

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

1.1 ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำแดงไทยโดยใช้เพคตินเอสอิสรและเซลลูโลสอิสร
ภายใต้ภาวะปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง

ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำแดงไทย โดยใช้เพคตินเอสอิสร และเซลลูโลสอิสร ภายใต้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง คือ ใช้เพคตินเอสเข้มข้นร้อยละ 0.05 ร่วมกับเซลลูโลสเข้มข้น ร้อยละ 0.10 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักเนื้อแดงไทยดิบ บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 60 นาที ซึ่งภายใต้ภาวะดังกล่าว สามารถลดความหนืดของแดงไทยดิบได้ร้อยละ 80 และน้ำแดงไทยที่สกัดได้มีปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 32 เมื่อเทียบกับการสกัดโดย ไม่ผ่านการใช้เอนไซม์ และผลิตภัณฑ์น้ำแดงไทยที่ได้ มีสีเขียวจางถึงเหลือง ใส มีกลิ่นแดงไทย สดผสมกลิ่นของเอนไซม์เล็กน้อย รสหวานเล็กน้อย มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 6.0 °Brix และมี pH 6.65

1.2 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรึงรูป เพคติน และเซลลูโลสบนเม็ดแก้ว

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรึงรูป เพคติน และเซลลูโลสบนเม็ดแก้ว ซึ่งตรึงรูป แยกกัน สรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปภาวะที่เหมาะสมในการตริ้งรูปเพคตินเนส และเซลลูเลสบนเม็ดแก้ว

ภาวะในการตริ้งรูป	เพคตินเนส	เซลลูเลส
ความเข้มข้นของ APTS	ร้อยละ 1 โดยปริมาตร	ร้อยละ 3 โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์	ร้อยละ 1 โดยปริมาตร	ร้อยละ 7 โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของเอนไซม์	ร้อยละ 2 โดยปริมาตร	ร้อยละ 6 โดยปริมาตร

1.3 สมบัติทางด้านจลนพลศาสตร์ ของเพคตินเนสตริ้งรูปและเซลลูเลสตริ้งรูป เทียบกับ เพคตินเอสอิสระและเซลลูเลสอิสระ

สมบัติทางด้านจลนพลศาสตร์ของ เพคตินเนสตริ้งรูป และเซลลูเลสตริ้งรูปบนเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยวิธีเชื่อมด้วยพันธะโควาเลนต์ที่ใช้สารละลาย APTS เป็นตัวกระตุ้นตัวพุง และใช้สารละลายกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารสร้างพันธะเชื่อมขวางระหว่างเอนไซม์กับตัวพุงที่ถูกกระตุ้น ซึ่งตริ้งรูปแยกกันในเอนไซม์แต่ละชนิด เปรียบเทียบกับเพคตินเนสอิสระ และเซลลูเลสอิสระ สรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปสมบัติทางด้านจลนพลศาสตร์ของ เพคตินเอสตรังรูป และเซลลูเลสตรังรูป
เปรียบเทียบกับเพคตินเอสอิสระและเซลลูเลสอิสระ

ค่าทางจลนพลศาสตร์	เพคตินเอส		เซลลูเลส	
	อิสระ	ตรังรูป	อิสระ	ตรังรูป
อุณหภูมิที่เอนไซม์แสดง แอกติวิตีสูงที่สุด (°C)	40	50	60	60
pH ที่เอนไซม์แสดง แอกติวิตีสูงที่สุด	4.5	3.6	4.55	5.0
ค่าคงที่ Michaelis-Menten (g/ml x 10 ²)	1.733	1.087	1.862	0.791
ค่าแอกติวิตีจำเพาะ (ยูนิต/มก.โปรตีน)	28.856x10 ⁻²	19.716x10 ⁻²	66.884x10 ⁻¹	54.855x10 ⁻¹
Vmax/Km (ยูนิต/ (กรัม/มิลลิลิตร)	16.66	18.14	35.92	69.35

1.4 ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาซ้ำของเอนไซม์แต่ละชนิดตรังรูป

เมื่อนำเพคตินเอสตรังรูป และเซลลูเลสตรังรูปบนเม็ดแก้ว ที่ตรังรูปแยกกัน มาทำปฏิกิริยาซ้ำ 5 ครั้ง พบว่า แอกติวิตีของเพคตินเอสตรังรูปลดลงมาก เมื่อทำปฏิกิริยาซ้ำ 1-3 ครั้งแรก และคงที่เมื่อทำปฏิกิริยาซ้ำในครั้งต่อไป โดยที่เพคตินเอสตรังรูปจะมีแอกติวิตีคงเหลือร้อยละ 28 หลังจากใช้ทำปฏิกิริยาซ้ำ 5 ครั้ง ส่วนแอกติวิตีของเซลลูเลสตรังรูป ลดลงมากเมื่อทำปฏิกิริยาซ้ำ 1-2 ครั้งแรก และคงที่เมื่อทำปฏิกิริยาซ้ำในครั้งต่อไป โดยที่เซลลูเลสตรังรูป จะมีแอกติวิตีคงเหลือร้อยละ 61 หลังจากทำปฏิกิริยาซ้ำ 5 ครั้ง

1.5 เสถียรภาพของเพคตินและเซลลูโลสตรังรูปในระหว่างการเก็บ

เพคตินตรังรูป ภายใต้ภาวะการเก็บใน อะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร pH 4.0 และเซลลูโลสตรังรูปภายใต้ภาวะการเก็บใน อะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร pH 4.8 มีเสถียรภาพตลอดช่วงเวลา 5-35 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงแอกติวิตี ที่อุณหภูมิ 8-10 องศาเซลเซียส

1.6 การสกัดน้ำแดงไทยโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เอนไซม์ผสมระหว่าง เพคตินตรังรูป และ เซลลูโลสตรังรูปแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำแดงไทย โดยเครื่องปฏิกรณ์เพคตินตรังรูป และ เซลลูโลสตรังรูป ขนาด 2x45 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ใส่เอนไซม์ผสมระหว่างเพคตินตรังรูป และเซลลูโลสตรังรูปในอัตราส่วน 7.5/2.5 กรัม ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็น SV เท่ากับ $18.75 \text{ (นาที่)}^{-1}$ เป็นเวลา 60 นาที จะสามารถย่อยสลายเนื้อแดงไทยตีปั่นได้ร้อยละการลดความหนืดของเนื้อแดงไทยตีปั่นสูงสุดร้อยละ 80

1.7 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของน้ำแดงไทยที่สกัดได้

โดยวิธีใช้แรงกดแบบธรรมดา การใช้เอนไซม์อิสระ และการใช้เอนไซม์ตรังรูป

น้ำแดงไทยที่ผ่านการสกัดโดยใช้เอนไซม์จะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดสูงกว่า และมี pH ต่ำกว่า น้ำแดงไทยที่สกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ และน้ำแดงไทยที่สกัดได้โดยใช้เอนไซม์ตรังรูปจะมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้เอนไซม์อิสระ กล่าวคือ จะช่วยลดปริมาณเอนไซม์ที่ปนเปื้อนลงไปในการผลิตกันได้ ทำให้เกิดผลกระทบทางด้าน สี กลิ่น รส และการยอมรับร่วนน้อยกว่าการใช้เอนไซม์อิสระ ผู้บริโภคยอมรับมากกว่าและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับมาก

2. ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยทั้งหมดที่ศึกษานี้ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตน้ำแดงไทยและนำไปสู่การพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ซึ่งจากการศึกษาการสกัดน้ำแดงไทยโดยใช้เอนไซม์อิสระจะมีข้อสังเกตที่เป็นประโยชน์คือ การนำเพคตินมาใช้ร่วมกับเซลลูโลสจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำแดงไทยให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงให้กลิ่นรสของแดงไทยสดรวมทั้งคุณค่าทางอาหารต่างๆ ของผลไม้ด้วย อย่างไรก็ตามในทางเศรษฐศาสตร์แล้ว การนำเอนไซม์มาประยุกต์ใช้ในการสกัดน้ำผลไม้จะให้ผลคุ้มค่า เมื่อใช้กับผลไม้ที่ให้ผลผลิตของน้ำผลไม้ที่สกัด

ได้โดยวิธีใช้แรงกดแบบธรรมดาต่ำกว่าร้อยละ 78 (Baumann, 1981) ซึ่งแต่งไทยถ้าสกัดโดยวิธีใช้แรงกดแบบธรรมดาจะให้น้ำผลไม้ออกมาประมาณร้อยละ 60 และเมื่อใช้เอนไซม์จะสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของน้ำแดงไทยได้ประมาณร้อยละ 30 ซึ่งจะเป็นผลดีทางเศรษฐศาสตร์ในแง่ของการเพิ่มผลผลิตต่อหน่วยที่สูงขึ้น สำหรับความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นระบบอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ อายุการเก็บ การบรรจุ และการใช้ความร้อนที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ โดยที่ให้มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางด้านกลิ่นรสของน้ำแดงไทยน้อยที่สุด และสิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งที่น่าจะมีการศึกษาประกอบกัน คือ การใช้เอนไซม์ในการสกัดส่วนที่ติดกับเมล็ด และส่วนที่ติดกับเปลือกของแดงไทย เนื่องจากเป็นส่วนที่มีกลิ่นรสของแดงไทยอยู่มาก และเป็นของเหลือทิ้งจากการบริโภค เป็นการลดต้นทุนในการผลิต และยังใช้ประโยชน์จากแดงไทยได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้การพัฒนาน้ำแดงไทยไปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่น่าสนใจก็นับเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการผลักดันให้มีการผลิตน้ำแดงไทยในระบบอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ ได้แก่ การทำน้ำแดงไทยเข้มข้น เพราะน้ำผลไม้เข้มข้นจะมีความคงตัวมากกว่าน้ำผลไม้สด ใช้เนื้อที่ในการเก็บน้อย และสะดวกในการใช้ภาชนะบรรจุ และการขนส่ง ซึ่งในการทำน้ำแดงไทยเข้มข้นจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการให้มีผลกระทบต่อ กลิ่น รสของน้ำแดงไทยน้อยที่สุด เช่น การทำเข้มข้นแบบแช่แข็ง หรือการทำให้เข้มข้นโดย reverse osmosis เป็นต้น

สำหรับในช่วงการศึกษาภาวะที่เหมาะสม ในการเตรียมเอนไซม์ตรีงูบนเม็ดแก้วด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยใช้สารละลาย APTS เป็นสารกระตุ้นตัวพวยง และสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารสร้างพันธะเชื่อมขวาง พบว่า สามารถตรีงูรูปเพคตินเนส และเซลลูเลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เป็นหลักฐานประกอบ แสดงให้เห็นถึงการติดแน่นของเอนไซม์กับตัวพวยงอย่างชัดเจน นอกเหนือจากค่าแอกติวิตีที่วัดได้ นอกจากนี้ พบว่า การตรีงูรูปจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเอนไซม์ที่ต่างไปจากเอนไซม์อิสระ ซึ่งสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะมีผลในการเสริมประสิทธิภาพและความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ย่อยสลายแดงไทยดิบในระบบต่อเนื่อง อาทิเช่น เพคตินเนสตรีงูรูปสามารถใช้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเพคตินเนสอิสระ จึงทำให้ศักยภาพของการนำเอนไซม์ไปใช้งานเพิ่มขึ้น กล่าวคือ จะสามารถควบคุมได้ง่ายกับระบบที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกระชั้นหัน นอกจากนี้พบว่า เพคตินเนสและเซลลูเลสตรีงูรูปที่เตรียมได้มีค่า Km ต่ำกว่าเพคตินเนสและเซลลูเลสอิสระ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ภาวะการเตรียมเอนไซม์ตรีงูรูปดังกล่าวทำให้

เพคตินและเซลลูโลสตรังรูปมีความจำเพาะต่อสับสเตรทมากกว่าเอนไซม์อิสระ อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาซ้ำของเอนไซม์ตรังรูปทั้งสองชนิด พบว่าการตรังรูปด้วยวิธีนี้นอกจากเอนไซม์จะเชื่อมกับตัวพุงด้วยพันธะโควาเลนต์แล้ว ยังมีเอนไซม์บางส่วนที่เกาะกับตัวพุงแบบดูดซับซึ่งเป็นแรงที่อ่อน และหลุดออกจากตัวพุงได้ง่ายในระหว่างการทำปฏิกิริยา และจากการทดลองนี้ พบว่า เอนไซม์ส่วนที่เกาะกับตัวพุงด้วยพันธะโควาเลนต์จะหลุดได้น้อย และคงแอกติวิตีไว้เช่นเดิม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการลดต้นทุนการผลิต เพราะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

จากการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ ในการนำเพคตินและเซลลูโลสตรังรูปมาใช้ เพื่อจุดประสงค์ในการสกัดน้ำตาลไทยในระบบอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซด พบว่า เอนไซม์ตรังรูปสามารถย่อยสลายเนื้อแป้งไทยตีป่นได้ และเป็นผลให้ความหนืดของแป้งไทยตีป่นลดลงร้อยละ 80 เช่นเดียวกับในกรณีของการใช้เอนไซม์อิสระในการสกัด และนอกจากนี้ยัง พบว่า การใช้เอนไซม์ตรังรูปในการสกัดน้ำตาลไทยยังช่วยพัฒนาคุณภาพในด้าน สี กลิ่น และรสของน้ำตาลไทยที่สกัดได้อีกด้วย เนื่องจากจะลดปริมาณการปนเปื้อนของเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์ลงได้

ข้อมูลการศึกษาทั้งหมดดังกล่าวนี้ เนื่องจากยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการนำเอนไซม์ตรังรูปมาประยุกต์ใช้กับการสกัดน้ำตาลมาก่อน ดังนั้นจึงอาจใช้ข้อมูลเหล่านี้เป็นฐานข้อมูลที่สำคัญ สำหรับการนำเอนไซม์ตรังรูปมาใช้ในการสกัดน้ำตาลหรือผลไม้อื่นๆ หรืออาจพัฒนาหาแนวทางเพิ่มเติมสำหรับการประยุกต์ให้สามารถนำไปใช้ในระบบที่มีการผลิตขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

สำหรับการขยายขนาดการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยอีกหลายประการ ซึ่งจะต้องมีการศึกษาในระดับสูงต่อไป ได้แก่ วัสดุสำหรับทำคอลัมน์ รูปร่างคอลัมน์ เครื่องสูบลของการไหลสำหรับความดันตกในคอลัมน์ นอกจากนี้จะต้องศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการขยายสเกลของการผลิต คือ สัดส่วนของคอลัมน์ ซึ่งหมายถึงอัตราสูงของคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือศึกษาผลของความเร็วเชิงเส้นของแป้งไทยตีป่นต่ออัตราเร็วปฏิกิริยา นอกจากนี้จะต้องศึกษาถึงเสถียรภาพการทำงานของเอนไซม์ตรังรูป หรือการสลายแอกติวิตีของคอลัมน์ในระหว่างปฏิกิริยาเอนไซม์ ซึ่งเป็นปัจจัย

สำคัญที่ชี้ให้เห็นว่าอุตสาหกรรมนั้นประสบความสำเร็จหรือล้มเหลว ดังนั้นจึงต้องศึกษาข้อมูล การเปลี่ยนค่าแอกติวิตีของเอนไซม์ในระหว่างการใช้งานในระยะยาว โดยพิจารณาการลดลง ของเสถียรภาพการทำงาน หรือค่าครึ่งชีวิต (half life) ซึ่งหมายถึงเวลาที่แอกติวิตีของเอนไซม์ คงเหลือหรือสลายไปร้อยละ 50 ของแอกติวิตีเริ่มต้น เพื่อหาเวลาที่จะสืบต่อแอกติวิตีโดยยืด เวลาการใช้งาน หรือเติมเอนไซม์ตรึงรูปลงไปให้เท่ากับแอกติวิตีที่สูญเสียไป