

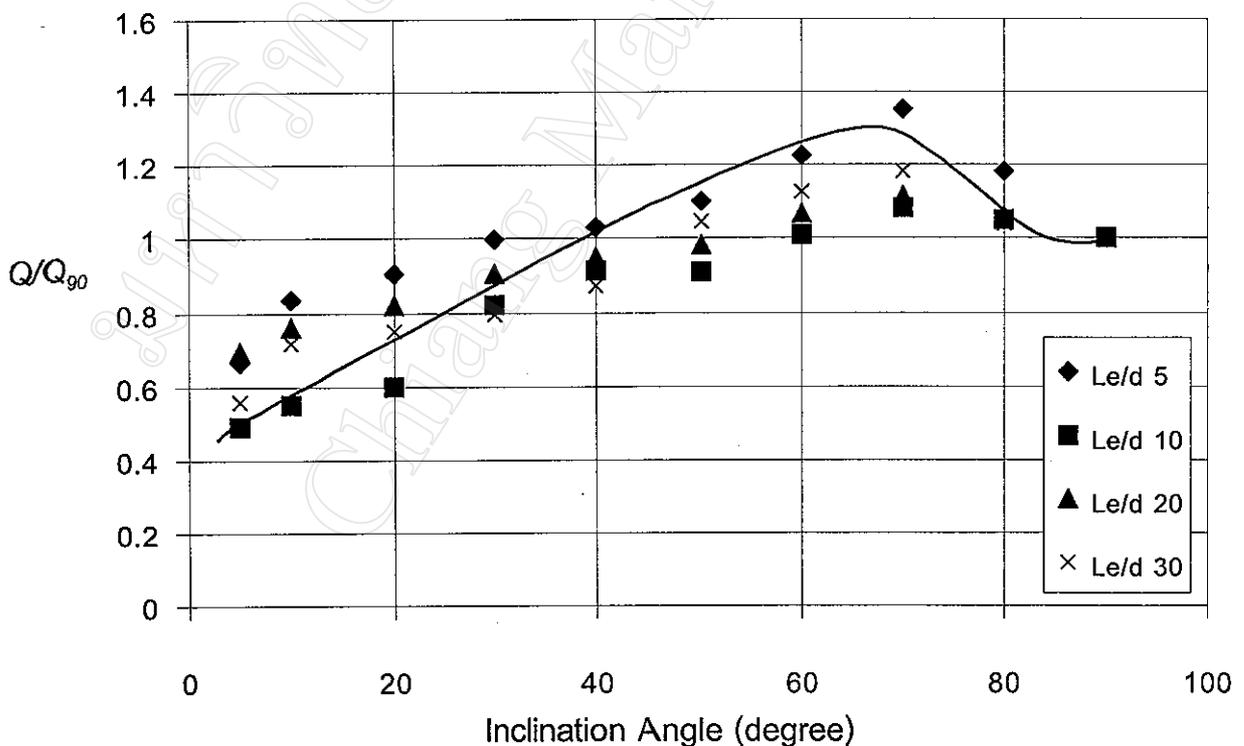
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบท่อเทอร์โมไซโฟนที่ทำจาก HDPE นั้น สามารถแยกได้ดังนี้

#### 4.1 ผลของมุมเอียงต่อการส่งผ่านความร้อนและความต้านทานความร้อนรวม

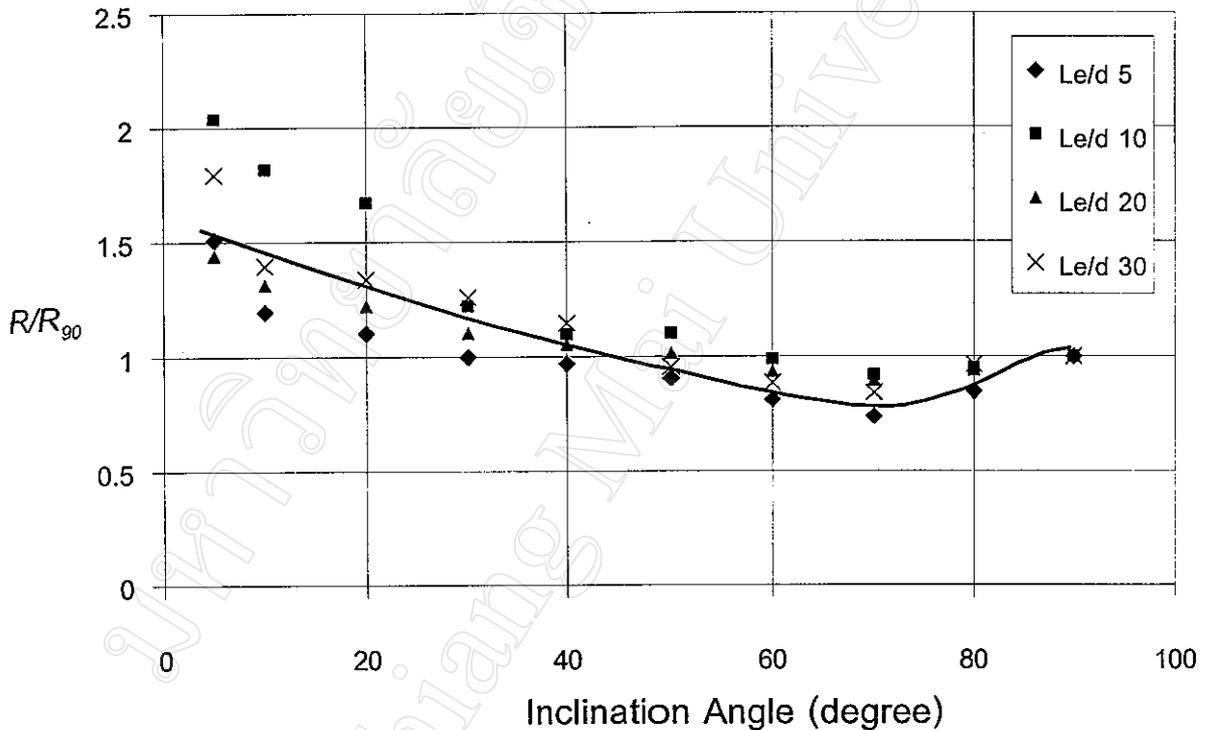
รูป 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเอียงการทำงาน (Inclination Angle) เทียบกับสัดส่วนของอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ตำแหน่งมุมเอียงต่าง ๆ ต่ออัตราการส่งผ่านความร้อนที่ตำแหน่งแนวตั้ง ( $Q/Q_{90}$ ) เส้นในกราฟคือเส้นแนวโน้มของ  $Q/Q_{90}$  ในการทดสอบท่อเทอร์โมไซโฟนที่ทำจาก HDPE กับสารทำงาน R113 พบว่าแนวโน้มของ  $Q/Q_{90}$  จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงการทำงานลดลงจาก 90 องศา และจะให้ค่าสูงสุดที่ตำแหน่งมุมเอียงการทำงานที่ 60 – 70 องศา รายละเอียดข้อมูล  $Q/Q_{90}$  สูงสุดของการทดสอบกับสารทำงาน R113 นั้นแสดงในตาราง ค – 1 และจากนั้นพบว่าค่า  $Q/Q_{90}$  จะค่อย ๆ ลดลงตามการลดลงของมุมเอียงการทำงาน ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดกับ



รูป 4.1 กราฟแสดง  $Q/Q_{90}$  เทียบกับมุมเอียงการทำงานของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R113 เป็นสารทำงาน

ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำการทดสอบทุก ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราส่วนสนัด

รูป 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเอียงการทำงานเทียบกับสัดส่วนของความต้านทานความร้อนรวมที่ตำแหน่งมุมเอียงต่าง ๆ ต่อความต้านทานความร้อนรวมที่ตำแหน่งแนวตั้ง ( $R/R_{90}$ ) เส้นในกราฟคือเส้นแนวโน้มของ  $R/R_{90}$  พบว่าแนวโน้มของ  $R/R_{90}$  จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมุมเอียงการทำงานลดลงจาก 90 องศา และจะให้ค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งมุมเอียงการทำงานที่ 60 – 70 องศา รายละเอียดการทดสอบค่า  $R/R_{90}$  ต่ำสุดเมื่อทดสอบกับสารทำงาน R113 แสดงในตาราง ค-5 และจากนั้นพบว่า ค่า  $R/R_{90}$  จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามการลดลงของมุมเอียงการทำงาน



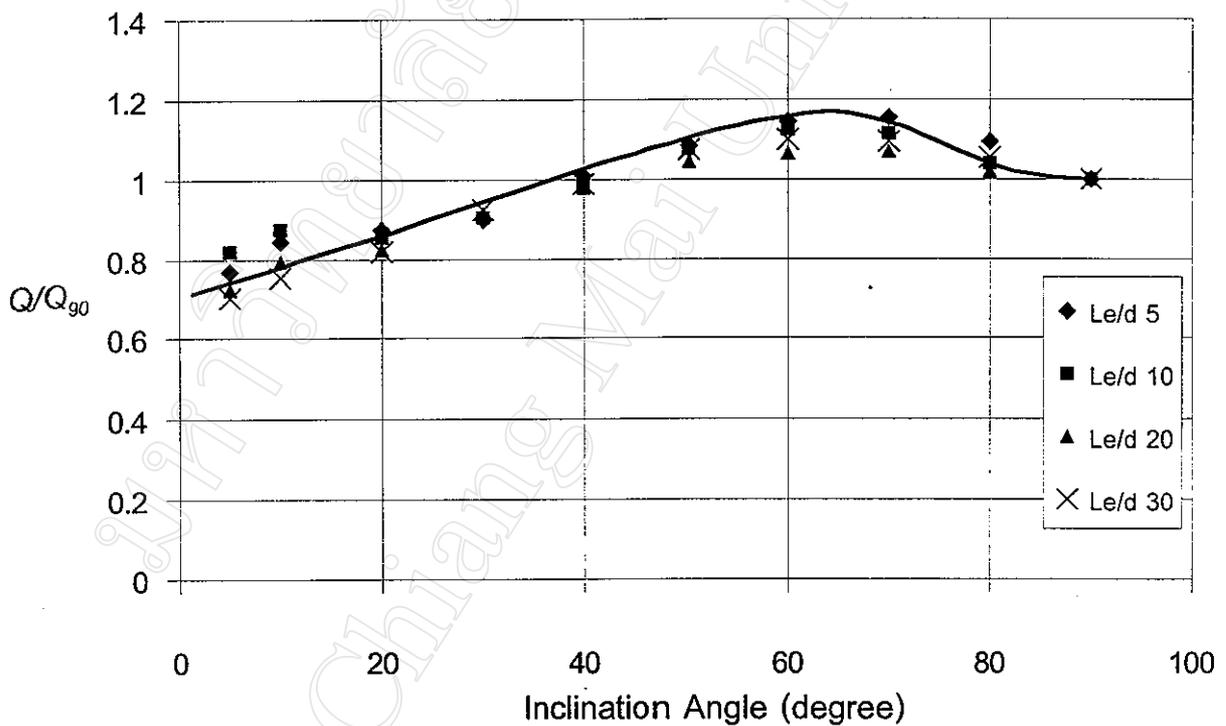
รูป 4.2 กราฟแสดง  $R/R_{90}$  เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร

และใช้ R113 เป็นสารทำงาน

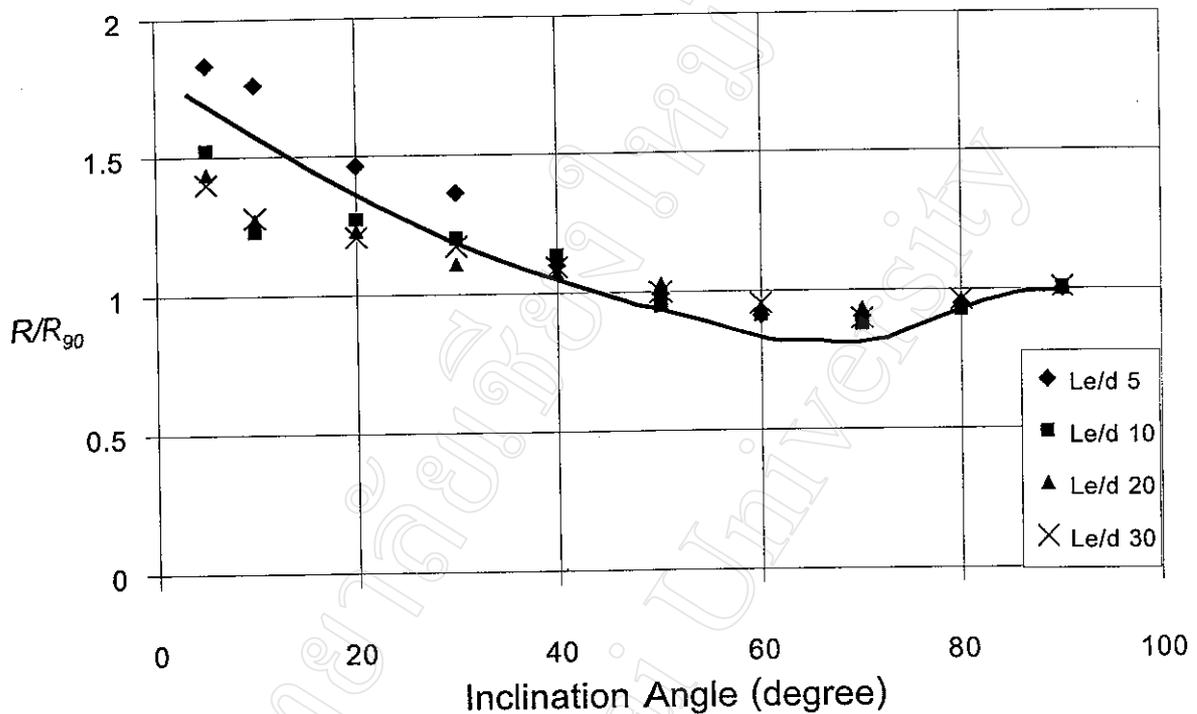
ผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการทดสอบ Terdtoon et. al. [19] ที่พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนมุมเอียงการทำงานจากตำแหน่งแนวตั้งแล้ว ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมค่าหนึ่งจะให้ค่าการส่งผ่านความร้อนสูงกว่าการทำงานที่ตำแหน่งแนวตั้งและให้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำกว่าที่ตำแหน่งแนวตั้ง แต่จากการทดสอบของ Terdtoon et. al. [19] นั้นได้ทำการทดสอบกับท่อโลหะกับสารทำงาน R113 ช่วงมุมเอียงการทำงานที่ให้ค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุดและให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด อยู่ที่ช่วงมุมประมาณ 50 องศา ซึ่งแตกต่างไปจากผลการทดสอบของสารทำงาน R113 กับท่อ HDPE ซึ่งมีมุมการทำงานที่ให้ค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่ช่วง 60-70 องศา ซึ่งสามารถตั้ง

สมมติฐานได้ว่าลักษณะการเปียก (Wettability) ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE นั้น แตกต่างไปจากท่อโลหะ ซึ่งหมายถึงค่าแรงตึงผิวระหว่างสารทำงานกับวัสดุท่อที่มีผลต่ออัตราการส่งผ่านความร้อน ทำให้ลักษณะการเปียกของฟิล์มของเหลวภายในท่อแตกต่างกันออกไปนั่นเอง

ผลของมุมเอียงการทำงานต่อการส่งผ่านความร้อนและความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ที่ใช้สารทำงาน R11 นั้น มีผลเช่นเดียวกันกับผลจากการใช้สารทำงาน R113 ดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4 ค่า  $Q/Q_{90}$  สูงสุด และ  $R/R_{90}$  ต่ำสุดของการทดสอบกับสารทำงาน R11 แสดงในตาราง ค-2 และ ค-6 ตามลำดับ ซึ่งยังคงพบว่าช่วงมุมเอียงที่ให้ค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุดและความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด ที่ทุก ๆ ค่าอัตราส่วนพื้นที่ทำการทดสอบคือช่วงมุมเอียงการทำงาน 60-70 องศา



รูป 4.3 กราฟแสดง  $Q/Q_{90}$  เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R11 เป็นสารทำงาน



รูป 4.4 กราฟแสดง  $R/R_{90}$  เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R11 เป็นสารทำงาน

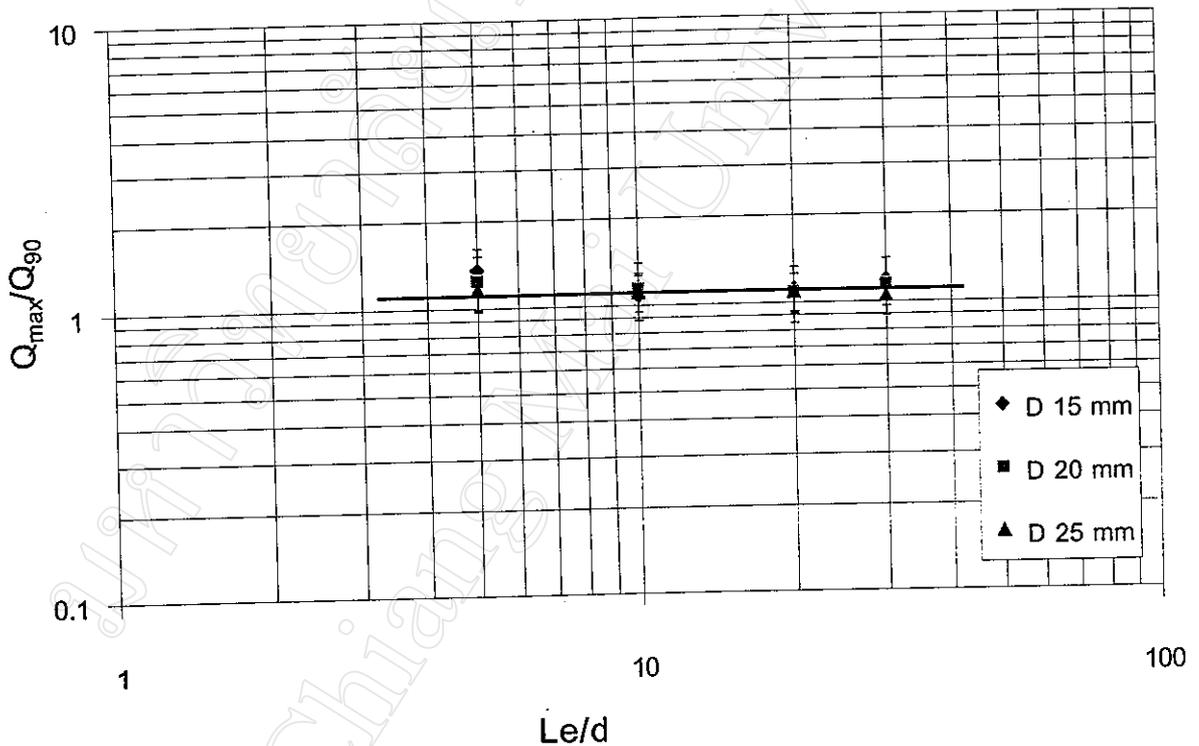
#### 4.2 ผลของอัตราส่วนสนทัดที่มีต่อการส่งผ่านความร้อน

การทดสอบสำหรับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ที่ใช้ R113 เป็นสารทำงานนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสนทัดจาก 5 ไปเป็น 30 จะทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 18.00 วัตต์ เป็น 109.87 วัตต์ กรณีสำหรับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรที่ใช้ R113 เป็นสารทำงานนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสนทัดจาก 5 ไปเป็น 30 จะทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 38.11 วัตต์ เป็น 150.81 วัตต์ ซึ่งรายละเอียดของความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในตาราง ค-3 ในภาคผนวก ค

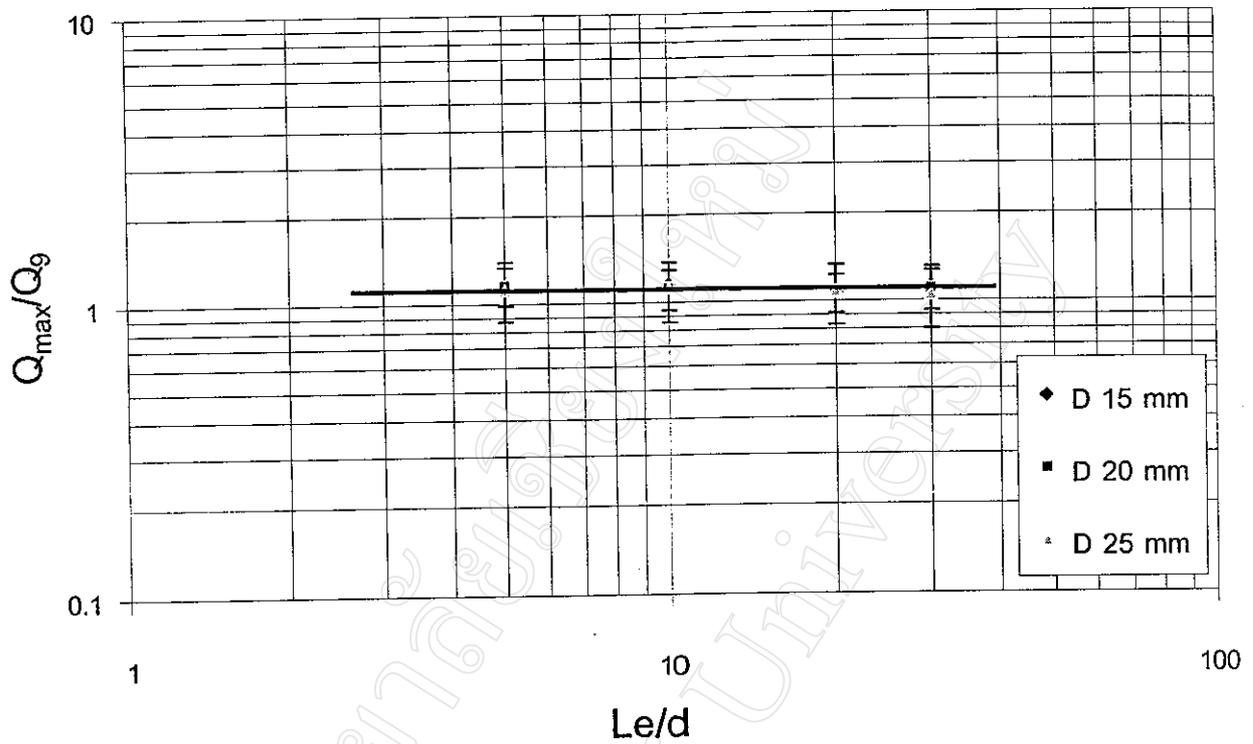
สำหรับกรณีของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตรที่ใช้สารทำงาน R11 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสนทัดจาก 5 ไปเป็น 30 จะทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 44.52 วัตต์ เป็น 82.11 วัตต์ กรณีสำหรับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรที่ใช้ R113 เป็นสารทำงานนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสนทัดจาก 5 ไปเป็น

30 จะทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 44.61 วัตต์ เป็น 182.45 วัตต์ ซึ่งรายละเอียดของความสัมพันธ์ดังกล่าวคงแสดงในตาราง ค-4 ในภาคผนวก ค

รูป 4.5 และ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัด ( $Le/d$ ) เทียบกับค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่ตำแหน่งมุมเอียงต่อค่าการส่งผ่านความร้อนที่ตำแหน่งแนวตั้ง ( $Q_{max}/Q_{90}$ ) ของการทดสอบกับ R113 และ R11 ตามลำดับ เส้นในกราฟทั้งสองเป็นเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ดังกล่าว จากการทดสอบท่อเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE กับสารทำงานทั้งสองชนิดพบว่า อัตราส่วนสนทัดที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลต่อค่า  $Q_{max}/Q_{90}$  เลยดังจะพบว่าเส้นแนวโน้มจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งผลสอดคล้องกับการทดสอบของ Terdtoon et. al. [20] ที่ทำการทดสอบกับท่อโลหะภายใต้สภาวะการทำงานปกติ พบว่าค่า  $Q_{max}/Q_{90}$  จะมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสนทัด



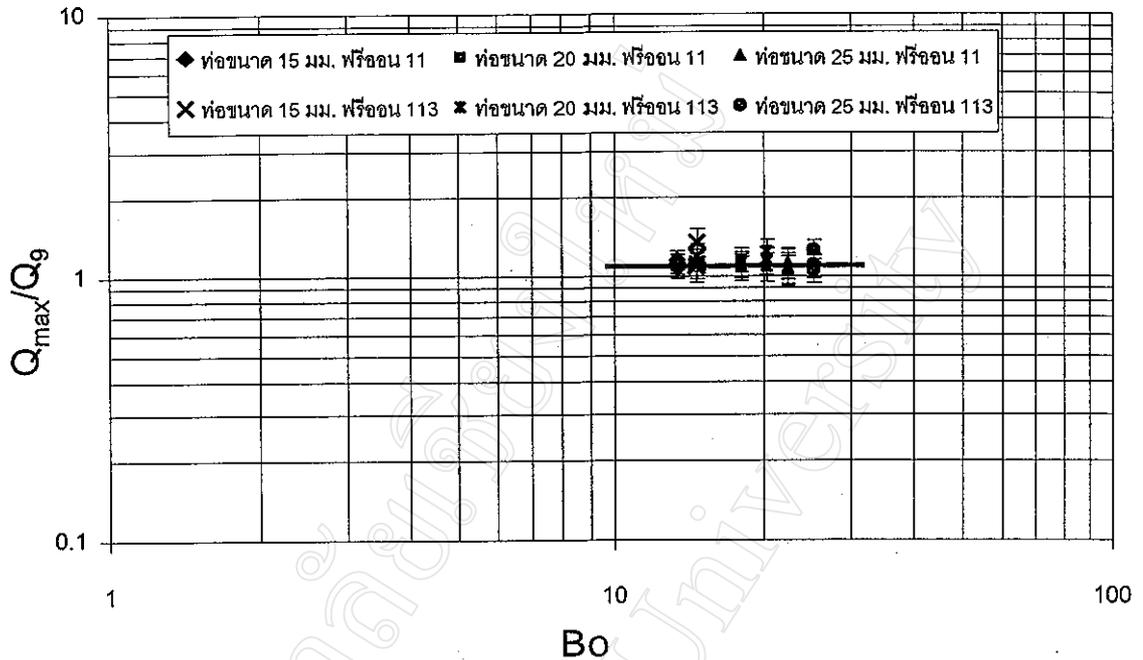
รูป 4.5 ผลของ  $Le/d$  กับ  $Q_{max}/Q_{90}$  ของเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE ที่ใช้สารทำงานเป็น R113



รูป 4.6 ผลของ  $Le/d$  กับ  $Q_{max}/Q_{90}$  ของเทอร์โมพลาสติกแบบ HDPE ที่ใช้สารทำงานเป็น R11

#### 4.3 ผลของตัวเลขของบอนด์ที่มีต่อการส่งผ่านความร้อน

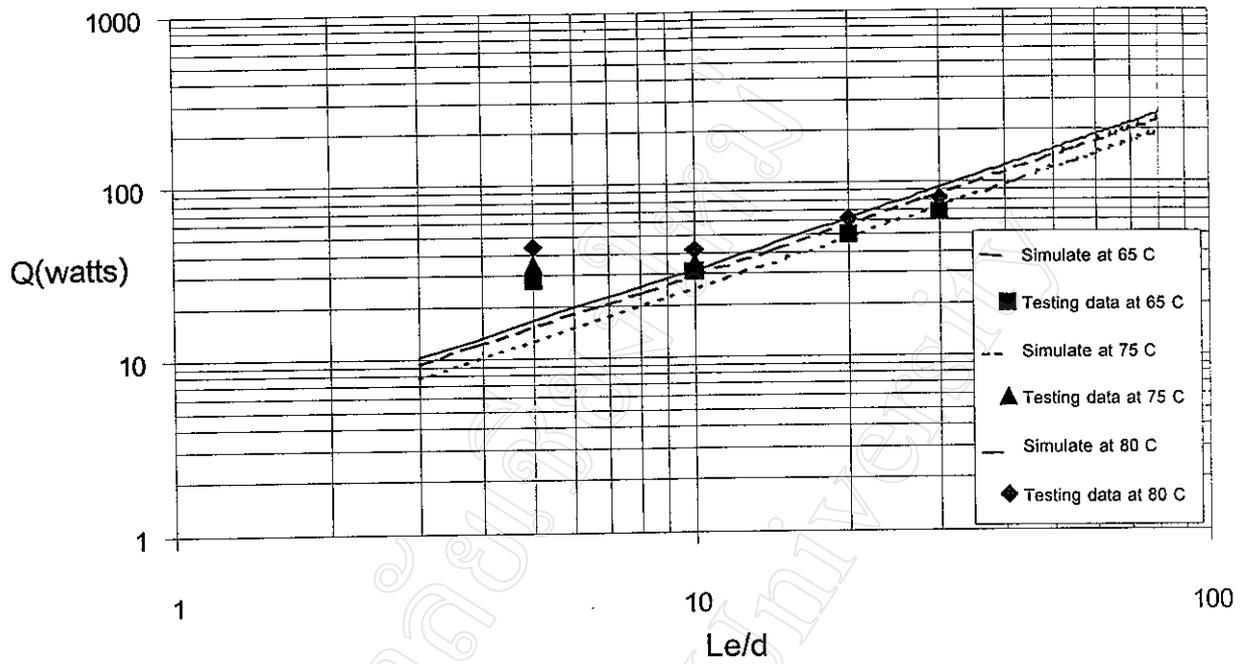
รูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของบอนด์ ( $B_o$ ) เทียบกับค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่ตำแหน่งมุมเอียงต่อค่าการส่งผ่านความร้อนที่ตำแหน่งแนวตั้ง ( $Q_{max}/Q_{90}$ ) ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ค่าตัวเลขของบอนด์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อ  $Q_{max}/Q_{90}$  แต่อย่างใด ซึ่งผลการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Terdtoon et. al. [20] ที่ทำการทดสอบกับท่อโลหะและใช้สารทำงานหลายชนิด ภายใต้อุณหภูมิการทำงานปกติ พบว่า ค่าตัวเลขของบอนด์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อ  $Q_{max}/Q_{90}$  เช่นเดียวกัน



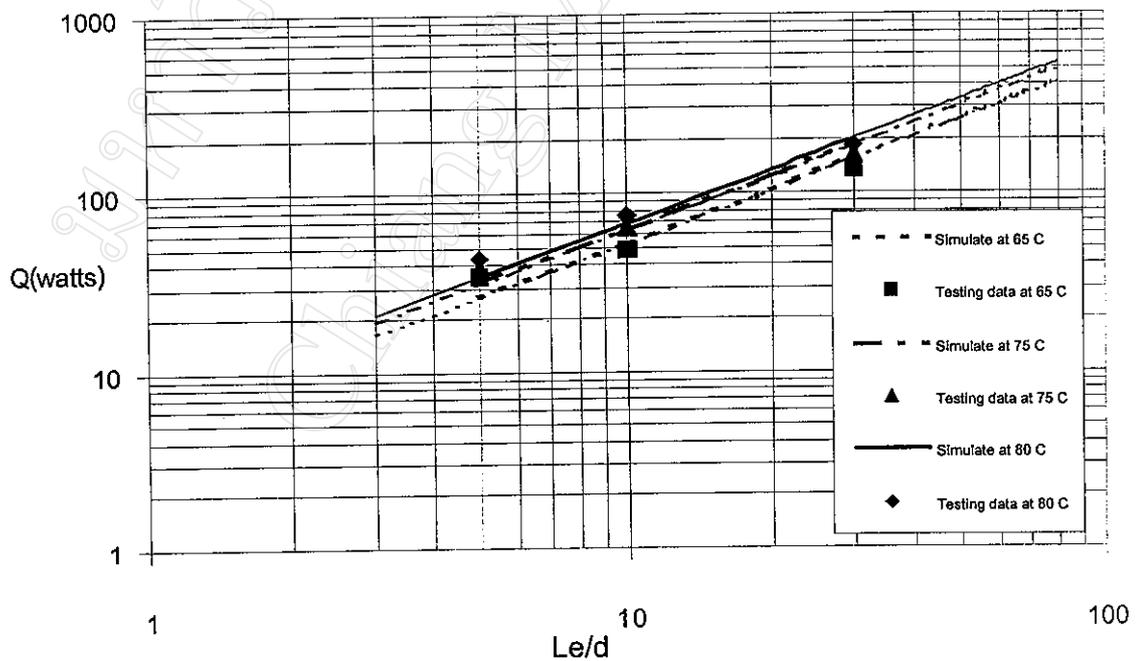
รูป 4.7 ผลของตัวเลขของบอนด์ กับ  $Q_{\max}/Q_{90}$  ของเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE

#### 4.4 การกระจายอุณหภูมิ

จากแบบจำลองของ Shiraishi [17] ที่ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซโฟนแบบโลหะเอาไว้ ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบผลจากการทดสอบ ซึ่งในแบบจำลองทางเอมพิริคัลของ Shiraishi นั้นต้องใช้ค่าการทำนายการส่งผ่านความร้อนที่อ้างอิงจากเอกสาร ESDU 81038 [11] ควบคู่กัน ตามสมการ (2.29) – (2.32) พบว่า ค่าการส่งผ่านความร้อนดังกล่าวนี้คำนวณได้จากแบบจำลองทางความร้อนจากเอกสาร ESDU 81038 [11] ซึ่งเป็นการคำนวณหาสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของเทอร์โมไซโฟนในแนวตั้งนั้น ผลการทดสอบของเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE อัตราส่วนสนทัด 5 ใช้สารทำงานเป็น R11 ค่าการส่งผ่านความร้อนที่ได้จากแบบจำลองทางความร้อนนั้นต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 31.38, 23.10 และ 28.65% สำหรับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าที่ทดสอบ 65, 75 และ 80°C ตามลำดับ และในขณะที่เมื่ออัตราส่วนสนทัด 30 นั้น ค่าการส่งผ่านความร้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางความร้อนนั้นมีค่าสูงกว่าการทดสอบ 13.41, 10.97 และ 9.01% สำหรับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าที่ทดสอบ 65, 75 และ 80°C ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.8 และ 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดกับค่าการส่งผ่านความร้อน เมื่อเส้นในรูปนั้นคำนวณได้จากแบบจำลองทางความร้อนจากเอกสาร ESDU 81038 [11]

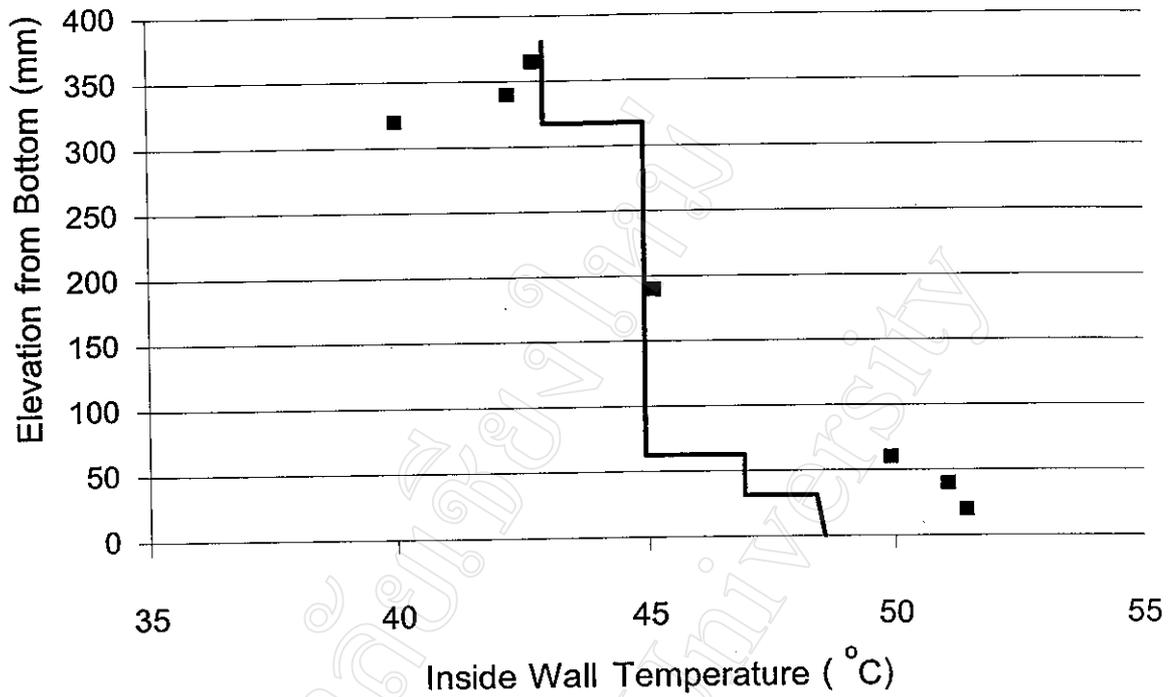


รูป 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านความร้อนของการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางความร้อนจาก ESDU 81038 [11] ของสารทำงาน R11 ท่อขนาด 15 มิลลิเมตร

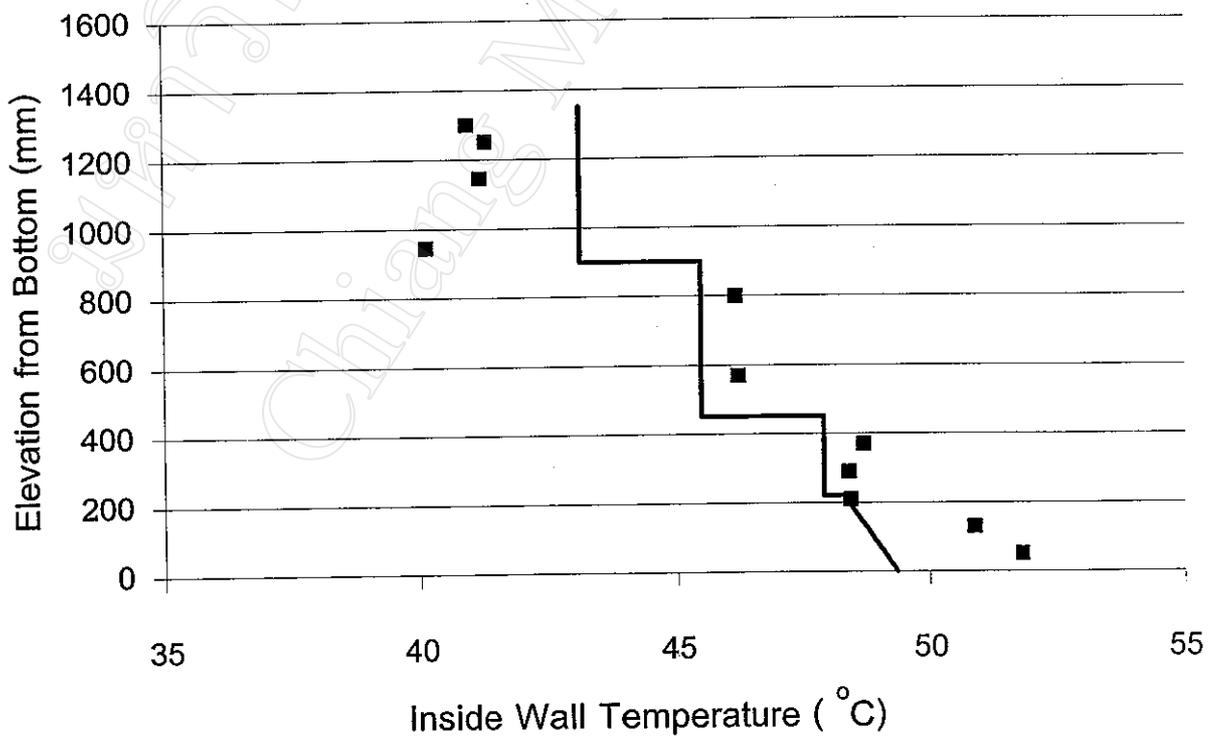


รูป 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านความร้อนของการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางความร้อนจาก ESDU 81038 [11] ของสารทำงาน R11 ท่อขนาด 25 มิลลิเมตร

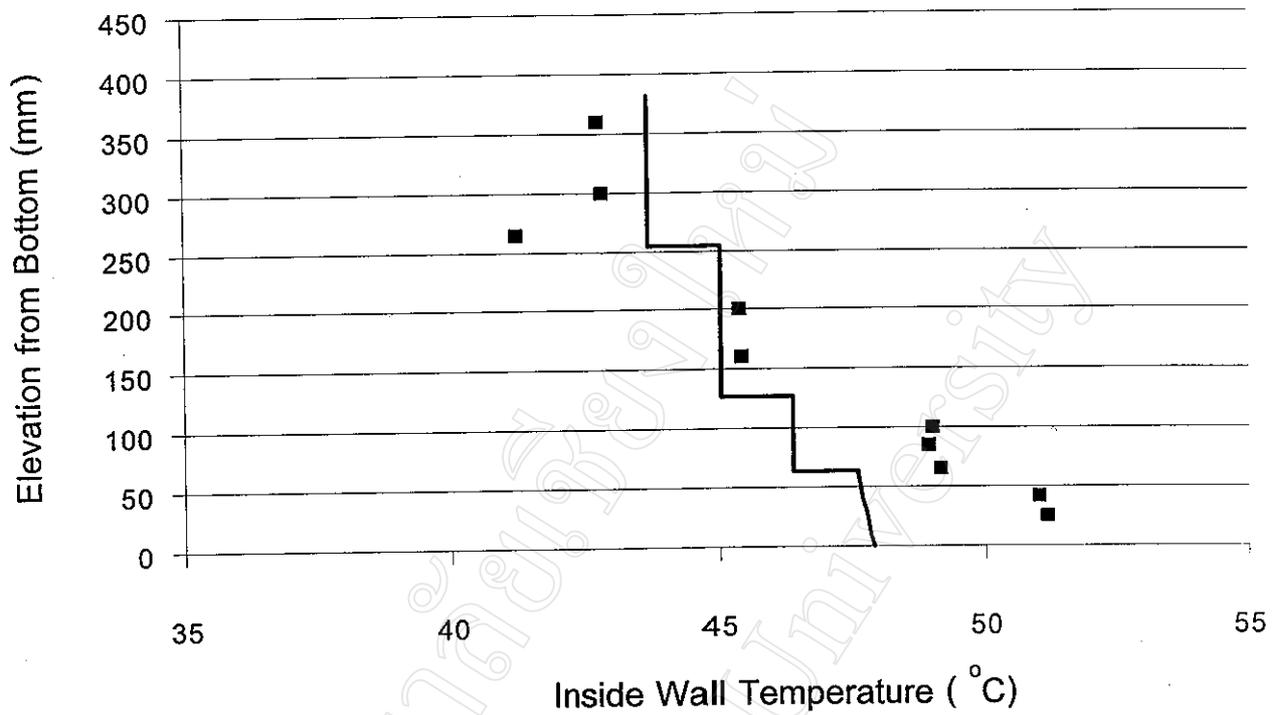
และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการทดสอบกับแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อนั้นสามารถแสดงในรูป 4.10 ถึง 4.17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อกับระดับความสูงของท่อทดสอบ เส้นในกราฟเป็นผลการคำนวณจากแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อของ Shiraiishi ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้ยังไม่สามารถทำนายผลของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ได้ดีนักทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อของ Shiraiishi ร่วมกับแบบจำลองทางความร้อนจากเอกสาร ESDU 81038[11] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว



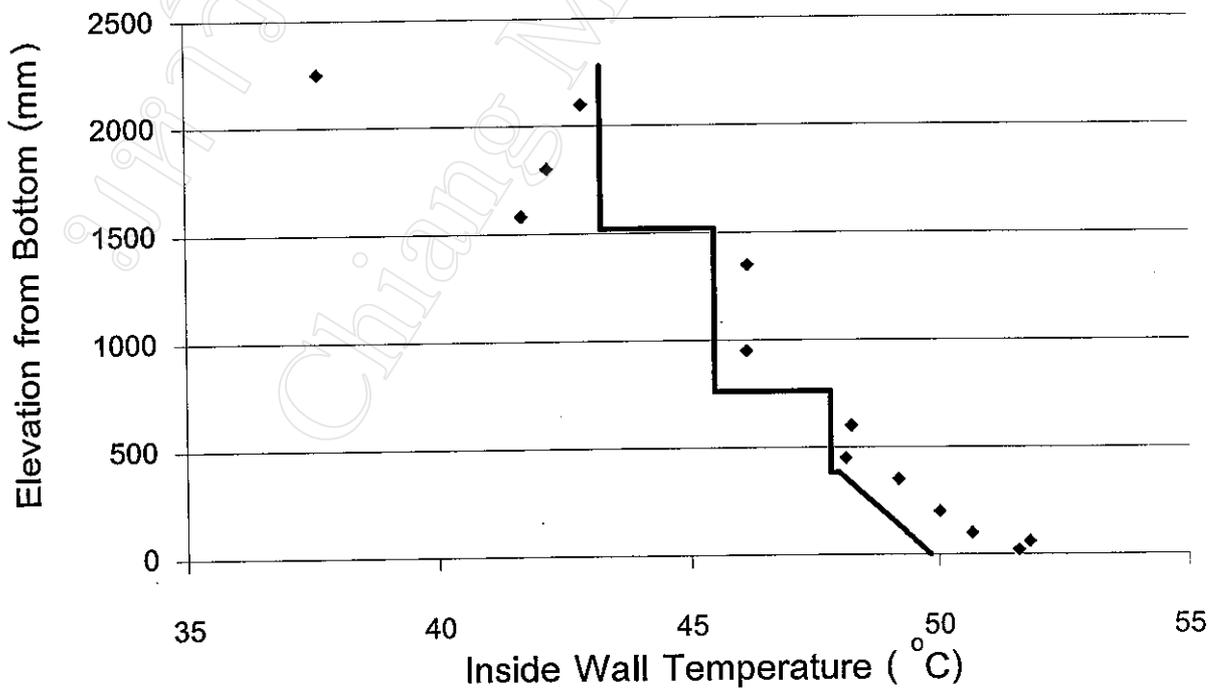
รูป 4.10 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร  $Le/d = 5$  ใช้ R113 เป็นสารทำงาน



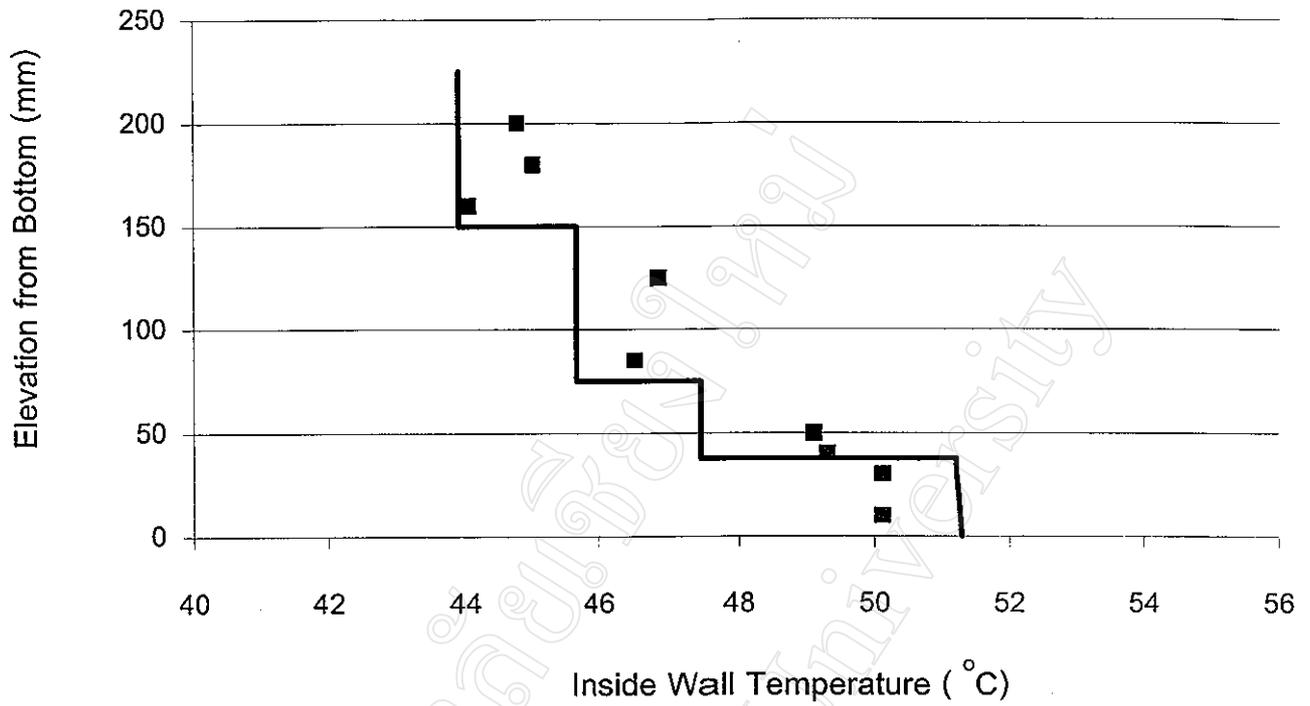
รูป 4.11 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร  $Le/d = 30$  ใช้ R113 เป็นสารทำงาน



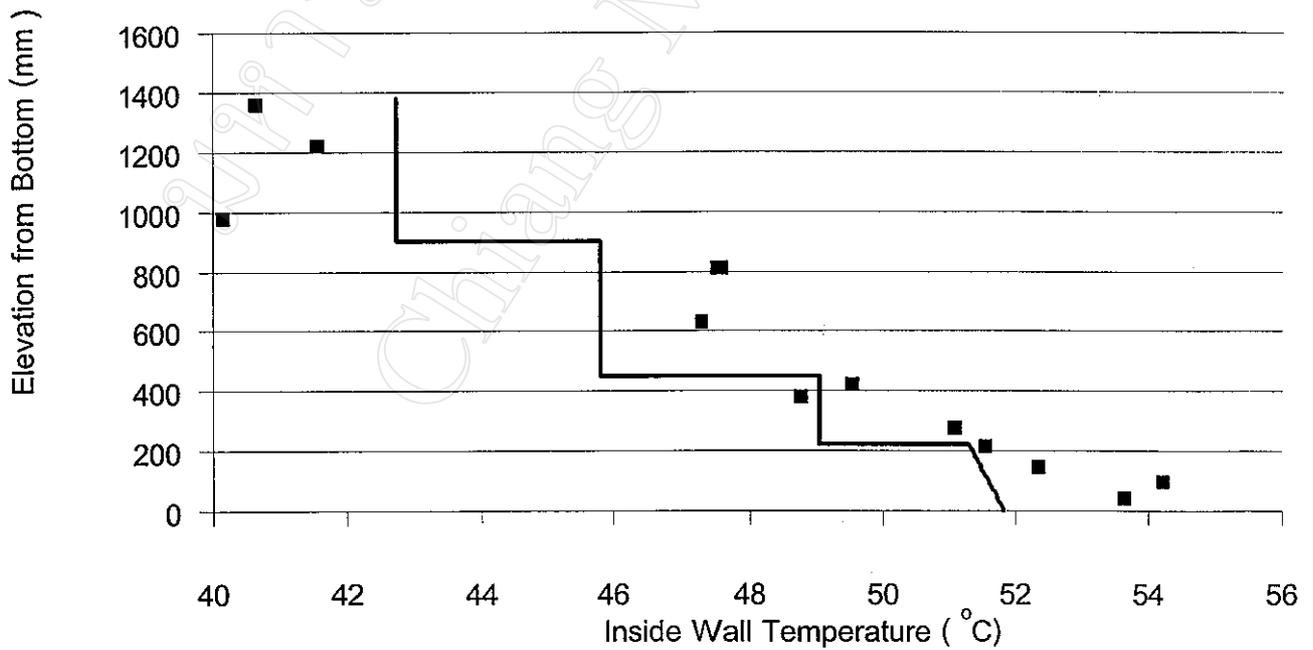
รูป 4.12 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร  $Le/d = 5$  ใช้ R113 เป็นสารทำงาน



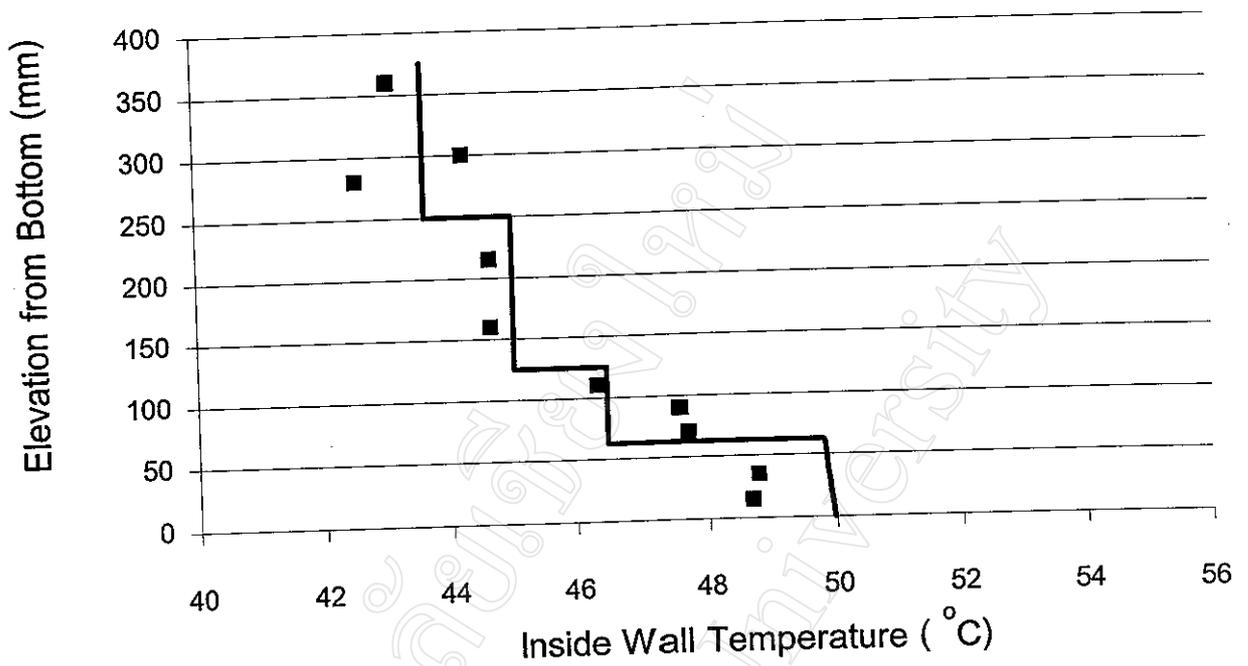
รูป 4.13 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร  $Le/d = 30$  ใช้ R113 เป็นสารทำงาน



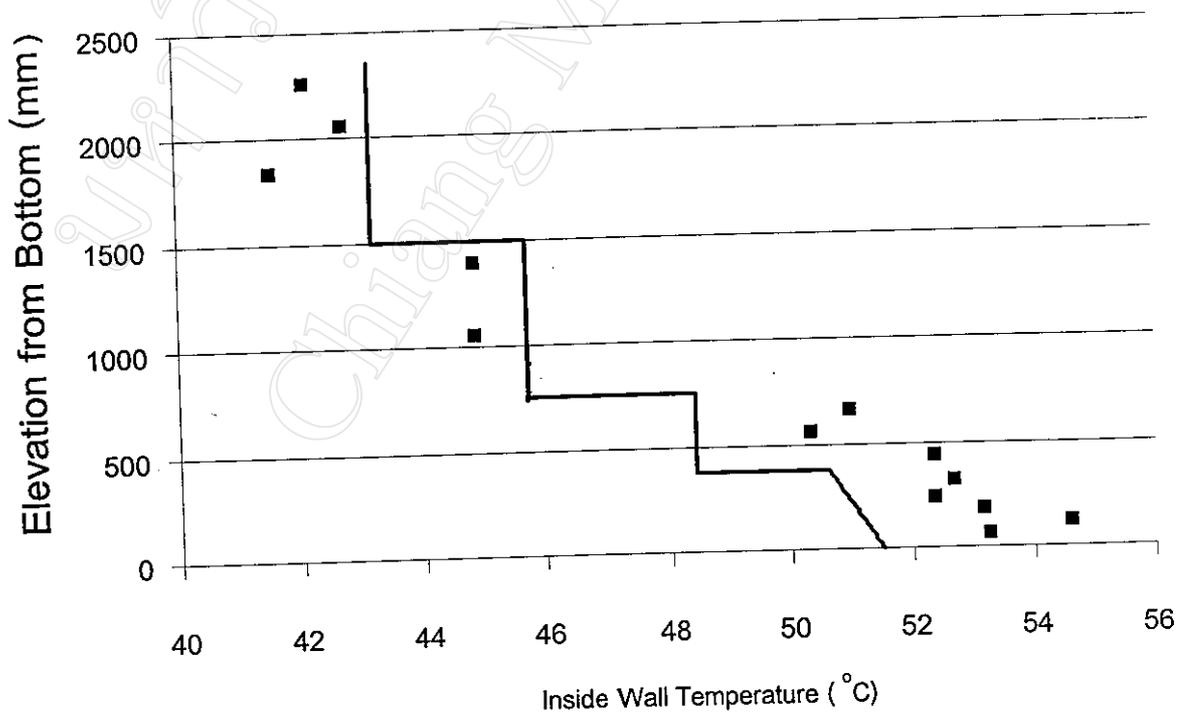
รูป 4.14 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร  $Le/d = 5$  ใช้ R11 เป็นสารทำงาน



รูป 4.15 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร  $Le/d = 30$  ใช้ R11 เป็นสารทำงาน



รูป 4.16 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร  $Le/d = 5$  ใช้ R11 เป็นสารทำงาน

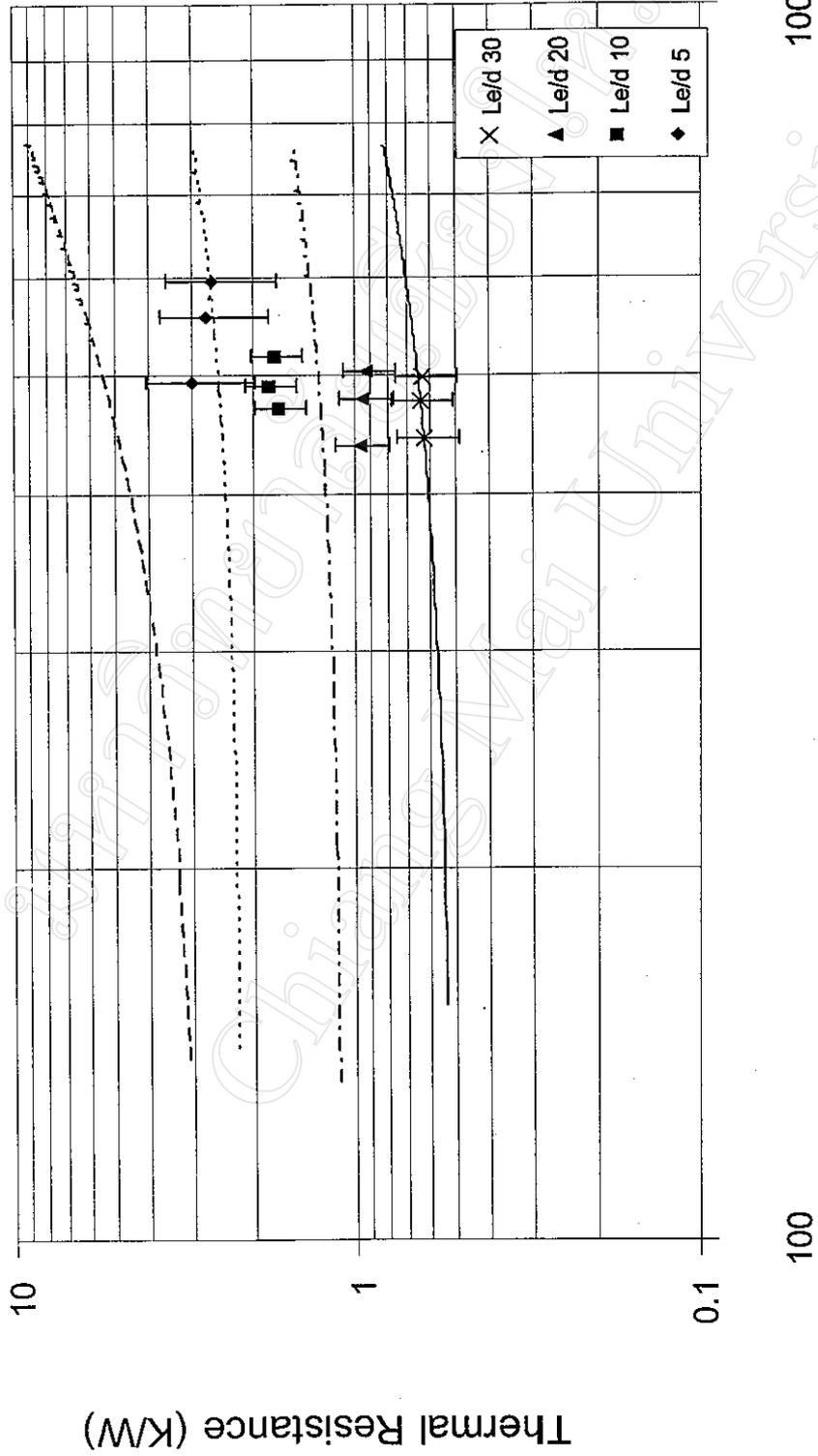


รูป 4.17 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร  $Le/d = 30$  ใช้ R11 เป็นสารทำงาน

#### 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อนกับความต้านทานความร้อนรวม

รูป 4.18 - 4.23 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ เทียบกับความต้านทานความร้อนรวม เส้นกราฟแสดงถึงผลการทำนายจากแบบจำลองทางความร้อนจากเอกสาร ESDU 81038[11] ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะว่าความต้านทานความร้อนรวมจะเพิ่มตามการเพิ่มของอัตราการส่งผ่านความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ผลจากการทดสอบท่อเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE กับสารทำงานทั้งสองชนิด พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความผิดพลาด  $\pm 45\%$  สำหรับท่อเทอร์โมไซโฟนขนาด 15 มิลลิเมตร อัตราส่วนสนทัด 5 และ  $\pm 20\%$  สำหรับท่อเทอร์โมไซโฟนขนาด 25 มิลลิเมตร อัตราส่วนสนทัด 30 โดยใช้สารทำงานคือ R113 สำหรับสารทำงาน R11 นั้นพบว่า สำหรับท่อเทอร์โมไซโฟนขนาด 15 มิลลิเมตร อัตราส่วนสนทัด 5 มีค่าความผิดพลาดในช่วง  $\pm 60\%$  และ  $\pm 15\%$  สำหรับท่อขนาด 25 มิลลิเมตร อัตราส่วนสนทัด 30 พบว่าผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จากการทดสอบ ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Shiraiishi [17] ที่พบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมจะลดลงเมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น

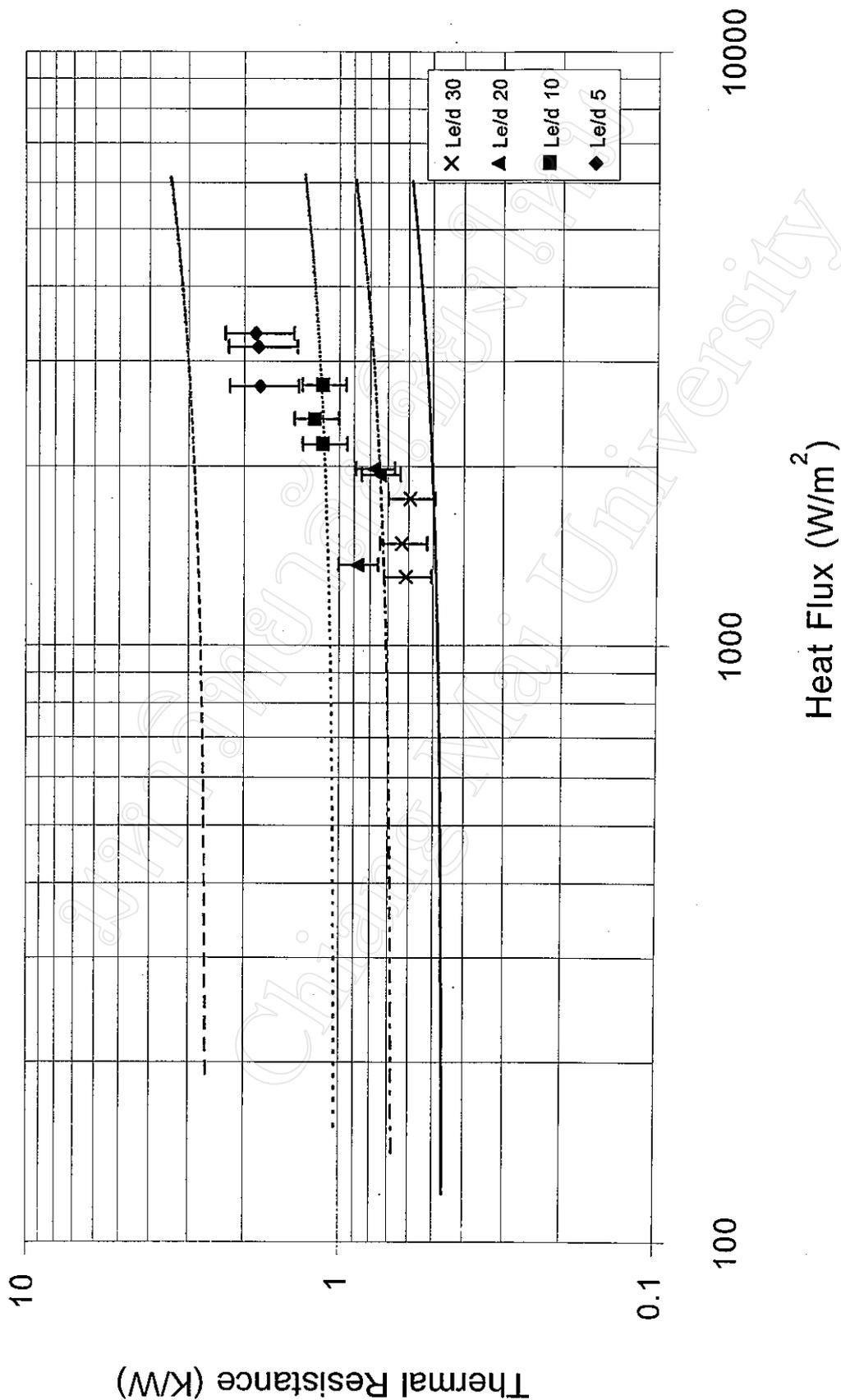
ซึ่งจากผลการทดสอบเมื่อวิเคราะห์ตามค่าการส่งผ่านความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนรวมแล้ว พบว่าแบบจำลองของ ESDU 81038 [11] นั้นไม่สามารถทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE ได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้อาจตั้งสมมติฐานได้ว่าเกิดจากค่าการนำความร้อนของวัสดุท่อ กล่าวคือ ในแบบจำลองทางความร้อนจากเอกสาร ESDU 81038 นั้นมีเงื่อนไขข้อหนึ่ง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุท่อต้องมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อพลาสติกแบบ HDPE นั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน และลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุล [21] ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ไม่คงที่ จึงทำให้ผลการทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนดังกล่าวเกิดความคลาดเคลื่อน



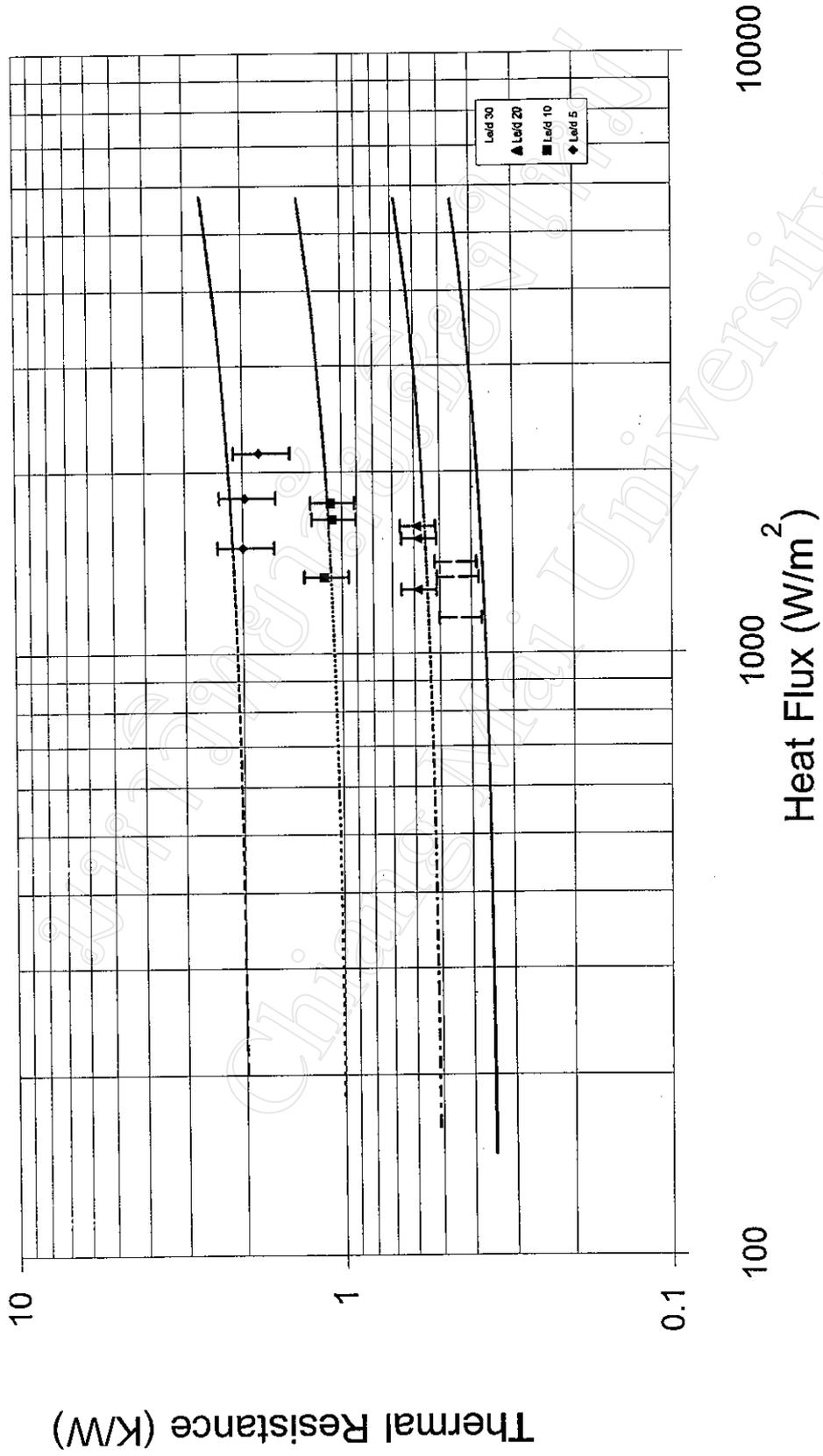
Heat Flux ( $W/m^2$ )

รูป 4.18 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่กับความต้านทานความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

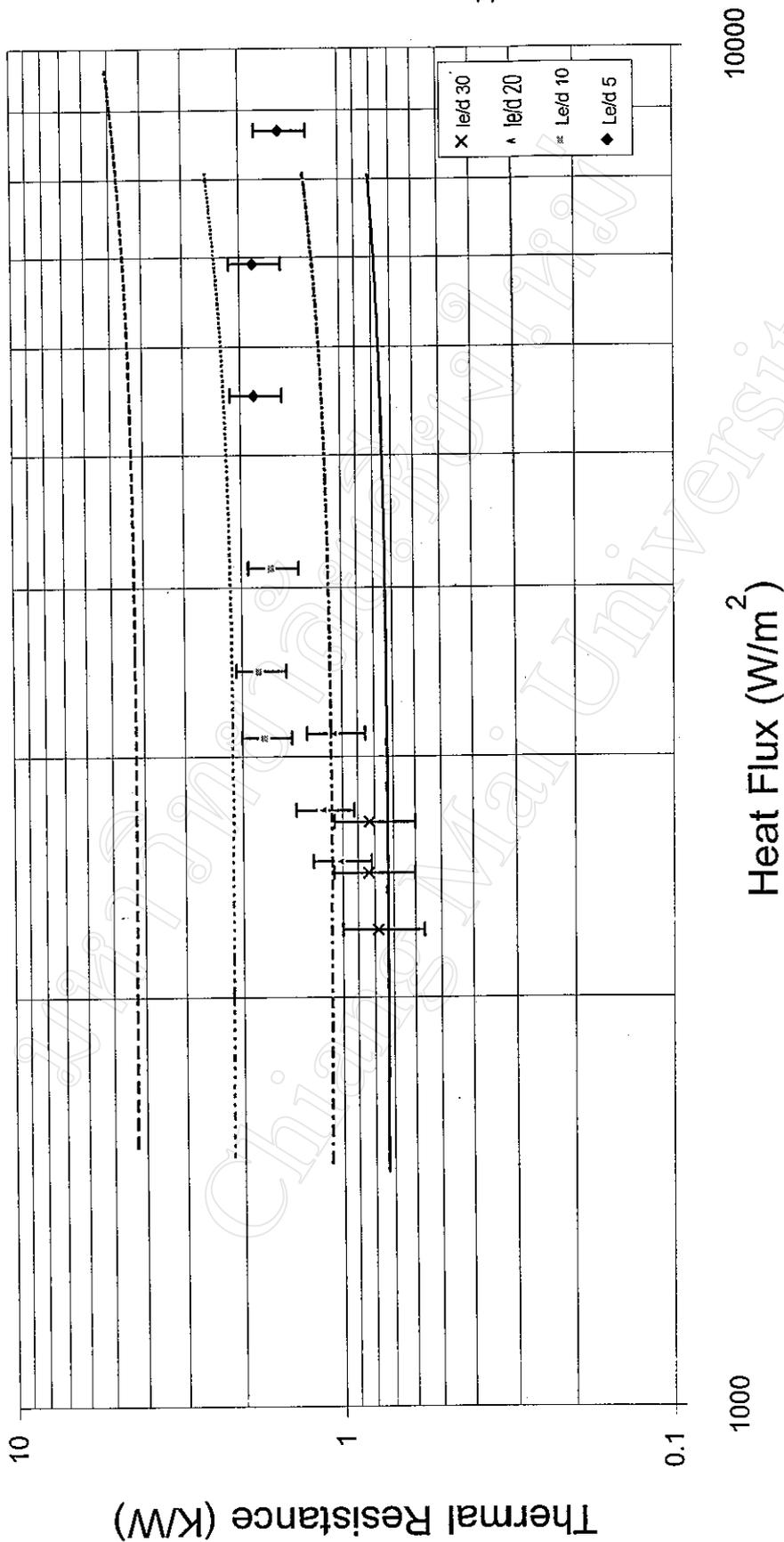
โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน



รูป 4.19 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซโฟนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน

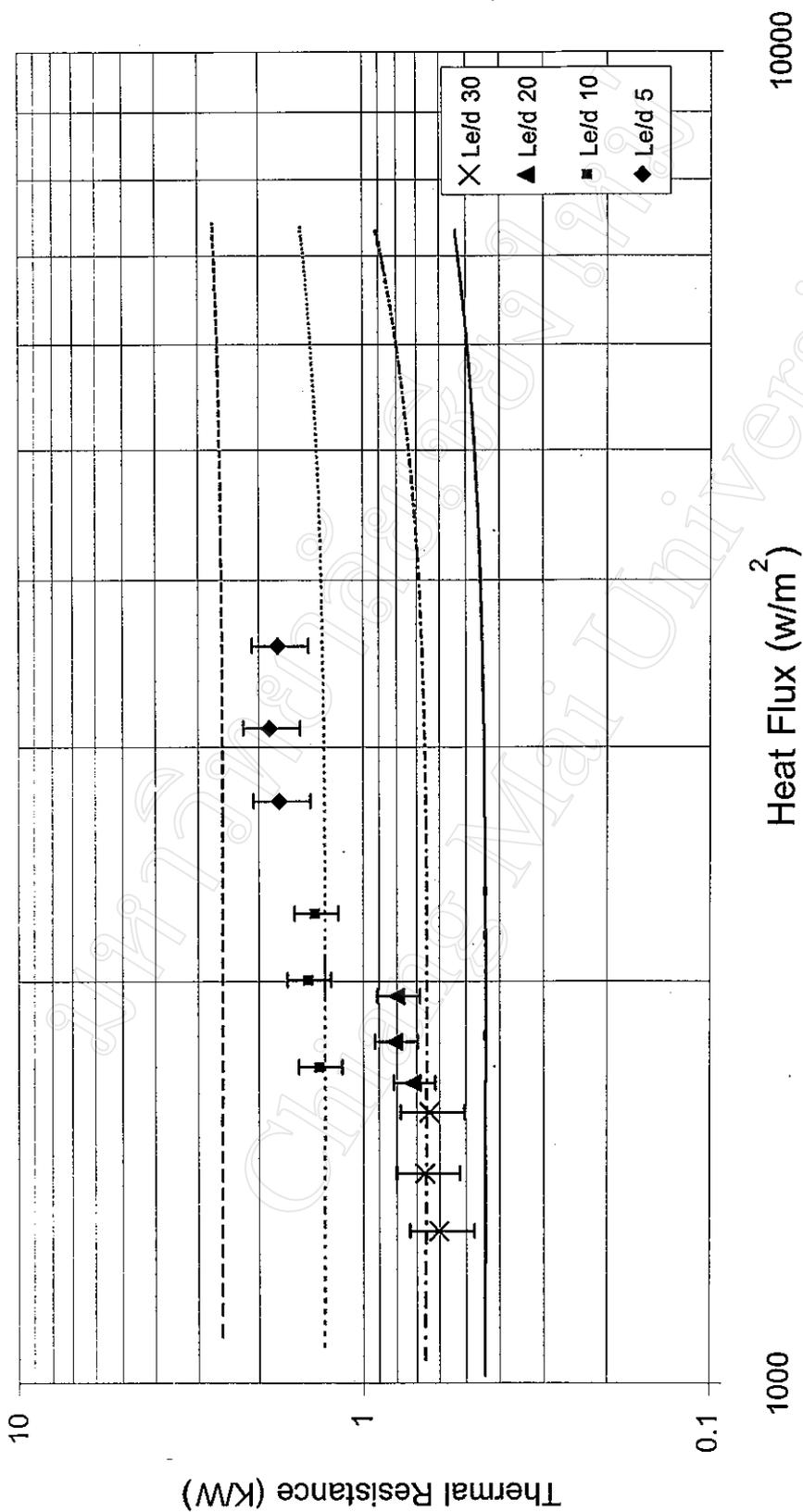


รูป 4.20 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โม โครโฟนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน



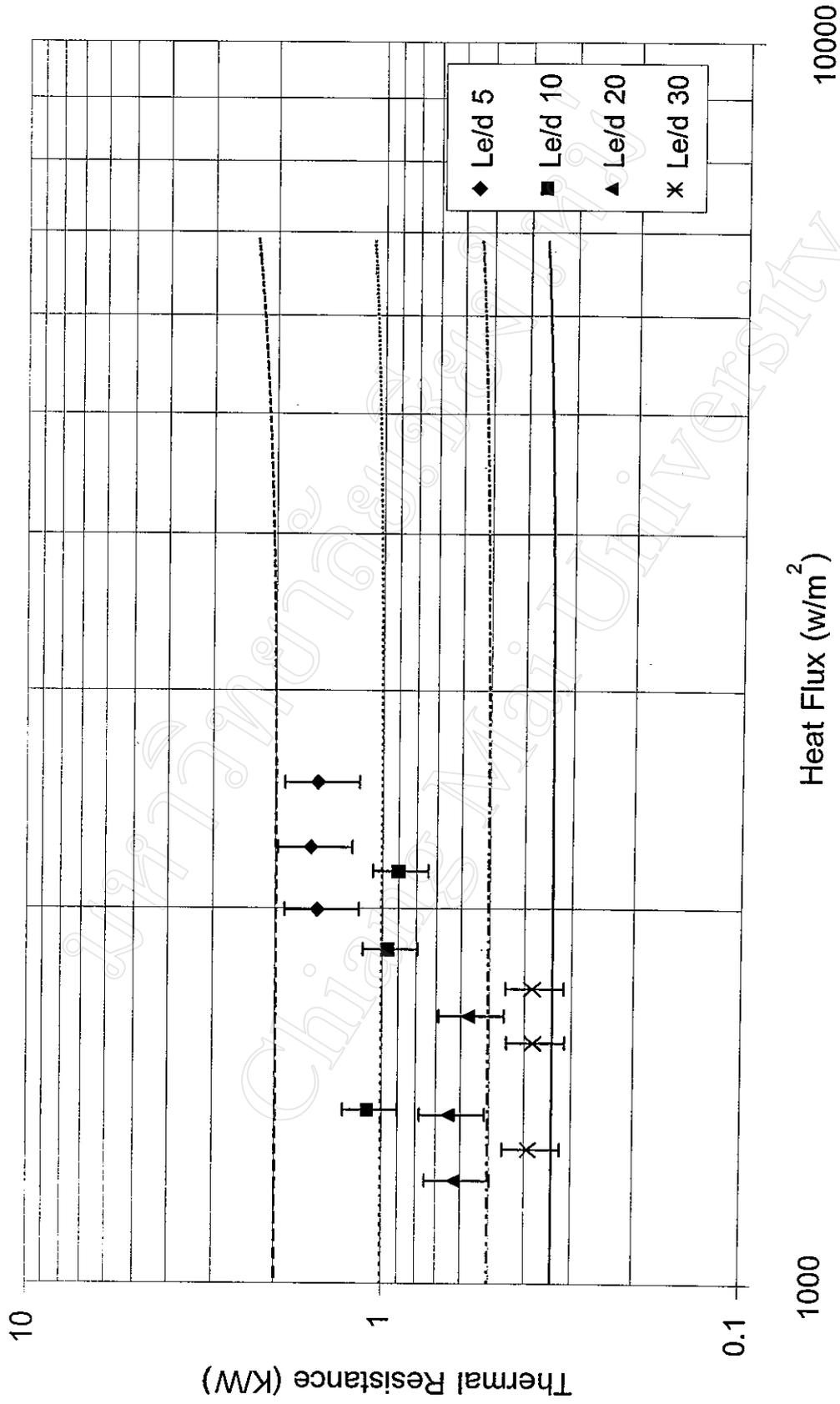
รูป 4.21 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน



รูป 4.22 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน



รูป 4.23 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของ เทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน