



บทที่ 4

ผลการทดสอบสมรรถนะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้น

ในบทนี้จะเป็นการแสดงและอภิปรายผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่อง-แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ ซึ่งมีน้ำเป็นของเหลวใช้งาน โดยดัดแปลงมาจากหม้อน้ำรถยนต์จำนวน 2 แผง ต่อถึงกันอย่างครบวงจรที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างลมร้อนและลมเย็นในอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของการทดสอบก็เพื่อที่จะเข้าใจถึงขีดความสามารถและปัญหาของเครื่องแลกเปลี่ยน-ความร้อนที่เราได้สร้างขึ้น เพื่อจะได้นำมาแก้ไขและพัฒนาหรือเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

4.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ

ตารางที่ 4.1 ได้สรุปเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความ-ร้อนแบบฮีทไปป์ชนิดครบวงจร

ตัวแปร	ช่วงการทดสอบ
เปอร์เซ็นต์ของของไหลใช้งาน	40, 55, 70, 90 % (ของพื้นที่ส่วนที่รับความร้อนในแผงการระเหย)
อัตราการไหลของลมร้อน*	2-6 เมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของลมเย็น*	2-6 เมตรต่อวินาที
อุณหภูมิขาเข้าของลมร้อน	50, 60, 70, 80, 90, 100 °ซ

* อัตราการไหลจะใช้ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 40,000 ถึง 160,000

ในที่นี้ใช้ Superficial Reynolds Number ซึ่งนิยามไว้ดังนี้คือ

$$Re = \rho V D_o / \mu \quad (4.1)$$

โดยที่ D_o = equivalent diameter = $4A/L$
 = 4(พ.ท.หน้าตัดของแผงหม้อน้ำ)/(เส้นรอบรูปของแผงหม้อน้ำ)
 = $4(0.4 \times 0.6) / 2(0.4 + 0.6) = 0.48$ เมตร

4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง

รูปที่ 4.1-4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านการระเหย (Re_u) ที่ทดลองได้ โดยในแต่ละรูปมีอุณหภูมิของอากาศร้อนเข้า 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และมีปริมาณของไหลใช้งาน 40, 55, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ด้านการระเหย ตามลำดับ ส่วนค่าตัวเลขเรย์โนลด์ทางการควบแน่นจะมีค่าอยู่ในช่วง 80,000-112,500

รูปที่ 4.5-4.8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านการควบแน่น (Re_c) ที่ทดลองได้ โดยมีอุณหภูมิของอากาศร้อนเข้าในแต่ละรูปที่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และในแต่ละรูปมีปริมาณของของไหลใช้งานต่างๆกัน ได้แก่ 40, 55, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของสายลมร้อนมีค่าเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เราสร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก ดังเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 4.1 ถึง 4.8 และรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งพล็อตระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับอัตราการไหลของลมภายนอกในช่วงการระเหยและในช่วงการควบแน่น ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่าของอุณหภูมิของลมร้อนมีค่า 50 องศาเซลเซียส สาเหตุของการลดลงอย่างมากของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม เป็นเพราะในการสร้างสุญญากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเราอาศัย Water ejector ซึ่งไม่สามารถสร้างสุญญากาศได้ต่ำกว่า 30 มม.ปรอท ดังนั้นจึงอาจยังมีอากาศค้างอยู่ภายในระบบ ทำให้รบกวนต่อการ

ไหลของไอ เพราะทำให้ผลต่างของความดันไอระหว่างช่วงการควบแน่นและการระเหยมีค่าต่ำลง การไหลของไวจึงมีค่าลดลงด้วยจนแทบจะไม่มีไอละเลย แต่เมื่อลมร้อนในแผงล่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความดันภายในแผงการระเหยก็จะมีค่าสูงขึ้น ผลต่างของความดันระหว่างแผงทั้งสองก็จะมีค่าสูงขึ้นมากพอ ไอน้ำที่เกิดขึ้นก็จะสามารถไหลไปได้สะดวกขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าสูงขึ้นด้วยเหตุนี้ ในการวิเคราะห์ต่อไปเราจะไม่นำข้อมูลที่อุณหภูมิขาเข้าของสายร้อนต่ำกว่า 60 °C มาพิจารณา อนึ่ง เราอาจสรุปได้ว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นไม่ควรใช้งานกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส

4.2.1 ผลของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 4.1-4.4 จะเห็นได้ว่า ที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55 และ 90 เปอร์เซ็นต์นั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.2 และ 4.4) กราฟรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของกรณีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณของไหลใช้งานค่าแรกที่ได้ทำการทดลอง เหตุที่รูปที่ 4.3 ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ารูปที่ 4.2 และ 4.4 เป็นเพราะในการทดลองเก็บข้อมูลที่ระดับของไหลใช้งานนี้ ได้ทำการทดลองเก็บข้อมูล ไม่มีการดูดอากาศออกอีกเลยในแต่ละวันหลังจากทำการสร้างแล้ว สาเหตุของการลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องลดลงตามเวลาผ่านไป เนื่องจากเราได้พบจุดรั่วซึมของอากาศเข้าสู่ระบบ โดยสังเกตพบฟองอากาศผุดขึ้นให้เห็นที่แท่งแก้วด้านข้างที่ใช้เพื่อดูระดับของของไหลใช้งาน จากปัญหาดังกล่าวในการทำการทดลองกับระดับของไหลใช้งานอื่นๆ เราจึงทำการดูดอากาศที่อาจจะรั่วซึมเข้าสู่ระบบทุกวันก่อนการทำการทดลอง โดยจะทำการดูดอากาศออกเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง อนึ่ง กราฟในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีปริมาณของของไหลใช้งานเพียง 40 เปอร์เซ็นต์ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น ในระหว่างการทดลอง ณ จุดนี้ จะสังเกตพบว่าระดับของของไหลใช้งานในแผงด้านการระเหยมีการเดือดอย่างรุนแรง จนทำให้ไม่สามารถบอกระดับของของไหลใช้งานที่เหลืออยู่น้อยในแผงล่างได้ชัดเจนจากท่อวัดระดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5-4.8 ซึ่งแสดงผลของตัวเลขเรย์โนลด์ ด้านเย็น (Re_c) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน จะเห็นได้ชัดเจนกว่ากรณีของตัวเลข

เรย์โนลด์ด้านร้อน (Re_{in}) ว่าเมื่อปริมาณของไหลใช้งานเปลี่ยนไปจะมีจุดที่ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนเริ่มลงในขณะที่เพียงค่าเรย์โนลด์ด้านเย็น ทั้งนี้เนื่องจากในแง่ด้านการควบแน่น การกระจายตัวของไอในแผงจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นอย่างมาก จากรูปแบบของเครื่องที่เราสร้างขึ้น ท่อเข้าของไอจะอยู่ในตำแหน่งด้านข้างของท่อรวมดังแสดงไว้ในอุปกรณ์การทดลองรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าจากตำแหน่งดังกล่าว การกระจายของไอในแผงด้านการควบแน่นจะไม่ดีนัก ไอส่วนใหญ่จะเข้าสู่ท่อที่ใกล้ที่สุดก่อน ทำให้ท่อที่อยู่ไกลออกไปจากท่อไอเข้ามีไอไปถึน้อยจึงทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพเมื่อเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นถึงจุดจุดหนึ่งค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของทั้งแผงจึงลดลง เพราะไอที่มาจากแผงการระเหยจะถูกควบแน่นหมดในช่วงต้นๆ ส่วนท่อที่ไกลออกไปแทบจะไม่ได้ทำงาน นั่นคือ พื้นที่ในการถ่ายเทเชิงประสิทธิผลมีค่าลดลงนั่นเอง

4.2.2 ผลของปริมาณของของไหลใช้งานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

จากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อปริมาณของไหลใช้งานในเครื่องมีค่าเพิ่มขึ้น การลดลงของอัตราการถ่ายเทความร้อนในกรณีของลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งพบเห็นในกรณีของปริมาณของไหลใช้งานต่ำกว่า 70 % จะไม่เห็นในกรณีปริมาณของไหลใช้งาน 90 % ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากการที่เมื่อในแผงช่วงการระเหยมีระดับสูงมาก จะมีโอกาสเกิดการพาหวนน้ำไปกัยไอไปสู่ช่วงการควบแน่นมากขึ้นด้วย ทำให้การกระจายของไอในแผงการควบแน่นดีขึ้น เนื่องจากสมรรถนะการควบแน่นของแต่ละท่อในแผงบนมีน้อยลง ไอจึงกระจายไปเข้าทั่วทุกท่อ

จากที่กล่าวมานี้จึงอาจสรุปได้ว่า ช่วงของปริมาณของไหลใช้งานที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 55-90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ควรจะแก้ไขปัญหการกระจายไม่ดีของไอในแผงบนดังได้เสนอแนะในหัวข้อ 5.3

4.3 ผลที่อัตราการไหลของของไหลภายนอกมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของไหลภายนอกด้านการระเหยกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง จาก

รูป 4.9 จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านด้านการระเหยเพิ่มขึ้นในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 40,000-160,000 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (UA) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของลมร้อนด้านนอกที่เปลี่ยนไป เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่ออัตราการไหลของของไหลภายนอกสูงขึ้น แผ่นฟิล์มด้านนอกซึ่งเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญจะบางลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม มีค่าสูงขึ้น

ในทำนองเดียวกันรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไหลภายนอกด้านการควบแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ทดลองได้ โดยมีค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นอยู่ในช่วง 40,000-160,000 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม (UA) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหลภายนอกเช่นกัน

4.4 ผลที่ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมมีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

4.4.1 ผลของผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม $(\Delta T)_{lm}$ ต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q)

จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเมื่อผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างของไหล 2 สายสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$Q = UAF(\Delta T)_{lm} \quad (4.2)$$

โดยในที่นี้

- U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
- A = พื้นที่ของผิวของการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- F = correction factor
- $(\Delta T)_{lm}$ = ผลต่างของอุณหภูมิ ในที่นี้จะใช้ผลต่างของอุณหภูมิเชิงลอการิทึมสำหรับการไหลแบบสวนทาง

จากสมการข้างต้น ในกรณีที่ค่าของ U , A และ F เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT)_{ln} เพิ่มขึ้น แต่จากกราฟรูปที่ 4.11-4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิลอการิทึมกับอัตราการถ่ายเทความร้อน จะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงนั่นคือ ไม่เป็นกำลังที่หนึ่งของผลต่างของอุณหภูมิลอการิทึม แต่จะเป็นฟังก์ชันของผลต่างของอุณหภูมิลอการิทึมยกกำลัง a จากการหาค่าความชันของเส้นตรงในรูป 4.11-4.14 พบว่าค่าอยู่ระหว่าง $1.0835 < a < 1.3862$ ที่สภาวะการทดลอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไหลใช้งานในแต่ละกรณี (ดูตารางที่ 4.3)

4.4.2 ผลที่ผลต่างอุณหภูมิลอการิทึมมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

จากสมการที่ 4.2 และผลการทดลองในรูป 4.11-4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Q เป็นฟังก์ชันของ $(\Delta T)_{ln}$ ยกกำลัง a โดยที่ a มีค่าประมาณ 1.0835 ถึง 1.3862 เราอาจสรุปได้ว่า เพื่อให้สมการ 4.2 ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นจริง ค่าของ U ควรจะเป็นฟังก์ชันของ $(\Delta T)_{ln}$ ยกกำลัง $(a-1) = 0.0835$ ถึง 0.3862 เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว เราได้พล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง UA กับ $(\Delta T)_{ln}$ ซึ่งได้จากการทดลองไว้ในรูปที่ 4.15-4.18 จะเห็นได้ว่า UA เป็นฟังก์ชันของ $(\Delta T)_{ln}$ ยกกำลัง 0.0835 ถึง 0.3862 ซึ่งตรงกับผลการวิเคราะห์ที่ได้ไว้ข้างต้น (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไหลใช้งานในแต่ละกรณีเช่นกัน)

สาเหตุที่ในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ ค่าของ U นั่นคือ UA ไม่เป็นค่าคงที่แต่ขึ้นกับค่าของ $(\Delta T)_{ln}$ ก็เพราะว่า อัตราการไหลของไอของของเหลวใช้งานในฮีทไปป์จะขึ้นกับผลต่างของความดันไอระหว่างช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น ซึ่งผลต่างดังกล่าวจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิลอการิทึมระหว่างช่วงดังกล่าว นอกจากนี้ถ้าเราให้อุณหภูมิด้านหนึ่ง (เช่นช่วงการควบแน่น) มีค่าคงที่ การที่ $(\Delta T)_{ln}$ มีค่าโตขึ้น หมายความว่า อุณหภูมิของช่วงการระเหยมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น อัตราการระเหยของของไหลใช้งานก็ย่อมสูงขึ้นด้วย เหตุผลต่างดังกล่าวนี้ช่วยอธิบายว่า ถ้าไปค่าของ U หรือ UA จึงเพิ่มขึ้นเมื่อ $(\Delta T)_{ln}$ ของระบบมีค่าสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้มีรายงานโดยนักวิจัยผู้อื่นเช่นกัน (42)

4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่สร้างขึ้น

ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องที่สร้างขึ้นกับของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่นๆ ในกรณีที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซที่ความดันบรรยากาศ

จากการวัดขนาดของท่อและครีป เพื่อคำนวณหาพื้นที่ถ่ายเททั้งหมดของแต่ละแผงของเครื่องที่สร้างขึ้น พบว่ามีพื้นที่รวม (แต่ละแผง) ประมาณ 11 ตารางเมตร ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่ส่วนของท่อ 0.9 ตารางเมตร และพื้นที่ส่วนของครีปประมาณ 9.8 ตารางเมตร จากผลการทดลองในกรณีของปริมาณของไหลใช้งานภายใน 90 เปอร์เซ็นต์พบว่า ค่าของ UA จะอยู่ในช่วง 27-63 วัตต์/°ซ ดังนั้น ค่าของ U ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะอยู่ในช่วง 35-85 วัตต์/ตารางเมตร-°ซ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆซึ่งใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซ-ก๊าซในทำนองเดียวกับอุปกรณ์ของเรา จะเห็นได้ว่า ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่เราได้สร้างขึ้นจะมีค่าสูงกว่าแบบอื่นๆที่ได้มีผู้ประเมินไว้ (50) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงข้อดีในแง่อื่น อันได้แก่ ความดันสูญเสีย การบำรุงรักษา พลังงานเสริม การรั่วซึมของของไหล พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาณหนึ่งหน่วยและราคา จะเห็นว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เราสร้างขึ้นจะมีข้อได้เปรียบเหนือกว่ามาก อนึ่งข้อสรุปในทำนองเดียวกันมีการเสนอไว้โดย Basilius

4.6 การหาสัมพันธภาพเพื่อใช้ทำนายค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วๆไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของ Nu จะเป็นฟังก์ชันของ Re และ Pr ดังนั้นได้มีผู้วิจัยอื่น (41) เสนอสหสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องไว้ในรูปแบบ

$$Nu = cRe^n Pr^{1/2} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมโดยประมาณสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆในกรณีถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่อากาศที่ความดัน 1 บาร์ (50)

ชนิด	U, W/m ² -K
1. Shell-and-tube heat exchanger	5-35
2. Double-pipe heat exchanger	10-35
3. Matrix heat exchanger	10-35

แต่ผลการทดลองของเราได้แสดงว่า ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องยังขึ้นกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมและปริมาณมวลของไหลใช้งานในแต่ละกรณีด้วย (ดูหัวข้อ 4.4.2) ดังนั้น เราอาจหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในรูปการทดลองดังนี้

$$UA = cRe^b (\Delta T)_{lm}^m Pr^n \quad (4.4)$$

เนื่องจากค่าของแพรนด์ตลของอากาศเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากในการทดลองนี้ ดังนั้น เราจึงจะหาความสัมพันธ์ในรูปของ

$$UA = cRe^{*b} (\Delta T)_{lm}^m \quad (4.5)$$

โดยความสัมพันธ์ที่จะใช้ได้กับกรณีของของไหลภายนอกเป็นอากาศและใช้หน่วยตามที่กำหนดไว้เท่านั้น ในที่นี้

$$Re^* = \sqrt{Re_c * Re_n} \quad (4.6)$$

จากกราฟรูปที่ 4.11-4.14 เราหาค่าของความชันของกราฟได้ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าของความชันของความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมกับอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

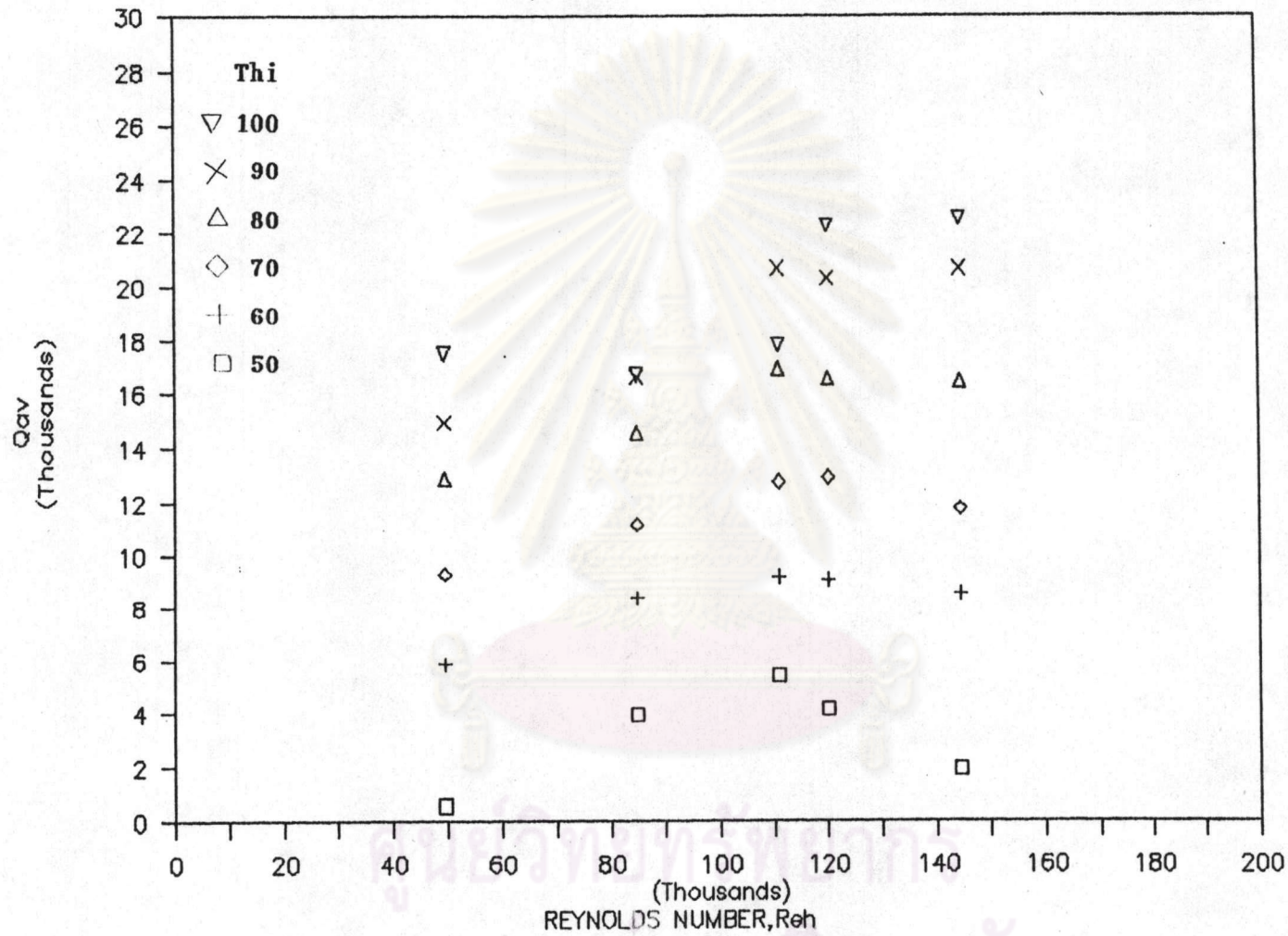
ปริมาณของไหลใช้งาน (%)	40	55	70	90
ความชันของ Q vs $(\Delta T)_{lm}$	1.0835	1.1768	1.3664	1.3862
ความชันของ UA vs $(\Delta T)_{lm}$	0.0835	0.1768	0.3664	0.3862

ตัวเลขยกกำลัง a ในสมการ 4.5 คือค่าของความชันของ UA กับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม ในตารางที่ 4.3

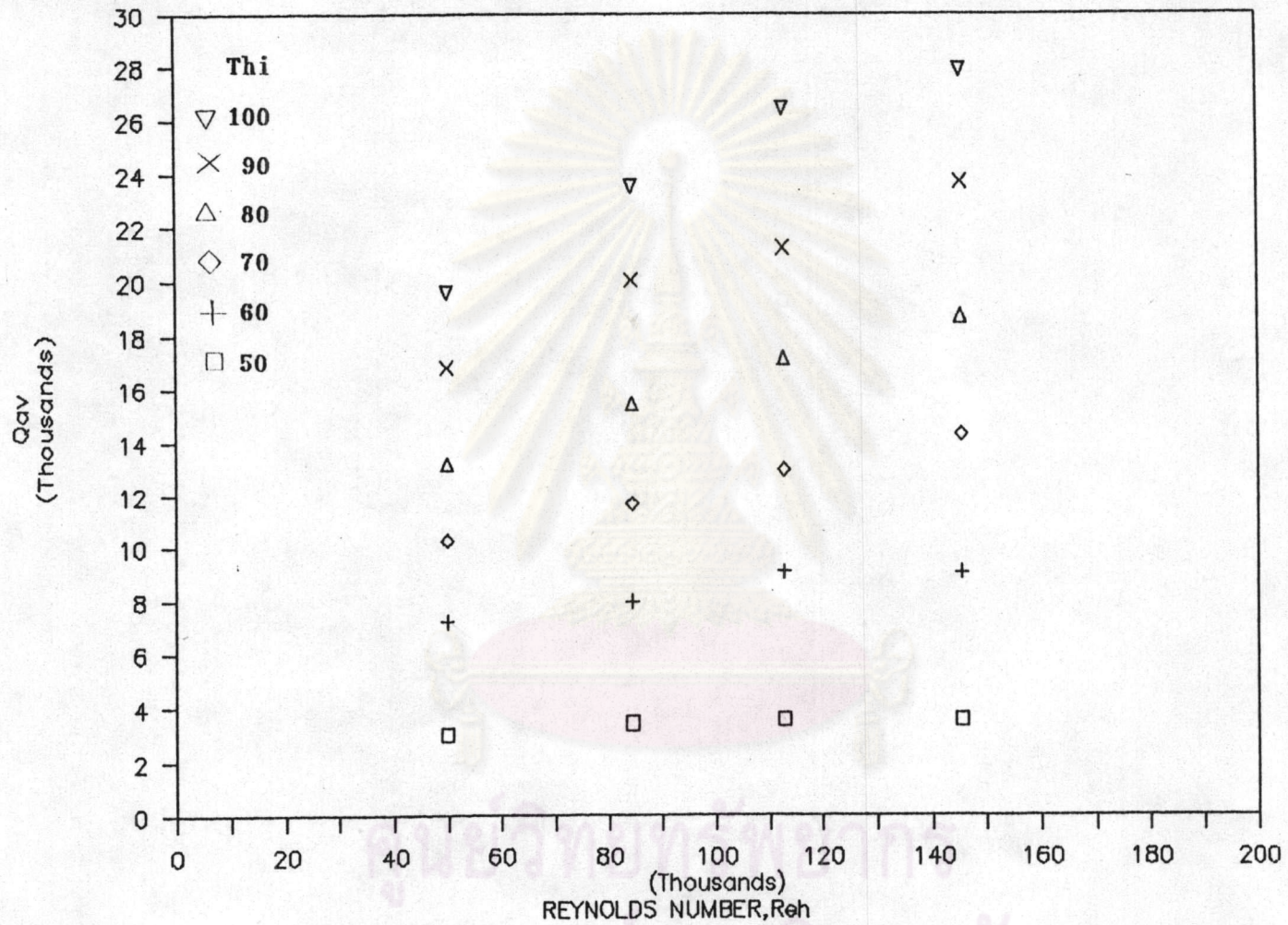
กราฟรูปที่ 4.19-4.22 ได้จากการพล็อตระหว่างค่าของ $\log UA/(\Delta T)_{lm}^a$ กับค่าของ $\log Re^*$ ค่าของจุดตัดและความชันดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 หาได้จากการทำ linear regression เช่นกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าความชันและจุดตัดแกนของความสัมพันธ์ $\log Re^*$ กับ $\log(UA/(\Delta T)_{lm}^a)$ สำหรับกรณีปริมาณของไหลใช้งานต่างๆ

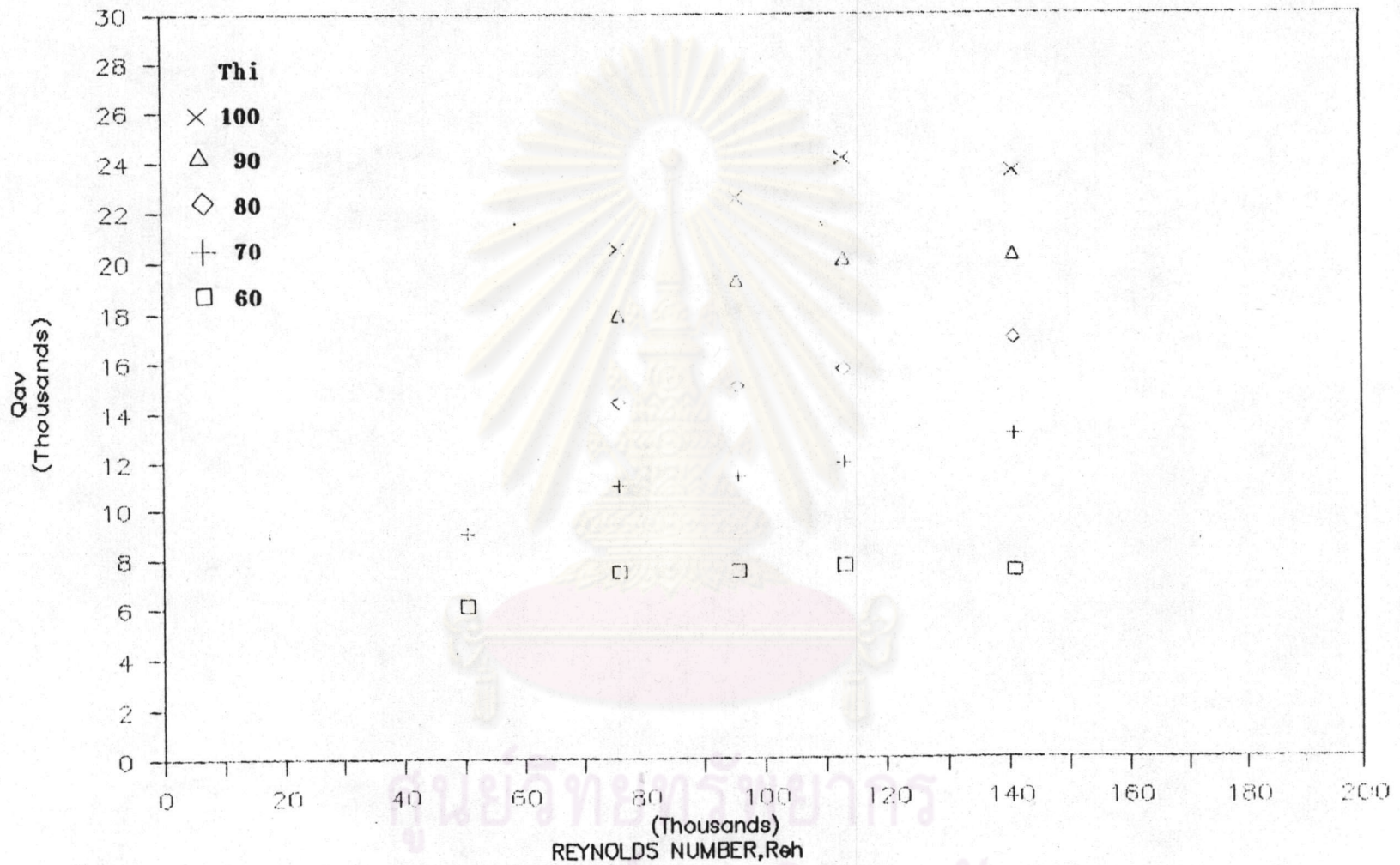
ปริมาณของไหลใช้งาน (%)	40	55	70	90
ความชัน (b)	0.1153	0.2654	0.1263	0.4581
จุดตัด ($\ln c$)	1.9437	1.1461	1.5472	-0.1470



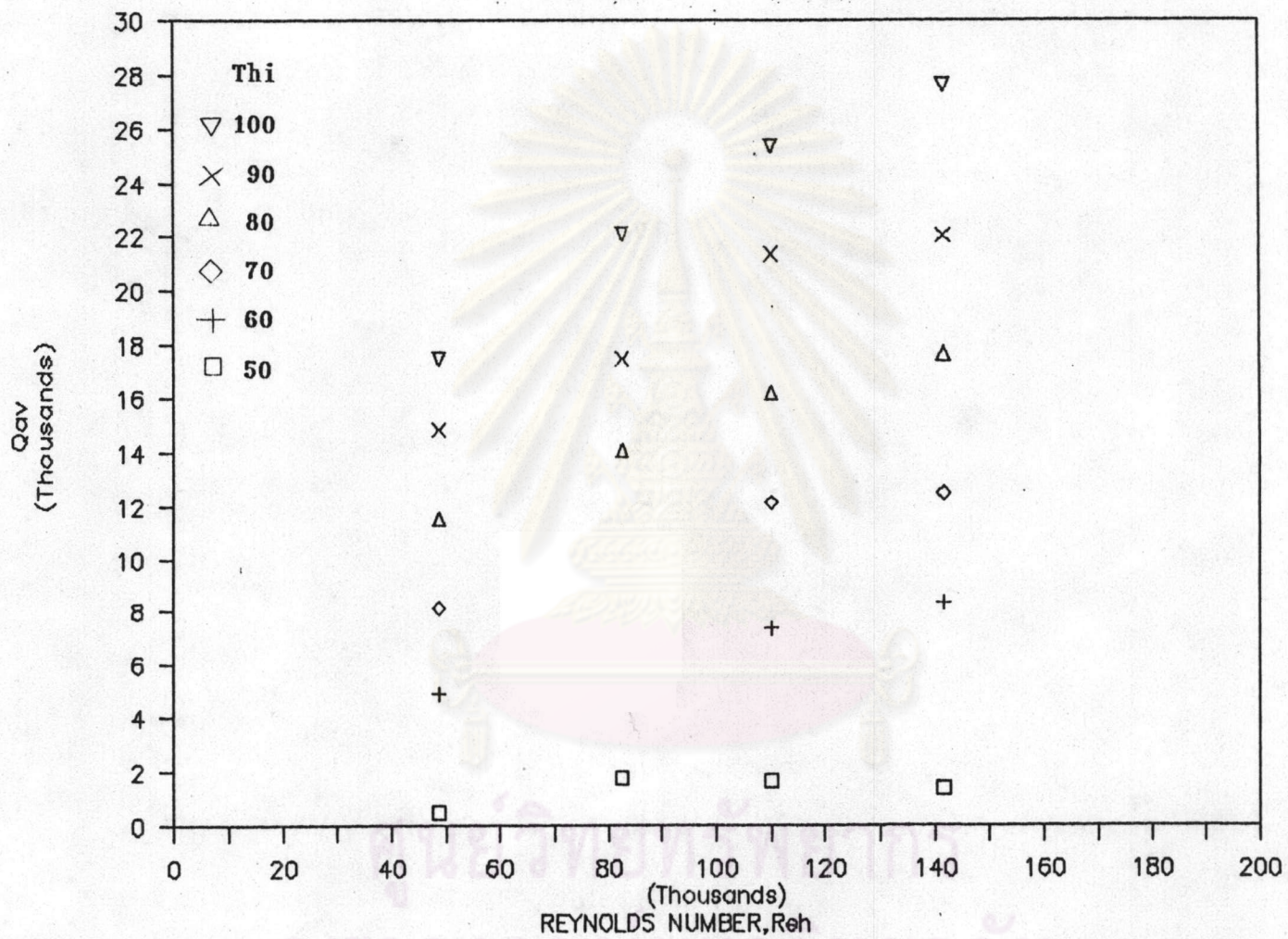
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



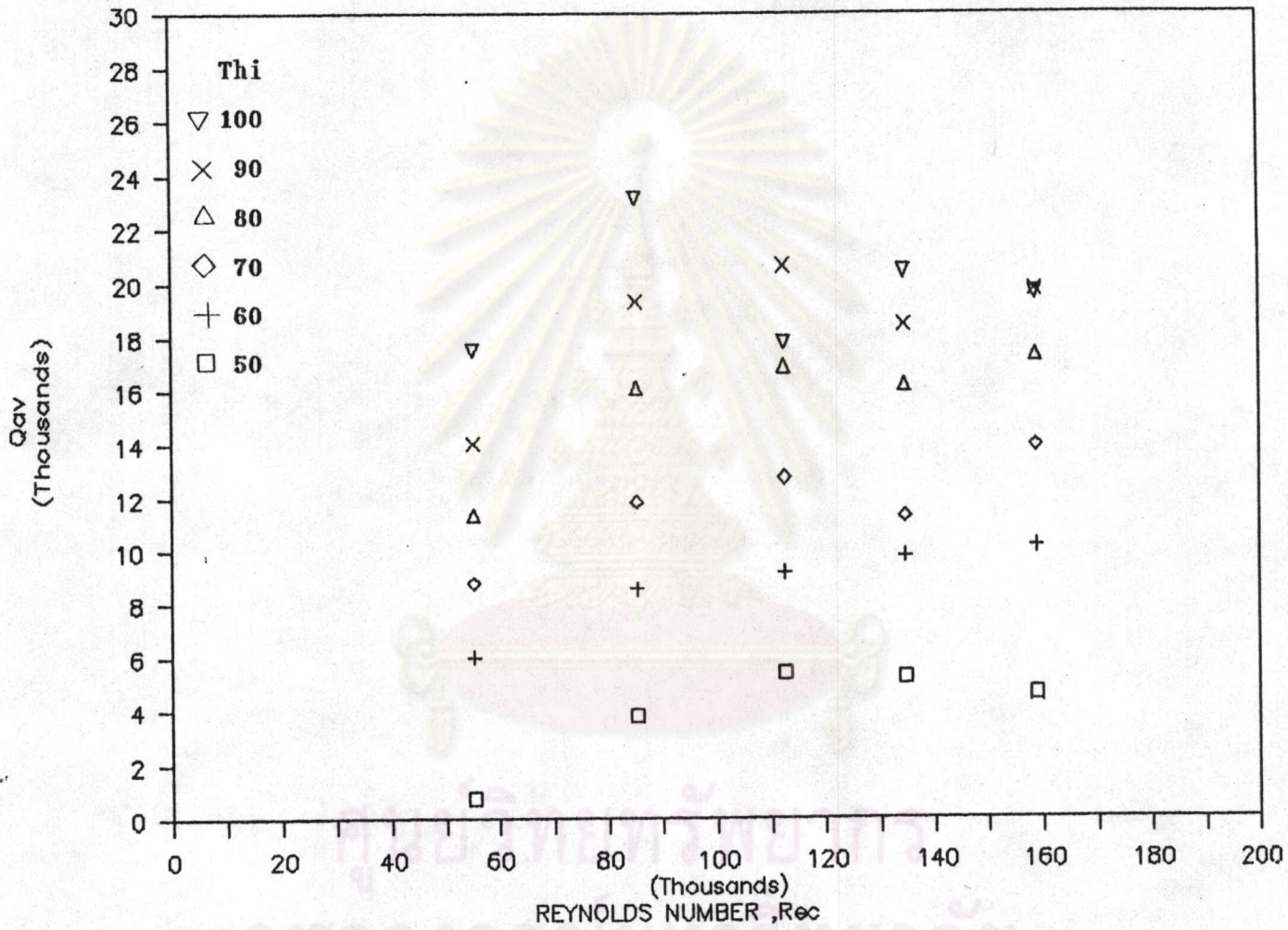
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



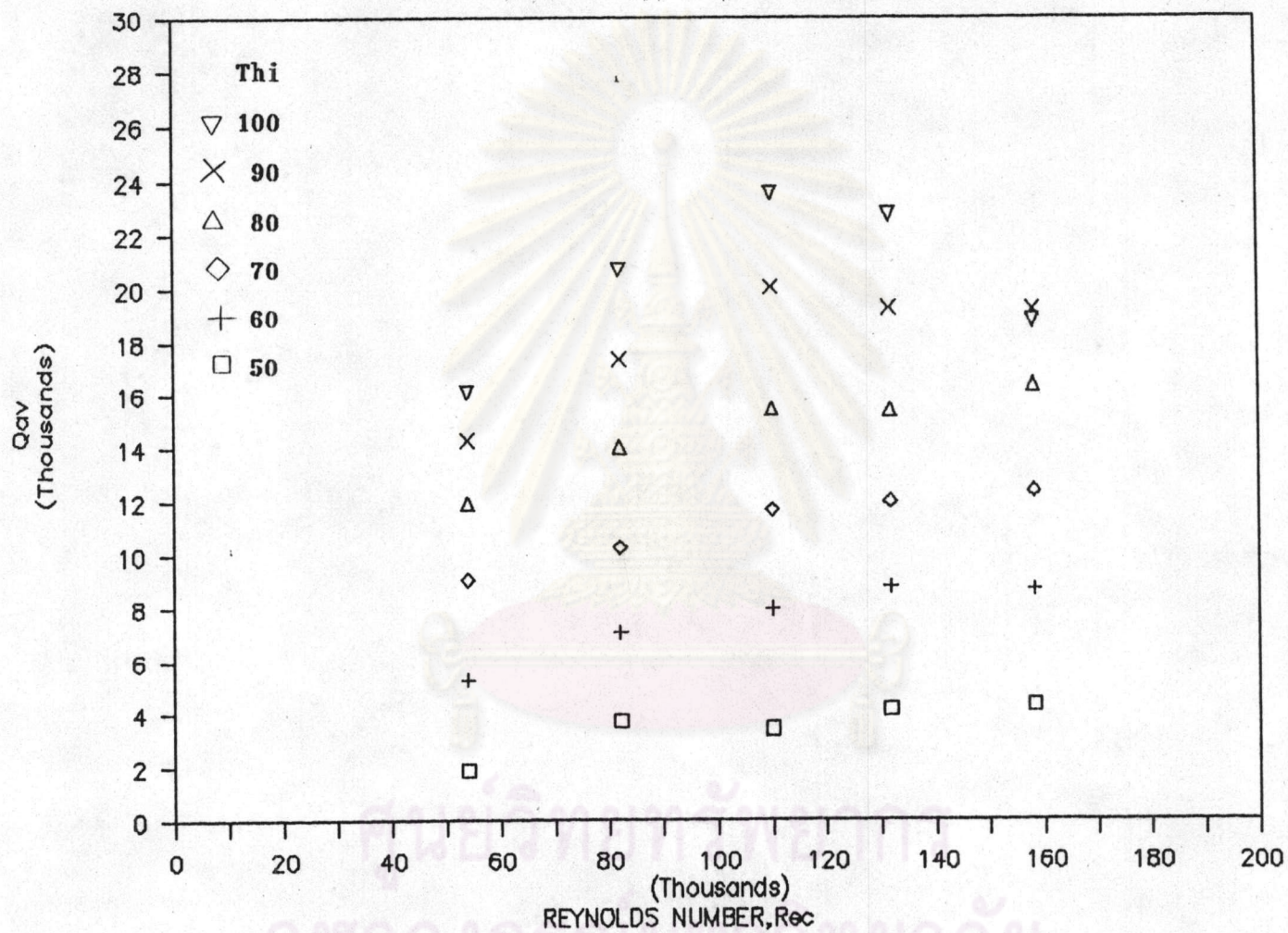
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์



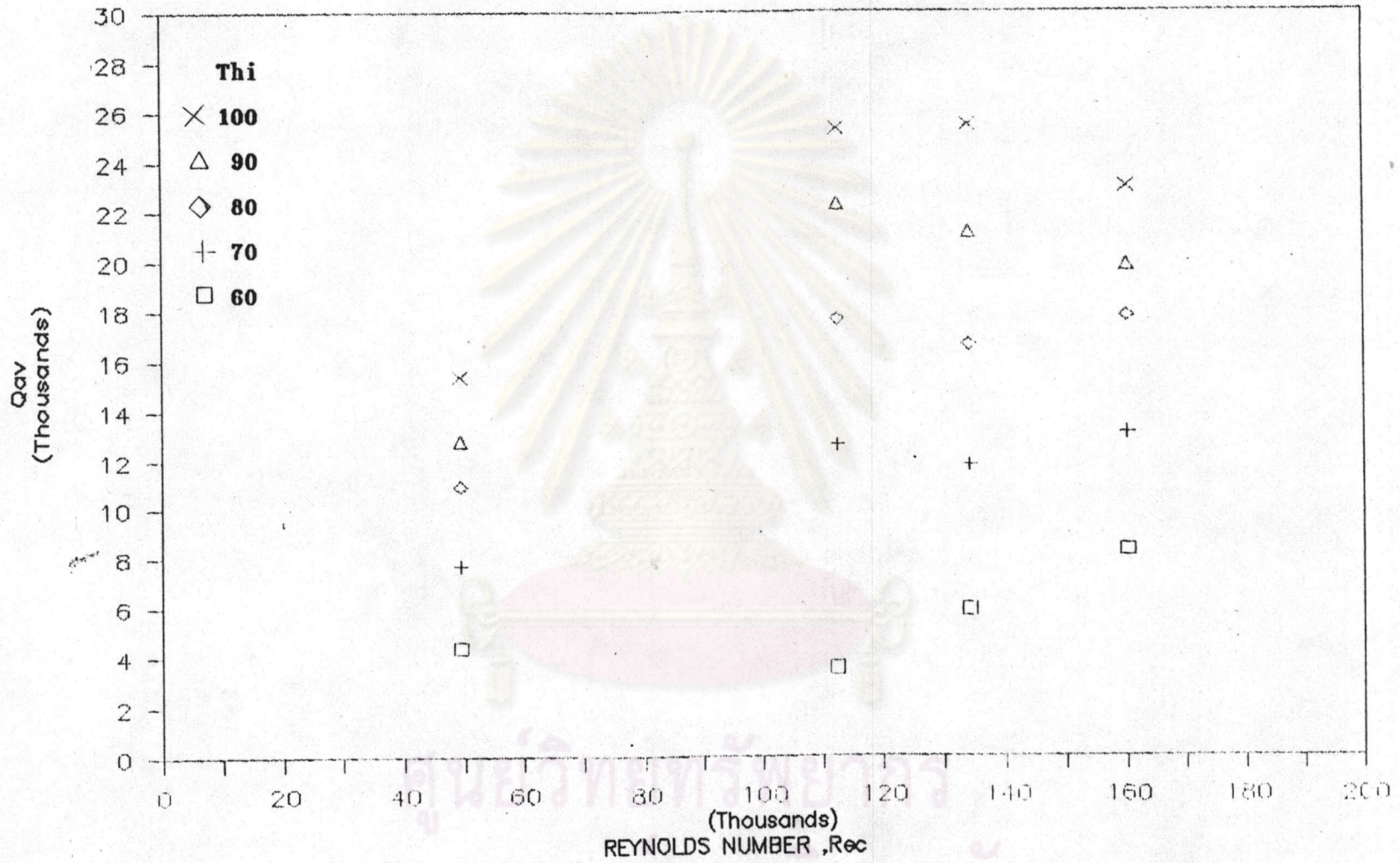
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



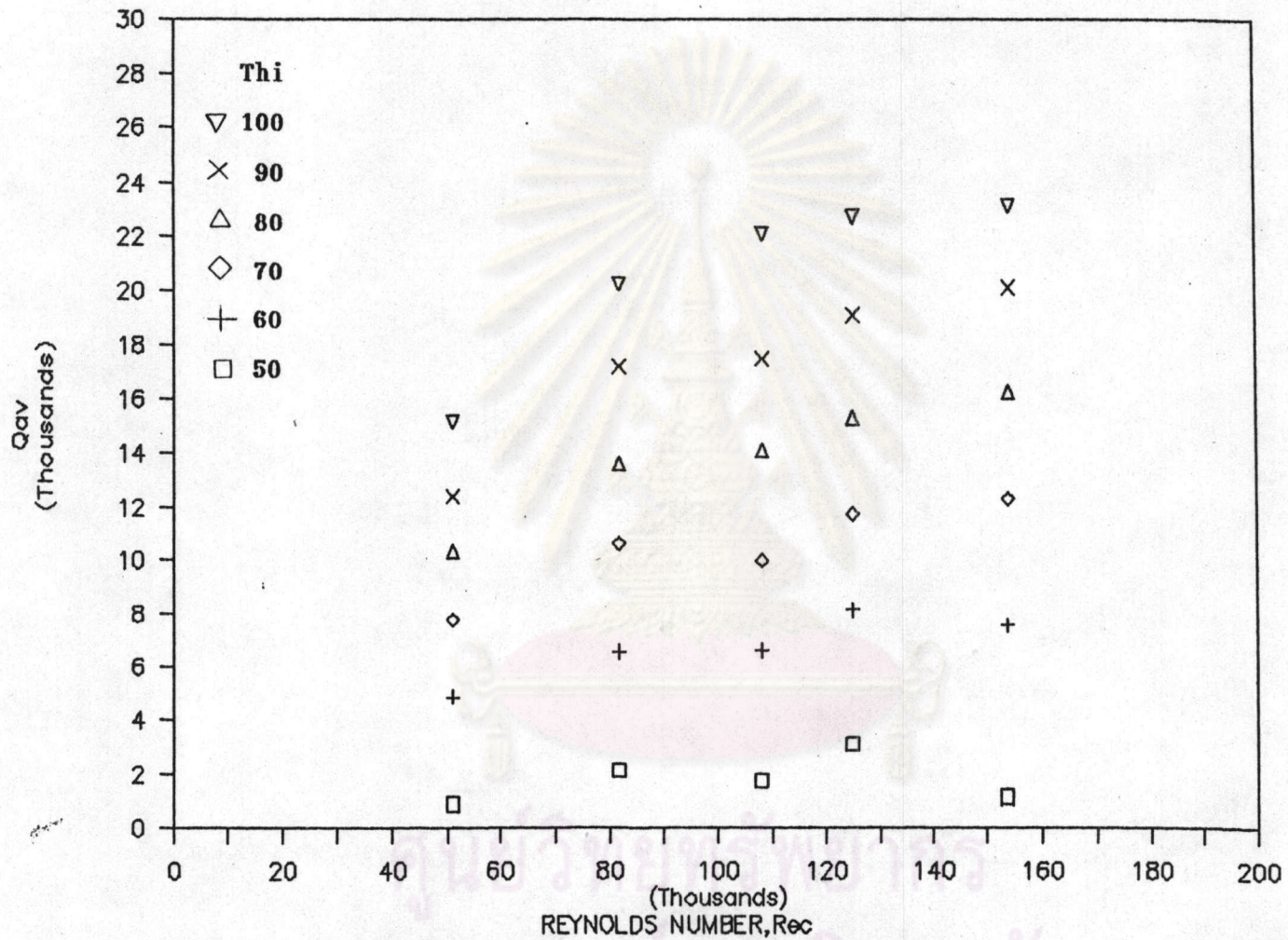
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านเยนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



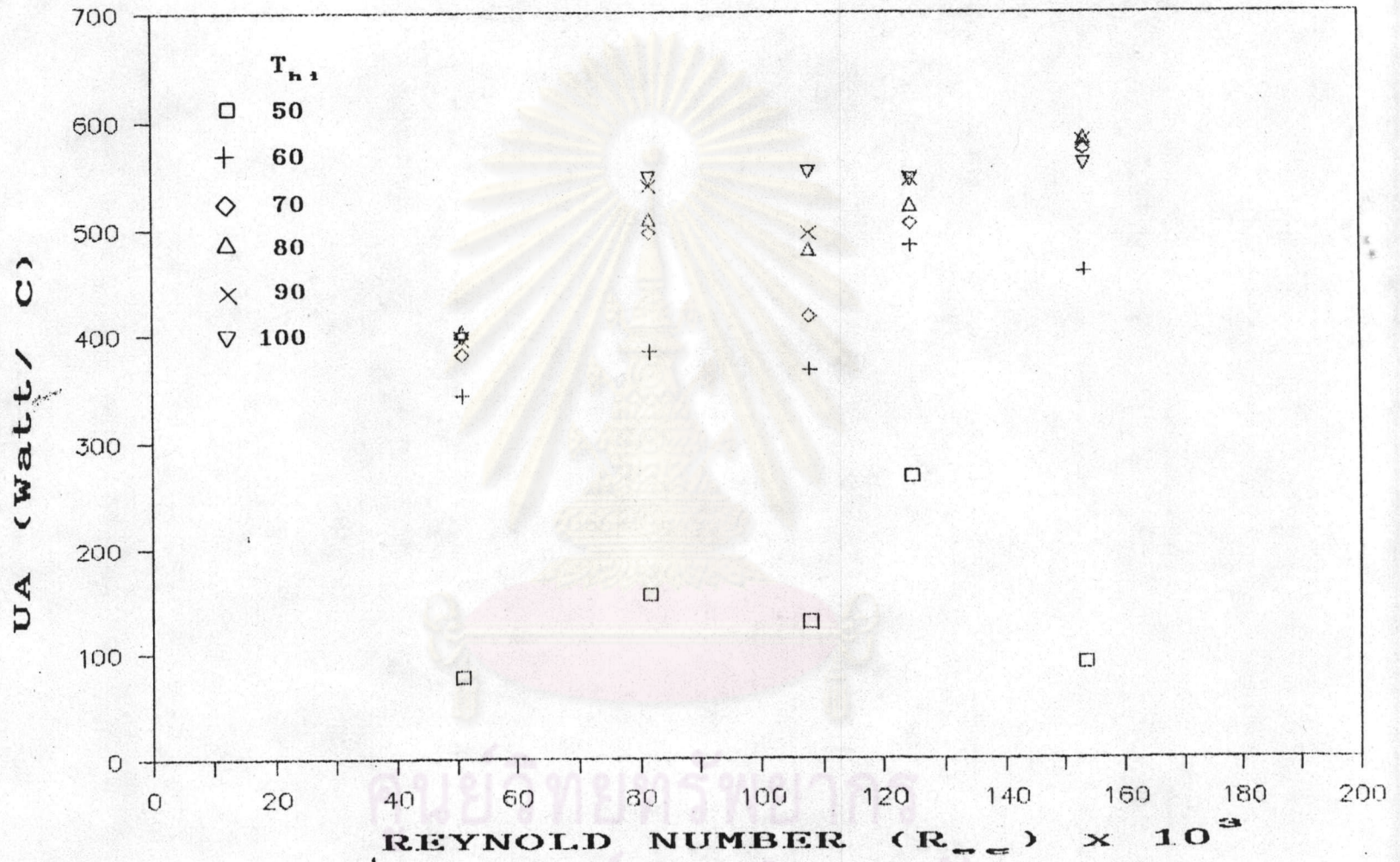
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านเยื่อที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



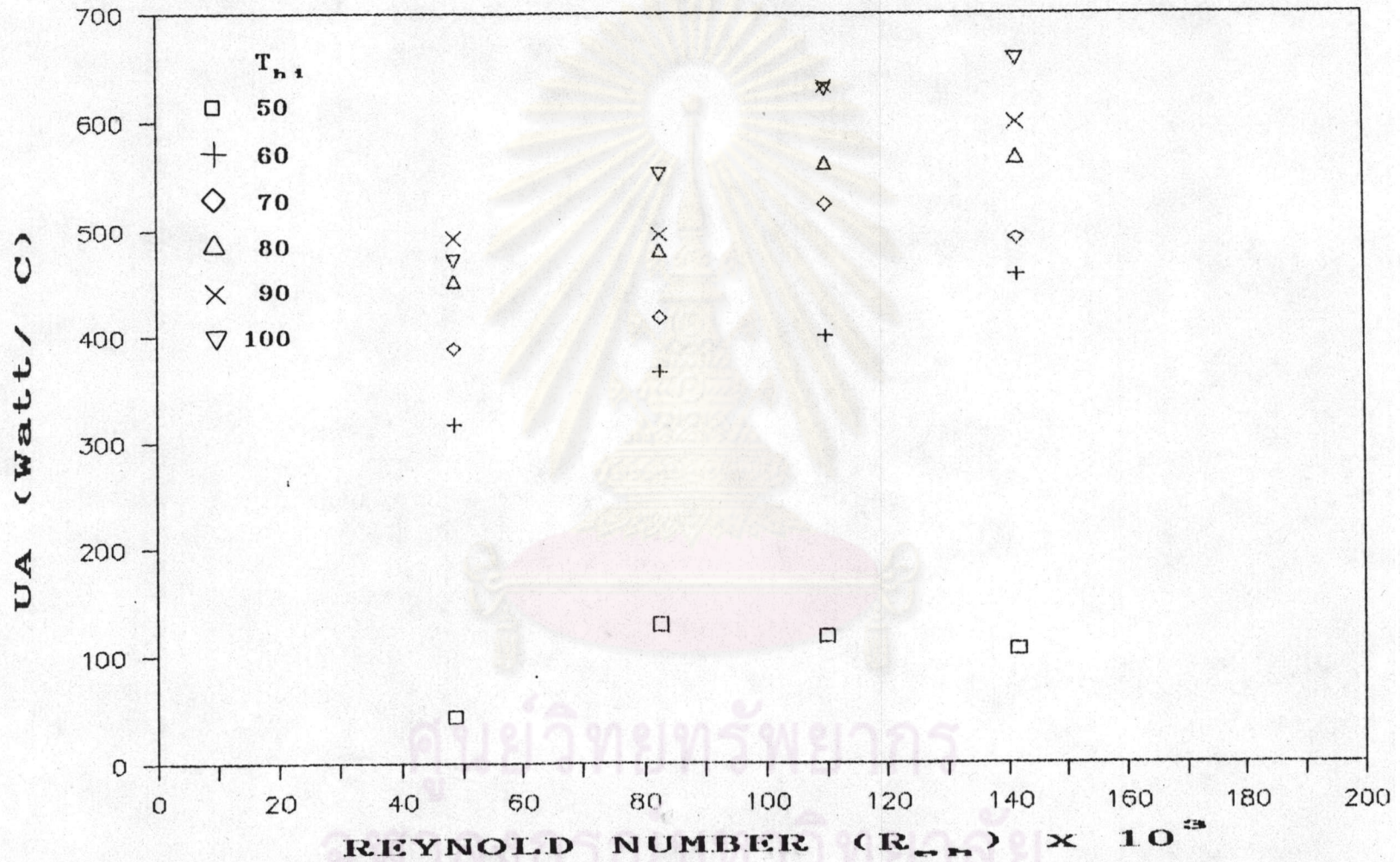
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเยนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์



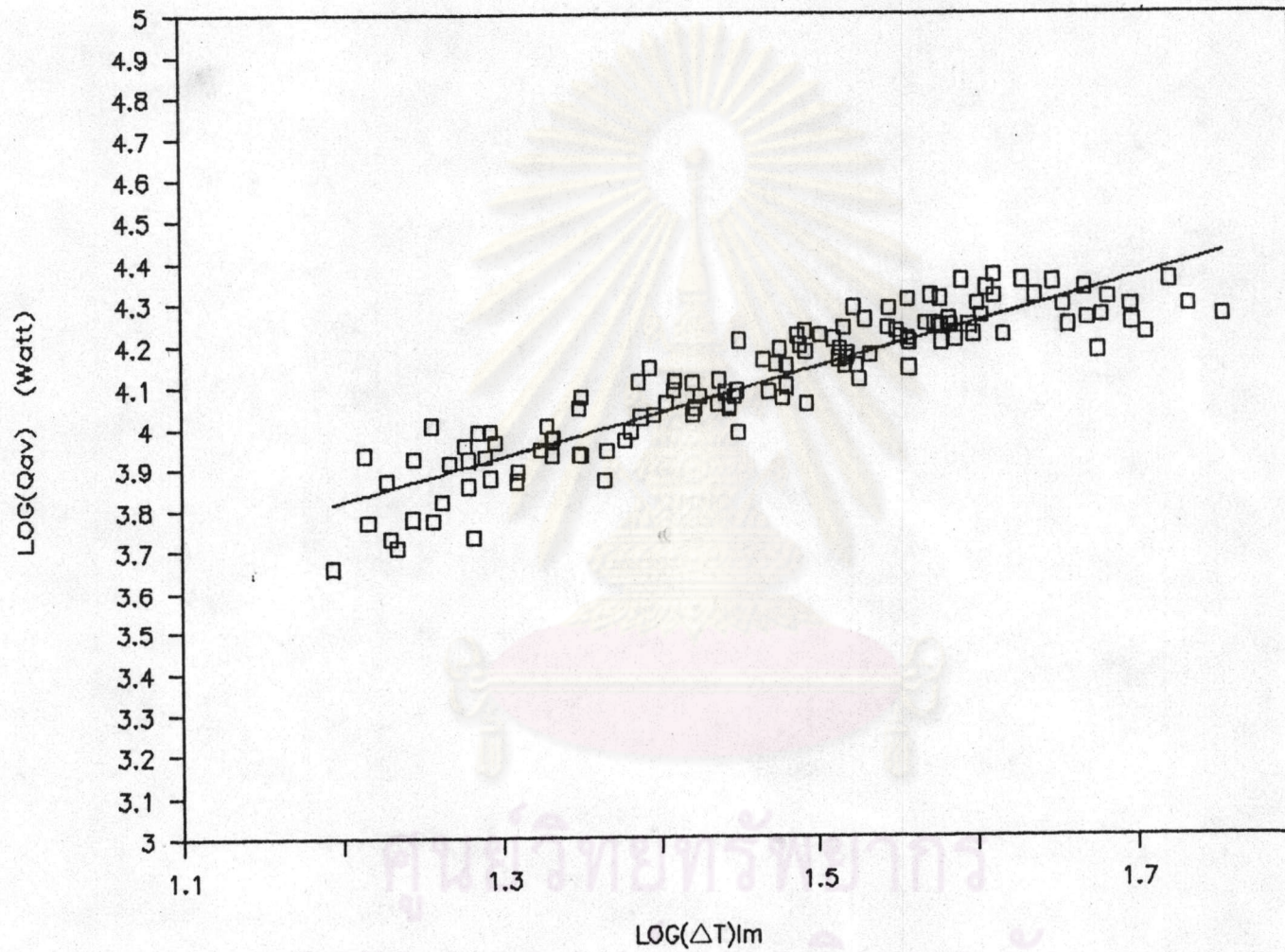
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านเยื่อที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



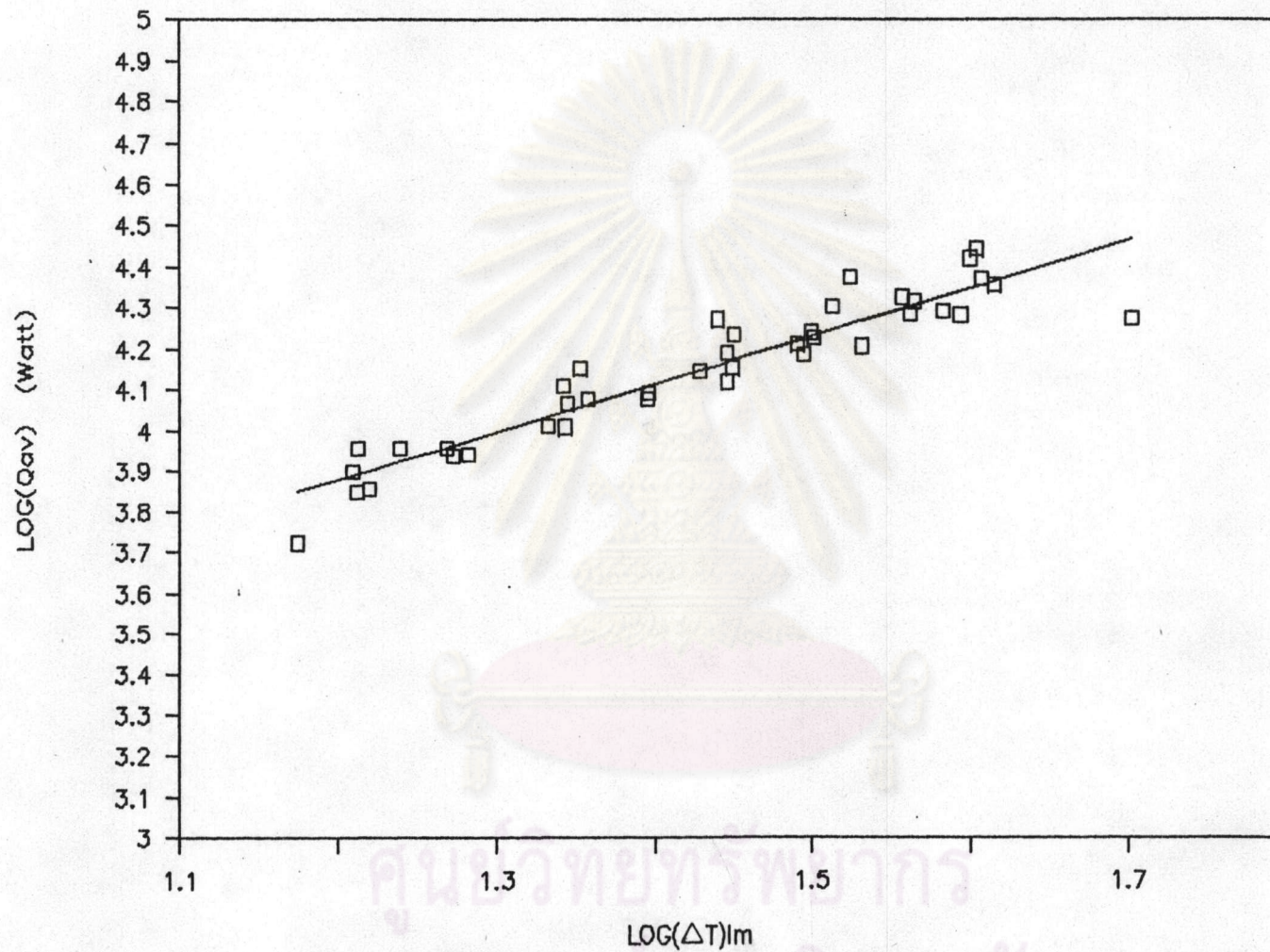
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



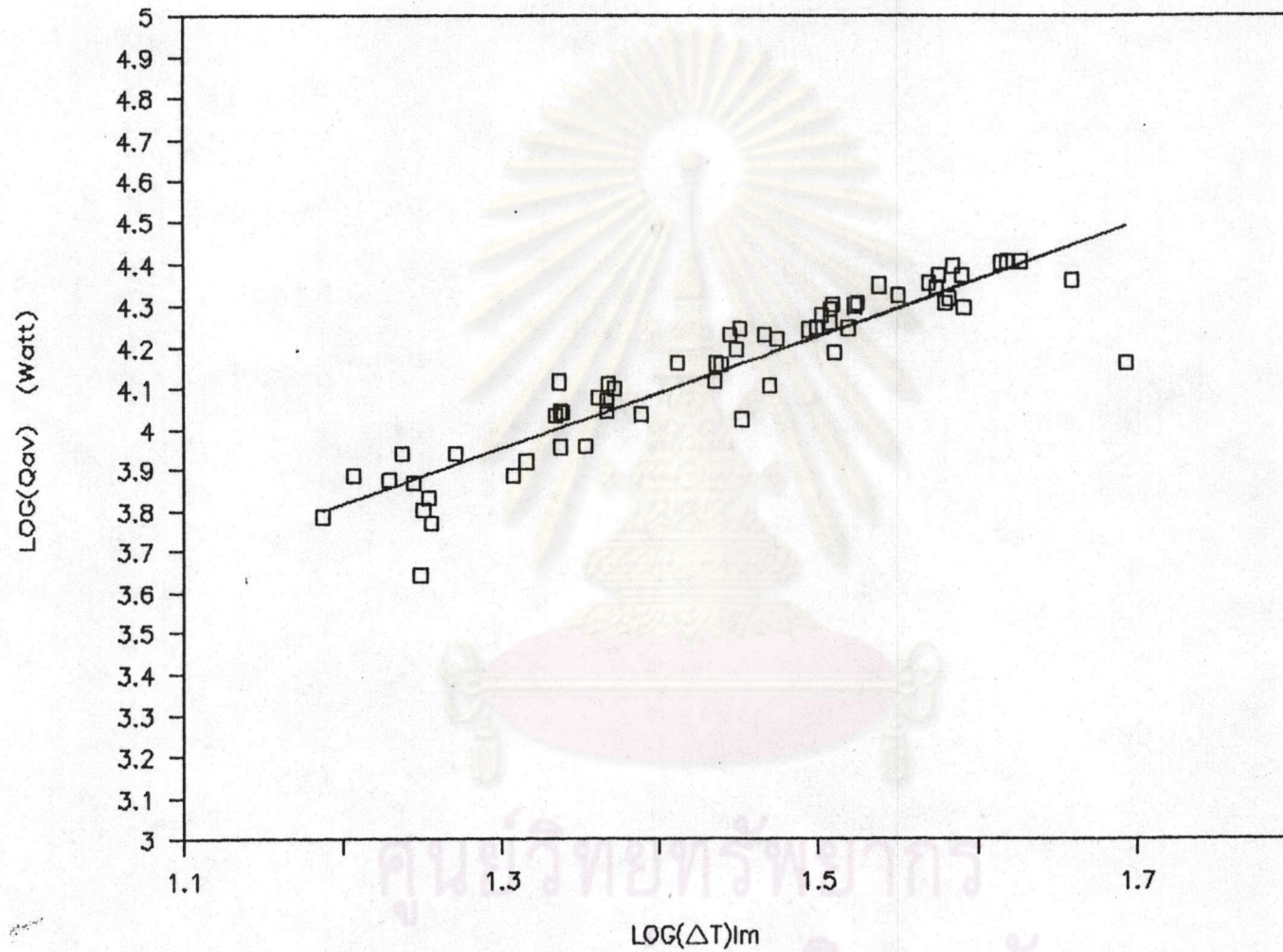
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับตัวเลข เรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



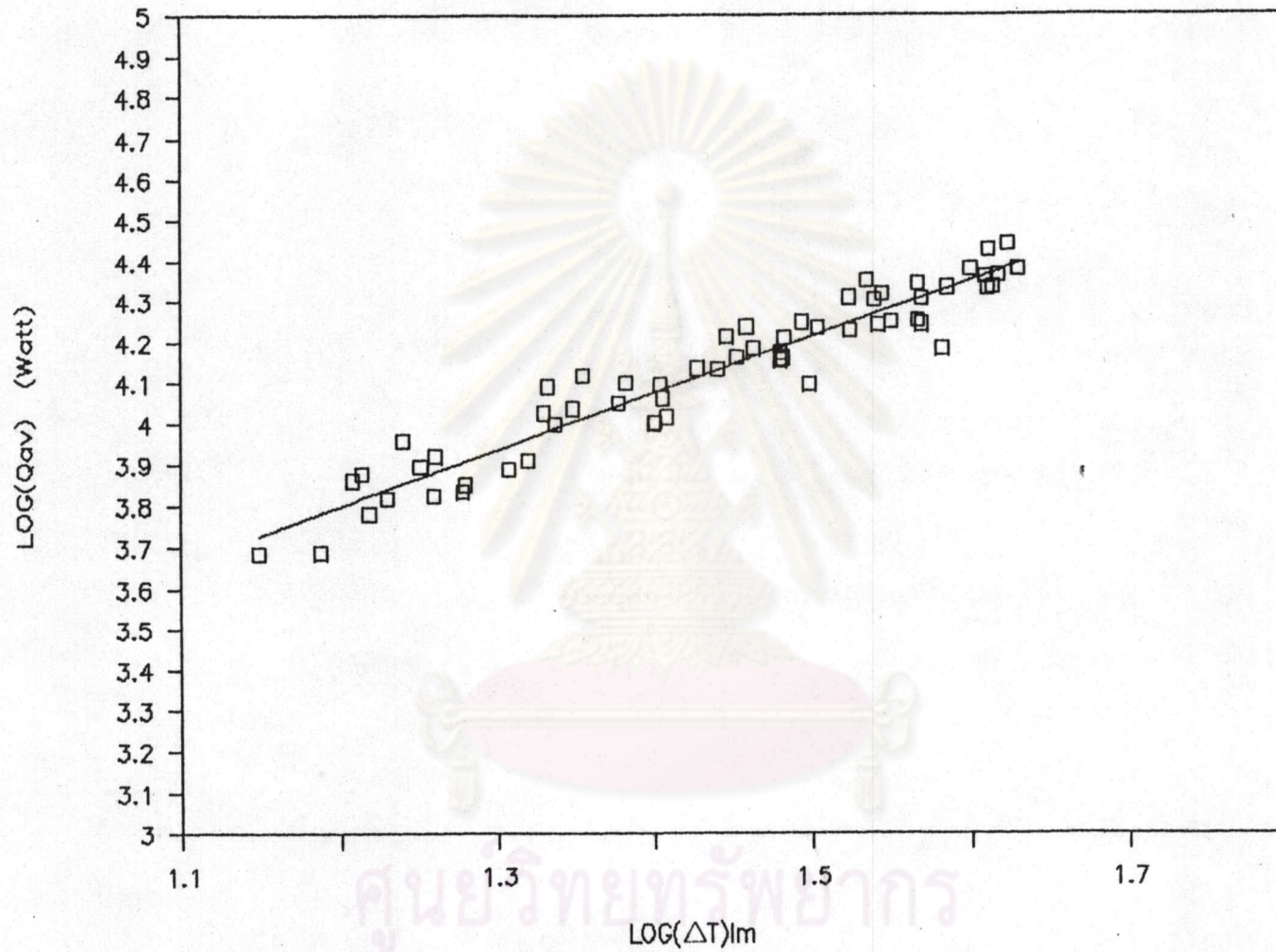
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



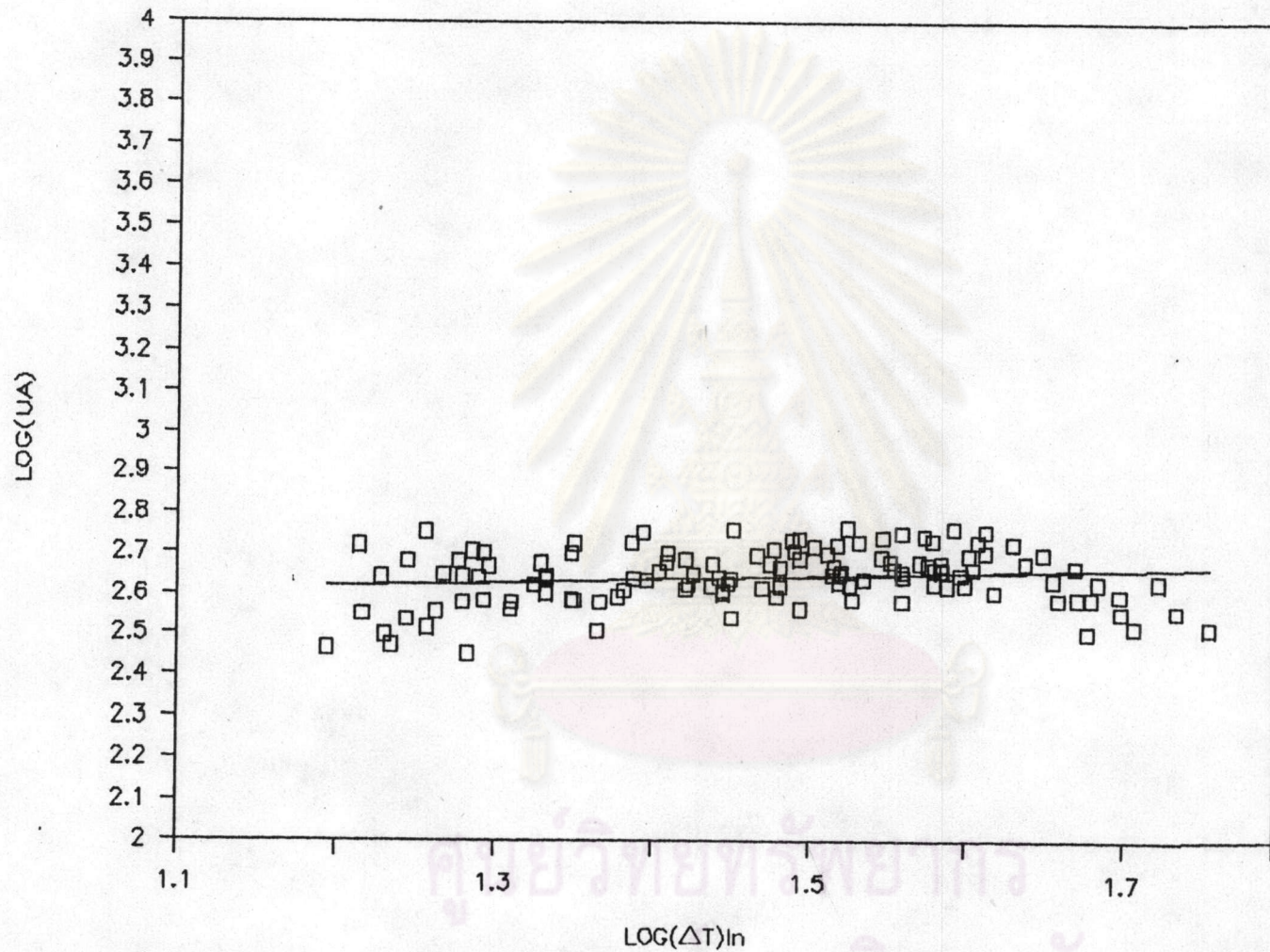
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



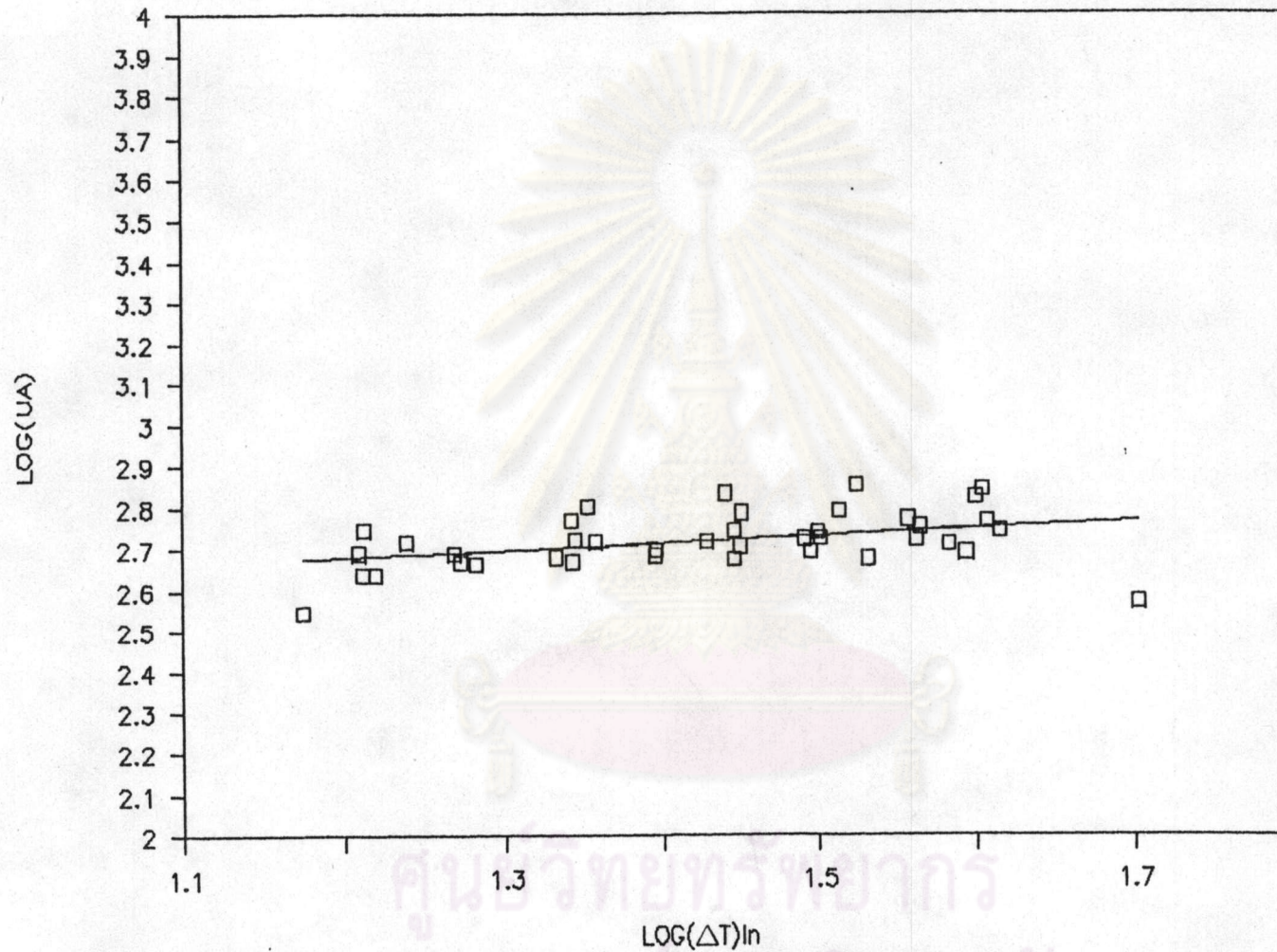
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์



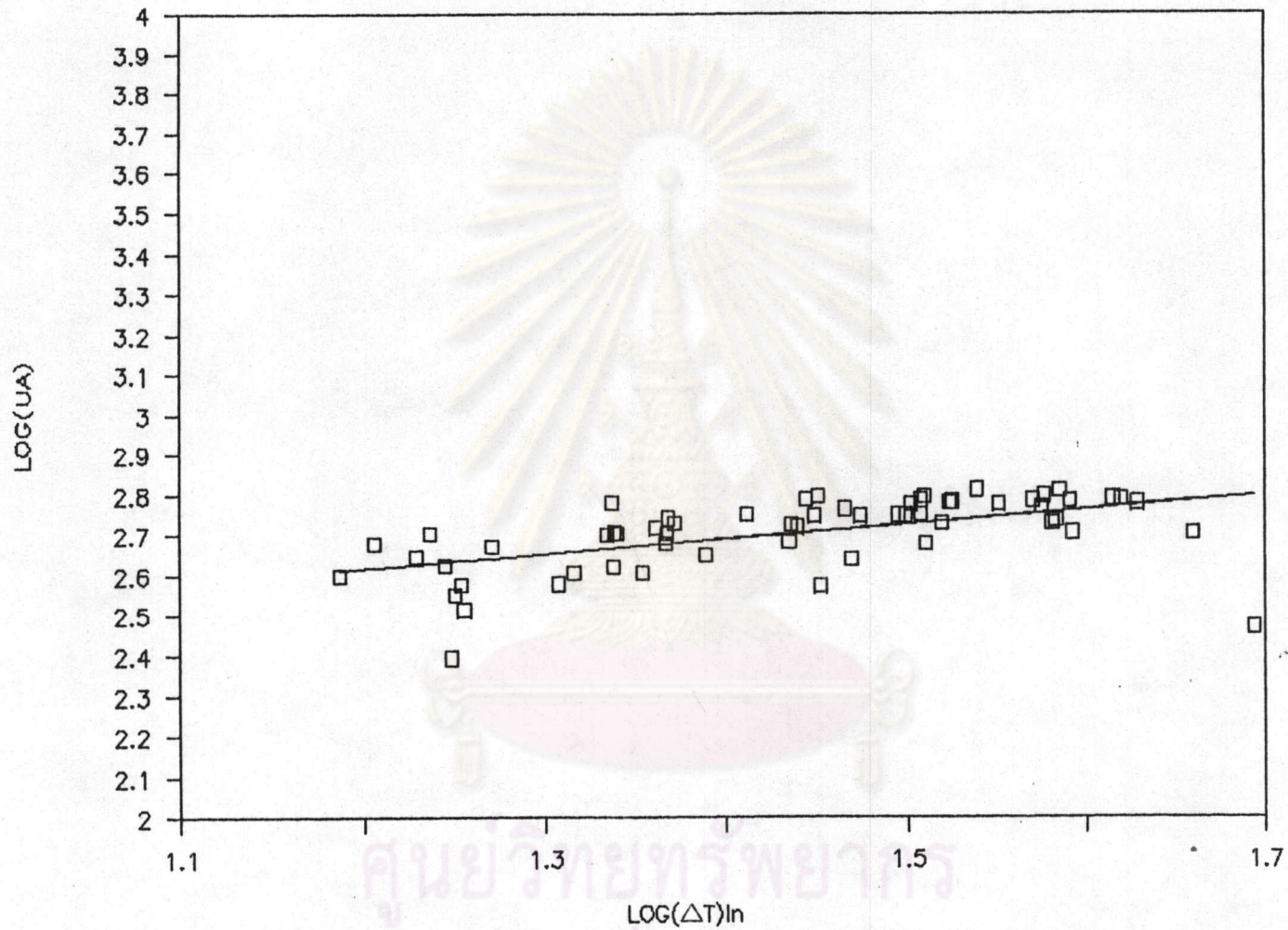
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



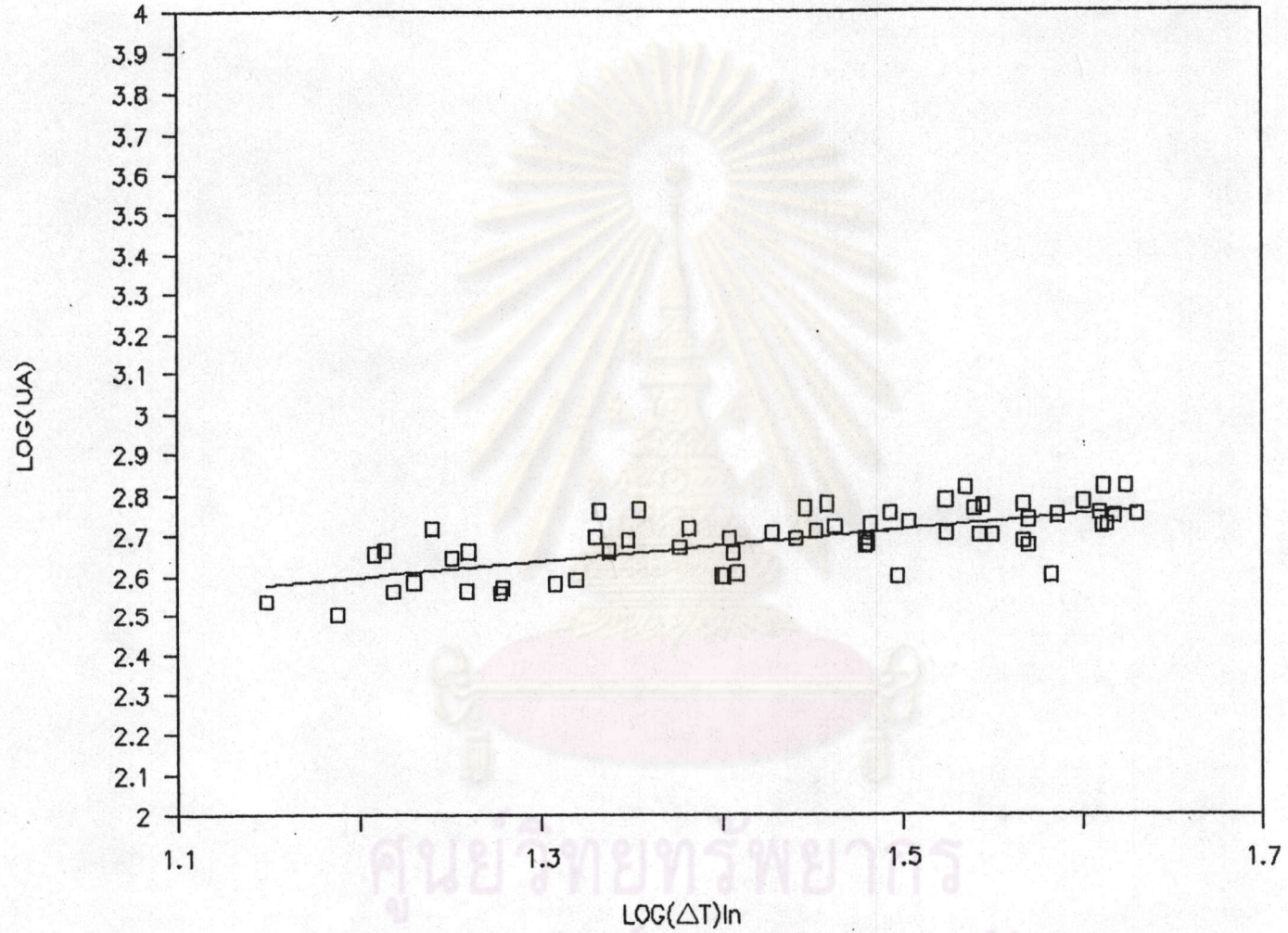
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



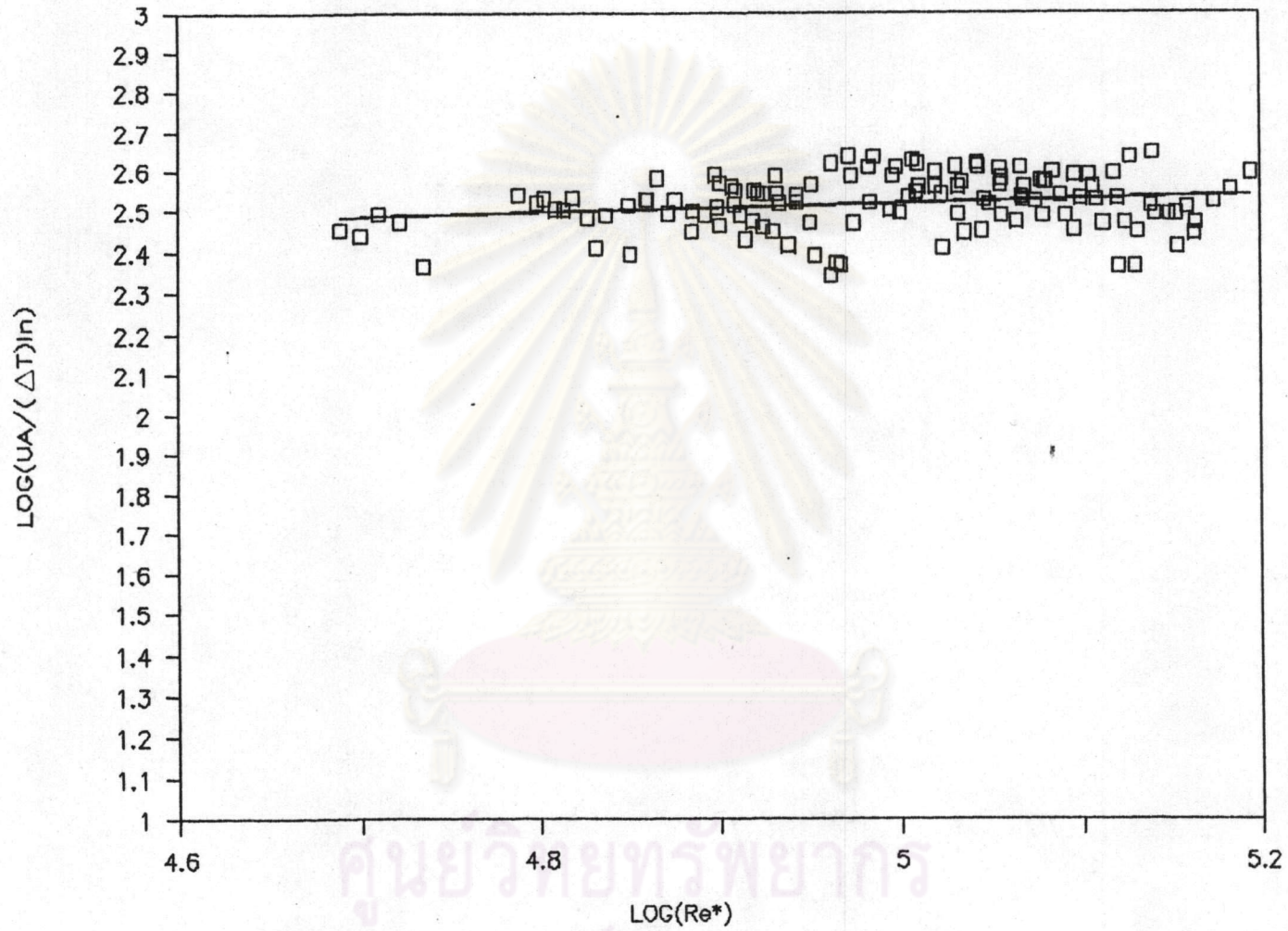
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลให้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



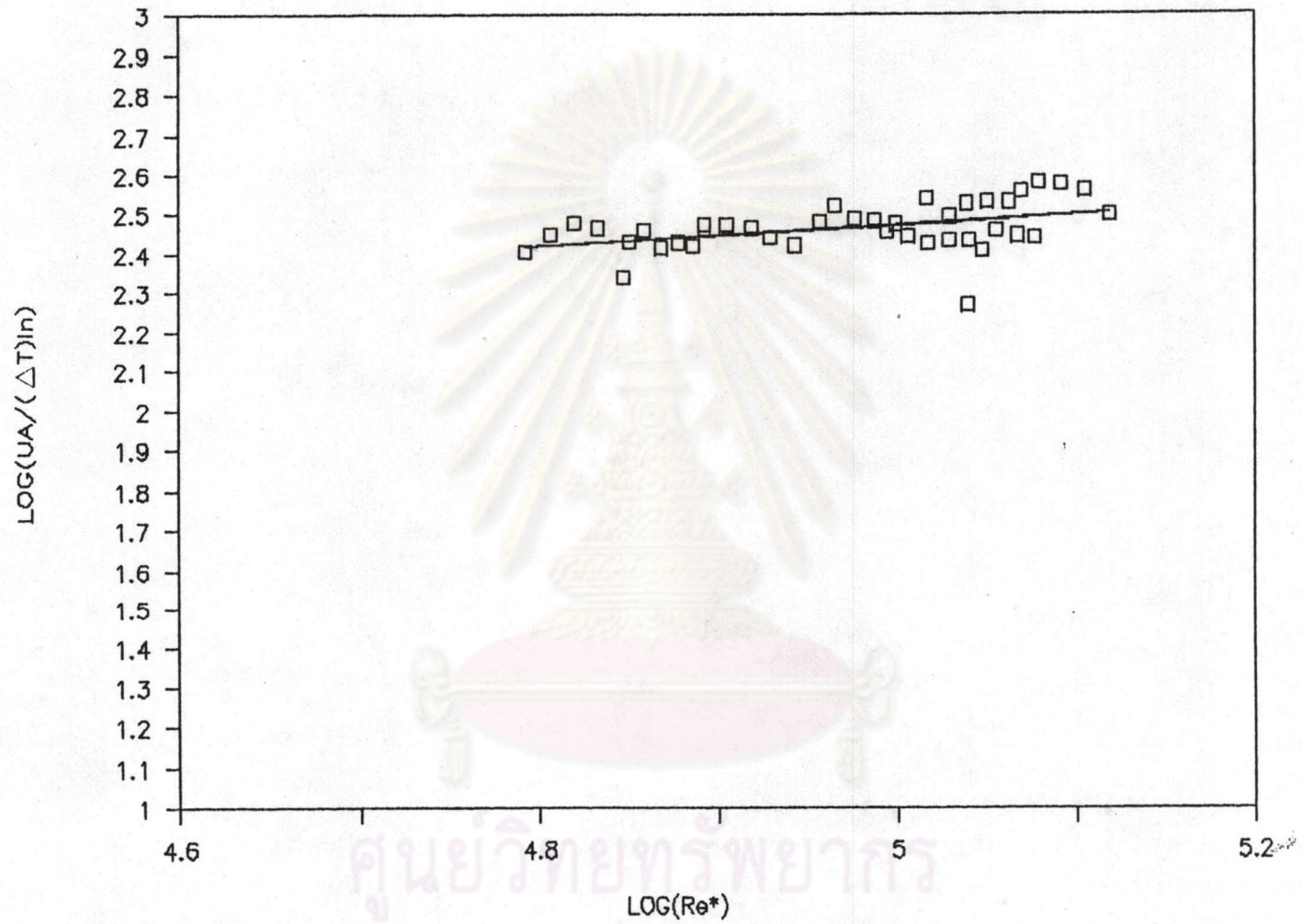
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์



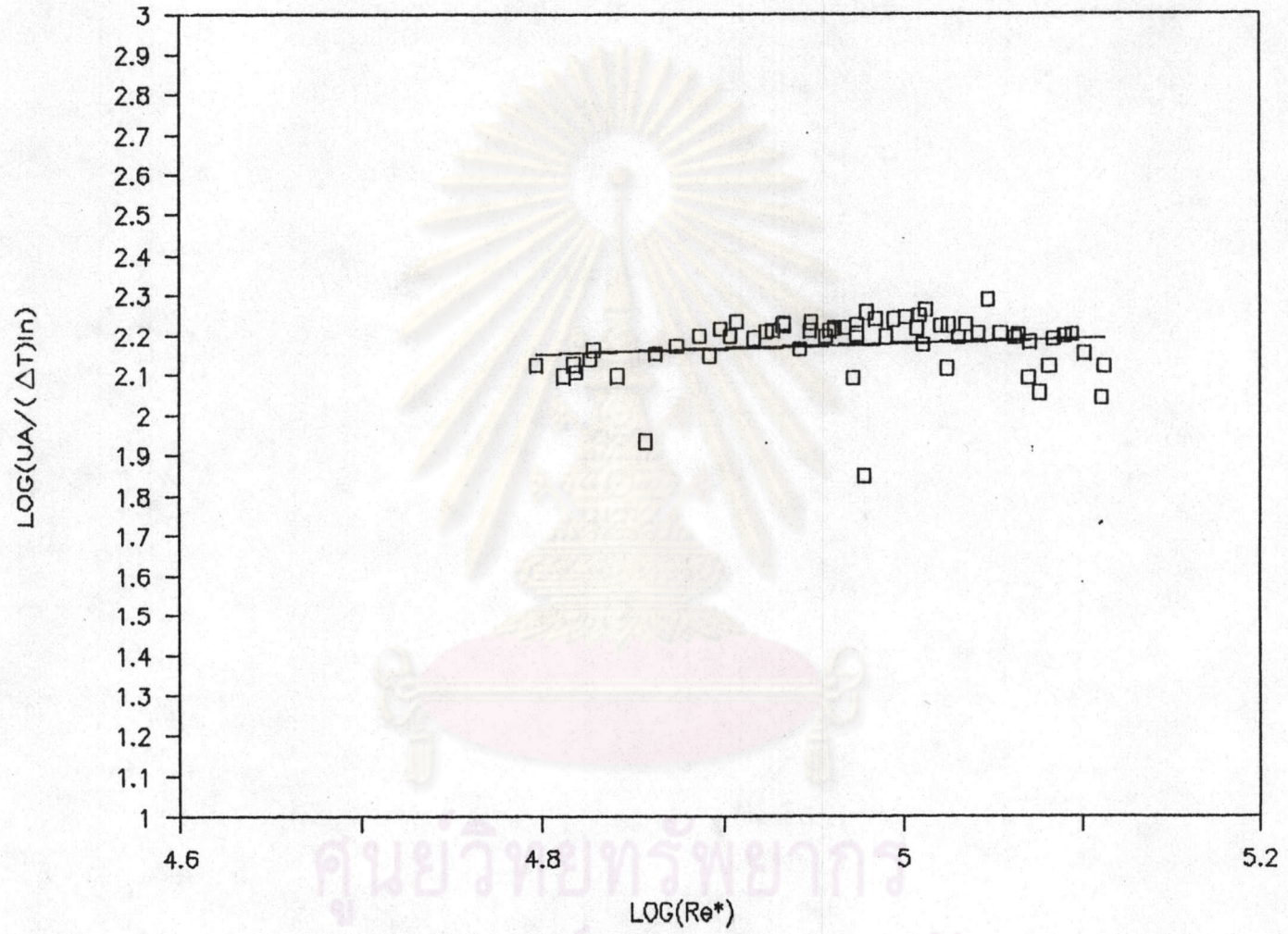
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์



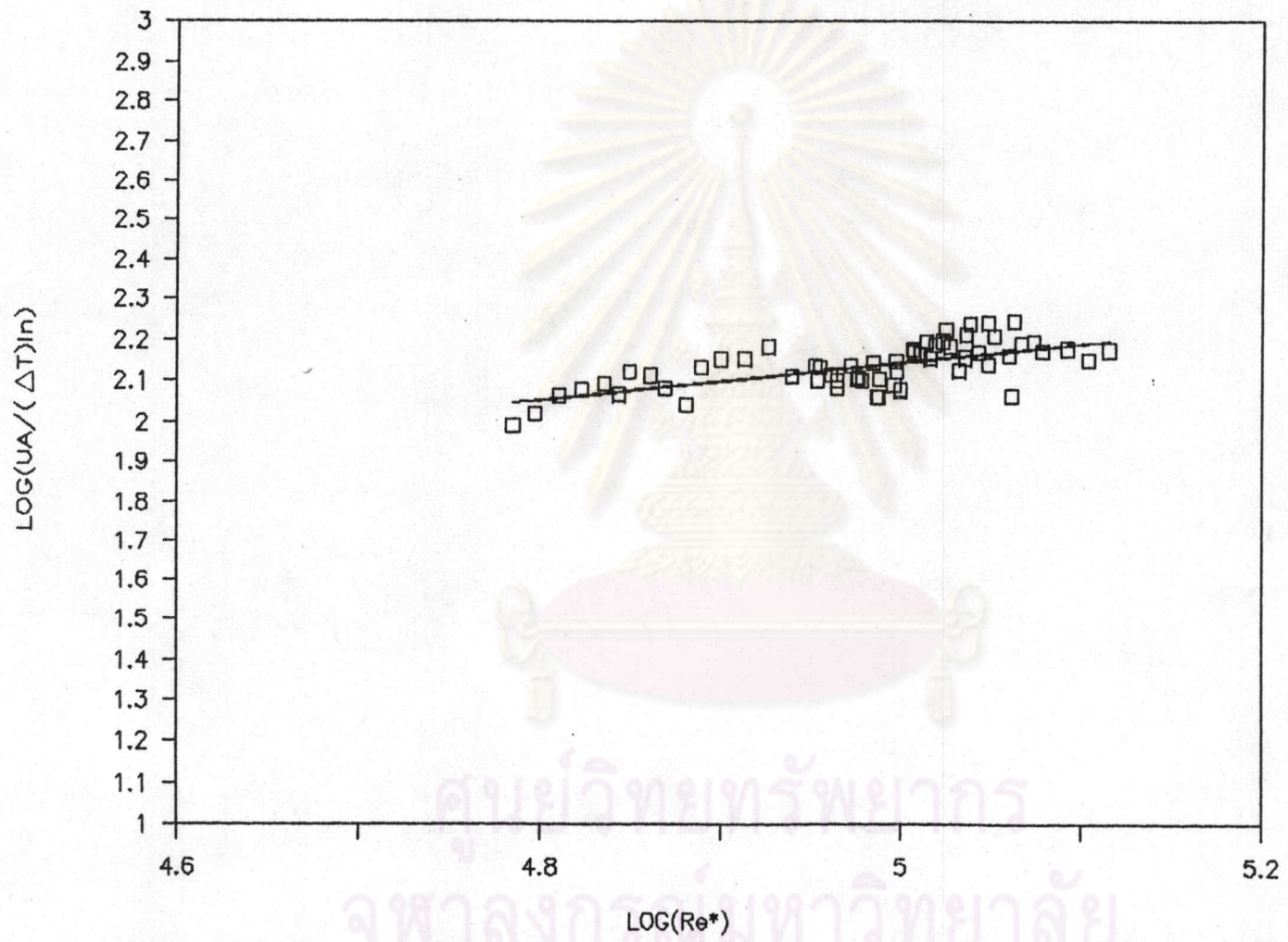
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_n^a$ กับ Re^* ที่มีปริมาณ
ของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_{in}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณ
ของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_h$ กับ Re^* ที่มีปริมาณ
ทองไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์

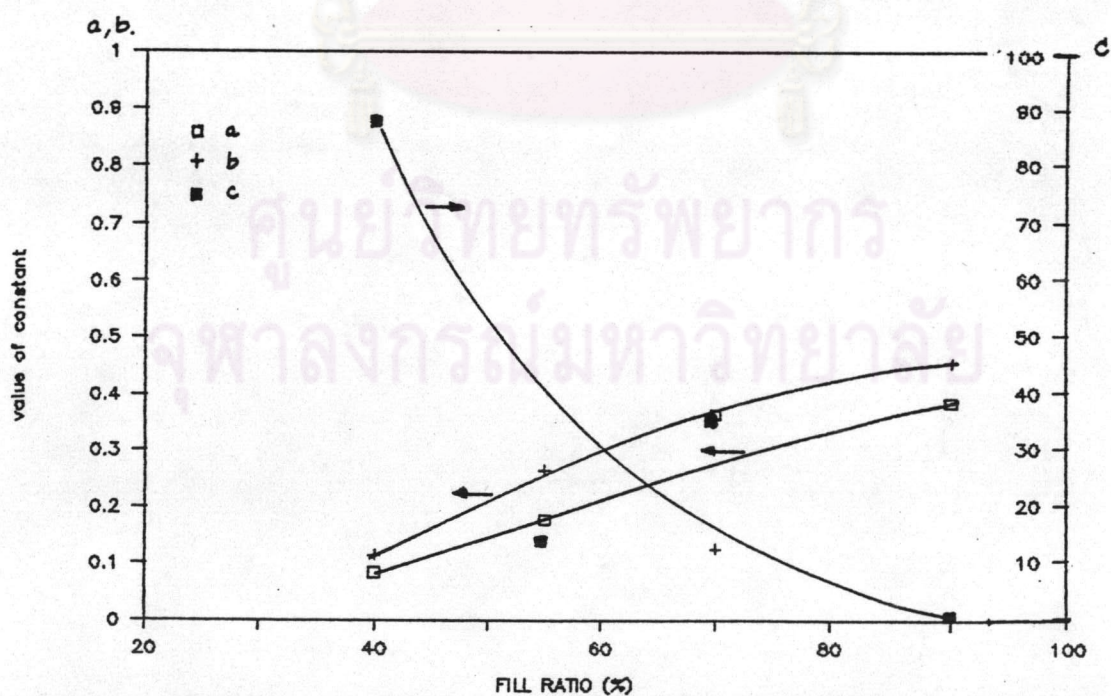


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_{ln}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าของตัวเลขยกกำลัง a, b และของสัมประสิทธิ์ c ในสมการ 4.5 ซึ่งได้จากการทดลอง รูปที่ 4.23 พล็อตค่าของ a, b และ c กับปริมาณของไหลใช้งาน ค่าของ a, b และ c จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถนำมาทำนายค่าของ a, b และ c สำหรับปริมาณของไหลใช้งานอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าของค่าคงที่ a, b และ c ของสมการที่ 4.5 สำหรับปริมาณของไหลใช้งานต่างๆ

ปริมาณของไหลใช้งาน (%)	40	55	70	90
a	0.0835	0.1768	0.3664	0.3862
b	0.1153	0.2654	0.1263	0.4581
c	87.84	14.00	35.25	0.7128

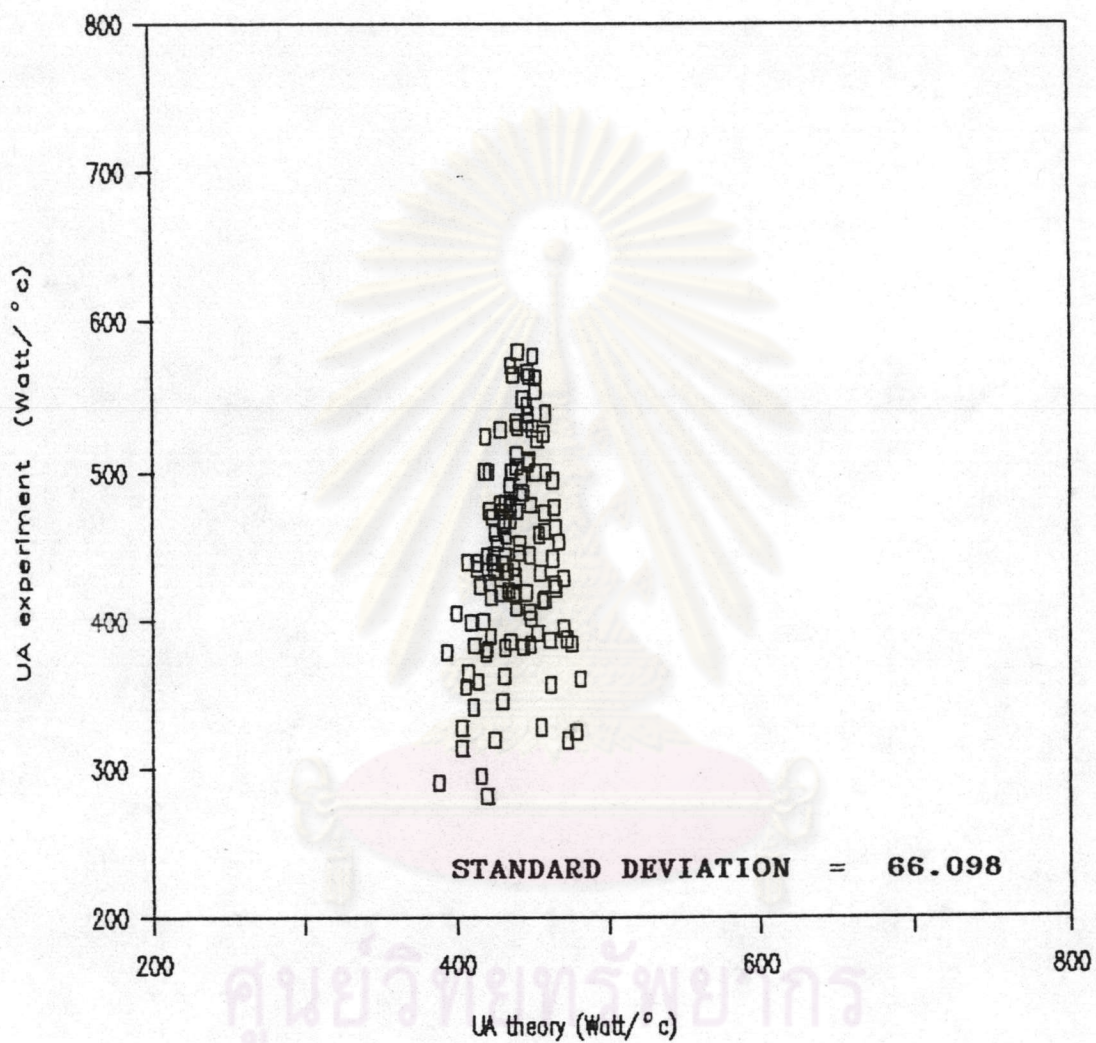


รูปที่ 4.23 ค่าคงที่ a, b และ c ของสมการ 4.5 กับปริมาณของไหลใช้งาน

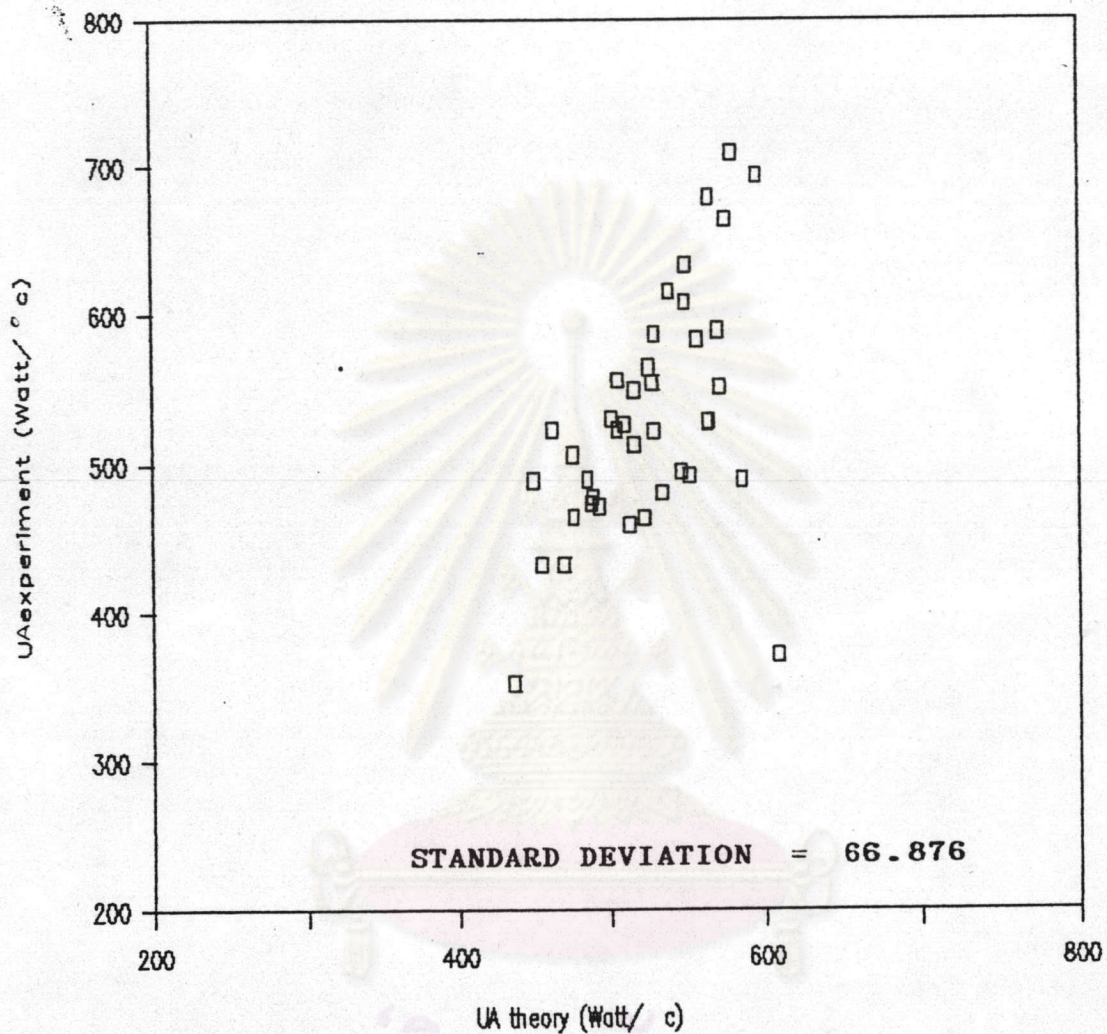
รูปที่ 4.24-4.27 เปรียบเทียบค่าของ UA ที่ได้จากการทดลองกับ UA ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สัมพันธ์ 4.5 สำหรับกรณีปริมาณของไหลใช้งาน 40, 50, 70, 90 % ตามลำดับ



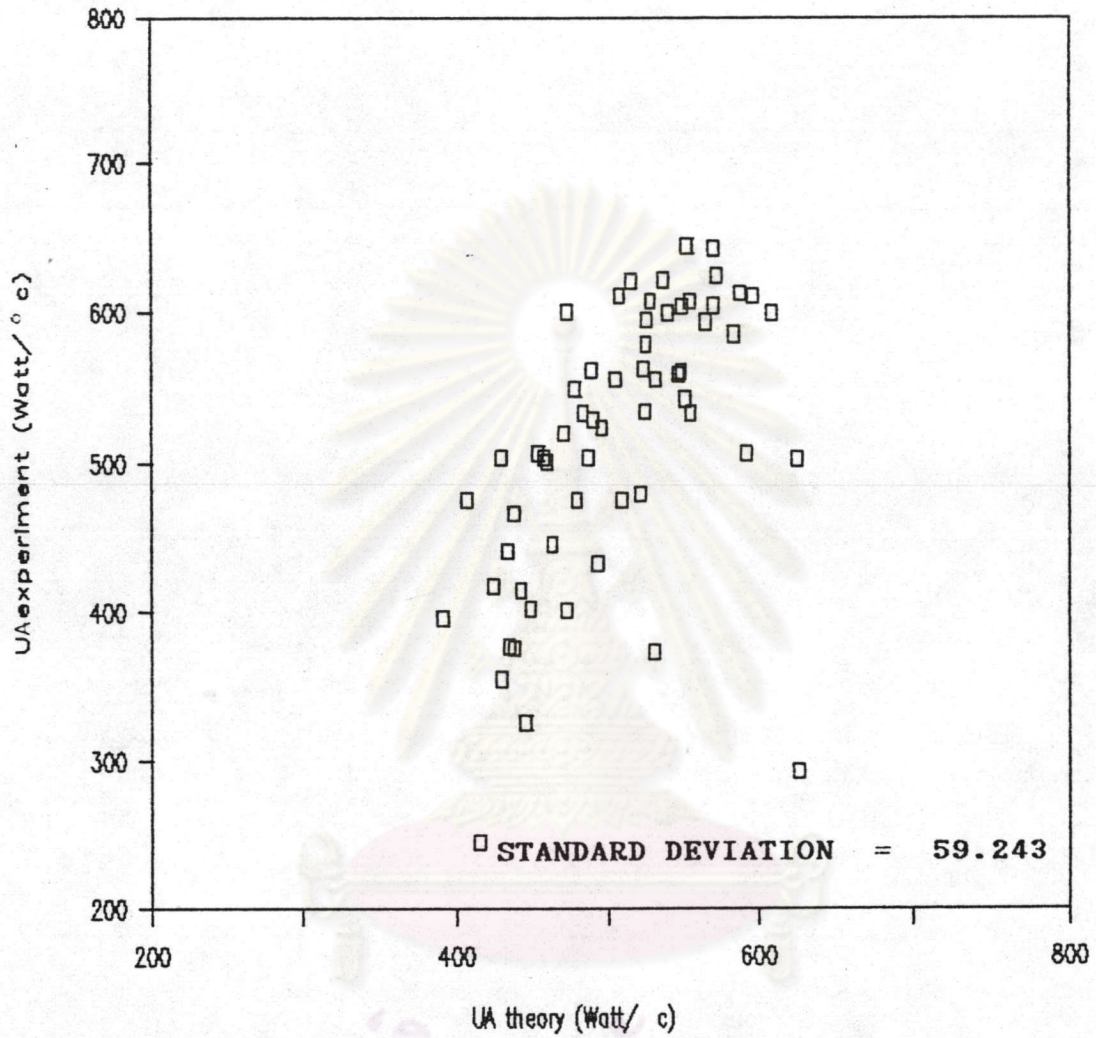
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



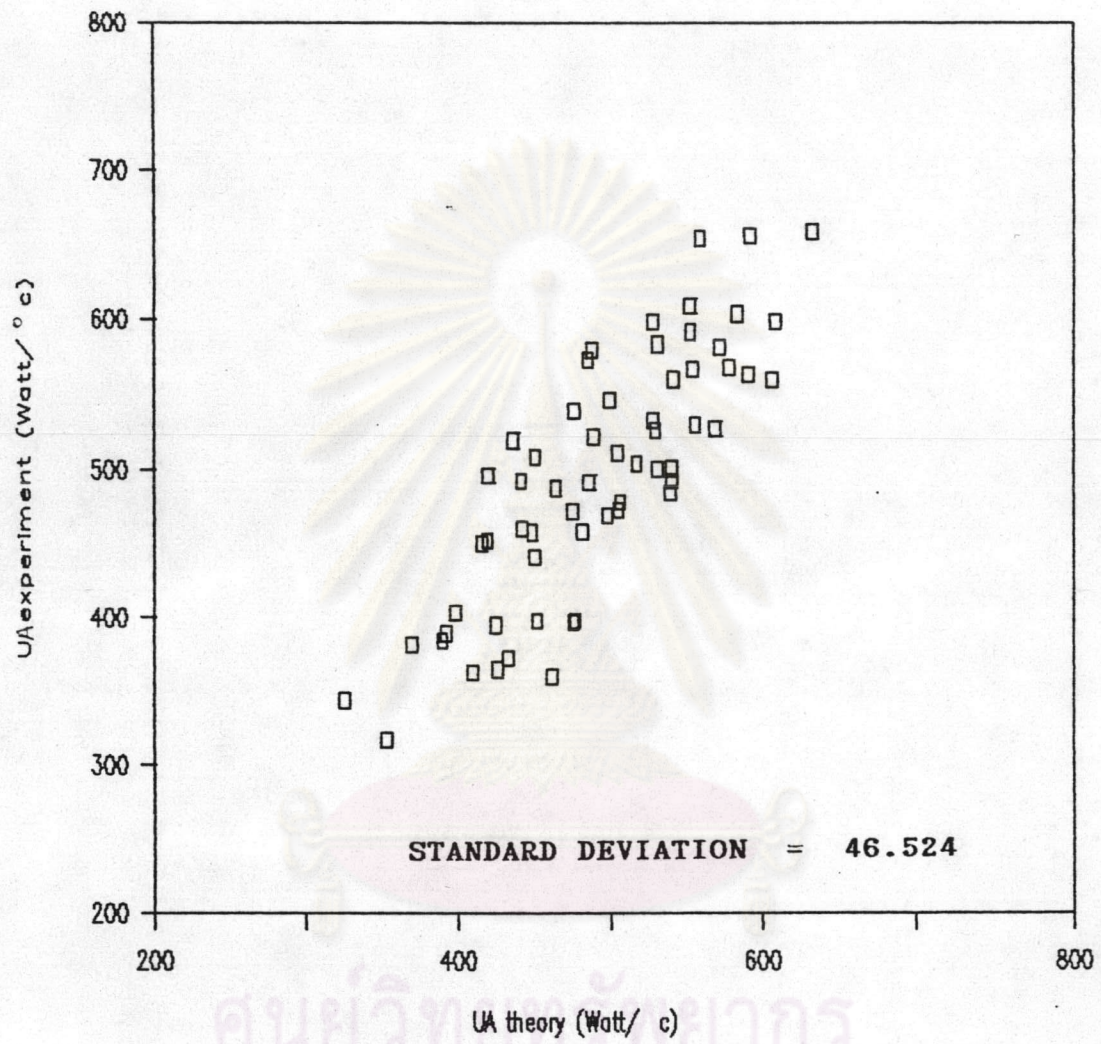
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซ็นต์