

Energy Efficiency in Pipelines: A Comparative-Applicative Analysis of Predictive Models for Drag Reducing Agents (DRA)

Abelardo Contreras, Ing.¹ 

^{1,3}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, acontrerasp@uni.edu.pe


Abstract— This research conducts an in-depth analysis on the use of Drag Reducing Agents (DRA) in the transportation of liquid hydrocarbons through pipelines, highlighting their importance in improving energy efficiency. The study focuses on evaluating predictive models used in the industry, such as the correlations by Conoco, Burger, Aesop, as well as an integrated correlation proposed by Zeng et al., applying them in pipeline sections of 14 and 10 inches under various operational conditions.

Through the application of these correlations, the variability in the predictability of the models is demonstrated. The findings suggest that for the 14-inch pipeline, the Conoco and Aesop correlations showed greater consistency with the actual test values, while the 10-inch pipeline presented specific challenges, indicating the need for adjustments in the models to improve their accuracy and applicability.

This study contributes to the theoretical understanding of the friction reduction phenomenon and acknowledges the limitations of current models to enhance their predictability and thereby contribute to the energy optimization in liquid hydrocarbon transport systems.

Keywords—Drag Reducer Agents (DRA), pipelines, hydraulics, liquid hydrocarbons.

Eficiencia Energética en Poliductos: Un Análisis Comparativo-Applicativo de Modelos Predictivos para Agentes Reductores de Fricción (DRA)

Abelardo Contreras, Ing.¹

^{1,3}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, acontrerasp@uni.edu.pe

Abstract— This research conducts an in-depth analysis on the use of Drag Reducing Agents (DRA) in the transportation of liquid hydrocarbons through pipelines, highlighting their importance in improving energy efficiency. The study focuses on evaluating predictive models used in the industry, such as the correlations by Conoco, Burger, Aesop, as well as an integrated correlation proposed by Zeng et al., applying them in pipeline sections of 14 and 10 inches under various operational conditions.

Through the application of these correlations, the variability in the predictability of the models is demonstrated. The findings suggest that for the 14-inch pipeline, the Conoco and Aesop correlations showed greater consistency with the actual test values, while the 10-inch pipeline presented specific challenges, indicating the need for adjustments in the models to improve their accuracy and applicability.

This study contributes to the theoretical understanding of the friction reduction phenomenon and acknowledges the limitations of current models to enhance their predictability and thereby contribute to the energy optimization in liquid hydrocarbon transport systems.

Keywords— Drag Reducer Agents (DRA), pipelines, hydraulics, liquid hydrocarbons.

Resumen— La presente investigación aborda un análisis exhaustivo sobre el uso de Agentes Reductores de Fricción (DRA) en el transporte de hidrocarburos líquidos mediante poliductos, destacando su relevancia en la mejora de la eficiencia energética. El estudio se enfoca en la evaluación de modelos de predicción empleados en la industria, como las correlaciones de Conoco, Burger, Aesop, así como una correlación integral propuesta por Zeng et al., aplicándolos en secciones de poliductos de 14 y 10 pulgadas bajo distintas condiciones operativas.

A través de la aplicación de estas correlaciones, se demuestra la variabilidad en la predictibilidad de los modelos. Los hallazgos sugieren que, para el poliducto de 14 pulgadas, las correlaciones de Conoco y Aesop mostraron una mayor consistencia con los valores de prueba reales, mientras que, el poliducto de 10 pulgadas presentó desafíos particulares, indicando la necesidad de realizar ajustes en los modelos para mejorar su precisión y aplicabilidad.

Este estudio contribuye a la comprensión teórica del fenómeno de reducción de fricción, y al reconocimiento de las limitaciones de los modelos actuales con el fin de mejorar su predictibilidad y por ende contribuir en la optimización energética en sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos.

Keywords— Agentes Reductores de Fricción (DRA), poliductos, hidráulica, hidrocarburos líquidos.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte eficiente de hidrocarburos líquidos, tales como Gasolinas/Gasoholes, Diesel y Líquidos de Gas Natural mediante poliductos, representa un pilar fundamental en la infraestructura energética global y particularmente en países como Perú, donde estos compuestos desempeñan un rol preponderante dentro de su matriz energética [1]. La producción y demanda de estos hidrocarburos ha mantenido una trayectoria constante en años recientes, proyectando una tendencia ascendente a futuro, como se ilustra en la Fig. 1. Este panorama subraya retos inherentes al transporte, especialmente en lo que respecta, por un lado, a las pérdidas energéticas asociadas al flujo turbulento y por otro, al requerimiento de energía adicional debido a los potenciales incrementos en la capacidad de transporte. En este contexto, se subraya la imperiosa necesidad de contar con mecanismos eficaces que contrarresten esta resistencia u optimicen el suministro de energía a lo largo de las redes de transporte.

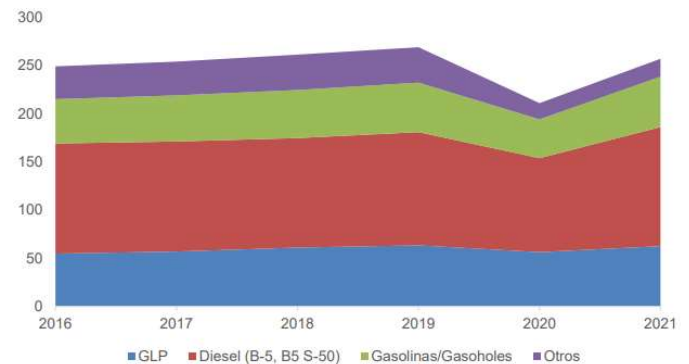


Fig.1 Perú: Evolución de la cantidad demandada de combustibles Líquidos en MBPD (2016-2021)

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

En respuesta a estos desafíos, se ha despertado un marcado interés en el desarrollo de estrategias dirigidas a mitigar las pérdidas por fricción en el transporte de estos valiosos recursos, así como en la optimización integral de la cadena de suministro de hidrocarburos [2], lo que a su vez promueve iniciativas enfocadas en la reducción de la huella de carbono [3]. Una estrategia que ha demostrado ser particularmente efectiva es la incorporación de aditivos conocidos como agentes reductores de fricción (DRA), cuya aplicación ha evidenciado notables beneficios económicos al facilitar la disminución de la caída de presión en flujos turbulentos, mejorando así la eficiencia y/o

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

capacidad de transporte [4]. Estos compuestos, fundamentalmente constituidos por largas cadenas poliméricas, son capaces de mejorar sustancialmente la capacidad de transporte en poliductos reduciendo la fricción interna, incluso con la adición de concentraciones mínimas, sin alterar las condiciones físicas o químicas del producto transportado. Este enfoque no solo permite maximizar la tasa de flujo de los hidrocarburos, sino también optimizar los costos vinculados al suministro energético [5]. En la Fig.2 se puede visualizar el efecto de un reductor de fricción sobre la pérdida de carga en una tubería de transporte.

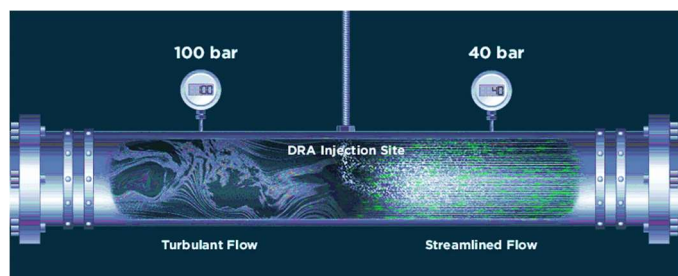


Fig.2: Aplicación y efecto de un reductor de fricción (DRA) sobre una tubería de transporte de hidrocarburos líquidos
Fuente: LPSI (Liquid Power Specialty Products Inc.)

La reducción de fricción mediante el uso de DRA fue documentada por primera vez por Toms en 1948 [6], quien reportó una significativa disminución de la pérdida de carga por fricción tras la adición de polimetilmetacrilato (PMM) en concentraciones reducidas. Esta línea de investigación fue posteriormente ampliada por Virk en 1975 [7], quien consolidó datos experimentales que corroboraban la eficacia de las soluciones poliméricas en la atenuación de dicha pérdida. La implementación práctica de DRA se inició en el oleoducto Trans-Alaskan en 1979, mediante la introducción de un 10% de CDR, un agente de la compañía Conoco-Phillips constituido por una solución de polímero de alto peso molecular en un solvente hidrocarburo [8], marcando el comienzo de la adopción generalizada de estos aditivos en sistemas de poliductos a nivel mundial, lo cual ha repercutido positivamente en la eficiencia del transporte de hidrocarburos líquidos.

A medida que la utilización de DRA se ha expandido globalmente, han surgido nuevos desafíos relacionados con la predicción adecuada y la estimación del rendimiento de estos aditivos en la planificación, operación y optimización de los sistemas de transporte [9]. Actualmente, la eficacia de los DRA se modela principalmente mediante pruebas de campo, recurriendo a modelos que vinculan la Reducción de Fricción (DR) exclusivamente con la concentración de DRA o, de manera más compleja, relacionándola también con parámetros como la viscosidad del fluido, la velocidad de flujo, el diámetro de la tubería, la longitud de la tubería de transporte y el Número de Reynolds. Sin embargo, estos modelos suelen presentar limitaciones, siendo aplicables solamente a condiciones de oleoductos y poliductos específicos que se asemejen en tamaño y propiedades del fluido a aquellos sobre los que se realizaron

las pruebas [9]. Además, las observaciones de campo indican que el DRA puede degradarse a lo largo del proceso de transporte debido a los esfuerzos cortantes, lo que resulta en una disminución de su concentración efectiva a medida que el fluido avanza por la tubería. Esto subraya la necesidad de incorporar en los modelos el coeficiente de degradación del DRA para reflejar más fielmente su comportamiento en condiciones reales.

A pesar de la considerable investigación dedicada al estudio de la reducción de fricción, aún no se ha desarrollado una teoría exhaustiva que explique completamente este fenómeno. Esto se debe, en gran medida, a la complejidad intrínseca del problema, que se sitúa en la intersección de tres disciplinas científicas: la fisicoquímica de polímeros, la reología y la hidrodinámica [9].

Por lo tanto, el presente estudio se enfoca en abordar los aspectos hidráulicos relacionados con el uso de DRA, evaluando los modelos más reconocidos en la industria, como las correlaciones de Conoco, Burger y Aesop, además de explorar una correlación integral propuesta por Zeng et al. [9]. Se aplicarán estos modelos en dos tramos de poliductos de 14 y 10 pulgadas, sometidos a distintos caudales y dosificaciones de DRA, con el objetivo de validar su capacidad predictiva y analizar su aplicabilidad y recomendaciones frente a condiciones específicas de transporte. Esta aproximación no solo busca aportar a la comprensión teórica del fenómeno, sino también ofrecer guías prácticas para la implementación efectiva de DRA en la mejora de la eficiencia del transporte de hidrocarburos líquidos en sistemas reales.

II. METODOLOGÍA

A. DRA: Mecanismo de reducción de fricción

La reducción de fricción es un fenómeno en el cual se reduce la fricción de un líquido que fluye en una tubería bajo un régimen turbulento, gracias a la adición de una pequeña cantidad de agente reductor de fricción (DRA). Este aditivo amortigua la turbulencia del flujo de hidrocarburo cerca de la pared de la tubería, lo que permite disminuir la fricción y, en consecuencia, la caída de presión por fricción. Este proceso resulta en una menor demanda energética o en un aumento de la tasa de flujo.

En la mayoría de los sistemas de transporte, el fluido transita en un régimen turbulento donde las moléculas se desplazan de manera aleatoria. Tal como se ilustra en la Fig. 3, este régimen comprende tres zonas de flujo; la subcapa laminar (laminar sub-layer), la región intermedia (buffer region) y el núcleo turbulento (turbulent core). El DRA actúa principalmente en la región intermedia y el núcleo turbulento, mitigando el consumo energético provocado por el movimiento aleatorio de las moléculas. En otras palabras, la reducción de fricción se logra gracias a la interacción entre el DRA y la turbulencia del fluido en estas zonas específicas.

El efecto del DRA se limita a la reducción de la fricción y, por ende, a la disminución de la pérdida de presión por fricción. Dado que la caída total de presión se debe tanto a la fricción

como a cambios en la elevación, el uso de DRA resulta ventajoso únicamente en tramos donde la pérdida de presión por fricción es predominante, y no en aquellos donde la principal contribución a la caída de presión se debe a la ganancia de elevación. [11].

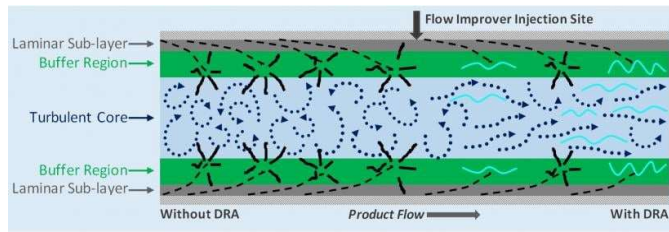


Fig.3: Mecanismo de reducción de fricción mediante el uso de DRA
Fuente: RBN Energy LLC

B. DRA: Limitaciones del mecanismo

La degradación mecánica y la desecación son dos problemas principales a los que se enfrentan los DRA cuando se utilizan dentro de ductos con flujo turbulento constante. La degradación mecánica resulta del contacto con el flujo turbulento o la exposición a esfuerzos cortantes considerables en bombas, codos y válvulas, lo cual provoca que las moléculas del polímero se fragilicen y rompan de manera irreversible y muy rápida, disminuyendo así su capacidad de reducción de fricción. La desecación ocurre cuando el solvente del DRA se evapora, causando que el DRA precipite, eliminando el efecto de reducción de fricción [12].

La resistencia a la degradación mecánica de los polímeros está influenciada por una variedad de parámetros, tales como el peso molecular y su distribución, el grado de turbulencia, la preparación y concentración del polímero, la geometría del flujo y el tamaño de la tubería [13] [14]. La resistencia a la temperatura es otra limitación para el uso de DRA. La sensibilidad del polímero a la deterioración aumenta con la temperatura. Además de degradarse mecánicamente, los aditivos poliméricos pueden degradarse químicamente. Durante la degradación química, la estructura del polímero cambia como resultado de reacciones químicas con otros componentes en el fluido, por ejemplo, cuando hay presencia de oxígeno y existen radicales libres o metales. Esta degradación química puede ser desencadenada por salinidades excesivas o concentraciones de calcio en el medio transportado [15] [16]

C. DRA: Rendimiento

Los factores que afectan el rendimiento de un DRA son los siguientes:

- Tipo de DRA
- Concentración de DRA inyectado
- Diámetro y rugosidad de la tubería
- Longitud de la tubería
- Propiedades del fluido, especialmente la viscosidad
- Velocidad o tasa de flujo

- Número de Reynolds
- Válvulas en el poliducto
- Bombas

La efectividad o eficiencia de un DRA se evalúa por la reducción de la pérdida de presión por fricción o reducción de la fricción (DR), la cual se expresa como:

$$DR = \frac{\Delta P_{f_0} - \Delta P_f}{\Delta P_{f_0}}$$

donde ΔP_{f_0} es la pérdida de presión por fricción para una sección seleccionada de un poliducto sin DRA, y ΔP_f es la pérdida de presión por fricción con DRA para la misma tasa de flujo de un fluido.

En un tubo cilíndrico de diámetro uniforme D, fluyendo completamente, la pérdida de presión debido a efectos viscosos ΔP_f es proporcional a la longitud L y puede ser caracterizada por la ecuación de Darcy–Weisbach:

$$\frac{\Delta P_f}{L} = f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{v^2}{d}$$

Donde la pérdida de presión por unidad de longitud $\Delta P_f/L$ (unidades SI: Pa/m) es una función de:

- ρ , la densidad del fluido (kg/m³);
- d, el diámetro interno del tubo (m);
- v, la velocidad media de flujo, medida experimentalmente como la tasa de flujo volumétrico Q por unidad de área transversal en la superficie mojada (m/s);
- f, el factor de fricción de Darcy

En consecuencia, un valor calculado de DR correspondiente a una prueba de campo para una longitud promedio está relacionada con:

- El tipo y concentración del DRA
- Diámetro y longitud de la tubería
- Propiedades del fluido
- Tasa de flujo

Considerando la misma tubería de longitud L y diámetro d, el mismo fluido ρ , y la misma tasa de flujo Q y velocidad v, reemplazando ΔP_{f_0} y ΔP_f en la ecuación inicial con f_0 y f, tenemos:

$$DR = \frac{f_0 - f}{f_0}$$

donde f_0 es el factor de fricción sin DRA, y f es el factor de fricción con DRA para el mismo fluido y a la misma tasa de flujo.

Reescribiendo la ecuación anterior para f, tenemos:

$$f = f_o \cdot (1 - DR)$$

donde f_o es calculable usando ecuaciones de determinación del factor de fricción, como la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f_o}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_o}} \right)$$

Por lo tanto, el problema de predecir el factor de fricción efectivo f con un DRA, para luego predecir la reducción de pérdida de presión, se convierte en un problema asociado a predecir el DR de un DRA [9].

En ese sentido, predecir el DR ha dependido del uso de modelos desarrollados a través de pruebas de campo desde que se usó el DRA en la industria. En el siguiente apartado, se describirán cada uno de los modelos de predicción más reconocidos en la industria.

D. DRA: Modelos de predicción de reducción de fricción

Previo a la aplicación de un reductor de fricción en un sistema de transporte por ductos, se requiere determinar la dosificación de inyección de DRA necesaria para lograr la presión o tasa de flujo deseada. Generalmente los fabricantes de DRA proporcionan sus propios modelos, no obstante, se pueden utilizar correlaciones tales como el de Conoco, Burger, Aesop y el Modelo integral (Zeng et. al.). A continuación, se describirán cada uno de ellos [11]:

Correlación de CONOCO

Esta es una correlación la cual requiere datos específicos del fluido en línea. El factor de reducción de fricción (DR) tiene la forma siguiente:

$$DR = \frac{ppm}{a * ppm + b}$$

Donde a y b son constantes específicas del producto y ppm es la concentración de DRA en partes por millón. Esta correlación de DRA solo es válida para velocidades superiores a los 0.6 m/s y Números de Reynolds superiores a 7500.

No obstante, existe una correlación empleada con mayor amplitud, denominada Correlación de Conoco Simplificada, en la cual el factor de reducción de fricción tiene la forma siguiente:

$$DR = \frac{ppm}{A * ppm + B}$$

Donde A y B son constantes experimentales del producto. La ecuación anterior se utiliza directamente con las constantes introducidas por el usuario. Esta última ecuación es la que se empleará dentro del presente análisis.

Correlación de BURGER

Ampliamente utilizada y depende de la concentración de DRA, la velocidad y viscosidad del fluido y el diámetro de la tubería. En esta ecuación, el factor de reducción de fricción (DR) tiene la siguiente forma:

$$DR = k_1 * \ln \left(\frac{v * \left(\frac{ppm}{C_s} \right)^{0.5}}{d^{0.2}} \right) + k_2$$

Donde:

k_1 and k_2 = constantes de la ecuación de Burger
 v = velocidad del fluido, ft/seg
 ppm = concentración de DRA en partes por millón
 C_s = viscosidad del fluido, centistokes
 d = diámetro de la tubería, ft

Correlación de AESOP

Esta correlación requiere datos específicos del fluido y se determina de la siguiente manera:

$$DR = B \left(\frac{AC_e}{1 + AC_e} \right) (1 + C * 10^{-5} N_{Re})$$

$$C_e = C_o e^{-\lambda d} ppm$$

Donde:

C_o = concentración inicial de DRA, en ppm
 C_e = concentración efectiva de DRA, en ppm
 d = distancia recorrida, km
 N_{Re} = número de Reynolds
 λ = coeficiente de degradación

Correlación Modelo Integral (Zeng et. al.)

Este modelo introduce variables tales como: tipo de DRA, diámetro de la tubería, viscosidad del fluido, concentración de DRA y el número de Reynolds:

$$DR = C \left(\frac{d}{d_o} \right)^p \left(\frac{v}{v_o} \right)^p \frac{Re^N}{\frac{A}{con} + B}$$

Donde:

C = tipo de DRA con el que se realizan la mayoría de las pruebas, $C = 1$
 d_o = diámetro interno de la tubería base con la que se realizan la mayoría de las pruebas
 d = diámetro interno del ducto en cuestión
 p = constante basada en datos de prueba de diferentes diámetros de tuberías
 v_o = viscosidad del fluido base con el que se realizan la mayoría de las pruebas
 v = viscosidad del fluido en cuestión

m = constante basada en datos de prueba de diferentes viscosidades de fluidos

N = exponente de Reynolds, una constante obtenida a través de análisis de regresión y basada en datos de prueba de diferentes tasas de flujo

A, B = constantes obtenidas a través de un análisis de regresión y basadas en datos de prueba de diferentes concentraciones de DRA.

con = concentración efectiva de DRA, estimada como:

$$con = con_o e^{-C_d x} \text{ para tuberías}$$

$$con = con_o (1 - C_d \Delta P) \text{ para válvulas/equipos}$$

Donde:

con_o = concentración de DRA en el punto de inyección, o en la parte superior de una válvula o equipo;

C_d = coeficiente de degradación de DRA, para una longitud de tubería, posee la unidad de 1/longitud; para una válvula o equipo, posee la unidad de 1/presión;

x = distancia desde la inyección hasta cualquier punto a lo largo de la tubería;

ΔP = pérdida de presión a través de una válvula o equipo.

Este modelo se denomina integral dado que contiene todos los factores principales que afectan la eficiencia del DRA [9]. Sin embargo, el aumento en el número de variables incrementa las dificultades para desarrollar un modelo sólido a partir de datos de prueba que deberían provenir de diferentes ductos y diferentes fluidos.

Para realizar la validación de la capacidad predictiva y analizar su aplicabilidad frente a condiciones específicas de transporte, se evaluará cada una de las correlaciones indicadas en el apartado anterior sobre un fluido de baja densidad, el cual será transportado en dos tramos de poliductos de 14 y 10 pulgadas, sometidos a distintos caudales y dosificaciones de DRA. Posteriormente contrastaremos los resultados obtenidos por los modelos a un caudal determinado con las correlaciones inicialmente obtenidas a partir de una prueba real de operación del sistema de transporte.

III. RESULTADOS

A continuación se muestra la caracterización de los fluidos y del sistema de transporte evaluado:

Características de los fluidos:

- Nombre: Líquidos de Gas Natural (NGL)
- Composición: C2 (1.8%), C3 (48.4%), iC4 (7%), nC4 (13.9%), C5+ (28.9%)
- Densidad promedio: 603 kg/m³ @15°C
- Viscosidad promedio: 0.2 Cp @15°C
- Presión de vapor: 6.5 @37.8°C
- DRA, Refined Power® RP II (LPSI)

Características del poliducto de 14 in (ver Fig. 4):

- Longitud: 107 km
- Espesor de pared: 0.219 in
- Diámetro nominal/interno: 14/13.562 in
- Rugosidad: 0.0026 cm
- Estación de bombeo inicial: E-1, KP 0, 382 msnm
- Estación de bombeo final: E-2, KP 107, 1622 msnm
- Válvulas de línea: 03 (V-1, V-2, V-3)

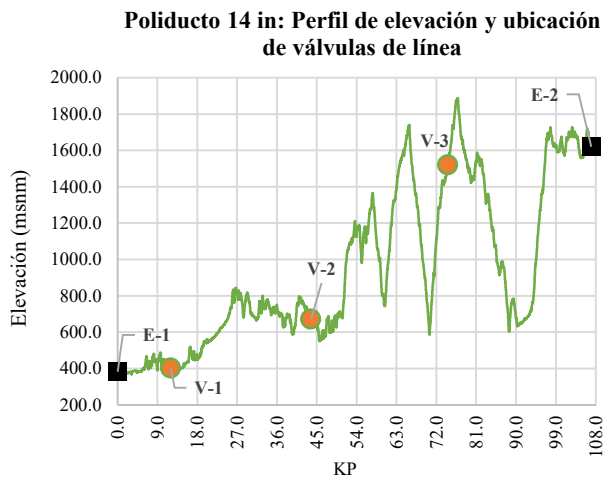


Fig.4: Características del poliducto de 14 pulgadas
Fuente: Elaboración propia

Características del poliducto de 10 in (ver Fig. 5):

- Longitud: 87 km
- Espesor de pared: 0.219 in
- Diámetro nominal/interno: 10.75/10.312 in
- Rugosidad: 0.0015 cm
- Estación inicial: R-1, KP 0, 2087.9 msnm
- Estación final: R-2, KP 87, 16.3 msnm
- Válvulas de línea: 07 (W-1 a W-7)

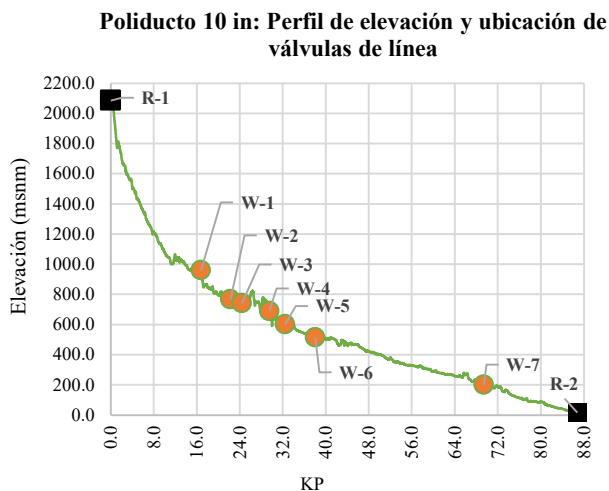


Fig.5: Características del poliducto de 10 pulgadas
Fuente: Elaboración propia

A. Poliducto de 14 in: Modelamiento hidráulico y aplicación de modelos de predicción de reducción de fricción

Con el fin de establecer una línea base para el análisis de aplicación de los modelos de predicción sobre el poliducto de 14 pulgadas, se consideraron datos operativos obtenidos a un caudal de prueba de 106 MBPD (presión en la estación inicial, estación final y válvulas intermedias, etc.), determinándose así las constantes experimentales asociadas a cada correlación. En la Tabla I se visualiza un resumen de los datos operativos, así como de las constantes obtenidas, asimismo, en la Fig. 6 se observa la consistencia de los valores obtenidos con respecto al perfil hidráulico desarrollado. Es importante indicar que este rate de caudal permite someter al aditivo reductor de fricción a mayores esfuerzos cortantes los cuales están asociados a condiciones de alta velocidad del fluido, lo cual nos da las condiciones necesarias para esperar una mayor consistencia en los modelos.

TABLA I
POLIDUCTO 14": CONDICIONES OPERATIVAS - 106 MBPD,
CONSTANTES EXPERIMENTALES OBTENIDAS Y DR

Parámetro	Valores de prueba real
Caudal	106 000 BPD
Presión inicial E-1	113.6 Barg
Presión final E-2	21.1 Barg
Presión en válvulas intermedias	V-1: 110.1 Barg V-2: 88.9 Barg V-3: 34.1 Barg
Temp. promedio	25 °C
Dosis DRA (ppm)	9 ppm

Correlación	Constantes experimentales @ 106 MBPD	DR promedio
Conoco	A = 1.28 B = 2.45	0.64
Burger	k1 = 12 k2 = 21.6	0.64
Aesop	A = 1 B = 4 C = 0.767 λ = 0.001	0.64
Modelo Integral	A = 295 B = 102 C = 1 Cd = 0.001 d0 = 0.7956 p = -0.5 v0 = 13.07 m = 0.5 N = 0.404	0.64

Fuente: Elaboración propia

Pipeline 14in - 106 MBPD - 9ppm

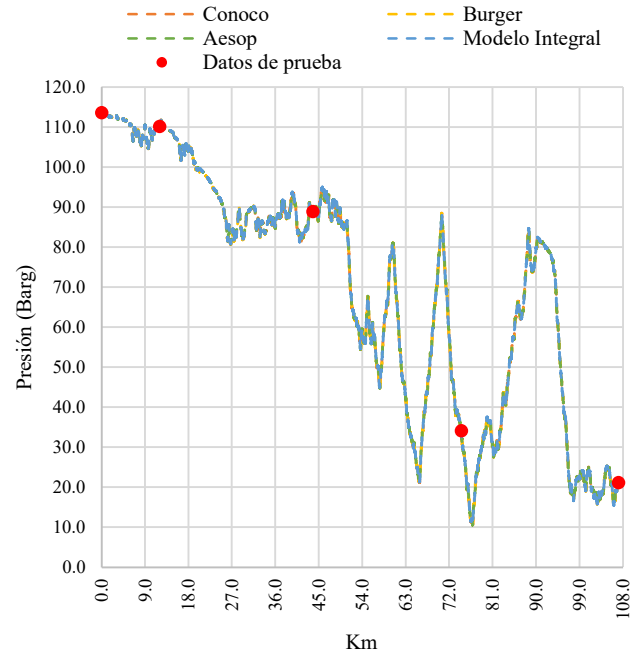


Fig.6: 14in - Consistencia del perfil hidráulico 106 MBPD
Fuente: Elaboración propia

Obtenidas las constantes experimentales se realizó la evaluación hidráulica del poliducto para un caudal de 83 MBPD a fin de determinar los DR en cada modelo, obtener los perfiles hidráulicos, compararlos con los datos de prueba real a 83 MBPD (Tabla II) y finalmente verificar si los modelos poseen consistencia de predictibilidad a este caudal.

TABLA II
POLIDUCTO 14": CONDICIONES OPERATIVAS - 83 MBPD,
CONSTANTES EXPERIMENTALES EMPLEADAS Y DR

Parámetro	Valores de prueba real
Caudal	83 000 BPD
Presión inicial E-1	115.8 Barg
Presión final E-2	21.2 Barg
Presión en válvulas intermedias	V-1: 112.7 Barg V-2: 91 Barg V-3: 35.3 Barg
Temp. promedio	25 °C
Dosis DRA (ppm)	2 ppm

Correlación	Constantes experimentales @ 83 MBPD	DR promedio
Conoco	A = 1.28 B = 2.45	0.40

Burger	k1 = 12 k2 = 21.6	0.52
Aesop	A = 1 B = 4 C = 0.767 $\lambda = 0.001$	0.37
Modulo Integral	A = 295 B = 102 C = 1 Cd = 0.001 d0 = 0.7956 p = -0.5 v0 = 13.07 m = 0.5 N = 0.404	0.31

Fuente: Elaboración propia

La evaluación realizada muestra que los DR calculados, a diferencia de los obtenidos para un caudal de 106 MBPD, presentan diferencias entre todos los modelos, siendo las correlaciones de Conoco y Aesop las que muestran mayor consistencia con respecto a los datos de prueba (DR: 0.4 y 0.37 respectivamente), seguida del Modelo Integral (DR: 0,31) y finalmente la correlación de Burger (DR: 0.52) es la que muestra la menor consistencia (Fig. 7).

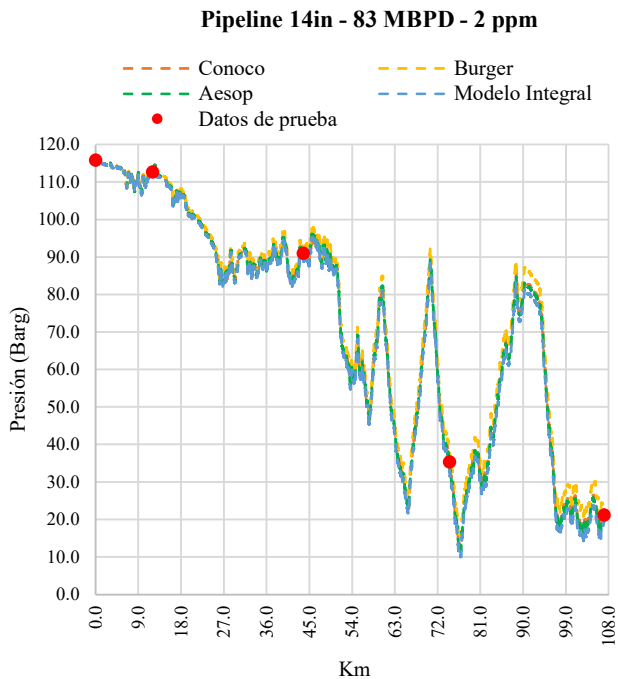


Fig.7: 14in - Consistencia del perfil hidráulico 83 MBPD

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla III se observan las desviaciones de la predictibilidad de los parámetros presión respecto de los valores de prueba a un caudal de 83 MBPD, corroborándose que los

modelos de Conoco y Aesop mantienen la consistencia observada con una desviación menor al 5% (Fig. 8)

TABLA III
COMPARATIVA DEL PERFIL DE PRESIONES POR CORRELACIÓN

Instalación	Datos 83 MBPD	Conoco	Burger	Aesop	Integral
	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)
E-1	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8
V-1	112.7	111.5	111.9	111.4	111.2
V-2	91	89.7	91.3	89.4	88.6
V-3	35.3	34.7	37.5	34.2	32.8
E-2	21.2	22.3	26.3	21.6	19.5

Fuente: Elaboración propia

Desviación de la predictibilidad de los parámetros de presión

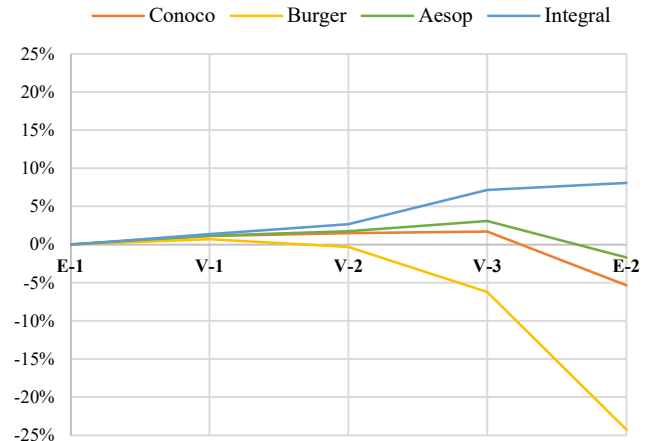


Fig.8: 14in - 83MBPD - Desviación en la predicción de presión

Fuente: Elaboración propia

B. Poliducto de 10 in: Modelamiento hidráulico y aplicación de modelos de predicción de reducción de fricción

Siguiendo la metodología empleada para el ducto de 14", en el poliducto de 10" también se establece una línea base para el análisis de aplicación de los modelos de predicción considerando datos operativos obtenidos a un caudal de prueba de 106 MBPD, determinándose así las constantes experimentales. La Tabla IV muestra un resumen de los datos operativos y constantes obtenidas. La Fig. 9 muestra de manera gráfica la consistencia de los valores obtenidos con respecto al perfil hidráulico desarrollado.

TABLA IV
POLIDUCTO 10": CONDICIONES OPERATIVAS - 106 MBPD,
CONSTANTES EXPERIMENTALES OBTENIDAS Y DR

Parámetro	Valores de prueba real
Caudal	106 000 BPD
Presión inicial R-1	7.1 Barg
Presión final R-2	49.9 Barg
Presión en válvulas intermedias	W-1: 57.1 Barg W-2: 63.5 Barg W-3: 63.1 Barg W-4: 61.8 Barg W-5: 64 Barg W-6: 64.7 Barg W-7: 54.7 Barg
Temp. promedio	25 °C
Dosis DRA (ppm)	7 ppm

Correlación	Constantes experimentales @ 106 MBPD	DR promedio
Conoco	A = 1.25 B = 5.57	0.49
Burger	k1 = 10.84 k2 = 5.2	0.49
Aesop	A = 1 B = 4 C = 0.4565 $\lambda = 0.001$	0.49
Modelo Integral	A = 295 B = 186.7 C = 1 Cd = 0.001 d0 = 0.7956 p = -0.5 v0 = 13.07 m = 0.5 N = 0.404	0.49

Fuente: Elaboración propia

Pipeline 10in - 106MBPD - 7ppm

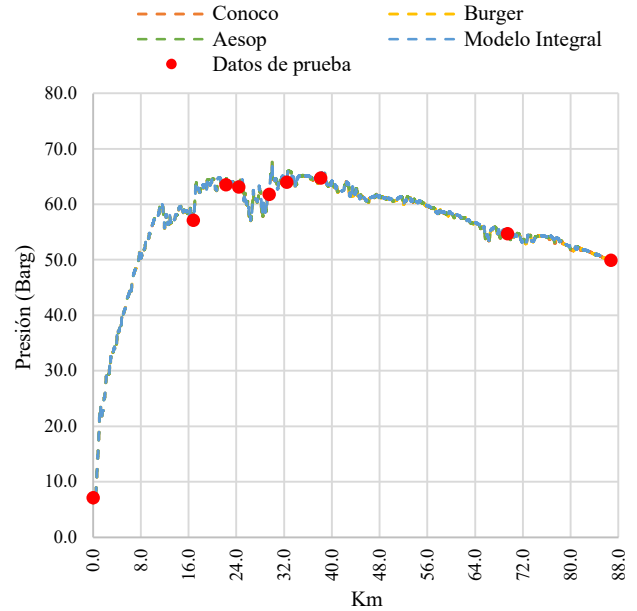


Fig.9: 10in - Consistencia del perfil hidráulico 106 MBPD

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realizó la evaluación hidráulica a un caudal de 85 MBPD a fin de determinar los DR para cada modelo, obtener los perfiles hidráulicos, realizar la comparación con los valores de prueba real (Tabla V) y finalmente verificar si los modelos poseen consistencia en su predictibilidad a este caudal.

TABLA V
POLIDUCTO 14": CONDICIONES OPERATIVAS - 85 MBPD,
CONSTANTES EXPERIMENTALES EMPLEADAS Y DR

Parámetro	Valores de prueba real
Caudal	85 000 BPD
Presión inicial R-1	6.9 Barg
Presión final R-2	33.4 Barg
Presión en válvulas intermedias	W-1: 54.3 Barg W-2: 59.8 Barg W-3: 58.9 Barg W-4: 56.4 Barg W-5: 58.4 Barg W-6: 57.5 Barg W-7: 41.9 Barg
Temp. promedio	25 °C
Dosis DRA (ppm)	2 ppm

Correlación	Constantes experimentales @ 85 MBPD	DR promedio
Conoco	A = 1.28 B = 2.45	0.25

Burger	$k1 = 12$ $k2 = 21.6$	0.40
Aesop	$A = 1$ $B = 4$ $C = 0.767$ $\lambda = 0.001$	0.30
Modelo Integral	$A = 295$ $B = 102$ $C = 1$ $Cd = 0.001$ $d0 = 0.7956$ $p = -0.5$ $v0 = 13.07$ $m = 0.5$ $N = 0.404$	0.30

Fuente: Elaboración propia

La evaluación realizada muestra que los DR calculados, a diferencia de los obtenidos para un caudal de 106 MBPD, presentan mayores diferencias entre todos los modelos comparado con lo obtenido para el poliducto de 14", siendo la correlaciones de Conoco la que, a pesar de tener desviaciones importantes respecto de los datos de prueba, posee la menor desviación con respecto a los otros modelos (Fig. 10).

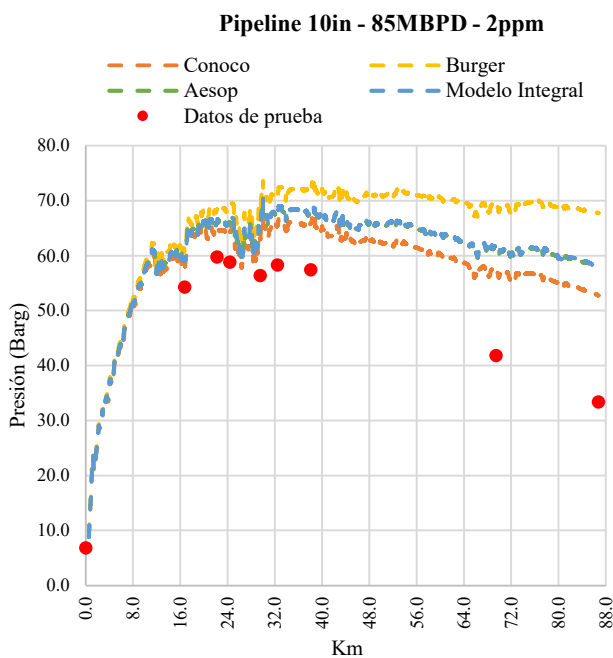


Fig.10: 10in - Consistencia del perfil hidráulico 85 MBPD
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla VI se observan las desviaciones de la predictibilidad de los parámetros presión respecto de los valores de prueba a un caudal de 85 MBPD, corroborándose que, en este caso ninguno de los modelos mantiene una consistencia moderada y por lo tanto desviaciones poco aceptables. (Fig. 11)

TABLA VI
COMPARATIVA DEL PERFIL DE PRESIONES POR
CORRELACIÓN

Instalación	Datos 85 MBPD	Conoco	Burger	Aesop	Integral
	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)	Presión (Barg)
R-1	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
W-1	54.3	58.0	60.9	59.1	59.1
W-2	59.8	64.7	68.5	66.1	66.2
W-3	58.9	64.3	68.5	65.8	65.9
W-4	56.4	63.0	68.0	64.8	64.9
W-5	58.4	65.6	71.1	67.6	67.7
W-6	57.5	65.9	72.4	68.3	68.4
W-7	41.9	57.3	69.2	61.5	61.6
R-2	33.4	52.8	67.8	58.0	58.2

Fuente: Elaboración propia

Desviación de la predictibilidad de los parámetros de presión

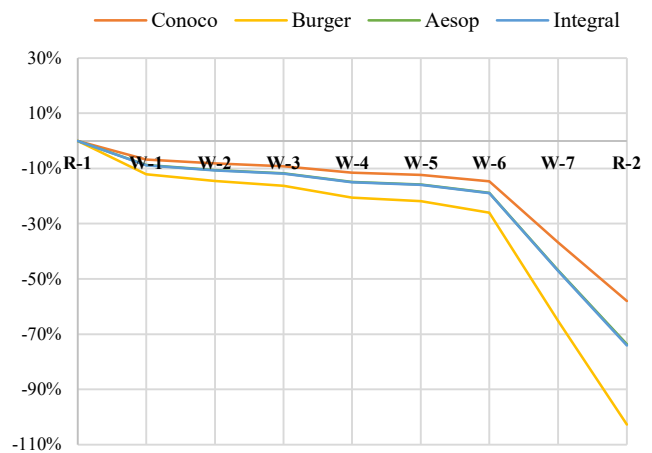


Fig.11: 10in - 85MBPD - Desviación en la predicción de presión
Fuente: Elaboración propia

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La presente investigación realiza un enfoque sistemático y minucioso hacia la comprensión y modelización de la reducción de fricción en poliductos mediante el uso de Agentes Reductores de Fricción (DRA). La selección de modelos de predicción ampliamente reconocidos en la industria, como las correlaciones de Conoco, Burger, Aesop, y el modelo integral propuesto por Zeng et al., refleja un esfuerzo por abordar la complejidad en la predicción del comportamiento de los DRA bajo diversas condiciones de flujo y composiciones de fluidos.

Como resultado de la aplicación de estas correlaciones se demuestra cómo las variaciones en el diámetro de la tubería y

REFERENCIAS

las condiciones operativas, como el caudal y la dosificación de DRA, influyen significativamente en la predictibilidad de los modelos de reducción de fricción. Para el poliducto de 14 pulgadas, la evaluación a diferentes caudales mostró una variabilidad en la predictibilidad de los modelos, no obstante, las correlaciones de Conoco y Aesop mostraron mayor consistencia en comparación con los valores de prueba reales. Este hallazgo resalta la importancia de seleccionar el modelo adecuado en función de las condiciones específicas del poliducto y sugiere que los modelos mencionados podrían ser más fiables para poliductos de dimensiones similares.

En contraste con lo anterior, la evaluación del poliducto de 10 pulgadas reveló desafíos adicionales asociados con la predictibilidad de los modelos para diámetros más reducidos. Las desviaciones en la predicción fueron significativas, indicando que ninguno de los modelos logró mantener una consistencia moderada ni una desviación aceptable con respecto a los valores de prueba reales a un caudal de 85 MBPD. Este resultado sugiere que el efecto del esfuerzo cortante, potencialmente influenciado por la mayor velocidad del fluido en el poliducto de menor diámetro, podría estar influyendo negativamente en la capacidad de los modelos para predecir con precisión la eficacia de los DRA.

La variabilidad en la predictibilidad y las desviaciones observadas en las predicciones de presión para el poliducto de 10 pulgadas resaltan la necesidad de realizar ajustes en los modelos existentes o desarrollar nuevos modelos que puedan adaptarse mejor a las condiciones específicas de tuberías de diferentes diámetros. Además, la posible influencia del esfuerzo cortante en la eficacia de los DRA dentro del poliducto de 10 pulgadas sugiere que podrían ser necesarias una mayor cantidad de pruebas de campo para obtener constantes de correlación más precisas y asertivas, que consideren con mayor detalle el efecto de degradación del DRA, puesto que, aunque se pueden notar algunos patrones generales, el comportamiento de los DRA bajo diferentes condiciones es tan diverso que aún es sigue siendo un caso de estudio el diseño de un único modelo que describa su comportamiento en todos los casos.

Asimismo, se evidencia una oportunidad significativa para investigaciones futuras en el ámbito de estudio de los reductores de fricción integrando un entendimiento más profundo de la fisicoquímica de los polímeros, la reología y la hidráulica de fluidos en los modelos de predicción enfocado en el desarrollo de futuros modelos robustos y versátiles. Estos modelos deberán ser capaces de adaptarse a una amplia gama de condiciones operativas, reflejando con mayor precisión el comportamiento real de los Agentes Reductores de Fricción.

AGRADECIMIENTOS

El autor del presente trabajo agradece a la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica por las facilidades técnicas para el desarrollo de la presente publicación.

- [1] Indecopi, "Informe de Lanzamiento del Estudio de Mercado sobre Combustibles Líquidos y Gas Licuado de Petróleo en el Perú," Dic. 2022.
- [2] Y. Gu, S. Yu, J. Mou, D. Wu, and S. Zheng, "Research progress on the collaborative drag reduction effect of polymers and surfactants," *Materials*, vol. 13, no. 2, art. no. 444, 2020, doi: 10.3390/ma13020444.
- [3] B. Ma, "DRA Performance Predictions, Steady-State to Pseudo Steady-State Behaviors," *Onepetro.org, OnePetro*, May 10, 2022, onepetro.org/PSIGAM/proceedings-abstract/PSIG22/All-PSIG22/PSIG-2208/485468.
- [4] M. A. Jalal, M. N. Khalaf, and M. A. Hussein, "Effect of variation in polymer structure on eddies suppression of basrah light crude oil turbulent flow," *Egypt. J. Chem.*, vol. 64, no. 7, pp. 3365–3378, 2021, doi: 10.21608/EJCHEM.2021.61114.3317.
- [5] R. Zabihi, D. Mowla, and H. R. Karami, "Artificial intelligence approach to predict drag reduction in crude oil pipelines," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 178, pp. 586–593, 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2019.03.042.
- [6] B. A. Toms, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers," *Proc. In. Cong. Rheol.*, vol. 2, pp. 135–141, 1948.
- [7] P. S. Virk, "Drag reduction fundamentals," *AIChE J.*, vol. 21, no. 4, pp. 625–656, 1975, doi: 10.1002/aic.690210402.
- [8] E. D. Burger, W. R. Munk, and H. A. Wahl, "Flow increases in the Trans Alaska pipeline through use of a polymeric drag-reducing additive," *J. Pet. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 377–386, 1982, doi: 10.2118/9419-PA.
- [9] W. Zeng et al., "A Comprehensive Model for Predicting Efficiency of DRA in Liquid Pipelines," *Onepetro.org, OnePetro*, May 15, 2018, onepetro.org/PSIGAM/proceedings-abstract/PSIG18/All-PSIG18/PSIG-1801/2083.
- [10] S. Strelnikova and T. Yushchenko, "Adaptation of Fluid Motion Mathematical Model in Pipelines Using Drag Reducing Agents," *Onepetro.org, OnePetro*, May 14, 2019, onepetro.org/PSIGAM/proceedings-abstract/PSIG19/All-PSIG19/PSIG-1906/2106.
- [11] M. Mohitpour et al., *Hydrocarbon Liquid Transmission Pipeline and Storage Systems: Design and Operation*, ASME Press, New York, NY, 2012, pp. 587–596.
- [12] F. DSouas and A. S. E. Meddour, "Drag Reduction in Single-Phase Crude Oil Flow: A Mini-Review," *J. Pipeline Sci. Eng.*, vol. 2, no. 4, Dec. 2022, p. 100088, <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100088>.
- [13] A. Abubakar, T. Al-Wahaibi, Y. Al-Wahaibi, A. R. Al-Hashmi, and A. Al-Ajmi, "Roles of drag reducing polymers in single-and multiphase flows," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 11, pp. 2153–2181, 2014, doi: 10.1016/j.cherd.2014.02.031.
- [14] L. Mucharam, S. Rahmawati, and R. Ramadhani, "Drag reducer selection for oil pipeline-based laboratory experiment," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 112–121, 2017, doi: 10.5539/mas.v12n1p112.
- [15] H. A. Abdulbari, A. Shabirin, H. Abdurrahman, "Bio-polymers for improving liquid flow in pipelines —a review and future work opportunities," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 4, pp. 1157–1170, 2014, doi: 10.1016/j.jiec.2013.07.050.
- [16] M. A. Asidin, E. Suali, T. Jusnuhin, and F. A. Lahin, "Review on the applications and developments of drag reducing polymer in turbulent pipe flow," *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 8, pp. 1921–1932, 2019, doi: 10.1016/j.cjche.2019.03.003.