



Análisis Numérico de Intercambiadores de Calor tipo "Pillow Plate"

González González, Mario Antonio (1), Vargas Vázquez, José Carlos (2), Luviano Ortiz, José Luis (3), Hernández Guerrero, Abel (4)

- 1 [Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [ma.gonzalezg@ugto.mx]
- 2 [Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jc.vargasvazquez@ugto.mx]
- 3 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [luis.luviano@ugto.mx]
- 4 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [abel@ugto.mx]

Resumen

Los intercambiadores de calor tipo "pillow-plate" (PPHE, por sus siglas en inglés) representan una alternativa prometedora a los intercambiadores convencionales (intercambiadores de tubos y placas planas), sus principales ventajas son las altas eficiencias que presentan y los bajos costos de manufactura y mantenimiento. En este estudio se analizó numéricamente el comportamiento hidrodinámico y térmico del flujo dentro del canal para diferentes configuraciones de un intercambiador de calor tipo "pillow-plate." Los resultados mostraron la existencia de dos zonas de flujo a lo largo del canal del intercambiador, además se identificaron los puntos de calentamiento y estancamiento dentro del canal. Esto da pauta a posibles futuros análisis con el fin de encontrar los mejores diseños de los intercambiadores de calor tipo "pillow-plate."

Introducción

El presente proyecto se enfocará en el planteamiento y desarrollo de un modelo numérico específico para la predicción del rendimiento de intercambiadores de calor de tipo "pillow-plate," el cual es un tema de gran interés para el sector industrial manufacturero de equipos tales como intercambiadores de calor compactos, torres de enfriamiento, y manufactura de elementos sellantes para la industria de la refrigeración, ya que predecir el rendimiento permitirá no sólo aumentar la eficiencia en relación a los proyectos de desarrollo a largo plazo, sino planificar con mejores resultados las estrategias de desarrollo en los proyectos que ya se encuentran trabajando.



Objetivos

El objetivo del presente trabajo consiste en desarrollar un modelo de predicción que, con base en la técnica de dinámica de fluidos computacional, permita evaluar el rendimiento termo-hidráulico de intercambiadores de calor tipo “pillow-plate.” Para el análisis, se considerarán variaciones de los parámetros geométricos más importantes del intercambiador. Se entregará una solución que asista en un nuevo diseño termo-hidráulico de intercambiadores de calor de dicho tipo.

Justificación

El desarrollo de productos con alta complejidad técnica debe llevarse a cabo en periodos de tiempo cada vez más cortos, a bajo costo y deben satisfacer los requisitos más severos de eficiencia y seguridad [1]. En los últimos años, el desarrollo de nuevos productos en la industria del frío enfrenta sus propios retos, los cuales han conducido a la implementación de varios diseños innovadores de intercambiadores de calor [2].

Los intercambiadores de calor tipo “pillow-plate” representan un diseño innovador y son encontrados comúnmente en procesos industriales; la manufactura de estos intercambiadores (J. Tran y S. Sommerfeld [3]) consta de los siguientes pasos; primero, dos láminas (usualmente de acero inoxidable) se colocan una sobre otra, enseguida se sueldan de acuerdo a una rejilla especificada de puntos de soldadura para producir el “pillow-plate,” al final se le da la forma deseada utilizando un proceso de hidroconformado. Debido a su reciente impacto en la industria, M. Piper y A. Olengber [4-5], han desarrollado un método para la determinación del diámetro hidráulico, área de sección transversal y área de transferencia de calor en dichos intercambiadores. Mitrovic y Maletic [6] publicaron los primeros resultados numéricos en transferencia de calor sin cambio de fase y caída de presión en PPHE. Para determinar los coeficientes de transferencia de calor y pérdidas de presión, M. Piper y M. Julian [7] han propuesto nuevas ecuaciones para el diseño termo-hidráulico que describen la convección forzada en los canales de entrada de los intercambiadores de calor tipo pillow-plate. Para el caso de flujo turbulento totalmente desarrollado sin cambio de fase M. Piper y A. Zibart [8] encontraron que en dicho tipo de intercambiadores se encuentran presentes dos regiones llamadas “meandering core”, la cual domina la transferencia de calor, y “recirculation zones”, que ocurre a raíz de los puntos de soldadura. Debido a lo anterior, Piper, A. Zibart y E.Y. Kenig [9] se dieron a la tarea de investigar más profundamente las dos zonas de comportamiento de flujo presentes en los “pillow-plate.” Para ello, separaron ambas zonas, esto con la finalidad de analizarlas por separado y finalmente sumar sus contribuciones tanto de transferencia de calor como de caída de presión. Por último, Piper y Zibart [10] propusieron una nueva estructura del “pillow-plate” con modificaciones su superficie ondulada. Esta nueva propuesta consiste en la generación de hoyuelos en las paredes del intercambiador por medio de una técnica llamada *Formación*



Incremental Electrohidráulica, descrita en [11], cuyo objetivo es buscar nuevos métodos que brinden posibles soluciones para la eliminación o reducción de las zonas de recirculación en los canales externos del “pillow-plate.”

Para la solución de este proyecto se implementarán las herramientas de simulación y análisis numérico para evaluar el efecto que tienen los parámetros geométricos sobre el proceso de transferencia de calor y el comportamiento hidrodinámico del fluido de trabajo, permitiendo establecer relaciones útiles para el diseño de este tipo de intercambiadores de calor.

Metodología

Generación de Geometría por Medio De Hidroconformado

La forma de la geometría utilizada en este análisis se muestra en la Figura 1, donde se observa un intercambiador compuesto por un *stack* de placas con tecnología “pillow-plate,” además se muestra el elemento periódico de interés en este trabajo, donde se pueden apreciar los parámetros geométricos más importantes del “pillow-plate.”

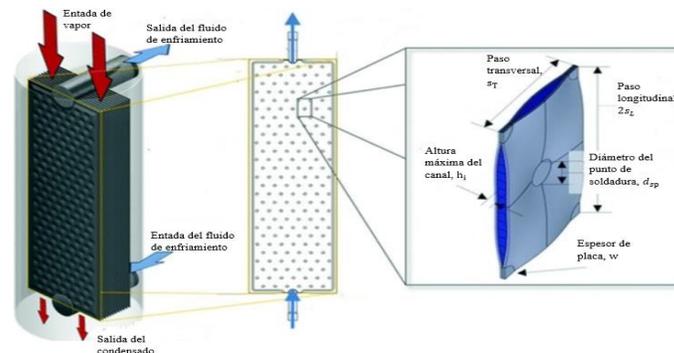


Figura 1 Elemento periódico de in intercambiador de calor tipo “pillow-plate” [12].

En la Figura 1, $2S_L$, S_T , d_{sp} y h_i representan el paso longitudinal, el paso transversal, el diámetro del punto de soldadura y la altura máxima del canal, respectivamente.

Con el fin de reducir el tiempo de cómputo, se analizó únicamente una sección del “pillow-plate” tomando en cuenta tres elementos periódicos para asegurar un flujo completamente desarrollado en última sección del canal (mostrada en la Figura 2), esto se realizó para aprovechar de manera adecuada las simetrías presentes en el domino, las cuales se muestran en la Figura 4.

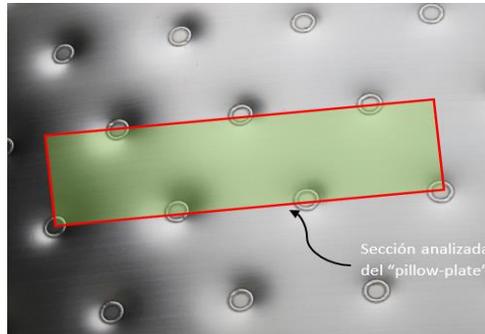


Figura 2 Selección del elemento periódico por analizar.

El material con el que está construido el pillow-plate” es acero inoxidable 1.4301 (debido a que es el más utilizado para la fabricación de estos intercambiadores). Es importante resaltar que los esfuerzos aplicados, y, por ende, las deformaciones obtenidas de la placa se encuentran más allá del límite elástico del material. Con el fin de obtener resultados más apegados a la realidad, se añadió a las simulaciones el comportamiento elastoplástico del material, cuyos datos se agregaron al software computacional para modelar la deformación elastoplástica de la placa al aplicar la presión del fluido. La forma final de un elemento periódico del intercambiador obtenido por medio de las simulaciones de hidroconformado se muestra en la Figura 3.

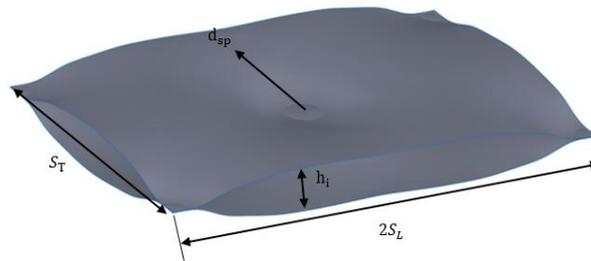


Figura 3 Geometría generada a partir de simulaciones de hidroconformado.

Suposiciones para el Análisis.

Las suposiciones empleadas para este análisis son las siguientes:

1. El fluido de trabajo es agua y es una sustancia pura.
2. El fluido es newtoniano e incompresible.
3. Las propiedades le fluido no varían con la temperatura.
4. No hay deslizamiento en las paredes.
5. Existe simetría en el plano central paralelo al fluido.
6. La temperatura en la pared se mantiene constante.
7. Los efectos gravitacionales son despreciados.
8. Flujo tridimensional y turbulento.
9. No hay cambio de fase.

Ecuaciones Gobernantes del Análisis.

La ecuación de continuidad, junto con las ecuaciones de Navier Stokes y la ecuación de energía para un fluido incompresible con propiedades constantes



(Ecuaciones (1.1-1.5)) son empleadas para describir matemáticamente el flujo en el presente análisis.

Ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

Ecuaciones de Navier Stokes.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1.2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1.3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1.4)$$

Ecuación de energía.

$$\rho c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1.5)$$

donde ρ , μ , c_p y k_f representan las propiedades del fluido y denotan densidad, coeficiente de viscosidad, calor específico y conductividad térmica, respectivamente.

Condiciones de Frontera.

Para resolver las ecuaciones gobernantes dentro del canal del “pillow-plate” se aplicaron las siguientes condiciones de frontera:

1. Perfil de velocidad uniforme en la entrada del canal del “pillow-plate.”
2. Temperatura de entrada del agua constante, $T_{in} = 20^\circ\text{C}$.
3. Presión manométrica cero en la salida del “pillow-plate.”
4. Condición de no deslizamiento en las paredes ($u = 0$).
5. Temperatura constante en la pared ($T_w = const$).
6. Condiciones de simetría, ver Figura 4.

Las ecuaciones gobernantes se resolvieron haciendo uso del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable disponible en el software comercial ANSYSYS Fluent.

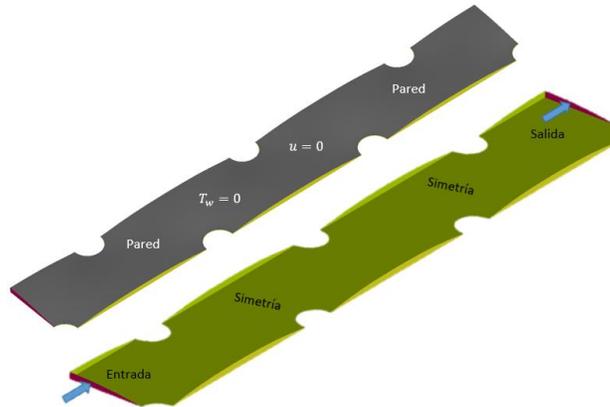


Figura 4 Condiciones de frontera del modelo.

Mallado

La malla utilizada en este trabajo se muestra en la Figura 5. Para resolver las ecuaciones gobernantes se utilizaron mallas que contienen aproximadamente $1 \cdot 10^6$ elementos.

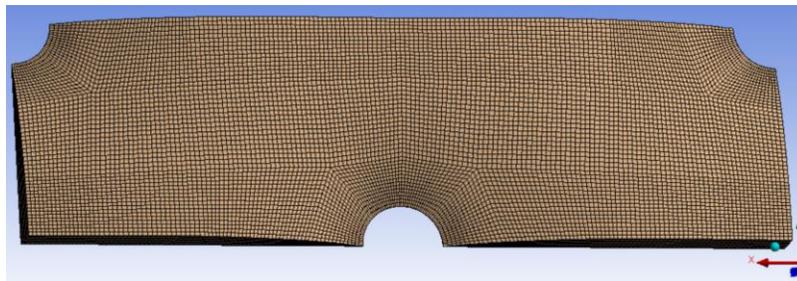


Figura 5 Mallado utilizado para la solución del modelo.

Validación.

La validación del modelo, se realizó comparando los resultados obtenidos con los resultados presentados por Radia ELDEEB, Vikrant AUTE y Reinhard RADERMACHER [12].

En la Figura 6 se muestran los contornos de velocidad obtenidos en este trabajo y los contornos de velocidad obtenidos por Radia ELDEEB [13] para diferentes números de Reynolds. Se puede observar que existe gran similitud en el comportamiento del fluido y las velocidades obtenidas en ambos casos.

Las características geométricas del “pillow-plate” analizado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Características geométricas del “pillow-plate” utilizado para la validación del modelo.

$S_T/2S_L$	h_i	d_{sp}	d_h
0.58 mm	3 mm	10 mm	4.1 mm

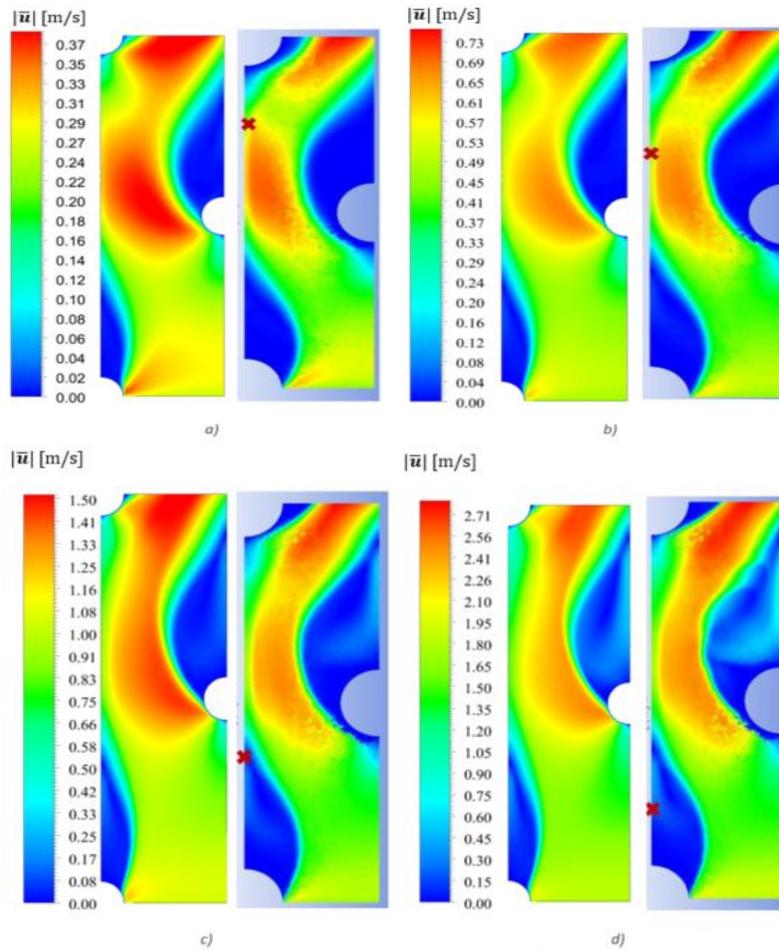


Figura 6 Validación del modelo por medio de contornos de velocidad obtenidos en este trabajo (del lado izquierdo) y obtenidos por Radia ELDEEB, Vikrant AUTE y Reinhard RADERMACHER [12] (del lado derecho) para a) $Re=1000$, b) $Re=2000$, c) $Re=4000$, d) $Re=6000$

Resultados.

En este estudio se analizó numéricamente el comportamiento del fluido a través del canal tridimensional, para ello, se estudiaron los patrones de flujo obtenidos al realizar variaciones geométricas. Los parámetros geométricos de los “pillow-plate” analizados en este trabajo se encuentran en la Tabla 1.2, donde se muestran el paso longitudinal ($2S_L$), el paso transversal (S_T), el diámetro del punto de soldadura (d_{sp}) y el diámetro hidráulico del canal (d_h), el cual fue calculado a partir de la metodología propuesta por M. Piper [4].

Tabla 2 Casos analizados del “pillow-plate.”

Caso	$2S_L$	S_T	d_{sp}	d_h
1	72	42	10	5.01
2	60	50	10	4.55
3	40	60	10	4.9



Los análisis realizados en este trabajo se hicieron manteniendo un número de Reynolds fijo de 4 000, puesto que, de acuerdo a lo encontrado en la literatura, este es un valor típico bajo el cual trabajan los intercambiadores de este tipo.

Contornos de Velocidad

En esta sección se discutirá el comportamiento del movimiento que el fluido desarrolla dentro del canal del “pillow-plate.” En la Figura 1.7 se muestran los contornos de velocidades a lo largo del plano de simetría del último de los tres elementos periódicos (lo cual asegura un flujo completamente desarrollado), para los tres casos analizados manteniendo el régimen turbulento del número de Reynolds de 4 000. En dicha figura se puede apreciar que para los tres casos analizados del “pillow-plate” se encuentran presentes dos zonas que rigen el comportamiento del flujo (lo cual concuerda por lo reportado en la literatura), analizando los contornos más a detalle, se observa que la zona 1 se forma debido a la presencia de los mayores gradientes de velocidad del fluido y conforme la geometría se ensancha y se acorta (casos 2 y 3), el movimiento general del fluido pasa de seguir una trayectoria sinusoidal a seguir una trayectoria rectilínea; se observa además, que las velocidades máximas se alcanzan en el centro de dicha trayectoria. En la zona 2, las velocidades del fluido son muy bajas en comparación con la zona 1, además se forman vórtices debido a la recirculación y el estancamiento de éste, cabe señalar que el estancamiento del fluido en esta zona se debe al impedimento del flujo que se genera entre los puntos de soldadura y la zona 1.

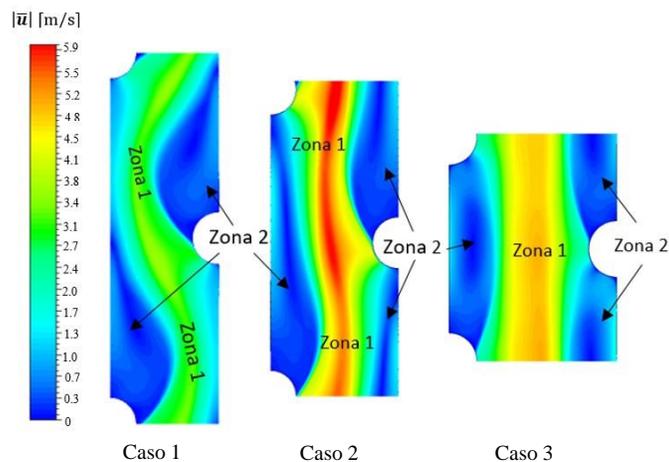


Figura 7 Contornos de velocidades para diferentes casos.

Contornos de presión

Los contornos de presión permiten detectar las zonas en las que el fluido presenta las mayores pérdidas de carga. En la Figura 1.8 se pueden apreciar los contornos de presión de los tres casos analizados, además se muestran a lo largo de tres elementos periódicos del “pillow-plate.” Como es de esperarse, las mayores

caídas de presión se presentan después de los puntos de soldadura, esto se debe al choque del fluido con dichos puntos y a la presencia de vórtices que favorecen el estancamiento y las pérdidas de presión.

Contornos de Temperatura

Conocer la distribución de temperaturas en el análisis es uno de los partes más importantes en la transferencia de calor. En la Figura 1.9 se muestra el comportamiento térmico del intercambiador “pillow-plate” a lo largo del plano de simetría cuando es sometido a una temperatura constante en la pared de $T_w = 60\text{ °C}$. En esta figura se observa que las mínimas temperaturas se encuentran a lo largo de la zona 1, mientras que las máximas temperaturas se encuentran en las zonas de recirculación, cabe señalar que esto ocurre para todos los tres casos analizados, por lo tanto, las zonas más calientes se encuentran principalmente cerca de los puntos de soldadura. Esto se explica debido a que en estas zonas se presenta el estancamiento y la recirculación del flujo provocando calentamientos no deseados en el intercambiador. Las temperaturas aproximadas en los puntos de recirculación se encuentran de un rango de 40 a 50 °C para los tres casos analizados.

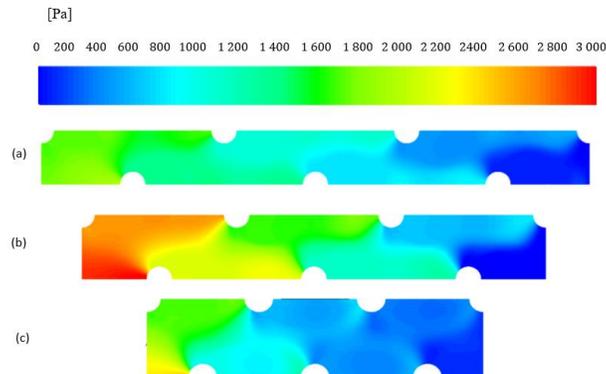


Figura 8 Contornos de presión en los tres casos de análisis.

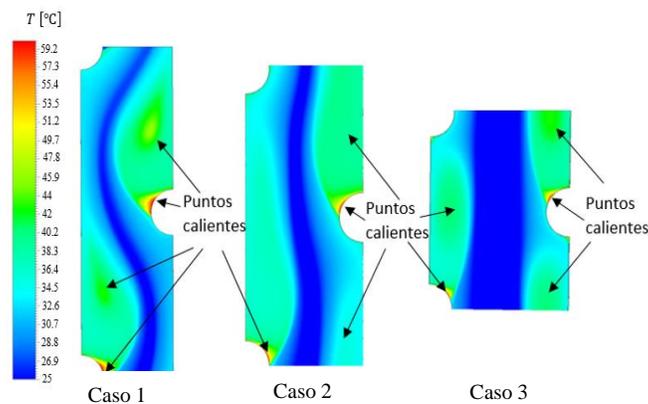


Figura 9 Contornos de temperatura de los tres casos de análisis.



Conclusiones

En este trabajo se estudió el comportamiento hidrodinámico y térmico del flujo dentro del canal de un intercambiador de calor tipo “pillow-plate” por medio de herramientas CFD (*computational fluid dynamics*). Se realizó un estudio sobre el comportamiento termo-hidráulico de diferentes configuraciones geométricas y se mostró que los resultados numéricos concuerdan con lo reportado en el estado del arte referente a intercambiadores de calor del tipo “pillow-plate.”

Los resultados obtenidos mostraron que los puntos donde se concentran las máximas temperaturas se encuentran en el centro de las zonas de recirculación y cerca de los puntos de soldadura. En dichas zonas, las altas temperaturas se generan debido a las bajas velocidades del fluido y a la recirculación de éste. Cerca de los puntos de soldadura, el caudal es relativamente bajo debido a la disminución del canal, lo cual provoca calentamiento en esta zona.

Es importante señalar que el patrón de soldadura en estos intercambiadores provoca que el fluido tenga un comportamiento turbulento dentro del canal, esto permite romper la capa límite y aumentar la transferencia de calor, sin embargo, estas geometrías aumentan la caída de presión debido a la colisión del fluido con los puntos de soldadura.

Por último, existen varios parámetros geométricos que no se analizaron en este trabajo, tales como la altura del canal, las dimensiones y forma de los puntos de soldadura, una investigación más a fondo podría llevar a otras configuraciones geométricas que incrementen la transferencia de calor, por lo que el análisis de diferentes formas y patrones del punto de soldadura es un punto de partida para trabajos futuros.

Referencias

- [1] Zhang, Ji, et al. "A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101 (2019) 305-328. doi: [10.1016/j.rser.2018.11.017](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.017).
- [2] Zhang, Yanfeng, et al. "Numerical study on heat transfer enhancement in capsule-type plate heat exchangers." *Applied Thermal Engineering* 108 (2016): 1237-1242. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.08.033](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.033).
- [3] J.M. Tran, S. Sommerfeld, M. Piper. *Investigation of pillow-plate condensers for the application in distillation columns. Chemical Engineering Research and Design* 99 (2015) 67-74.
- [4] M. Piper, A. Olenberg, J.M. Tran, E.Y. Kenig, *Determination of the geometric design parameters of pillow-plate heat exchangers, Applied Thermal Engineering* (2015), doi: [10.1016/j.applthermaleng.2015.08.097](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.097).



- [5] Tran, Julian M., et al. *"Pillow-Plate Heat Exchangers: Fundamental Characteristics."* *Innovative Heat Exchangers*. Springer, Cham, 2018. 233-245, doi: 10.1007/978-3-319-71641-1-7.
- [6] Mitrovic, Jovan, and Boban Maletic. *"Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in thermoplates."* *Chemical Engineering & Technology* 34.9 (2011): 1439-1448. Doi: [10.1002/ceat.201100271](https://doi.org/10.1002/ceat.201100271).
- [43] Piper, Mark, Julian M. Tran, and Eugeny Y. Kenig. *"A CFD study of the thermo-hydraulic characteristics of pillow-plate heat exchangers."* *ASME 2016 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2016 14th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016, doi: [10.1115/HT2016-7176](https://doi.org/10.1115/HT2016-7176).
- [7] J. Mitrovic, B. Maletic. *Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in thermoplates*. Chem Eng Technol 2011; 34():1439-48.
- [8] M. Piper, A. Zibart, E.Y Keing. *New design equations for turbulent forced convection heat transfer and pressure lost in pillow-plate channels*. International Journal of Thermal Sciences 120 (2017) 459-468.
- [10] M. Piper, A. Zibart, E. Djakow, R. Springer, W. Homberg, E.Y. Kenig, *"Heat transfer enhancement in pillow-plate heat exchangers with dimpled surfaces: a numerical study"*, *Applied Thermal Engineering* (2019), doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.082.
- [11] Djakow, Eugen, et al. *"Incremental electrohydraulic forming-A new approach for the manufacture of structured multifunctional sheet metal blanks."* *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1896. No. 1. AIP Publishing, 2017, doi: [10.1063/1.5008083](https://doi.org/10.1063/1.5008083).
- [12] J.M. Tran, M. Linnemann, M. Piper, E.Y. Kenig, *On the coupled condensation-evaporation in pillow-plate condensers: Investigation of cooling medium evaporation*, *Applied Thermal Engineering* (2017),doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.050