเมอร์

2) เครื่องฉีดหลอดพรีฟอร์มยี่ห้อ Husky ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์ 300 ตัน

3) เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้าแบบจานหมุนยี่ห้อ Mitsubishi ชนิด 3 เฟส

4) เครื่องมือวัดความหนาหลอดพรีฟอร์มชนิดฮอลล์ เอฟเฟกต์ ยี่ห้อ Eletrograph รุ่น 2001s

5) โปรแกรม Site Energy Use Calculator ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

6.2 หาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมต่อกระบวนการฉีดหลอดพรีฟอร์ม โดยอาศัยการควบคุมอุณหภูมิ

1) ตั้งอุณหภูมิของกระบอกอัดรีด กระบอกฉีดและแม่พิมพ์ตามมาตรฐานปกติที่โรงงานใช้ผลิตได้หลอดพรีฟอร์มใส ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้ในการผลิตของโรงงาน

จุดที่ให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)							
ชุดหลอม	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5	Ex6	B/H
	290	295	295	295	295	295	290
ชุดฉีด	BHE	SP1	SP2	SPH	DTS	N/A	
	290	275	280	280	280	280	
แม่พิมพ์	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5		
	280	280	280	280	280		

2) ตั้งอุณหภูมิลดลง จากอุณหภูมิปกติที่โรงงานใช้ 5 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับต่อไปนี้

ตารางที่ 2 อุณหภูมิที่ปรับลดลง 5 องศาเซลเซียส

จุดที่ให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)							
ชุดหลอม	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5	Ex6	B/H
	285	290	290	290	290	290	285
ชุดฉีด	BHE	SP1	SP2	SPH	DTS	N/A	
	285	280	275	275	275	275	
แม่พิมพ์	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5		
	275	275	275	275	275		

ตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ปรับลดลง 10 องศาเซลเซียส

จุดที่ให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)							
ชุดหลอม	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5	Ex6	B/H
	280	285	285	285	285	285	280
ชุดฉีด	BHE	SP1	SP2	SPH	DTS	N/A	
	280	275	270	270	270	270	
แม่พิมพ์	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5		
	270	270	270	270	270		

การตั้งอุณหภูมิทั้ง 3 สภาวะ ในตารางที่ 1-3 ยังคงตั้งเวลาหล่อเย็นไว้คงที่ที่ 1.25 วินาที ส่วนรอบเวลาการผลิตของทั้ง 3 สภาวะการผลิตก็ยังคงเท่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงคือประมาณ 6 วินาที

6.3 ทดลองฉีดหลอดพรีฟอร์ม

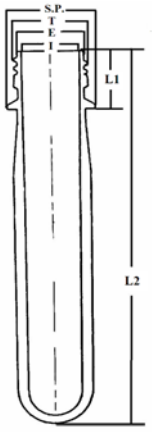
ทดลองฉีดหลอดพรีฟอร์มพร้อมกับบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทุกชั่วโมงจากการอ่านด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบจานหมุน แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยแต่ละสภาวะการผลิต

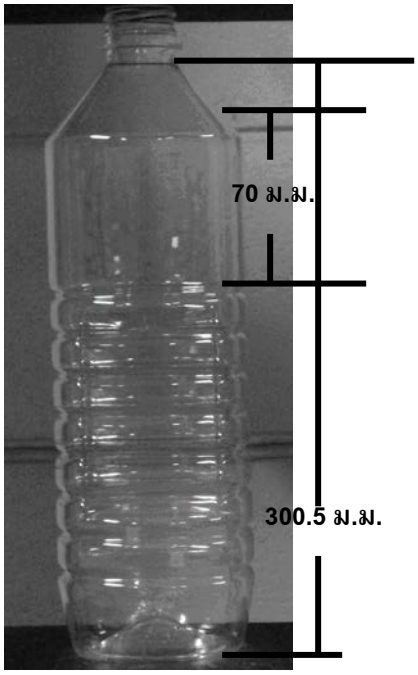
สภาวะการผลิตที่ทดลอง	ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
ปกติ	225
ลด 5°C	213
ลด 10°C	207

6.4 เก็บตัวอย่างหลอดพรีฟอร์ม

เก็บตัวอย่างหลอดพรีฟอร์มทั้งหมด 10 หลอดต่อครั้ง เก็บทั้งหมด 4 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 2 ชั่วโมง จากการลดอุณหภูมิการผลิต 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส เพื่อนำหลอดพรีฟอร์มมาวัดขนาดซึ่งทางโรงงานได้กำหนดการวัดขนาดไว้ดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 2)



รูปที่ 2 การวัดขนาดของหลอดพรีฟอร์ม
ที่มา (บริษัท เพชรแพค จำกัด)



รูปที่ 3 ขวดน้ำดื่มตราสิงห์ ขนาด 1.5 ลิตร
ที่มา (บริษัท เพชรแพค จำกัด)

ตารางที่ 5 ขนาดตามมาตรฐานของโรงงาน

ขนาดตามมาตรฐานกำหนด	
ขนาด L_1 (มม)	20.40 +/- 0.20
ขนาด L_2 (มม)	150.00 +/- 0.20
ขนาด S.P. (มม)	36.00 +/- 0.20
ขนาด T (มม)	31.38 +/- 0.30
ขนาด E (มม)	29.18 +/- 0.30
ขนาด I (มม)	26.80 +/- 0.20

6.5 นำตัวอย่างหลอดพรีฟอร์มที่ลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส ไปตรวจสอบความใสด้วยว่ายังได้มาตรฐานหรือไม่ โดยอาศัยการทดสอบด้วยสายตา ตามเกณฑ์ของโรงงานทั่วไปที่กำหนด อุปกรณ์จะประกอบด้วยฉากหลังแบนเรียบสีดำ และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์[8]

6.6 นำหลอดพรีฟอร์มที่ใสได้มาตรฐาน ไปเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (ดูรูปที่ 3)

6.7 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ตามมาตรฐาน ASTM D 638-03

6.8 คำนวณค่า SEC เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของกระทรวงพลังงาน

7. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

7.1 ผลการวัดขนาดของหลอดพรีฟอร์ม

เมื่อนำหลอดพรีฟอร์มที่ได้จากอุณหภูมิการผลิตต่างๆไปวัดขนาดจะได้ผลดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ผลการวัดขนาดเป็นมิลลิเมตรของหลอดพรีฟอร์มเฉลี่ย10 หลอดจากการทดลองปรับลดอุณหภูมิลง 5 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ตำแหน่งที่วัด					
	L_1	L_2	S.P	T	E	I
ครั้งที่ 1	20.33	150.56	35.96	31.26	29.27	26.84
ครั้งที่ 2	20.30	150.56	35.96	31.51	29.29	26.80
ครั้งที่ 3	20.28	151.56	35.96	31.24	29.32	26.81
ครั้งที่ 4	20.35	150.56	35.97	31.28	29.27	26.80
ค่าเฉลี่ย	20.32	150.81	35.96	31.32	29.29	26.81
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.031	0.5	0.005	0.126	0.024	0.019

ตารางที่ 7 ผลการวัดขนาดเป็นมิลลิเมตรของหลอดพรีฟอร์มเฉลี่ย10 หลอดจากการทดลองปรับลดอุณหภูมิลง 10 องศาเซลเซียส

	ตำแหน่งที่วัด					
ตัวอย่าง	L_1	L_2	S.P	T	E	I
ครั้งที่ 1	20.28	150.56	35.97	31.24	29.31	26.80
ครั้งที่ 2	20.33	150.56	35.96	31.28	29.29	26.80
ค่าเฉลี่ย	20.30	150.56	35.96	31.26	29.30	26.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.035	0	0.007	0.028	0.014	0

สำหรับตารางที่ 7 จะเก็บตัวอย่างหลอดพรีฟอร์มมาวัดขนาดตามจำนวนครั้งได้เพียง 2 ครั้ง เนื่องจากเป็นผลมาจากการปรับลดอุณหภูมิลง 10 องศาเซลเซียส หลอดพรีฟอร์มเกิดฝ้าที่ผนังหลอด จึงทำให้ต้องปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิปกติ เพื่อไม่ให้เกิดของเสียในการผลิต

อย่างไรก็ตามจากผลการวัดขนาดของหลอดพรีฟอร์มพบว่าหลอดพรีฟอร์มที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งจากการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสและ 10 องศาเซลเซียส ยกเว้น L_2 จะต่ำกว่าค่าต่ำสุดของมาตรฐานเล็กน้อยซึ่งแสดงว่าหลอดสั้นลงแต่ไม่มากนักยังพอทำการเป่าขวดได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องด้วยการมีอัตราหล่อเย็นช้าลงส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ผลึกมากขึ้น หลอด PET จึงหดมากกว่าเดิม ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่า เหตุที่ขนาดของหลอดพรีฟอร์มส่วนใหญ่ยังมีการหดตัวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ก็เพราะว่าทั้งสามอุณหภูมิการผลิตมีสภาพของแข็งอสัณฐานใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามถ้าเกิดผลึกสเฟียรูไลต์ทั่วทั้งหลอดอาจจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าขนาดมาตรฐานได้

7.2 ผลการตรวจสอบความใสของหลอดพรีฟอร์ม

ผลการตรวจสอบความใสของหลอดพรีฟอร์มได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ลักษณะความใสของตัวอย่างหลอดพรีฟอร์มจากการทดลองลดอุณหภูมิ

ตัวอย่าง	ลักษณะความใสหลอดพรีฟอร์ม	
	ลด 5°C	ลด 10°C
ครั้งที่ 1	ใส	ฝ้าที่ผนัง
ครั้งที่ 2	ใส	ฝ้าที่ผนัง
ครั้งที่ 3	ใส	-
ครั้งที่ 4	ใส	-

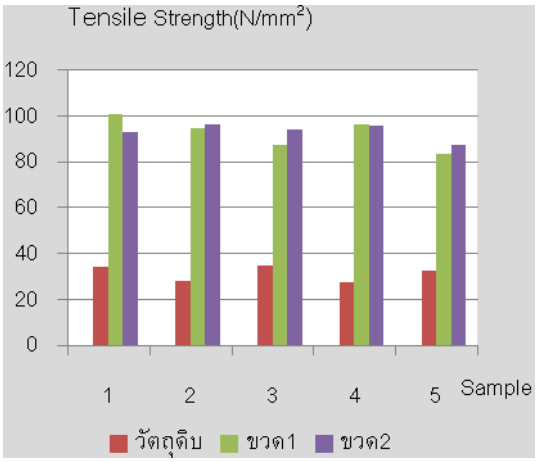
เมื่อทำการตรวจสอบความใสพบว่าจากการทดลองลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างหลอดพรีฟอร์มมา 4 ครั้ง หลอดพรีฟอร์มมีลักษณะของสีใสทุกหลอด ไม่มีตำหนิ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นของแข็งอสัณฐาน และเมื่อหลอดพรีฟอร์มนี้ ได้รับความร้อนอีกครั้งหนึ่งเหนือจุด Tg พร้อมกับทำการเป่ายืดก็จะเกิดผลึกลาเมลลาที่มีขนาดเล็ก ทำให้ขวดมีความใส และแข็งแรง[4] แต่เมื่อทดสอบความใสจากการทดลองลดอุณหภูมิ10 องศาเซลเซียส พบว่าหลอดพรีฟอร์มมีลักษณะของฝ้าที่ผนังหลอด เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการหล่อเย็นที่ลดลงทำให้ PET เมื่อถูกหล่อเย็นใกล้จุด Tg กล่าวคือประมาณ 100 องศาเซลเซียส และไม่มีแรงดึงยืดมากระทำ ก็จะเกิดผลึกสเฟียรูไลต์ ที่มีขนาดโตอันเป็นเหตุให้ความใสลดลง จึงพิจารณาไม่เลือกใช้การลดอุณหภูมิลง 10 องศาเซลเซีย

7.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบและขวดตามแนววงแหวนได้ผลดังตารางที่ 9 และรูปที่ 4

ตารางที่ 9 ความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบ และขวดตามแนววงแหวน (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

	ตัวอย่างที่					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5		
วัตถุดิบ	34.26	28.16	35.01	27.41	32.58	31.484	3.50
อุณหภูมิปกติ (ขวด 1)	100.81	94.97	87.75	96.54	83.60	92.73	6.95
อุณหภูมิลด 5 °C (ขวด 2)	92.98	96.49	94.45	96.16	87.75	93.566	3.54



รูปที่ 4 กราฟความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบและขวดตามแนววงแหวน

จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตามแนววงแหวนของขวดและวัตถุดิบ ขวด1 หมายถึงอุณหภูมิผลิตปกติ ขวด2 หมายถึงอุณหภูมิลด 5 องศาเซลเซียส ซึ่งขวดที่ลดอุณหภูมิกับขวดมาตรฐานมีค่าความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบประมาณ 3 เท่า และในส่วนเพิ่มเติมอาจกล่าวได้ว่าการที่ค่าความต้านทานแรงดึงของขวด PET เมื่อลดอุณหภูมิการผลิตลง 5 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าอุณหภูมิการผลิตเดิมเล็กน้อย ก็เนื่องจากการลดอุณหภูมิลงในส่วนของแม่พิมพ์ทำให้ส่งเสริมการเกิดผลึกบริเวณผิวหลอดพรีฟอร์มได้(สังเกตได้จากผลการทดลองลดอุณหภูมิลง 10 องศาเซลเซียส ยิ่งทำให้เกิดผลึกง่ายขึ้นจนเห็นเป็นรอยฝ้าขาวที่ผิว) การมีผลึกมากขึ้นใน PET ทำให้พอลิเมอร์แข็งขึ้น และเมื่อนำค่าเฉลี่ยของขวดและวัตถุดิบมาหารกัน พบว่าขวด1ได้ค่าเท่ากับ 2.95 และขวด 2 ค่าเท่ากับ 2.97 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการจัดเรียงตัวตามแนววงแหวน มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนแนววงแหวนตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 5 ส่วนการทดสอบตามแนวแกนไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากขวดถูกออกแบบมาให้มีรอยหยัก จึงใช้การคำนวณหาอัตราส่วนตามแนวแกนระหว่างขวดกับหลอดพรีฟอร์ม จากสูตรที (3) ในหัวข้อที่ 5 แทน ได้ค่าเท่ากับ 2.31 ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎี และค่าอัตราส่วนการพองตัวรวมเท่ากับ 6.86 ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำกว่าทฤษฎี (ประมาณ 10) แต่ยังสามารถใช้งานได้เพราะขวดจะใช้บรรจุน้ำดื่มเท่านั้น ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก ทั้งนี้ทางทฤษฎีจะทำการทดลองกับขวดน้ำอัดลมขนาด 2 ลิตร (0.72 IV) ได้ค่าอัตราส่วนการพองตัวรวมสูงเนื่องจากต้องการสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

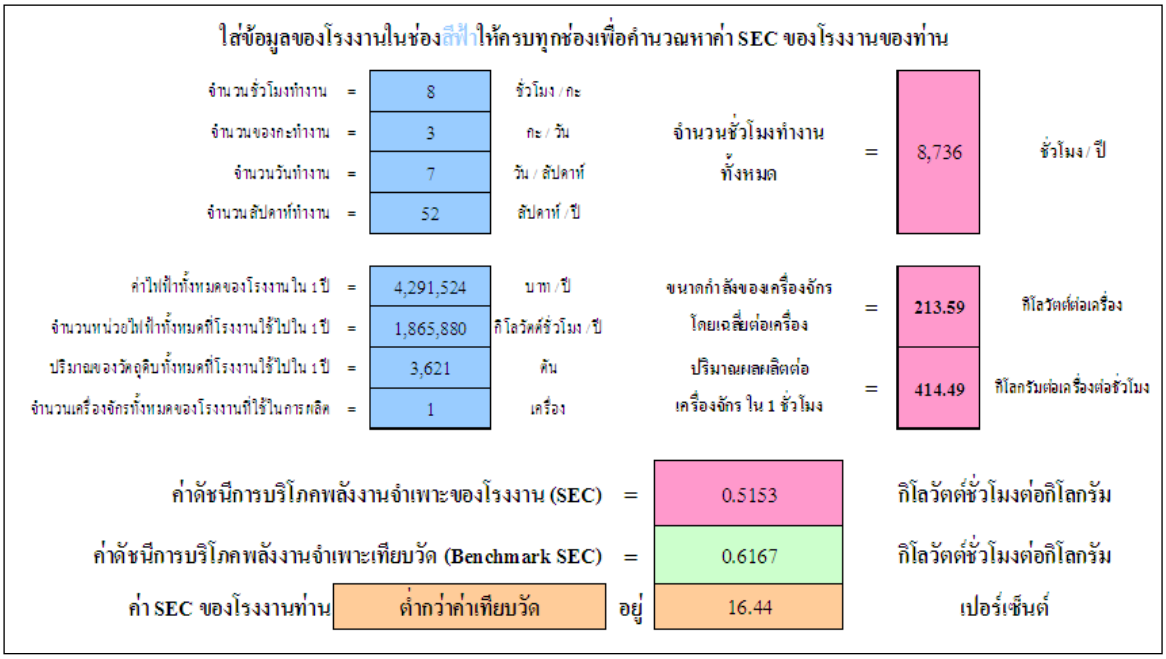
7.4 ผลการประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน

ทำการใส่ข้อมูลต่าง ๆลงในช่องสีฟ้าของโปรแกรม โปรแกรมจะทำการคำนวณ ค่า SEC ของโรงงาน และเทียบกับค่าอ้างอิงของกระทรวงพลังงาน ดังรูปที่ 5 แล้วพล็อตเป็นกราฟแสดงสภาพภาพการใช้พลังงานของโรงงานดังรูปที่ 6

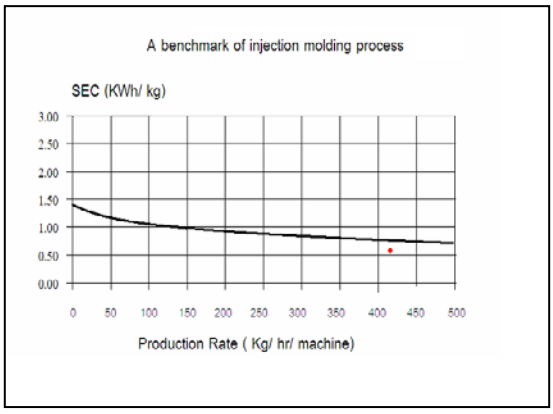
จากผลการคำนวณจึงสามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 10 ดังนี้

ตารางที่ 10 ค่าที่ได้จากการประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน

ค่าพลังงานไฟฟ้า(kW/machine)	213.59
ปริมาณผลผลิต(Kg/hr/machine)	414.49
ค่าดัชนีชี้วัดบริโภคพลังงาน(SEC)	0.5153
ค่าดัชนีชี้วัดบริโภคพลังงานเทียบวัด (Benchmark SEC)	0.6167
ค่า (SEC) ต่ำกว่า ค่าเทียบวัด(เปอร์เซ็นต์)	16.44



รูปที่ 5 โปรแกรม Site Energy Use Calculator



รูปที่ 6 กราฟแสดงสถานภาพการใช้พลังงานของโรงงาน

จากผลการประเมินพบว่าที่สภาวะการผลิตปกติมีการบริโภคพลังงานไฟฟ้า 225 กิโลวัตต์ เมื่อทำการทดลองหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมจากการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการบริโภคพลังงานไฟฟ้าลดลง 12 กิโลวัตต์ เหลือเท่ากับ 213 กิโลวัตต์ และจากการใช้โปรแกรมประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ มีค่าดัชนีชี้วัดบริโภคพลังงานจำเพาะ (SEC) ของโรงงานเท่ากับ 0.5153 และค่าดัชนีชี้วัดบริโภคพลังงานเทียบวัดเท่ากับ 0.6167 โดยค่า SEC ของโรงงานมีค่าต่ำกว่าค่าเทียบวัดร้อยละ 16.44

8. สรุป

พบว่าจากการลดอุณหภูมิการผลิตลง 5 องศาเซลเซียส หลอดพรีฟอร์มยังมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และการประเมินดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานมีค่าต่ำกว่าค่าอ้างอิง ของกระทรวงพลังงานร้อยละ 16.44 นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราส่วนการจัดเรียงตัวตามแนววงแหวน ใกล้เคียงกับทางทฤษฎี ส่วนการทดสอบตามแนวแกนไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากขวดมีรอยหยัก

9. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงงานอุตสาหกรรมและวิจัยสำหรับปริญญาตรี และขอขอบคุณ คุณวัฒนา ซำศิริ ที่ให้ความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย ที่ บริษัท เพชรแพค จำกัด

10. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน "เอกสารเผยแพร่ โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมพลาสติก." กรุงเทพฯ, 2549.

[2] PET พลาสติกใสใส่น้ำดื่ม. (24 มกราคม 2552). [ระบบออนไลน์], http://www.vcharkarn.com/

[3] Robert, J.C., "The Basis of Stretch Blow Molding PET Containers," Plastics Engineering, pp.35-39, 1999.

[4] Morton-Jones, D.H., "Polymer Processing," Chapman and Hall, London, pp.136-137, 1989.

[5] Zagarola, S.W., "PET-Preform & Bottle Manufacturing: Process Optimization and Control," International Training Course. 19-20 November 2007. Bangkok., pp.35-46, 2007.

[6] สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน กระทรวงพลังงาน. "คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมพลาสติก." ม.ป.ท.: ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมเนจเมนท์ จำกัด, 2552.

[7] Norman, C.L., "Plastic Blow Molding Handbook," Chapman and Hall, New York ,pp.101-105, 1990.

[8] Samuel, L.B., "Practical Extrusion Blow Molding," Marcel Dekker, Inc., New York,pp.231-232, 1999.