

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย An Experimental Study of Spontaneous Ignition of Sawdust

เบญจมาศ ทองศรี¹ และ ณัฐศักดิ์ บุญมี^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

*e-mail address: fengnab@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย โดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณหาค่าคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย และเพื่อประมาณหาขนาดการกองเก็บขี้เลื่อยที่ไม่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง การทดลองจะดำเนินการโดยนำชิ้นทดสอบขี้เลื่อยซึ่งมีขนาด 8^3 , 10^3 , และ 12^3 cm^3 รูปทรงลูกบาศก์ใส่เข้าไปในตูบที่มีการไหลเวียนอากาศเป็นอย่างดี จากการทดลองหาค่าคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เอง $E/\bar{R}$ เท่ากับ 11588 K และค่า $A\Delta h_c/k$ เท่ากับ $1.74 \times 10^{15} \text{ K/m}^2$

จากคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย สามารถประมาณขนาดการจัดเก็บของขี้เลื่อยที่ปลอดภัยได้ การกองเก็บขี้เลื่อยโดยทั่วไปอาจพิจารณาเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งมีรัศมี (r_0) และครึ่งหนึ่งของความสูง (l_0) หรือรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม ครึ่งหนึ่งของความยาวแต่ละด้าน (w_0), (l_0), (r_0) ดังนั้นขนาดการกองเก็บขี้เลื่อยที่ปลอดภัยสามารถแสดงโดยพื้นที่ใต้เส้นกราฟคือขนาดที่ปลอดภัยไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_∞) นั้นๆ สำหรับกองขี้เลื่อย

คำหลัก: ขี้เลื่อย, การลุกไหม้ได้เอง, ทฤษฎีของ F-K

Abstract

This paper presents an experimental study of spontaneous ignition of sawdust. The spontaneous ignition theory of Frank-Kamenetskii has been utilized to analyze the data. The objective are to find the apparent spontaneous ignition properties of sawdust and to determine a safe storage pile size of sawdust that does not cause spontaneous ignition. Three sizes (8^3 , 10^3 , and 12^3 cm^3) of cubic sawdust samples were put into a convective oven to determine the apparent spontaneous ignition properties ($E/\bar{R}$ and $A\Delta h_c/k$). Based on a series of tests, the study found that $E/\bar{R}$ is 11588 K and $A\Delta h_c/k = 1.74 \times 10^{15} \text{ K/m}^2$.

From the apparent spontaneous ignition properties, a safe storage pile size of sawdust has been determined. A typical sawdust pile can be assumed to store in a cylinder shape with radius r_0 and half height l_0 . Thus the safe storage pile size is presented in a graphical format. Any sawdust pile with r_0 and l_0 (for cylindrical shape) or half width w_0 , l_0 , r_0 (for rectangular box) falls in the area under curve for a given ambient temperature (T_∞) indicating a safe size from spontaneous ignition.

Keywords: Sawdust, Spontaneous Ignition, Theory of Frank - Kamenetskii

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ สำหรับใช้สอยสร้างอาคาร บ้านเรือน ตลอดจนการนำมาทำเฟอร์นิเจอร์หรือเครื่องตกแต่งบ้านจากกระบวนการแปรรูปไม้จะได้ขี้เลื่อยเหลือ

ใช้จากกระบวนการผลิต มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียดซึ่งเลื่อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่ ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งบางโรงงานจะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ(Boiler) หรือนำมาผลิตไฟฟ้าชีวมวล (Biomass

TSF-36

Power) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเพาะเห็ด ทำรูป ฯลฯ ส่วนการจัดเก็บซีลี้อยู่ในแบบเทกองบนพื้นที่โล่ง (Bulk Size) เนื่องจากมีปริมาณมาก กรณีศึกษาซีลี้อยู่จากการแปรรูปไม้ในโรงงานแห่งหนึ่ง จากข้อมูลปริมาณของวัตถุดิบและเศษวัสดุในช่วงของกระบวนการผลิตวัตถุดิบมีจำนวน 6588.24 ตัน จะได้ไม้แปรรูป 2610.93 ตัน และเป็นเศษซีลี้อยู่ในกระบวนการผลิต 753.04 ตัน [1] ทั้งนี้ปริมาณของซีลี้อยู่จะขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของแต่ละโรงงาน ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นในการกองเก็บซีลี้อยู่ที่มีปริมาณหลายตันคือความเสี่ยงในการเกิดไฟไหม้เนื่องจากกองซีลี้อยู่เกิดปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนด้วยตัวเอง (Self-Heating) จนเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเอง การถ่ายเทความร้อนของกองซีลี้อยู่กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบมีผลอย่างมากต่อการเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเอง (Spontaneous Ignition) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเพลิงไหม้ ตัวอย่างเหตุการณ์เพลิงไหม้โรงงานกองซีลี้อยู่อย่างพารา จังหวัดปราจีนบุรี[2] และกองซีลี้อยู่ชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นความเสี่ยงในการเกิดอัคคีภัยจึงได้ทำการศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของซีลี้อยู่ เพื่อป้องกันและลดความสูญเสียจากอัคคีภัย

การศึกษาการลุกไหม้ได้เองของวัสดุ โดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii ในการวิเคราะห์ โดยมีนักวิจัยบางกลุ่มได้ทำการศึกษาดูอย่างเช่น ทำการศึกษาการจุดติดไฟได้ด้วยตัวเองของกากอ้อยและการจัดเก็บวัสดุให้ปลอดภัย[3] การศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาคายความร้อนด้วยตัวเอง(Self-Heating) จากส่วนประกอบของต้นไม้[4]และการศึกษากระบวนการลุกไหม้ได้เองของวัสดุที่มีลักษณะพรุน[5] การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย[6]

งานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของซีลี้อยู่ เพื่อหาคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เองของซีลี้อยู่ และการประเมินเพื่อหาสภาวะที่ปลอดภัยในการกองเก็บซีลี้อยู่ในลักษณะรูปทรงต่างๆ

2. ทฤษฎีการลุกไหม้ได้เอง

การวิเคราะห์การลุกไหม้ได้เองของ Frank-Kamenetskii จะวิเคราะห์ที่ตัวเลข Damkohler (δ) ซึ่งตัวเลขนี้หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพลังงานเนื่องจากการปฏิกิริยาเคมีต่อพลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการนำ

ความร้อน โดยตัวเลข Damkohler เป็นฟังก์ชันของขนาดและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมสมการที่ (1)

$$\delta = \left(\frac{E}{RT_\infty} \right) \left[\frac{r_0^2 (A\Delta h_c) e^{-E/RT_\infty}}{kT_\infty} \right] \quad (1)$$

โดยที่ A คือ Pre-exponent factor, Δh_c คือ ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, E คือ พลังงานกระตุ้น, R คือ ค่านิยจกที่ของแก๊ส, T_∞ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ r_0 คือขนาด[7]

ตัวเลข Damkohler จากสมการที่ (1) มีเทอมที่แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/K$ ซึ่ง 2 เทอมนี้ไม่ขึ้นกับขนาดรูปทรงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยถ้านำเชื้อเพลิงทดสอบมาควบคุมอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้วยตู้บ่มซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงมาก ๆ (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับอุณหภูมิผิวเชื้อเพลิงทดสอบ $T_s = T_\infty$ เป็นผลให้ $B_i = \infty$) เราสามารถคำนวณหาค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/K$ ได้จากผลการทดลองหาอุณหภูมิการลุกไหม้ได้เอง T_{ig} ของชิ้นเชื้อเพลิงทดสอบในภาชนะบรรจุรูปทรงลูกบาศก์ที่ขนาด r_0 แตกต่างกัน

จัดรูปสมการที่ (1) ใหม่และหาค่าล็อกทั้งสองข้างของสมการ จะได้ตามสมการที่ (2) ซึ่งสามารถเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx + C$ โดยที่ m คือ ความชัน และ C คือ จุดตัดแกน y

$$\ln \left[\delta_c \left(\frac{T_{ig}^2}{r_0^2} \right) \right] = - \left(\frac{E}{\bar{R}} \right) \frac{1}{T_{ig}} + \ln \left[\left(\frac{E}{\bar{R}} \right) \left(\frac{A\Delta h_c}{k} \right) \right] \quad (2)$$

จากนั้นจะได้สมการตัวเลข Damkohler ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าตัวเลข Damkohlerวิกฤต โดยถ้าวัดตัวเลข Damkohler ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าตัวเลข Damkohler วิกฤต ก็แสดงว่าเกิดการลุกไหม้ได้เอง

ตัวเลข Damkohler วิกฤต (δ_c) สำหรับรูปทรง Cylinder รัศมี r_0 , สูง $2l_0$ ใช้สูตร

$$\delta_c = 2.0 + 0.84(r_0/l_0)^2 \quad (3)$$

TSF-36

เมื่อ r_0 คือ รัศมี และ l_0 คือ ครึ่งหนึ่งของความสูง[8]

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองหาอุณหภูมิการลุกไหม้ได้เองของชี้เลี้ยงดำเนินการโดยเริ่มจากเก็บตัวอย่างจากกองชี้เลี้ยงเพื่อใช้เป็นชั้นทดสอบ กำหนดภาชนะบรรจุ (Basket) รูปทรงลูกบาศก์มีความยาวด้าน 8^3 , 10^3 , และ 12^3 เซนติเมตร³ ตามลำดับ และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple K-Type จำนวน 3 จุด เพื่อวัด กึ่งกลางของชั้นทดสอบ ผิวด้านนอกของชั้นทดสอบ และอุณหภูมิของตู้อบ ตามรูปที่ 1(ก) เพื่อวัดค่าอุณหภูมิของชั้นทดสอบ และทำการเก็บข้อมูลด้วย Personal Daq/54 ตามรูปที่ 1(ข) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ทำการตั้งค่าตู้อบให้ทำงานตามอุณหภูมิที่กำหนด (ปรับเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 1°C) โดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ จุดที่ทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางของชั้นทดสอบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของตู้อบ ซึ่งแสดงว่าชั้นทดสอบเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมินั้น จะถือเป็นอุณหภูมิการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig}) ของชั้นทดสอบ การทดลองดำเนินไปโดยปรับให้มีอัตราการไหลเวียนของอากาศภายในตู้อบมากที่สุด เพื่อให้ค่าการพาความร้อนมีค่าสูง ($B_i = \infty$) ซึ่งยืนยันได้จากค่า $T_s = T_{oven}$



รูปที่ 1 (ก) ตำแหน่งของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 3 จุด



รูปที่ 1 (ข) การเก็บข้อมูลด้วย Personal Daq/54

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

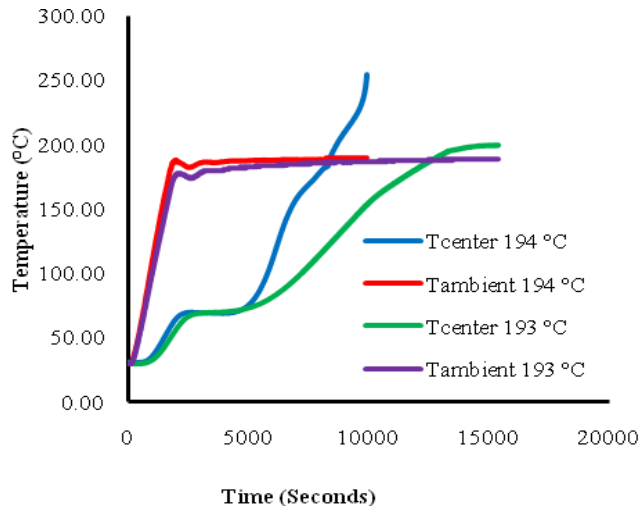
4.1 อุณหภูมิการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig})



รูปที่ 2 การลุกไหม้ได้เองของชี้เลี้ยงขนาด 8^3 เซนติเมตร³
($T_{ig} = 194^\circ\text{C}$)

จากรูปที่ 2 พบว่าลักษณะการลุกไหม้ของชั้นทดสอบจะเป็นการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง (Thermal Runaway) โดยเริ่มลุกไหม้จากจุดกึ่งกลางชั้นทดสอบและขยายวงกว้างออกไปสู่ด้านผิวของชั้นทดสอบ การลุกไหม้ทำให้ผิวของชี้เลี้ยงเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากเกิดกระบวนการไพโรไลซิส และปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนออกมา

TSF-36



รูปที่ 3 อุณหภูมิการลุกไหม้ได้เองของชิ้นทดสอบ 8³ เซนติเมตร³

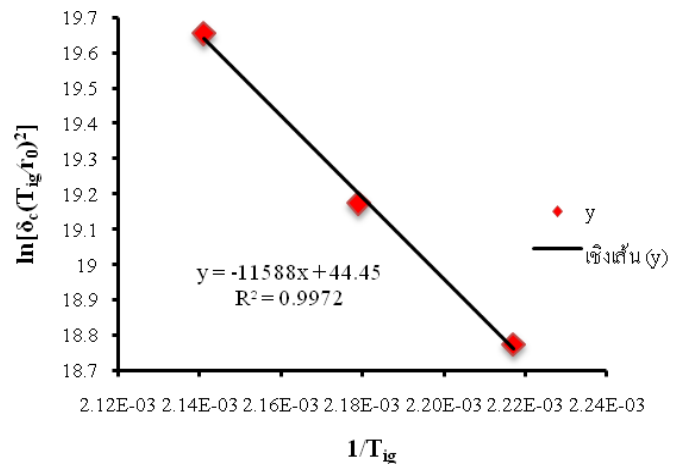
จากรูปที่ 3 เป็นการทดลองของชิ้นทดสอบขนาด 8³ เซนติเมตร³ พบว่าอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง T_{ig} เท่ากับ 194 °C ส่วนอุณหภูมิที่ 193 °C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง ส่วนผลการทดลองของซีลี้อยู่ในภาชนะบรรจุขนาด 10³ และ 12³ เซนติเมตร³ ได้ค่า $T_{ig} = 186$ °C และ 178 °C ตามลำดับ

4.2 หาค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$

นำค่า T_{ig} จากชิ้นทดสอบซีลี้อยูรูปทรงลูกบาศก์มีความยาวด้าน 8³, 10³, และ 12³ เซนติเมตร³ มาคำนวณเพื่อหาค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$ ตามตารางที่ 1 จะได้กราฟสมการเส้นตรงตามรูปที่ 4 และได้สมการที่ (4)

ตารางที่ 1 ผลการลุกไหม้ได้เองของซีลี้อยู่ในภาชนะบรรจุรูปทรงลูกบาศก์ 8³, 10³, 12³ เซนติเมตร³

Cube 2r ₀ (mm)	r ₀ (m)	T _{ig} (°C)	T _{ig} (K)	δ _c	y = $\ln \left[\delta_c \left(\frac{T_{ig}^2}{r_0^2} \right) \right]$	x = $\frac{1}{T_{ig}}$
80	0.04	194	467	2.52	19.65467	2.14E-03
100	0.05	186	459	2.52	19.17382	2.18E-03
120	0.06	178	451	2.52	18.77402	2.22E-03



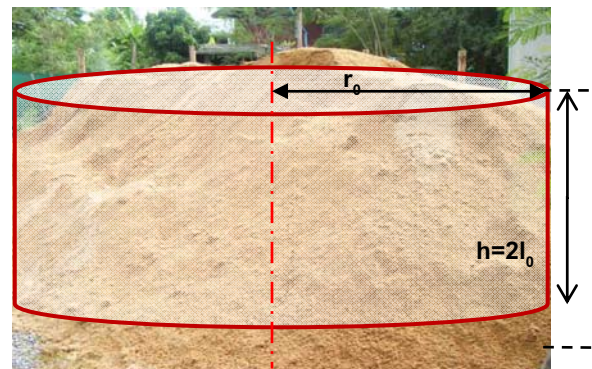
รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $y = \ln[\delta_c(T_{ig}^2/r_0^2)]$ และ $x = 1/T_{ig}$

ความชันของกราฟ คือ $E/\bar{R} = 11588K$ จะได้ $A\Delta h_c/k = 1.74 \times 10^{15} K/m^2$ แทนค่าลงในสมการที่ (1) จะได้สมการตัวเลข Damkohler คือ

$$\delta = 2.02 \times 10^{19} \left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2} \right) e^{-11588/T_\infty} \quad (4)$$

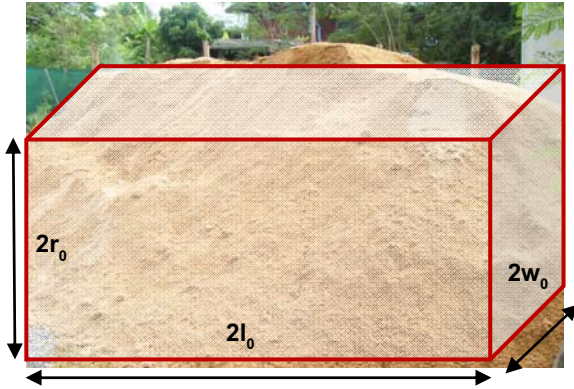
4.3 การประมาณขนาดการกักเก็บซีลี้อยู่ที่ปลอดภัย

จากการวิเคราะห์ผลข้างต้น จะนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ความปลอดภัยของกองซีลี้อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้แห่งหนึ่ง ซึ่งการกักเก็บซีลี้อยู่มีหลากหลายรูปทรง โดยทั่วไปซีลี้อยู่จะมีลักษณะการกักเก็บตามรูปที่ 5 (ก) และรูปที่ 5 (ข) ซึ่งสามารถประมาณเป็นรูปทรงกระบอก และรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม ตามลำดับ



รูปที่ 5 (ก) การกักเก็บซีลี้อยู่รูปทรงกระบอก

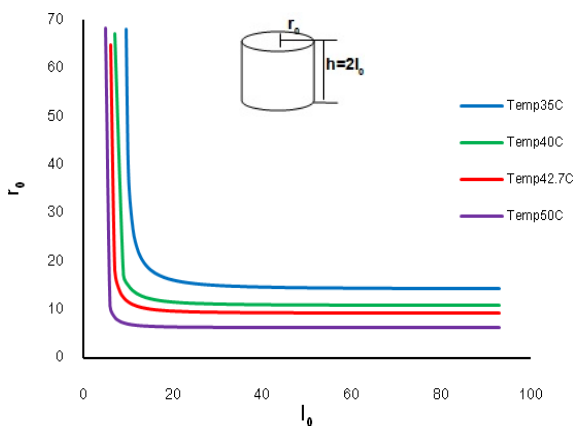
TSF-36



รูปที่ 5 (ข) การกองเก็บชีเลื่อยรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม

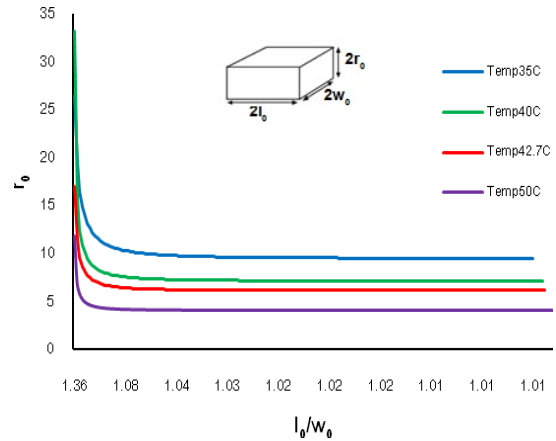
จากเงื่อนไขการลุกไหม้ได้เองจะเกิดขึ้นเมื่อ δ มากกว่า δ_c ซึ่งสามารถหาสภาวะวิกฤติของ r_0 , l_0 และ T_∞ ได้เมื่อสมการที่ (3) เท่ากับ สมการที่ (4) จะได้สมการที่ (5) และสามารถหาผลเฉลยของสมการนี้ได้ตามรูปที่ 6 (ก) หรือจะประมาณการกองเก็บชีเลื่อยเป็นรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม (Rectangular Box) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของสมการ (6) นี้ได้ตามรูปที่ 6 (ข)

$$2.02 \times 10^{19} \left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2} \right) e^{-11588/T_\infty} = 2 + 0.84 \left(\frac{r_0}{l_0} \right)^2 \quad (5)$$



รูปที่ 6 (ก) ความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกองชีเลื่อยทรงกระบอก

$$2.02 \times 10^{19} \left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2} \right) e^{-11588/T_\infty} = 0.88 \left[1 + \left(\frac{r_0}{w_0} \right)^2 + \left(\frac{r_0}{l_0} \right)^2 \right] \quad (6)$$



รูปที่ 6 (ข) ความสัมพันธ์ของความสูงและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของชีเลื่อยรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม

รูปที่ 6 (ก) คือผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกองชีเลื่อยทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 35°C, 40°C, 42.7°C และ 50°C โดยพื้นที่ใต้เส้นกราฟคือบริเวณปลอดภัยไม่เกิดลุกไหม้ได้เองของอุณหภูมินั้นๆ กราฟนี้สามารถนำมาประมาณค่าขนาดการกองเก็บที่ปลอดภัยได้ ตัวอย่างเช่น กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้แห่งหนึ่ง จากอุณหภูมิสูงสุดในช่วงฤดูร้อนปี 2557 คือ 42.7°C [9] ดังนั้นจึงพิจารณาใช้เส้นกราฟ 42.7°C ขนาดที่ปลอดภัย คือ จุดใดๆ ในพื้นที่ใต้เส้นกราฟ เช่น ถ้า r_0 เท่ากับ 14.10 เมตร l_0 ที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิน 8 เมตร เป็นต้น

รูปที่ 6 (ข) คือผลเฉลยของความสัมพันธ์ของความสูงและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างที่อุณหภูมิ 35°C, 40°C, 42.7°C และ 50°C โดยพื้นที่ใต้เส้นกราฟคือบริเวณปลอดภัยไม่เกิดลุกไหม้ได้เองของอุณหภูมินั้นๆ กราฟนี้สามารถนำมาประมาณค่าขนาดการกองเก็บที่ปลอดภัยได้ ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดในช่วงฤดูร้อนปี 2557 คือ 42.7°C [9] ดังนั้นจึงพิจารณาใช้เส้นกราฟ 42.7°C ขนาดที่ปลอดภัย คือ จุดใดๆ ในพื้นที่ใต้เส้นกราฟ เช่น ถ้า r_0 เท่ากับ 11.40 เมตร l_0/w_0 ที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิน 1.21 เมตร เป็นต้น

TSF-36

4.4 เปรียบเทียบ Activation Energy ($E, \text{kJ/mole}$) ของชี้เลี้ยง

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบ Activation Energy ($E, \text{kJ/mole}$) ของชี้เลี้ยง

material	Activation Energy (kJ/mole)	Source
Sawdust	56.54	(Spokoyny,1988)
Sawdust	90	(Chong et al, 1995)
Sawdust	<u>96.34</u>	<u>This experiment</u>
Sawdust	100	(Jones et al, 1998)
Sawdust	115	(Bowes, 1984)

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่า E จากการทดลองครั้งนี้ อยู่ในช่วงค่า E ของงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งเป็นการทดลองการลุกไหม้ได้เองของชี้เลี้ยงเหมือนกัน ค่าที่ได้ถือว่าใกล้เคียงกัน

5. สรุป

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของชี้เลี้ยง เพื่อหาคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เอง โดยใช้ทฤษฎีของ Frank – Kamenetskii ในการวิเคราะห์ผลการทดลองขึ้น เชื้อเพลิงทดสอบ ขนาด รูปทรง และอุณหภูมิภายในตู้อบ ตามที่กำหนด ได้ค่า $E/\bar{R}$ เท่ากับ $11588 K$ และค่า $A\Delta h_c/k$ เท่ากับ $1.74 \times 10^{15} K/m^2$ การประมาณขนาดการจัดเก็บของชี้เลี้ยงที่ปลอดภัยเพื่อลดและป้องกันการเกิดอัคคีภัยที่มีสาเหตุจากการลุกไหม้ได้เอง สามารถประเมินสภาวะความเสี่ยงได้โดยใช้รูปกราฟผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกองชี้เลี้ยงรูปทรงกระบอกหรือพินารูปทรงกล่อ่งสี่เหลี่ยม โดยใช้ความสัมพันธ์ของความสูงและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของชี้เลี้ยงรูปทรงกล่อ่งสี่เหลี่ยม ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยพื้นที่บริเวณใต้เส้นกราฟคือบริเวณที่ปลอดภัย ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองของอุณหภูมินั้นๆ สำหรับกองชี้เลี้ยงในโรงงานแปรรูปไม้แห่งหนึ่งที่น่าสนใจมาเป็นที่ศึกษา โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดในช่วงฤดูร้อนเท่ากับ 42.7°C พบว่าขนาดที่ปลอดภัยของชี้เลี้ยงรูปทรงกระบอก คือ จุดใดๆ ในพื้นที่ใต้เส้นกราฟ 42.7°C เช่น ถ้า r_0 เท่ากับ 14.10 เมตร l_0 ที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิน 8 เมตร หรือขนาดที่

ปลอดภัยของชี้เลี้ยงรูปทรงกล่อ่งสี่เหลี่ยมถ้า r_0 เท่ากับ 11.40 เมตร l_0/w_0 ที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิน 1.21 เมตร เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900 ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ใช้ตู้อบและห้องปฏิบัติการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2557). อุตสาหกรรมแปรรูปไม้. แหล่งที่มา <http://www2.diw.go.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 1/03/2558.
- [2] ไทยรัฐ (2554). ไฟไหม้โรงงานไม้. แหล่งที่มา <http://www.thairath.co.th/>, เข้าดูเมื่อวันที่ 1/03/2558.
- [3] Gray, B.F., J.F. Griffiths, and Hasko, S.M., (1984). *Spontaneous Ignition Hazards in Stockpiles of Cellulosic Materials: Criteria for Safe Storage*. Journal of Chemical Technology in Biotechnology.
- [4] Jones, J.C., et al. (1990). *The Self-Heating and Thermal Ignition Propensity of Forest Floor Litter*. Journal of Fire Science.
- [5] Stephen Michael Tamburello, (2011). *On Determining Spontaneous Ignition in Porous Materials*. Master Thesis, University of Maryland.
- [6] พงษ์ศักดิ์ พงษ์สัมพันธ์, (2558). การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย, การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [7] James G. Quintiere, (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. John Wiley & Sons Ltd, USA.
- [8] Robert G. Zalosh, (2002). *Industrial Fire Protection Engineering*. John Wiley & Sons Ltd, England
- [9] กรมอุตุนิยมวิทยา (2557). ภูมิอากาศของประเทศไทย. แหล่งที่มา <http://www.tmd.go.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 1/03/2558.
- [10] J.C.Jones and A Puignou (1998). *On the thermal ignition of waste*. Journal of Chemical Engineers.

TSF-36

- [11] Bowes, P.C., (1984). *Self-Heating: Evaluating and Controlling the Hazard*. Elsevier.
- [12] Beever, P.F.(1995) *Chapter 2-12 Self-Heating and Spontaneous Combustion*, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2nd Edition, P.J. DiNenno, Editor. Society of Fire Protection Engineering: Quincy, Massachusetts.
- [13] ณัฐศักดิ์ บุญมี (2557). *พลศาสตร์อัคคีภัย(ร่าง)*. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.