บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้อาศัยหลักการพื้นฐานว่า เพนโตแซนที่มีอยู่ในซังข้าวโพดนั้นจะถูกไฮโดรไลซ์โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นเพนโตส์ ต่อจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดร-ชันดึงน้ำออกจากโมเลกุลเพนโตส์กลายเป็นเฟอร์ฟูรัล และเพื่อที่จะให้เฟอร์ฟูรัลที่เกิดขึ้นออกจากขวดปฏิกิริยาในทันทีเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง จึงได้ผ่านไอน้ำลงไปช่วยการกลายเป็นไอของเฟอร์ฟูรัล ในขณะเดียวกันก็เป็นการรักษาระดับของเหลวและความเข้มข้นของกรดในขวดปฏิกิริยาให้คงที่ด้วย

5.1 ตัวแปรสำหรับการทดลอง

ตัวแปรเท่าที่รวบรวมได้ที่มีผลกระทบต่อผลผลิตเฟอร์ฟูรัล ได้แก่

1. ชนิดของวัตถุดิบ
2. อุณหภูมิในเครื่องปฏิกร
3. ชนิดของกรดที่ใช้ทำปฏิกิริยา
4. ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ทำปฏิกิริยา
5. อัตราส่วนของของเหลวต่อวัตถุดิบ
6. เวลาที่ใช้ในเครื่องปฏิกร
7. ขนาดของวัตถุดิบ
8. ความชื้นของวัตถุดิบ

การทดลองนี้เลือกใช้ซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และด้วยเงินทุนวิจัยอันจำกัด จึงไม่สามารถใช้เครื่องปฏิกรที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศและอุณหภูมิสูงกว่า 100°ซ ซึ่งเป็นจุดสมดุลย์ในเครื่องปฏิกรที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ และมีจุดเดือดที่ 100°ซ ดังนั้นจึงได้เลือกทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรประมาณ 100°ซ เท่ากับอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านเข้าไปใน

เครื่องปฏิกร เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างง่าย ๆ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการมาใช้ในการทดลอง

ชนิดของกรดที่ใช้ทำปฏิกิริยานั้นได้เลือกกรดซัลฟูริคสำหรับการทดลองทั้งหมด เนื่องจากเป็นกรดที่มีความไวในการเร่งปฏิกิริยาสูง ไม่เป็นกรดระเหยง่าย และสามารถผลิตได้เองในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก

ซังข้าวโพดที่ใช้ในการทดลอง ได้จากโรงสีข้าวโพดจังหวัดเพชรบูรณ์ และทำให้แห้งด้วยการผึ่งไว้ในอากาศ จึงมีปริมาณความชื้นเท่ากันทั้งหมด ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่มีอิทธิพลต่อความชื้นในซังข้าวโพด ซึ่งมีประมาณ ร้อยละ 8-9 **มากมัก** การแช่ซังข้าวโพด หรือผ่านไอน้ำเข้าไปในซังข้าวโพดซึ่งจะดูดซับน้ำได้มากเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในซังข้าวโพดนั้น จะมีตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วยนอกเหนือไปจากปริมาณความชื้นในซังข้าวโพดเพียงอย่างเดียว **เช่น** โครงสร้างของซังข้าวโพดจะเปลี่ยนไปเมื่อแช่น้ำ ระยะเวลาในการผ่านไอน้ำที่ไม่เท่ากันอาจทำให้โครงสร้างต่างกัน ปริมาณความชื้นในซังข้าวโพดที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตซังข้าวโพดนั้น อาจจะปรับให้เหมาะสมด้วยปริมาณของเหลวในเครื่องปฏิกรซึ่งจะสะดวกกว่ามากทีเดียว

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนี้ จึงเลือกตัวแปรสำหรับการทดลอง 4 ตัวแปร คือ

1. ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริคที่ใช้ทำปฏิกิริยา
2. อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อซังข้าวโพด
3. ขนาดของซังข้าวโพด
4. ระยะเวลาในการแช่ซังข้าวโพดในสารละลายกรดก่อนไอน้ำ

5.2 เครื่องมือสำหรับการทดลอง

เครื่องมือชุดที่ 1 (ดูรูปที่ 5.1) ประกอบด้วย เตาไฟฟ้า แบบแผ่นให้ความร้อน 2 อัน ขวดต้มกลั่นชนิดก้นแบน และคอขวดยาว ขนาด 2000 มล. จำนวน 2 ใบ ใบหนึ่งสำหรับต้มน้ำให้กลายเป็นไอผ่านลงสู่ขวดใบที่สองซึ่งเป็นขวดทำปฏิกิริยา จุกยาง 2 จุก ซึ่งต่อเข้ากับท่อแก้วนำไอน้ำออกจากขวดต้มน้ำไปยังขวดทำปฏิกิริยา และท่อสำหรับไอออกเพื่อผ่านไปยัง

เครื่องควบแน่นซึ่งต่อกับตัวปรับ (receiving adaptor) ลงสู่ขวดเก็บของเหลวที่กลั่นได้

เครื่องมือชุดที่ 2 (รูปที่ 5.2) ประกอบด้วยเตาไฟฟ้ามีฉนวนหุ้ม (heating mantle) 2 ใบ ขวดต้มกลั่นก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ ใบหนึ่งสำหรับต้มน้ำให้กลายเป็นไอผ่านลงขวดใบที่สองซึ่งเป็นขวดทำปฏิกิริยา ตัวปรับคอขวดที่มีทางออก 2 ทาง (claisen adapter) 2 อัน ท่อแก้วเชื่อมระหว่างขวดต้มน้ำและขวดทำปฏิกิริยา 1 อัน คอแก้วสำหรับต่อกับส่วนควบแน่น (distillating head) 1 อัน ส่วนควบแน่น 1 อัน ส่วนที่ต่อกับส่วนควบแน่นไปยังขวดรับของเหลวที่กลั่นได้ (receiveing adapter) 1 อัน ขวดสำหรับรับของเหลวที่กลั่นได้ จุกสำหรับปิดคอขวด 1 อัน และเทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิที่ขวดทำปฏิกิริยา 1 อัน

เครื่องแก้วส่วนที่ควรจะป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศ ได้ใช้เส้นด้ายพันไว้เป็นฉนวนความร้อน

5.3 วิธีการทดลอง

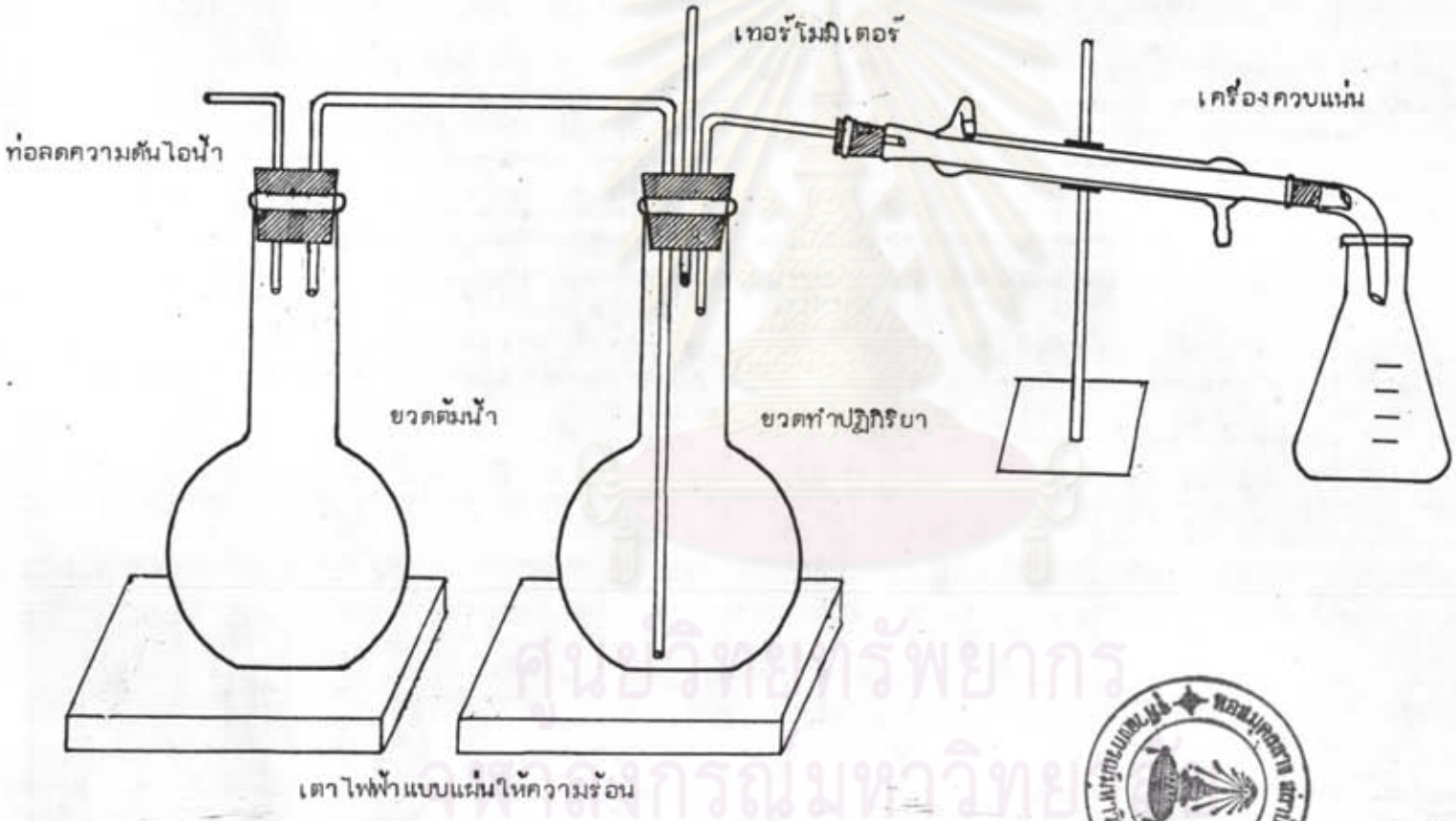
การเตรียมวัตถุดิบ

การทดลองชุดที่ 1-5 เตรียมซังข้าวโพดโดยการสับด้วยมีดและตำด้วยครกจนได้ขนาดประมาณว่าผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 16 เมช ได้

การทดลองชุดที่ 6-8 บดซังข้าวโพดด้วยเครื่องบดหยาบ และบดต่อด้วยเครื่องบดละเอียด จนขนาดของซังข้าวโพดผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานขนาด 8 เมชได้หมด แยกขนาดซังข้าวโพดด้วยตะแกรงมาตรฐานออกเป็น 6 ขนาด คือ ขนาดระหว่าง 8-10 เมช, 10-12 เมช, 12-20 เมช, 20-40 เมช, 40-60 เมช และ 60-80 เมช

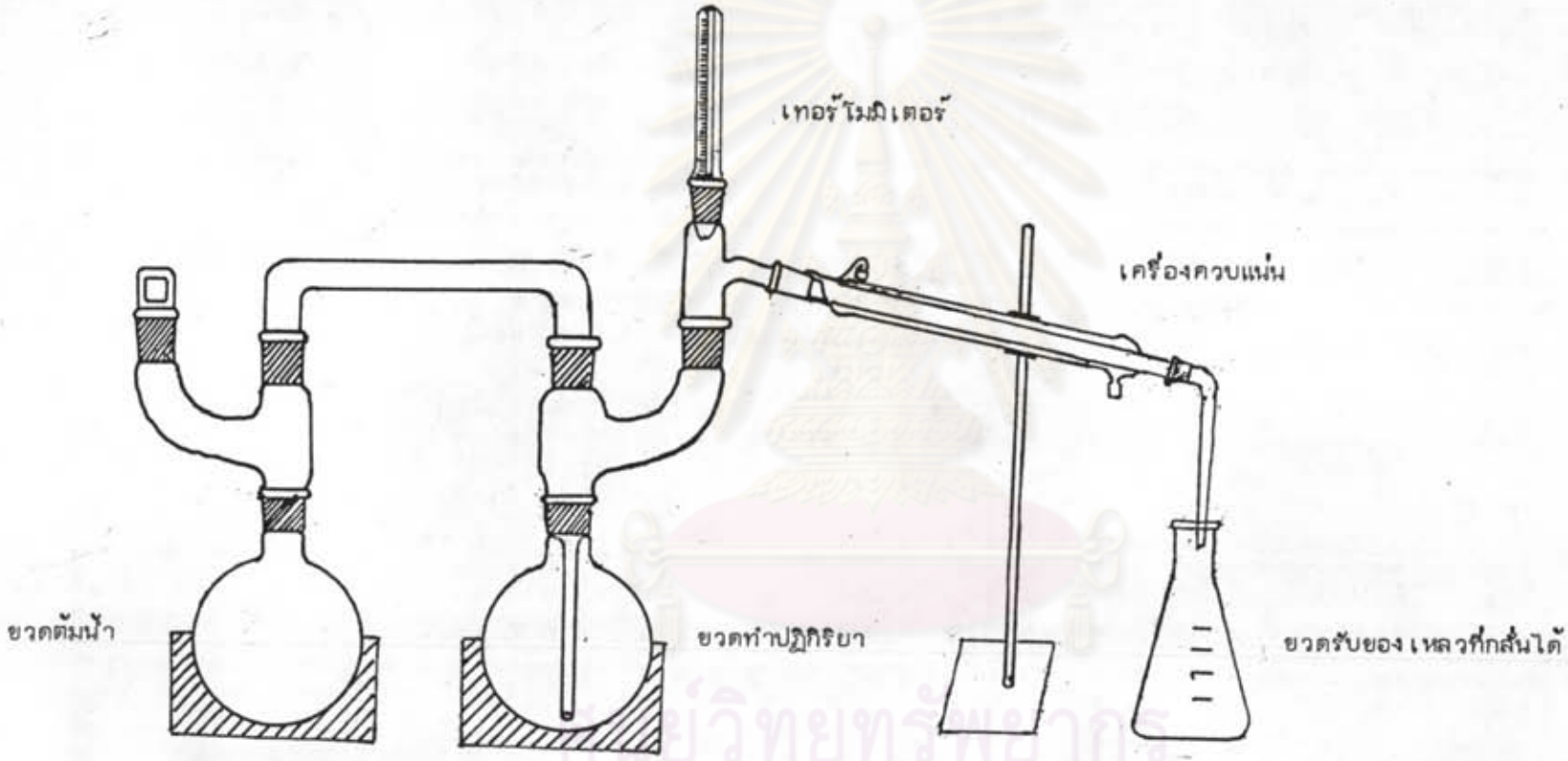
การทดลองชุดที่ 1 และ 2 ใช้เครื่องมือชุดแรกทำการทดลอง โดยนำซังข้าวโพดที่เตรียมไว้ 100 กรัม ใส่ลงในขวดต้มกลั่นขนาด 2000 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดแล้วเขย่าให้เข้ากันวางบนเตาไฟฟ้า เมื่อครบกำหนดเวลา 1 ชั่วโมงจึงต่อจุกยางที่มีท่อนำไอเพื่อเชื่อมให้ไอน้ำจากขวดต้มกลั่นผ่านลงสู่ขวดทำปฏิกิริยา เปิดเตาไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ขวดทำปฏิกิริยาแต่เพียงเล็กน้อย สักครู่จะเดือดและเกิดไอผ่านท่อไปยังส่วนควบแน่น เมื่อน้ำในขวดต้มน้ำ

รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องมือประกอบการทดลองชุดที่ 1-2



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.2 แสดงเครื่องมือประกอบการทดลองชุดที่ 3-10



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลดระดับลง เติมน้ำเดือดลงไปเพื่อปรับระดับน้ำในยวดต้มน้ำให้คงที่ เพื่อให้เกิดไอน้ำในปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

การทดลองชุดที่ 3-10 ชั่งตัวอย่างซึ่งข้าวโพดที่บดแล้ว 20.0 กรัม ใส่ลงในยวดทำปฏิกิริยาขนาด 500 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรด ปิดยวดด้วยจุกแก้ว เขย่าให้เข้ากัน นำไปใส่ในเตาไฟฟ้าที่มีฉนวนหุ้ม พันยวดส่วนที่พ้นฉนวนหุ้มด้วยเส้นด้ายเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เมื่อได้เวลาที่กำหนดแล้วจึงต่อปลายท่อแก้วอีกข้างหนึ่งเข้ากับยวดต้มน้ำซึ่งน้ำกำลังเดือดอยู่ ต่อส่วนควบแน่นเข้ากับยวดทำปฏิกิริยา และต่อส่วนควบแน่นด้วยคอแก้วปรับมุมลงสู่ยวดรองรับของเหลวที่กลั่นได้ ซึ่งจะประกอบด้วย น้ำและเฟอร์ฟูรัล ในขณะทำการทดลองปรับเตาไฟฟ้าสำหรับยวดทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องปรับ (variac) เพื่อรักษาระดับของเหลวภายในยวดปฏิกิริยาให้คงที่ และคอยเติมน้ำเดือดลงในยวดต้มน้ำขนาด 500 มิลลิลิตร ให้ระดับน้ำในยวดคงที่อยู่เสมอ เพื่อให้ปริมาณไอน้ำที่ออกจากยวดต้มน้ำเสมอตลอดการทดลอง

5.4 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.4.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

โดยการเติมสารละลายแอนนิลีน (aniline) ในกรดแกรเชียลอะซิติค ร้อยละ 25 ลงในสารละลายตัวอย่าง จะเกิดสีแดงขึ้นทันทีถ้าหากสารละลายนั้นมีเฟอร์ฟูรัล

5.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

วิธีวัดการดูดกลืนอุลตร้าไวโอเลต (Ultraviolet Absorption)

วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์โดยการวัดการดูดกลืนอุลตร้าไวโอเลตที่ความยาวคลื่นที่แสดงคุณสมบัติของเฟอร์ฟูรัล คือที่ 279 นาโนเมตร

วิธีการ เตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานนี้ที่ความยาวคลื่น 279 นาโนเมตร และพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นและการดูดกลืน (calibration curve) รูปที่ 5.3.

นำสารละลายเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการกลั่นตัวอย่างซังข้าวโพดด้วยไอน้ำ มาเจือจางให้มีความเข้มข้นประมาณ 4 ไมโครกรัมต่อลิตร

หมายเหตุ การวัดค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างกระทำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 24-25°ซ

5.5 ผลการทดลอง

การทดลองทั้งหมด มี 8 ชุด

การทดลองชุดที่ 1 ตัวแปรสำหรับการทดลองคือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริคตั้งแต่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ตามลำดับ ดูข้อมูลได้จากตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1.1-5.1.2

จากผลการทดลองชุดนี้พบว่า ความเข้มข้นที่ให้ผลผลิตสูงสุด คือความเข้มข้นที่ร้อยละ 30 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ร้อยละ 10.24 ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้สูงสุด ร้อยละ 1.07 ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 35 จากการทดลองชุดนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของกรดสูงมักจะเกิดควันของ SO_2 ออกมาด้วยทำให้ความเข้มข้นของกรดในของเหลวที่กลั่นได้สูง เมื่อคำนวณปริมาณกรดซัลฟูริคเข้มข้นที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายกรดตามความเข้มข้นข้างต้นนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เฟอร์ฟูรัล 1 ตัน จะต้องใช้ปริมาณกรดซัลฟูริคเข้มข้นสูงมาก คือตั้งแต่ 16 ตัน ถึง 41 ตัน และปริมาณวัตถุดิบคือซังข้าวโพดที่ต้องใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน ก็มากเช่นเดียวกัน คือตั้งแต่ 9.8 ตัน ถึง 149 ตัน

การทดลองชุดที่ 2 ตัวแปรสำหรับการทดลองคือ อัตราส่วนของซังข้าวโพดต่อสารละลายกรดซัลฟูริค ตั้งแต่ 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4 ตามลำดับ โดยได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นที่ให้ผลิตภัณฑ์เฟอร์ฟูรัลสูงสุด คือ ร้อยละ 30 และทำการทดลองอีกชุดหนึ่งที่ความเข้มข้น ร้อยละ 25 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของกรดกับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด (ดูตารางที่ 5.2.1-5.2.2 รูปที่ 5.2.1-5.2.2)

ผลปรากฏว่า อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรดที่ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ความเข้มข้น ร้อยละ 30 คืออัตราส่วน 1 : 3 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์เฟอร์ฟูรัล ร้อยละ 9.2 สำหรับที่ความเข้มข้นของกรด ร้อยละ 25 ปรากฏว่าให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด ร้อยละ 11.5 ที่อัตราส่วน 1 : 4

และยังพบว่า ที่ความเข้มข้นของกรด ร้อยละ 25 ให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัสซัลเฟตสูงกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกันโดยใช้อัตราส่วนของข้าวโพดต่อสารละลายที่เท่ากัน ซึ่งให้ผลต่างไปจากการทดลองชุดที่ 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดลองชุดแรกใช้กรดซัลฟูริคเข้มข้นร้อยละ 98 เกรดสำหรับห้องทดลอง (Lab grade) ในขณะที่การทดลองชุดที่ 2 ใช้กรดซัลฟูริคเข้มข้น ร้อยละ 98 เกรดการค้า (commercial grade) กรดซัลฟูริคเกรดการค้านี้มีสิ่งเจือปนสูงกว่า สิ่งเจือปนเหล่านี้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นเล็กน้อย ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สูงสุดเมื่อใช้กรดซัลฟูริค ร้อยละ 25 แทนที่จะเป็น ร้อยละ 30 ซึ่งที่ความเข้มข้น ร้อยละ 30 นี้ จะเกิดควัน SO_2 ขึ้น ทำให้ปริมาณกรดในขวดปฏิกิริยาลดลง

จากการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 2 พบว่าเกิดปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

1. การใช้เตาไฟฟ้าแบบแผ่นให้ความร้อนทำให้การกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ ที่ก้นขวดจะร้อนมาก และจะยิ่งร้อนมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะที่ขวดต้มน้ำซึ่งเปิดไฟแรงกว่าจะร้อนมากที่เดียว

2. การใช้ท่อนำก๊าซขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ต่อเชื่อมจากขวดต้มน้ำไปยังขวดทำปฏิกิริยาโดยใช้จุกยางปิดปากขวด ทำให้เกิดปัญหาการรั่วไหลของไอที่เกิดขึ้น การต่อท่อขนาดเล็กออกจากขวดต้มน้ำ ทำให้ภายในขวดมีแรงดันสูง เกิดการกระเทือน (bumping) ในขวดต้มน้ำอย่างรุนแรง ประกอบกับการได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ทำให้ขวดแตกร้าวได้ง่าย

ดังนั้น การทดลองชุดต่อไปจึงได้ปรับปรุงอุปกรณ์การทดลองใหม่ทั้งหมดโดยใช้เครื่องแก้วที่เหมาะสม (ground joint) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างขวดและท่อต่าง ๆ ทั้งหมด เพื่อให้การต่อแบบสนิทไม่มีการรั่วไหลของไอ และได้นำเอาเตาไฟฟ้าชนิดมีฉนวนหุ้ม (heating mantle) ใช้แทนเตาไฟฟ้าแบบแผ่นให้ความร้อน ทำการกระจายความร้อนเป็นไปได้ทั่วถึงมากกว่า นอกจากนี้ยังได้นำเส้นด้ายมาพันส่วนที่ต่อต่าง ๆ เพื่อเป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบสู่บรรยากาศ เนื่องจากเตาไฟฟ้าแบบมีฉนวนหุ้มที่จัดหาได้นั้นมีขนาดสำหรับขวดปฏิกิริยา 500 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนขนาดของขวดทำปฏิกิริยาให้เล็กลงด้วย

การทดลองชุดที่ 3

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้ คือ ระยะเวลาก่อนผ่านไอน้ำ 0, 1, 2, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ดูตารางที่ 5.3 รูปที่ 5.3.1-5.3.2)

พบว่าระยะเวลาที่แช่ซังข้าวโพดก่อนผ่านไอน้ำ 1, 2, 3 ชั่วโมงให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันมาก คือ ประมาณ ร้อยละ 5 เพื่อที่จะลดเวลาในการแช่ซังข้าวโพดในกรดก่อนผ่านไอน้ำ จึงได้เลือกระยะเวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง สำหรับการทดลองชุดต่อไป

หมายเหตุ การทดลองชุดนี้ไม่ได้แยกขนาดของซังข้าวโพด เพียงแต่พยายามสุ่มตัวอย่างให้มีซังข้าวโพด แต่ละขนาดในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะมีความแตกต่างกันได้มากในแต่ละการทดลอง ทำให้ผลการทดลองที่ได้อาจคลาดเคลื่อนได้มาก

การทดลองชุดที่ 4 (ตารางข้อมูลที่ 5.4.1-5.4.4)

เนื่องจากเปลี่ยนอุปกรณ์สำหรับการทดลองใหม่ จึงได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวแปรเดิม คือความเข้มข้นของกรด ร้อยละ 5, 10, 15, 20 ตามลำดับ

จากการทดลองชุดที่ 4.1 (ตารางที่ 4.1) พบว่า ผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ได้คือ ร้อยละ 8.26 ที่ความเข้มข้นของกรด ร้อยละ 15 และอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนอุปกรณ์การทดลองให้ดีขึ้น การกระจายความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น การสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศลดลง การรั่วไหลของไอลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยากลายเป็นเฟอร์ฟูรัลเป็นไปได้มากขึ้น ดังนั้นจึงใช้ปริมาณกรดน้อยลงในการทำให้เกิดปฏิกิริยาดีที่สุด คือ จากการทดลองชุดที่ 2 พบว่าต้องใช้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 25 แต่ในการทดลองชุดที่ 3 นี้พบว่า สารละลายกรดเข้มข้น ร้อยละ 15 ก็เป็นการพอเพียงที่จะให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด ที่ความเข้มข้นของกรดสูงเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ได้อีกมาก

จากการทดลองชุดที่ 2.1 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 25 จะให้ผลิตภัณฑ์สูงสุดเมื่อให้อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 4 ในขณะที่การทดลองที่ 2.2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 30 จะให้ผลิตภัณฑ์สูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 3 ทำให้เกิดปัญหาว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรดและอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด มีผลกระทบซึ่งกันและกันหรือไม่ จึงได้ทำการทดลอง

ชุดที่ 4 นี้เพิ่มขึ้นอีก 3 ชุด เป็น 4 ชุด คือ การทดลองชุดที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ซึ่งทำที่อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4 ตามลำดับ ผลปรากฏว่า ไม่ว่าจะทำการทดลองที่อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรดใดก็ตาม ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุดคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดร้อยละ 15 และที่ความเข้มข้นนี้จะให้ปริมาณเฟอร์ฟูรัลคิดเป็น ร้อยละต่อปริมาตรของเหลวที่กลั่นได้สูงสุดอีกด้วย (ดูรูปที่ 6.4.1 และ 6.4.2) ในบรรดาการทดลองทั้งหมดในกลุ่มการทดลองชุดที่ 4 นี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15 ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด ร้อยละ 8.9 และปริมาณเฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้สูงสุด ร้อยละ 0.44

เมื่อพิจารณาปริมาณกรดซัลฟูริคที่เข้มข้น (ร้อยละ 98) ที่ต้องใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน พบว่าปริมาณกรดซัลฟูริคเข้มข้นที่ต้องใช้น้อยที่สุด คือ 3.34 ตัน โดยทำสารละลายกรดให้มีความเข้มข้น ร้อยละ 15 (ดูรูปที่ 6.4.3) และจากรูปที่ 6.4.4 พบว่าปริมาณซังข้าวโพดที่ต้องใช้น้อยที่สุดในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน คือ 11.2 ตัน ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15 เช่นเดียวกัน

การทดลองชุดที่ 5 (ตารางข้อมูล 6.5.1-6.5.4, รูปที่ 6.5.1-5.5.4)

ตัวแปร คือ อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4 โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ

ผลปรากฏว่า ที่อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 ไม่ว่าจะทำที่ความเข้มข้นใดก็ตามจะให้ผลิตภัณฑ์และปริมาณเฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้สูงสุด ปริมาณซังข้าวโพดที่ต้องใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตันก็น้อยที่สุดเช่นเดียวกัน (รูปที่ 6.5.4) แต่สำหรับปริมาณกรดซัลฟูริคเข้มข้นที่ต้องใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน นั้นจะต้องทำที่อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1 (รูปที่ 6.5.3)

จากการทดลองชุดที่ 4 และชุดที่ 5 นี้ พอจะสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15 และอัตราส่วนของซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 จะให้ผลผลิตสูงสุดร้อยละ 8.93 ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้สูงสุด ร้อยละ 0.44 และปริมาณซังข้าวโพดที่ใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน ต่ำสุด 11.20 ตัน แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณกรดซัลฟูริคเข้มข้นที่ต้องใช้ในการผลิตเฟอร์ฟูรัล 1 ตัน พบว่าปริมาณกรดซัลฟูริค

เข้มข้นน้อยที่สุด คือ 3.34 ดันโดยทำให้เป็นสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 15 และใช้อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1

การทดลองชุดที่ 6

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้ คือ ขนาดของซังข้าวโพดตั้งแต่ 8-10, 10-12, 12-20, 20-40, 40-60 และ 60 เมช ซึ่งเมื่อคำนวณขนาดหน้าตัดของรู (Aperture mean) โดยเฉลี่ยแล้วจะเป็น 2.0065, 1.524, 1.115, 0.601, 0.3085 และ 0.2115 มิลลิเมตร ตามลำดับ

โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15 อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์เฟอร์ฟูรัลสูงสุด (จากผลการทดลองชุดที่ 4 และชุดที่ 5)

จากการทดลองชุดที่ 6 นี้ พบว่าขนาดของซังข้าวโพดใหญ่ 8-10 เมช และ 10-12 เมช เกือบทั้งหมดจะเป็นแกนแข็ง ซึ่งเมื่อเติมสารละลายกรดเข้มข้น ร้อยละ 15 จำนวน 40 มิลลิลิตรลงไป ปรากฏว่าซังคงมีส่วนที่เป็นของเหลวเหลืออยู่มาก ส่วนซังข้าวโพดที่มีขนาดเล็กกว่านี้ พบว่าเมื่อเติมสารละลายกรดลงไปแล้ว จะมีลักษณะเปียกชื้นและพองตัวขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากซังข้าวโพดดูดซึมสารละลายกรดเข้าไป ปริมาณของเหลวที่ไม่ถูกดูดซึมเหลืออยู่น้อยมาก เมื่อคำนวณน้ำหนักจำเพาะของซังข้าวโพดแต่ละขนาดอย่างคร่าว ๆ โดยเทียบกับน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน (17.75 กรัม) ปรากฏผลดังตารางที่ 6.6.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าซังข้าวโพดขนาด 8-10 เมช และ 10-12 เมช มีน้ำหนักจำเพาะใกล้เคียงกัน คือ 0.52 และมีความชื้นเท่ากัน คือ ร้อยละ 7.3 ซังข้าวโพดทั้งสองขนาดนี้มีลักษณะเป็นแกนแข็งซึ่งจะบดให้มีขนาดเล็กกว่านี้ค่อนข้างยาก ส่วนซังข้าวโพดที่มีขนาดเล็กรองลงไปจะมีน้ำหนักจำเพาะน้อยลงไปเป็นลำดับ ยกเว้น ขนาด 60-80 เมช มีน้ำหนักจำเพาะมากขึ้นเนื่องจากมีแกนแข็งที่ถูกบดจนละเอียดปนอยู่มากกว่าในขนาดอื่น ๆ ปริมาณความชื้นที่อยู่ในซังข้าวโพดขนาดเล็กกว่า 12 เมช อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันมาก คือ ร้อยละ 8.5-8.7

จากตารางที่ 6.6.2 พบว่า ซังข้าวโพดขนาด 8-10 เมช ให้ผลิตภัณฑ์เพียงร้อยละ 3.7 ในขณะที่ซังข้าวโพดขนาด 10-12 เมช ซึ่งมีน้ำหนักจำเพาะใกล้เคียงกันให้ผลิตภัณฑ์สูงถึงร้อยละ 7.2 แสดงว่าซังข้าวโพดส่วนที่เป็นแกนแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้

ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงกว่า ซังข้าวโพดขนาดที่ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด คือ 12-20 เมช ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์สูงถึงร้อยละ 9.8 ซังข้าวโพดที่มีขนาดเล็กลงไปจะดูดซึมสารละลายกรดได้ดีขึ้น แต่จะจับกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้การแพร่กระจายของสารละลายกรดที่เติมลงไปเป็นไปได้อย่างไม่ทั่วถึง ส่วนที่อยู่ภายในก้อนอาจจะไม่ถูกสารละลายกรด นอกจากนี้ไอที่ผ่านลงไปจะกระจายได้ไม่ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อซังข้าวโพดมีขนาดเล็กลงไป

การทดลองชุดที่ 7

จากผลการทดลองชุดที่ 6 สรุปได้ว่า ซังข้าวโพดขนาด 12-20 เมช จะให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด การใช้ซังข้าวโพดขนาดนี้พบว่า เมื่อเติมสารละลายกรดเข้มข้น ร้อยละ 15 จำนวน 40 มิลลิลิตรลงไป ซังข้าวโพดจะมีลักษณะเปียกแฉะเท่านั้น ปริมาณสารละลายกรดอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เฟอรัฟฟรัลมากที่สุด จึงทำการทดลองชุดที่ 7 ขึ้น เพื่อหาอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรดที่ให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงสุดสำหรับซังข้าวโพดขนาด 12-20 เมช ซึ่งผลปรากฏว่า อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 ยังคงให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงสุด ร้อยละ 9.8

การทดลองชุดที่ 8

จากผลการทดลองชุดที่ 4-7 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15, อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 และขนาดซังข้าวโพดอยู่ระหว่าง 12-20 เมช ให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงสุด จึงได้ใช้เงื่อนไขเหล่านี้สำหรับการทดลองชุดที่ 8 เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่ซังข้าวโพดด้วยสารละลายกรดก่อนผ่านไอน้ำ โดยทดลองแช่ซังข้าวโพดเป็นเวลา 5, 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าระยะเวลา 60 นาที ให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงสุด

5.6 สรุปผลการทดลอง

สภาวะ (condition) ที่ให้ผลิตภัณฑ์เฟอรัฟฟรัลสูงสุด ปริมาณ (ร้อยละ) ของเฟอรัฟฟรัลในของเหลวที่กลั่นได้สูงสุด ปริมาณซังข้าวโพดที่ใช้ในการผลิตเฟอรัฟฟรัล 1 ตันต่ำสุด คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด ร้อยละ 15 อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2 ขนาดซังข้าวโพด 12-20 เมช ระยะเวลาแช่ซังข้าวโพดในสารละลายกรดก่อนผ่าน

ไอน้ำ 1 ชั่วโมง

แต่ถ้าพิจารณาว่า ลักษณะที่จะให้ผลิตภัณฑ์เฟอร์ฟูรัลสูงพอประมาณ แต่ใช้วัตถุดิบคือกรดซัลฟูริคเข้มข้นในปริมาณน้อยที่สุด พบว่าจะต้องทำปฏิกิริยาโดยใช้อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1 ตัวแปรอื่น ๆ คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรด, ขนาดซังข้าวโพด และระยะเวลาที่แช่ซังข้าวโพดในสารละลายกรดก่อนผ่านไอน้ำ ยังคงเหมือนเดิม

หมายเหตุ

ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ใช้ในการทดลอง	มีหน่วยเป็นร้อยละโดยปริมาตร
อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	มีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อปริมาตร
ผลผลิตเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการทดลอง	มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้	มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 1

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค (ร้อยละ)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ต้นต่อต้น)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ต้นต่อต้น)
5	1,083	0.673	0.07	41.69	148.59
10	1,171	1.82	0.16	32.70	54.95
15	1,045	3.53	0.34	23.46	28.33
20	1,022	5.93	0.58	18.62	16.86
25	932	7.05	0.76	19.55	14.18
30	1,031	10.24	0.99	15.98	9.76
35	816	8.75	1.07	21.61	11.43

ตัวแปรในการทดลองชุดนี้คือ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 ตามลำดับ

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้คือ

ปริมาณซังข้าวโพดที่ใช้ 100 กรัม

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริค 300 มิลลิลิตร

ระยะเวลาก่อนผ่านไอน้ำประมาณ 1 ชั่วโมง

ขนาดขวดทำปฏิกิริยา 2,000 มิลลิลิตร

แหล่งให้ความร้อน เตาไฟฟ้าชนิดแผ่นให้ความร้อน

ระยะเวลาในการเก็บของเหลวที่ควบแน่นได้ 3 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 2.1

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	1,215	4.53	0.37	12.18	22.07
1 : 2	1,190	6.34	0.53	17.41	15.77
1 : 3	1,520	9.22	0.61	17.96	10.85
1 : 4	1,630	9.08	0.56	24.32	11.01

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 100 กรัม

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค ร้อยละ 30

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดของขวดทำปฏิกิริยา 2,000 มิลลิลิตร

ระยะเวลาในการเก็บของเหลวที่กลั่นได้ 3 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 2.2

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	1,596	7,173	0.450	6.41	13.94
1 : 2	1,360	7,935	0.58	11.59	12.60
1 : 3	1,280	9.7896	0.76	14.10	10.21
1 : 4	1,140	11.504	1.01	15.99	8.69

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 100 กรัม

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค ร้อยละ 25

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดของขวดทำปฏิกิริยา 2,000 มิลลิลิตร

ระยะเวลาในการเก็บของเหลวที่กลั่นได้ 3 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองชุดที่ 3

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ (ชั่วโมง)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
0	300	1.93	0.13	28.67	51.99
1	310	5.33	0.34	10.35	18.74
2	300	5.33	0.35	10.35	18.74
3	300	5.09	0.34	10.87	19.68
6	330	4.32	0.26	12.76	23.12

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

ระยะเวลาก่อนผ่านไอน้ำ 0, 1, 2, 3, 6 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20 กรัม

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค ร้อยละ 10

ปริมาณสารละลายกรด 60 มิลลิลิตร

ขนาดของขวดทำปฏิกิริยา 500 มิลลิลิตร

ระยะเวลาในการเก็บของเหลวที่กลั่นได้ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.4.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.1

กรดซัลฟูริค (ร้อยละ)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
5	375	1.82	0.90	5.05	54.93
10	315	3.14	0.20	5.87	31.88
15	415	8.26	0.40	3.34	12.10
20	310	4.78	0.31	7.69	20.90

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

กรดซัลฟูริค ร้อยละ 5, 10, 15, 20

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริคที่ใช้ 20 มิลลิลิตร

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.2

กรดซัลฟูริค (ร้อยละ)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
5	360	3.764	0.21	4.89	26.57
10	365	4.543	0.25	8.10	22.01
15	410	8.93	0.44	6.18	11.20
20	320	6.85	0.43	10.7	14.60

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

กรดซัลฟูริค ร้อยละ 5, 10, 15, 20

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริคที่ใช้ 40 มิลลิลิตร

(อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 2)

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4.3 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.3

กรดซัลฟูริค (ร้อยละ)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
5	345	3.09	0.18	8.93	32.34
10	375	3.97	0.21	13.91	25.20
15	375	7.93	0.42	10.43	12.60
20	330	6.57	0.40	16.80	15.21

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

กรดซัลฟูริค ร้อยละ 5, 10, 15, 20

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริคที่ใช้ 40 มิลลิลิตร

(อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 3)

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ตารางที่ 5.4.4 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.4

กรดซัลฟูริค (ร้อยละ)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
5	325	1.21	0.07	30.32	82.40
10	370	2.85	0.15	25.77	35.02
15	365	6.36	0.35	17.36	15.72
20	340	6.26	0.37	23.50	15.96

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

กรดซัลฟูริค ร้อยละ 5, 10, 15, 20

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริคที่ใช้ 80 มิลลิลิตร

(อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 4)

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.1

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	375	1.82	0.10	5.05	54.93
1 : 2	360	3.76	0.21	4.89	26.57
1 : 3	345	3.09	0.18	8.93	32.34
1 : 4	325	1.21	0.07	30.3	82.40

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 5

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังยาวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.2

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	315	3.14	0.20	5.87	31.88
1 : 2	365	4.54	0.25	8.10	22.01
1 : 3	375	3.97	0.21	13.91	25.20
1 : 4	370	2.86	0.15	25.77	35.02

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 10

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5.3 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.3

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ฮิลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	415	8.26	0.40	3.34	12.01
1 : 2	410	8.93	0.44	6.18	11.20
1 : 3	375	7.94	0.42	10.43	12.60
1 : 4	365	6.36	0.35	17.36	15.72

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิลฟูริค ร้อยละ 15

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5.4 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.4

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ต้นต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ต้นต่อตัน)
1 : 1	310	4.78	0.31	7.69	20.90
1 : 2	320	6.85	0.43	10.74	14.60
1 : 3	330	6.57	0.40	16.80	15.21
1 : 4	340	6.26	0.37	23.50	15.96

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลาย 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 20

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ขนาดซังข้าวโพด 4-10 เมช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 6 : ขนาดซังข้าวโพด, ปริมาณความยื้น, น้ำหนักจำเพาะ

ขนาดซังข้าวโพด (เมช)	ขนาดหน้าตัดโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ปริมาณความยื้น (ร้อยละ)	น้ำหนักจำเพาะ
0-10	2.0065	7.35	9.21
10-12	1.5240	7.28	9.30
12-20	1.1150	8.68	4.73
20-40	0.601	8.52	2.91
40-60	0.3085	8.87	2.77
60-80	0.2115	8.74	3.50

หมายเหตุ น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่าตัวอย่างซังข้าวโพดเท่ากับ 17.75 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 6

ขนาดซังข้าวโพด (เมช)	ขนาดหน้าตัดโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ปริมาตรของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
8-10	2.0065	375	3.734	0.199	14.78	26.78
10-12	1.5240	345	7.215	0.418	7.65	13.86
12-20	1.1150	375	9.802	0.523	5.63	10.20
20-40	0.601	375	8.869	0.473	6.22	11.27
40-60	0.3085	315	7.057	0.448	7.82	14.17
60-80	0.2115	300	4.668	0.311	11.83	21.42

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

ขนาดของซังข้าวโพด 8-10, 10-12, 12-20, 20-40, 40-60, 60-80 เมช

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 15

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริค 40 มิลลิลิตร

(อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด = 1 : 2)

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองชุดที่ 7

อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
1 : 1	315	5.88	0.373	4.69	17.00
1 : 2	375	9.80	0.52	5.63	10.20
1 : 3	355	9.06	0.51	9.14	11.04
1 : 4	385	8.63	0.45	12.80	11.59

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

อัตราส่วนของซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 15

ขนาดซังข้าวโพด 10-20 เมช

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดลองชุดที่ 8

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ (นาที)	ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)	ผลผลิตเฟอร์ฟูรัล (ร้อยละ)	เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้ (ร้อยละ)	ซัลฟูริคต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)	ซังข้าวโพดต่อเฟอร์ฟูรัล (ตันต่อตัน)
5	345	7.945	0.410	7.08	12.80
30	360	9.410	0.52	5.86	10.63
60	375	9.80	0.52	5.63	10.20
90	360	8.29	0.46	6.66	12.06
120	330	5.75	0.35	9.60	17.39

ตัวแปรสำหรับการทดลองชุดนี้

เวลาก่อนผ่านไอน้ำ 5, 30, 60, 90, 120 นาที

ตัวควบคุมสำหรับการทดลองชุดนี้

ปริมาณซังข้าวโพด 20.0 กรัม

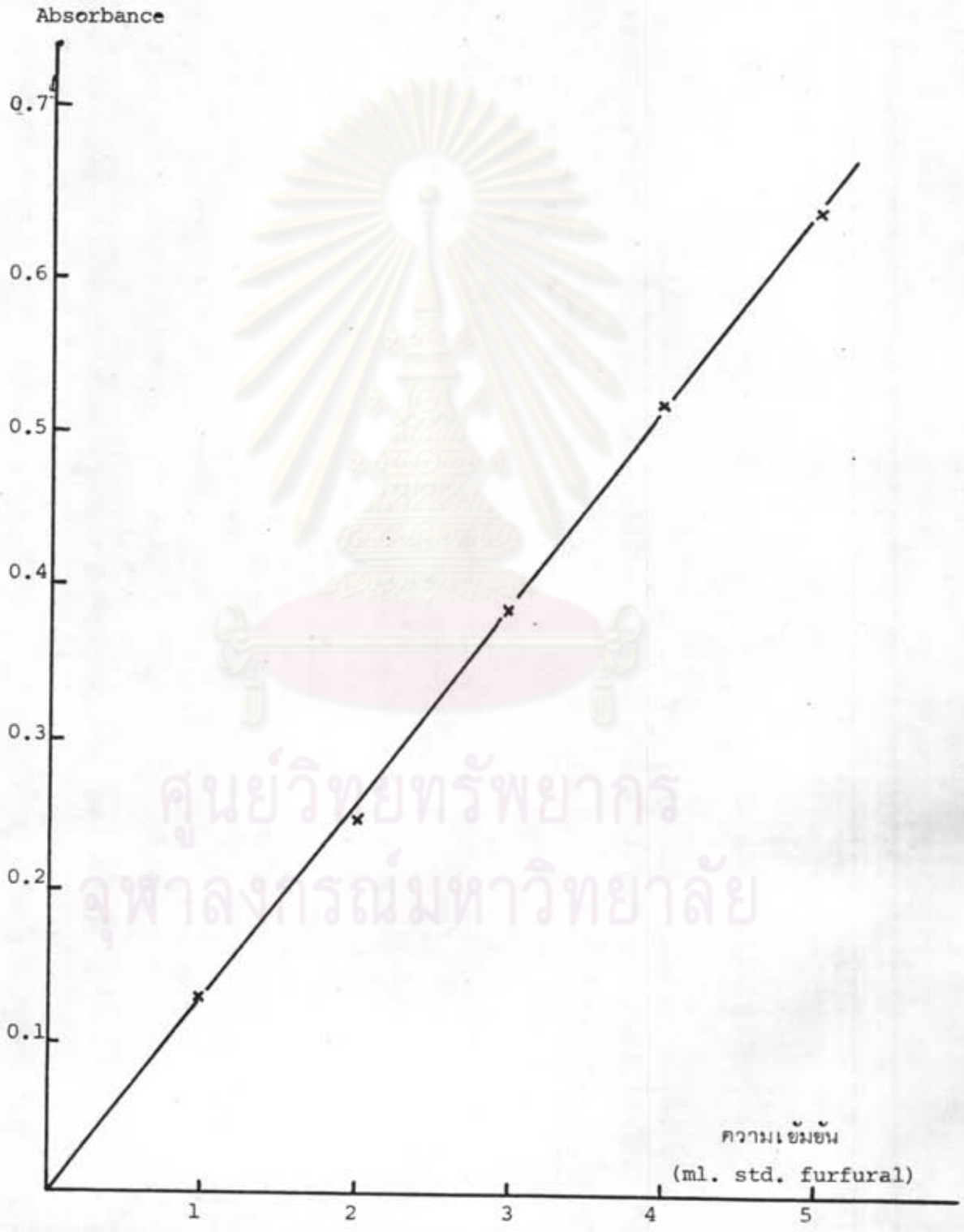
ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค ร้อยละ 15

ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริค 40 มิลลิลิตร

(อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรดซัลฟูริค 1 : 2)

ขนาดของซังข้าวโพด 10-20 เมช

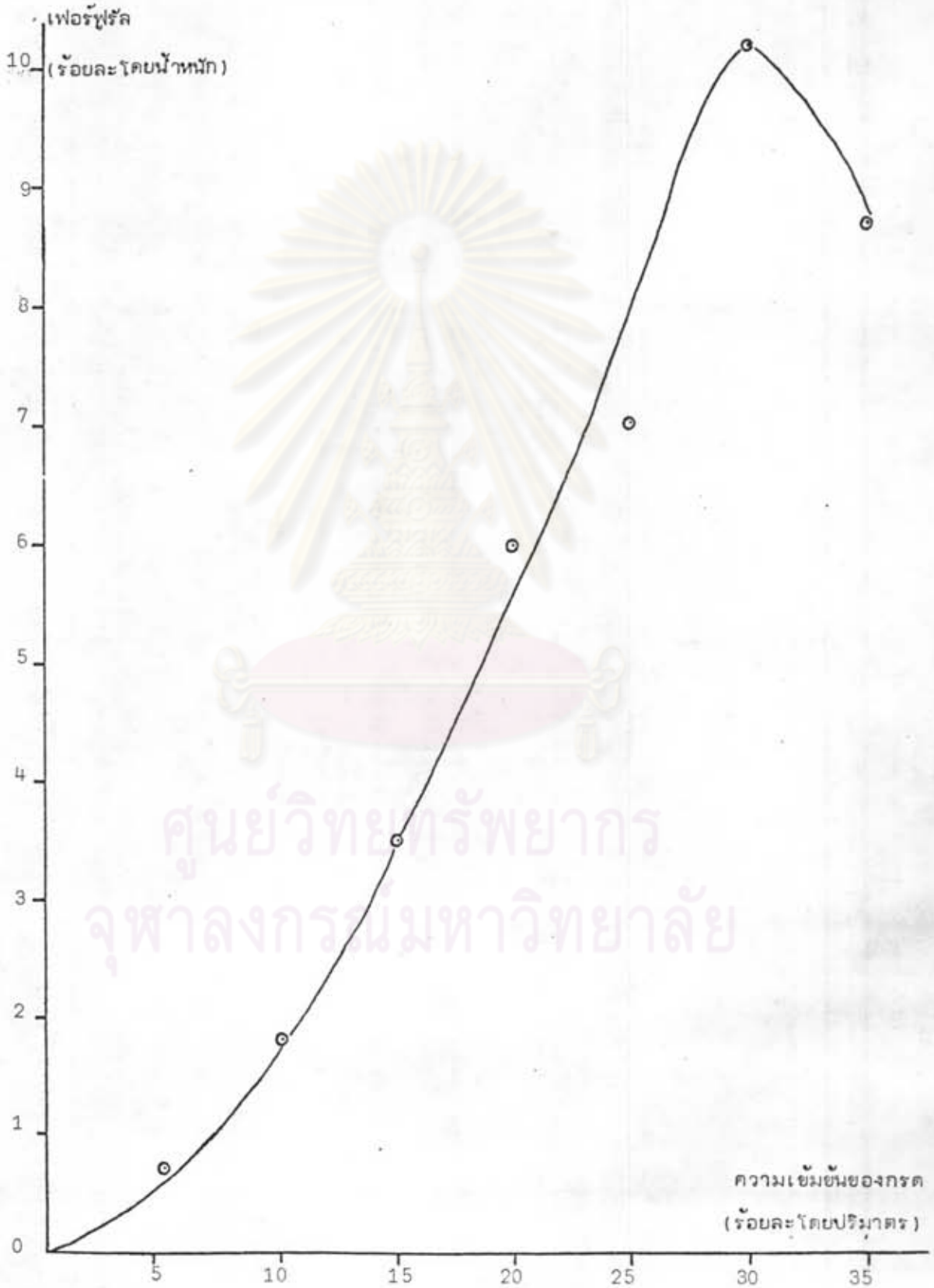
รูปที่ 5.3 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์ฟูรัลกับค่าความดูดกลืนแสง



1 ml std. furfural = 9.958 Mg furfural

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

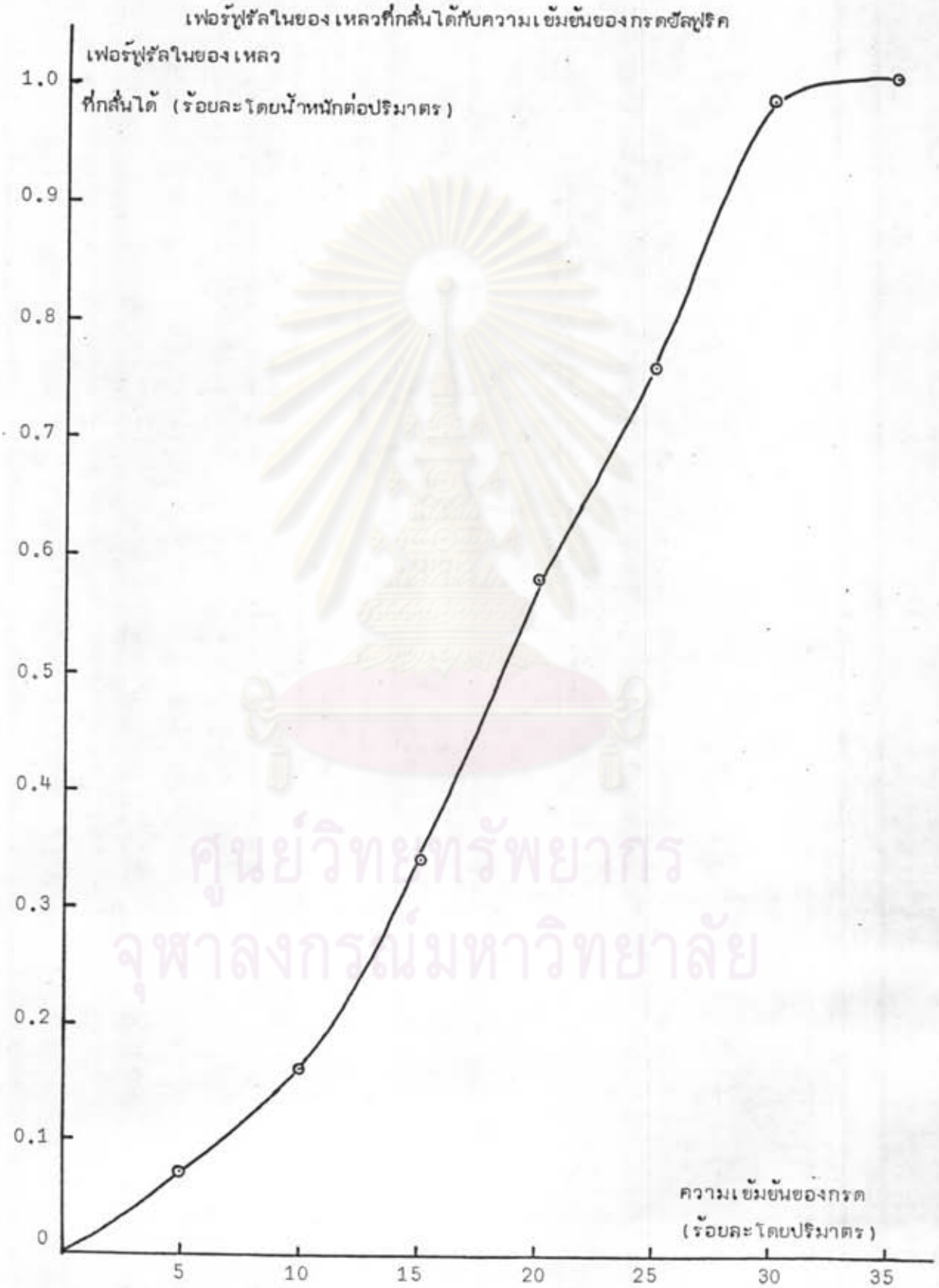
รูปที่ 5.1.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 1 : เฟอรัฟรัลกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

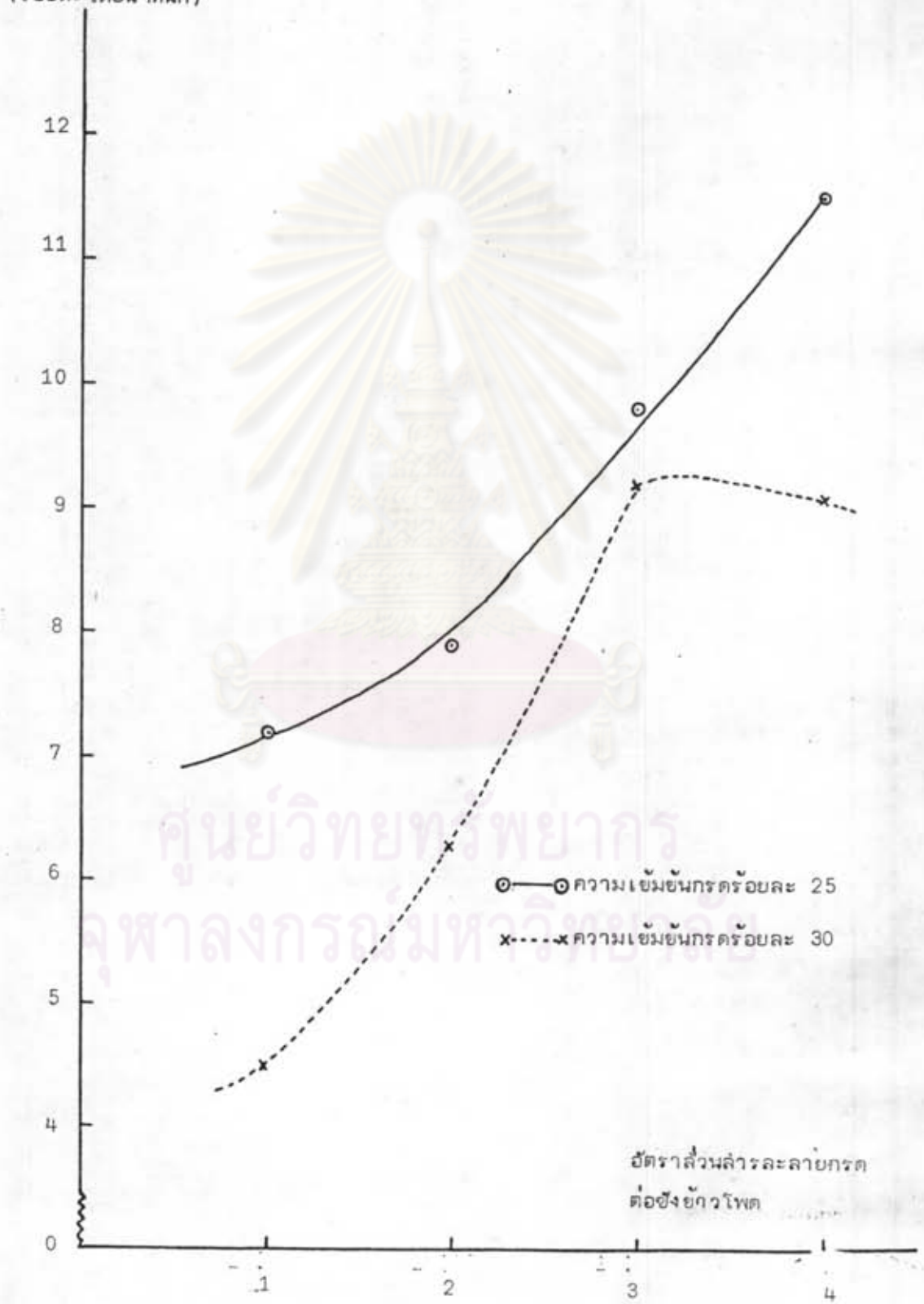
รูปที่ 5.1.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 1 :

เฟอรัฟรัลในยองเหลวที่กลั่นได้กับความเข้มข้นของกรดฮัลฟริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

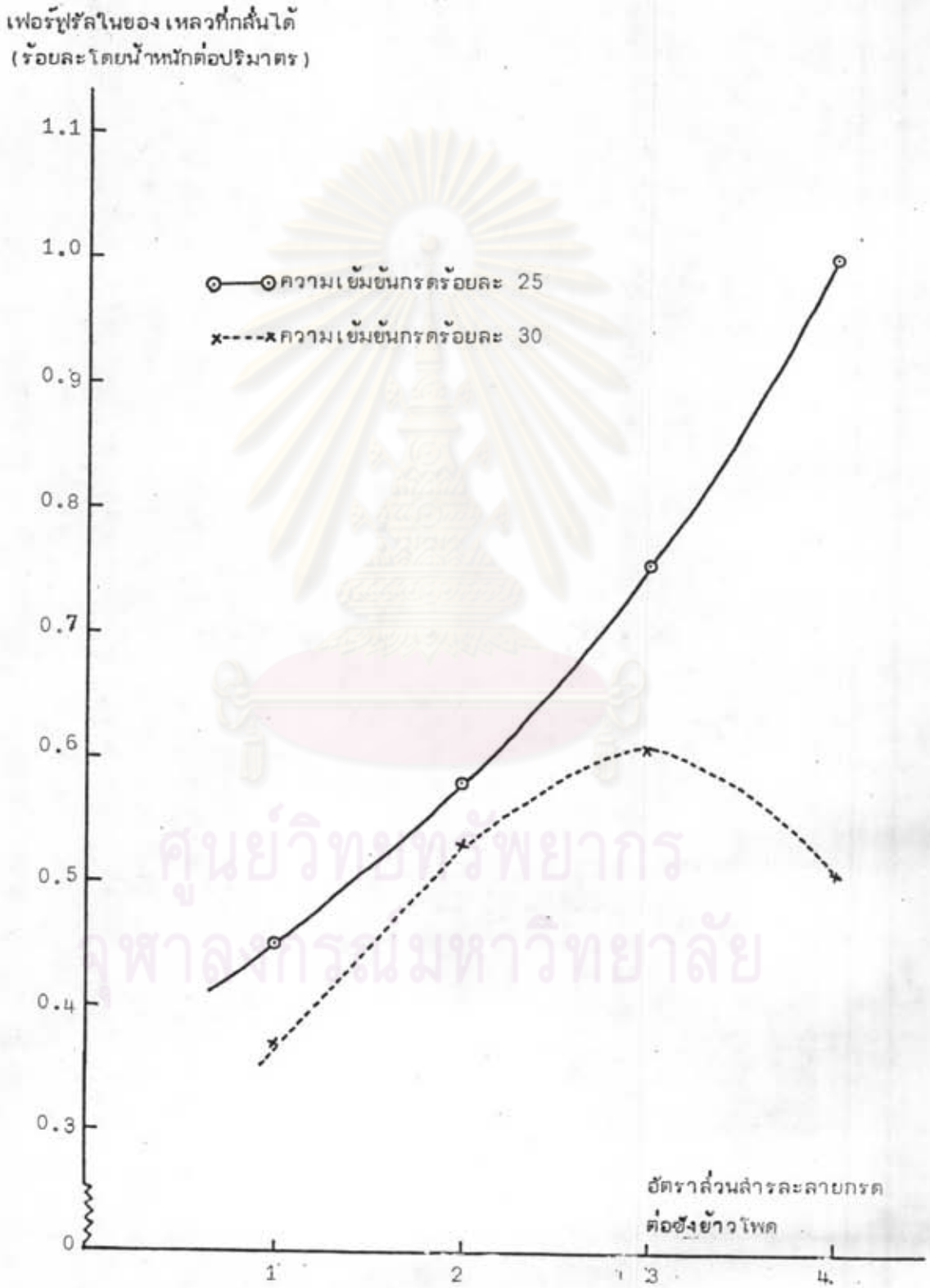
รูปที่ 5.2.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 2 : เฟอร์ฟูรัลกับอัตราส่วนยังย้าวโพดต่อสารละลายกรด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.2.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 2 :

เฟอรัฟฟรัลในของเหลวที่กลั่นได้กับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด



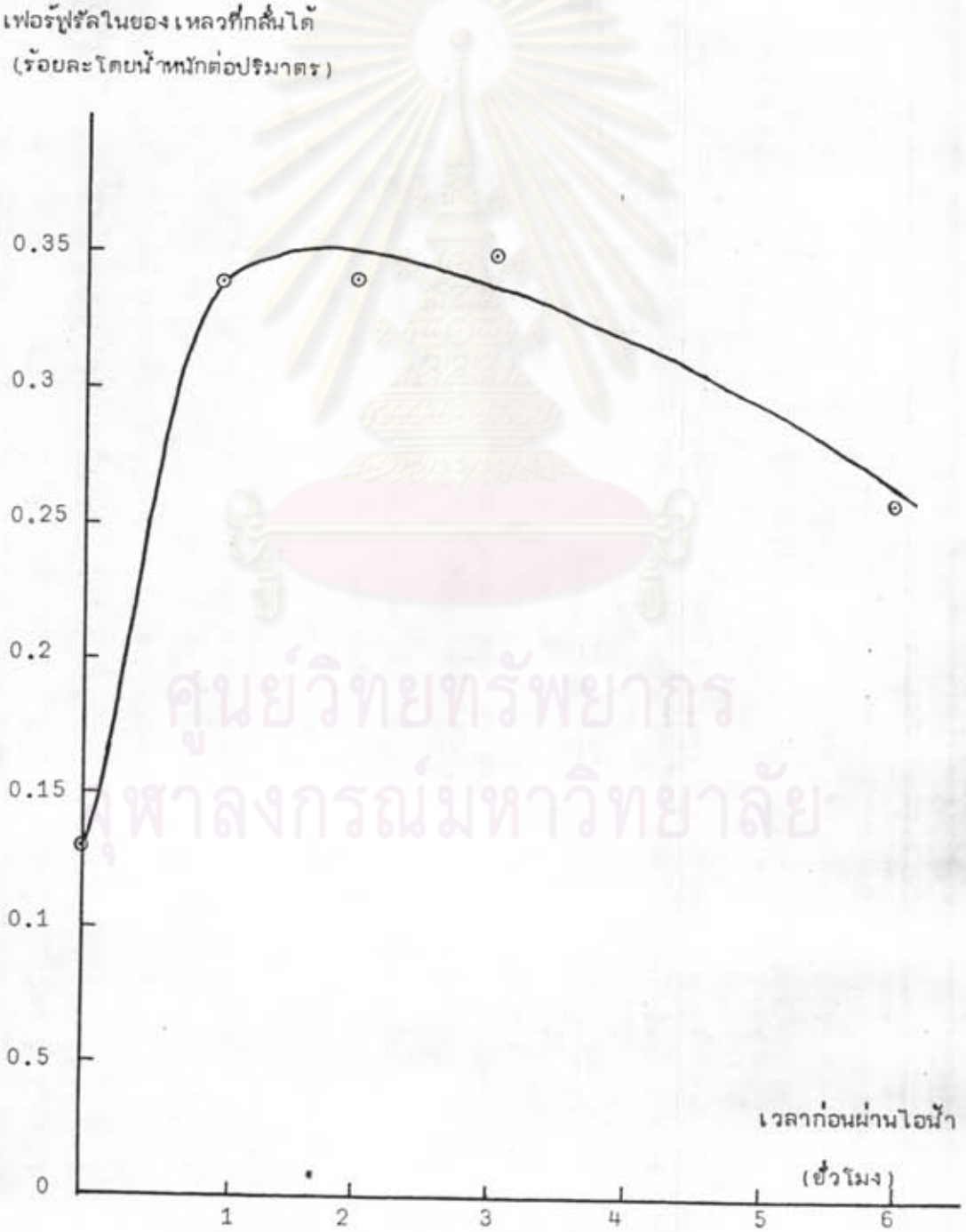
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.3.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 3 : เฟอรัฟรัลกับเวลาก่อนผ่านไอน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

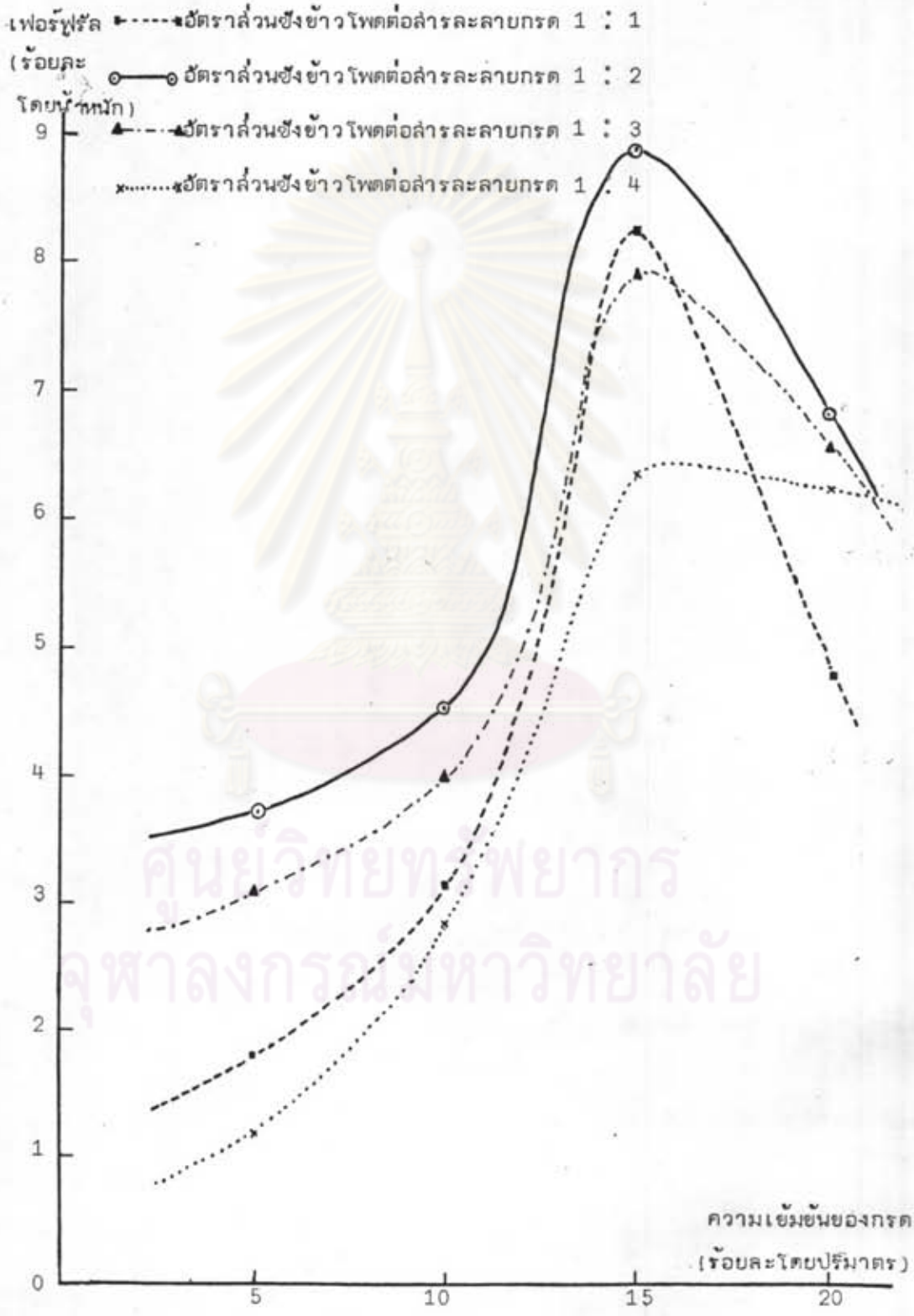
รูปที่ 5.3.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 3 :

เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้กับเวลาก่อนผ่านไอน้ำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

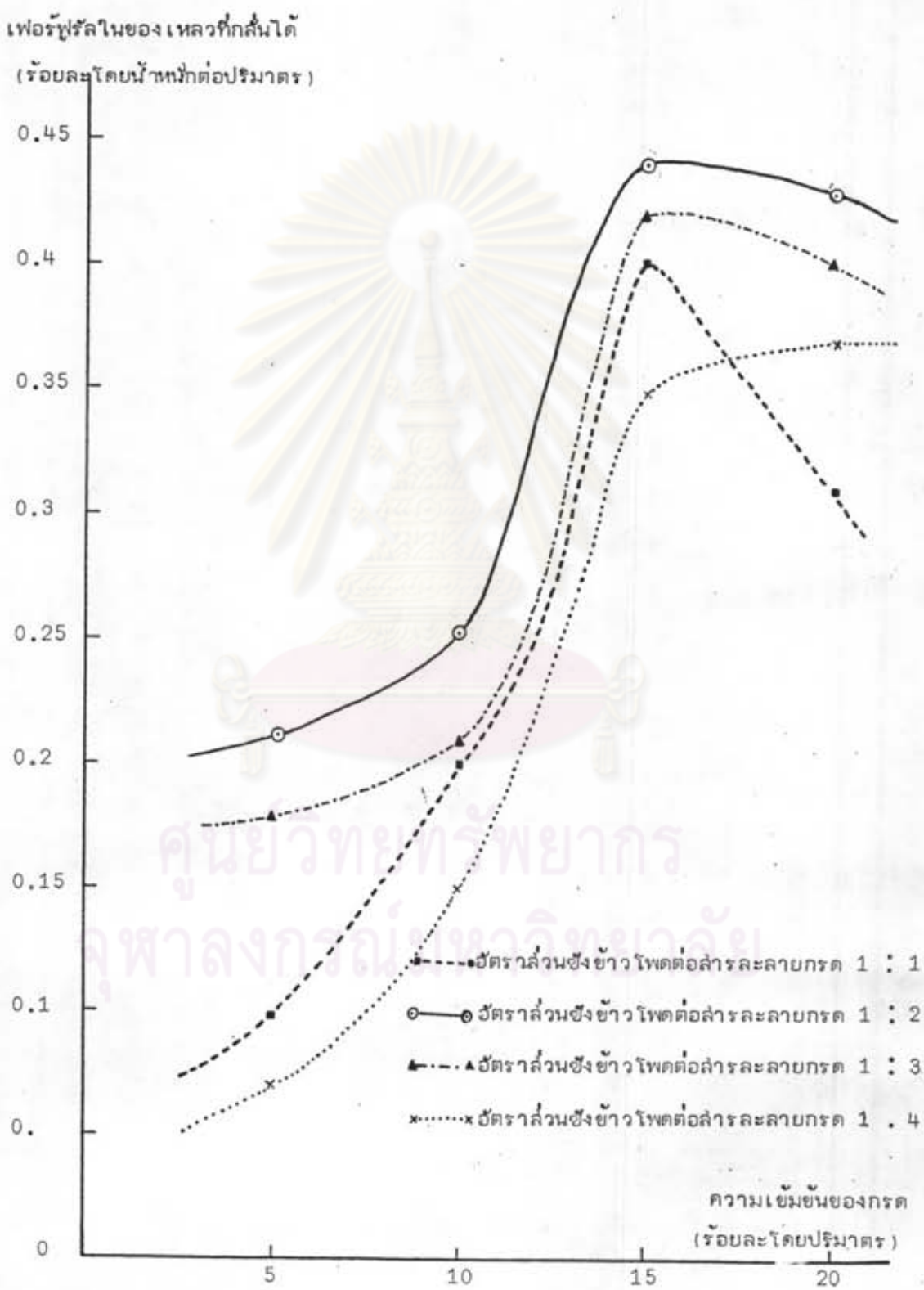
รูปที่ 5.4.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.1-4.4 :
เฟอร์ฟูรัลกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.4.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.1-4.4 :

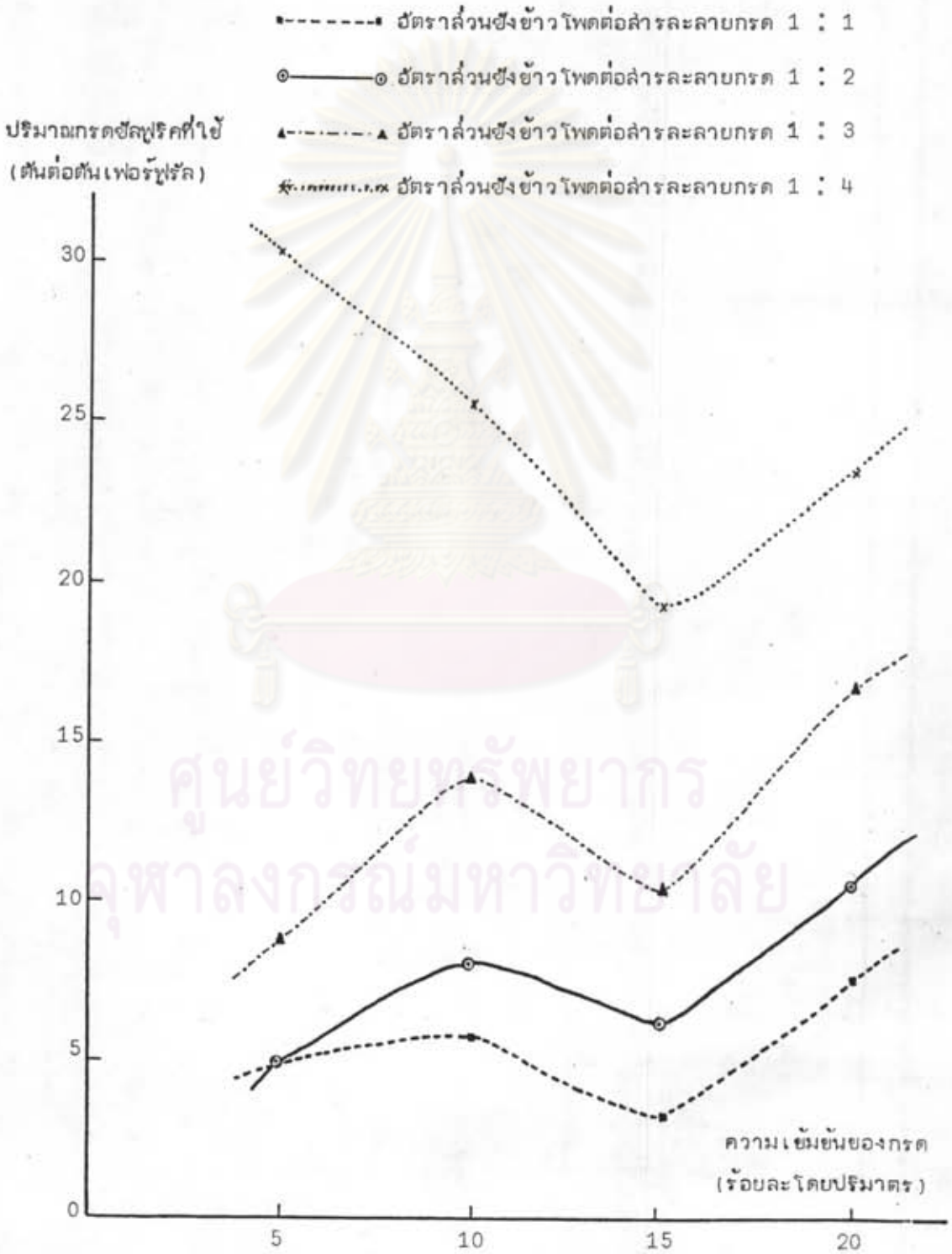
เฟอรัฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้กับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.4.3 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.1-4.4 :

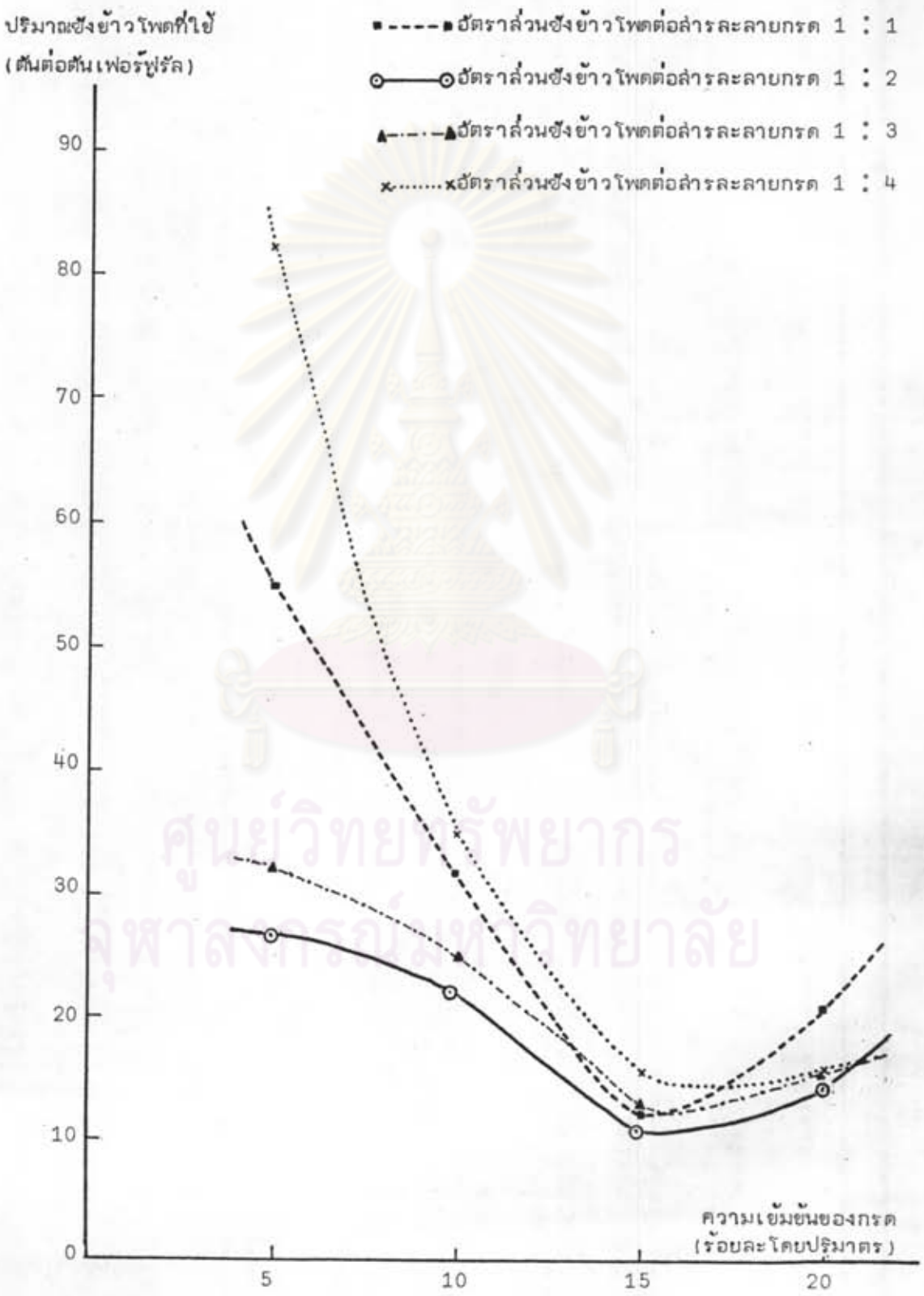
ปริมาณกรดซัลฟูริคที่ใช้ต่อตันเฟอร์ฟูรัลกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.4.4 แสดงผลการทดลองชุดที่ 4.1-4.4 :

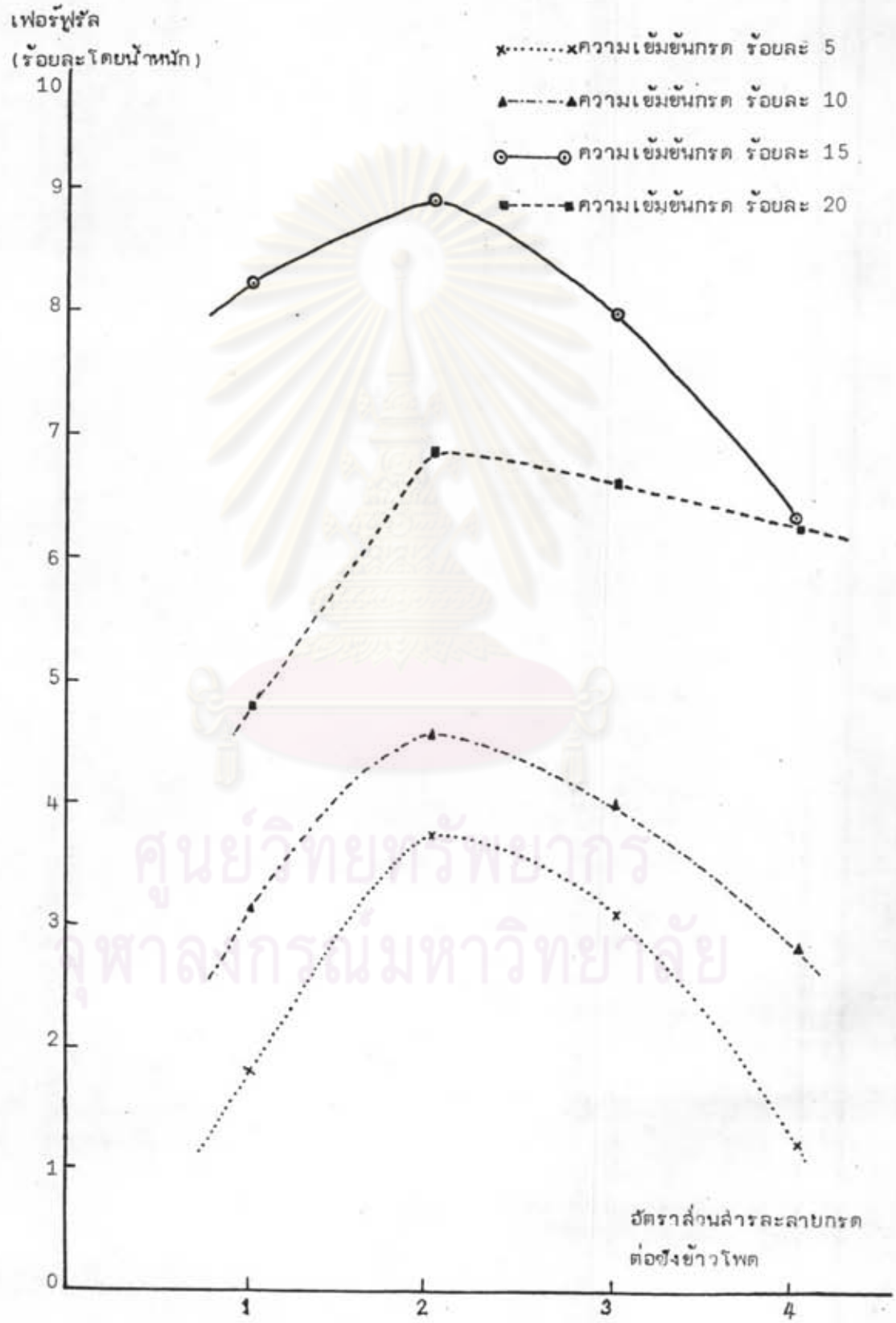
ปริมาณยังย้าวโพดที่ใช้กับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.1-5.4 :

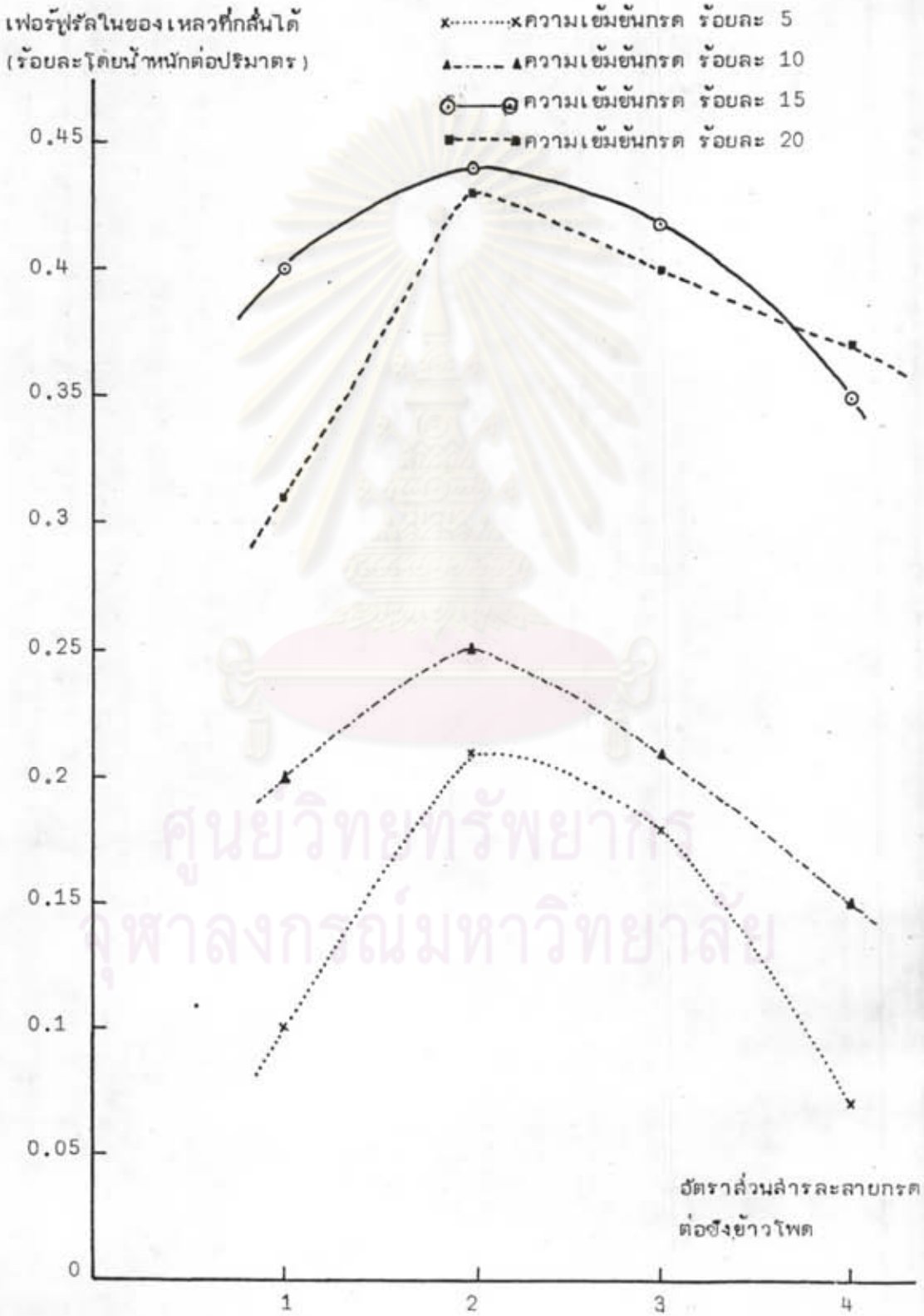
เฟอรัฟูรัลกับอัตราส่วนของข้าวโพดต่อสารละลายกรด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.1-5.4 :

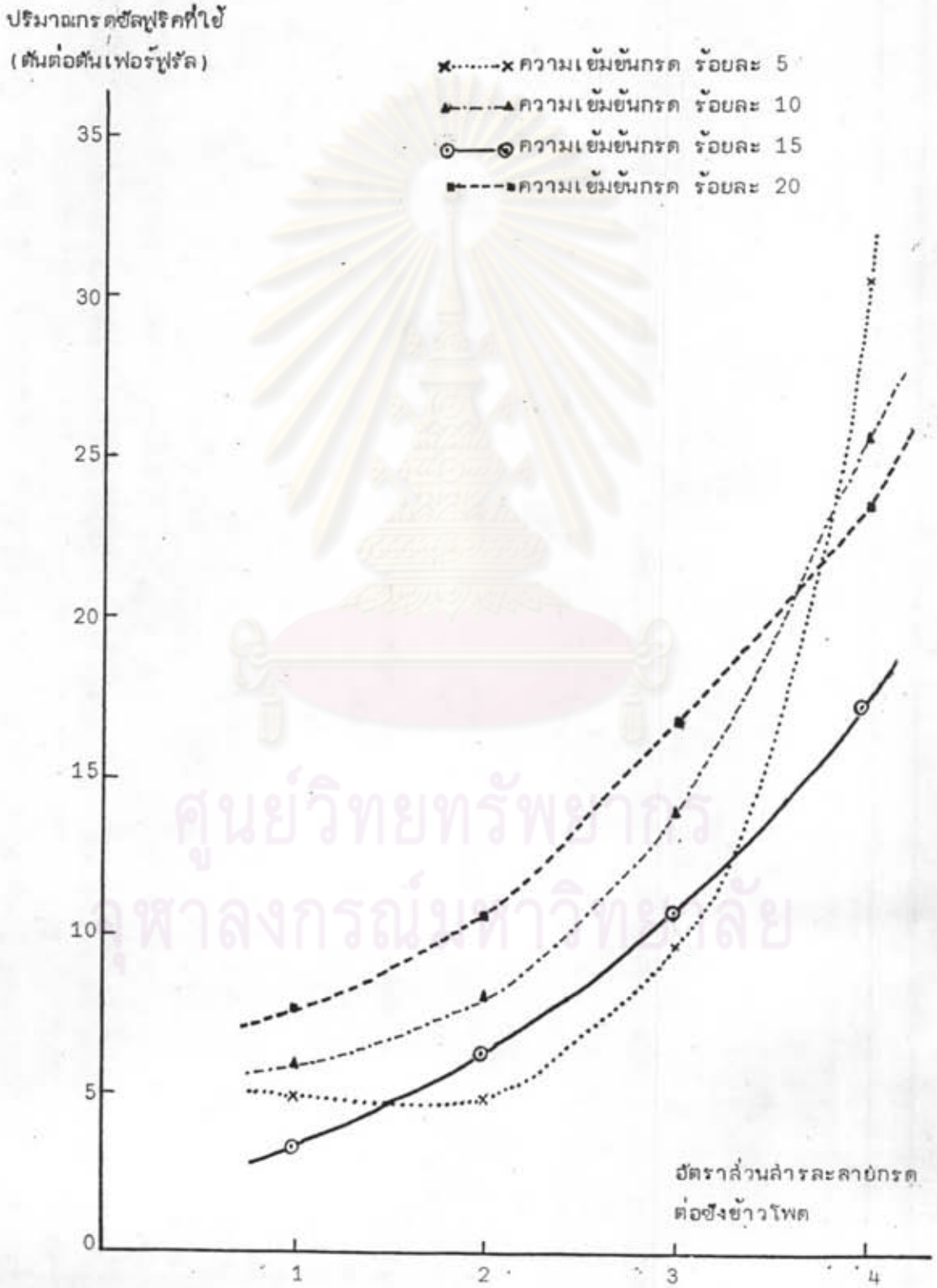
เฟอรัฟรัลในของเหลวที่กลั่นได้กับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5.3 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.1-5.4 :

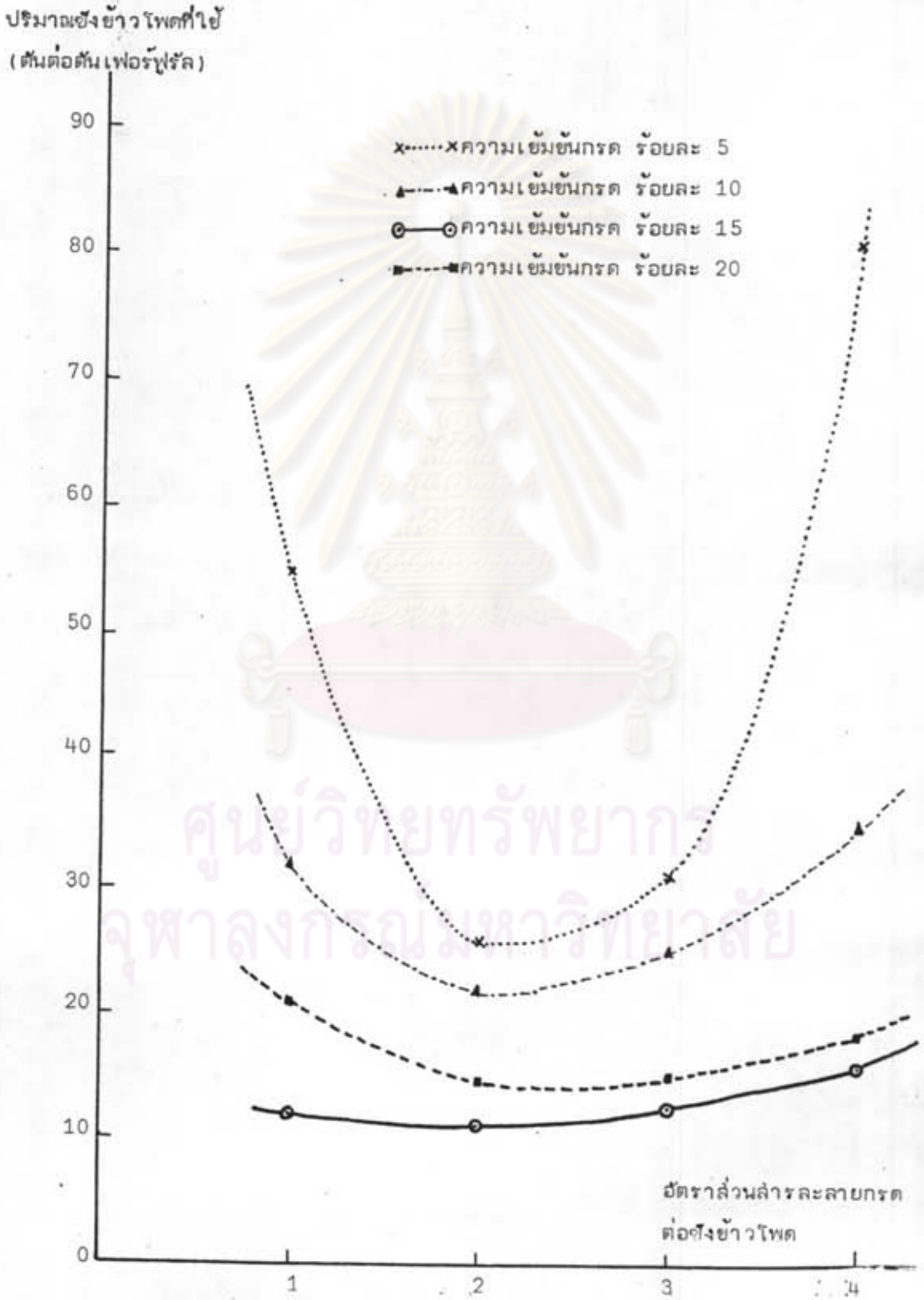
ปริมาณกรดซัลฟูริคที่ใช้กับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด



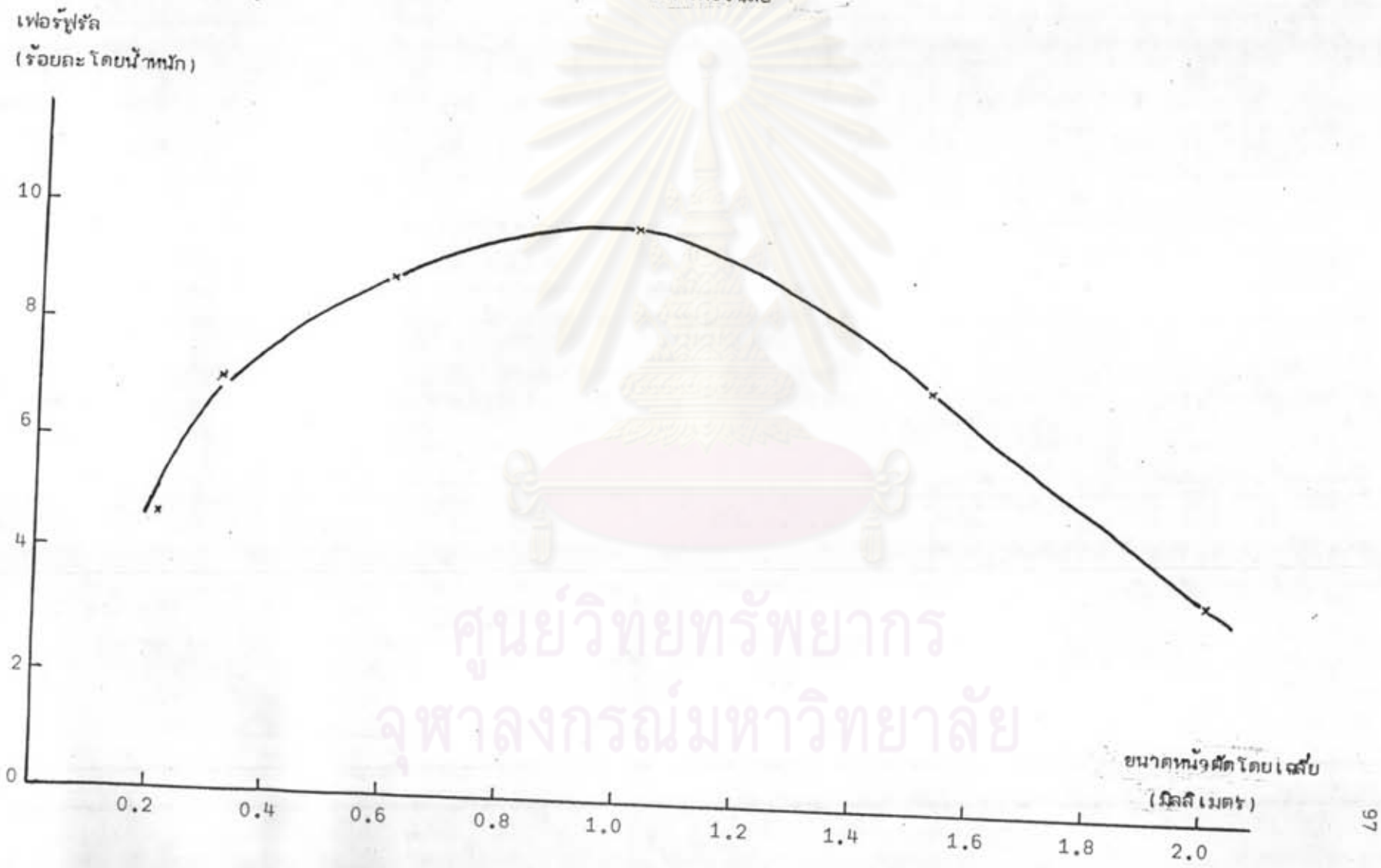
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5.4 แสดงผลการทดลองชุดที่ 5.1-5.4 :

ปริมาณยีงข้าวโพดที่ใช้กับอัตราส่วนยีงข้าวโพดต่อสารละลายกรด

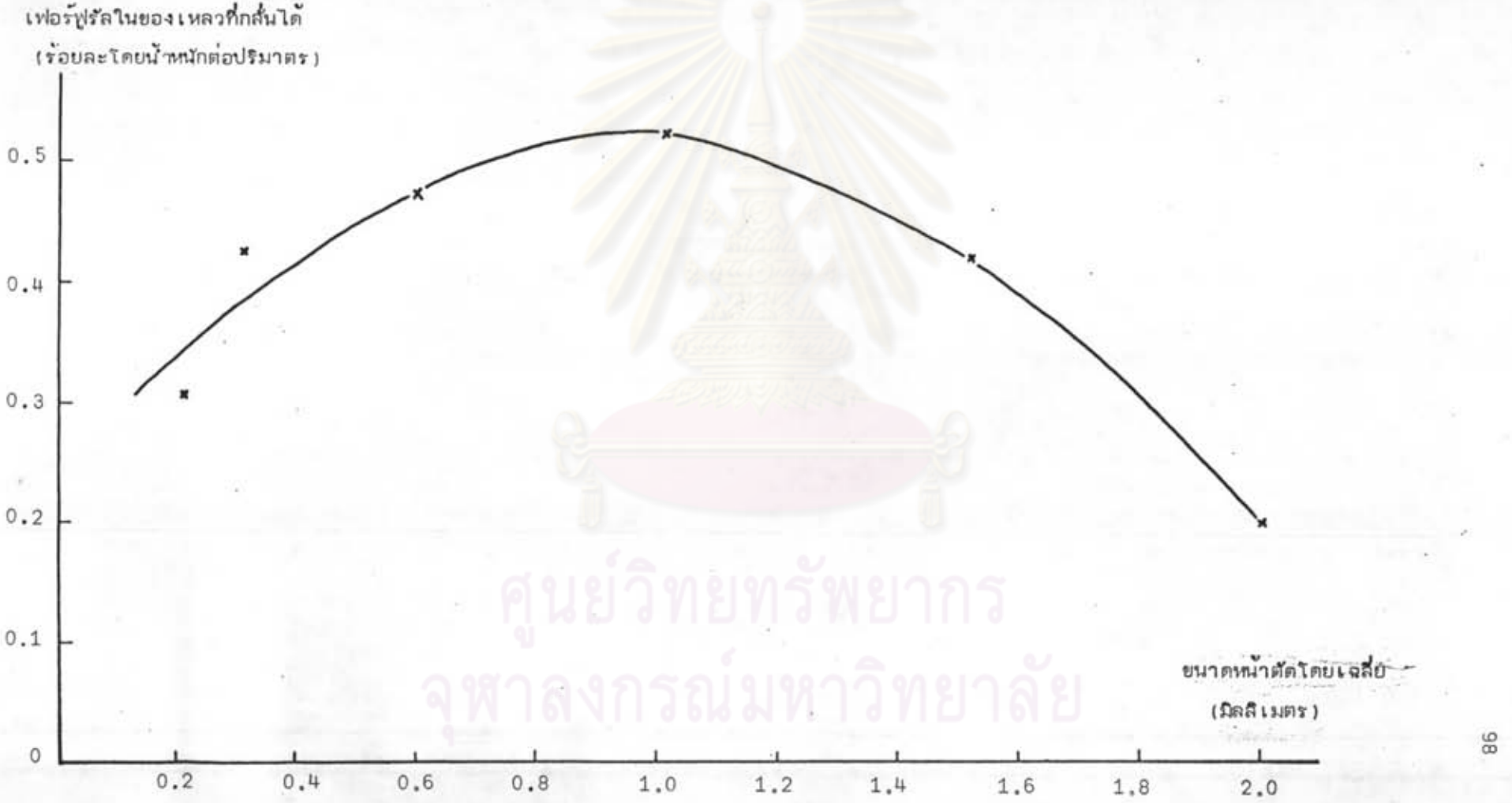


รูปที่ 5.6.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 6 : เฟอร์ฟูรัลกับขนาดหน้าตัดโดยเฉลี่ย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.6.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 6 : เฟอร์ฟูรัลในของเหลวที่กลั่นได้กับขนาดหน้าตัดโดยเฉลี่ย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.7.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 7 :

เฟอรัฟรัล เฟอรัฟรัลกับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.7.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 7 :

เฟอร์ฟูรัลในยองเหลวที่กลั่นได้กับอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อสารละลายกรด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

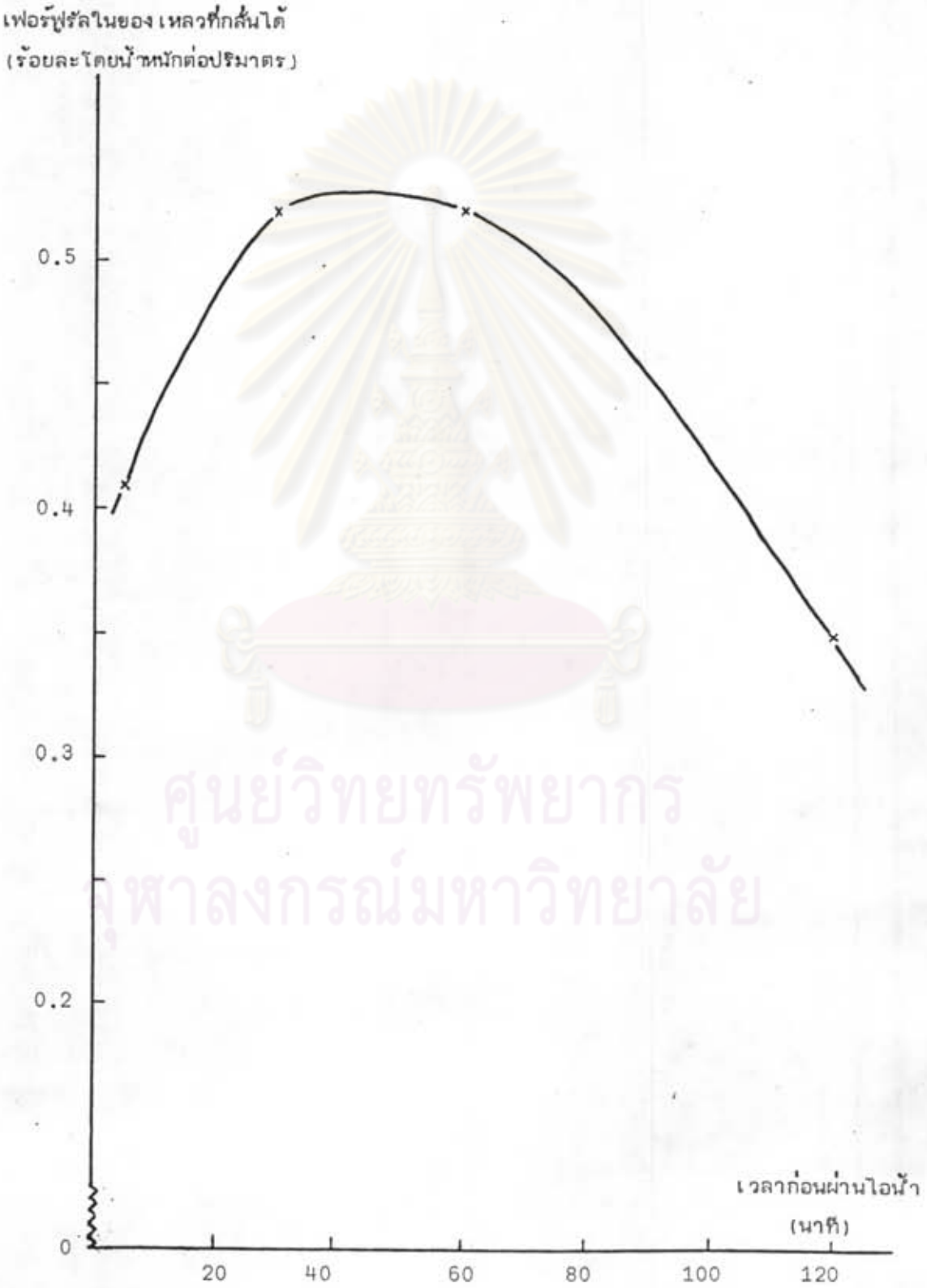
รูปที่ 5.8.1 แสดงผลการทดลองชุดที่ 8 :

เฟอรัสซัลเฟตกับเวลาก่อนผ่านไอน้ำ (นาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.8.2 แสดงผลการทดลองชุดที่ 8 :

เฟอร์ฟูรัลในยอง เหลวที่กลั่นได้กับเวลาก่อนผ่านไอน้ำ (นาที)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย