



**Revista Internacional de Investigación e Innovación
Tecnológica**

Página principal: www.riit.com.mx

Características aerodinámicas y térmicas de bancos de tubos planos

Aerodynamic and thermal characteristics of flat tube banks

Teodoro-Cristóbal, R., Carvajal-Mariscal, I., Sánchez-Silva, F.

Instituto Politécnico Nacional, ESIME, UPALM, Av. IPN, s/n.
rteodoroc0700@alumno.ipn.mx; icarvajal@ipn.mx

Innovación tecnológica: Se presentan las características aerodinámicas y térmicas de bancos de tubos planos obtenidas de investigaciones experimentales y numéricas.

Área de aplicación industrial: Como elementos de intercambiadores de calor usados en la recuperación de calor de los gases de combustión en procesos que requieran una moderada caída de presión del flujo externo, por ejemplo, en los sistemas de cogeneración con turbina de gas.

Recibido: 31/01/2016
Aceptado: 15/06/2016

Resumen

Se realizó una investigación bibliográfica sobre la dinámica del flujo externo y la transferencia de calor en bancos de tubos planos con la finalidad de analizar su potencial aplicación como elementos en la construcción de intercambiadores de calor usados para recuperar la energía residual de gases de combustión. Se revisaron los trabajos con investigaciones tanto de tipo numérico como experimental. El análisis de los resultados presentados en la literatura ha mostrado que la geometría del tubo plano, así como la distribución de los tubos planos en los intercambiadores de calor influye de una manera positiva en la recuperación de calor ya que al mantener el mismo flujo de calor transferido presenta una menor caída de presión. Sin embargo, las investigaciones experimentales son escasas y para un intervalo del número de Reynolds limitado. Además, a partir de los resultados publicados hasta el momento no queda claro cuál de las dos configuraciones del banco de tubos planos, en línea o escalonada, presenta la menor caída de presión. Por lo tanto, se concluye que existe la oportunidad de investigar experimentalmente diferentes configuraciones, geometrías e intervalos de velocidad del flujo en los bancos de tubos planos, que permitan validar con certeza los resultados numéricos y ampliar el campo de aplicación de estas superficies de intercambio de calor.

Palabras clave: Tubos planos, Bancos de tubos, Flujo externo, Caída de presión, Recuperación de calor.

Abstract

A literature research on the dynamics of external flow and heat transfer in flat tube banks was carried out in order to analyze their potential application as elements in the construction of heat exchangers used to recover waste energy from the combustion gases. The research studies were reviewed with both numerical and experimental. The analysis of the results presented in the literature has shown that the geometry of the flat tube, as well as distribution of the flat tubes in the heat exchangers in a positive influence on the recovery of heat since to maintain the same heat transfer flow has a lower pressure drop. However, the experimental researches are scarce and for a Reynolds number range limited. Furthermore, from the results published so far is not clear which of the two configurations of flat tubes bank, in-line or staggered, has the lowest pressure drop. Hence it is concluded that exist the opportunity to experimentally investigate different configurations, geometries and flow velocity ranges on the banks of flat tubes, for validating the numerical results with certainty and expand the field of application of these heat exchange surfaces.

Key words: Flat tube, Tube banks, External flow, Pressure drop, Heat recovery.

I. Introducción

La demanda de energía se incrementa constantemente por lo que el uso eficiente de la energía es de gran importancia para muchas empresas. Además, en años recientes, la regularización de la producción y consumo de energía ha llegado a ser muy estricta debido al calentamiento global. En consecuencia, las industrias manufactureras han mejorado la eficiencia energética de sus procesos, mejorando la competitividad de sus productos.

Por otra parte, muchos de los procesos de transmisión de calor son efectuados mediante el uso de diferentes intercambiadores de calor. Actualmente un factor importante es la relación de los aspectos económicos y ambientales, para poder ser competitivos en el ahorro y en el uso eficiente de los recursos no renovables.

Por lo tanto, una opción de impacto inmediato que no requiere de grandes cambios estructurales importantes en el sector industrial es el planteamiento de proyectos de recuperación de la energía térmica.

Esta ha sido la motivación para realizar una investigación bibliográfica exhaustiva, que muestre los trabajos recientes y cuáles son las tendencias actuales en este tema. La información con mayor relevancia tiene que ver con las características de este tipo de elementos de transmisión de calor, al variar la geometría de los tubos utilizados así como la configuración o disposición en los bancos de tubos; que son parámetros que con llevan al diseño de los intercambiadores de calor. Generalmente, el diseño de intercambiadores de calor, con flujo transversal a los elementos, se basa en correlaciones empíricas de transferencia de calor y caída de presión.

Por otra parte, para tener un diseño óptimo de los recuperadores de calor se requiere implementar elementos, tubos, que reúnan ciertas características y para lograr esto es necesaria una evaluación profunda de los mecanismos de transferencia de calor así como de las estructuras secundarias del flujo, que frecuentemente se encuentran en pequeñas escalas.

Debido a las características que presentan, han tenido buena aceptación los tubos planos

en el diseño de modernos intercambiadores de calor en aplicaciones tales como: el uso en los radiadores automotrices, recuperadores de calor en turbinas, bombas de calor, entre otros. Se han observado buenos resultados en la aplicación de los tubos planos, en particular lo que se refiere a la caída de presión, cuando son comparados con los tubos circulares.

El estudio de los tubos planos ha tenido un desarrollo progresivo y se ha ido adaptando a las necesidades y nuevas tecnologías que se han generado con el tiempo. El origen del interés mostrado en este perfil puede ser situado en estudios como la formación de vórtices sobre los tubos planos expuestos a flujos transversales (Mair & Stansby, 1975), o el estudio numérico para determinar el número de Nusselt y el factor de fricción en tubos planos con esquinas redondeadas (Spiga & Dall'Olio, 1995).

Recientemente, debido a las características mostradas en las investigaciones de diversos perfiles de tubos, se ha considerado el estudio de bancos de tubos planos en las simulaciones numéricas con las condiciones de flujo en forma bidimensional, en régimen laminar, en estado estacionario y flujo incompresible, con configuración en línea y escalonada. Como resultado, se han identificado los efectos que producen varios parámetros independientes tales como: el número de Reynolds (Re), el número de Prandtl (Pr), la relación de longitud (L/Da), y la relación de altura (H/Da), sobre la caída de presión y la transferencia de calor de los tubos y bancos de tubos planos.

II. Efecto de la geometría

A. Perfiles de tubos.

Se han realizado investigaciones sobre las características de la transferencia de calor y

la caída de presión, principalmente sobre cilindros, ya que actualmente son los elementos principales en los intercambiadores de calor. Un estudio fue realizado sobre diversos perfiles de tubos en el que se desarrollaron varios módulos geométricos de los perfiles de tubos de diferentes formas: ovalado, plano, circular, y de diamante o rombo, que fue realizado por (Bahaidarah, Ijaz & Anand, 2006). Los resultados obtenidos para el tubo plano, ovalado y de diamante fueron comparados entre sí, y con los tubos circulares. Las conclusiones obtenidas mostraron buenas características de los tubos planos, en lo que se refiere a la caída de presión cuando son comparados con los tubos circulares.

Una investigación numérica sobre siete formas de cilindros en el que se estudió el fenómeno de la transferencia de calor y el flujo para un número de Reynolds (Re) en el intervalo de 200 – 2000, dio a conocer que el efecto de la transferencia de calor y la caída de presión son afectados por la forma del cilindro (Hashim & Dakhil, 2010).

Otra forma de perfil de tubo analizada, es el perfil en forma de ala, en el que se determinó el coeficiente de caída de presión, con un intervalo de Re_a del lado aire de 1.8×10^3 - 9.7×10^3 (Ahmed, Osama & Abdelatif, 2015).

Cuando se realizó la comparación de tubos planos con ovalados, que tienen una forma geométrica similar como se muestra en la Figura 1, se determinó que la diferencia entre las relaciones de bloqueo junto con la diferencia en la forma general de los tubos conduce a altos factores de fricción para el tubo ovalado, pero este tiene una mayor eficiencia desde el punto de vista de la transferencia de calor. Sin embargo, si se considera la transferencia de calor y la potencia de bombeo, entonces el tubo plano

es una mejor elección (Fullerton & Anand, 2010).

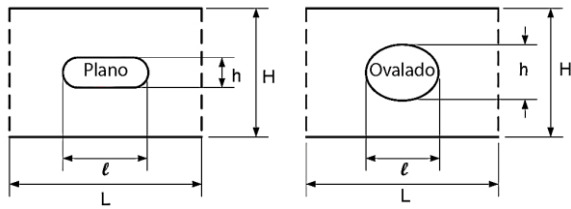


Figura 1. Geometría de los tubos redondo y plano.

B. Perfiles de tubos planos.

En los tubos planos se consideran dos parámetros geométricos importantes, los cuales son el diámetro mayor (d_1) y el diámetro menor (d_2), ver Figura 2. De acuerdo a (Matsuda, et al, 2014) la transferencia de calor es mayor cuando el diámetro menor tiende a ser más pequeño.

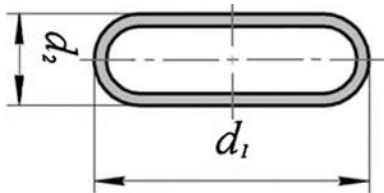


Figura 2. Geometría del tubo plano.

Además, al usar el diámetro menor del tubo plano como una dimensión determinante, es posible estimar la relación de diámetros óptima del tubo plano, en el que la transferencia de calor es máxima, mientras el arrastre es mínimo (Zhukova, 2011).

Como era de esperarse, el comportamiento de un solo tubo no es el mismo que al estar en un banco de tubos, en el que los tubos se ven influenciado por las perturbaciones de los tubos adyacentes. En forma numérica se han realizado diversos estudios con el fin de evaluar la transferencia de calor y la caída de presión en diversas configuraciones, ya sea en línea o escalonado.

Destaca el estudio realizado por medio del método de red neuronal artificial por Tahseen, Rahman & Ishak, 2014, en el que por medio de este método se determinó el coeficiente de transferencia de calor y caída de presión en un banco de tubos planos, configurados en forma lineal y sometidos a un flujo cruzado, en un intervalo del número de Reynolds de 10 – 320, con relación de pasos transversales de 2.5, 3.0, 4.5, y de pasos longitudinales de 3.0 y 6.0. Los coeficientes de transferencia de calor y de caída de presión obtenidos presentaron un error promedio relativo del 4.1% para el número de Nusselt, 4.8% para la caída de presión adimensional y 3.8% en el factor de fricción, con lo que se demostró que este método es una herramienta adecuada para la predicción de los coeficientes de transferencia de calor y caída de presión en este tipo de bancos de tubos en el intervalo del número de Reynolds estudiado.

Con el fin de determinar la caída de presión y la transferencia de calor Ishak, Tahseen & Rahman, 2013, realizaron estudios experimentales en bancos de tubos para un intervalo de Reynolds de 373 – 623. Al comparar los tubos planos con circulares, se observan mejores características en la transferencia de calor de estos últimos, pero una menor caída de presión para los tubos planos.

En los estudios numéricos desarrollados por Bahaidarah, Anand & Chen, 2005, se analizaron varios parámetros independientes, tales como el número de Reynolds (Re), número de Prandtl (Pr), la relación de longitud (L/Da), la relación de altura (H/Da), sobre la caída de presión y la transferencia de calor. En la Figura 3 se observa una gráfica del número de Reynolds contra el número de Nusselt, en la que se comparan cuatro formas de tubos, de la cual el tubo plano es el que presenta una mayor

transferencia de calor, a medida que se incrementa el número de Reynolds.

En la simulación de Mallikarjuna, Seshadri & Ragh, 2014, se compararon tubos redondos y planos aletados para la condición de un flujo turbulento del lado de las aletas usando el modelo $k - \varepsilon$ para diferentes pasos y temperaturas de las aletas. Del estudio se concluyó que para ambos regímenes, laminar y turbulento, de los tubos redondo y plano con todas las configuraciones geométricas simuladas, el factor de Colburn varía inversamente respecto de la velocidad del aire a la entrada.

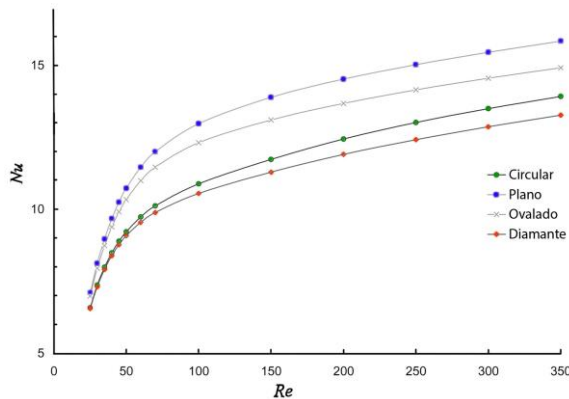


Figura 3. Variación del número de Nusselt contra el número de Reynolds para cuatro formas de tubos. (Bahaidarah, Anand & Chen, 2005).

Un estudio por medio de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) en un banco de tubos planos, mostró que para el modelo de flujo turbulento el factor de fricción para el tubo plano es 13% – 17% mayor que para los tubos redondos, para un intervalo de $Re = 330 - 1300$. Por otra parte, para $Re = 2900 - 7200$ el factor de fricción para el tubo redondo es 40% – 45% mayor que para los tubos planos (Singh & Sachdeva, 2010).

Al realizar la comparación de las configuraciones, arreglos, en línea y escalonado, siempre se tiene una mayor

transferencia de calor en la configuración escalonada de tubos planos. Se encontró también que la transferencia de calor es mayor en los bancos de tubos circulares para números de Reynolds menores a 1000. Sin embargo, desde el punto de vista de la caída de presión el comportamiento de los bancos de tubos planos es mejor (Bahaiarah, Ijaz & Anand, 2006).

III. Relaciones de paso

Además de la dinámica del flujo y la transferencia de calor en la superficie de los tubos planos, se ha investigado la influencia que tiene la disposición de los tubos en el arreglo del banco de tubos. Esto se ha hecho con el objetivo de tener el mayor coeficiente de transferencia de calor presentando una caída de presión aceptable para el proceso.

Los resultados de las pruebas hechas por Tahseen, Ishak & Rahman, 2012, muestran que en un banco de tubos con una relación longitudinal (S_L/D_s) y transversal (S_t/D_s) de 2.0 y 4.0, un número de Reynolds que varía dentro del intervalo de 25 – 300, y un número de Prandtl de 0.7 la intensidad de la transferencia de calor entre la superficie de los tubos y el flujo de aire aumenta cuando se eleva el número de Reynolds y la relación del paso diametral.

Variando las relaciones de los pasos se han encontrado algunas correlaciones empíricas. La correlación para el cálculo del número de Nusselt encontrada en un banco de tubos planos con un número de Reynolds menor a 1000 y una relación longitudinal (S_L/D_s) y transversal (S_t/D_s) de 2.0 y 4.0, es $\overline{Nu} = 0.242 \times Re^{0.702}$ (Tahseen, Ishak & Rahman, 2013).

Pero no solo se ha realizado la variación de los pasos, sino que además se ha estudiado la variación de la relación de pasos con la

variación en las dimensiones geométricas obteniendo la relación de aspecto $\left(\frac{H/D}{L/D}\right)$. Se observó que cuando $\left(\frac{H/D}{L/D}\right)$ aumenta, la caída de presión normalizada disminuye (Abdel-Rehim, 2013).

Aparte de estas investigaciones experimentales, también se han estudiado en forma numérica bancos de tubos en configuración en línea y escalonados, en los que se determinaron correlaciones para la caída de presión adimensional y el número de Nusselt.

En los resultados obtenidos por Benarji, Balaji & Venkateshan, 2008, se encontró que la configuración en línea con una relación de altura de $(H/D_a = 4)$ y la relación de longitud de $(L/D_a = 4, 5, 6)$ y la configuración escalonada con una relación de altura de $(H/D_a = 5)$ y una relación de longitud de $(L/D_a = 5, 6, 7)$, presentan los máximos valores de transferencia de calor y la mínima caída de presión.

A partir de las investigaciones de Tahseen, Ishak & Rahman, 2014, se ha observado que cuando la relación de altura (H/D_a) aumenta y la relación de longitud (L/D_a) también, el valor del coeficiente de fricción disminuye, debido al aumento de la distancia entre los tubos del intercambiador de calor, lo que también conduce a una baja caída de presión. Estas variaciones han sido analizadas con técnicas como el modelo ANFIS (*adaptive neuro – fuzzy interference system*), con el que los autores mencionan se puede predecir la eficiencia de los sistemas térmicos en aplicaciones de ingeniería.

En las simulaciones de Tahseen, Ishak & Rahman, 2012, se utilizó el método de volumen finito con las condiciones de flujo laminar, estado estacionario, bidimensional y flujo incompresible; en el que se implementó la variación de la relación

(S_T/D_s) en un intervalo de 2 – 4, para números de Reynolds de 25 – 300 con el propósito de estudiar el comportamiento del flujo en diferentes filas del arreglo. Los autores encontraron que la región de la recirculación de flujo aumenta con el incremento del número de Reynolds.

IV. Aplicaciones

El comportamiento característico de los tubos y bancos de tubos planos invita a su aplicación en intercambiadores de calor en un amplio panorama de procesos industriales. Algunas de estas aplicaciones contemplan ramas tan diversas de la tecnología como en los recuperadores de calor para turbinas, los sistemas de climatización (HVAC por sus siglas en inglés), entre otros.

Matsuda et al., 2014, han propuesto el desarrollo de un intercambiador de calor de tubos planos hecho de aluminio, para aplicar en una bomba de calor con el fin de incrementar la eficiencia energética de estos sistemas. A partir del análisis de los resultados experimentales, los autores concluyen que el coeficiente de transferencia de calor del lado aire α_0 del intercambiador de calor de tubos planos es 15% mayor a uno convencional de tubos circulares. Así mismo, el valor de la ΔP que presenta el intercambiador de calor de tubos planos es 9% menor que el del intercambiador de calor convencional para condiciones de trabajo sin humedad.

Además de las relaciones de paso, la disposición en el banco de tubos, y el método de experimentación, se han planteado otras alternativas como el estudio de un banco de tubos planos con un ángulo de inclinación de $\varphi = 20^\circ$ respecto a la horizontal en dirección al flujo, como se

muestra en la Figura 4 (Ahrend, Hartmann & Koehler, 2010).

Los autores encontraron que debido a esta disposición geométrica la transferencia de calor del banco de tubos planos aumentó alrededor del 40%, y se espera una mejora en la eficiencia de la transferencia de calor del intercambiador de calor de tubos planos, al comparar con los tubos redondos.

Un sector en el que recientemente se están aprovechando y desarrollando las investigaciones de nuevos tipos de intercambiadores de calor, es en el sector de las turbinas de uso aeronáutico.

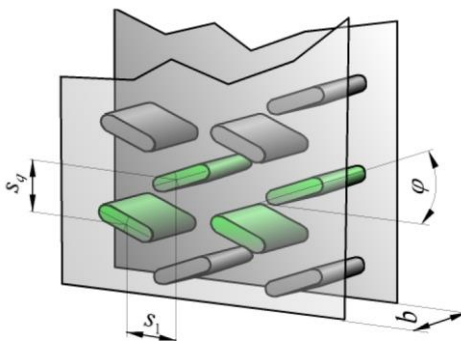


Figura 4. Modelo de elementos de un intercambiador de calor con tubos inclinados a $\varphi = 20^\circ$ respecto a la horizontal (Ahrend, Hartmann & Koehler, 2010).

Esto se debe principalmente al interés por recuperar el calor residual de las turbinas de gas para su uso en otros procesos o internamente para el mismo ciclo de operación.

La recuperación de calor involucra el reusó de la energía térmica existente de la turbina por medios convencionales (regeneración termodinámica e inyección de vapor) o técnicas no convencionales (regeneración del aire húmedo, combustible reformado con vapor). Esto ha conducido a un aumento significativo en las tasas de temperatura y

flujo en la salida de la turbina de gas, así surge la necesidad de desarrollar eficientes sistemas de recuperación de calor para el escape de los gases.

El calor interno puede ser recuperado a través del fluido de trabajo (aire, combustible) o un fluido auxiliar (usualmente agua). En el primer caso de recuperación de calor es definida como directa, en el segundo caso como indirecta. La regeneración termodinámica es una técnica de recuperación directa, ya que la energía térmica es transferida directamente de los gases de combustión al aire en el compresor a la salida. Esto produciría una eficiencia de ganancia debido a la reducción de energía térmica primaria sin cambiar los requerimientos, como una primera aproximación, a la salida de la potencia mecánica (Carapellucci & Giordano, 2012).

Una de las primeras formas de tubos utilizadas para la recuperación de calor en el campo de la aeronáutica es el presentado por Boggia & Rud, 2002. Se realizó un estudio sobre el ciclo termodinámico y las innovaciones tecnológicas necesarias para la introducción de un recuperador de calor compuesto de tubos ovalados. A partir de la investigación desarrollada se concluyó que el perfil del tubo del intercambiador de calor combina los beneficios de una alta transferencia de calor efectiva con la mínima pérdida de presión aerodinámica.

Aunado a este estudio Schöenborn, Ebert, Simon & Storm, 2004, y Kritikos, et al, 2010, desarrollaron un recuperador compacto, el cual está construido en base a tubos ovalados, y con el arreglo de la matriz inventado por la empresa manufacturera MTU Aero Engines. Su principal característica es la alta resistencia a los gradientes térmicos lo que es muy conveniente en su aplicación en turbinas de gas.

Los autores también han incursionado en las investigaciones de las configuraciones de tubos planos con una relación $d_1/d_2 = 0.27$. Las investigaciones experimentales se han realizado usando un anemómetro de temperatura constante marca Dantec, en dos configuraciones de tubos, en línea y en escalonada, con un paso transversal de $H/Da=3$ y un paso longitudinal de $L/Da=5$, en el intervalo del número de Reynolds de 6000 – 51000.

Los resultados preliminares muestran que entre el arreglo en línea y el arreglo escalonado la diferencia de presiones resulta mínima como se muestra en la Figura 5.

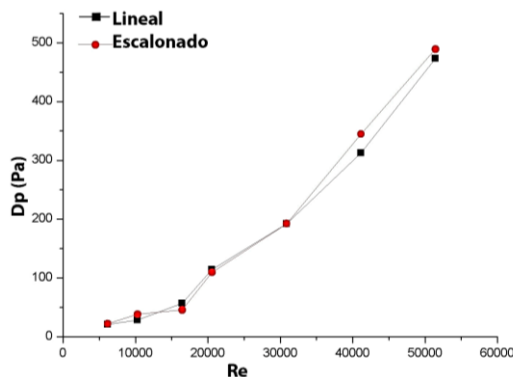


Figura 5. Caída de presión contra número de Reynolds en el intervalo de 6000 – 51000.

V. Conclusiones

La transferencia de calor y la dinámica del flujo en tubos y bancos de tubos planos han recibido la atención de varios investigadores quienes los han estudiado en forma experimental y numéricamente.

La revisión de las diferentes investigaciones experimentales, muestra que hay una escasez de resultados experimentales específicamente obtenidos para validar los resultados numéricos. Esto resulta evidente al constatar que el mayor número de Reynolds alcanzado ha sido de 1000, lo que

ha conducido, entre otras cosas, a que se validen los resultados con datos obtenidos en bancos de tubos circulares. Por lo tanto, uno de los resultados de esta revisión bibliográfica es que existe la oportunidad de realizar investigaciones experimentales en bancos de tubos planos para números de Reynolds mayores a 1000 y diferentes relaciones d_1/d_2 . Los resultados serán útiles no sólo para validación de estudios numéricos sino también para conocer mejor el comportamiento de estas superficies de intercambio de calor.

A partir de la investigación bibliográfica también se encontró que tanto las investigaciones numéricas como las experimentales no presentan datos contundentes que ayuden a determinar cuál de las dos configuraciones del banco de tubos planos, en línea o escalonada, presenta la menor caída de presión. Datos preliminares de los autores muestran que no existe mucha diferencia en la caída de presión entre estas dos configuraciones en el intervalo del número de Reynolds 6000-51000, sin embargo, esto debe ser comprobado con un mayor número de pruebas experimentales. Por lo tanto, se tiene la opción de realizar investigaciones experimentales en un amplio intervalo del número de Reynolds para las dos configuraciones y diferentes pasos entre tubos, cuyos resultados permitan tomar una decisión cuando se elija una de las configuraciones durante el diseño de recuperadores de calor de tubos planos.

En general, resulta evidente que la aplicación de los tubos planos en la recuperación de calor residual es positiva e invita a realizar más investigaciones para ampliar el conocimiento de las características de estas superficies y su aplicación en otros campos de la tecnología.

VI. Referencias

- [1] Mair W. A. & Stansby P. K., “Vortex Wakes of Bluff Cylinders in Shear Flow”, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 28, No. 2, 1975, pp. 519 – 540.
- [2] Spiga M. & Dall’Olio R., “Fraction Factor and Nusselt Number in Flat Tubes with around edges”, *Journal of Heat and Fluid Flow, ELSEVIER*, Vol. 16, No. 4, 1995, pp. 307 – 310.
- [3] Bahaidarah H. M. S., Ijaz M. & Anand N. K., “Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer over a Series of In-Line Noncircular Tubes Confined in a Parallel-Plate Channel”, *Taylor and Francis Grup, Numerical Heat transfer, Part B*, vol. 50, 2006, pp. 97-119.
- [4] Hashim A. Y. & Dakhil K. J., “Effect of Cylinder Shape on Heat Transfer and Fluid Flow”, *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences*, vol 3, No. 3, 2010, pp. 11.
- [5] Ahmed E. S., Osama M. M. & Abdelatif M. A., ‘Effect of Longitudinal-External-Fins on Fluid Flow Characteristics for Wing-Shaped Tubes Bundle in Crossflow” Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Thermodynamics*, vol 25, september, 2015, pp 16.
- [6] Fullerton T. L. & Anand N. K., “Periodically Fully-Developed Flow and Heat Transfer Over Flat and Oval Tubes Using a Control Volume Finite-Element Method”, *Taylor and Francis Grup, Numerical Heat transfer, Part A*, vol. 57, 2010, pp. 642-665.
- [7] Matsuda T., Ishibashi A., Okazaki T., Hokazono K., Shimamoto D. & Okazawa H., “Development of Flat Tube Heat Exchanger for Heat Pump Air Conditioner”, *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Perdue*, 2014, pp. 2493-2504.
- [8] Zhukova Y. V., “Different Approaches to Generalizing Experimental Data on Convective Heat Transfer of a Single Oval-Shaped Tube in Cross Flow”, *Begell House, Heat Transfer Research*, vol. 42, 2011, pp. 487-500.
- [9] Tahseen T. A., Rahman M. M. & Ishak M., “Heat Transfer and Pressure Drop Prediction in an In-Line Flat Tube Bundle by Radial Basis Function Network”, *IJAME, Malaysia*, vol. 10, 2014, pp. 2003-2015.
- [10] Ishak M., Tahseen T. A. & Rahman M. M., “Experimental Investigation on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Air Flow over a Staggered Flat Tube Bank in Crossflow”, *IJAME, Malaysia*, vol. 7, 2013, pp. 900-911.
- [11] Bahaidarah H. M. S., Anand N. K. & Chen H. C., “A Numerical Study Of Fluid Flow and Heat Transfer over a Series a Bank of Flat Tubes”, *Taylor and Francis Inc., Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 48, 2005, pp. 359-385.
- [12] Mallikarjuna, Seshadri V. & Raghu V. B., “Numerical Analysos of Fin Side Turbulent Flow for Round and Flat Tube Heat Exchangers”, *IJMER, India*, vol. 4, 2014, pp. 33-39.
- [13] Singh G., & Sachdeva G., “CFD Simulation of Round and Flat Tube Fin

- Heat exchanger for Laminar and Turbulent Flow Models,” *37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, Madras, Chennai, India, vol. 10, 2010, pp. 10.
- [14] Tahseen T. A., Ishak M. & Rahman M. M., “Performance Predictions of Laminar Heat Transfer and Pressure Drop in an In-Line Flat Tube Bundle using an Adaptive Neuro-fuzzy Interference System (ANFIS) Model”, ELSEVIER, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 50, 2014, pp. 85-97.
- [15] Tahseen T. A., Ishak M. & Rahman M. M., “A Numerical Study of Forced Convection Heat Transfer over a Series of Flat Tubes Between Parallel Plates”, *JMES, Malaysia*, vol. 3, 2012, pp. 271-280.
- [16] Abdel-Rehim Z. S., “Heat Transfer Characteristics and Fluid Flow Past Staggered Flat-Tube Bank Using CFD,” *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, 2013, pp. 161-167.
- [17] Benarji N., Balaji C. & Venkateshan S. P., “Unsteady Fluid Flow and Heat Transfer over a Bank of Flat Tubes,” *Springer-Verlag, Heat Mass Transfer*, vol. 44, 2008, pp. 445-46.
- [18] Tahseen T. A., Ishak M. & Rahman M. M., “Analysis of Laminar Forced Convection of Air for Crossflow over Two Staggered Flat Tubes”, *IJAME, Malaysia*, vol. 6, 2012, pp. 755-768.
- [19] Ahrend U., Hartmann A. & Koehler J., ‘Measurements of Local Heat Transfer Coefficient in Heat Exchangers with Inclined Flat Tubes by Means of the Amonia Absorption Method’, *14th International Heat Transfer Conference, Washington, DC, USA.*, 2010, pp. 10.
- [20] Carapellucci R. & Giordano L., “The Recovery of Exhaust Heat from Gas Turbines” in *Efficiency, Performance and Robustness of Gas Turbines*, Konstantin Volkov, Eds. InTech. 2012, pp. 165-190.
- [21] Boggia S. & Rud K., ‘Intercooled Recuperated Aero Engine’, *MTU Aero Engines*, Munchen, Germany, 2002. pp 8.
- [22] Schönenborn H., Ebert E., Simon B., Storm P., ‘Thermomechanical Design of a heat Exchanger for a Recuperative Aero Engine’ *ASME, Expo Power for Land, Sea and Air, Austria*, 2004, pp. 7.