

การทบทวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดชีวมวลโดยการปรับสภาพ จากการระเบิดด้วยไอน้ำ

Mathematical Modeling of Biorefinery by Steam Explosion Pretreatment: A Review

อำนาจ อิมเจริญ^{1*} พิชัย อัญมมงคล¹ สิ้นชัย ชินวรรตน์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ถ. รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ. นครนายก 26120

Corresponding author: ^{1} E-mail: mme58105@gmail.com ¹E-mail: pichaias@yahoo.co.uk

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.ประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

²E-mail: sch@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายในการทบทวนงานวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการสกัดชีวมวลจากการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำเพื่อความเข้าใจในการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Material) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายองค์ประกอบหลักของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสหลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำนั้นมีหลายวิธีเช่น แบบจำลองฟิสิกส์ (Physics Model) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic Model) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Model) วิธีการจำลองที่แตกต่างกันจะให้ผลการทำนายได้แม่นยำแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของวัสดุชีวมวลในแต่ละชนิดด้วย การปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นเทคโนโลยีสะอาดสำหรับการเปลี่ยนวัตถุดิบของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นพลังงานชีวมวลและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มทางเคมีและทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละวิธีตั้งที่กล่าวมาสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาและการประยุกต์ใช้กับวัตถุดิบชีวมวลอื่นๆภายในประเทศไทย

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสกัดชีวมวล การระเบิดด้วยไอน้ำ

ABSTRACT

This paper is aimed to review published research on mathematical modeling of a biorefinery by steam explosion pretreatment and deeply understand about the mathematical modeling applied in the biorefinery of lignocellulosic material. The mathematical modeling was used to predict the main components of lignocellulosic material product after steam explosion pretreatment. There are several modeling methods such as physics model, kinetic model, finite element model and artificial neural network model. The different modeling method will give prediction result at different levels of accuracy depending on physical and chemical biomass characteristics. The steam explosion pretreatment is a potential clean technology to convert raw lignocellulosic material into bioenergy with high added-value

chemical and physical product. These mathematical modeling are used to base on development and applications with biomass in Thailand.

Keyword: Mathematical Modeling, Biorefinery, Steam explosion

1. บทนำ

กระบวนการปรับสภาพวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยหลายวิธีซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ใช้สารเคมี วิธีการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion Pretreatment) เป็นวิธีหนึ่งที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาดโดยปราศจากสารเคมี ตัวแปรตัวประกอบความรุนแรง (Severity Factor) ใช้อธิบายความแตกต่างในแต่ละเงื่อนไขของการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปรอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปรับสภาพในกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำนั้นตัวแปรอุณหภูมิ ช่วงเวลาในการปรับสภาพและความดันไอน้ำจะมีผลกระทบโดยตรงต่อระดับการแตกตัวของโครงสร้างจุลภาค [1] และปริมาณองค์ประกอบหลักของวัสดุ [17] ตัวประกอบความรุนแรงนี้ไม่สนใจช่วงเวลาในการระเบิดซึ่งตัวแปรความหนาแน่นกำลังการระเบิด (Explosion Power Density) เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่ใช้อธิบายความแตกต่างในการระเบิดด้วยไอน้ำที่ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปรเอนทัลปีของไอน้ำ เอนทัลปีของน้ำ เอนทัลปีของวัสดุ ร่วมกับช่วงเวลาในการระเบิดและปริมาตรของถังปฏิกรณ์การระเบิด [3] ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองดังที่กล่าวมาข้างต้นไม่มีตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะผลกระทบจากการฉีกขาดทางกายภาพและไม่สามารถอธิบายถึงผลกระทบของการแตกตัวแบบทันทีทันใดได้ฉะนั้นเพื่อการปรับปรุงตัวแปรให้ดีขึ้นจึงมีการพิจารณาตัวแปรขนาดชิ้นส่วน ปริมาณความชื้น และพื้นที่ในการปล่อยชิ้นส่วนออกสู่ความดันบรรยากาศร่วมในความสัมพันธ์ของตัวประกอบความรุนแรงแบบใหม่ (Novel Severity Factor) [4] ตัวแปรที่ใช้อธิบายองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสระหว่างการระเบิดด้วยไอน้ำในข้างต้นนั้นยังคงไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแบบจำลองมัลติฟิสิกส์ (Multiphysics Model) ที่ซึ่ง

ประกอบด้วยสมการปฏิกิริยาการแปรที่ขึ้นกับเวลาร่วมกับไฟไนต์เรตทางเคมีและแบบจำลองเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่ต่อเนื่องเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาทั้งเชิงพื้นที่และปรากฏการณ์ชั่วขณะในวัสดุชีวมวลที่ซึ่งมีความเป็นไปได้ถึงการทำนายอย่างแม่นยำของการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าระหว่างการปรับสภาพและสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองผลกระทบสำหรับการออกแบบและความเหมาะสมของตัวแปรในการปรับสภาพสำหรับการเปลี่ยนทางชีวเคมีไปสู่เชื้อเพลิงชีวมวล [5] แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic Model) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการกำหนดค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์จากวิธีตัวแปรคุณสมบัติสูงสุด (Peak property) เพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมของซีเลียวไม้น (Pine sawdust) สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำแบบจำลองนี้จะใช้หาค่าตัวแปรอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมสำหรับการสลายตัวของความชื้นและเฮมิเซลลูโลสเพื่อปรับปรุงการจัดเก็บชีวมวลและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง [6] ในขณะเดียวกันแบบจำลองจลนพลศาสตร์ยังคงใช้ทำนายความเข้มข้นของลิกนินในซีลไม้ออสเพน (Aspen wood) หลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำซึ่งเป็นการรวมกันของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของไซเลน (Xylan) ในการสลายพอลิเมอร์ (Depolymerization) โดยการย่อยสลายด้วยกรด (Acidic Hydrolysis) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการละลาย (Solubilization) และการควบแน่น (Condensation) ของลิกนินในกรดแอซิดิก [7] ในการเตรียมชีวมวลจากการระเบิดด้วยไอน้ำให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่มีประโยชน์มากเนื่องจากธรรมชาติของกระบวนการระเบิดมีอัตราความเครียดของวัสดุสูงและเกิดขึ้นในเวลาอันสั้นฉะนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ

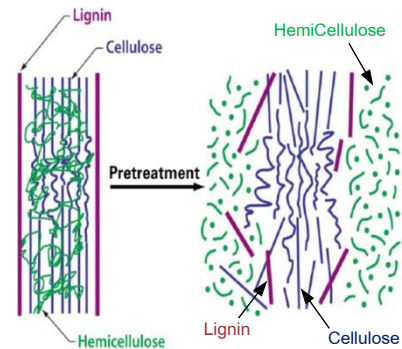
การเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดสามารถใช้จำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเซลล์และการปรับเปลี่ยนตัวแปรของกระบวนการให้เหมาะสม [16] นอกจากนี้การผลิตไบโอเอทานอลจากฟางต้นเรพ (Rapeseed straw) ด้วยกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) และการหมัก (Fermentation) หลังจากการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำสามารถจำลองกระบวนการบนพื้นฐานข้อมูลการทดลองที่ปราศจากสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์โดยการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เพื่อให้บรรลุถึงค่ามากที่สุดของน้ำตาลและผลผลิตสูงสุดของไบโอเอทานอล [9] การประยุกต์ใช้กระบวนการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำกับกระบวนการผลิตแผ่นไม้ประกอบที่ไม่ใช้กาวเป็นตัวประสาน (Binderless board) จากทางใบปาล์มน้ำมันโดยศึกษาคุณสมบัติทางกลของแผ่นไม้ประกอบ [10] ส่วนลำต้นปาล์มน้ำมันศึกษาผลกระทบของโครงสร้างเชิงอนุภาคต่อคุณสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์ [11] และทำการปรับปรุงตัวแปรให้เหมาะสมกับกระบวนการเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสม [12]

การทบทวนงานวิจัยในครั้งนี้นำเสนอความก้าวหน้าของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยการระเบิดด้วยไอน้ำสำหรับการแยกองค์ประกอบหลักและการประยุกต์ใช้ในการเพิ่มมูลค่าของผลิตผล

2. การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ

การปรับสภาพวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสโดยการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นการใช้วิธีการทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมีเพื่อแยกโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยไอน้ำความดันสูงและอุณหภูมิสูงในเวลาอันสั้นโดยการปล่อยออกสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างเส้นใยถูกทำลายโดยการแตกตัวด้วยการระเบิดซึ่งองค์ประกอบหลักทางโครงสร้างประกอบด้วย 3 องค์ประกอบได้แก่ เซลลูโลสเป็นใยไฟเบอร์หลักของ

พืช เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมใยไฟเบอร์และลิกนินเป็นสารที่เคลือบใยไฟเบอร์ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เซลลูโลสยึดติดกันซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีลักษณะการแตกตัวของโครงสร้างตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแตกตัวของชีวมวลจากการระเบิดเยื่อด้วยไอน้ำ [8]

องค์ประกอบหลักทั้งสามมีปริมาณที่แตกต่างกันที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของวัสดุชีวมวลในแต่ละชนิดและเงื่อนไขของตัวแปรในการดำเนินการระหว่างการระเบิดด้วยไอน้ำที่เหมาะสมตารางที่ 1 เฮมิเซลลูโลสในองค์ประกอบของชีวมวลส่วนใหญ่ไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน [13] การแตกตัวของเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาการย่อยระหว่าง 225 ถึง 325 องศาเซลเซียส เซลลูโลสการแตกตัวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าเพราะว่าในตัวเองมีโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 325 ถึง 375 องศาเซลเซียส [14] ลิกนินเป็นหนึ่งองค์ประกอบหลักที่ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพทางความร้อนมีการแตกตัวในช่วงอุณหภูมิกว้างมากกว่าอยู่ระหว่าง 180 ถึง 500 องศาเซลเซียส [15]

ตารางที่ 1 ปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [8]

วัสดุ ลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (%)	เฮมิ เซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ใบไม้	15-20	80-85	0

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการ
ทำนายพฤติกรรมและผลลัพธ์ของกระบวนการปรับ
สภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำที่สามารถสร้างขึ้นได้
โดยความสัมพันธ์จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งทางฟิสิกส์
และทางเคมีหรือข้อมูลจากการทดลอง

3.1 แบบจำลองฟิสิกส์ (Physics Model)[1,3- 5,17]

ในกระบวนการปรับสภาพจากการระเบิดด้วย
ไอน้ำเป็นการแตกตัวของชีวมวลไปสู่ความดัน
บรรยากาศภายในเวลาอันสั้น สมการบนพื้นฐานการ
ทดลองเรียกว่าตัวแปรความรุนแรง (Severity Factor)
หรือความก้าวหน้าของปฏิกิริยา (Reaction Ordinate)
 R_0 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปรับสภาพ
ตามสมการดังนี้

$$R_0 = t \cdot e^{\left\{ \frac{T-100}{14.75} \right\}} \quad (1)$$

โดยที่

t คือช่วงเวลาในการปรับสภาพ, min

T คืออุณหภูมิไอน้ำ, °C

ในทางปฏิบัติใช้ $\log R_0$ แสดงถึงความรุนแรงในแต่ละ
เงื่อนไขในการระเบิดด้วยไอน้ำ ตัวแปรความหนาแน่น

(Explosion Power Density) ถูกสร้างขึ้นบนสมมุติฐาน
ของการขยายตัวที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน
(Adiabatic Expansion Process)

$$P_e = (\Delta H_s + \Delta H_l + \Delta H_m) / (t * V) \quad (2)$$

โดยที่

ΔH_s คือการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของไอน้ำ, kJ/kg

ΔH_l คือการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของน้ำ, kJ/kg

ΔH_m คือการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของวัสดุ, kJ/kg

t คือช่วงเวลาในการปรับสภาพ, sec

V คือปริมาตรถึงปฏิกรณ์การระเบิด, m³

ตัวแปรดังกล่าวมายังคงไม่สามารถอธิบายผลกระทบ
จากการแตกตัวแบบทันทีทันใดได้ ฉะนั้นการใช้ทฤษฎี
การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทโมเมนตัมและ
กลศาสตร์การแตกหักเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การ
ศึกษาทางกายภาพในการแตกตัวแบบทันทีทันใดโดย
พิจารณาจากตัวแปร ปริมาณความชื้นของวัสดุ
ช่วงเวลาในการปรับสภาพและขนาดชิ้นส่วนที่
เหมาะสมกับพื้นที่ในการปล่อยออกสู่ความดัน
บรรยากาศทำให้เกิดเป็นความสัมพันธ์ของตัวประกอบ
ความรุนแรงแบบใหม่ R_1 ใช้อธิบายความรุนแรงของ
กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ ผลกระทบทางฟิสิกส์และ
ทางเคมีภายในกระบวนการตามสมการดังต่อไปนี้ [4]

$$R_1 = \frac{td^{-1.5}}{K_7} e^{\left\{ \frac{(K_1+K_2w)A^2(1-w)}{(K_3+K_4w)d^4+(K_5+wK_6)(1-w)^2 A^2} - 373 \right\}} 10^{-pH} \quad (3)$$

โดยที่

$$K_1 \approx \frac{224.9Mv_r}{2\rho_3 Rr(\kappa-1)}, K_2 = \frac{0.2mwc_m(\kappa+3)}{2\rho_3 r(\kappa-1)},$$

$$K_3 \approx \frac{224.9\pi^2 \eta^2}{2m}, K_4 = \frac{0.2wc_m \pi^2 \eta^2}{2rMV},$$

$$K_5 \approx \frac{224.9m}{2K_s \rho_s}, K_6 = \frac{0.2m^2 wc_m}{2K_s \rho_s rMV}$$

$$K_7 = \frac{\rho}{M \left(\frac{\phi D}{1 - Ln\phi} \right)^{0.67} \left(0.48 \cdot \left(\frac{\rho u}{\mu(1-\varepsilon)} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0.33} \cdot \Delta C}$$

โดยที่

d คือรัศมีเทียบเท่าทรงกลมของอนุภาค, mm

w คือปริมาณความชื้นของวัตถุ, %

A คือพื้นที่ช่องปล่อยวัตถุออก, m²

ρ คือความหนาแน่นของของเหลว, kg/m³

ρ_s คือความหนาแน่นของของแข็ง, kg/m³

ρ_3 คือความหนาแน่นสถานะที่หนึ่งที่น้ำไค, kg/m³

μ คือความหนืดไดนามิกส์ของของเหลว, kg/ms

M คือมวลโมเลกุล

V คือปริมาตร, m³

r คือความร้อนของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

R คือค่าคงที่ของแก๊ส 8.3143x10⁻³, kJ/mol · K

κ คือ ค่าคงที่ของกระบวนการ (Polytrophic exponent of steam)

m คือมวลทั้งหมดของวัตถุ, kg

c_m คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg

η คือสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับช่องปล่อยชีวมวลออกสู่ความดันบรรยากาศ

K_s คือปริมาณความยืดหยุ่นเชิงปริมาตร (Bulk Modulus), N/m²

ϕ คือช่องว่างของชิ้นส่วน (Void fraction)

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่จริง

n คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของศูนย์กลางทรงกลม, kg/m³

u คือ ความเร็ว, m/s

ΔC คือ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น

ε คือปริมาตรของช่องว่าง

pH คือ ความเป็นกรด-เบส

L คือ ความยาวของวัสดุรูปทรง, mm

แบบจำลองมัลติฟิสิกส์ (Multiphysics Model) ที่ใช้พิจารณาทั้งปรากฏการณ์เชิงพื้นที่และสถานะชั่วขณะในอนุภาคชีวมวล มีความเป็นไปได้ถึงการทำนายที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงคาร์โบไฮเดรตและ

โครงสร้างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าระหว่างการปรับสภาพ แบบจำลองสมการอนุพันธ์ย่อยที่ไม่ต่อเนื่องใช้หาคำตอบเชิงตัวเลขโดยวิธีสเปกตรัลไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเลเจนเต้ (Legendre Spectral Finite Element Method) วิธีสเปกตรัลไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้หาคำตอบที่เหมาะสมด้วยจำนวนลำดับขั้นอิสระ (Degree of Freedom) ที่ต่ำและทำให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมผลเฉลยที่ซึ่งเกิดขึ้นในระบบปฏิบัติการแพร่เมื่อรวมกับโนดการหาพื้นที่วิธีสเปกตรัลไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเลเจนเต้มีเมทริกซ์มวลแนวทแยงมุมที่ซึ่งคือส่วนกลับอย่างง่ายสำหรับวิธีลำดับขั้นเวลา ระบบสมการอนุพันธ์ย่อยสามารถทำให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} ([\mathbf{C}]\mathbf{u}) = \frac{\partial}{\partial z} ([\mathbf{D}]\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z}) + [\mathbf{R}]\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = [c_s \quad \varepsilon_L \quad \tilde{f}_x \quad \tilde{c}_{x0} \quad \tilde{c}_{xy} \quad \tilde{c}_f \quad T]^T \quad (5)$$

โดยที่

c_s คือ ความเข้มข้นของไอน้ำ

ε_L คือ การแตกตัวเชิงปริมาตรของของเหลว

\tilde{f}_x คือ การแตกตัวเชิงมวลของไซเลน

\tilde{c}_{x0} คือ ความเข้มข้นของไซโลลิลโกเมอร์

\tilde{c}_{xy} คือ ความเข้มข้นของไซโลลิส

\tilde{c}_f คือ ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรีล

T คือ อุณหภูมิของอนุภาคชีวมวล, °C

พจน์ $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{D}]$ และ $[\mathbf{R}]$ เป็นเมทริกซ์แนวทแยงมุมแทนการพา การแพร่และปฏิกิริยาตามลำดับที่ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$[\mathbf{C}] = \text{diag} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{D_{x0}}{\varepsilon_L^2} \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial z} \\ \frac{D_{xy}}{\varepsilon_L^2} \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial z} \\ \frac{D_f}{\varepsilon_L^2} \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial z} \\ \frac{D_f}{\varepsilon_L^2} \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial z} \\ 0 \end{bmatrix}, [\mathbf{D}] = \text{diag} \begin{bmatrix} D_s \\ 0 \\ 0 \\ \frac{D_{x0}}{\varepsilon_L} \\ \frac{D_{xy}}{\varepsilon_L} \\ \frac{D_f}{\varepsilon_L} \\ \frac{\varepsilon_L}{k_{eff}} \\ \frac{\rho_{eff} C_{eff}}{\rho_{eff} C_{eff}} \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{R}] = \text{diag} \begin{bmatrix} -k_{cond}(\varepsilon_P - \varepsilon_L) \\ -\frac{M_w}{\rho_L} k_{cond} c_s - k_{evap} \\ \rho_L \\ -(k_{x0} + k_{x1}) c_{acid} \varepsilon_P \\ -k_{x2} c_{acid} \\ -k_f c_{acid} \\ 0 \\ -4h \\ \rho_{eff} C_{eff} d \end{bmatrix} \quad (6)$$

โดยที่

D_{x0} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไซโลโอลิโกเมอร์

D_{xy} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไซโลส

D_f คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเฟอร์ฟูรัล

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำ

k_{eff} คือ ค่าการนำความร้อน, W/m/K

k_{cond} คือ ค่าคงที่อัตราการควบแน่น

k_{evap} คือ ค่าคงที่อัตราการระเหย

k_{x0} คือ ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนไซเลนเป็นไซโลโอลิโกเมอร์

k_{x1} คือ ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนไซเลนเป็นไซโลส

k_{x2} คือ ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนไซโลโอลิโกเมอร์เป็นไซโลส

k_f คือ ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนไซโลสเป็นเฟอร์ฟูรัล

ρ_{eff} คือ ความหนาแน่น, kg/m³

C_{eff} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำหนักเชิงปริมาตร

ε_P คือ ความเป็นรูพรุนของอนุภาคชีวมวล, nm

M_w คือ น้ำหนักโมเลกุล, g/mol

ρ_L คือ ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m³

c_{acid} คือ ความเข้มข้นของกรด, w/w%

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m²/K

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, mm

พจน์ของการพาความร้อนสำหรับประเภทที่ละลายน้ำได้ในสมการที่(6) เกิดขึ้นเนื่องจากการสร้างฟังก์ชันการแพร่ที่สอดคล้องกับทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการไล่ระดับของความเข้มข้นเทียบกับน้ำ (c_{x0}, c_{xy}, c_f) ใช้น้ำมากกว่าความเข้มข้นของโมลสุทธิ ($\tilde{c}_{x0}, \tilde{c}_{xy}, \tilde{c}_f$) พจน์ของ \mathbf{f} ถูกกำหนดโดย

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} k_{evap}(\varepsilon_L - \varepsilon_{LT}) \frac{\rho_L}{M_w} \\ k_{cond} c_s \varepsilon_P \frac{M_w}{\rho_L} + k_{evap} \varepsilon_{LT} \\ 0 \\ k_{x0} \rho_s c_{acid} \varepsilon_P \frac{\tilde{f}_x}{M_{x0}} \\ k_{x1} \rho_s c_{acid} \varepsilon_P \frac{\tilde{f}_x}{M_{xy}} + k_{x2} \tilde{c}_{x0} c_{acid} \frac{M_{x0}}{M_{xy}} \\ k_f \tilde{c}_{xy} c_{acid} \frac{M_{xy}}{M_f} \\ \frac{L}{\rho_{eff} C_{eff}} \cdot B + \frac{4h}{\rho_{eff} C_{eff} d} \cdot T_s \end{bmatrix}$$

$$B = k_{cond} c_s (\varepsilon_P - \varepsilon_L) M_w - k_{evap} (\varepsilon_L - \varepsilon_{LT}) \rho_L \quad (7)$$

โดยที่

ε_{LT} คือ จุดเริ่มต้นการแตกตัวของของเหลว

M_{x0} คือ น้ำหนักโมเลกุลของไซโลโอลิโกเมอร์, g/mol

M_{xy} คือ น้ำหนักโมเลกุลของไซโลส, g/mol

M_f คือ น้ำหนักโมเลกุลของเฟอร์ฟูรัล, g/mol

L คือ ค่าความร้อนแฝง, J/kg

T_s คือ อุณหภูมิไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ, °C

ρ_s คือ ความหนาแน่นสถานะของแข็ง, kg/m³

แต่ละตัวแปรในเวกเตอร์ผลเฉลยสามารถเขียนเป็นการรวมกันเชิงเส้นของฟังก์ชันพื้นฐานการประมาณค่าระหว่างช่วงลากรอง (Lagrangian Interpolant) และไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) รูปแบบสมการเต็ม (5) หลังจากการรวมกันเชิงพื้นที่และภายหลังการลดรูป ผลในการเชื่อมกันของสมการอนุพันธ์ด้วยค่าโหนด \mathbf{U} เป็นตัวแปรอิสระถูกกำหนดโดย

$$[\mathbf{M}] \frac{d\mathbf{U}}{dt} + [\mathbf{K}_C] \mathbf{U} = [\mathbf{K}_D] \mathbf{U} + [\mathbf{K}_R] \mathbf{U} + \mathbf{F} \quad (8)$$

โดยที่ $[\mathbf{M}]$ แทนเมทริกซ์มวล $[\mathbf{K}_C]$ แทนเมทริกซ์ความแข็งของการพา $[\mathbf{K}_D]$ แทนเมทริกซ์ความแข็งของการแพร่ $[\mathbf{K}_R]$ แทนเมทริกซ์ความแข็งของการเกิดปฏิกิริยาและ $[\mathbf{F}]$ แทนพจน์ของอินพุต สมการอนุพันธ์ที่เชื่อมกันถูกใช้หาคำตอบโดยวิธีการลำดับชั้น

เวลาแบบเซมิอิมพลิซิท (semi-implicit time stepping method) เพื่อหลีกเลี่ยงการจำกัดลำดับขั้นเวลาที่ซึ่งถูกกำหนดโดยเวลาการแพร่ของอุณหภูมิและไอน้ำสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับสมการไอน้ำและอุณหภูมิแนวโน้มเป็น 1,000 ถึง 10,000 ครั้งมากกว่ารูปแบบระบบการแพร่ของของแข็งอย่างมาก แบบแผนการรวมเวลาแบบเซมิอิมพลิซิท สามารถกำหนดเป็น

$$[\mathbf{M}] \left(\frac{\mathbf{U}^{n+1} - \mathbf{U}^n}{\Delta t} \right) + [\mathbf{K}_C] \mathbf{U}^{n+1} = [\mathbf{K}_D] \mathbf{U}^{n+1} + [\mathbf{K}_R] \mathbf{U}^{n+1} + \mathbf{F}^n \quad (9)$$

โดยที่ตัวยก n แสดงถึงระดับเวลาและเวลาทั้งหมดถูกกำหนดโดย $t^n = n\Delta t$ โดยที่ Δt คือช่วงเวลา ผลต่างลำดับขั้นเวลาย้อนหลังหนึ่งลำดับขั้นถูกใช้กับด้านขวามือของสมการที่ (9) เขียนที่ระดับเวลาถัดไป $n+1$ ด้วยการประมาณเชิงเส้นโดยเมทริกซ์ความแข็งที่เวลาล่าช้า (time lagging) วิธีการนี้ต้องการหาคำตอบระบบเชิงเส้นที่ทุกๆลำดับขั้นเวลาที่ซึ่งคือทำผ่านเมทริกซ์อิสระอัลกอริทึมค่าคงเหลือต่ำสุด (Generalized minimum residual algorithm)

3.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic Model)

[6-7]

การสลายตัวของเอมิเซลลูโลสในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำของชีวมวลซีเลื่อยไม้สน (Pine sawdust) เพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งมีกลไกจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวตามสมการ (11) และมีอัตราการสลายตัวแสดงโดยสมการของ Arrhenius [7] ดังนี้

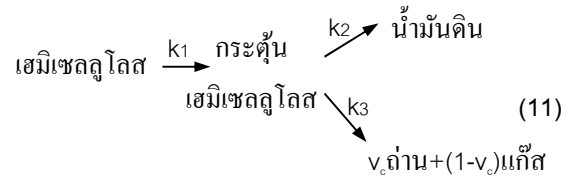
$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (10)$$

โดยที่

k คือค่าคงที่ปฏิกิริยา, s^{-1}

A คือตัวแปรเอกโพเนนเชียลเริ่มต้น, s^{-1}

E คือพลังงานการกระตุ้น, kJ/mol



ตัวแปรจลนพลศาสตร์ทางเคมีถูกกำหนดโดยวิธีคุณสมบัติสูงสุด (Peak Property) โดย Kim [2] จากเส้นกราฟความแตกต่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (Differential Thermalgravimetric) ถูกใช้ประมาณค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ ตัวแปรพลังงานการกระตุ้น E และตัวแปรเอกโพเนนเชียลเริ่มต้น A สามารถประมาณค่าได้ตามสมการนี้ [6]

$$E = \frac{nRT_m^2 H_m}{(1 - \alpha_m)} \quad (12)$$

$$A = \frac{H_m \beta \exp(E / RT_m)}{(1 - \alpha_m)^n} \quad (13)$$

โดยที่

n คือ ลำดับขั้นการเกิดปฏิกิริยา

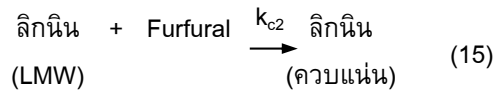
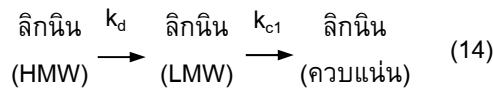
β คือ อัตราความร้อนคงที่, K/min

T_m คือ อุณหภูมิสูงสุด, K

H_m คือ ความสูงสูงสุด

α_m คือ การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงสุด

การทำนายรูปแบบลิกนินโดยการเพิ่มปฏิกิริยาเข้าไปในแบบจำลองจลนพลศาสตร์โดยที่ลิกนินเทียมถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการของลิกนินน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW) ที่ละลายได้กระทำกับเฟอร์ฟูรัล (Furfural) บนพื้นฐานการสมมุติของ Miranda (1978) ตามปฏิกิริยาลำดับขั้นที่สองที่ถูกทำนายโดยสมการ (15) ปฏิกิริยานี้จำเป็นสำหรับการแสดงปริมาณลิกนินที่ถูกควบแน่นซึ่งเกิดจากการควบแน่นตัวเองโดยปฏิกิริยา (14) และสำหรับการอธิบายการเพิ่มขึ้นในปริมาณลิกนินเทียมหลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำ [7]



$$\frac{dC_{ls}}{dt} = k_d C_l + k_{c1} C_{ls} - k_{c2} C_{ls} C_f \quad (16)$$

$$\frac{dC_{lc}}{dt} = k_{c1} C_{ls} + k_{c2} C_{ls} C_f \quad (17)$$

$$\frac{dC_f}{dt} = k_2 x_L - k_{c2} C_{ls} C_f \quad (18)$$

โดยที่

C_l คือ ความเข้มข้นของลิกนินน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMW), wt%

C_f คือ ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัลถูกกำหนดจากแบบจำลองการสลายตัวไซโลส, wt%

C_{ls} คือ ความเข้มข้นของลิกนินที่ละลายน้ำได้ (ลิกนินน้ำหนักโมเลกุลต่ำ), wt%

C_{lc} คือ ความเข้มข้นของลิกนินควบแน่น, wt%

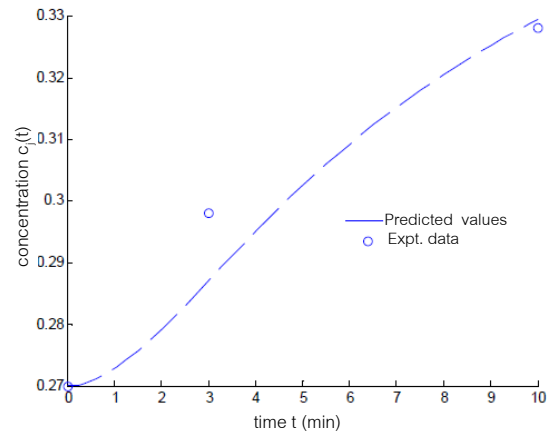
k_d คือ อัตราคงที่ของปฏิกิริยาการทำลายของลิกนิน, min^{-1}

k_{c1} คือ อัตราคงที่ของปฏิกิริยาการควบแน่นตัวเองของลิกนิน, min^{-1}

k_{c2} คือ อัตราคงที่ของปฏิกิริยาการควบแน่นลิกนินกับเฟอร์ฟูรัล, min^{-1}

x_L คือ ปริมาณของไซโลสในไอน้ำควบแน่น

k_2 คือ อัตราคงที่การแตกตัวของไซโลส, min^{-1}



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นระหว่างการทำนายด้วยแบบจำลองกับการทดลอง [7]

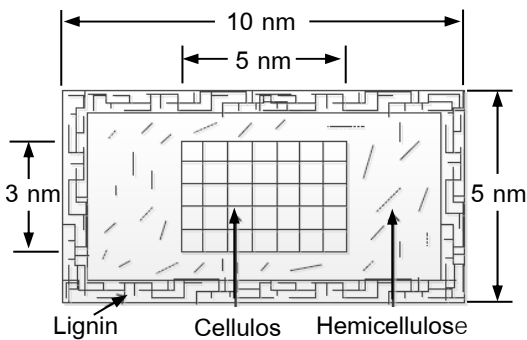
การใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการทำนายความเข้มข้นของลิกนินในชิ้นไม้แอสเพน (Aspen wood) หลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 205 °C ตามรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของลิกนินที่ได้จากการทำนายยังคงมีความแตกต่างกับการทดลองที่ซึ่งสามารถอธิบายได้สองเหตุผลคือ ขนาดชิ้นส่วนไม้แอสเพนมีขนาดไม่เหมาะสมและการกระจายตัวของไอน้ำในชิ้นส่วนไม้แอสเพนไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอด้วย

3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) [16]

การระเบิดด้วยไอน้ำเป็นวิธีสำหรับการแยก

ออกเป็นชิ้นและการเปิดออกของโครงสร้างเซลล์ของไม้และชีวมวลอื่นๆเพื่อให้เหมาะสมที่จะใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากสำหรับการทำกระบวนการที่เหมาะสมเนื่องจากธรรมชาติการระเบิดของกระบวนการมีอัตราความเครียดของวัสดุสูงที่ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในเวลาอันสั้นสามารถสร้างขึ้นเพื่อจำลองกระบวนการจัดการของเซลล์ลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินอธิบายในลักษณะส่วนประกอบเสริมแรงในแบบจำลองเส้นใยละเอียดเซลลูโลสถูกพิจารณาให้กระทำเป็นแรงเสริมในเมทริกซ์ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน อย่างไรก็ตามเมทริกซ์วัสดุไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันของเฮมิ

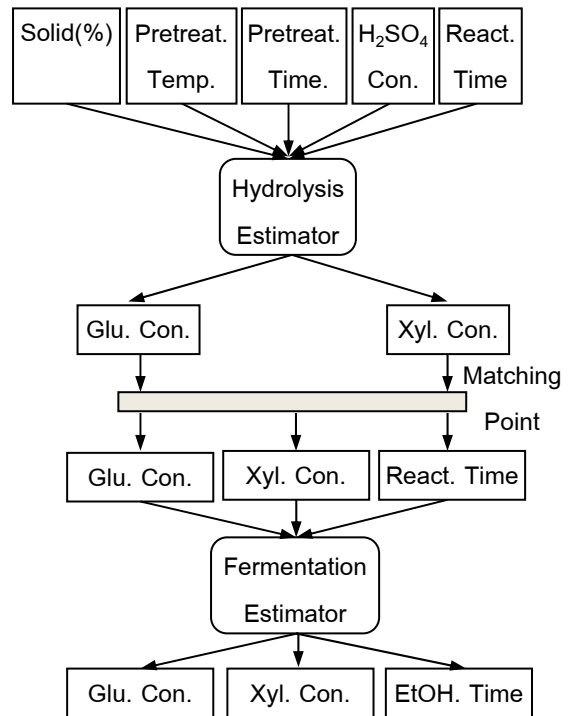
เซลลูโลสและลิกนินโครงสร้างค่อนข้างมีลำดับชั้น โครงสร้างที่แน่นอนของเส้นใยละเอียดไม่รู้แต่ถูกจำลองด้วยแกนของผลึกเซลลูโลสรอบๆโดยชั้นของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่ไม่มีผลึก ส่วนชั้นถัดไปปกคลุมด้วยลิกนินที่ซึ่งยึดเกาะเส้นใยละเอียดเข้าด้วยกัน รูปแบบของชั้นที่แตกต่างของผนังเซลล์มันใช้เพื่อดูจุดซึมน้ำเอมิเซลลูโลสและส่วนที่ไม่เป็นผลึกของเซลลูโลส จากความชื้นตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 การประมาณขนาดแบบจำลองหน้าตัดของเส้นใยละเอียด [16]

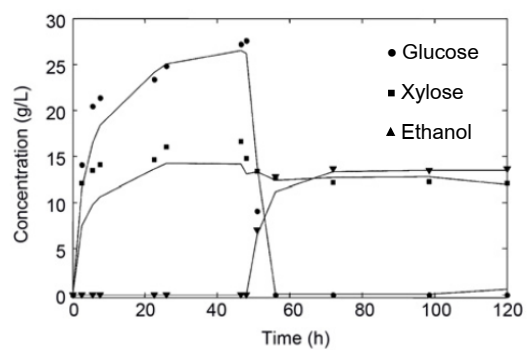
3.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks Model)[9]

การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์(Enzymatic Hydrolysis) และการรวมกันระหว่างกระบวนการหมักและการเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาลพร้อมกัน (Simultaneous Saccharification and Fermentation) แบบจำลองทั้งกระบวนการในลำดับขั้นของการย่อย (Hydrolysis) และการหมัก (Fermentation) ในสองโครงข่ายถูกรวมกันและถูกพิจารณาเป็นแบบจำลองกระบวนการควบคุมตามรูปที่ 4 ค่าเอาท์พุทสองค่าจากโครงข่ายแรก (ความเข้มข้นของ glucose และ xylose) หลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์) รวมเข้าด้วยกันกับเวลาการหมักเป็นสามตัวแปรอินพุทเริ่มต้นสำหรับโครงข่ายที่สองหลังจากจุดที่เข้ากันได้ มันจะเป็นไปได้ถึงการประมาณความเข้มข้นของส่วนประกอบที่ต้องการจากการเริ่มต้นของการย่อยด้วยเอนไซม์ไปถึงการหมัก



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อโครงข่ายสำหรับการจำลองตลอดกระบวนการ [9]

การเชื่อมต่อโครงข่ายแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายได้แม่นยำสำหรับความเข้มข้นในแต่ละช่วงเวลาของกลูโคสและเอทานอลส่วนไซโลสยังมีความแตกต่างเกิดขึ้นเล็กน้อยตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพของการเชื่อมโครงข่าย การทดลอง (จุด) และการประมาณค่า (เส้น) [9]

4. สรุป

การสกัดชีวมวลวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำเพื่อให้ได้มาซึ่งสารเคมีและพลังงานที่จำเป็นต่อความยั่งยืนของพวกเราในปัจจุบันและในอนาคต กระบวนการระเบิดเยื่อด้วยไอน้ำของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นเทคโนโลยีสะอาดปราศจากสารเคมีโดยมีแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางฟิสิกส์และทางเคมีสำหรับการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมกับกระบวนการระเบิดเยื่อด้วยไอน้ำเพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณองค์ประกอบของวัสดุภายหลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำที่มากที่สุดและมีคุณภาพสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานรวมถึงการทำนายปริมาณองค์ประกอบของวัสดุได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาแบบจำลองโดยการรวมแบบจำลองทางฟิสิกส์และทางเคมีเข้าด้วยกันเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองผลกระทบของโครงสร้างระหว่างการปรับสภาพเพื่อการออกแบบกระบวนการได้อย่างเหมาะสมแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขที่ให้ผลลัพธ์ได้แม่นยำกว่าแบบจำลองทางฟิสิกส์และทางเคมีโดยเฉพาะการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์เพื่อการปรับเปลี่ยนตัวแปรกระบวนการให้เหมาะสมและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับกระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเหมาะสำหรับการหาค่ามากที่สุดขององค์ประกอบทางเคมีระหว่างกระบวนการปรับสภาพจากการระเบิดด้วยไอน้ำเนื่องจากเป็นการคำนวณเชิงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Putnina, S. Kukle and J. Gravitis, "Steam Explosion as the Pretreatment Method of Lignocellulosic Biomass," *Material Science Textile and Clothing Technology*, pp. 80-83, 2012.
- [2] S. Kim, et al., "Using Peak Properties of a Dtg Curve to Estimate the Kinetic Parameters of the Pyrolysis Reaction: Application to High Density Polyethylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 85, pp. 799-805, 2004.
- [3] Z. Yu, et al., "A Real Explosion: The Requirement of Steam Explosion Pretreatment," *Bioresource Technology*, vol. 121, pp. 335-341, 2012.
- [4] Y. Zhang and H. Chen, "Multiscale Modeling of Biomass Pretreatment for Optimization of Steam Explosion Conditions," *Chemical Engineering Science*, vol. 75, pp. 177-182, 2012.
- [5] H. Sitaraman, et al., "Multiphysics Modeling and Simulation of High-Solids Dilute-Acid Pretreatment of Corn Stover in a Steam-Explosion Reactor," *Chemical Engineering Journal*, vol. 268, pp. 47-59, 2015.
- [6] Z. Chaula, et al., "Modelling the Suitability of Pine Sawdust for Energy Production Via Biomass Steam Explosion," *Smart Guide and Renewable Energy*, vol. 5, pp. 1-7, 2014.
- [7] P.S. Lam, et al., "Kinetic Modeling of Pseudolignin Formation in Steam Exploded Woody Biomass," *8th World Congress of Chemical Engineering. Montreal Quebec*: pp. 23-27, 2009.
- [8] P. Kumar, et al., "Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, pp. 3713-3729, 2009.
- [9] F. Talebnia, et al., "Ethanol Production from Steam Exploded Rapeseed Straw and the Process Simulation Using Artificial Neural Networks," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 20, pp. 139-147, 2015.
- [10] N. Laemsak and M. Okuma, "Development of Boards Made from Oil Palm Frond li:

- Properties of Binderless Boards from Steam-Exploded Fibers of Oil Palm Frond,” *Journal of Wood Science*, vol. 46, pp. 322-326, 2000.
- [11] R. Hashim, et al., “Effect of Particle Geometry on the Properties of Binderless Particleboard Manufactured from Oil Palm Trunk,” *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4251-4257, 2010.
- [12] WNAW. Nadhari, et al., “Utilization of Oil Palm Trunk Waste for Manufacturing of Binderless Particleboard: Optimization Study,” *BioResources*, vol. 8, pp. 1675-1696, 2013.
- [13] J. Bourgois, M. C. Bartholin and R. Guyonnet, “Thermal Treatment of Wood: Analysis of the Obtained Product,” *Wood Science and Technology*, vol. 23, pp. 303-310, 1989.
- [14] C. Di Blasi, “Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, pp. 47-90, 2008.
- [15] Hill, C., “Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes,” John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, pp. 180, 2006.
- [16] BJÖRN ALWERUD. *Transient FE-Modelling of Wood Cells Exposed to Steam Explosion, Strain Rate Effects and Deformation Mechanism*. Master of Science. Structural Engineering and Building Technology. Chalmers University of Technology, (2013).
- [17] Sinchai Chinvorarat, Panitnad Chandranupap and Thitikul Parkkeereel. “Development of a Continuous Steam Explosion Prototype for Biomass Refinery in Thailand”. 10th Biomass-
- Asia Workshop. 5-6/08/2013. Centara Grand at Central World Hotel Bangkok Thailand, (2013).