ARTÍCULO CIENTÍFICO

ANÁLISIS DEL ESQUEMA DE INTERPOLACIÓN EN LA FORMACIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE LECHE EN UN SISTEMA HELICOIDAL

Ana Camila Palacios-Soto, María José Ramírez-Rivera, Erika Ramos-Ojeda*

Resumen

El ensuciamiento de los procesos térmicos de leche es un fenómeno indeseable que reduce la eficiencia térmica y aumenta los costos de limpieza. La literatura presenta una diversidad de trabajos en el diseño de equipos para reducir la generación de ensuciamiento. Este trabajo describe una estrategia numérica para estudiar la formación de ensuciamiento como reacción de pared. El sistema es un intercambiador de calor helicoidal con el fin de fomentar y detallar el fenómeno de ensuciamiento. La metodología aplica Dinámica Computacional de Fluidos considerando los parámetros: número de iteraciones y esquema de interpolación en la celda. Los resultados mostraron una diferencia en la formación de ensuciamiento bajo los esquemas de interpolación propuestos, lo cual es relevante para una reacción en la pared. Este análisis es un planteamiento elemental para estudios posteriores y detallados sobre el comportamiento y formación de ensuciamiento.

Palabras clave:

Reacción, esquema de interpolación, turbulencia, CFD.

Abstract

Milk fouling is an undesirable phenomenon that reduces the thermal efficiency and increases the cleaning costs. The published works have studied the formation of fouling to improve the design of heat exchangers. This work contains a numerical strategy to elucidate the formation of fouling as a wall reaction. The system is a helicoidal heat exchanger to promote and detail the formation of fouling. The methodology applied CFD simulation and considered the parameters: number of iterations and cell interpolation scheme. The results presented a difference in the formation of fouling under the diverse interpolation schemes, which is relevant for a wall reaction. This analysis is fundamental for further and detailed studies about the formation of fouling.

Keywords:

Reaction, interpolation scheme, turbulence, CFD.

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque, carretera Celaya-Juventino Rosas km 8.0, Celaya, Gto., 38124, México.
*autor de correspondencia: d25981019@roque.tecnm.mx

1. Introducción

El ensuciamiento lácteo es un fenómeno recurrente en los procesos de transferencia de calor, caracterizado por la deposición no deseada de materiales sobre las superficies de los equipos. Este proceso proviene de una exposición prolongada a temperaturas elevadas y es caracterizado por transformaciones fisicoquímicas en las proteínas, como solidificación, degradación y cambio estructural (Wilson, 2018). Principalmente, la desnaturalización de la β-lactoglobulina (β-Lg) fundamenta este fenómeno (de Wit & Klarenbeek, 1989) y sus modificaciones repercuten en la adherencia progresiva de material a las superficies. Estudios previos han detallado las reacciones químicas de la desnaturalización de β-Lg, como autooxidación, polimerización y descomposición térmica (Jong y col., 1992; Watkinson y Wilson, 1997). En general, la afectación de este problema es la reducción de la eficiencia térmica de los sistemas de intercambio de calor y los paros continuos para lavado (Fryer, 1989; Jeurnink &Brinkman, 1994).

Numerosos estudios han abordado el análisis del ensuciamiento desde diferentes enfoques. Visser y Jeurnink (1997) identificaron los principales factores que determinan la formación de depósitos y Jun y Puri (2005) desarrollaron modelos matemáticos orientados a su prevención y mitigación en sistemas de transferencia de calor. Sadeghinezhad et al. (2013) analizaron la influencia de las propiedades de la superficie en la adherencia de material. Por otra parte, Petit y col. (2013) realizaron un estudio dimensional que explica el incremento del ensuciamiento en intercambiadores de calor de placas, y Huppertz & Nieuwenhuijse (2022) profundizaron sobre el efecto de los componentes de la leche (proteínas y minerales) en la generación de incrustaciones durante el calentamiento.

A pesar de los numerosos avances en la comprensión del fenómeno, la mayoría de los estudios reportados se han enfocado en equipos convencionales como intercambiadores de placas o evaporadores de película descendente (Ramírez-Rivera et al., 2024). En general, el aumento del ensuciamiento es posible a bajas velocidades, altas temperaturas y obstrucciones en el flujo de calor. No obstante, análisis teóricos no han sido presentados para detallar el desarrollo del ensuciamiento. Este trabajo presenta una estrategia para precisar la predicción en el ensuciamiento bajo la técnica numérica de CFD. El caso de estudio propuesto incentiva la formación de ensuciamiento para determinar los parámetros numéricos de mayor influencia durante la simulación CFD en una reacción de pared. Las siguientes secciones describen la estrategia convencional de CFD para el fenómeno de ensuciamiento.

2. Metodología

El sistema es intercambiador de calor en forma helicoidal para promover la generación de ensuciamiento con mayor área de transferencia de calor y aumento en la obstrucción del flujo. El análisis fue posible con el paquete comercial ANSYS® Fluent 2025R2 y consistió en: a) elaboración del dominio computacional, b) desarrollo de la malla del sistema y c) solución numérica.

2.1 Dominio computacional

La geometría fue realizada en Design Modeler ® y consistió de una coraza cilíndrica de 5 cm de diámetro y 30 cm de longitud, con un sistema helicoidal interno basado en una forma circular de 1.5 cm de diámetro y 10 giros exactos. La Figura 1a) contiene la imagen de este dominio computacional. La discretización del sistema uso el paquete Meshing ANSYS ® y generó una malla de 167,861 elementos tetraédricos. La calidad de malla está basada en la distorsión de los elementos con un valor máximo de 0.2542 (el valor cercano a cero indica una aceptable calidad de malla). La Figura 1 b) representa este resultado bajo la distribución de la distorsión de los elementos.

2.2 Condiciones de frontera

El fluido fue leche (densidad, 1017 kg/m^3, capacidad calorífica, 3.849 kJ/kgK, conductividad térmica, 0.53 W/mK) con de 3.5% de proteína e ingresó con velocidad de 0.01 m/s a 85°C. La pared helicoidal consideró una resistencia convectiva con coeficiente de transferencia de calor de 100 W/m^{2}K y temperatura de 90°C. La salida del fluido conservó la cantidad de materia de entrada.

2.3 Ecuaciones de gobierno

El análisis consideró un sistema en estado estable, no-isotérmico y turbulento, lo cual es representado por las ecuaciones de continuidad, momentum y turbulencia que se encuentran en la Tabla1. El modelo de turbulencia fue κ−ε estándar.

La formación de ensuciamiento proviene de la deposición y desnaturalización de β-lg. El modelado sigue expresiones cinéticas de cuatro fases: desnaturalización de la β-lg nativa (N) en estado desplegado (U), generación de proteína agregada (A) y depositada en la pared (D). Jong et al. (1993) propusieron el modelo cinético bajo observaciones experimentales (Ecuación

1), donde r es la velocidad de reacción, C la concentración molar, k el parámetro cinético y los subíndices son propios para las fases de la proteína (N, U, A y D). El parámetro cinético sigue el modelo de Arrhenius (Ecuación 2) cuyos valores provienen de de Wit & Klarenbeek (1989), de Jong et al. (1992) y de Jong et al. (1993), respectivamente.

2.3. Solución numérica

La simulación fue resuelta con 1000 iteraciones en estado estable bajo el algoritmo SIMPLEC con inicialización estándar desde la condición de frontera de entrada. La solución fue posible con un procesador Intel® Corel ™ i5-12450H 2 GHz de 16 GB de RAM.

2.4 Prueba de iteraciones

La prueba de independencia de iteraciones determina un número de iteraciones suficientes para realizar las simulaciones. Esto describe que la solución es independiente del número de iteraciones, y que el tiempo computacional puede ser reducido. En este caso, el esquema de interpolación de primer orden fue considerado para probar 800, 1000, 2000, 5000 y 10000 iteraciones.

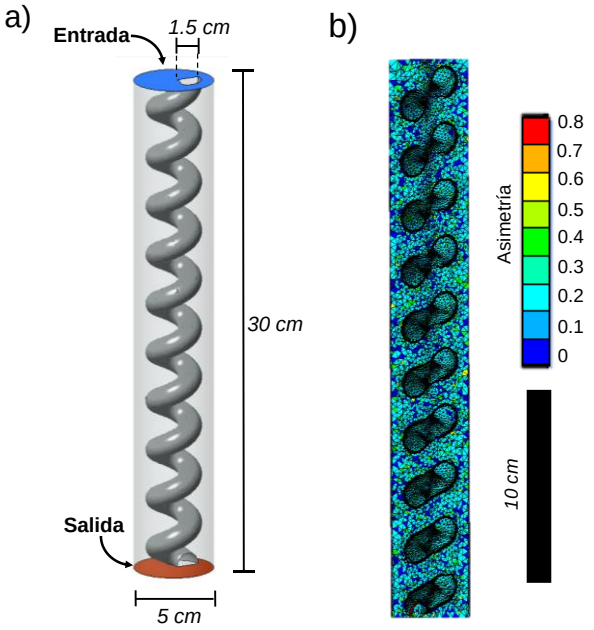

Figure 1. Sistema de intercambiador de calor helicoidal ®: a) descripción del dominio computacional y b) discretización del sistema.

Tabla 1. Ecuaciones de gobierno para la simulación CFD propuesta.

Nombre	Ecuación
Conservación de la masa	$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$
Conservación de momentum	$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i v_j}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + g_i\rho$
Energía cinética de turbulencia	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right] - \rho\varepsilon$
Energía de disipación de turbulencia	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1.3}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + 1.44\frac{\varepsilon}{\kappa} - 1.92\rho\frac{\varepsilon^2}{\kappa}$
Nomenclatura	v: velocidad, x: coordenada, P: presión, g: gravedad, μ: viscosidad, ρ: densidad, μ_t: viscosidad de turbulencia (0.09 ρ κ^2/ε), κ: energía cinética de turbulencia, ε: disipación de turbulencia, i y j: índices de las direcciones.

$$\left.\begin{aligned} -r_N &= k_U C_N \\ r_U &= k_U C_N - k_A C_U^2 - k_D C_U \\ r_A &= k_A C_U^2 \\ r_D &= k_D C_U \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} k_U &= \left(3.37\times10^{37}\, s^{-1}\right) e^{\frac{-0.261\,J/mol}{RT}} \\ k_A &= \left(1.36\times10^{43}\, s^{-1}\right) e^{\frac{-0.312\,J/mol}{RT}} \\ k_D &= \left(0.51 s^{-1}\right) e^{\frac{-0.0451\,J/mol}{RT}} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

2.5 Prueba del esquema de interpolación

Esta prueba consideró los esquemas disponibles por ANSYS Fluent: primer y segundo orden en dirección del flujo, esquema de tercer orden de interpolación para cinética convectiva (QUICK por sus siglas en inglés) y monotonicidad para las leyes de conservación (MUSCL por sus siglas en inglés). Los esquemas de dirección de flujo proponen el concepto de celda donante promediando bajo derivades centrales. No obstante, el esquema de primer orden (FOUS, por sus siglas en inglés) genera un problema de falsa difusión (Yeoh & Tu, 2010). El esquema de segundo orden (SOUS, por sus siglas en inglés) expande una serie de Taylor sobre la derivada central, aplica un vector de distancia para evaluar los gradientes a lo largo de las caras y logra un sistema matricial para determinar los gradientes (Barth & Jesperson, 1989). El esquema QUICK aplica una interpolación cuadrática con valores peso basados en la dirección del flujo y con ajustes geométricos al tipo de malla (Leonard, 1979). El esquema MUSCL es una combinación lineal del esquema central y el de segundo orden (van Leer, 1997; van Leer & Nishikawa, 2021). Así, estos esquemas son comparados sobre la formación de ensuciamiento en la pared del intercambiador helicoidal.

3. Resultados

Las pruebas realizadas cuantificaron el área ocupada por ensuciamiento a lo largo del serpentín. El ensuciamiento correspondió al contorno de la fracción másica de proteína depositada (D) con valor mayor a $1.4\text{x}10^{-8}$. La prueba de independencia de iteraciones presentó una evolución numérica de esta área con aumento hasta un valor estable después de 5000 iteraciones. La Figura 2 representa el resultado de esta prueba. Así, las pruebas restantes aplicaron 5000 iteraciones. La comparación de los esquemas de interpolación cuantificó el área de ensuciamiento. Estos resultados presentaron una diferencia del 4.5% entre el esquema FOUS y los restantes, ya que los esquemas SOUS y QUICK lograron idénticos valores y el MUSCL un valor cercano a estos. La Tabla 2 resume estos valores. Dada la naturaleza de la formulación de cada esquema, el SOUS es aceptable para resolver el problema de ensuciamiento sin una demanda numérica adicional en la solución del problema y con una estabilidad numérica aceptable.

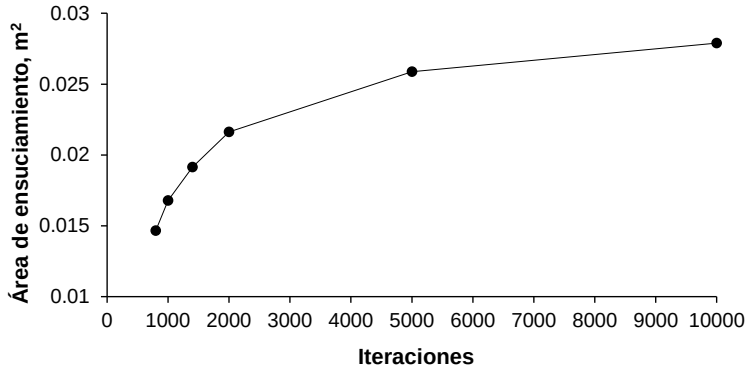

Figura 2. Comportamiento del ensuciamiento respecto a las iteraciones.

Tabla 2. Resultados de prueba de esquema de interpolación

Esquema de interpolación	Área de ensuciamiento (cm^2)
FOUS	250.946
SOUS	261.867
QUICK	261.867
MUSCL	261.975

El análisis CFD aplicó a la distribución de temperatura, velocidad y área de ensuciamiento en el sistema, como muestra la Figura 3 con planos XY. La distribución de temperatura sigue un aumento en la zona de salida del flujo en respuesta al tiempo de residencia del fluido dentro del intercambiador. La zona interna del helicoidal presentó mayor aumento de temperatura a diferencia de la zona circundante. Esto es esperado dada la transferencia de calor desde las paredes del helicoidal. La Figura 3 a) describe este patrón.

El perfil de velocidad presentó el efecto de la obstrucción de la forma helicoidal. En las paredes externas, la velocidad fue cero dada la condición de no deslizamiento. Sin embargo, cerca de las paredes internas, el efecto de la obstrucción de los giros del helicoidal generó un aumento de la velocidad. Esto demuestra cambios de velocidad al acercarse a la pared del helicoidal. La Figura 3 b) demuestra este comportamiento, donde la gráfica es tomada a partir de dos líneas cercanas a las paredes (roja y negra). Este comportamiento oscilatorio fue descrito para un caso similar por Xijun et al. (2026). La oscilación existió a lo largo del helicoidal en respuesta a la obstrucción de las vueltas.

La formación de ensuciamiento fue predominante en la parte exterior del helicoidal. La Figura 3 c) contiene la zona de mayor formación de ensuciamiento circundada por las líneas de corriente, predominando las exteriores. Un detalle de esta imagen enfoca el perfil de la fracción másica de la proteína (D). Esto describe zonas de baja formación en la parte central de helicoidal y la formación paulatina en dirección del flujo. Las vueltas de la geometría generaron una obstrucción en la zona central, lo cual impactó en el aumento de la turbulencia y redujo el ensuciamiento. Esta relación inversa de la turbulencia y el ensuciamiento sigue lo descrito por Visser & Jeurnink (1997).

4. Conclusiones

La técnica de CFD presenta una diversidad de aproximaciones numéricas para la solución de problemas de flujo. En este caso, el ensuciamiento sobre superficies de calentamiento es una reacción de pared que depende del esquema de interpolación. Este trabajo comparó cuatro esquemas de interpolación de ANSYS Fluent, donde el SOUS fue una estrategia robusta y próxima a las de mayor consumo computacional. Por otra parte, el escenario presentado (intercambiador de calor con geometría helicoidal) describió una respuesta esperada para el fenómeno de ensuciamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de SECIHTI, México, a través de la beca 1260180.

Referencias

Barth, T.J., & Jesperson, D.C. (1989). The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. AIAA Journal, Paper 89-0366.

de Jong, P., Waalewijn, R., & van der Linden, H.J.L.J. (1993). Validity of a kinetic fouling model for heat-treatment of whole milk. Lait, 73(3), 293-302. DOI: 10.1051/lait:1993327.

de Jong, P.D., Bouman, S., & van der Linden, H.J.L.J. (1992). Original Papers and Proceedings: Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of β-lactoglobulin. International Journal of Dairy Technology, 45(1), 3-8.

de Wit, J., & Klarenbeek, G. (1989). Technological and functional aspects of milk proteins. En Milk Proteins: Nutritional, Clinical, Functional and Technological Aspects (pp. 211-222). Springer.

Fryer, P. (1989). The uses of fouling models in the design of food process plant. International Journal of Dairy Technology, 42(1), 23-29.

Huppertz, T., & Nieuwenhuijse, H. (2022). Constituent fouling during heat treatment of milk: A review. International Dairy Journal, 126, 105236. DOI: 10.1016/j.idairyj.2021.105236

Jeurnink, T.J., & Brinkman, D.W. (1994). The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey. International Dairy Journal, 4(4), 347-368.

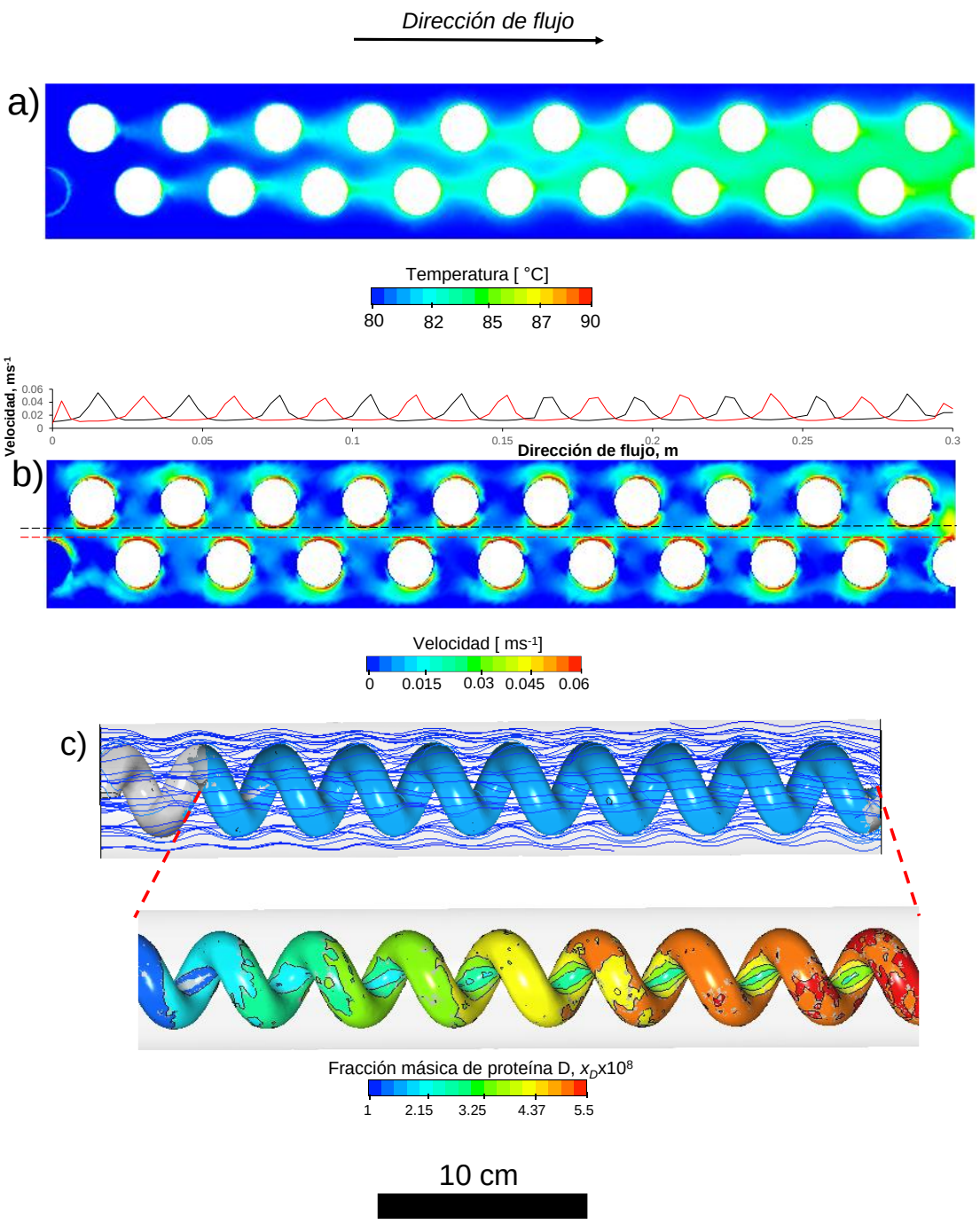

Figura 3. Resultados de la simulación CFD del sistema helicoidal: a) perfil de temperatura, b) perfil de velocidad, y c) área de ensuciamiento.

de Jong, P, Bouman, S., & van der Linden, H.J.L.J. (1992). Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of β-lactoglobulin. Journal of the Society of Dairy Technology, 45, 3-8.
DOI: 10.1111/j.1471-0307.1992.tb01715.x

Jun, S., & Puri, V. (2005). Fouling models for heat exchangers in dairy processing: A review. Journal of food process engineering, 28(1), 1-34.

Leonard, B.P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 19(1), 59-98.

Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G., & Delaplace, G. (2013). β-lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: Pilot-scale experiments and dimensional analysis. Chemical Engineering Science, 101, 432-450.
DOI: 10.1016/j.ces.2013.06.045

Ramírez-Rivera, M.J., Díaz-Ovalle, C.O., Ramos-Ojeda, E., & Castrejón-González, E.O. (2024). CFD simulation analysis of fouling formation in a milk falling-film evaporator. Food and Bioproducts Processing, 143, 242-254.
DOI: 10.1016/j.fbp.2023.12.003

Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Badarudin, A., Zubair, M.N.M., et al. (2013). A review of milk fouling on heat exchanger surfaces. Reviews in Chemical Engineering. 29(3), 169-188.
DOI: 10.1515/revce-2013-0003 ().

van Leer, B. (1997). Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. Journal of Computational Physics, 135(2), 229-248.

van Leer, B., & Nishikawa, H. (2021). Towards the ultimate understanding of MUSCL: Pitfalls in achieving third-order accuracy. Journal of Computational Physics, 446, 110640.

Visser, J., & Jeurnink, T.J.M. (1997). Fouling of heat exchangers in the dairy industry. Experimental Thermal and Fluid Science, 14(4), 407-424.
DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00142-2

Watkinson, A.P., & Wilson, D.I. (1997). Chemical reaction fouling: A review. Experimental Thermal and Fluid Science, 14(4), 361-374.
DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00138-0

Wilson, D.I. (2018). Fouling during food processing – progress in tackling this inconvenient truth. Current Opinion in Food Science, 23, 105-112.
DOI: 10.1016/j.cofs.2018.10.002.

Xijun, Z., Kaiwen, Q., & Xiaobin, T. (2026). Simulation of flow field characteristics around longitudinally staggered variable-curvature helical coil bundles. Nuclear Engineering and Design, 446, 114632.

Yeoh, G.-H., & Tu, J. (2010). Computational techniques for multi-phase flows: Butterworth-Heinem