รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2543. **การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล เวอร์ชัน** 7-10. กรุงเทพมหานคร: ซี เค แอนด์ เอส โฟโต้สตูดิโอ.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2544. **การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows.** กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฆัมพร พันธ์ชูจิตร์ และประยงค์ ประทุมรัตน์. (ม.ป.ป.) **ความรู้เกี่ยวกับช่างยนต์: ทฤษฎีเครื่องยนต์ดีเซล**. (ม.ป.ท.)

ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. 2533. **การถ่ายเทความร้อน**. กรุงเทพมหานคร: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

ประณต กุลประสูตร. 2538. **เครื่องยนต์เล็ก (แก๊สโซลีน ดีเซล และแก๊สเหลว).** กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

มนูญ เคี่ยมการ. 2540. **หม้อน้ำรถยนต์**. กรุงเทพมหานคร: เรดิคอน.

สุธรรม ศรีเกษม, เมธินทร์ ทรงชัยกุล และสง่า ศรีศุภปรีดา. (ม.ป.ป.) **MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม**. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยรังสิต.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2534. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หม้อน้ำรถยนต์**.

ภาษาอังกฤษ

Achaichia, A.; and Cowell, T. A. 1988. Heat transfer and pressure drop characteristics of flat tube and louvered plated fin surfaces. **Experimental Thermal Fluid Science** 1: 147-157.

Bhatti, M. S.; and Shah, R. K. 1987. Turbulent and transition flow convective heat transfer in ducts. In S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung (eds.), **Handbook of Single-Phase Convective Heat transfer.** Canada: John Wiley & Sons.

Bowman, R. A.; Mueller, A. C.; and Nagle, W. M. 1940. Mean temperature difference in design. **Transactions of The A.S.M.E.**: 283-294.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Brooke, B.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; and Raman, R. 1998. **GAMS-A User's Guide**. Washington DC: The MathWorks.

Chang, Y. J.; and Wang C. C. 1996. Air side performance of brazed aluminum heat exchangers. **Journal of Enhanced Heat Transfer** 3 (1): 15-28.

Chang, Y. J.; and Wang, C. C. 1997. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 40 (3): 533-544.

Chang. Y. J.; Wang, C. C.; Shyu, R. J.; and Robert, Hu. 1995. Performance comparison between automotive flat tube condenser and round tube condenser. **ASME/JSME Thermal Engineering Conference** 4: 331-336.

Chang, Y. J.; Hsu, K. C.; Lin, Y. T.; and Wang, C. C. 2000. A generalized friction correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 43: 2237-2243.

Davenport, C. J. 1983. Correlation for heat transfer and flow friction characteristics of louvered fin. **AIChE Symposium Series** 79: 19-27.

David, A. W.; and Chattergy, R. 1978. **Introduction to Nonlinear Optimization: A Problem Solving Approach**. New York: Elsevier Science.

Dillen, E.; and Webb, R. L. 1994. A correlation prediction to predict heat transfer and friction for the louver fin geometry. **SAE International Congress**, Detroit, MI. SAE paper no.940504. cited in Webb, R. L.; Chang, Y. J., and Wang, C. C. 1995. Heat transfer and friction correlations for the louver fin geometry. **ImechE**: 533-541.

Dipprey, D. F.; and Sabersky, R. H. 1963. Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes in various Prandtl number. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 6: 329-353. cited in Webb, R. L. 1987. Enhancement of single-phase heat transfer. In S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung (eds.), **Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer**. Canada: John Wiley & Sons.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Douglas, P. L.; Mallick, S. K.; and Wagler, R. M. 1991. Synthesis of flexible thermally integrated distillation sequences. TransIChemE 69: 483-491. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Edgar, T. F.; and Himmelblau, D. M. 1988. **Optimization of Chemical Processes**. USA: McGraw-Hill.

Farrell, P.; Wert, K.; and Webb, R. 1991. Heat Transfer and Friction Characteristics of Turbulator Radiator Tubes. **SAE Transactions** 100: 218-230.

Floudas, C. A.; and Grossmann, I. E. 1987. Active constraint strategy for flexibility analysis in chemical process. **Computer Chemical Engineering** 11: 675-693. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Geankoplis, C. J. 1995. **Transport Process and Unit Operations**. 3rd. Singapore: Prentice-Hall.

Gnielinski, V. 1976. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering** 16: 359-368. cited in Bhatti, M. S.; and Shah, R. K. 1987. Turbulent and transition flow convective heat transfer in ducts. In S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung (eds.), **Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer**. Canada: John Wiley & Sons.

Gomory, R. E. 1960. An algorithm for the mixed integer problem. Rand Report R.M. 25797. cited in Singiresu, S. 1996. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 3 rd ed. Canada: McGraw-Hill..

Grossmann, I. E.; and Sargent, R. W. H. 1978. Optimum design of chemical plants with uncertain parameter. **AIChE Journal** 24: 1021-1028.

Halemane K. P.; and Grossmann, I. E. 1983. Optimal process design uncertainty. **AIChE Journal** 29: 425-433.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Han, J. C. 1984. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls. **Journal of Heat Transfer** 106: 774-781.

Holman, J. P.; and White, P. R. S. 1992. **Heat Transfer**. 7 th ed. Singapore: McGraw-Hill.

Ierapetritou, M. G.; Pistikopoulos, E. N.; and Floudas, C. A. 1996. Operational planning under uncertainty. **Computers Chemical Engineering** 20: 1499-1516.

Jone, O. C. 1976. An improvement in the calculation of turbulent friction in rectangular ducts. **Journal of Fluids Engineering** 98: 173-181. cited in Rohsenow, W. M.; and Hartnett, J. P. 1973. **Handbook of Heat Transfer**. New York: McGraw-Hill.

Kakac, S.; and Spalding, D. B. 1979. **Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles**. vol.1. pp.361-367. New York: Hemisphere Publishing. cited in Han, J. C. 1984. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls. **Journal of Heat Transfer** 106: 774-781.

Kays, W. M. 1940. Loss coefficients for abrupt changes in flow cross section with low Reynolds number flow in single and multiple tube systems, Tech. Rept 9, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Jan.1, 1950. **Transactions of the A.S.M.E.** 72:1067-1074.

Kays, W. M.; and London, A. L. 1984. **Compact Heat Exchanger**. 3 rd ed. New York: McGraw-Hill.

Land, A. H.; and Doig, A. 1960. An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica 28: 497-520. cited in Singiresu, S. 1996. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 3 rd ed. Canada: McGraw-Hill.

Nikuradse, J. 1950. Laws for flow in rough pipes. **NACA TM 1292**. cited in Han, J. C. 1984. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls. Journal of Heat Transfer 106: 774-781.

Nishida, N.; Ichickawa, A.; and Tazaki, E. 1974. Synthesis of optimal process system with uncertainty. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 16: 209-214. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Olsson, C. O.; and Sunden, B. 1996. Heat transfer and pressure drop characteristics of ten radiator tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 39 (15): 3211-3220.

Olsson, C. O.; and Sunden, B. 1995. Hydraulic and thermal performance of radiator tubes. **Vehicle Thermal Management System** VTMS-2: 457-462.

Optimization Toolbox: For Use with MATLAB-A User's Guide Version2. 2000. Massachusetts: The MathWorks.

Pistikopoulos, E. N.; and Grossmann. 1988. Optimal retrofit design for improving process flexibility in linear systems. **Computer Chemical Engineering** 12: 719-731. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Pistikopoulos, E. N.; and Grossmann. 1989. Optimal retrofit design for improving process flexibility in linear systems-II. **Computer Chemical Engineering** 13: 1087-1096. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Rao, S. S. 1979. **Optimization Theory and Applications.** India: Wiley Eastern.

Roetzel, W. 1973. Calculation of single phase pressure drop in heat exchangers considering the change of fluid properties along the flow path. **Warme- und Stoffubertragung** 1:3-13.

Roetzel, W.; and Nicole, F. J. L. 1975. Mean temperature difference for heat exchanger design- A general approximation explicit equation. **Journal of Heat Transfer** 97: 5-8.

Rohsenow, W. M.; and Hartnett, J. P. 1973. **Handbook of Heat Transfer.** New York: McGraw-Hill.

Rugh, J. P.; Pearson, J. T.; and Ramadhyani, S. 1992. A study of a very compact heat exchanger used for passenger compartment heating in automobiles. **Compact Heat Exchangers for Power and Process Industries,** ASME Symp. Ser.: 201: 15-24.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Sahnoun, A.; and Webb, R. L. 1992. Prediction of heat transfer and friction for the louver-fin geometry. **Journal of Heat Transfer** 114: 893-900. cited in Webb, R. L.; Chang, Y. J., and Wang, C. C. 1995. Heat transfer and friction correlations for the louver fin geometry. **ImechE**: 533-541.

Singiresu, S. 1996. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 3 rd ed. Canada: McGraw-Hill.

Sunden, B.; and Svantesson, J. 1992. Correlation of j- and f- factors for multilouvered heat transfer surfaces. **Proceedings of the 3 rd UK National Heat Transfer Conference**: 805-811. cited in Chang, Y. J.; and Wang, C. C. 1997. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 40 (3): 533-544.

Takamatsu, T.; Hashimoto, I.; and Shioya, S. 1973. On design margin for process systems with parameter uncertainty. **Journal of Chemical Engineering Japan** 6: 453-457. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. 2542. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Tanaka, T.; Itoh, M.; Kudoh, M.; and Tomita, A. 1984. Improvement of compact heat exchangers with inclined louvered fins. **Bulletin of JSME** 27: 219-226. cited in Chang, Y. J.; and Wang, C. C. 1997. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 40 (3): 533-544.

Using MATLAB version 6. 2000. Massachusetts: The MathWorks.

Wagler, R. M.; and Douglas, P. L. 1988. A method for the design of flexible distillation sequences. **The Canadian Journal of Chemical Engineering** 66: 529-590. อ้างถึงใน ธิดาพันธ์ ซื่อสัตยาวงศ์. 2542. **การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Webb, R. L. 1988. **PSU Radiators Test Data.** Unpublished data for five radiators. cited in Chang, Y. J.; and Wang, C. C. 1997. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 40 (3): 533-544.

Webb, R. L.; Chang, Y. J., and Wang, C. C. 1995. Heat transfer and friction correlations for the louver fin geometry. **ImechE**: 533-541.

Webb, R. L.; Eckert, E. R.; and Goldstein, R. J. 1971. Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 14: 601-617.

Webb, R. L.; and Jung, S. H. 1992. Air-side performance of enhanced brazed aluminum heat exchangers. **ASHARE Transactions** 98: Pt 2: 390-401.

Yaws, Carl L. 1999. **Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental Transport, Safety and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals.** McGraw-Hill.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
อุณหภูมิอ้างอิงและคุณสมบัติของของไหล

ก.1 การคำนวณอุณหภูมิอ้างอิงของน้ำและอากาศ (Roetzel, 1973)

อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ คำนวณได้จาก

$$T_{w,I} = \left(T_{w,1} - T\right)^{0.211}\left(T_{w,2} - T\right)^{0.789} + T \qquad \text{(ก.1)}$$

$$T_{w,II} = \left(T_{w,1} - T\right)^{0.789}\left(T_{w,2} - T\right)^{0.211} + T \qquad \text{(ก.2)}$$

อุณหภูมิอ้างอิงของอากาศ คำนวณได้จาก

$$T_{a,I} = \left(T_{a,1} - T\right)^{0.211}\left(T_{a,2} - T\right)^{0.789} + T \qquad \text{(ก.3)}$$

$$T_{a,II} = \left(T_{a,1} - T\right)^{0.789}\left(T_{a,2} - T\right)^{0.211} + T \qquad \text{(ก.4)}$$

โดยที่

T คือ อุณหภูมิใดๆ

$T_{w,1}$, $T_{w,2}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำ ตามลำดับ

$T_{a,1}$, $T_{a,2}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของอากาศ ตามลำดับ

ก.2 การคำนวณคุณสมบัติของของไหล

1) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ (Yaws, 1999)

สำหรับอุณหภูมิระหว่าง 273-615 เคลวิน

- ความหนาแน่น (ρ_w , กก. / ลบ.ม.) คำนวณได้จาก

$$\rho_w = 347.1 \times 0.274^{-\left(1-\frac{T_w}{647.13}\right)^{0.28571}} \quad \text{(ก.5)}$$

- ความหนืด (μ_w , ปาสคาล.วินาที) คำนวณได้จาก

$$\mu_w = 10^{-3} \times 10^{\left(-10.2158+\frac{1.7925\times 10^{3}}{T_w}+1.773\times 10^{-2}T_w-1.2631\times 10^{-5}T_w^2\right)} \quad \text{(ก.6)}$$

- ความจุความร้อน ($c_{p,w}$, กิโลจูล / (กิโลกรัม.เคลวิน)) คำนวณได้จาก

$$c_{p,w} = \frac{1}{18}\left(92.053 - 3.9953\times 10^{-2}T_w - 2.1103\times 10^{-4}T_w^2 + 5.3469\times 10^{-7}T_w^3\right) \quad \text{(ก.7)}$$

- ค่าการนำความร้อน (k_w , กิโลวัตต์ / (เมตร.เคลวิน)) คำนวณได้จาก

$$k_w = -2.758\times 10^{-4} + 4.612\times 10^{-6}T_w - 5.5391\times 10^{-9}T_w^2 \quad \text{(ก.8)}$$

2) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศ (Geankoplis, 1995)

สำหรับอุณหภูมิระหว่าง 283.2 - 666.5 เคลวิน

- ความหนาแน่น (ρ_a , กก. / ลบ.ม.) คำนวณได้จาก

$$\rho_a = 5.722447 \times 10^{-8} T_a^3 - 4.532673 \times 10^{-5} T_a^2 + 7.847886 \times 10^{-3} T_a + 1.359029$$

(ก.9)

- ความหนืด (μ_a , ปาสคาล.วินาที) คำนวณได้จากสมการ

$$\mu_a = -2.398627 \times 10^{-12} T_a^3 + 2.326925 \times 10^{-9} T_a^2 - 7.038609 \times 10^{-7} T_a + 8.498949 \times 10^{-5}$$

(ก.10)

- ความจุความร้อน ($c_{p,a}$, กิโลจูล / (กิโลกรัม.เคลวิน)) คำนวณได้จาก

$$c_{p,a} = -6.772398 \times 10^{-8} T_a^3 + 6.59709 \times 10^{-5} T_a^2 - 2.125316 \times 10^{-2} T_a + 3.270914$$

(ก.11)

- ค่าการนำความร้อน (k_a , กิโลวัตต์ / (เมตร.เคลวิน)) คำนวณได้จาก

$$k_a = -5.469994 \times 10^{-12} T_a^3 + 5.254478 \times 10^{-9} T_a^2 - 1.597851 \times 10^{-6} T_a + 1.80252 \times 10^{-4}$$

(ก.12)

ภาคผนวก ข
โปรแกรมคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์

ในส่วนนี้จะแสดงโปรแกรมคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมแม็ทแลบ เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและความดันลดของอากาศ และเพื่อสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณความดันลดภายในถังน้ำ

สำหรับการทดสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและความดันลดของอากาศนั้น จะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ และสำหรับการสร้างสมการคำนวณความดันลดภายในถังน้ำนั้น จะใช้โปรแกรมคำนวณคุณลักษณะหม้อน้ำรถยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานภายในถังน้ำที่ได้จากการทดลอง จากนั้นจะใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอสในการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นเชิงพหุ (multiple linear regression) เพื่อสร้างสมการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานภายในถังน้ำต่อไป (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค)

โปรแกรมคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์จะประกอบด้วย 4 ไฟล์ ได้แก่

1) ไฟล์ Test.m เป็นโปรแกรมหลักที่ใช้คำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์

2) ไฟล์ FunF1.m เป็นโปรแกรมรองที่ใช้คำนวณความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล

3) ไฟล์ frictwI.m เป็นโปรแกรมรองที่ใช้ในการคำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่อุณหภูมิอ้างอิง $T_{w,I}$

4) ไฟล์ frictwII.m เป็นโปรแกรมรองที่ใช้ในการคำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่อุณหภูมิอ้างอิง $T_{w,II}$

1) ไฟล์ Test.m

```
global ReDhwI ReDhwII Td Tw Tw1 Tw2 Ta1 Ta2
aa=1;
m=1;
n=1;
mm=1;
mn=1;
mmm=1;
m1=1;
m2=1;
m3=1;
m4=1;
m5=1;
Dp=34e-3;
Lp=300e-3;

for i=1:46
   if i<=29|i==37|i==38|i==45|i==46
      ss=9;
   elseif(i>=30&i<=34)|(i>=39&i<=44)
      ss=12;
   elseif i==35|i==36
      ss=16;
   end
for j=4:ss
if i <=6

% model A

Tw=1.5*1e-3;
Td=14.5*1e-3;
D=16*1e-3;

Fd=D;
Fl=8.2*1e-3;
Fh=17.523e-3;
Ft=0.045e-3;

Lp=1*1e-3;
Ll=7.2*1e-3;
La=22;
Tt=0.11e-3;
St=0.0000254;

elseif i>=7 & i<16

% model B

.
.
.

% model E

elseif i==45|i==46

Tw=1.6*1e-3;
Td=22*1e-3;
```

```
D=24*1e-3;

Fd=D;
Fl=7*1e-3;
Ft=0.08e-3;

Lp=1*1e-3;
Ll=6*1e-3;
La=27;

Tt=0.265e-3;
St=0.0000254;

end%(i)

if i==1
   H=325*1e-3;
   W=667.8*1e-3;
   Fp=3*0.5e-3;
   La=22.5;
   Dp=28e-3;
   Wt=685.4e-3;
   D1=34e-3;
   z1=28e-3;
   D2=44e-3;
   z2=13e-3;
   d=25.4e-3;
   L=351e-3;

   if j==1
      ua=6;    Vw=20;   QQ=24600; PPa=0;     PPw=0;
   elseif j==2
      ua=6;    Vw=40;   QQ=30000; PPa=11.2;  PPw=0;
   elseif j==3
      ua=6;    Vw=60;   QQ=32800; PPa=0;     PPw=0;
   elseif j==4
      ua=8;    Vw=20;   QQ=25200; PPa=0;     PPw=14;
   elseif j==5
      ua=8;    Vw=40;   QQ=32400; PPa=15.4;  PPw=48;
   elseif j==6
      ua=8;    Vw=60;   QQ=35200; PPa=0;     PPw=113;
   elseif j==7
      ua=10;   Vw=20;   QQ=26500; PPa=0;     PPw=0;
   elseif j==8
      ua=10;   Vw=40;   QQ=34000; PPa=21;    PPw=0;
   elseif j==9
     ua=10;    Vw=60;   QQ=37400; PPa=0;     PPw=0;
   end
      .
      .
      .
      .
      elseif i==46

   H=350e-3;
   W=695e-3;
   Fp=3.5*0.5*1e-3;
   La=27;
   Dp=32e-3;
   Wt=721.8e-3;
   D1=44e-3;
```

```
   D2=44e-3;
   z1=32e-3;
   z2=30e-3;

   if j==1
      ua=6;    Vw=20;   QQ=31500; PPa=0;  PPw=0;
   elseif j==2
      ua=6;    Vw=40;   QQ=37300; PPa=16.3;  PPw=0;
   elseif j==3
      ua=6;    Vw=60;   QQ=41500; PPa=0;     PPw=0;
   elseif j==4
      ua=8;    Vw=20;   QQ=33000; PPa=0;     PPw=10;
   elseif j==5
      ua=8;    Vw=40;   QQ=39838; PPa=23.6;  PPw=30.7;
   elseif j==6
      ua=8;    Vw=60;   QQ=45000; PPa=0;     PPw=64.5;
   elseif j==7
      ua=10;   Vw=20;   QQ=35000; PPa=0;     PPw=0;
   elseif j==8
      ua=10;   Vw=40;   QQ=42000; PPa=31.5;  PPw=0;
   elseif j==9
      ua=10;   Vw=60;   QQ=49000; PPa=0;     PPw=0;
   end

 end

Tl=H;
e=0;

%%%Thermal conductivity of fin and tube

if i<=26
kf=0.34;
kwall=0.104;

else
kf=0.24;
kwall=0.186;
end

%%%Hydraulic and Equivalent diameter

Dha=4*(2*Fp-2*Ft)*(Fl-Ft)/(4*(Fl-Ft)+2*(2*Fp-2*Ft));
Dhw=(2*(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt))/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
Dlw=(2/3+11*(Tw-2*Tt)*(2-(Tw-2*Tt)/(Td-2*Tt))/(24*(Td-2*Tt)))*Dhw;


Tp=Fl+Tw;
Nt=round((W+Fl)/(Tw+Fl));
W=Nt*(Tw+Fl)-Fl;
Nm=H*(Nt-1)/(2*Fp);
Apr=((2*Fp-2*Ft)*Fd+4*(Tw-2*Tt)*Fp)*Nm+2*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));
Asc=4*(Fl-Ft)*Fd*Nm;

Aa=Apr+Asc;
Affa=(Fl-Ft)*(2*Fp-2*Ft)*Nm;
Afra=W*H;


Aw=2*Nt*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));
Affw=(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt)*Nt;
```

```
Afrw=W*D;
Awall=2*Nt*Npass*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Q=0.95*QQ*4.184/3600;
PPa=PPa*101325/(10330);
PPw=PPw*101325/760;
Vw=Vw/(6e4);
ufra=ua;

Tw1= 90.55+273;
Ta1= 31.75+273;

Tw2= 67.98+273;
Ta2= 51.20+273;
k=1;
N=1000;

while k<N

   Taa=(Ta1+Ta2)/2;
   Tww=(Tw1+Tw2)/2;

   dena= 5.722447e-008*Taa^3-4.532673e-005*Taa^2+7.847886e-
003*Taa+1.359029e+000;
   cpa= -6.772398e-008*Taa^3+6.597090e-005*Taa^2-2.125316e-
002*Taa+3.270914e+000;
   visa= -2.398627e-012*Taa^3+2.326925e-009*Taa^2-7.038609e-
007*Taa+8.498949e-005;
   ka= -5.469994e-012*Taa^3+5.254478e-009*Taa^2-1.597851e-
006*Taa+1.802520e-004;
   Pra=cpa*visa/ka;

   denw=(0.3471*0.274^(-(1-Tww/647.13)^0.28571))*1000;
   cpw=(92.053-3.9953e-2*Tww-2.1103e-4*Tww^2+5.3469e-7*Tww^3)/18;
   visw=10^(-10.2158+((1.7925e3)/Tww)+1.773e-2*Tww-1.2631e-5*Tww^2)*1e-
3;
   kw=(-.2758+4.612e-3*Tww-5.5391e-6*Tww^2)*1e-3;
   Prw=cpw*visw/kw;

   Taa2=Ta1+Q/(dena*ufra*Afra*cpa);
   Tww2=Tw1-Q/(denw*Vw*cpw);

   if abs(Taa2-Ta2)<1e-5& abs(Tww2-Tw2)<1e-5
      k=N+3;
   else
      k=k+1;
      Ta2=Taa2;
      Tw2=Tww2;
   end
end


r=fsolve('FunF1',0.4);
p=(Tw1-Tw2)/(Tw1-Ta1);
q=(Ta2-Ta1)/(Tw1-Ta1);
MTD=r*(Tw1-Ta1);
```

```
% Inlet condition

Taa=Ta1;
Tww=Tw1;

   dena1= 5.722447e-008*Taa^3-4.532673e-005*Taa^2+7.847886e-
003*Taa+1.359029e+000;
   cpa1= -6.772398e-008*Taa^3+6.597090e-005*Taa^2-2.125316e-
002*Taa+3.270914e+000;
   visa1= -2.398627e-012*Taa^3+2.326925e-009*Taa^2-7.038609e-
007*Taa+8.498949e-005;
   ka1= -5.469994e-012*Taa^3+5.254478e-009*Taa^2-1.597851e-
006*Taa+1.802520e-004;
   Pra1=cpa1*visa1/ka1;

   denw1=(0.3471*0.274^(-(1-Tww/647.13)^0.28571))*1000;
   cpw1=(92.053-3.9953e-2*Tww-2.1103e-4*Tww^2+5.3469e-7*Tww^3)/18;
   visw1=10^(-10.2158+((1.7925e3)/Tww)+1.773e-2*Tww-1.2631e-5*Tww^2)*1e-
3;
   kw1=(-.2758+4.612e-3*Tww-5.5391e-6*Tww^2)*1e-3;
   Prw1=cpw1*visw1/kw1;

%Outlet condition

Taa=Ta2;
Tww=Tw2;
   dena2= 5.722447e-008*Taa^3-4.532673e-005*Taa^2+7.847886e-
003*Taa+1.359029e+000;
   cpa2= -6.772398e-008*Taa^3+6.597090e-005*Taa^2-2.125316e-
002*Taa+3.270914e+000;
   visa2= -2.398627e-012*Taa^3+2.326925e-009*Taa^2-7.038609e-
007*Taa+8.498949e-005;
   ka2= -5.469994e-012*Taa^3+5.254478e-009*Taa^2-1.597851e-
006*Taa+1.802520e-004;
   Pra2=cpa2*visa2/ka2;

   denw2=(0.3471*0.274^(-(1-Tww/647.13)^0.28571))*1000;
   cpw2=(92.053-3.9953e-2*Tww-2.1103e-4*Tww^2+5.3469e-7*Tww^3)/18;
   visw2=10^(-10.2158+((1.7925e3)/Tww)+1.773e-2*Tww-1.2631e-5*Tww^2)*1e-
3;
   kw2=(-.2758+4.612e-3*Tww-5.5391e-6*Tww^2)*1e-3;
   Prw2=cpw2*visw2/kw2;

%% upper tank

ut1=Vw/(Wt*D1);
Dht1=2*Wt*D1/(Wt+D1);
Ret1=denw1*ut1*Dht1/visw1;
At1=2*z1*(Wt+D1);
Afft1=Wt*D1;

%% lower tank

ut2=Vw/(Wt*D2);
Dht2=2*Wt*D2/(Wt+D2);
Ret2=denw2*ut2*Dht2/visw2;
At2=2*z2*(Wt+D2);
Afft2=Wt*D2;
```

```
%%%Calculation at reference temperature

Tww=Tw2-10;
Taa=Ta1-10;

%Calculation of reference temperature,TI

TwI=((Tw1-Tww)^0.211)*((Tw2-Tww)^0.789)+Tww;
TaI=((Ta1-Taa)^0.211)*((Ta2-Taa)^0.789)+Taa;

%Calculation of reference temperature,TII

TwII=((Tw1-Tww)^0.789)*((Tw2-Tww)^0.211)+Tww;
TaII=((Ta1-Taa)^0.789)*((Ta2-Taa)^0.211)+Taa;

%Water-side @ TwI

denwI=(0.3471*0.274^(-(1-TwI/647.13)^0.28571))*1000;
cpwI=(92.053-3.9953e-2*TwI-2.1103e-4*TwI^2+5.3469e-7*TwI^3)/18;
viswI=10^(-10.2158+((1.7925e3)/TwI)+1.773e-2*TwI-1.2631e-5*TwI^2)*1e-3;
kwI=(-.2758+4.612e-3*TwI-5.5391e-6*TwI^2)*1e-3;
PrwI=cpwI*viswI/kwI;

%Water-side @ TwII

denwII=(0.3471*0.274^(-(1-TwII/647.13)^0.28571))*1000;
cpwII=(92.053-3.9953e-2*TwII-2.1103e-4*TwII^2+5.3469e-7*TwII^3)/18;
viswII=10^(-10.2158+((1.7925e3)/TwII)+1.773e-2*TwII-1.2631e-
5*TwII^2)*1e-3;
kwII=(-.2758+4.612e-3*TwII-5.5391e-6*TwII^2)*1e-3;
PrwII=cpwII*viswII/kwII;

%Air-side @ TaI

denaI= 5.722447e-008*TaI^3-4.532673e-005*TaI^2+7.847886e-
003*TaI+1.359029e+000;
cpaI= -6.772398e-008*TaI^3+6.597090e-005*TaI^2-2.125316e-
002*TaI+3.270914e+000;
visaI= -2.398627e-012*TaI^3+2.326925e-009*TaI^2-7.038609e-
007*TaI+8.498949e-005;
kaI= -5.469994e-012*TaI^3+5.254478e-009*TaI^2-1.597851e-
006*TaI+1.802520e-004;
PraI=cpaI*visaI/kaI;

%Air-side @ TaII

denaII= 5.722447e-008*TaII^3-4.532673e-005*TaII^2+7.847886e-
003*TaII+1.359029e+000;
cpaII= -6.772398e-008*TaII^3+6.597090e-005*TaII^2-2.125316e-
002*TaII+3.270914e+000;
visaII= -2.398627e-012*TaII^3+2.326925e-009*TaII^2-7.038609e-
007*TaII+8.498949e-005;
kaII= -5.469994e-012*TaII^3+5.254478e-009*TaII^2-1.597851e-
006*TaII+1.802520e-004;
PraII=cpaII*visaII/kaII;
```

```
%friction of inlet pipe

up1=Vw/(pi/4*Dp^2);
Rep1=denw1*Dp*up1/visw1;
if Rep1< 2300
   fp1=16/Rep1;
else
   fp1=0.00128+.1143*Rep1^(-.311);
end
Fp1=denw1*up1^2/2*(4*fp1*Lp/Dp);

%friction of outlet pipe

up2=Vw/(pi/4*Dp^2);
Rep2=denw2*Dp*up2/visw2;
if Rep2< 2300
   fp2=16/Rep2;
else
   fp2=0.00128+.1143*Rep2^(-.311);
end

Fp2=denw2*up2^2/2*(4*fp2*Lp/Dp);
Fp12=Fp1+Fp2;

%%%%%%%%Cal. at TwI

%Water-side friction factor

%friction of tube

uwI=Vw/(Affw);
mwI=denwI*uwI*Affw;
QwI=mwI*cpwI*(Tw1-Tw2);
ReDhwI=denwI*uwI*Dhw/viswI;
ReDlwI=denwI*uwI*Dlw/viswI;

n=Tw/Td;
if ReDhwI<2100
    fwI=24*(1-1.3553*n+1.9467*n^2-1.7012*n^3+0.9564*n^4-
0.2537*n^5)/ReDhwI;
else
    fwI=0.00128+0.1143*(ReDlwI^(-0.311));
    fwsI=fsolve('frictwI1',fwI);
       if e==0
           fwI=fwsI;
       else
           fwrI=2/((0.95*(p/e)^0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))^2;
           fwI=((Tw-2*Tt)*fwsI+(Td-2*Tt)*fwrI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
       end
end

%Water-side heat transfer coefficient

if ReDhwI<2100
    hwI=7.541*(1-2.61*n+4.97*n^2-5.119*n^3+2.702*n^4-0.548*n^5)*kwI/Dhw;
else % for ReDhwII > 2100 & ReDhwII< 5000000
    hwI=((fwI/2)*(ReDhwI-1000)*PrwI/(1+12.7*((fwI/2)^0.5)*(PrwI^(2/3)-
1)))*kwI/Dhw;
end
```

```
%Expansion and contraction losses

if ReDhwI<2000
   KI=1.7;
else
   KI=1.4;
end

FtI=denwI*(uwI^2)/2*(fwI*Aw/Affw+KI);

%Static head

statI=denwI*(z1+z2+H)*9.8;

%Pressure in tank

PtI=PPw+statI-(FtI+Fp12);
KwtankI=PtI/(denwI*(uwI^2)/2);
Kwtank1I=PtI/(denwI*((0.5*(ut1+ut2))^2)/2);

%Water-side pressure drop

PwI=-statI+(FtI+Fp12+PtI);


%%%%%%%%Cal. at TwII

%Water-side friction factor

%friction of tube

uwII=Vw/(Affw);
mwII=denwII*uwII*Affw;
QwII=mwII*cpwII*(Tw1-Tw2);

ReDhwII=denwII*uwII*Dhw/viswII;
ReDlwII=denwII*uwII*Dlw/viswII;


if ReDhwII<2100
    fwII=24*(1-1.3553*n+1.9467*n^2-1.7012*n^3+.9564*n^4-
0.2537*n^5)/ReDhwII;
else
    fwII=0.00128+0.1143*(ReDlwII^(-0.311));
    fwsII=fsolve('frictwII1',fwII);
    if e==0
        fwII=fwsII;
    else
        fwrII=2/((0.95*(p/e)^0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))^2;
        fwII=((Tw-2*Tt)*fwsII+(Td-2*Tt)*fwrII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
    end
end
```

```
%Water-side heat transfer coefficient

if ReDhwII<2100
    hwII=7.541*(1-2.61*n+4.97*n^2-5.119*n^3+2.702*n^4-
0.548*n^5)*kwII/Dhw;
else
    hwII=((fwII/2)*(ReDhwII-
1000)*PrwII/(1+12.7*((fwII/2)^0.5)*(PrwII^(2/3)-1)))*kwII/Dhw;
end

%Expansion and contraction losses

if ReDhwII<2000
   KII=1.7;
else
   KII=1.4;
end

FtII=denwII*(uwII^2)/2*(fwII*Aw/Affw+KII);

%Static head

statII=denwII*(z1+z2+H)*9.8;

%Pressure of tank

PtII=PPw+statII-(FtII+Fp12);
KwtankII=PtII/(denwII*(uwII^2)/2);
Kwtank1II=PtII/(denwII*((0.5*(ut1+ut2))^2)/2);
Kwww=3.83e25*exp((-0.61*W+10.55*D-3.65*D1-
40.27*D2+3.01*z2)/Dht2)*Ret1^(2.5-2.73*Dht1)*...
   (Ret2^(7.52*Dht2))*((log(1+W/Dht2))^12.04)*((log(1+H/Dht2))^0.63)*...
   ((log(1+D/Dht2))^(-
3.12))*((log(1+Dht1/Dht2))^5.57)*((log(1+z1/Dht2))^0.36)*...
   ((log(1+z2/Dht2))^(-0.94))*((log(0.5*Ret1))^(-
14.85))*((log(0.5*Ret2))^(-15.33));

%Water-side pressure drop

PwII=-statII+(FtII+Fp12+PtII);
PwtankI=denwI*((0.5*(ut1+ut2))^2)/2*Kwww;
PwtankII=denwII*((0.5*(ut1+ut2))^2)/2*Kwww;

%%%%%%%%%Cal. at TaI

%%Contraction and expansion coefficient

ee=Affa/Afra;
cc=Affa/Afra;

Ke=0.973-1.916*ee+0.944*ee^2;

Kc=0.408-0.409*cc^2;

%Air-side heat transfer coefficient and friction factor

ufra=ua;
maI=denaI*ufra*Afra;
QaI=maI*cpaI*(Ta2-Ta1);
uaI=ufra*Afra/Affa;
ReLpI=denaI*uaI*Lp/visaI;
```

```
haI=(ReLpI^(-0.49)) * ((La/90)^0.27) * ((Ll/Lp)^0.68) * ((Fp/Lp)^(-
0.14)) * ((Fl/Lp)^(-0.29))* ...
   ((Ft/Lp)^(-0.05)) * ((Td/Lp)^(-0.23)) * ((Tp/Lp)^(-
0.28))*(denaI*uaI*cpaI*(PraI^(-2/3)));
jaI=haI/(denaI*uaI*cpaI*(PraI^(-2/3)));
mI=(2*haI/(kf*Ft))^0.5;
lI=((Fl-Ft)+(Fp/2-Ft/2))/2;
effI=(tanh(mI*lI))/(mI*lI);
effoI=1-Asc/Aa*(1-effI);

if ReLpI>=150
   faI=(4.97*ReLpI^(0.6049-1.064/(La^0.2)))*((log((Ft/Fp)^0.5+0.9))^(-
0.527))*(((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpI))^(-2.966))...
   *((Fp/Ll)^((-0.7931)*Tp/(Tp-Tw)))*((Tp/Tw)^(-
0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)^1.4))^(-3.553))*(La^(-0.477));
else
   faI=(14.39*ReLpI^(-
0.805*Fp/Fl))*((log(1.0+(Fp/Lp)))^3.04)*((log((Ft/Fp)^0.48+0.9))^(-
1.435))*((Dha/Lp)^(-3.01))...
      *((log(0.5*ReLpI))^(-3.01))*((Fp/Ll)^(-0.308))*((Fd/Ll)^(-
0.308))*(exp(-0.1167*Tp/Tw))*(La^0.35);
end

%Air-side pressure drop

denam=0.5*(denaI+denaII);

aPaI=denaI*(uaI^2)/2*(faI*Aa/Affa+Kc+Ke);
aKaI=(2*PPa/(denaI*uaI^2))-faI*Aa/Affa-Kc-Ke;

bPaI=denaI*(uaI^2)/2*(faI*Aa/Affa+0.75);
bKaI=(2*PPa/(denaI*uaI^2))-faI*Aa/Affa-0.75;

cPaI=denaI*(uaI^2)/2*(faI*Aa/Affa);
cKaI=(2*PPa/(denaI*uaI^2))-faI*Aa/Affa;

dPaI=denam*uaI^2/2*(faI*Aa/Affa*denaI/denam+(Kc+1-cc^2)+2*(denaI/denaII-
1)...
   -(1-ee^2-Ke)*denaI/denaII);
dKaI=(2*PPa/(denam*uaI^2))-(faI*Aa/Affa*denaI/denam+(Kc+1-
cc^2)+2*(denaI/denaII-1)...
   -(1-ee^2-Ke)*denaI/denaII);

faexpI=((2*PPa/(denam*uaI^2))-((Kc+1-cc^2)+2*(denaI/denaII-1)...
   -(1-ee^2-Ke)*denaI/denaII))*Affa*denam/(Aa*denaI);

%%%%%%%%%Cal. at TaII

%Air-side heat transfer coefficient and friction factor

ufra=ua;
maII=denaII*ufra*Afra;
QaII=maII*cpaII*(Ta2-Ta1);
uaII=ufra*Afra/Affa;


ReLpII=denaII*uaII*Lp/visaII;
```

```
haII=(ReLpII^(-0.49)) * ((La/90)^0.27) * ((Ll/Lp)^0.68) * ((Fp/Lp)^(-
0.14)) *...
   ((Fl/Lp)^(-0.29))*((Ft/Lp)^(-0.05)) * ((Td/Lp)^(-0.23)) * ((Tp/Lp)^(-
0.28))*...
   (denaII*uaII*cpaII*(PraII^(-2/3)));

jaII=haII/(denaII*uaII*cpaII*(PraII^(-2/3)));
mII=(2*haII/(kf*Ft))^0.5;
lII=((Fl-Ft)+(Fp/2-Ft/2))/2;
effII=(tanh(mII*lII))/(mII*lII);
effoII=1-Asc/Aa*(1-effII);
ml=0.5*((mI*lI)+(mII*lII));
tanhml=0.5*((tanh(mI*lI))+(tanh(mII*lII)));

if ReLpII>=150
   faII=(4.97*ReLpII^(0.6049-1.064/(La^0.2)))*((log((Ft/Fp)^0.5+0.9))^(-
0.527))*...
      (((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpII))^(-2.966))*((Fp/Ll)^((-0.7931)*Tp/(Tp-
Tw)))*...
      ((Tp/Tw)^(-0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)^1.4))^(-3.553))*(La^(-
0.477));
else
   faII=(14.39*ReLpII^(-0.805*Fp/Fl))*((log(1.0+(Fp/Lp)))^3.04)*...
      ((log((Ft/Fp)^0.48+0.9))^(-1.435))*((Dha/Lp)^(-3.01))*...
      ((log(0.5*ReLpII))^(-3.01))*((Fp/Ll)^(-0.308))*...
      ((Fd/Ll)^(-0.308))*(exp(-0.1167*Tp/Tw))*(La^0.35);
end

%Air-side pressure drop

denam=0.5*(denaI+denaII);

aPaII=denaII*(uaII^2)/2*(faII*Aa/Affa+Kc+Ke);
aKaII=(2*PPa/(denaII*uaII^2))-faII*Aa/Affa-Kc-Ke;

bPaII=denaII*(uaII^2)/2*(faII*Aa/Affa+0.75);
bKaII=(2*PPa/(denaII*uaII^2))-faII*Aa/Affa-0.75;

cPaII=denaII*(uaII^2)/2*(faII*Aa/Affa);
cKaII=(2*PPa/(denaII*uaII^2))-faII*Aa/Affa;


dPaII=denam*uaII^2/2*(faII*Aa/Affa*denaI/denam+(Kc+1-
cc^2)+2*(denaI/denaII-1)...
   -(1-ee^2-Ke)*denaI/denaII);
dKaII=(2*PPa/(denam*uaII^2))-(faII*Aa/Affa*denaI/denam+(Kc+1-
cc^2)+2*(denaI/denaII-1)...
   -(1-ee^2-Ke)*denaI/denaII);

faexpII=((2*PPa/(denam*uaII^2))-((Kc+1-cc^2)+2*(denaI/denaII-1)-(1-ee^2-
Ke)...
   *denaI/denaII))*Affa*denam/(Aa*denaI);


%Overall heat transfer coefficient
UAI=1/(1/(effoI*haI*Aa)+1/(hwI*Aw)+Tt/(kwall*Awall));
UAII=1/(1/(effoII*haII*Aa)+1/(hwII*Aw)+Tt/(kwall*Awall));

UA=1/(0.5*(1/UAI+1/UAII));
r=fsolve('FunFl',0.4);
MTD=r*(Tw1-Ta1);
```

```
UAreal=1/(0.5*(1/QwI+1/QwII))/MTD;
UAre=0.5*(QwI+QwII)/MTD;

%%GGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOBBBBBBBBBBBBBBBBBBB

   Ta=(Ta1+Ta2)/2;
   dena= 5.722447e-008*Taa^3-4.532673e-005*Taa^2+7.847886e-
003*Taa+1.359029e+000;
   cpa= -6.772398e-008*Taa^3+6.597090e-005*Taa^2-2.125316e-
002*Taa+3.270914e+000;
   visa= -2.398627e-012*Taa^3+2.326925e-009*Taa^2-7.038609e-
007*Taa+8.498949e-005;
   ka= -5.469994e-012*Taa^3+5.254478e-009*Taa^2-1.597851e-
006*Taa+1.802520e-004;
   Pra=cpa*visa/ka;

ma=dena*ufra*Afra;
ua=ufra*Afra/Affa;
ReLp=dena*ua*Lp/visa;

if ReLp>=150
   fa=(4.97*ReLp^(0.6049-1.064/(La^0.2)))*((log((Ft/Fp)^0.5+0.9))^(-
0.527))*...
      (((Dha/Lp)*log(0.3*ReLp))^(-2.966))*((Fp/Ll)^((-0.7931)*Tp/(Tp-
Tw)))*...
      ((Tp/Tw)^(-0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)^1.4))^(-3.553))*(La^(-
0.477));
else
   fa=(14.39*ReLp^(-0.805*Fp/Fl))*((log(1.0+(Fp/Lp)))^3.04)*...
      ((log((Ft/Fp)^0.48+0.9))^(-1.435))*((Dha/Lp)^(-3.01))*...
      ((log(0.5*ReLp))^(-3.01))*((Fp/Ll)^(-0.308))*((Fd/Ll)^(-
0.308))*...
      (exp(-0.1167*Tp/Tw))*(La^0.35);
end

denam=0.5*(dena1+dena2);

faexp=Affa/Aa*(denam/dena1)*(2*PPa/(denam*ua^2)-(Kc+1-cc^2)-
2*(dena1/dena2-1)+...
   (1-ee^2-Ke)*dena1/dena2);

ePaa=denam*ua^2/2*(fa*Aa/Affa*dena1/denam+(Kc+1-cc^2)+2*(dena1/dena2-
1)...
   -(1-ee^2-Ke)*dena1/dena2);
eKa=(2*PPa/(denam*ua^2))-(fa*Aa/Affa*dena/denam+(Kc+1-
cc^2)+2*(dena1/dena2-1)...
   -(1-ee^2-Ke)*dena1/dena2);

%GGGGGGGGGGGGGGGGOOOOOOOOOOOOGOBOOOOOOOOOOOOBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBB

a1=log(ReLpI);
a2=(1/(La)^0.2)*log(ReLpI);
a3=log(Dha/Lp*log(0.3*ReLpI));
a4=Fp/Fl*(ReLpI);
a5=log(log(0.5*ReLpI));

a6=log(ReLpII);
a7=(1/(La)^0.2)*log(ReLpII);
a8=log(Dha/Lp*log(0.3*ReLpII));
a9=Fp/Fl*(ReLpII);
a10=log(log(0.5*ReLpII));
```

```
a11=log(ReLp);
a12=(1/(La)^0.2)*log(ReLp);
a13=log(Dha/Lp*log(0.3*ReLp));
a14=Fp/Fl*(ReLp);
a15=log(log(0.5*ReLp));

b1=log(log(0.9+(Ft/Fp)^0.5));
b2=Tp/(Tp-Tw)*log(Fp/Ll);
b3=log(Tp/Tw);
b4=log(log(1.2+(Lp/Fp)^1.4));
b5=log(La);
b6=log(log(1+Fp/Lp));
b7=log(Dha/Lp);
b8=log(Fp/Ll);
b9=log(Fd/Ll);
b10=Tp/Tw;
b11=La/90;
b12=Ft/Fp;
b13=Dha/Lp;
b14=Tp/(Tp-Tw);
b15=Fp/Ll;
b16=Lp/Fp;
b17=Fp/Fl;
b18=Fp/Lp;

%GGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGGOOOOOOOOOOOOOGOBOOOOOOOOOOOOBBBBBBBBBBBBB

aPaa=0.5*UA*(aPaI/UAI+aPaII/UAII);
bPaa=0.5*UA*(bPaI/UAI+bPaII/UAII);
cPaa=0.5*UA*(cPaI/UAI+cPaII/UAII);
dPaa=0.5*UA*(dPaI/UAI+dPaII/UAII);
Pa1=101325;

aPa=Pa1*(1-(1-2*aPaa/Pa1)^0.5);
bPa=Pa1*(1-(1-2*bPaa/Pa1)^0.5);
cPa=Pa1*(1-(1-2*cPaa/Pa1)^0.5);
dPa=Pa1*(1-(1-2*dPaa/Pa1)^0.5);
ePa=Pa1*(1-(1-2*ePaa/Pa1)^0.5);

Pareal=PPa;
Pw=0.5*UA*(PwI/UAI+PwII/UAII);
Pt=PPw-Pw;
PwcalI=-statI+FtI+Fp12+PwtankI;
PwcalII=-statII+FtII+Fp12+PwtankII;
Pwcal=0.5*UA*(PwcalI/UAI+PwcalII/UAII);

Pwtube=0.5*UA*(FtI/UAI+FtII/UAII);

Qa=.5*(QaI+QaII);
Qw=.5*(QwI+QwII);
Qexp=.5*(Qa+Qw);
Qcal=UA*MTD;
QDeviation=(Qcal-Qexp)/Qexp*100;

   up(m1,1)=i;
   up(m1,2)=j;
   up(m1,3)=Pwtube;
   up(m1,4)=PPw;
   up(m1,5)=aPa;
   up(m1,6)=bPa;
```

```
  up(m1,7)=cPa;
  up(m1,8)=dPa;
  up(m1,9)=ePa;
  up(m1,10)=PPa;

  up(m1,11)=Qcal;
  up(m1,12)=Qexp;

  up(m1,13)=ufra;
  up(m1,14)=Vw*6e4;
  m1=m1+1;

if PPw>0
  wc(m2,1)=i;
  wc(m2,2)=j;
  wc(m2,3)=Pwtube;
  wc(m2,4)=PPw;

  wc(m2,5)=PtI;
  wc(m2,6)=PtII;
  wc(m2,7)=KwtankI;
  wc(m2,8)=KwtankII;
  wc(m2,9)=Kwtank1I;
  wc(m2,10)=Kwtank1II;
  wc(m2,11)=denwI;
  wc(m2,12)=denwII;
  wc(m2,13)=uwI;
  wc(m2,14)=uwII;

  wc(m2,15)=ut1;
  wc(m2,16)=Dht1;
  wc(m2,17)=Ret1;
  wc(m2,18)=At1;
  wc(m2,19)=Afft1;
  wc(m2,20)=D1;
  wc(m2,21)=z1;
  wc(m2,22)=denw1;

  wc(m2,23)=ut2;
  wc(m2,24)=Dht2;
  wc(m2,25)=Ret2;
  wc(m2,26)=At2;
  wc(m2,27)=Afft2;
  wc(m2,28)=D2;
  wc(m2,29)=z2;
  wc(m2,30)=denw2;

  wc(m2,31)=H;
  wc(m2,32)=W;
  wc(m2,33)=D;

  wc(m2,34)=W/Dht2;
  wc(m2,35)=H/Dht2;
  wc(m2,36)=D/Dht2;
  wc(m2,37)=Dht1/Dht2;
  wc(m2,38)=D1/Dht2;
  wc(m2,39)=D2/Dht2;
  wc(m2,40)=z1/Dht2;
  wc(m2,41)=z2/Dht2;

  wc(m2,42)=Dht1*log(Ret1);
```

```
    wc(m2,43)=Dht2*log(Ret2);

    wc(m2,44)=log(W/Dht2);
    wc(m2,45)=log(H/Dht2);
    wc(m2,46)=log(D/Dht2);
    wc(m2,47)=log(Dht1/Dht2);
    wc(m2,48)=log(D1/Dht2);
    wc(m2,49)=log(D2/Dht2);
    wc(m2,50)=log(z1/Dht2);
    wc(m2,51)=log(z2/Dht2);
    wc(m2,52)=log(Ret1);
    wc(m2,53)=log(Ret2);
    wc(m2,54)=Dht1/Dht2*log(Ret1);

    wc(m2,55)=log(log(1+W/Dht2));
    wc(m2,56)=log(log(1+H/Dht2));
    wc(m2,57)=log(log(1+D/Dht2));
    wc(m2,58)=log(log(1+Dht1/Dht2));
    wc(m2,59)=log(log(1+D1/Dht2));
    wc(m2,60)=log(log(1+D2/Dht2));
    wc(m2,61)=log(log(1+z1/Dht2));
    wc(m2,62)=log(log(1+z2/Dht2));
    wc(m2,63)=log(log(0.5*Ret1));
    wc(m2,64)=log(log(0.5*Ret2))

    wc(m2,65)=Pt/(denw1*ut1^2/2);
    wc(m2,66)=Pt/(denw2*ut2^2/2);
    wc(m2,67)=Pt/(0.5*(denw2*ut2^2/2+denw1*ut1^2/2));
    wc(m2,68)=log(Pt/(denw1*ut1^2/2));
    wc(m2,69)=log(Pt/(denw2*ut2^2/2));
    wc(m2,70)=log(Pt/(0.5*(denw2*ut2^2/2+denw1*ut1^2/2)));

    wc(m2,71)=Fp12;
    wc(m2,72)=statI;
    wc(m2,73)=FtI;
    wc(m2,74)=PtI;
    wc(m2,75)=PwI;
    wc(m2,76)=statII;
    wc(m2,77)=FtII;
    wc(m2,78)=PtII;
    wc(m2,79)=PwII;
    wc(m2,80)=Pwtube;
    wc(m2,81)=Pw;
    wc(m2,82)=Pwcal;
    m2=m2+1;
end
if PPa>0
    ac(m3,1)=i;
    ac(m3,2)=j;
    ac(m3,3)=facorre;
    ac(m3,4)=faI;
    ac(m3,5)=aKaI;
    ac(m3,6)=bKaI;
    ac(m3,7)=cKaI;
    ac(m3,8)=faII;
    ac(m3,9)=aKaII;
    ac(m3,10)=bKaII;
    ac(m3,11)=cKaII;
    ac(m3,12)=aPa;
    ac(m3,13)=bPa;
    ac(m3,14)=cPa;
```

```
ac(m3,15)=dPa;
ac(m3,16)=ePa;
ac(m3,17)=PPa;

bc(m5,1)=i;
bc(m5,2)=j;
bc(m5,3)=Fp;
bc(m5,4)=Fl;
bc(m5,5)=Ft;
bc(m5,6)=Fd;
bc(m5,7)=Tp;
bc(m5,8)=Td;
bc(m5,9)=Dha;
bc(m5,10)=Lp;
bc(m5,11)=Ll;
bc(m5,12)=La;

bc(m5,13)=ReLpI;
bc(m5,14)=faI;
bc(m5,15)=aKaI;
bc(m5,16)=bKaI;
bc(m5,17)=cKaI;
bc(m5,18)=dKaI;
bc(m5,19)=aPaI;
bc(m5,20)=bPaI;
bc(m5,21)=cPaI;
bc(m5,22)=dPaI;

bc(m5,23)=ReLpII;
bc(m5,24)=faII;
bc(m5,25)=aKaII;
bc(m5,26)=bKaII;
bc(m5,27)=cKaII;
bc(m5,28)=dKaII;
bc(m5,29)=aPaII;
bc(m5,30)=bPaII;
bc(m5,31)=cPaII;
bc(m5,32)=dPaII;
bc(m5,33)=ReLp;
bc(m5,34)=fa;
bc(m5,35)=eKa;
bc(m5,36)=ePa;
bc(m5,37)=faexpI;
bc(m5,38)=a1;
bc(m5,39)=a2;
bc(m5,40)=a3;
bc(m5,41)=a4;
bc(m5,42)=a5;

bc(m5,43)=faexpII;
bc(m5,44)=a6;
bc(m5,45)=a7;
bc(m5,46)=a8;
bc(m5,47)=a9;
bc(m5,48)=a10;
bc(m5,49)=faexp;
bc(m5,50)=a11;
bc(m5,51)=a12;
bc(m5,52)=a13;
bc(m5,53)=a14;
bc(m5,54)=a15;
```

```
  bc(m5,55)=b1;
  bc(m5,56)=b2;
  bc(m5,57)=b3;
  bc(m5,58)=b4;
  bc(m5,59)=b5;
  bc(m5,60)=b6;
  bc(m5,61)=b7;
  bc(m5,62)=b8;
  bc(m5,63)=b9;
  bc(m5,64)=b10;
  bc(m5,65)=b11;
  bc(m5,66)=b12;
  bc(m5,67)=b13;
  bc(m5,68)=b14;
  bc(m5,69)=b15;
  bc(m5,70)=b16;
  bc(m5,71)=b17;
  bc(m5,72)=b18;
  bc(m5,73)=PPa;

  m3=m3+1;
  m5=m5+1;
end

para(m4,1)=Q;
para(m4,2)=ufra;
para(m4,3)=Vw;
para(m4,4)=W;
para(m4,5)=H;
para(m4,6)=D;
para(m4,7)=Td;
para(m4,8)=Ft;
para(m4,9)=Tt;
para(m4,10)=kf;
para(m4,11)=kwall;
para(m4,12)=ksd;
para(m4,13)=Sdt;
para(m4,14)=St;
para(m4,15)=Fd;
para(m4,16)=Tl;
para(m4,17)=Afra;
para(m4,18)=Tw1;
para(m4,19)=Ta1;
para(m4,20)=Tw2;
para(m4,21)=Ta2;
para(m4,22)=dena;
para(m4,23)=cpa;
para(m4,24)=visa;
para(m4,25)=ka;
para(m4,26)=Pra;
para(m4,27)=denw;
para(m4,28)=cpw;
para(m4,29)=visw;
para(m4,30)=kw;
para(m4,31)=Prw;
para(m4,32)=0.5*(maI+maII);
para(m4,33)=0.5*(mwI+mwII);
para(m4,34)=MTD;
para(m4,35)=Nt;
para(m4,36)=Fl;
para(m4,37)=Nm;
```

```
 para(m4,38)=Fp;
 para(m4,39)=Apr;
 para(m4,40)=Tw;
 para(m4,41)=Asc;
 para(m4,42)=Tp;
 para(m4,43)=Aa;
 para(m4,44)=Affa;
 para(m4,45)=Aw;
 para(m4,46)=Affw;
 para(m4,47)=Awall;
 para(m4,48)=0.5*(uaI+uaII);
 para(m4,49)=0.5*(uwI+uwII);
 para(m4,50)=0.5*(ReLpI+ReLpII);
 para(m4,51)=Lp;
 para(m4,52)=La;
 para(m4,53)=Ll;
 para(m4,54)=0.5*(haI+haII);
 para(m4,55)=0.5*(mI+mII);
 para(m4,56)=0.5*(lI+lII);
 para(m4,57)=ml;
 para(m4,58)=tanhml;
 para(m4,59)=0.5*(effI+effII);
 para(m4,60)=0.5*(effoI+effoII);
 para(m4,61)=Dha;
 para(m4,62)=0.5*(faI+faII);
 para(m4,63)=aPa;
 para(m4,64)=bPa;
 para(m4,65)=cPa;
 para(m4,66)=dPa;
 para(m4,67)=ePa;
 para(m4,68)=PPa;
 para(m4,69)=Dhw;
 para(m4,70)=Dlw;
 para(m4,71)=0.5*(ReDhwI+ReDhwII);
 para(m4,72)=0.5*(ReDlwI+ReDlwII);
 para(m4,73)=0.5*(fwI+fwII);
 para(m4,74)=0.5*(hwI+hwII);

 para(m4,75)=Fp12;
 para(m4,76)=statI;
 para(m4,77)=FtI;
 para(m4,78)=PwI;
 para(m4,79)=statII;
 para(m4,80)=FtII;
 para(m4,81)=PwII;
 para(m4,82)=Pwtube;
 para(m4,83)=Pw;
 para(m4,84)=0.5*(QwI+QwII);
 para(m4,85)=0.5*(QaI+QaII);
 para(m4,86)=Pwcal;
 m4=m4+1;

end
end
```

2) ไฟล์ FunF1.m

```
function R =FunF1(r)
global Tw1 Tw2 Ta1 Ta2

p=(Tw1-Tw2)/(Tw1-Ta1);
q=(Ta2-Ta1)/(Tw1-Ta1);

z=0;
for u=0:20
   for v=0:20
      R=((-
1)^(u+v))*factorial(u+v)*((p/r)^u)*((q/r)^v)/(factorial(u)*factorial(u+1
)*factorial(v)*factorial(v+1));
      z=z+R;
   end
end
R=(-r+z);
```

3) ไฟล์ fricwl1.m

```
function fs =frictwII1(f)
global ReDhwII Td Tw

fs=-(f^-0.5)+4*log10(ReDhwII*(f^0.5))-0.4+4*log10((1.156+((Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)-1))/((Td-2*Tt)/(Tw-2*Tt));
```

4) ไฟล์ fricwll1.m

```
function fs =frictwII1(f)
global ReDhwII Td Tw

fs=-(f^-0.5)+4*log10(ReDhwII*(f^0.5))-0.4+4*log10((1.156+((Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)-1))/((Td-2*Tt)/(Tw-2*Tt));
```

ภาคผนวก ค
การสร้างสมการคำนวณความดันลดของน้ำ

ค.1 ขั้นตอนการสร้างสมการคำนวณความดันลดของน้ำ

1. คำนวณความดันลดจากความเสียดทานของน้ำที่ไหลผ่านท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออก (ΔP_{pipe})

$$\Delta P_{pipe} = \left[\frac{\rho_w u_w^2}{2} \left(\frac{4 f_w L}{D} \right) \right]_{inlet\ pipe} + \left[\frac{\rho_w u_w^2}{2} \left(\frac{4 f_w L}{D} \right) \right]_{outlet\ pipe} \qquad (ค.1)$$

2) คำนวณความดันลดของน้ำที่ไหลผ่านท่อแบน (ΔP_{tube})

$$\Delta P_{tube} = \left[\frac{\rho u^2}{2} \left(f \frac{A}{A_{ff}} + K_c + K_e \right) \right]_w \qquad (ค.2)$$

3) คำนวณความดันสถิตของน้ำ (ΔP_{stat})

$$\Delta P_{stat} = \rho_w g z \qquad (ค.3)$$

4) คำนวณความดันลดในถังน้ำจากผลการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ ($\Delta P_{tank,exp}$)

$$\Delta P_{tank,exp} = \Delta P_{w,exp} - \left(\Delta P_{pipe} + \Delta P_{tube} - \Delta P_{statl} \right) \qquad (ค.4)$$

5) กำหนดให้ความดันลดในถังน้ำสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta P_{tank} = \left[\frac{\rho u^2}{2} K \right]_{tank} \qquad (ค.5)$$

โดยที่

u_{tank} คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง คำนวณได้จาก

$$u_{tank} = \left(\frac{u_{t,1} + u_{t,2}}{2} \right) \qquad \text{(ค.6)}$$

เมื่อ

$u_{t,1}$, $u_{t,2}$ คือ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง คำนวณได้จาก

$$u_{t,1} = \frac{V_w}{W \times D_{t,1}} \qquad \text{(ค.7)}$$

$$u_{t,2} = \frac{V_w}{W \times D_{t,2}} \qquad \text{(ค.8)}$$

และ K_{tank} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ

6) คำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ ($K_{tank,exp}$)

$$K_{tank,exp} = \frac{\Delta P_{w,exp}}{\left(\frac{\rho u^2}{2} \right)_{tank}} \qquad \text{(ค.9)}$$

7) สร้างกลุ่มของตัวแปรที่คาดว่ามีผลต่อความดันลดในถังน้ำ และกำหนดรูปแบบของสมการหรือความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้สร้างกลุ่มตัวแปรที่คาดว่ามีผลต่อความดันลดในถังน้ำ ประกอบด้วย

$$x_1 = \frac{W}{D_{ht2}}, \qquad x_2 = \frac{H}{D_{ht2}}, \qquad x_3 = \frac{D}{D_{ht2}},$$

$$x_4 = \frac{D_{ht1}}{D_{ht2}}, \qquad x_5 = \frac{D_1}{D_{ht2}}, \qquad x_6 = \frac{D_2}{D_{ht2}},$$

$$x_7 = \frac{z_1}{D_{ht2}}, \qquad x_8 = \frac{z_2}{D_{ht2}},$$

$$x_9 = \mathrm{Re}_{t1}^{Dht1}, \qquad x_{10} = \mathrm{Re}_{t1}, \qquad x_{11} = \mathrm{Re}_{t1}^{Dht1/Dht2},$$

$$x_{12} = \left[\ln\left(1+\frac{W}{D_{ht2}}\right)\right], \qquad x_{13} = \left[\ln\left(1+\frac{H}{D_{ht2}}\right)\right], \qquad x_{14} = \left[\ln\left(1+\frac{D}{D_{ht2}}\right)\right],$$

$$x_{15} = \left[\ln\left(1+\frac{D_{ht1}}{D_{ht2}}\right)\right], \qquad x_{16} = \left[\ln\left(1+\frac{z_1}{D_{ht2}}\right)\right], \qquad x_{17} = \left[\ln\left(1+\frac{z_2}{D_{ht2}}\right)\right],$$

$$x_{18} = \ln(0.5\,\mathrm{Re}_{t1}), \qquad x_{19} = \ln(0.5\,\mathrm{Re}_{t2})$$

เมื่อ

z_1, z_2 คือ ความสูงของถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง ตามลำดับ

D_{t1}, D_{t2} คือ ความลึกของถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง ตามลำดับ

D_{ht1}, D_{ht2} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง คำนวณได้จากสมการ (ค.10) และ (ค.11) ตามลำดับ

$$D_{ht1} = \frac{2(W \times D_{t1})}{W + D_{t1}} \qquad \text{(ค.10)}$$

$$D_{ht2} = \frac{2(W \times D_{t2})}{W + D_{t2}} \qquad \text{(ค.11)}$$

$\mathrm{Re}_{t1}, \mathrm{Re}_{t2}$ คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำตอนบนและถังน้ำตอนล่าง คำนวณได้จากสมการ (ค.12) และ (ค.13) ตามลำดับ

$$\mathrm{Re}_{t1} = \left(\frac{\rho\, u\, D_{ht1}}{\mu}\right)_w \qquad \text{(ค.12)}$$

$$\mathrm{Re}_{t2} = \left(\frac{\rho\, u\, D_{ht2}}{\mu}\right)_w \qquad \text{(ค.13)}$$

และมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$K_{\tan k} = x_1^a \times x_2^b \times .... \times x_{11}^k \times \exp(x_0) \qquad \text{(ค.14)}$$

8) จัดรูปสมการ (ค.14) ให้อยู่ในรูปเชิงเส้น จะได้

$$\ln(K_{\tan k}) = a \ln x_1 + b \ln x_2 + ... + k \ln x_{11} + l \qquad \text{(ค.15)}$$

9) คำนวณค่าล็อกของสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ ($\ln(K_{\tan k,\exp})$) และค่าล็อกของกลุ่มตัวแปรที่ที่คาดว่ามีผลต่อความดันลดในถังน้ำ ($\ln x_1 .... \ln x_{11}$) โดยใช้โปรแกรมคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้น (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) และข้อมูลจากผลการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์

10) ใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอสวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นเชิงพหุ เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ $a,b,c,...,k,l$ ของสมการ (ค.15)

แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นเชิงพหุ ดังตารางที่ ค.1 และ ค.2

ค.2 สมการคำนวณความดันลดของน้ำ

จากตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2 จะได้สมการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ แสดงดังสมการ

$$K_{\tan k} = 3.83\times10^{25} \exp^{\left(-0.61W+10.55D-3.65D_{t,1}-40.27D_{t,2}+3.01z_2\right)/D_{ht2}} \mathrm{Re}_{t1}^{2.5-2.73D_{ht1}} \mathrm{Re}_{t2}^{7.52D_{ht2}}$$
$$\left[\ln\left(1+\frac{W}{D_{ht2}}\right)\right]^{12.04}\left[\ln\left(1+\frac{H}{D_{ht2}}\right)\right]^{0.63}\left[\ln\left(1+\frac{D}{D_{ht2}}\right)\right]^{-3.12}\left[\ln\left(1+\frac{D_{ht1}}{D_{ht2}}\right)\right]^{5.57} \qquad \text{(ค.16)}$$
$$\left[\ln\left(1+\frac{z_1}{D_{ht2}}\right)\right]^{0.36}\left[\ln\left(1+\frac{z_2}{D_{ht2}}\right)\right]^{-0.94}\left[\ln(0.5\,\mathrm{Re}_{t1})\right]^{-14.85}\left[\ln(0.5\,\mathrm{Re}_{t2})\right]^{-15.33}$$

นั่นคือ สามารถประมาณค่าความดันลดในถังน้ำได้จาก

$$\Delta P_{\tan k} = \left[\frac{\rho u^2}{2} K\right]_{\tan k} \qquad \text{(ค.17)}$$

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์ของสมการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ

Variables	Coefficients	Std. Error	t	Sig.
x_0	58.91	3.70	15.92	0.0000
x_1	-0.61	0.15	-4.09	0.0001
x_2	-	-	-	-
x_3	10.55	2.38	4.44	0.0000
x_4	-3.65	1.77	-2.06	0.0402
x_5	-40.27	1.77	-22.69	0.0000
x_6	-	-	-	-
x_7	3.01	0.56	5.37	0.0000
x_8	-2.73	1.05	-2.60	0.0097
x_9	7.52	1.13	6.64	0.0000
x_{10}	2.50	0.35	7.22	0.0000
x_{11}	-	-	-	-
x_{12}	12.04	3.04	3.96	0.0001
x_{13}	0.63	0.16	3.90	0.0001
x_{14}	-3.12	0.65	-4.82	0.0000
x_{15}	5.57	1.44	3.87	0.0001
x_{16}	0.36	0.09	3.84	0.0002
x_{17}	-0.94	0.18	-5.27	0.0000
x_{18}	-14.85	4.20	-3.54	0.0005
x_{19}	-15.33	1.96	-7.83	0.0000

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นเชิงพหุ

Model Summary				
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
0.9910	0.9820	0.981	0.093	1.747

ภาคผนวก ง
โปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์

ในส่วนนี้จะแสดงโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมแกมส์ (GAMS) สำหรับโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ไฟล์ ได้แก่

1) ไฟล์ normality.gms เป็นโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่สภาวะปกติ

2) ไฟล์ uncertainty.gms เป็นโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน

1) ไฟล์ normality.gms

```
$title Design and Optimization of Automotive Radiators

$offlisting
Option solprint=off;

set ii /0*10/;
alias(ii,jj);

parameter
u(ii),v(jj),fu(ii),fv(jj),u1(ii),v1(jj),fu1(ii),fv1(jj),fuv(ii,jj);

u('0')=0;    u('1')=1;   u('2')=2;     u('3')=3;     u('4')=4;
u('5')=5;
u('6')=6;    u('7')=7;   u('8')=8;     u('9')=9;     u('10')=10;
u1(ii)=u(ii)+1;

v('0')=0;    v('1')=1;   v('2')=2;     v('3')=3;     v('4')=4;
v('5')=5;
v('6')=6;    v('7')=7;   v('8')=8;     v('9')=9;     v('10')=10;
v1(jj)=v(jj)+1;

fu('0')=1;              fu('1')=1;              fu('2')=2;
fu('3')=6;              fu('4')=24;             fu('5')=120;
fu('6')=720;            fu('7')=5040;           fu('8')=40320;
fu('9')=362880;         fu('10')=3628800;

fu1('0')=1;             fu1('1')=2;             fu1('2')=6;
fu1('3')=24;            fu1('4')=120;           fu1('5')=720;
fu1('6')=5040;          fu1('7')=40320;         fu1('8')=362880;
fu1('9')=3628800;       fu1('10')=39916800;

fv('0')=1;              fv('1')=1;               fv('2')=2;
fv('3')=6;              fv('4')=24;              fv('5')=120;
fv('6')=720;            fv('7')=5040;            fv('8')=40320;
fv('9')=362880;         fv('10')=3628800;
```

```
fv1('0')=1;              fv1('1')=2;              fv1('2')=6;
fv1('3')=24;             fv1('4')=120;            fv1('5')=720;
fv1('6')=5040;           fv1('7')=40320;          fv1('8')=362880;
fv1('9')=3628800;        fv1('10')=39916800;

table fuv(ii,jj)
       0          1          2          3          4          5
0      1          1          2          6          24         120
1      1          2          6          24         120        720
2      2          6          24         120        720        5040

3      6          24         120        720        5040       40320

4      24         120        720        5040       40320      362880

5      120        720        5040       40320      362880     3628800

+

       6            7            8            9            10
0      720          5040         40320        362880       3628800
1      5040         40320        362880       3628800      39916800
2      40320        362880       3628800      39916800     479001600

3      362880       3628800      39916800     479001600    6227020800

4      3628800      39916800     479001600    6227020800
87178291200

5      39916800     479001600    6227020800   87178291200
1.30767E+12;



scalars   k,N;
parameters

         ufra    /8/
         Vw      /6.67e-004/
         St      /0.0508e-3/
         Lp1     /0.3/
         Dp1     /34e-3/
         Lp2     /0.3/
         Dp2     /34e-3/
         D1      /34e-3/
         D2      /44e-3/
         z1      /28e-3/
         z2      /13e-3/;

set i /CuB,Al1/;

parameters kfin(i)       /CuB 0.34,     Al1 0.24/
           ktube(i)      /CuB 0.104,    Al1 0.186/
           tfin(i)       /CuB 0.045e-3,Al1 0.08e-3/
           ttube(i)      /CuB 0.11e-3, Al1 0.265e-3/
           costfin(i)    /CuB 129     , Al1 147/
           denfin(i)     /CuB 8954,     Al1 2707/
           costtube(i)   /CuB 123,      Al1 147/
           dentube(i)    /CuB 8522,     Al1 2707/;

scalars  kf,kwall,Ft,Tt,cf,ct,cs;
```

```
parameter qqq,Pwup,Paup,W,D,H;
qqq=34.5;
Pwup=10000;
Paup=140;
W=0.6708;
H=0.325;
D=16e-3;

parameters
         Fd,Tl,Afra,Tw1,Ta1,Tw2,Ta2,Tww2,Taa2,TwI,TwII,TaI,TaII,
         Tww,Taa,dena,cpa,visa,ka,Pra,denw,cpw,visw,kw,Prw,
         denaI,cpaI,visaI,kaI,PraI,denwI,cpwI,viswI,kwI,PrwI,
         denaII,cpaII,visaII,kaII,PraII,denwII,cpwII,viswII,kwII,PrwII,
         Twref,Taref,denw1,denw2,visw1,visw2;

*define parameters
Fd=D;
Tl=H;
Afra=W*H;

Tw1= 90.55+273;
Ta1= 31.75+273;

Tw2= 67.98+273;
Ta2= 51.20+273;
k=1;
N=1000;

while ((k le N),

        Taa=(Ta1+Ta2)/2;
        Tww=(Tw1+Tw2)/2;

        dena= 5.722447e-8*Taa**3-4.532673e-5*Taa**2+7.847886e-3*Taa+
             1.359029e+000;
        cpa= -6.772398e-008*Taa**3+6.597090e-005*Taa**2-2.125316e-002*Taa+
             3.270914e+000;
        visa= -2.398627e-012*Taa**3+2.326925e-009*Taa**2-7.038609e-
007*Taa+
             8.498949e-005;
        ka= -5.469994e-012*Taa**3+5.254478e-009*Taa**2-1.597851e-006*Taa+
             1.802520e-004;
        Pra=cpa*visa/ka;

        denw=(0.3471*0.274**(-(1-Tww/647.13)**0.28571))*1000;
        cpw=(92.053-3.9953e-2*Tww-2.1103e-4*Tww**2+5.3469e-7*Tww**3)/18;
        visw=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tww)+1.773e-2*Tww-1.2631e-
5*Tww**2)*1e-3;
        kw=(-.2758+4.612e-3*Tww-5.5391e-6*Tww**2)*1e-3;
        Prw=cpw*visw/kw;

   Taa2=Ta1+qqq/(dena*ufra*Afra*cpa);
   Tww2=Tw1-qqq/(denw*Vw*cpw);

   if ((abs(Taa2-Ta2)< 1e-3)and(abs(Tww2-Tw2)< 1e-3),
      Ta2=Taa2;
      Tw2=Tww2;
      k=N+3;
   else
      Ta2=Taa2;
```

```
      Tw2=Tww2;
      k=k+1;
   );
);

denw1=(0.3471*0.274**(-(1-Tw1/647.13)**0.28571))*1000;
denw2=(0.3471*0.274**(-(1-Tw2/647.13)**0.28571))*1000;

visw1=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tw1)+1.773e-2*Tw1-1.2631e-5*Tw1**2)*1e-3;
visw2=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tw2)+1.773e-2*Tw2-1.2631e-5*Tw2**2)*1e-3;

Twref=Tw2-10;
Taref=Ta1-10;

TwI=((Tw1-Twref)**0.211)*((Tw2-Twref)**0.789)+Twref;
TaI=((Ta1-Taref)**0.211)*((Ta2-Taref)**0.789)+Taref;
TwII=((Tw1-Twref)**0.789)*((Tw2-Twref)**0.211)+Twref;
TaII=((Ta1-Taref)**0.789)*((Ta2-Taref)**0.211)+Taref;

denaI= 5.722447e-8*TaI**3-4.532673e-5*TaI**2+7.847886e-
3*TaI+1.359029e+000;
cpaI= -6.772398e-008*TaI**3+6.597090e-005*TaI**2-2.125316e-
002*TaI+3.270914e+000;
visaI= -2.398627e-012*TaI**3+2.326925e-009*TaI**2-7.038609e-
007*TaI+8.498949e-005;
kaI= -5.469994e-012*TaI**3+5.254478e-009*TaI**2-1.597851e-
006*TaI+1.802520e-004;
PraI=cpaI*visaI/kaI;

denwI=(0.3471*0.274**(-(1-TwI/647.13)**0.28571))*1000;
cpwI=(92.053-3.9953e-2*TwI-2.1103e-4*TwI**2+5.3469e-7*TwI**3)/18;
viswI=10**(-10.2158+((1.7925e3)/TwI)+1.773e-2*TwI-1.2631e-5*TwI**2)*1e-3;
kwI=(-.2758+4.612e-3*TwI-5.5391e-6*TwI**2)*1e-3;
PrwI=cpwI*viswI/kwI;

denaII= 5.722447e-8*TaII**3-4.532673e-5*TaII**2+7.847886e-
3*TaII+1.359029e+000;
cpaII= -6.772398e-008*TaII**3+6.597090e-005*TaII**2-2.125316e-
002*TaII+3.270914e+000;
visaII= -2.398627e-012*TaII**3+2.326925e-009*TaII**2-7.038609e-
007*TaII+8.498949e-005;
kaII= -5.469994e-012*TaII**3+5.254478e-009*TaII**2-1.597851e-
006*TaII+1.802520e-004;
PraII=cpaII*visaII/kaII;

denwII=(0.3471*0.274**(-(1-TwII/647.13)**0.28571))*1000;
cpwII=(92.053-3.9953e-2*TwII-2.1103e-4*TwII**2+5.3469e-7*TwII**3)/18;
viswII=10**(-10.2158+((1.7925e3)/TwII)+1.773e-2*TwII-1.2631e-
5*TwII**2)*1e-3;
kwII=(-.2758+4.612e-3*TwII-5.5391e-6*TwII**2)*1e-3;
PrwII=cpwII*viswII/kwII;

Parameters
         ma,Qa,mw,Qw,p,q,Pa1;

Pa1=101325;
ma=dena*ufra*Afra;
Qa=ma*cpa*(Ta2-Ta1);
mw=denw*Vw;
Qw=mw*cpw*(Tw1-Tw2);
```

```
p=(Tw1-Tw2)/(Tw1-Ta1);
q=(Ta2-Ta1)/(Tw1-Ta1);

Integer variable Nt,x1,x2,x6,x7;

Positive variables
         Td,Fl,Nm,Fp,Apr,Tw,Asc,Tp,Aa,Affa,Aw,Affw,Awall,
         ua,uw,ReLpI,ReLpII,Lp,La,Ll,haI,haII,mI,mII,l,mlI,mlII,
         tanhmlI,tanhmlII,effI,effII,effoI,effoII,Dha,faI,faII,
         PaI,PaII,Dhw,Dlw,ReDhwI,ReDhwII,ReDlwI,ReDlwII,fwI,fwII,
         fwrI,fwrII,fwsI,fwsII,hwI,hwII,hwsI,hwsII,hwrI,hwrII,PwI,PwII,
         r,MTD,pp,e,Kc,Ke,PtubeI,PtubeII,ReDp1,ReDp2,fp1,fp2,up1,up2,
         Ppipe,statI,statII,ut1,ut2,utank,Dht1,Dht2,Ret1,Ret2,Kwtank,
         PtankI,PtankII,UUAI,UUAII,UUA,Pa,Pw;

Free variable C;

Equations
         e1,e2,e3,e4,e5,e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
         e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
         e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
         e46,e47,e48,e49,e50,e51,e52,e53,e54,e55,e56,e57,e58,e59,e60,
         e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
         e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
         e91,e92,e93,e94,e95,e96,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,
         e104,e105,e106,e107;

e1.. Tp=e=Fl+Tw;
e2.. Nt=e=(W+Fl)/Tp;
e3.. Nm=e=H*(Nt-1)/(2*Fp);
e4.. Apr=e=(2*(2*Fp-2*Ft)*Fd+4*(Tw-2*Tt)*Fp)*Nm+2*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-
2*Tt));
e5.. Asc=e=4*(Fl-Ft)*Fd*Nm;

e6.. Tp=e=2*Fl+Tw;
e7.. Nt=e=(W+2*Fl)/((Tw+2*Fl));
e8.. Nm=e=2*H*(Nt-1)/(2*Fp);
e9.. Apr=e=((2*Fp-2*Ft)*Fd+2*(Tw-2*Tt)*Fp)*Nm +2*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));
e10.. Asc=e=4*(Fl-Ft)*Fd*Nm;

e11.. Aa=e=Apr+Asc;
e12.. Affa=e=(Fl-Ft)*(2*Fp-2*Ft)*Nm;
e13.. Aw=e=2*Nt*Tl*((Td-2*Tt) +(Tw-2*Tt));
e14.. Affw=e=(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt)*Nt;
e15.. Awall=e=2*Nt*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));

e16.. uw=e=Vw/Affw;
e17.. ua=e=ufra*Afra/Affa;

e18.. ReLpI=e=denaI*ua*Lp/visaI;
e19.. ReLpII=e=denaII*ua*Lp/visaII;

e20..
haI=e=1/(ReLpI**0.49)*((La/90)**0.27)*((Ll/Lp)**0.68)*((Lp/Fp)**0.14)*
((Lp/Fl)**0.29)*((Lp/Ft)**0.05)*((Lp/Td)**0.23)*((Lp/(Fl+Tw))**
(0.28))*(denaI*ua*cpaI/(PraI**(2/3)));
e21..
haII=e=1/(ReLpII**0.49)*((La/90)**0.27)*((Ll/Lp)**0.68)*((Lp/Fp)**0.14)*
((Lp/Fl)**0.29)*((Lp/Ft)**0.05)*((Lp/Td)**0.23)*((Lp/(Fl+Tw))**
(0.28))*(denaII*ua*cpaII/(PraII**(2/3)));
```

```
e22.. mI=e=(2*haI/(kf*Ft))**0.5;
e23.. mII=e=(2*haII/(kf*Ft))**0.5;

e24.. l=e=((Fl-Ft)+(Fp/2-Ft/2))/2;

e25.. mlI=e=mI*l;
e26.. mlII=e=mII*l;

e27.. tanhmlI=e=(exp(mlI)-exp(-mlI))/(exp(mlI)+exp(-mlI));
e28.. tanhmlII=e=(exp(mlII)-exp(-mlII))/(exp(mlII)+exp(-mlII));

e29.. effI=e=tanhmlI/mlI;
e30.. effII=e=tanhmlII/mlII;

e31.. effoI=e=1-Asc/Aa*(1-effI);
e32.. effoII=e=1-Asc/Aa*(1-effII);

e33.. Dha=e=4*(2*Fp-2*Ft)*(Fl-Ft)/(4*(Fl-Ft)+2*(2*Fp-2*Ft));

e34.. faI=e=(4.97*ReLpI**(0.6049-
1.064/(La**0.2)))*((log((Ft/Fp)**0.5+0.9))**
(-0.527))*(((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpI))**(-2.966))*((Fp/Ll)**((-0.7931)*
Tp/(Tp-Tw)))*((Tp/Tw)**(-0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)**1.4))**(-3.553))*
(La**(-0.477));

e35.. faII=e=(4.97*ReLpII**(0.6049-
1.064/(La**0.2)))*((log((Ft/Fp)**0.5+0.9))**
(-0.527))*(((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpII))**(-2.966))*((Fp/Ll)**((-0.7931)*
Tp/(Tp-Tw)))*((Tp/Tw)**(-0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)**1.4))**(-3.553))*
(La**(-0.477));

e36..  Ke=e=0.973-1.916*(Affa/Afra)+0.944*((Affa/Afra)**2);
e37..  Kc=e=0.408-0.409*((Affa/Afra)**2);

e38.. PaI=e=denaI*(ua**2)/2*(faI*Aa/Affa+Kc+Ke);
e39.. PaII=e=denaII*(ua**2)/2*(faII*Aa/Affa+Kc+Ke);

e40.. Dhw=e=(2*(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt))/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
e41.. Dlw=e=(2/3+11*(Tw-2*Tt)*(2-(Tw-2*Tt)/(Td-2*Tt))/(24*(Td-2*Tt)))*Dhw;

e42.. ReDhwI=e=denwI*uw*Dhw/viswI;
e43.. ReDhwII=e=denwII*uw*Dhw/viswII;

e44.. ReDlwI=e=denwI*uw*Dlw/viswI;
e45.. ReDlwII=e=denwII*uw*Dlw/viswII;

*smooth

e46.. fwI=e=(0.00128+0.1143*(ReDlwI**(-0.311)));
e47.. fwII=e=(0.00128+0.1143*(ReDlwII**(-0.311)));

*rib

e48.. fwsI=e=0.00128+0.1143*(ReDlwI**(-0.311));
e49.. fwsII=e=0.00128+0.1143*(ReDlwII**(-0.311));

e50.. fwrI=e=2/((0.95*(pp/e)**0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))**2;
```

```
e51..  fwrII=e=2/((0.95*(pp/e)**0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))**2;

e52.. fwI=e=((Tw-2*Tt)*fwsI+(Td-2*Tt)*fwrI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
e53.. fwII=e=((Tw-2*Tt)*fwsII+(Td-2*Tt)*fwrII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e54.. hwI=e=(fwI/2)*(ReDlwI-1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwI/2)**0.5)
 *(PrwI**(2/3)-1)));

e55.. hwII=e=(fwII/2)*(ReDlwII-
1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*((fwII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

e56.. hwsI=e=(fwsI/2)*(ReDlwI-1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwsI/2)**0.5)*
(PrwI**(2/3)-1)));

e57.. hwsII=e=(fwsII/2)*(ReDlwII-1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*
((fwsII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

e58.. hwrI=e=(fwrI/2)/(1+((fwrI/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwI*
((fwrI/2)**0.5))**0.28*(PrwI**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwI*uw*cpwI;

e59.. hwrII=e=(fwrII/2)/(1+((fwrII/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwII*
((fwrII/2)**0.5))**0.28*(PrwII**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwII*uw*cpwII;

e60.. hwI=e=((Tw-2*Tt)*hwsI+(Td-2*Tt)*hwrI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
e61.. hwII=e=((Tw-2*Tt)*hwsII+(Td-2*Tt)*hwrII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e62.. PtubeI=e=denwI*(uw**2)/2*(fwI*Aw/Affw+1.4);
e63.. PtubeII=e=denwII*(uw**2)/2*(fwII*Aw/Affw+1.4);

e64.. ReDp1=e=denw1*uw*Dp1/visw1;
e65.. ReDp2=e=denw2*uw*Dp2/visw2;
e66.. fp1=e=(0.00128+0.1143*(ReDp1**(-0.311)));
e67.. fp2=e=(0.00128+0.1143*(ReDp2**(-0.311)));
e68.. up1=e=Vw/(3.1416/4*(Dp1**2));
e69.. up2=e=Vw/(3.1416/4*(Dp2**2));
e70..
Ppipe=e=denw1*(up1**2)/2*(4*fp1*Lp1/Dp1)+denw2*(up2**2)/2*(4*fp2*Lp2/Dp2);

e71.. statI=e=denwI*(z1+z2+H)*9.8;
e72.. statII=e=denwII*(z1+z2+H)*9.8;

e73.. ut1=e=Vw/(W*D1);
e74.. ut2=e=Vw/(W*D2);
e75.. utank=e=(ut1+ut2)/2;
e76.. Dht1=e=2*(W*D1);
e77.. Dht2=e=2*(W*D2);
e78.. Ret1=e=denw1*ut1*Dht1/visw1;
e79.. Ret2=e=denw2*ut2*Dht2/visw2;

e80.. Kwtank=e=(3.83e25)*exp((-0.61*W+10.55*D-3.65*D1-
40.27*D2+3.01*z2)/Dht2)*
Ret1**(2.5-2.73*Dht1)*(Ret2**(7.52*Dht2))*((log(1+W/Dht2))**12.04)*
((log(1+H/Dht2))**0.63)*((log(1+D/Dht2))**(-3.12))*
((log(1+Dht1/Dht2))**5.57)*((log(1+z1/Dht2))**0.36)*
((log(1+z2/Dht2))**(-0.94))*((log(0.5*Ret1))**(-14.85))*
((log(0.5*Ret2))**(-15.33));

e81.. PtankI=e=(denwI*(utank**2))/2*Kwtank;
e82.. PtankII=e=(denwII*(utank**2))/2*Kwtank;
```

```
e83.. PwI=e=PtankI-statI+(PtubeI+Ppipe);
e84.. PwII=e=PtankII-statII+(PtubeII+Ppipe);
e85.. UUAI=e=(1/(1/(effoI*haI*Aa)+1/(hwI*Aw)+Tt/(kwall*Awall)));
e86.. UUAII=e=(1/(1/(effoII*haII*Aa)+1/(hwII*Aw)+Tt/(kwall*Awall)));
e87.. UUA=e=1/(0.5*(1/UUAI+1/UUAII));

e88.. r=e=sum((ii,jj),(power(-
1,(u(ii)+v(jj))))*fuv(ii,jj)/(fu(ii)*ful(ii)*
fv(jj)*fvl(jj))*((p/r)**u(ii))*((q/r)**v(jj)));

e89.. MTD=e=r*(Tw1-Ta1);

e90.. qqq=e=UUA*MTD;

e91.. Pa=e=Pa1*(1-(1-2*(0.5*UUA*(PaI/UUAI+PaII/UUAII))/Pa1)**0.5);
e92.. Pw=e=0.5*UUA*(PwI/UUAI+PwII/UUAII);

e93.. Pa=l=Paup;
e94.. Pw=l=Pwup;

*without splitter plate

e95.. C=e=cf*((2*Fp-2*Ft)+4*(Fl-Ft))*Fd+ct*2*Nt*H*((Tw-2*Tt)+(Tw-2*Tt));

*with splitter plate

e96.. C=e=cf*((2*Fp-2*Ft)+4*(Fl-Ft))*Fd+ct*2*Nt*H*((Tw-2*Tt)+(Tw-
2*Tt))+cs*D*H*(Nt-1);

e97.. Fl-Ll=g=1e-3;
e98.. e/Dhw*ReDhwI*(fwrI/2)**0.5=g=30;
e99.. e/Dhw*ReDhwII*(fwrII/2)**0.5=g=30;

e100.. e/Dhw=g=0.01;
e101.. e/Dhw=l=0.04;
e102.. pp/e=g=10;
e103.. pp/e=l=40;
e104.. x1=e=Fp*1e4;
e105.. x2=e=Fl*1e4;
e106.. x6=e=Td*1e4;
e107.. x7=e=Tw*1e4;

*initialization

Fp.l=1.5e-3;
Fl.l=8.2e-3;
Tw.l=1.5e-3;
Lp.l=1e-3;
Ll.l=7.2e-3;
La.l=25;
Td.l=14.5e-3;
Nt.l=70;
pp.l=4.06e-3;
e.l=0.25e-3;

*bound

Fp.lo=0.00050;          Fp.up=0.00200;
Fl.lo=0.005;            Fl.up=0.010;
Tw.lo=0.001;            Tp.lo=Fl.lo+Tw.lo;
Td.lo=10e-3;            Td.up=Fd;
```

```
Lp.lo=0.001;                Lp.up=0.005;
Ll.lo=0.005;                Ll.up=0.010;
La.lo=20;                   La.up=30;

Nt.lo=10;                   Nt.up=1000;
e.lo=1e-4;                  e.up=2.5e-4;
pp.lo=1e-3;                 pp.up=10e-3;

Affw.lo=0.0001;             Affa.lo=0.01;

ua.lo=1;                    ua.up=20;
ReLpI.lo=100;               ReLpI.up=1000;
ReLpII.lo=100;              ReLpII.up=1000;

Dha.lo=0.0005;              Dha.up=0.01;

faI.lo=0.01;                faI.up=0.5;
faII.lo=0.01;               faII.up=0.5;

haI.lo=0.05;                mI.lo=100;
haII.lo=0.05;               mII.lo=100;

l.lo=0.001;

mlI.lo=0.1;                 mlII.lo=0.1;

tanhmlI.lo=0.5;
tanhmlII.lo=0.5;

effI.lo=0.5;                effI.up=1;
effII.lo=0.5;               effII.up=1;

effoI.lo=0.5;               effoI.up=1;
effoII.lo=0.5;              effoII.up=1;

uw.lo=0.05;                 uw.up=5;

Dhw.lo=0.0005;              Dhw.up=0.01;
Dlw.lo=0.0005;              Dlw.up=0.01;

ReDhwI.lo=4000;             ReDhwI.up=5e5;
ReDhwII.lo=4000;            ReDhwII.up=5e5;

ReDlwI.lo=2500;             ReDlwI.up=5e5;
ReDlwII.lo=2500;            ReDlwII.up=5e5;

fwI.lo=0.001;
fwsI.lo=0.001;
fwrI.lo=0.001;

fwII.lo=0.001;
fwsII.lo=0.001;
fwrII.lo=0.001;

hwI.lo=0.5;                 hwI.up=30;
hwsI.lo=0.5;                hwsI.up=30;
hwrI.lo=0.5;                hwrI.up=30;

hwII.lo=0.5;                hwII.up=30;
hwsII.lo=0.5;               hwsII.up=30;
```

```
hwrII.lo=0.5;              hwrII.up=30;


Nm.lo=1000;                Nm.up=50000;
Apr.lo=0.1;                Apr.up=5;
Asc.lo=1;                  Asc.up=30;
Awall.lo=0.1;              Awall.up=5;
Aw.lo=0.1;                 Aw.up=5;
Aa.lo=Apr.lo+Asc.lo;       Aa.up=Apr.up+Asc.up;

PaI.lo=100;                PwI.lo=1000;
PaII.lo=100;               PwII.lo=1000;
PtubeI.lo=100;             PtubeII.lo=100;
Ppipe.lo=0.01;
statI.lo=100;              statII.lo=100;
PtankI.lo=500;             PtankII.lo=500;

ReDp1.lo=2000;             ReDp2.lo=2000;
fp1.lo=0.0001;             fp2.lo=0.0001;
up1.lo=0.01;               up2.lo=0.01;
ut1.lo=0.01;               ut2.lo=0.01;
utank.lo=0.01;
Kwtank.lo=500;

r.lo=0.5;
Kc.lo=0.01;
Ke.lo=0.01;

UUAI.lo=0.05;
UUAII.lo=0.05;
UUA.lo=0.05;

Model smooth1 /e1,e2,e3,e4,e5,e11,e12,e13,e14,e15,
         e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
         e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
         e46,e47,e54,e55,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,
         e73,e74,e75,e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,
         e88,e89,e90,e91,e92,e93,e94,e95,e97,e104,e105,e106,e107/;

Model rib1   /e1,e2,e3,e4,e5,e11,e12,e13,e14,e15,
         e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
         e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
         e48,e49,e50,e51,e52,e53,e56,e57,e58,e59,e60,
         e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
         e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
         e91,e92,e93,e94,e95,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,
         e104,e105,e106,e107/;

Model smooth2 /e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
         e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
         e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
         e46,e47,e54,e55,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,
         e73,e74,e75,e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,
         e88,e89,e90,e91,e92,e93,e94,e95,e97,e104,e105,e106,e107/;

Model rib2   /e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
         e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
         e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
         e48,e49,e50,e51,e52,e53,e56,e57,e58,e59,e60,
         e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
         e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
```

```
         e91,e92,e93,e94,e95,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,
         e104,e105,e106,e107/;

smooth1.scaleopt=1;
rib1.scaleopt=1;
smooth2.scaleopt=1;
rib2.scaleopt=1;

Option MINLP=sbb;
Option decimals=7;

parameters report1(*,*),report2(*,*),report3(*,*),report4(*,*);
loop(i,
         kf=kfin(i);
         kwall=ktube(i);
         Ft=tfin(i);
         Tt=ttube(i);

         cf=costfin(i)*denfin(i)*tfin(i);
         ct=costtube(i)*dentube(i)*ttube(i);
         cs=costfin(i)*denfin(i)*St;

         solve smooth1 using MINLP minimizing C;
         report1(i,"Fp")=Fp.l;
         report1(i,"Fl")=Fl.l;
         report1(i,"Lp")=Lp.l;
         report1(i,"Ll")=Ll.l;
         report1(i,"La")=La.l;
         report1(i,"Td")=Td.l;
         report1(i,"Tw")=Tw.l;
         report1(i,"Nt")=Nt.l;
         report1(i,"C")=C.l;
         report1(i,"Pa")=Pa.l;
         report1(i,"Pw")=Pw.l;

         solve rib1 using MINLP minimizing C;
         report2(i,"Fp")=Fp.l;
         report2(i,"Fl")=Fl.l;
         report2(i,"Lp")=Lp.l;
         report2(i,"Ll")=Ll.l;
         report2(i,"La")=La.l;
         report2(i,"Td")=Td.l;
         report2(i,"Tw")=Tw.l;
         report2(i,"Nt")=Nt.l;
         report2(i,"e")=e.l;
         report2(i,"p")=pp.l;
         report2(i,"C")=C.l;
         report2(i,"Pa")=Pa.l;
         report2(i,"Pw")=Pw.l;

         solve smooth2 using MINLP minimizing C;
         report3(i,"Fp")=Fp.l;
         report3(i,"Fl")=Fl.l;
         report3(i,"Lp")=Lp.l;
         report3(i,"Ll")=Ll.l;
         report3(i,"La")=La.l;
         report3(i,"Td")=Td.l;
         report3(i,"Tw")=Tw.l;
         report3(i,"Nt")=Nt.l;
         report3(i,"C")=C.l;
         report3(i,"Pa")=Pa.l;
```

```
        report3(i,"Pw")=Pw.l;


        solve rib2 using MINLP minimizing C;
        report4(i,"Fp")=Fp.l;
        report4(i,"Fl")=Fl.l;
        report4(i,"Lp")=Lp.l;
        report4(i,"Ll")=Ll.l;
        report4(i,"La")=La.l;
        report4(i,"Td")=Td.l;
        report4(i,"Tw")=Tw.l;
        report4(i,"Nt")=Nt.l;
        report4(i,"e")=e.l;
        report4(i,"p")=pp.l;
        report4(i,"C")=C.l;
        report4(i,"Pa")=Pa.l;
        report4(i,"Pw")=Pw.l;
);


file n1 /n1.dat/;
n1.pc=4;
n1.nd=10;
put n1;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report1(i,"Fp"),
@12,report1(i,"Fl"),
@15,report1(i,"Lp"),
@17,report1(i,"Ll"),
@19,report1(i,"La"),
@21,report1(i,"Td"),
@23,report1(i,"Tw"),
@25,report1(i,"Nt"),
@27,report1(i,"C"),
@29,report1(i,"Pa"),
@31,report1(i,"Pw")/);


file n2 /n2.dat/;
n2.pc=4;
n2.nd=10;
put n2;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report2(i,"Fp"),
@31,report2(i,"Fl"),
@33,report2(i,"Lp"),
@35,report2(i,"Ll"),
@37,report2(i,"La"),
@39,report2(i,"Td"),
@41,report2(i,"Tw"),
@43,report2(i,"Nt"),
@45,report2(i,"e"),
@47,report2(i,"p"),
@49,report2(i,"C"),
@51,report2(i,"Pa"),
@53,report2(i,"Pw")/);
```

```
file n3 /n3.dat/;
n3.pc=4;
n3.nd=10;
put n3;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report3(i,"Fp"),
@53,report3(i,"Fl"),
@55,report3(i,"Lp"),
@57,report3(i,"Ll"),
@59,report3(i,"La"),
@61,report3(i,"Td"),
@63,report3(i,"Tw"),
@65,report3(i,"Nt"),
@67,report3(i,"C"),
@69,report3(i,"Pa"),
@71,report3(i,"Pw")/);


file n4 /n4.dat/;
n4.pc=4;
n4.nd=10;
put n4;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report4(i,"Fp"),
@71,report4(i,"Fl"),
@73,report4(i,"Lp"),
@75,report4(i,"Ll"),
@77,report4(i,"La"),
@79,report4(i,"Td"),
@81,report4(i,"Tw"),
@83,report4(i,"Nt"),
@85,report4(i,"e"),
@87,report4(i,"p"),
@89,report4(i,"C"),
@91,report4(i,"Pa"),
@93,report4(i,"Pw")/);
```

2) ไฟล์ uncertainty.gms

```
$title Design and Optimization of Automotive Radiators

$offlisting
Option solprint=off;

set ii /0*10/;
alias(ii,jj);

parameter
u(ii),v(jj),fu(ii),fv(jj),u1(ii),v1(jj),fu1(ii),fv1(jj),fuv(ii,jj);

u('0')=0;    u('1')=1;   u('2')=2;     u('3')=3;     u('4')=4;
u('5')=5;
u('6')=6;    u('7')=7;   u('8')=8;     u('9')=9;     u('10')=10;
u1(ii)=u(ii)+1;

v('0')=0;    v('1')=1;   v('2')=2;     v('3')=3;     v('4')=4;
v('5')=5;
v('6')=6;    v('7')=7;   v('8')=8;     v('9')=9;     v('10')=10;
v1(jj)=v(jj)+1;

fu('0')=1;              fu('1')=1;              fu('2')=2;
fu('3')=6;              fu('4')=24;             fu('5')=120;
fu('6')=720;            fu('7')=5040;           fu('8')=40320;
fu('9')=362880;         fu('10')=3628800;

fu1('0')=1;             fu1('1')=2;             fu1('2')=6;
fu1('3')=24;            fu1('4')=120;           fu1('5')=720;
fu1('6')=5040;          fu1('7')=40320;         fu1('8')=362880;
fu1('9')=3628800;       fu1('10')=39916800;

fv('0')=1;              fv('1')=1;               fv('2')=2;
fv('3')=6;              fv('4')=24;              fv('5')=120;
fv('6')=720;            fv('7')=5040;            fv('8')=40320;
fv('9')=362880;         fv('10')=3628800;

fv1('0')=1;             fv1('1')=2;              fv1('2')=6;
fv1('3')=24;            fv1('4')=120;            fv1('5')=720;
fv1('6')=5040;          fv1('7')=40320;          fv1('8')=362880;
fv1('9')=3628800;       fv1('10')=39916800;

table fuv(ii,jj)
      0         1         2         3         4         5
0     1         1         2         6         24        120
1     1         2         6         24        120       720
2     2         6         24        120       720       5040

3     6         24        120       720       5040      40320

4     24        120       720       5040      40320     362880

5     120       720       5040      40320     362880    3628800

+
```

```
        6           7           8           9           10
0       720         5040        40320       362880      3628800
1       5040        40320       362880      3628800     39916800
2       40320       362880      3628800     39916800    479001600

3       362880      3628800     39916800    479001600   6227020800

4       3628800     39916800    479001600   6227020800
87178291200

5       39916800    479001600   6227020800  87178291200
1.30767E+12;


scalars   k,N;
parameters

          ufra     /8/
          Vw       /6.67e-004/
          St       /0.0508e-3/
          Lp1      /0.3/
          Dp1      /34e-3/
          Lp2      /0.3/
          Dp2      /34e-3/
          D1       /34e-3/
          D2       /44e-3/
          z1       /28e-3/
          z2       /13e-3/;

set i /CuB,Al1/;

parameters kfin(i)        /CuB 0.34,     Al1 0.24/
           ktube(i)       /CuB 0.104,    Al1 0.186/
           tfin(i)        /CuB 0.045e-3,Al1 0.08e-3/
           ttube(i)       /CuB 0.11e-3,  Al1 0.265e-3/
           costfin(i)     /CuB 129     , Al1 147/
           denfin(i)      /CuB 8954,     Al1 2707/
           costtube(i)    /CuB 123,      Al1 147/
           dentube(i)     /CuB 8522,     Al1 2707/;

scalars  kf,kwall,Ft,Tt,cf,ct,cs;

parameter qqq,Pwup,Paup,W,D,H;
qqq=34.5;
Pwup=10000;
Paup=140;
W=0.6708;
H=0.325;
D=16e-3;

parameters
          Fd,Tl,Afra,Tw1,Ta1,Tw2,Ta2,Tww2,Taa2,TwI,TwII,TaI,TaII,
          Tww,Taa,dena,cpa,visa,ka,Pra,denw,cpw,visw,kw,Prw,
          denaI,cpaI,visaI,kaI,PraI,denwI,cpwI,viswI,kwI,PrwI,
          denaII,cpaII,visaII,kaII,PraII,denwII,cpwII,viswII,kwII,PrwII,
          Twref,Taref,denw1,denw2,visw1,visw2;

*define parameters
Fd=D;
Tl=H;
```

```
Afra=W*H;

Tw1= 90.55+273;
Ta1= 31.75+273;

Tw2= 67.98+273;
Ta2= 51.20+273;
k=1;
N=1000;

while ((k le N),

        Taa=(Ta1+Ta2)/2;
        Tww=(Tw1+Tw2)/2;

        dena= 5.722447e-8*Taa**3-4.532673e-5*Taa**2+7.847886e-3*Taa+
             1.359029e+000;
        cpa= -6.772398e-008*Taa**3+6.597090e-005*Taa**2-2.125316e-002*Taa+
             3.270914e+000;
        visa= -2.398627e-012*Taa**3+2.326925e-009*Taa**2-7.038609e-
007*Taa+
             8.498949e-005;
        ka= -5.469994e-012*Taa**3+5.254478e-009*Taa**2-1.597851e-006*Taa+
             1.802520e-004;
        Pra=cpa*visa/ka;

        denw=(0.3471*0.274**(-(1-Tww/647.13)**0.28571))*1000;
        cpw=(92.053-3.9953e-2*Tww-2.1103e-4*Tww**2+5.3469e-7*Tww**3)/18;
        visw=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tww)+1.773e-2*Tww-1.2631e-
5*Tww**2)*1e-3;
        kw=(-.2758+4.612e-3*Tww-5.5391e-6*Tww**2)*1e-3;
        Prw=cpw*visw/kw;

   Taa2=Ta1+qqq/(dena*ufra*Afra*cpa);
   Tww2=Tw1-qqq/(denw*Vw*cpw);



   if ((abs(Taa2-Ta2)< 1e-3)and(abs(Tww2-Tw2)< 1e-3),
      Ta2=Taa2;
      Tw2=Tww2;
      k=N+3;
   else
      Ta2=Taa2;
      Tw2=Tww2;
      k=k+1;
   );
);

denw1=(0.3471*0.274**(-(1-Tw1/647.13)**0.28571))*1000;
denw2=(0.3471*0.274**(-(1-Tw2/647.13)**0.28571))*1000;

visw1=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tw1)+1.773e-2*Tw1-1.2631e-5*Tw1**2)*1e-3;
visw2=10**(-10.2158+((1.7925e3)/Tw2)+1.773e-2*Tw2-1.2631e-5*Tw2**2)*1e-3;

Twref=Tw2-10;
Taref=Ta1-10;

TwI=((Tw1-Twref)**0.211)*((Tw2-Twref)**0.789)+Twref;
TaI=((Ta1-Taref)**0.211)*((Ta2-Taref)**0.789)+Taref;
TwII=((Tw1-Twref)**0.789)*((Tw2-Twref)**0.211)+Twref;
```

```
TaII=((Ta1-Taref)**0.789)*((Ta2-Taref)**0.211)+Taref;

denaI= 5.722447e-8*TaI**3-4.532673e-5*TaI**2+7.847886e-
3*TaI+1.359029e+000;
cpaI= -6.772398e-008*TaI**3+6.597090e-005*TaI**2-2.125316e-
002*TaI+3.270914e+000;
visaI= -2.398627e-012*TaI**3+2.326925e-009*TaI**2-7.038609e-
007*TaI+8.498949e-005;
kaI= -5.469994e-012*TaI**3+5.254478e-009*TaI**2-1.597851e-
006*TaI+1.802520e-004;
PraI=cpaI*visaI/kaI;

denwI=(0.3471*0.274**(-(1-TwI/647.13)**0.28571))*1000;
cpwI=(92.053-3.9953e-2*TwI-2.1103e-4*TwI**2+5.3469e-7*TwI**3)/18;
viswI=10**(-10.2158+((1.7925e3)/TwI)+1.773e-2*TwI-1.2631e-5*TwI**2)*1e-3;
kwI=(-.2758+4.612e-3*TwI-5.5391e-6*TwI**2)*1e-3;
PrwI=cpwI*viswI/kwI;

denaII= 5.722447e-8*TaII**3-4.532673e-5*TaII**2+7.847886e-
3*TaII+1.359029e+000;
cpaII= -6.772398e-008*TaII**3+6.597090e-005*TaII**2-2.125316e-
002*TaII+3.270914e+000;
visaII= -2.398627e-012*TaII**3+2.326925e-009*TaII**2-7.038609e-
007*TaII+8.498949e-005;
kaII= -5.469994e-012*TaII**3+5.254478e-009*TaII**2-1.597851e-
006*TaII+1.802520e-004;
PraII=cpaII*visaII/kaII;

denwII=(0.3471*0.274**(-(1-TwII/647.13)**0.28571))*1000;
cpwII=(92.053-3.9953e-2*TwII-2.1103e-4*TwII**2+5.3469e-7*TwII**3)/18;
viswII=10**(-10.2158+((1.7925e3)/TwII)+1.773e-2*TwII-1.2631e-
5*TwII**2)*1e-3;
kwII=(-.2758+4.612e-3*TwII-5.5391e-6*TwII**2)*1e-3;
PrwII=cpwII*viswII/kwII;

Parameters
         ma,Qa,mw,Qw,p,q,Pa1;

Pa1=101325;
ma=dena*ufra*Afra;
Qa=ma*cpa*(Ta2-Ta1);
mw=denw*Vw;
Qw=mw*cpw*(Tw1-Tw2);

p=(Tw1-Tw2)/(Tw1-Ta1);
q=(Ta2-Ta1)/(Tw1-Ta1);

Integer variable Nt,x1,x2,x6,x7;

Positive variables
         Td,Fl,Nm,Fp,Apr,Tw,Asc,Tp,Aa,Affa,Aw,Affw,Awall,
         ua,uw,ReLpI,ReLpII,Lp,La,Ll,haI,haII,halI,hauI,halII,hauII,

mI,mII,m_lI,m_uI,m_lII,m_uII,l,mlI,mlII,ml_lI,ml_lII,ml_uI,ml_uII,
         tanhmlI,tanhmlII,tanhml_lI,tanhml_lII,tanhml_uI,tanhml_uII,
         effI,effII,eff_lI,eff_uI,eff_lII,eff_uII,
         effoI,effoII,effo_lI,effo_lII,effo_uI,effo_uII,
         Dha,faI,faII,falI,fauI,falII,fauII,
         PaI,PaII,PalI,PalII,PauI,PauII,
         Dhw,Dlw,ReDhwI,ReDhwII,ReDlwI,ReDlwII,
         fwI,fwII,fwlI,fwlII,fwuI,fwuII,
```

```
          fwrI,fwrII,fwrlI,fwrlII,fwruI,fwruII,
          fwsI,fwsII,fwslI,fwslII,fwsuI,fwsuII,

hwI,hwII,hwlI,hwlII,hwuI,hwuII,hwsI,hwsII,hwslI,hwslII,hwsuI,hwsuII,

hwrI,hwrII,hwrlI,hwrlII,hwruI,hwruII,PwI,PwII,PwlI,PwlII,PwuI,PwuII,
          r,MTD,pp,e,Kc,Ke,PtubeI,PtubeII,ReDp1,ReDp2,fp1,fp2,up1,up2,
          Ppipe,statI,statII,ut1,ut2,utank,Dht1,Dht2,Ret1,Ret2,Kwtank,
          PtankI,PtankII,UUAI,UUAII,UUA,Pa,Pw,Pal,Pau,Pwl,Pwu;


Free variable C;

Equations
          e1,e2,e3,e4,e5,e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
          e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
          e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
          e46,e47,e48,e49,e50,e51,e52,e53,e54,e55,e56,e57,e58,e59,e60,
          e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
          e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
          e91,e92,e93,e94,e95,e96,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,

e104,e105,e106,e107,b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,b11,b12,b13,b14,b15,
          b16,b17,b18,b19,b20,b21,b22,b23,b24,b25,b26,b27,b28,b29,b30,
          b31,b32,b33,b34,b35,b36,b37,b38,b39,b40,b41,b42,b43,b44,
          c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,c11,c12,c13,c14,
          c15,c16,c17,c18,c19,c20,c21,c22,c23,c24,c25,c26,c27,c28,c29,c30,
          c31,c32,c33,c34,c35,c36;

e1.. Tp=e=Fl+Tw;
e2.. Nt=e=(W+Fl)/Tp;
e3.. Nm=e=H*(Nt-1)/(2*Fp);
e4.. Apr=e=(2*(2*Fp-2*Ft)*Fd+4*(Tw-2*Tt)*Fp)*Nm+2*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-
2*Tt));
e5.. Asc=e=4*(Fl-Ft)*Fd*Nm;
e6.. Tp=e=2*Fl+Tw;
e7.. Nt=e=(W+2*Fl)/((Tw+2*Fl));
e8.. Nm=e=2*H*(Nt-1)/(2*Fp);
e9.. Apr=e=((2*Fp-2*Ft)*Fd+2*(Tw-2*Tt)*Fp)*Nm +2*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));
e10.. Asc=e=4*(Fl-Ft)*Fd*Nm;

e11.. Aa=e=Apr+Asc;
e12.. Affa=e=(Fl-Ft)*(2*Fp-2*Ft)*Nm;
e13.. Aw=e=2*Nt*Tl*((Td-2*Tt) +(Tw-2*Tt));
e14.. Affw=e=(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt)*Nt;
e15.. Awall=e=2*Nt*Tl*((Td-2*Tt)+(Tw-2*Tt));

e16.. uw=e=Vw/Affw;
e17.. ua=e=ufra*Afra/Affa;

e18.. ReLpI=e=denaI*ua*Lp/visaI;
e19.. ReLpII=e=denaII*ua*Lp/visaII;

e20..
haI=e=1/(ReLpI**0.49)*((La/90)**0.27)*((Ll/Lp)**0.68)*((Lp/Fp)**0.14)*
((Lp/Fl)**0.29)*((Lp/Ft)**0.05)*((Lp/Td)**0.23)*((Lp/(Fl+Tw))**
(0.28))*(denaI*ua*cpaI/(PraI**(2/3)));

b1..  halI=e=0.85*haI;
b2..  hauI=e=1.15*haI;
```

```
e21..
haII=e=1/(ReLpII**0.49)*((La/90)**0.27)*((Ll/Lp)**0.68)*((Lp/Fp)**0.14)*
((Lp/Fl)**0.29)*((Lp/Ft)**0.05)*((Lp/Td)**0.23)*((Lp/(Fl+Tw))**
(0.28))*(denaII*ua*cpaII/(PraII**(2/3)));

c1..  halII=e=0.85*haII;
c2..  hauII=e=1.15*haII;

e22.. mI=e=(2*haI/(kf*Ft))**0.5;
b3..  m_lI=e=(2*halI/(kf*Ft))**0.5;
b4..  m_uI=e=(2*hauI/(kf*Ft))**0.5;

e23.. mII=e=(2*haII/(kf*Ft))**0.5;
c3..  m_lII=e=(2*halII/(kf*Ft))**0.5;
c4..  m_uII=e=(2*hauII/(kf*Ft))**0.5;

e24.. l=e=((Fl-Ft)+(Fp/2-Ft/2))/2;

e25.. mlI=e=mI*l;
b5..  ml_lI=e=m_lI*l;
b6..  ml_uI=e=m_uI*l;

e26.. mlII=e=mII*l;
c5..  ml_lII=e=m_lII*l;
c6..  ml_uII=e=m_uII*l;

e27.. tanhmlI=e=(exp(mlI)-exp(-mlI))/(exp(mlI)+exp(-mlI));
b7..  tanhml_lI=e=(exp(ml_lI)-exp(-ml_lI))/(exp(ml_lI)+exp(-ml_lI));
b8..  tanhml_uI=e=(exp(ml_uI)-exp(-ml_uI))/(exp(ml_uI)+exp(-ml_uI));

e28.. tanhmlII=e=(exp(mlII)-exp(-mlII))/(exp(mlII)+exp(-mlII));
c7..  tanhml_lII=e=(exp(ml_lII)-exp(-ml_lII))/(exp(ml_lII)+exp(-ml_lII));
c8..  tanhml_uII=e=(exp(ml_uII)-exp(-ml_uII))/(exp(ml_uII)+exp(-ml_uII));
e29.. effI=e=tanhmlI/mlI;
b9..  eff_lI=e=tanhml_lI/ml_lI;
b10.. eff_uI=e=tanhml_uI/ml_uI;

e30.. effII=e=tanhmlII/mlII;
c9..  eff_lII=e=tanhml_lII/ml_lII;
c10.. eff_uII=e=tanhml_uII/ml_uII;

e31.. effoI=e=1-Asc/Aa*(1-effI);
b11.. effo_lI=e=1-Asc/Aa*(1-eff_lI);
b12.. effo_uI=e=1-Asc/Aa*(1-eff_uI);

e32.. effoII=e=1-Asc/Aa*(1-effII);
c11.. effo_lII=e=1-Asc/Aa*(1-eff_lII);
c12.. effo_uII=e=1-Asc/Aa*(1-eff_uII);

e33.. Dha=e=4*(2*Fp-2*Ft)*(Fl-Ft)/(4*(Fl-Ft)+2*(2*Fp-2*Ft));

e34..
faI=e=(4.97*ReLpI**(0.6049-1.064/(La**0.2)))*((log((Ft/Fp)**0.5+0.9))**
(-0.527))*(((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpI))**(-2.966))*((Fp/Ll)**((-
0.7931)*Tp/(Tp-Tw)))*((Tp/Tw)**(- 0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)**1.4))**(-
3.553))*(La**(-0.477));

b13.. faII=e=1.15*faI;
b14.. fauI=e=0.85*faI;
```

```
e35.. faII=e=(4.97*ReLpII**(0.6049-
1.064/(La**0.2)))*((log((Ft/Fp)**0.5+0.9))**(-
0.527))*(((Dha/Lp)*log(0.3*ReLpII))**(-2.966))*((Fp/Ll)**((-0.7931)*
         Tp/(Tp-Tw)))*((Tp/Tw)**(-0.0446))*((log(1.2+(Lp/Fp)**1.4))**(-
3.553))*(La**(-0.477));

c13.. falII=e=1.15*faII;
c14.. fauII=e=0.85*faII;

e36..  Ke=e=0.973-1.916*(Affa/Afra)+0.944*((Affa/Afra)**2);
e37..  Kc=e=0.408-0.409*((Affa/Afra)**2);

e38.. PaI=e=denaI*(ua**2)/2*(faI*Aa/Affa+Kc+Ke);
b15.. PalI=e=denaI*(ua**2)/2*(falI*Aa/Affa+Kc+Ke);
b16.. PauI=e=denaI*(ua**2)/2*(fauI*Aa/Affa+Kc+Ke);

e39.. PaII=e=denaII*(ua**2)/2*(faII*Aa/Affa+Kc+Ke);
c15.. PalII=e=denaII*(ua**2)/2*(falII*Aa/Affa+Kc+Ke);
c16.. PauII=e=denaII*(ua**2)/2*(fauII*Aa/Affa+Kc+Ke);

e40.. Dhw=e=(2*(Tw-2*Tt)*(Td-2*Tt))/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
e41.. Dlw=e=(2/3+11*(Tw-2*Tt)*(2-(Tw-2*Tt)/(Td-2*Tt))/(24*(Td-2*Tt)))*Dhw;

e42.. ReDhwI=e=denwI*uw*Dhw/viswI;
e43.. ReDhwII=e=denwII*uw*Dhw/viswII;

e44.. ReDlwI=e=denwI*uw*Dlw/viswI;
e45.. ReDlwII=e=denwII*uw*Dlw/viswII;

*smooth

e46.. fwI=e=(0.00128+0.1143*(ReDlwI**(-0.311)));
b17.. fwlI=e=0.85*fwI;
b18.. fwuI=e=1.15*fwI;
e47.. fwII=e=(0.00128+0.1143*(ReDlwII**(-0.311)));
c17.. fwlII=e=0.85*fwII;
c18.. fwuII=e=1.15*fwII;

*rib

e48..  fwsI=e=0.00128+0.1143*(ReDlwI**(-0.311));
b19.. fwslI=e=0.85*fwsI;
b20.. fwsuI=e=1.15*fwsI;

e49..  fwsII=e=0.00128+0.1143*(ReDlwII**(-0.311));
c19.. fwslII=e=0.85*fwsII;
c20.. fwsuII=e=1.15*fwsII;

e50..  fwrI=e=2/((0.95*(pp/e)**0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))**2;

b21.. fwrlI=e=0.85*fwrI;
b22.. fwruI=e=1.15*fwrI;

e51..  fwrII=e=2/((0.95*(pp/e)**0.53)-2.5*log(2*e/Dhw)-2.5-2.5*log(2*(Td-
2*Tt)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt))))**2;

c21.. fwrlII=e=0.85*fwrII;
c22.. fwruII=e=1.15*fwrII;

e52..  fwI=e=((Tw-2*Tt)*fwsI+(Td-2*Tt)*fwrI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
```

```
b23.. fwlI=e=((Tw-2*Tt)*fwslI+(Td-2*Tt)*fwrlI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
b24.. fwuI=e=((Tw-2*Tt)*fwsuI+(Td-2*Tt)*fwruI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e53..  fwII=e=((Tw-2*Tt)*fwsII+(Td-2*Tt)*fwrII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
c23.. fwlII=e=((Tw-2*Tt)*fwslII+(Td-2*Tt)*fwrlII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
c24.. fwuII=e=((Tw-2*Tt)*fwsuII+(Td-2*Tt)*fwruII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e54.. hwI=e=(fwI/2)*(ReDlwI-1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwI/2)**0.5)*
(PrwI**(2/3)-1)));

b25.. hwlI=e=0.85*(fwlI/2)*(ReDlwI-
1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwlI/2)**0.5)*(PrwI**(2/3)-1)));

b26.. hwuI=e=1.15*(fwuI/2)*(ReDlwI-
1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwuI/2)**0.5)*(PrwI**(2/3)-1)));

e55.. hwII=e=(fwII/2)*(ReDlwII-
1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*((fwII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

c25.. hwlII=e=0.85*(fwlII/2)*(ReDlwII-1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*
((fwlII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

c26.. hwuII=e=1.15*(fwuII/2)*(ReDlwII-1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*
((fwuII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

e56..  hwsI=e=(fwsI/2)*(ReDlwI-
1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*((fwsI/2)**0.5)*(PrwI**(2/3)-1)));

b27.. hwslI=e=0.85*(fwslI/2)*(ReDlwI-1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*
((fwslI/2)**0.5)*(PrwI**(2/3)-1)));

b28.. hwsuI=e=1.15*(fwsuI/2)*(ReDlwI-1000)*PrwI*kwI/(Dlw*(1+12.7*
((fwsuI/2)**0.5)*(PrwI**(2/3)-1)));
e57.. hwsII=e=(fwsII/2)*(ReDlwII-
1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*((fwsII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

c27.. hwslII=e=0.85*(fwslII/2)*(ReDlwII-1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*
((fwslII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

c28.. hwsuII=e=1.15*(fwsuII/2)*(ReDlwII-1000)*PrwII*kwII/(Dlw*(1+12.7*
((fwsuII/2)**0.5)*(PrwII**(2/3)-1)));

e58..  hwrI=e=(fwrI/2)/(1+((fwrI/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwI*
((fwrI/2)**0.5))**0.28*(PrwI**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwI*uw*cpwI;

b29.. hwrlI=e=0.85*(fwrlI/2)/(1+((fwrlI/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwI*
((fwrlI/2)**0.5))**0.28*(PrwI**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwI*uw*cpwI;

b30.. hwruI=e=1.15*(fwruI/2)/(1+((fwruI/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwI*
((fwruI/2)**0.5))**0.28*(PrwI**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwI*uw*cpwI;

e59..
hwrII=e=(fwrII/2)/(1+((fwrII/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwII*((fwrII/2)**0.5)
)**0.28*(PrwII**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*denwII*uw*cpwII;

c29.. hwrlII=e=0.85*(fwrlII/2)/(1+((fwrlII/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwII*
((fwrlII/2)**0.5))**0.28*(PrwII**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*
denwII*uw*cpwII;

c30.. hwruII=e=1.15*(fwruII/2)/(1+((fwruII/2)**0.5)*(4.5*(e/Dhw*ReDhwII*
((fwruII/2)**0.5))**0.28*(PrwII**0.57)-0.95*(pp/e)**0.53))*
```

```
denwII*uw*cpwII;

e60.. hwI=e=((Tw-2*Tt)*hwsI+(Td-2*Tt)*hwrI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
b31.. hwlI=e=((Tw-2*Tt)*hwslI+(Td-2*Tt)*hwrlI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
b32.. hwuI=e=((Tw-2*Tt)*hwsuI+(Td-2*Tt)*hwruI)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e61..  hwII=e=((Tw-2*Tt)*hwsII+(Td-2*Tt)*hwrII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
c31.. hwlII=e=((Tw-2*Tt)*hwslII+(Td-2*Tt)*hwrlII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));
c32.. hwuII=e=((Tw-2*Tt)*hwsuII+(Td-2*Tt)*hwruII)/((Tw-2*Tt)+(Td-2*Tt));

e62.. PtubeI=e=denwI*(uw**2)/2*(fwI*Aw/Affw+1.4);
b33.. PwlI=e=denwI*(uw**2)/2*(fwlI*Aw/Affw+1.4);
b34.. PwuI=e=denwI*(uw**2)/2*(fwuI*Aw/Affw+1.4);

e63.. PtubeII=e=denwII*(uw**2)/2*(fwII*Aw/Affw+1.4);
c33.. PwlII=e=denwII*(uw**2)/2*(fwlII*Aw/Affw+1.4);
c34.. PwuII=e=denwII*(uw**2)/2*(fwuII*Aw/Affw+1.4);

e64.. ReDp1=e=denw1*uw*Dp1/visw1;
e65.. ReDp2=e=denw2*uw*Dp2/visw2;
e66.. fp1=e=(0.00128+0.1143*(ReDp1**(-0.311)));
e67.. fp2=e=(0.00128+0.1143*(ReDp2**(-0.311)));
e68.. up1=e=Vw/(3.1416/4*(Dp1**2));
e69.. up2=e=Vw/(3.1416/4*(Dp2**2));
e70..
Ppipe=e=denw1*(up1**2)/2*(4*fp1*Lp1/Dp1)+denw2*(up2**2)/2*(4*fp2*Lp2/Dp2);

e71.. statI=e=denwI*(z1+z2+H)*9.8;
e72.. statII=e=denwII*(z1+z2+H)*9.8;

e73.. ut1=e=Vw/(W*D1);
e74.. ut2=e=Vw/(W*D2);
e75.. utank=e=(ut1+ut2)/2;
e76.. Dht1=e=2*(W*D1);
e77.. Dht2=e=2*(W*D2);
e78.. Ret1=e=denw1*ut1*Dht1/visw1;
e79.. Ret2=e=denw2*ut2*Dht2/visw2;
e80.. Kwtank=e=(3.83e25)*exp((-0.61*W+10.55*D-3.65*D1-
40.27*D2+3.01*z2)/Dht2)*Ret1**(2.5-
2.73*Dht1)*(Ret2**(7.52*Dht2))*((log(1+W/Dht2))**12.04)*
((log(1+H/Dht2))**0.63)*((log(1+D/Dht2))**(-3.12))*
((log(1+Dht1/Dht2))**5.57)*((log(1+z1/Dht2))**0.36)*
((log(1+z2/Dht2))**(-0.94))*((log(0.5*Ret1))**(-14.85))*
((log(0.5*Ret2))**(-15.33));

e81.. PtankI=e=(denwI*(utank**2))/2*Kwtank;
e82.. PtankII=e=(denwII*(utank**2))/2*Kwtank;

e83.. PwI=e=PtankI-statI+(PtubeI+Ppipe);
e84.. PwII=e=PtankII-statII+(PtubeII+Ppipe);

e85..
UUAI=e=(0.1*(1/(1/(effoI*halI*Aa)+1/(hwlI*Aw)+Tt/(kwall*Awall)))+
0.8*(1/(1/(effoI*haI*Aa)+1/(hwI*Aw)+Tt/(kwall*Awall)))+
0.1*(1/(1/(effoI*hauI*Aa)+1/(hwuI*Aw)+Tt/(kwall*Awall))));

e86..
UUAII=e=(0.1*(1/(1/(effoII*halII*Aa)+1/(hwlII*Aw)+Tt/(kwall*Awall)))+
0.8*(1/(1/(effoI*haII*Aa)+1/(hwII*Aw)+Tt/(kwall*Awall)))+
0.1*(1/(1/(effoI*hauII*Aa)+1/(hwuII*Aw)+Tt/(kwall*Awall))));
```

```
e87.. UUA=e=1/(0.5*(1/UUAI+1/UUAII));

e88..  r=e=sum((ii,jj),(power(-
1,(u(ii)+v(jj))))*fuv(ii,jj)/(fu(ii)*ful(ii)*
fv(jj)*fvl(jj))*((p/r)**u(ii))*((q/r)**v(jj)));

e89..  MTD=e=r*(Twl-Tal);

e90.. qqq=e=UUA*MTD;

e91.. Pa=e=Pal*(1-(1-2*(0.5*UUA*(PaI/UUAI+PaII/UUAII))/Pal)**0.5);
b41.. Pal=e=Pal*(1-(1-2*(0.5*UUA*(PalI/UUAI+PalII/UUAII))/Pal)**0.5);
b42.. Pau=e=Pal*(1-(1-2*(0.5*UUA*(PauI/UUAI+PauII/UUAII))/Pal)**0.5);

e92.. Pw=e=0.5*UUA*(PwI/UUAI+PwII/UUAII);
b43.. Pwl=e=0.5*UUA*(PwlI/UUAI+PwlII/UUAII);
b44.. Pwu=e=0.5*UUA*(PwuI/UUAI+PwuII/UUAII);

e93.. Pa=l=Paup;
b37.. Pal=l=Paup;
b38.. Pau=l=Paup;

e94.. Pw=l=Pwup;
b39.. Pwl=l=Pwup;
b40.. Pwu=l=Pwup;
*without splitter plate

e95.. C=e=cf*((2*Fp-2*Ft)+4*(Fl-Ft))*Fd+ct*2*Nt*H*((Tw-2*Tt)+(Tw-2*Tt));

*with splitter plate

e96.. C=e=cf*((2*Fp-2*Ft)+4*(Fl-Ft))*Fd+ct*2*Nt*H*((Tw-2*Tt)+(Tw-
2*Tt))+cs*D*H*(Nt-1);

e97.. Fl-Ll=g=1e-3;
e98.. e/Dhw*ReDhwI*(fwrI/2)**0.5=g=30;
b35.. e/Dhw*ReDhwI*(fwrlI/2)**0.5=g=30;
b36.. e/Dhw*ReDhwI*(fwruI/2)**0.5=g=30;

e99.. e/Dhw*ReDhwII*(fwrII/2)**0.5=g=30;
c35.. e/Dhw*ReDhwII*(fwrlII/2)**0.5=g=30;
c36.. e/Dhw*ReDhwII*(fwruII/2)**0.5=g=30;

e100.. e/Dhw=g=0.01;
e101.. e/Dhw=l=0.04;
e102.. pp/e=g=10;
e103.. pp/e=l=40;
e104.. x1=e=Fp*1e4;
e105.. x2=e=Fl*1e4;
e106.. x6=e=Td*1e4;
e107.. x7=e=Tw*1e4;

*initialization

Fp.l=1.5e-3;
Fl.l=8.2e-3;
Tw.l=1.5e-3;
Lp.l=1e-3;
Ll.l=7.2e-3;
La.l=25;
Td.l=14.5e-3;
```

```
Nt.l=70;
pp.l=4.06e-3;
e.l=0.25e-3;

*bound

Fp.lo=0.00050;          Fp.up=0.00200;
Fl.lo=0.005;            Fl.up=0.010;
Tw.lo=0.001;            Tp.lo=Fl.lo+Tw.lo;
Td.lo=10e-3;            Td.up=Fd;

Lp.lo=0.001;            Lp.up=0.005;
Ll.lo=0.005;            Ll.up=0.010;
La.lo=20;               La.up=30;

Nt.lo=10;               Nt.up=1000;
e.lo=1e-4;              e.up=2.5e-4;
pp.lo=1e-3;             pp.up=10e-3;

Affw.lo=0.0001;         Affa.lo=0.01;

ua.lo=1;                ua.up=20;
ReLpI.lo=100;           ReLpI.up=1000;
ReLpII.lo=100;          ReLpII.up=1000;

Dha.lo=0.0005;          Dha.up=0.01;

faI.lo=0.01;            faI.up=0.5;
faII.lo=0.01;           faII.up=0.5;

falI.lo=0.01;           falI.up=0.5;
falII.lo=0.01;          falII.up=0.5;

fauI.lo=0.01;           fauI.up=0.5;
fauII.lo=0.01;          fauII.up=0.5;

haI.lo=0.05;            mI.lo=100;
haII.lo=0.05;           mII.lo=100;

halI.lo=0.05;           m_lI.lo=100;
halII.lo=0.05;          m_lII.lo=100;

hauI.lo=0.05;           m_uI.lo=100;
hauII.lo=0.05;          m_uII.lo=100;

l.lo=0.001;

mlI.lo=0.1;             mlII.lo=0.1;
ml_lI.lo=0.1;           ml_lII.lo=0.1;
ml_uI.lo=0.1;           ml_uII.lo=0.1;

tanhmlI.lo=0.5;         tanhmlII.lo=0.5;
tanhml_lI.lo=0.5;       tanhml_lII.lo=0.5;
tanhml_uI.lo=0.5;       tanhml_uII.lo=0.5;

effI.lo=0.5;            effI.up=1;
effII.lo=0.5;           effII.up=1;

eff_lI.lo=0.5;          eff_lI.up=1;
eff_lII.lo=0.5;         eff_lII.up=1;
```

```
eff_uI.lo=0.5;          eff_uI.up=1;
eff_uII.lo=0.5;         eff_uII.up=1;

effoI.lo=0.5;           effoI.up=1;
effoII.lo=0.5;          effoII.up=1;

effo_lI.lo=0.5;         effo_lI.up=1;
effo_lII.lo=0.5;        effo_lII.up=1;

effo_uI.lo=0.5;         effo_uI.up=1;
effo_uII.lo=0.5;        effo_uII.up=1;

uw.lo=0.05;             uw.up=5;

Dhw.lo=0.0005;          Dhw.up=0.01;
Dlw.lo=0.0005;          Dlw.up=0.01;

ReDhwI.lo=4000;         ReDhwI.up=5e5;
ReDhwII.lo=4000;        ReDhwII.up=5e5;

ReDlwI.lo=2500;         ReDlwI.up=5e5;
ReDlwII.lo=2500;        ReDlwII.up=5e5;

fwI.lo=0.001;
fwsI.lo=0.001;
fwrI.lo=0.001;

fwlI.lo=0.001;
fwslI.lo=0.001;
fwrlI.lo=0.001;

fwuI.lo=0.001;
fwsuI.lo=0.001;
fwruI.lo=0.001;

fwII.lo=0.001;
fwsII.lo=0.001;
fwrII.lo=0.001;

fwlII.lo=0.001;
fwslII.lo=0.001;
fwrlII.lo=0.001;

fwuII.lo=0.001;
fwsuII.lo=0.001;
fwruII.lo=0.001;


hwI.lo=0.5;             hwI.up=30;
hwsI.lo=0.5;            hwsI.up=30;
hwrI.lo=0.5;            hwrI.up=30;

hwlI.lo=0.5;            hwlI.up=30;
hwslI.lo=0.5;           hwslI.up=30;
hwrlI.lo=0.5;           hwrlI.up=30;

hwuI.lo=0.5;            hwuI.up=30;
hwsuI.lo=0.5;           hwsuI.up=30;
hwruI.lo=0.5;           hwruI.up=30;

hwII.lo=0.5;            hwII.up=30;
```

```
hwsII.lo=0.5;              hwsII.up=30;
hwrII.lo=0.5;              hwrII.up=30;

hwlII.lo=0.5;              hwlII.up=30;
hwslII.lo=0.5;             hwslII.up=30;
hwrlII.lo=0.5;             hwrlII.up=30;

hwuII.lo=0.5;              hwuII.up=30;
hwsuII.lo=0.5;             hwsuII.up=30;
hwruII.lo=0.5;             hwruII.up=30;

Nm.lo=1000;                Nm.up=50000;
Apr.lo=0.1;                Apr.up=5;
Asc.lo=1;                  Asc.up=30;
Awall.lo=0.1;              Awall.up=5;
Aw.lo=0.1;                 Aw.up=5;
Aa.lo=Apr.lo+Asc.lo;       Aa.up=Apr.up+Asc.up;

PaI.lo=100;                PwI.lo=1000;
PaII.lo=100;               PwII.lo=1000;

PalI.lo=100;               PauI.lo=100;
PwlI.lo=1000;              PwuI.lo=1000;

PalII.lo=100;              PauII.lo=100;
PwlII.lo=1000;             PwuII.lo=1000;

PtubeI.lo=100;             PtubeII.lo=100;
Ppipe.lo=1;
statI.lo=100;              statII.lo=100;
PtankI.lo=500;             PtankII.lo=500;

ReDp1.lo=2000;             ReDp2.lo=2000;
fp1.lo=0.0001;             fp2.lo=0.0001;
up1.lo=0.01;               up2.lo=0.01;
ut1.lo=0.01;               ut2.lo=0.01;
utank.lo=0.01;             Kwtank.lo=500;

r.lo=0.5;
Kc.lo=0.01;
Ke.lo=0.01;

UUAI.lo=0.05;
UUAII.lo=0.05;
UUA.lo=0.05;

Model smooth1 /e1,e2,e3,e4,e5,e11,e12,e13,e14,e15,
      e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
      e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
      e46,e47,e54,e55,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,
      e74,e75,e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,
      e90,e91,e92,e93,e94,e95,e97,e104,e105,e106,e107,
      b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,b11,b12,b13,b14,b15,b16,b17,b18,

      b25,b26,b33,b34,b37,b38,b39,b40,b41,b42,b43,b44,c10,c11,c12,c13,
      c14,c15,c16,c17,c18,c25,c26,c33,c34/;



Model1 rib1   /e1,e2,e3,e4,e5,e11,e12,e13,e14,e15,
      e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
```

```
      e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
      e48,e49,e50,e51,e52,e53,e56,e57,e58,e59,e60,
      e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
      e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
      e91,e92,e93,e94,e95,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,
      e104,e105,e106,e107,b19,b20,b21,b22,b23,b24,b27,b28,b29,b30,b31,
      b32,b35,b36,b37,b38,b39,b40,b41,b42,b43,b44,c19,c20,c21,c22,c23,
      c24,c27,c28,c29,c30,c31,c32,c35,c36/;

Model smooth2 /e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
      e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
      e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
      e46,e47,e54,e55,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,
      e73,e74,e75,e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,
      e88,e89,e90, e91,e92,e93,e94,e95,e97,e104,e105,e106,e107,
      b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,b11,b12,b13,b14,b15,b16,b17,b18,
      b25,b26,b33,b34,b37,b38,b39,b40,b41,b42,b43,b44,c10,c11,c12,c13,
      c14,c15,c16,c17,c18,c25,c26,c33,c34/;

Model rib2   /e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,e14,e15,
      e16,e17,e18,e19,e20,e21,e22,e23,e24,e25,e26,e27,e28,e29,e30,
      e31,e32,e33,e34,e35,e36,e37,e38,e39,e40,e41,e42,e43,e44,e45,
      e48,e49,e50,e51,e52,e53,e56,e57,e58,e59,e60,
      e61,e62,e63,e64,e65,e66,e67,e68,e69,e70,e71,e72,e73,e74,e75,
      e76,e77,e78,e79,e80,e81,e82,e83,e84,e85,e86,e87,e88,e89,e90,
      e91,e92,e93,e94,e95,e97,e98,e99,e100,e101,e102,e103,
      e104,e105,e106,e107,b19,b20,b21,b22,b23,b24,b27,b28,b29,b30,b31,
      b32,b35,b36,b37,b38,b39,b40,b41,b42,b43,b44,c19,c20,c21,c22,c23,
      c24,c27,c28,c29,c30,c31,c32,c35,c36/;



smooth1.scaleopt=1;
rib1.scaleopt=1;
smooth2.scaleopt=1;
rib2.scaleopt=1;


Option MINLP=sbb;
Option decimals=7;

parameters report1(*,*),report2(*,*),report3(*,*),report4(*,*);

loop(i,
         kf=kfin(i);
         kwall=ktube(i);
         Ft=tfin(i);
         Tt=ttube(i);

         cf=costfin(i)*denfin(i)*tfin(i);
         ct=costtube(i)*dentube(i)*ttube(i);
         cs=costfin(i)*denfin(i)*St;

         solve smooth1 using MINLP minimizing C;
         report1(i,"Fp")=Fp.l;
         report1(i,"Fl")=Fl.l;
         report1(i,"Lp")=Lp.l;
         report1(i,"Ll")=Ll.l;
         report1(i,"La")=La.l;
         report1(i,"Td")=Td.l;
         report1(i,"Tw")=Tw.l;
```

```
report1(i,"Nt")=Nt.l;
report1(i,"C")=C.l;
report1(i,"Pa")=Pa.l;
report1(i,"Pw")=Pw.l;

solve rib1 using MINLP minimizing C;
report2(i,"Fp")=Fp.l;
report2(i,"Fl")=Fl.l;
report2(i,"Lp")=Lp.l;
report2(i,"Ll")=Ll.l;
report2(i,"La")=La.l;
report2(i,"Td")=Td.l;
report2(i,"Tw")=Tw.l;
report2(i,"Nt")=Nt.l;
report2(i,"e")=e.l;
report2(i,"p")=pp.l;
report2(i,"C")=C.l;
report2(i,"Pa")=Pa.l;
report2(i,"Pw")=Pw.l;

solve smooth2 using MINLP minimizing C;
report3(i,"Fp")=Fp.l;
report3(i,"Fl")=Fl.l;
report3(i,"Lp")=Lp.l;
report3(i,"Ll")=Ll.l;
report3(i,"La")=La.l;
report3(i,"Td")=Td.l;
report3(i,"Tw")=Tw.l;
report3(i,"Nt")=Nt.l;
report3(i,"C")=C.l;
report3(i,"Pa")=Pa.l;
report3(i,"Pw")=Pw.l;
solve rib2 using MINLP minimizing C;
report4(i,"Fp")=Fp.l;
report4(i,"Fl")=Fl.l;
report4(i,"Lp")=Lp.l;
report4(i,"Ll")=Ll.l;
report4(i,"La")=La.l;
report4(i,"Td")=Td.l;
report4(i,"Tw")=Tw.l;
report4(i,"Nt")=Nt.l;
report4(i,"e")=e.l;
report4(i,"p")=pp.l;
report4(i,"C")=C.l;
report4(i,"Pa")=Pa.l;
report4(i,"Pw")=Pw.l;
);

file n1 /n1.dat/;
n1.pc=4;
n1.nd=10;
put n1;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report1(i,"Fp"),
@12,report1(i,"Fl"),
@15,report1(i,"Lp"),
@17,report1(i,"Ll"),
@19,report1(i,"La"),
@21,report1(i,"Td"),
@23,report1(i,"Tw"),
@25,report1(i,"Nt"),
```

```
@27,report1(i,"C"),
@29,report1(i,"Pa"),
@31,report1(i,"Pw")/);

file n2 /n2.dat/;
n2.pc=4;
n2.nd=10;
put n2;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report2(i,"Fp"),
@31,report2(i,"Fl"),
@33,report2(i,"Lp"),
@35,report2(i,"Ll"),
@37,report2(i,"La"),
@39,report2(i,"Td"),
@41,report2(i,"Tw"),
@43,report2(i,"Nt"),
@45,report2(i,"e"),
@47,report2(i,"p"),
@49,report2(i,"C"),
@51,report2(i,"Pa"),
@53,report2(i,"Pw")/);

file n3 /n3.dat/;
n3.pc=4;
n3.nd=10;
put n3;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report3(i,"Fp"),
@53,report3(i,"Fl"),
@55,report3(i,"Lp"),
@57,report3(i,"Ll"),
@59,report3(i,"La"),
@61,report3(i,"Td"),
@63,report3(i,"Tw"),
@65,report3(i,"Nt"),
@67,report3(i,"C"),
@69,report3(i,"Pa"),
@71,report3(i,"Pw")/);


file n4 /n4.dat/;
n4.pc=4;
n4.nd=10;
put n4;
loop(i,put@3,i.tl,
@9,report4(i,"Fp"),
@71,report4(i,"Fl"),
@73,report4(i,"Lp"),
@75,report4(i,"Ll"),
@77,report4(i,"La"),
@79,report4(i,"Td"),
@81,report4(i,"Tw"),
@83,report4(i,"Nt"),
@85,report4(i,"e"),
@87,report4(i,"p"),
@89,report4(i,"C"),
@91,report4(i,"Pa"),
@93,report4(i,"Pw")/);
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศริญญา เจริญวงศ์ เกิดวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อพ.ศ. 2542