

ผลการทดลองและอภิปราย

ในบทนี้จะได้กล่าวถึง ผลการทดลองฟลูอิด เซชันของหินน้ำมัน เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดสภาพฟลูอิด เบด (U_{mf}) การวิเคราะห์คุณสมบัติของหินน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง การทดลองหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (\bar{d}_p) ของหินน้ำมัน การทดลองปรับเทียบ (Calibrate) อัตราการบ่อนหินน้ำมันของเครื่องบ่อนแบบสกรู ผลการทดลอง เผาหินน้ำมันในเตาเผาฟลูอิด เบด และการอภิปรายผลการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองฟลูอิด เซชันของหินน้ำมัน เพื่อหาค่าความเร็ว U_{mf} ได้แสดงไว้เป็นกราฟในรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่าความเร็ว U_{mf} ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ส่วนข้อมูลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ ข-1 ข-2 และ ข-3 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของหินน้ำมันที่ใช้ในการทดลองสรุปอยู่ในตารางที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์หัตถิมะ และค่าความร้อนของหินน้ำมัน โดยศูนย์ เครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในตารางที่ ข-4

ผลการทดลองหาค่า เส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยของ เม็ดหินน้ำมัน แสดงไว้ในตารางที่ 6.3 ข้อมูลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ ข-5 สำหรับตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

ผลการปรับเทียบอัตราการบ่อนหินน้ำมันแสดงไว้เป็นกราฟในรูปที่ 6.5 ข้อมูลการปรับเทียบแสดงไว้ในตารางที่ ข-6

ผลการทดลอง เผาหินน้ำมันในเตาเผาฟลูอิด เบด แสดงไว้เป็นกราฟในรูปที่ 6.6 และ 6.7 การหาประสิทธิภาพการเผาไหม้แสดงไว้เป็นกราฟในรูปที่ 6.8 ถึง 6.12 รูปที่ 6.13 และ 6.14 เป็นภาพถ่ายการเผาหินน้ำมันในเตาเผาระหว่างการทดลอง ผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้แสดงไว้ในตารางที่ 6.4 และ 6.5 การเปรียบเทียบค่า

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6.6 วิธีการคำนวณต่าง ๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ง. สำหรับข้อมูลการเผาหินน้ำมันแสดงไว้ในตารางที่ ข-7 และ ข-8

6.2 การอภิปรายผลการทดลอง

รูปที่ 6.1, 6.2 และ 6.3 เป็นผลการทดลองปรากฏการณ์ฟลูอิโด เซชัน เพื่อหาค่าความเร็ว U_{mf} ที่ได้จากการทดลองตามหัวข้อ 5.2 ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มของปรากฏการณ์ใกล้เคียงกับรูปที่ 3.5 กล่าวคือ ความดันตกระหว่างจุด ก. และ จุด ข. ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะเพิ่มขึ้น เมื่อปรับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดลอง U_0 สูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเร็ว U_0 จนกระทั่งถึงค่าคงที่ ขณะ เบดของ เม็ดหินน้ำมันอยู่ในสภาพไม่เคลื่อนไหวหรือเรียกว่า เบดนิ่ง อากาศจะไหลผ่าน เบดในลักษณะคล้ายกับการกรอง การสูญเสียความดันภายใน เบดมีผลส่วนใหญ่ เนื่องจากความเสียดทานระหว่างอากาศที่ไหลผ่าน เม็ดหินน้ำมัน ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับ การสูญเสียความดันใน ทอมแรกของสมการที่ 3.4 เมื่อความเร็ว U_0 สูงกว่าความเร็ว U_{mf} แล้ว เบดจะขยายตัวทำให้อากาศไหลผ่าน เบดได้สะดวกขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความดันตกภายใน เบด เริ่มคงที่ อย่างไรก็ตามผลการทดลองปรากฏการณ์ฟลูอิโด เซชันของหินน้ำมันขนาดใหญ่คือ 3.94 มม. และ 2.29 มม. พบว่าอากาศไหลผ่านเบดไม่สม่ำเสมอสังเกตได้จาก เม็ดหินน้ำมันใน เบดแยกออกเป็นช่อง ซึ่ง เกิดขึ้นภายในเบดหรือบริเวณใกล้เคียงกับผนังทดลอง เมื่ออากาศไหลผ่านช่องดังกล่าวทำให้ความดันตกภายใน เบดลดต่ำลงสำหรับหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. มีลักษณะปรากฏการณ์ที่สม่ำเสมอและดีกว่า เนื่องจากมีขนาดค่อนข้างเล็ก การเปรียบเทียบการทดลองฟลูอิโด เซชันของหินน้ำมันทั้งสามขนาด เมื่อบรรจุหินน้ำมันในเบดหนัก 1,500 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าความดันตกใน เบดของหินน้ำมันทั้งสามขนาดเมื่อมีค่าคงที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ แรงกระทำเนื่องจากผลของความดันตกกระหว่างหน้าตัดใด ๆ ภายในฟลูอิโด เบดจะเท่ากับน้ำหนักของ เม็ดของแข็งที่อยู่ระหว่างหน้าตัดนั้น ๆ ดังนั้น เมื่อบรรจุหินน้ำมันแต่ละขนาดลงใน เบดแต่ละครั้งให้มีน้ำหนักเท่ากัน ความดันตกในเบดช่วงที่คงที่แล้วย่อมเท่ากันด้วย

ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิโด เซชัน U_{mf} จากรูปที่ 6.1 และ 6.2 พบว่าความเร็ว U_{mf} ที่ได้จากการทดลอง เมื่อบรรจุหินน้ำมันขนาดเดียวกันหนัก 500, 1,000 และ 1,500 กรัม ในเบดมีค่าใกล้เคียงกัน ตารางที่ 6.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากสมการที่ 3.10 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของความ

เร็ว U_{mf} จากวิธีการทั้งสองจะน้อยลง เมื่อดินน้ำมันมีขนาด เล็กลง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินน้ำมันแหล่งแม่สอดที่ใช้ในการทดลอง เฝ้าในตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่า เถ้าและสารระเหยในดินน้ำมันมีปริมาณประมาณ 60 % และ 30 % โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับผลวิเคราะห์ค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ดังแสดงในตารางที่ ข-4 ซึ่งให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของ เลขนัยสำคัญต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการวิเคราะห์ค่าคาร์บอน ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด (Homogeneous) หรือ เนื่องจากขีดจำกัดของ เครื่องมือวัดเอง จากการสังเกตพบว่าการวิเคราะห์ค่าคาร์บอนมีความแตกต่างกันตั้งแต่ 0.29 ถึง 0.35 หรือคิดเป็นค่า เฉลี่ยความแตกต่างเท่ากับ 1.54 %

ผลการเปรียบเทียบอัตราการป้อนดินน้ำมันผ่าน เครื่องบ้อนสกรูดังแสดงในรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนดินน้ำมันลดลง เมื่อดินน้ำมันมีขนาด เล็กลงที่ความเร็วรอบ เดียวกัน ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะการทำงานของ เครื่องบ้อนสกรูใช้การหมุนของใบ เกลียวผลัดกันให้ เม็ดดินน้ำมัน เคลื่อนที่ไป และจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างใบ เกลียวกับท่อบ้อน เพื่อแก้ไขการทำงานของสกรู ทำให้ เมื่อใบ เกลียวหมุนผลัดกัน เม็ดดินน้ำมัน เม็ดดินน้ำมันบางส่วนจะถูกผลัดดันไปกับใบ เกลียว และบางส่วนลอดผ่านใบ เกลียว เกาะค้างที่ด้านข้างของผนังท่อบ้อน ถ้า เม็ดดินน้ำมัน มีขนาด เล็กปริมาณที่ตกค้างอยู่บริเวณด้านข้าง ผนังท่อบ้อนก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างระหว่าง เม็ดดินมีค่าน้อย ดินน้ำมันขนาดใหญ่จึงมีส่วนที่ใบ เกลียวหมุนผลัดดันมากกว่า

ผลการ เผาไหม้ดินน้ำมันในรูปที่ 6.6 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการ เผาไหม้ภายใน เบด ที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศประมาณ 10-30 ซม. ค่อนข้างคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการ เผาไหม้ในทางอุดมคติ อย่างไรก็ตามการ เผาไหม้ดินน้ำมันขนาด 2.29 มม. มีความผิดปกติอยู่บ้างคือ อุณหภูมิภายใน เบด T_4 ที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศประมาณ 10 ซม. ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดอื่น ๆ ภายใน เบด ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากตอน เริ่มจุด เต่าอาจเกิดการรวมตัวของ เถ้าบางส่วนในบริเวณจุดวัดอุณหภูมิ T_4 ซึ่งทำหน้าที่เสมือนฉนวนความร้อนจึงทำให้ อุณหภูมิที่วัดต่ำกว่าปกติ และแม้ว่าระหว่างจุดวัดอุณหภูมิ T_7 และ T_9 ไม่มีจุดวัดอุณหภูมิภายใน เต่าอีกก็ตาม แต่จากการสังเกตลักษณะการ เผาไหม้ในช่วงพรีเบิร์ดพบว่า ไม่มีการ เผาไหม้สารระเหยที่หลุดลอยออกจาก เบดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วงพรีเบิร์ดส่วนใหญ่จึง เป็น อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ไหลออกจาก เต่าและก๊าซร้อนนี้ เมื่อ เคลื่อนที่ไปจะถ่ายเทความร้อนให้แก่สิ่ง-

แวดล้อม เช่น ผนังเตา ทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนลดลง และอุณหภูมิที่ลดลงนี้มีแนวโน้มลดลงเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Mei และคณะ (5)

สำหรับจุดวัดอุณหภูมิภายใน เเบดที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศระยะใดระยะหนึ่ง มีเพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากลักษณะการเผาไหม้ฟลูอิดซ์ เเบดมีอุณหภูมิการเผาไหม้ภายใน เเบดที่สม่ำเสมอ ดังนั้นอุณหภูมิในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันจึงควรเท่ากันด้วย สำหรับอุณหภูมิภายใน เเบดจะใช้อุณหภูมิ T_5 แทนอุณหภูมิเฉลี่ยของ เเบดทั้งนี้ เนื่องจากจุดวัดอุณหภูมิ T_5 อยู่ภายใน เเบดส่วนที่หนาแน่น (Dense Phase) และไม่ถูกผลกระทบของ เถ้าที่รวมตัวกัน ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่าปกติ

การทดลองการเผาไหม้หินน้ำมันที่มีข้อบกพร่องในส่วนของ การทดลองที่อาจเกิดขึ้นได้หลายประการ เช่น คุณสมบัติของหินน้ำมันที่ใช้ทดลองไม่สม่ำเสมอเพียงพอ และการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียโดยเครื่อง Orsat มีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย เป็นต้น ดังนั้นผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถบ่งชี้ให้แน่ชัดถึงความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามการทดลองมีลักษณะของแนวโน้มที่เกิดขึ้นพอที่จะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาเผา T_5 กับปริมาณ

Excess air จากรูปพบว่าอุณหภูมิใน เเบด T_5 ลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ Excess air เพิ่มขึ้น สำหรับหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. อุณหภูมิ T_5 มีแนวโน้มแสดงค่าสูงสุดที่ 70 % Excess air อย่างไรก็ตามหลังจากค่านี้แล้วอุณหภูมิ T_5 ก็ลดลง สำหรับหินน้ำมันขนาด 2.29 มม. ไม่มีจุดที่แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดทั้งนี้ก็เนื่องจากขีดจำกัดของสภาวะการทดลองไม่เอื้ออำนวยให้ทำการทดลองที่ปริมาณ Excess air ต่ำกว่า 51.1% เพราะถ้าปริมาณ Excess air ต่ำกว่าค่านี้แล้ว เเบดจะไม่อยู่ในสภาพฟลูอิดซ์ สำหรับสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผา T_5 ลดลงเมื่อปริมาณ Excess air เพิ่มขึ้นก็คือ เมื่อเปอร์เซ็นต์ Excess air เพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เเบดของหินน้ำมันที่กำลังลุกไหม้เพิ่มขึ้นด้วย การถ่ายเทความร้อนจากหินน้ำมันที่กำลังลุกไหม้สู่อากาศจึงเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายใน เเบดจึงลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น จากรูปจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ Excess air ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 47.5-116.9 % ทั้งนี้เนื่องมาจากหินน้ำมันที่ใช้ในการทดลองมีค่าอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงทางทฤษฎีเท่ากับ 2.89 และ 2.68 Kg_a/Kg_f สำหรับหินน้ำมันขนาด 2.29 มม. และ 1.15 มม. ตามลำดับ การบ้อนอากาศในปริมาณที่พอดีสำหรับ เเผาไหม้หินน้ำมันตามอัตราส่วนดังกล่าว

ไม่สามารถทำให้หินน้ำมันอยู่ในสภาพฟลูอิดซ์ เบคได้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ปริมาณอากาศมากขึ้น เพื่อทำให้เกิดสภาพฟลูอิดซ์ เบค ปริมาณที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้ เปอร์ เซนต์ Excess air มีค่าสูงอยู่ในช่วงดังกล่าว

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในเตา T_5 กับอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เบค U_0 (คิดที่สภาวะของอากาศก่อน เข้า เตา) ไม่ได้แสดงไว้ เนื่องจากลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้จะคล้ายคลึงกับกราฟที่แสดงในรูปที่ 6.7 พิจารณาจากข้อมูล ในตารางที่ 6.4 และ 6.5 ทั้งนี้ เนื่องจากความเร็วของอากาศ และอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ เปอร์ เซนต์ Excess air

ข้อสังเกตข้อหนึ่งก็คือความเร็วของอากาศ U_0 ที่ใช้ในการทำให้เกิดฟลูอิดซ์ เบค บางค่าขณะ เผาไหม้หินน้ำมันทั้งสองขนาดมีค่าต่ำกว่าความเร็ว U_{mf} พิจารณาจากตารางที่ 6.4 และ 6.5 เปรียบเทียบกับค่า U_{mf} ในตารางที่ 6.1 ทั้งนี้ เนื่องจากความเร็ว U_{mf} ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิห้องและหินน้ำมันมีความหนาแน่นคงที่ แต่ในระหว่างการเผาไหม้ หินน้ำมันจะกลายเป็นกากหินหรือเถ้า ซึ่งกากหินนี้มีมีความหนาแน่นต่ำกว่าหินน้ำมัน เหตุผลอีก ประการหนึ่งที่สำคัญคือ ผลของอุณหภูมิมิฉะนั้นเกิดการเผาไหม้จะทำให้ก๊าซมีความเร่งเพิ่มขึ้น (Acceleration of Gas)⁽³⁵⁾ แนวทางอธิบายผลของอุณหภูมิจึงใช้การพิสูจน์จากสมการ พื้นฐานแสดงในภาคผนวก จ.

เปอร์ เซนต์ Excess air ของหินน้ำมันทั้งสองขนาดอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ทั้ง ๆ ที่ปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. ลดลงมีสาเหตุ เนื่องจากอัตราการใช้ หินน้ำมันขนาด 1.15 มม. ลดลงด้วย พิจารณาจากตารางที่ 6.4 และ 6.5 หรือเปอร์ เซนต์ Excess air ที่คำนวณจากปริมาณ CO_2 , O_2 และ CO จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียอาจเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ เนื่องจากตำแหน่งจุดเก็บก๊าซไม่ดีพอสำหรับ เก็บก๊าซตัวอย่าง

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิภายใน เบคให้คงที่ ในระหว่างที่ ปรับความเร็วของอากาศเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนที่ได้จาก การทดลองขึ้นกับตัวแปร 3 ตัวด้วยกันคือ ปริมาณ Excess air อุณหภูมิภายใน เบค และขนาด ของ เม็ดหินน้ำมัน รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนกับ ปริมาณ Excess air อุณหภูมิการเผาไหม้และขนาดของหินน้ำมัน เพื่อให้สะดวกในการพิจารณา จึงแสดงภาพถ่ายของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับ ปริมาณ Excess air

และอุณหภูมิภายในเตา T_5 ในรูป 6.9-6.10 และรูปที่ 6.11-6.12 ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 6.9 และ 6.10 แสดงให้เห็นว่าหินน้ำมันทั้งสองขนาดมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันคือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เกือบคงที่ในช่วง Excess air เท่ากับ 50-70 % หลังจากช่วงนี้แล้วประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม เปอร์ เซนต์ Excess air จนกระทั่งถึงค่า Excess air ประมาณ 110 % ตามความเป็นจริงแล้วเป็นการยากที่จะตัดสินใจจากเส้นกราฟจากข้อมูลเพียง 5-6 ข้อมูลเท่านั้น เนื่องจากจำนวนข้อมูลไม่มากพอที่จะสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวควรแสดงเป็นกราฟในลักษณะใด อย่างไรก็ตามจากแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันของหินน้ำมันทั้งสองขนาดจึงได้ตัดสินใจจากเส้นกราฟดังที่ได้แสดงในรูปดังกล่าว และความสัมพันธ์ที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Bhattacharya ⁽³⁾ สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Excess air มีสาเหตุเนื่องมาจากเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะยิ่งรุนแรงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความปั่นป่วนของเชื้อเพลิงภายในเบดเพิ่มขึ้น (Turbulent) ผลก็คือประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้น รูปที่ 6.11 และ 6.12 แสดงภาพฉายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนกับอุณหภูมิในเตาเผา T_5 จากกราฟทั้งสองรูปสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Excess air และเมื่อปริมาณ Excess air เพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในเตา T_5 มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นจากเหตุผลทั้งสองประการจึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยทั่วไปขึ้นกับองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ตัว คือ อุณหภูมิการเผาไหม้ (Temperature) การปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งสัมพันธ์กับการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และระยะเวลาที่เชื้อเพลิงเผาไหม้อยู่ในเตาเผา (Residence Time) สำหรับการทดลองนี้ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเผาจะมีความสำคัญน้อยกว่าผลของการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ พิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 6.7, 6.9 และ 6.10 ประกอบ จากการสังเกตพบว่า อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีช่วงแคบมากคือประมาณ 100° ซ. เท่านั้น

ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนของหินน้ำมันแหล่งแม่สอดที่ได้จากการทดลองนี้พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 98.00-99.00 % ในช่วงปริมาณ Excess air ตั้งแต่ 47.5-116.9 % ซึ่งผลการทดลองนี้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเผาหินน้ำมันอิสราเอลของ Pitrolo และ Shang ⁽¹⁴⁾

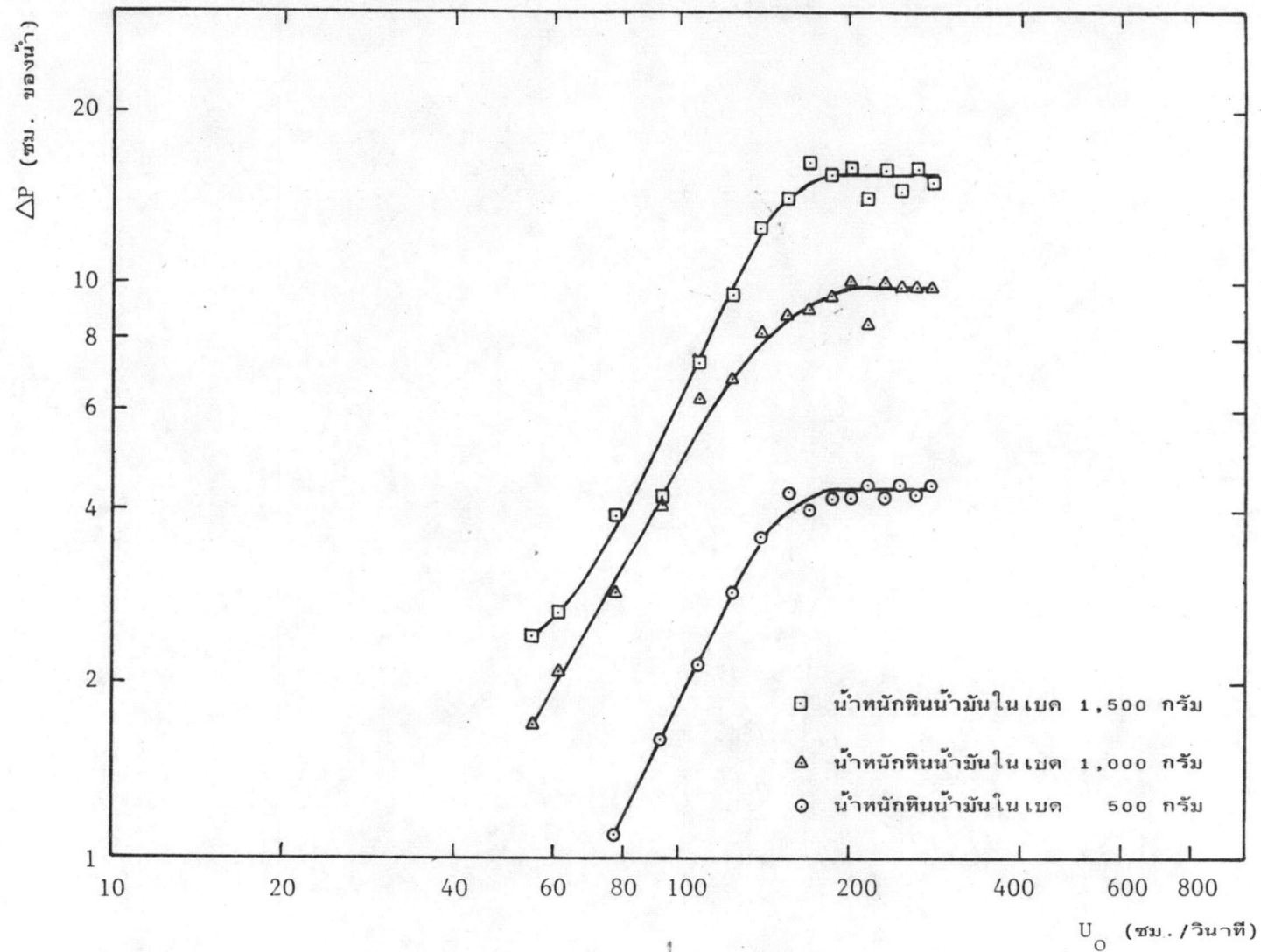
พิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากตารางที่ 1.6 จากผลการทดลองของ Mei⁽⁵⁾ พบว่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนของหินน้ำมันอิสราเอลในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดขนาด 15 ซม. มีค่า 98.00 % หรือสูงกว่า เมื่อไม่มีการบ้อนกลับของอนุภาคที่ลอยไปกับก๊าซร้อน เข้าสู่เตาอีก (Recycling of Fines)

สำหรับการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้มีสมมติฐานในการหา ดังนี้ คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนคิดจากส่วนที่เป็นของแข็ง เท่านั้น (Solid Basis) เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยมีปริมาณ Excess air สูงมาก ดังนั้นปริมาณ CO และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจะน้อยมากสามารถละทิ้งได้⁽³⁶⁾ เถ้าที่หลุดลอยออกจากเตาเผา (Fly Ash) แบ่งได้เป็นสองส่วนคือ⁽³⁶⁾ ส่วนที่ถูกก๊าซร้อนพาออกไป เถ้าส่วนนี้จะมีขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นจากการขัดสีระหว่างเถ้าภายในเบด และหินน้ำมันที่บ้อน เข้าสู่เตาเผา มีการกระจายขนาดพิจารณาจากตารางที่ ข-5 ส่วนที่สองเกิดขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของฟองอากาศที่บริเวณผิวของเบด ทำให้ เถ้าหลุดลอยออกไป (Splashing) หินน้ำมันขนาดเล็ก ๆ เมื่อ เข้าสู่เตาเผา จะเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ปริมาณคาร์บอนใน เถ้าส่วนนี้จึงน้อยสามารถละทิ้งได้ ส่วนปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในเถ้าส่วนที่สองจะสมมติให้ เท่ากับปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ใน เถ้าที่ระบายออกจากเตาผ่านท่อระบายเถ้า เนื่องจากเหตุผลที่สำคัญคือ ลักษณะการเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดมีการ เคลื่อนที่หมุนเวียนของเชื้อเพลิงภายในเบดที่ดี (Well Mixing)⁽³⁷⁾ ทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาใกล้เคียงกัน ดังนั้นไม่ว่าจะนำเถ้าออกจากเตาที่จุดใด ๆ ก็ตามจะมีปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ใน เถ้า เท่ากัน เสมอ สำหรับตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

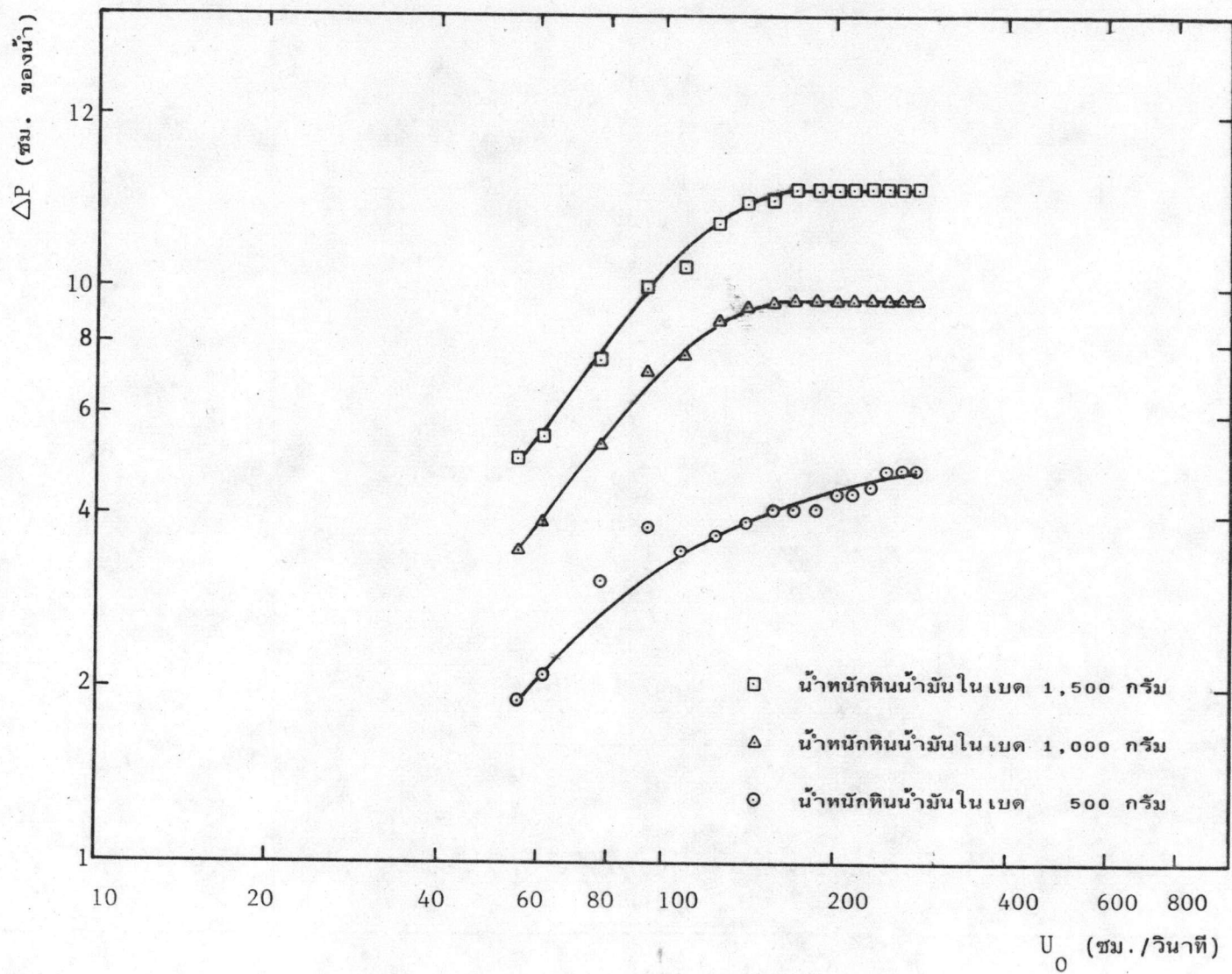
การหาประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนอาจสรุปได้ในรูปสมการ โดยใช้กรรมวิธีของ Linear Least Square หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้ กับความเร็วของอากาศ U_0 อุณหภูมิการเผาไหม้ T_5 และขนาดของหินน้ำมัน d_p จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 6.4 และ 6.5 ดังแสดงในสมการที่ 6.1

$$\hat{\eta}_c = 102.965 + 0.00282 U_0 - 0.00506 T_5 - 0.0235 d_p \dots 6.1$$

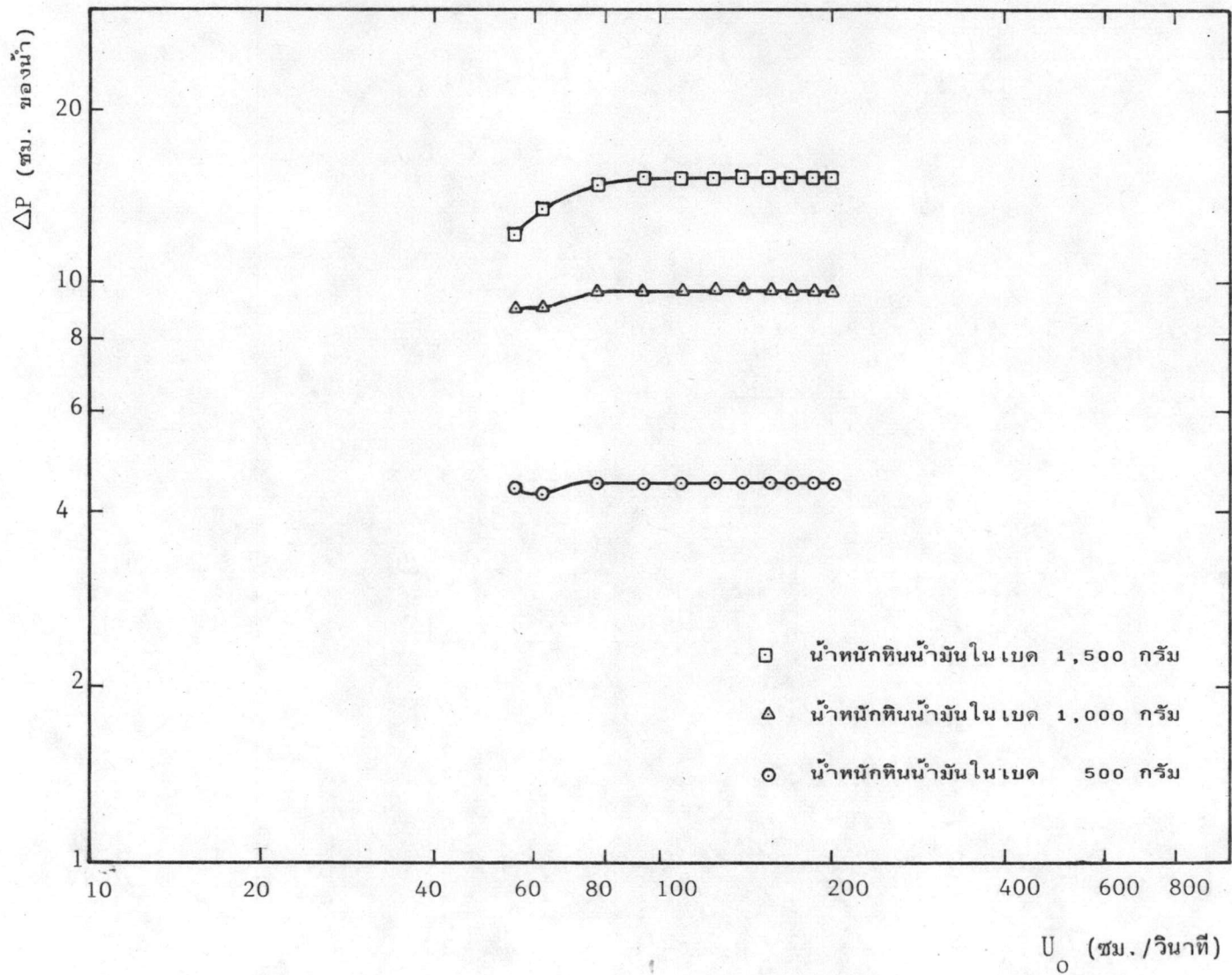
ช่วงความเร็วของอากาศ U_0 ในสมการที่ 6.1 มีค่าอยู่ระหว่าง 45-140 ซม./วินาที
สำหรับอุณหภูมิ T_5 มีค่าอยู่ระหว่าง 840-950 °ซ สำหรับผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ
การเผาไหม้ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6.6



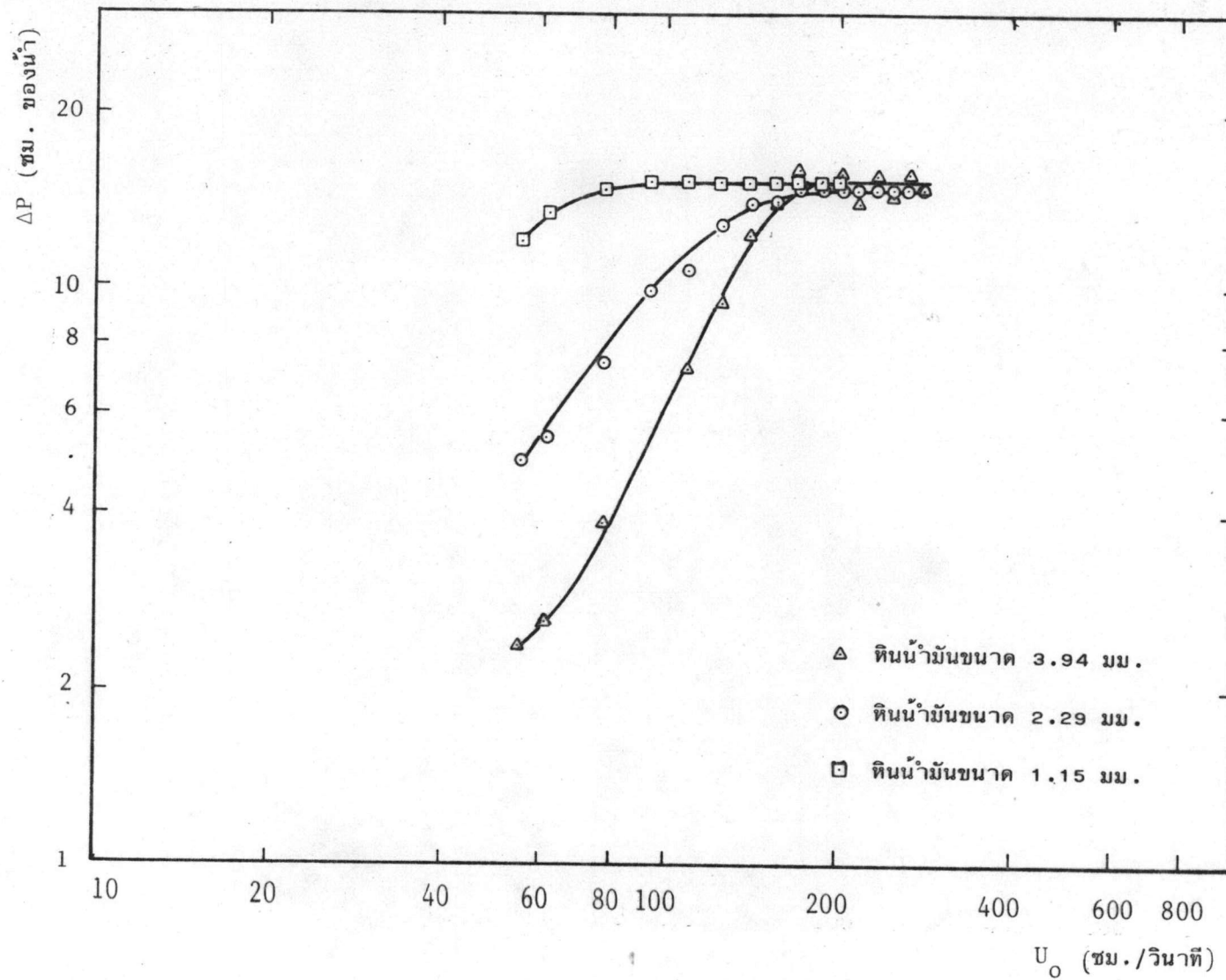
รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบด (ΔP) กับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบด (U_0) ของหินน้ำมันขนาด 3.94 มม.



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบด (ΔP) กับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบด (U_0) ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม.

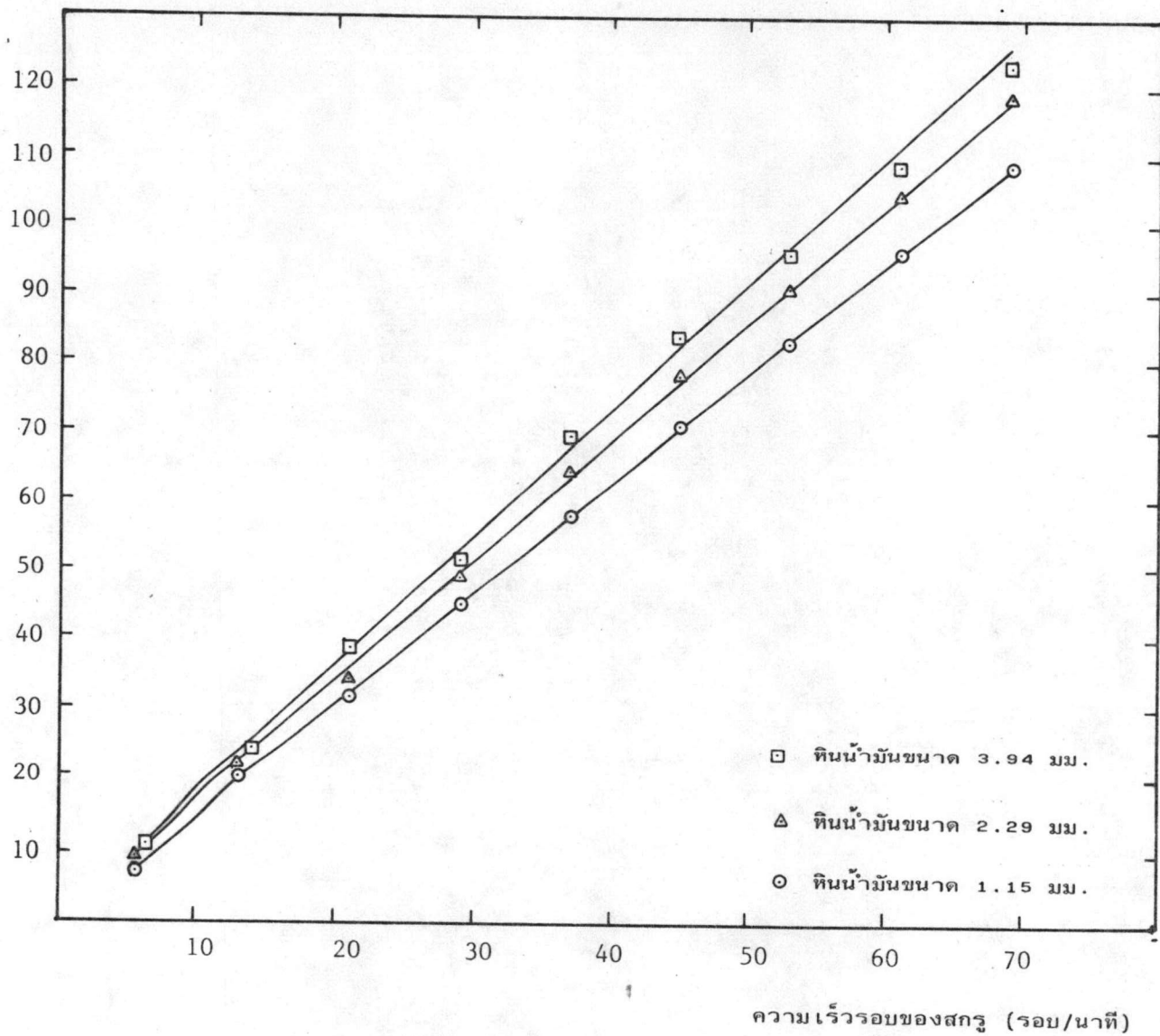


รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเขต (ΔP) กับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเขต (U_0) ของหินน้ำมันขนาด 1.15 มม.

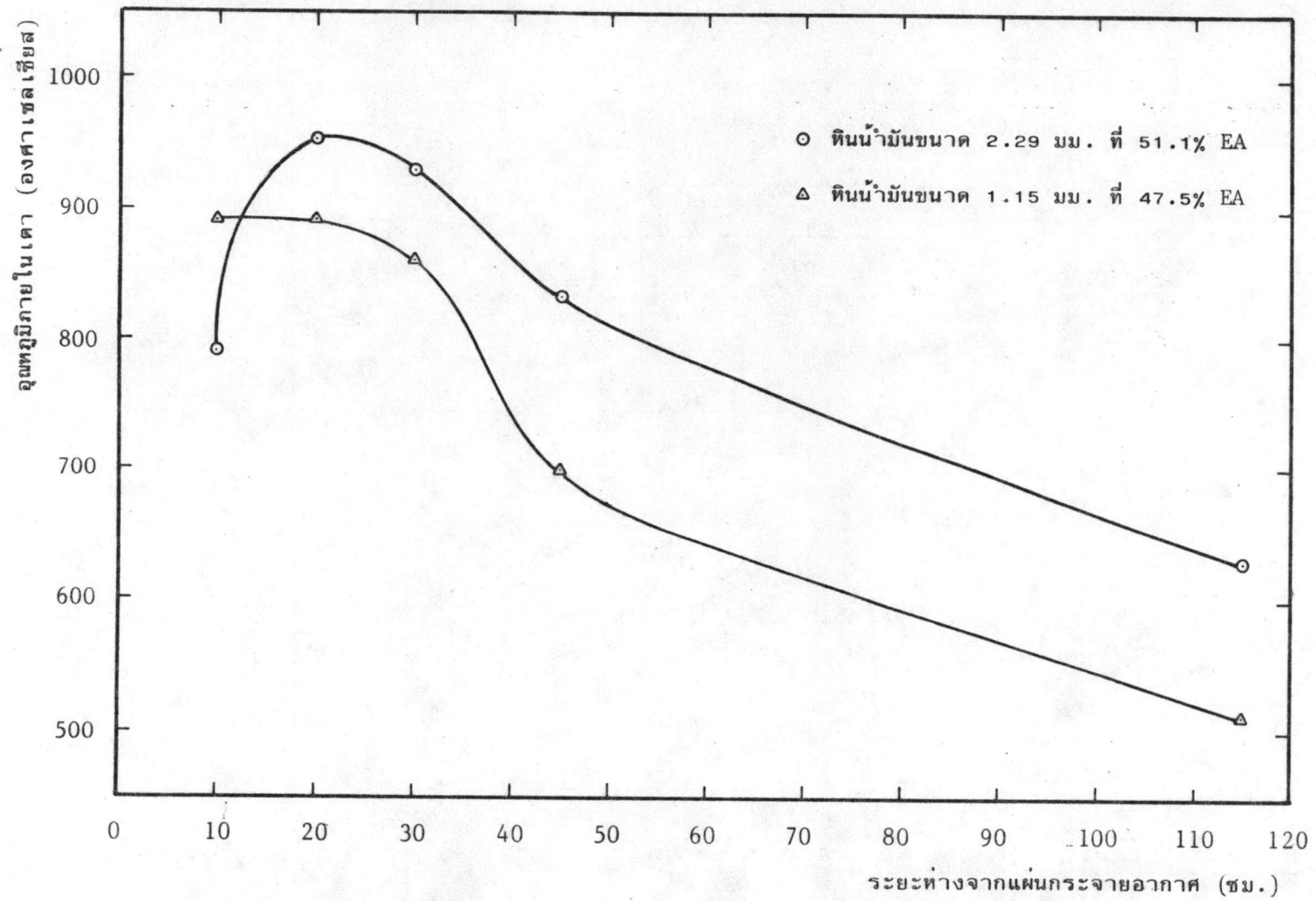


รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบด (ΔP) กับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบด (U_0) ของทินน้ำมันที่บรรจุในเบดหนัก 1,500 กรัม

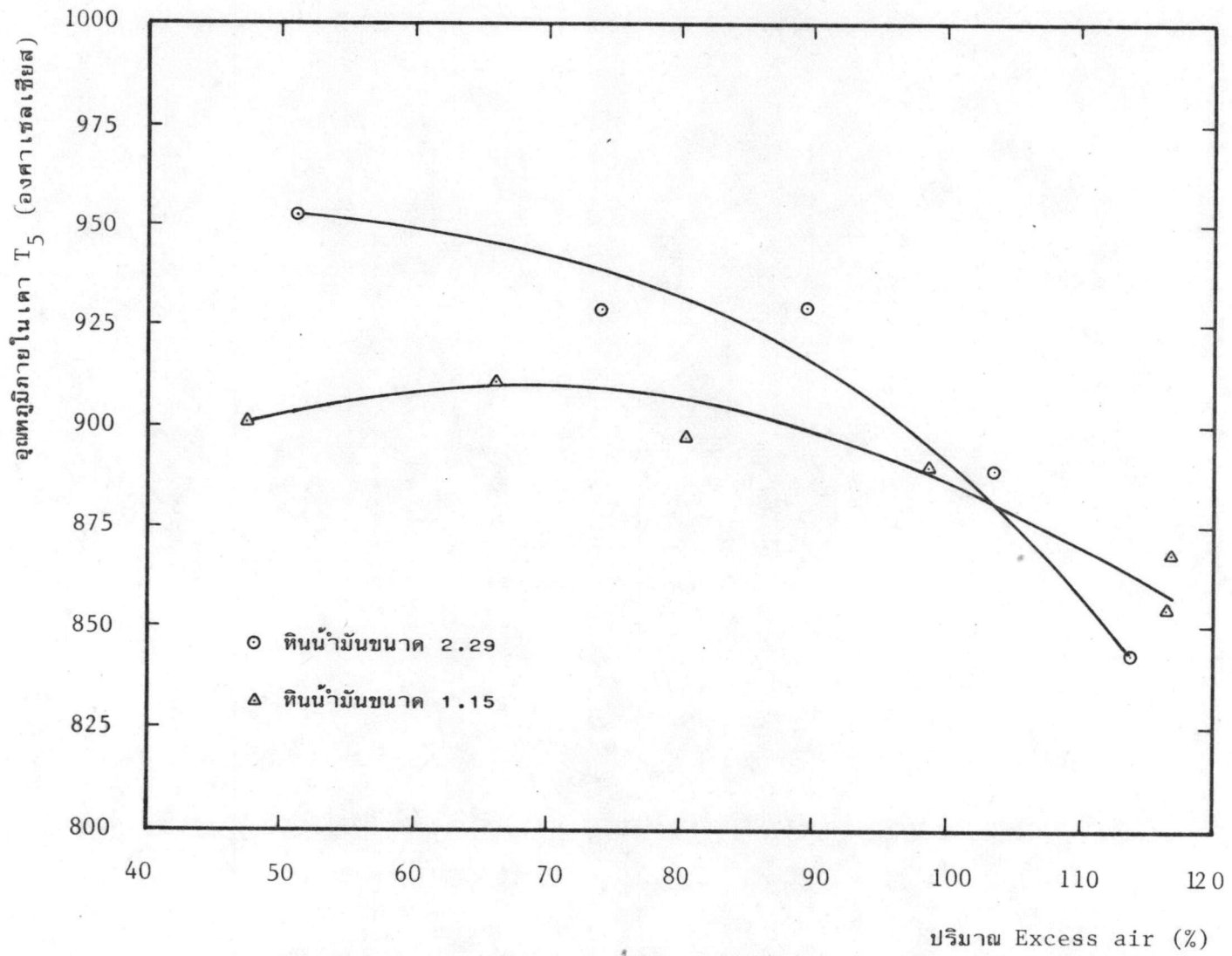
อัตราการป้อนหินน้ำมัน (กก./ชม.)



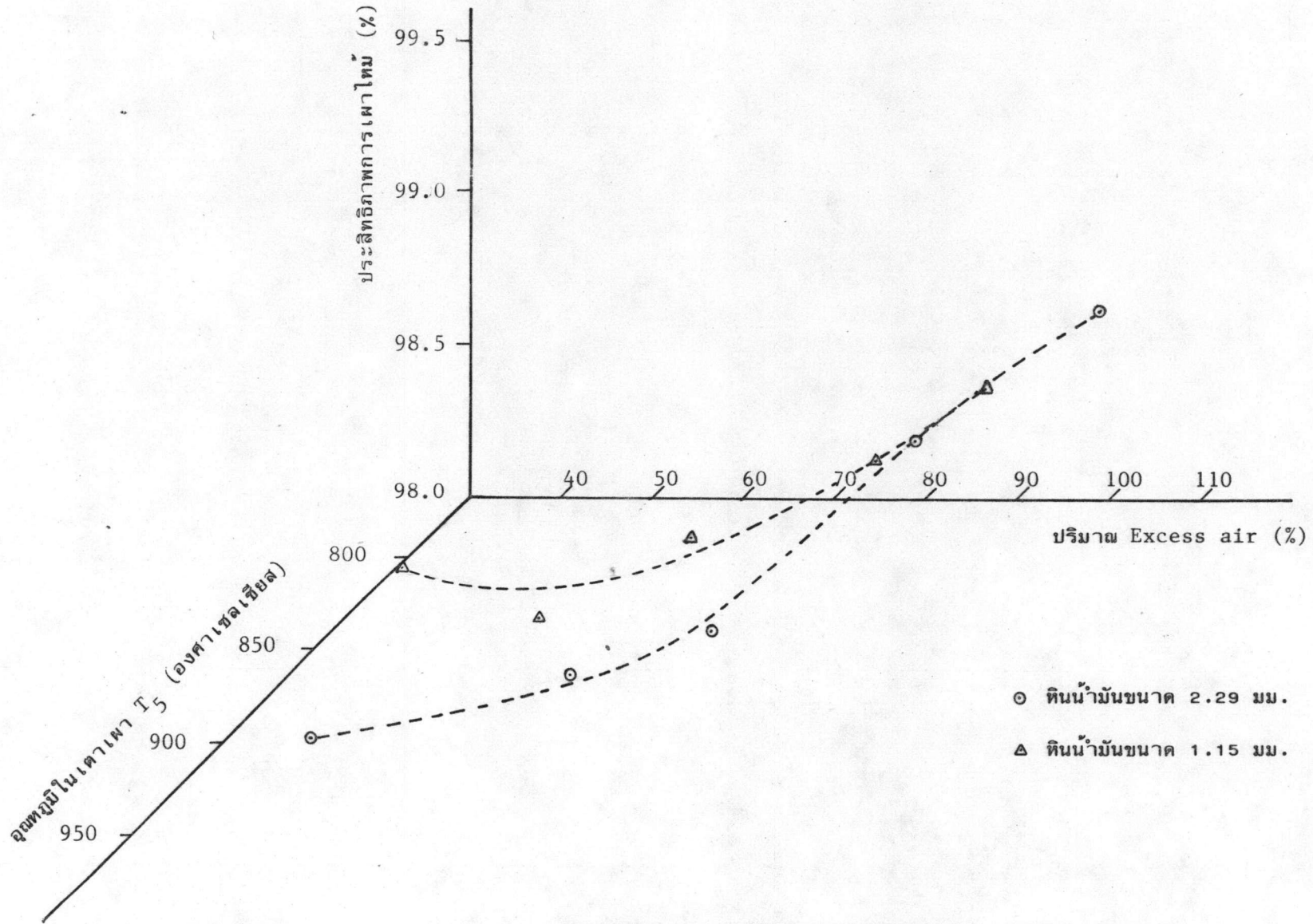
รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนหินน้ำมัน (กก./ชม.) กับความเร็วรอบของสกรู (รอบ/นาที)



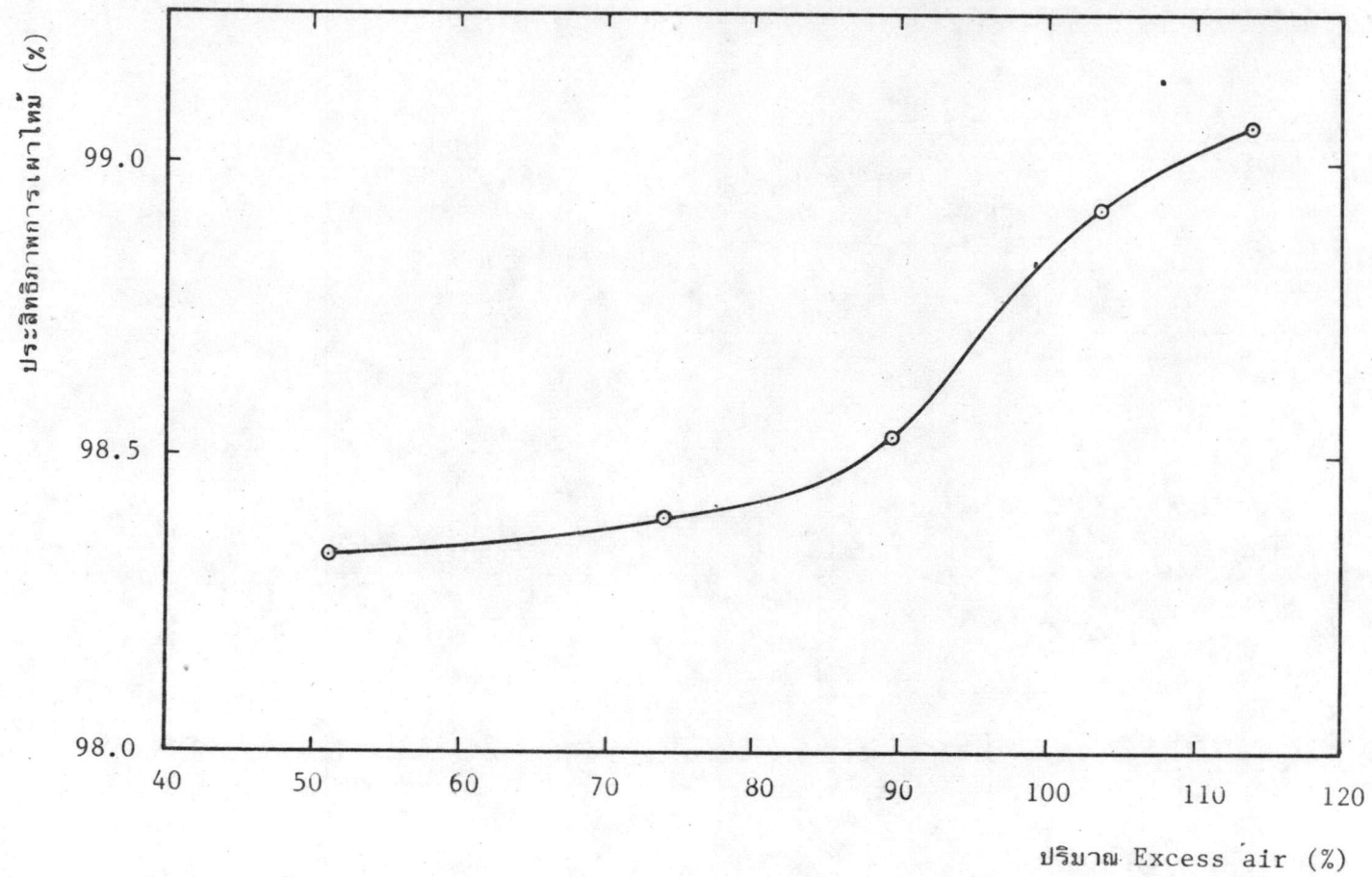
รูปที่ 6.6 แสดงอุณหภูมิกายในเตาที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศต่าง ๆ กัน



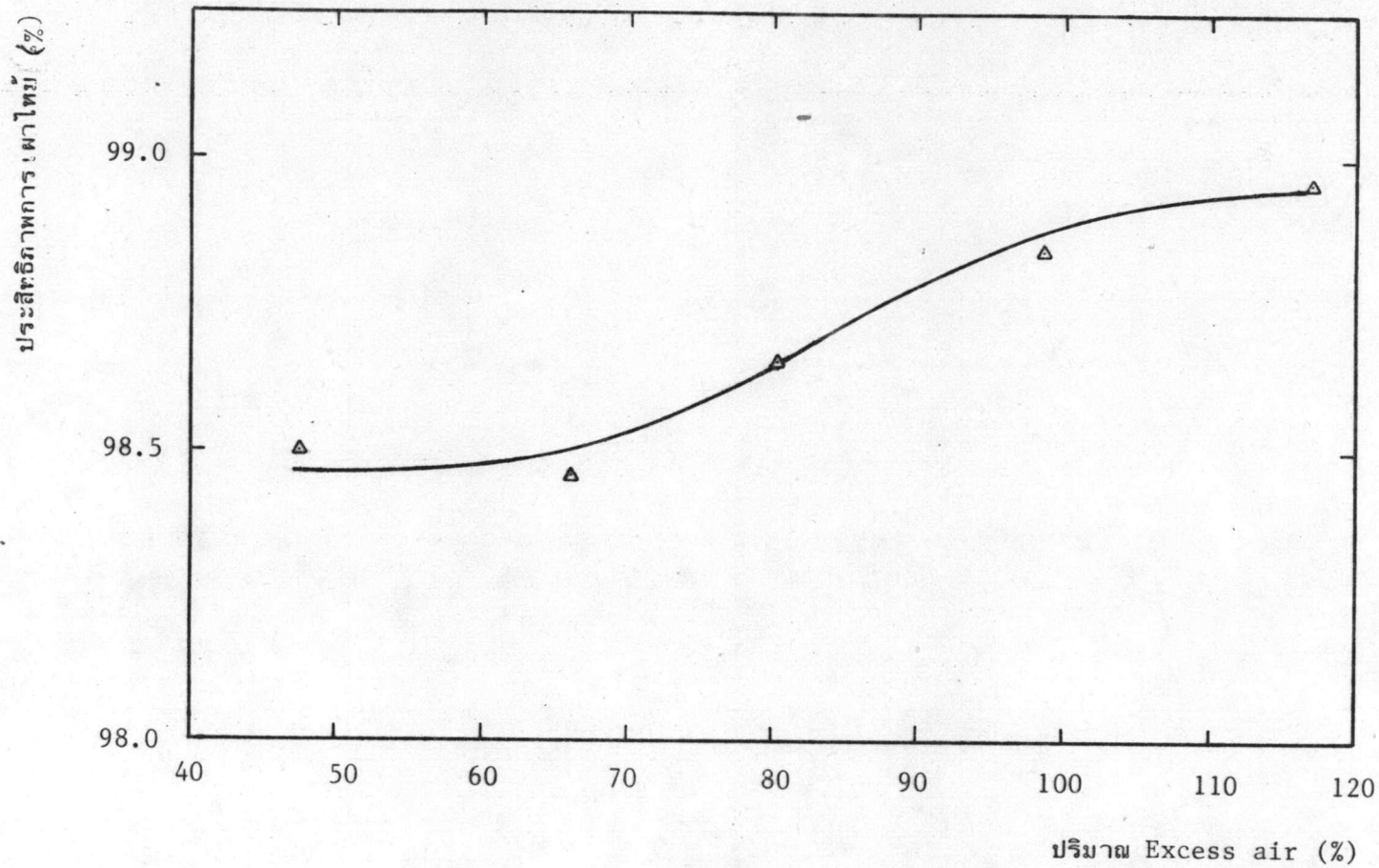
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาเผา T_5 กับปริมาณ Excess air



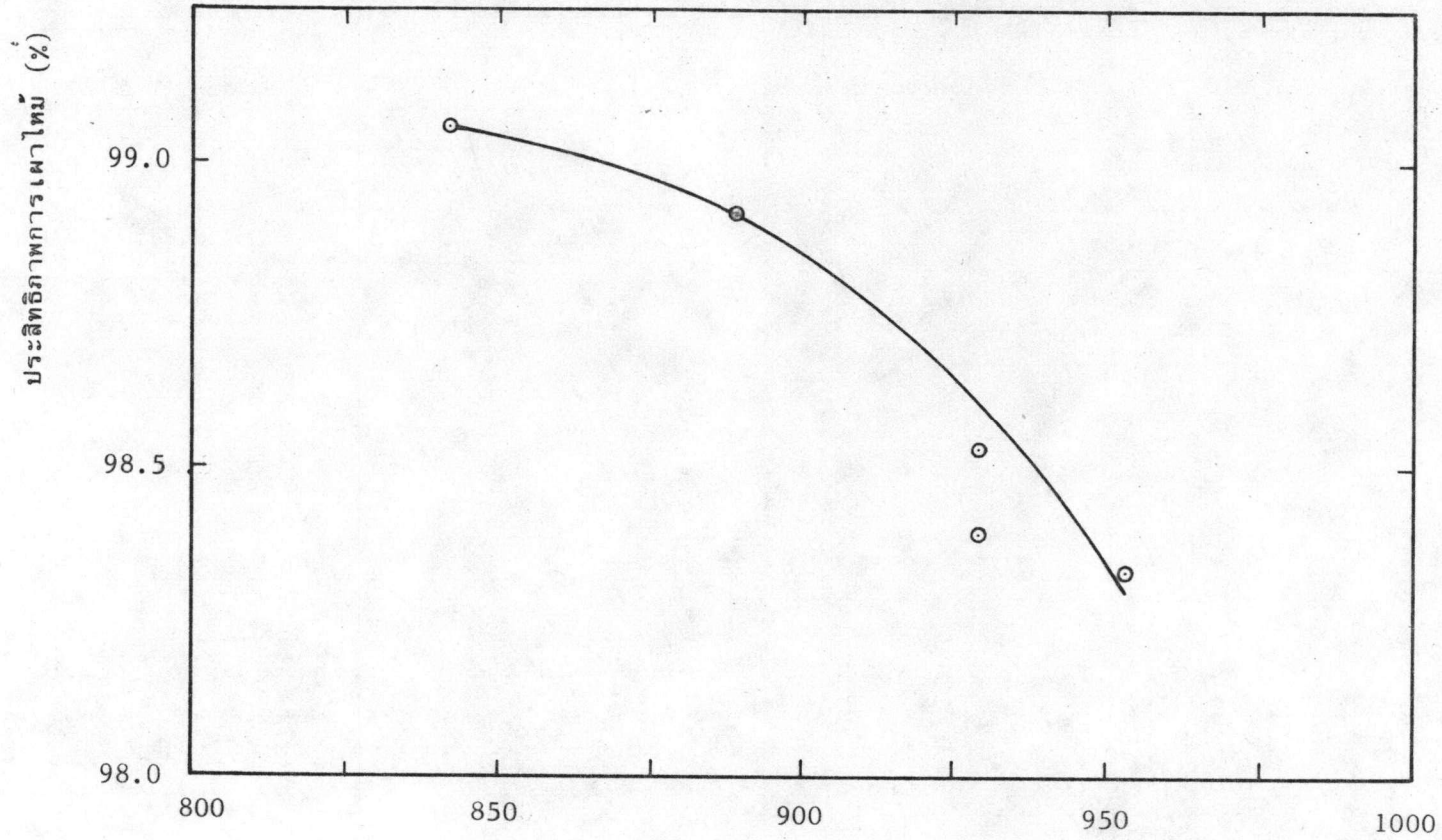
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน กับปริมาณ Excess air อุณหภูมิภายในเตาเผา T₅ และขนาดเฉลี่ยของเม็ดทินน้ำมัน



รูปที่ 6.9 แสดงภาพฉายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน กับปริมาณ Excess air ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม. จากรูปที่ 6.8

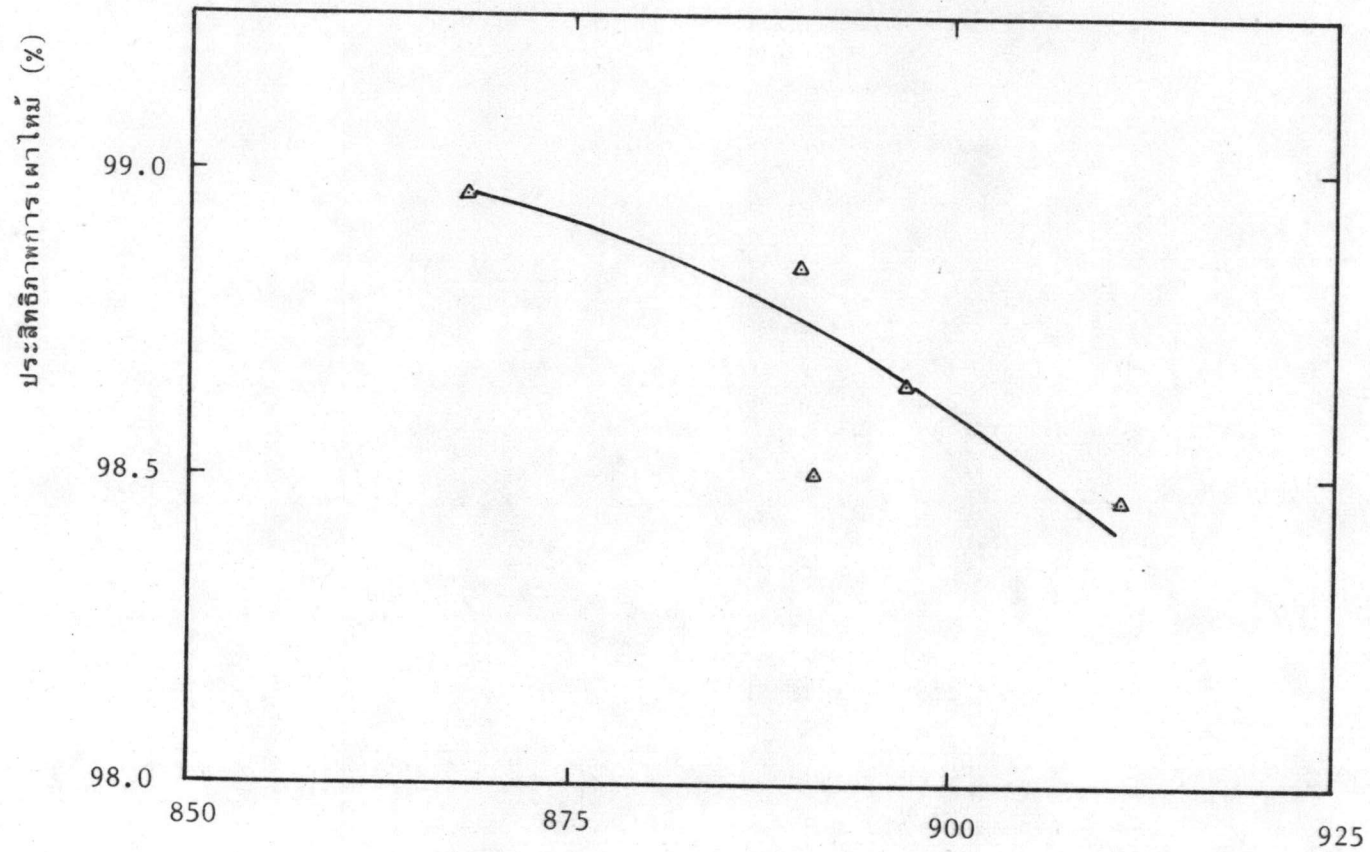


รูปที่ 6.10 แสดงภาพฉายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลการเผาไหม้คาร์บอน กับปริมาณ Excess air ของหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. จากรูปที่ 6.8



อุณหภูมิในเตา T₅ (องศาเซลเซียส)

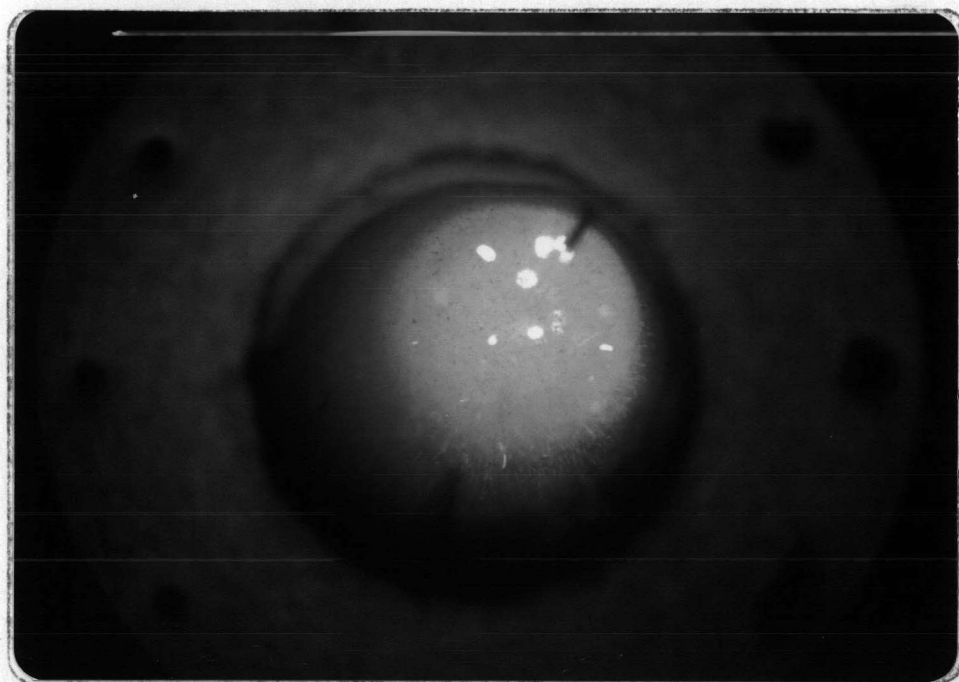
รูปที่ 6.11 แสดงภาพฉายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลการเผาไหม้คาร์บอน กับอุณหภูมิในเตา T₅ ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม. จากรูปที่ 6.8



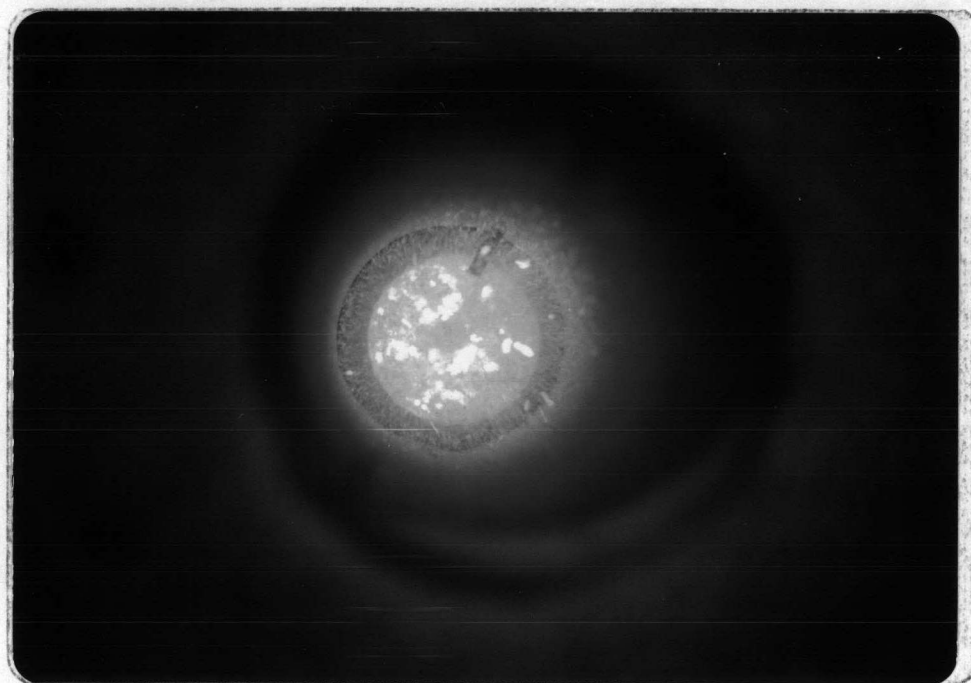
อุณหภูมิในเตา T₅ (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 6.12 แสดงภาพฉายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน กับอุณหภูมิในเตา

เผา T₅ ของหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. จากรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.13 แสดงภาพถ่ายหินน้ำมันขนาด 1.15 มม. ที่กำลังลุกไหม้ในเตาเผา
ฟลูอิดซ์เบดโดยมีปริมาณ Excess air 116.5 %



รูปที่ 6.14 แสดงภาพถ่ายการลุกไหม้ของหินน้ำมันซึ่งผสมกันระหว่างขนาด
3.94 มม. และ 1.15 มม.

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็ว U_{mf} ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

ขนาดหินน้ำมัน (มม.)	U_{mf} (ชม./วินาที)		ความแตกต่าง ^(ค) (%)
	การทดลอง	การคำนวณ ^(ง)	
3.94	155.0 ^(ก)	172.6	-11.3
2.29	126.7 ^(ก)	115.8	+ 8.6
1.15	65.5 ^(ข)	63.8	+ 2.6

(ก) ค่าที่ได้เป็นค่าความเร็ว U_{mf} เฉลี่ยจากผลการทดลอง เปลี่ยนน้ำหนักหินน้ำมันที่บรรจุใน
หอทดลอง 3 ครั้ง คือ 500, 1,000 และ 1,500 กรัม

(ข) ค่าที่ได้เป็นค่าความเร็ว U_{mf} ขณะบรรจุหินน้ำมันในหอทดลองหนัก 1,500 กรัม

(ค) เปอร์เซนต์ความแตกต่างใช้ค่าความเร็ว U_{mf} จากการทดลองเป็นค่าอ้างอิง

(ง) คำนวณจากสมการที่ 3.10

U_{mf} -ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบคขณะเริ่มฟลูอิดซ์

ตารางที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของหินน้ำมันแหล่งแม่สอดที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดของหินน้ำมัน (มม.)	วิเคราะห์อัลติเมท (ก)					วิเคราะห์พรอกซิเมท (ข)				SG ^(ค)	HV ^(ง) (แคลอรี/กรัม)
	C (% นน.)	H (% นน.)	N (% นน.)	S (% นน.)	O (% นน.)	A (% นน.)	M (% นน.)	VM (% นน.)	FC (% นน.)		
3.94	23.12	2.905	0.515	0.654	10.746	62.06	1.2	35.96	0.78	2.49	2266
2.29	21.585	2.74	0.595	0.483	11.307	63.29	1.65	34.87	0.19	2.36	2091
1.15	20.435	2.54	0.455	0.6486	11.861	64.06	1.64	32.75	1.55	2.52	1902

(ก) การวิเคราะห์ C, H และ N (dry basis) วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ S ใช้กรรมวิธีตามมาตรฐาน ASTM D3177-75

$$O = 100 - [C + H + N + S + A] \text{ (dry basis)}$$

(ข) การวิเคราะห์พรอกซิเมทใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM 3172-73

(ค) ใช้วิธีการแทนที่น้ำมันก๊าด

(ง) การหาค่าความร้อนของหินน้ำมัน วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C - คาร์บอน ; H - ไฮโดรเจน ; N - ไนโตรเจน ; O - ออกซิเจน ; A - ปริมาณเถ้า; M - ความชื้น

VM - สารระเหย; FC - คาร์บอนคงตัว; SG - ค่าความถ่วงจำเพาะ; HV - ค่าความร้อน

ตารางที่ 6.3 เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (\bar{d}_p) ของเม็ดหินน้ำมัน

ขนาดหินน้ำมัน	$\bar{d}_{p(1)}$ (มม.)	$\bar{d}_{p(2)}$ (มม.)	\bar{d}_p (มม.)
-4+6	3.95	3.94	3.945
-6+10	2.29	2.30	2.295
-10+20	1.18	1.13	1.15

หมายเหตุ (1) . (2) หมายถึง การทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.4 แสดงข้อมูลและผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหินน้ำมันขนาด 2.29 มม.

ที่อัตราการป้อนหินน้ำมัน 9.49 กก./ชม.

Q (Nm ³ /hr)	U _{oc} (cm/s)	EA (%)	(A/F) _a (Kg _a /Kg _f)	T ₅ (°C)	C _o (%)	F _o (Kg/hr)	A _{loss} (%)	η _c (%)
65	102	51.1	4.36	953	0.57	4.74	19.7	98.33
70	110	73.9	5.03	929	0.55	5.03	14.8	98.39
75	118	89.5	5.47	929	0.50	4.65	21.3	98.53
80	126	103.5	5.88	889	0.37	4.62	21.8	98.92
85	134	113.7	6.17	842	0.32	4.81	18.6	99.06

Q - อัตราการไหลของอากาศ; U_{oc} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เบดคืดที่อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตาเผา

EA - ปริมาณอากาศที่มากเกินพอ (%); (A/F)_a - อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงขณะเผาไหม้จริง

T₅ - อุณหภูมิภายในเบดที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 20 ซม. ; C_o - คาร์บอนที่เหลืออยู่ในเถ้าที่ระบายผ่านท่อระบายเถ้า

F_o - อัตราการไหลของเถ้าผ่านท่อระบาย; A_{loss} - เถ้าที่หลุดลอยจากเตาเผา ; η_c - ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ตารางที่ 6.5 แสดงข้อมูลและผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหินน้ำมันขนาด 1.15 มม.
ที่อัตราการป้อนหินน้ำมัน 7.69 กก./ชม.

Q (Nm ³ /hr)	U _{oc} (cm/s)	EA (%)	(A/F) _a (Kg _a /Kg _f)	T ₅ (°C)	C _o (%)	F _o (Kg/hr)	A _{loss} (%)	η _c (%)
30	47	47.5	3.95	891	0.48	4.65	4.0	98.50
35	55	66.0	4.45	911	0.49	4.59	5.3	98.46
40	62	80.4	4.83	897	0.43	4.26	12.1	98.65
45	71	98.6	5.32	890	0.37	4.38	9.6	98.84
50	78	116.9	5.81	868	0.33	4.31	11.0	98.96
55	86	116.5	5.80	854	0.49	4.11	15.2	98.46

- Q - อัตราการไหลของอากาศ ; U_{oc} - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน เบดคิดที่อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตาเผา
EA - ปริมาณอากาศที่มากเกินพอ(%); (A/F)_a - อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงขณะเผาไหม้จริง
T₅ - อุณหภูมิภายในเบดที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 20 ซม.; C_o - คาร์บอนที่เหลืออยู่ในเถ้าที่ระบายผ่านท่อระบายเถ้า
F_o - อัตราการไหลของเถ้าผ่านท่อระบาย; A_{loss} - เถ้าที่หลุดลอยจากเตาเผา; η_c - ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากการทดลอง
และการคำนวณ

U_o (cm/sec)	T_5 ($^{\circ}$ C)	\bar{d}_p (mm.)	η_c %	$\hat{\eta}_c$ %	difference %
102	953	2.29	98.33	98.37	0.04
110	929	2.29	98.39	98.52	0.13
118	929	2.29	98.53	98.54	0.01
126	889	2.29	98.92	98.76	-0.16
134	842	2.29	99.06	99.03	-0.03
47	891	1.15	98.50	98.56	0.06
55	911	1.15	98.46	98.48	0.02
62	897	1.15	98.65	98.57	-0.08
71	890	1.15	98.84	98.63	-0.21
78	868	1.15	98.96	98.76	-0.20
86	854	1.15	98.46	98.86	0.41

- U_o - ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบดคืดที่อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตาเผา
 T_5 - อุณหภูมิภายในเบดที่ระยะห่างจากแผ่นกระจายอากาศ 20 ซม.
 \bar{d}_p - เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดหินน้ำมัน
 η_c - ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนที่ได้จากการทดลอง
 $\hat{\eta}_c$ - ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 6.1