آزمایش عدد رینولدز[1]

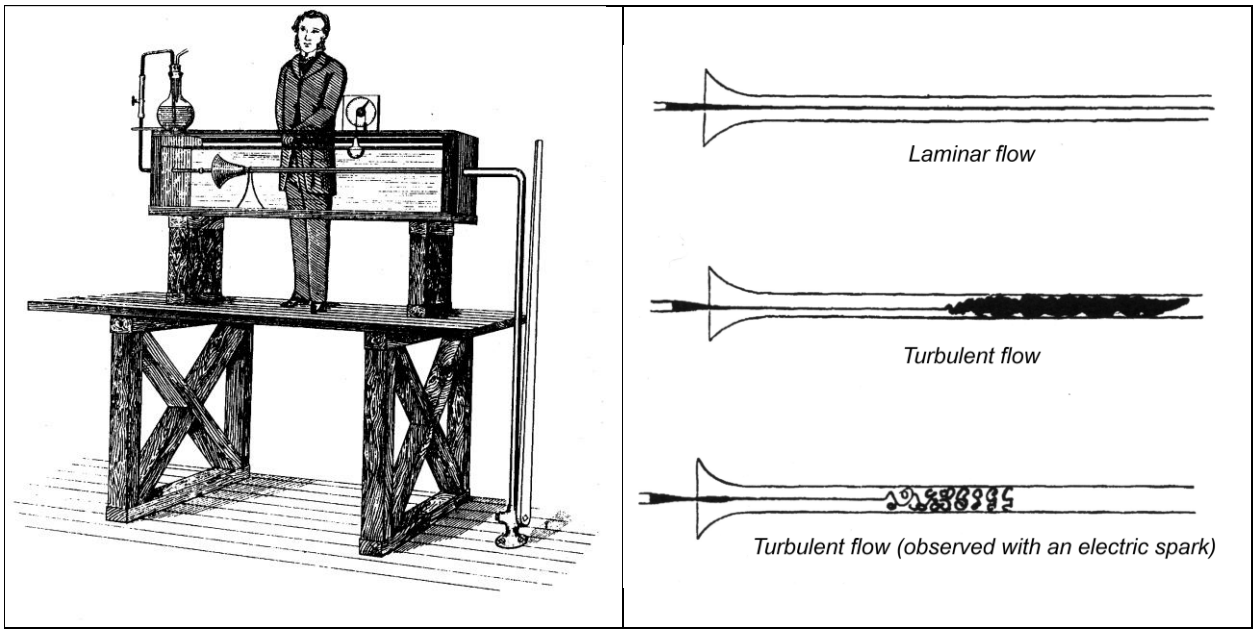
تهیه و تنظیم : پارسا امینی

هدف آزمایش

هدف از انجام این آزمایش مشاهده رژیم های جریانی آرام، گذرا (آشفته متناوب) و آشفته کامل برای جریان آب درون یک لوله، و یافتن شرایطی که این رژیم ها در آن اتفاق می افتند، با به کار گیری تکنیک تزریق رنگ می باشد.

مقدمه

در سال ۱۸۸۳، رینولدز دانشمند ایرلندی، عددی بی‌بعد را معرفی کرد که می‌توانست الگوی جریان را معلوم کند. او متوجه شد که این عدد به خواص استاتیکی و دینامیکی سیال، هم‌چون سرعت، چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و ... وابسته است. بنابراین آزمایشاتی را به‌منظور فهمیدن دقیق این رابطه انجام داد. برای این منظور سیستمی را مطابق با شکل زیر طراحی کرد. این سیستم به این صورت بود که لوله‌ای نازک که حاوی سیالی رنگی بود در یک لوله اصلی محتوی آب، قرار داده شد. سپس سیال رنگی درون آب به جریان در می‌آمد. بنابراین امکان دیدن حرکت سیال فرآهم می‌شد. با توجه به آزمایش انجام شده، او توانست عددی بی‌بعد را تعریف کند که الگوی جریان وابسته به آن است[1].



شکل ۱. دستگاه ابداع شده توسط رینولدز و جریان های آرام و آشفته در این دستگاه [2]

[1] Reynolds

تئوری آزمایش

عدد رینولدز نشان دهنده نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز است که به دلیل حرکت سیال به وجود می‌آیند. از آنجایی که آشفته و یا لایه‌ای بودن جریان وابسته به این نیروها است، از این رو با استفاده از عدد رینولدز می‌توان رژیم (لایه‌ای یا آشفته بودن) یک جریان را تعیین کرد. اگر در یک سیال در حال حرکت، نیروهای اینرسی غالب باشند، به احتمال زیاد جریان مد نظر آشفتگی است. عکس این مورد، اگر نیروهای لزجت در یک سیال غالب باشند، سیال به صورت لایه‌ای حرکت می‌کند. با توجه به مفاهیم عنوان شده در بالا عدد رینولدز (Re) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\text{عدد رینولدز} = \frac{\text{نیروهای اینرسی}}{\text{نیروهای ویسکوز}} \qquad (۱)$$

با استفاده از این عدد می‌توان تعیین کرد که جریان با توجه به چه الگویی حرکت می‌کند. از آنجایی که این عدد نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای برشی را نشان می‌دهند، بنابراین می‌توان گفت:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{VL}{\upsilon} \qquad (۲)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{F_{inertia}}{F_{viscous}} = \frac{\frac{kg}{m^3} \times \frac{m}{s} \times m}{Pa \times s} = \frac{F}{F} \qquad (۳)$$

عبارت‌های استفاده شده در بالا به ترتیب زیر هستند:

- ρ (kg/m3) چگالی سیال
- V (m/s) سرعت سیال
- L (m) طول مشخصه سیال
- ν (m2/s) ویسکوزیته سینماتیکی سیال

در حالت کلی رژیم جریان به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود: «لایه‌ای[۲] » و «آشفته[۳]». البته اگر درست‌تر بیان شود، حالت سومی نیز وجود دارد که به آن گذرا[۴] گفته می‌شود. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که بخشی از جریان به صورت لایه‌ای و بخشی دیگر به صورت آشفته است. رینولدز بحرانی عددی است که در آن جریانِ سیال شروع به آشفته شدن می‌کند. این مقدار در حالت‌های مختلفِ جریان، متفاوت است.

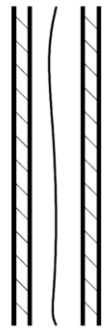
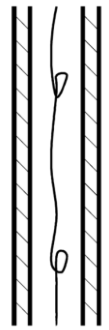
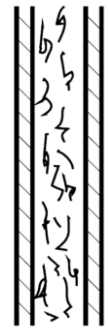
[۲] Laminar

[۳] Turbulence

[۴] Transition

- **جریان داخلی**

به جریانی که درون لوله حرکت می‌کند، جریان داخلی می‌گویند. رینولدزهای بحرانی برای چنین جریانی در شکل ۲ بیان شده‌اند.

		
$Re_{lam.} \leq 2000$	$Re_{cr.} \approx 2000$	$Re_{turb.} \geq 2800$

شکل ۲. شکل جریان در سه محدوده مختلف عدد رینولدز

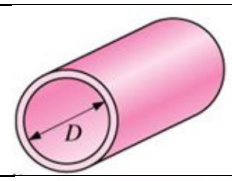
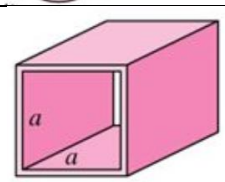
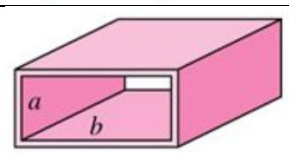
در حالتی که جریانی در یک کانال بسته و یا در لوله حرکت می‌کند، عدد رینولدز وابسته به قطر هیدرولیکی لوله (D_H) و طول آن (L) است. هم‌چنین در حالتی که لوله به صورت استوانه‌ای باشد، قطر هیدرولیکی آن در واقع همان قطر لوله است. بنابراین در این حالت عدد رینولدز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Re} = \frac{F_{inertia}}{F_{viscous}} = \frac{\rho V D_H}{\mu} \qquad (۴)$$

در حالتی که مقطع لوله به صورت دایره‌ای نباشد، می‌توان با استفاده از رابطه زیر قطر هیدرولیکی لوله را محاسبه کرد:

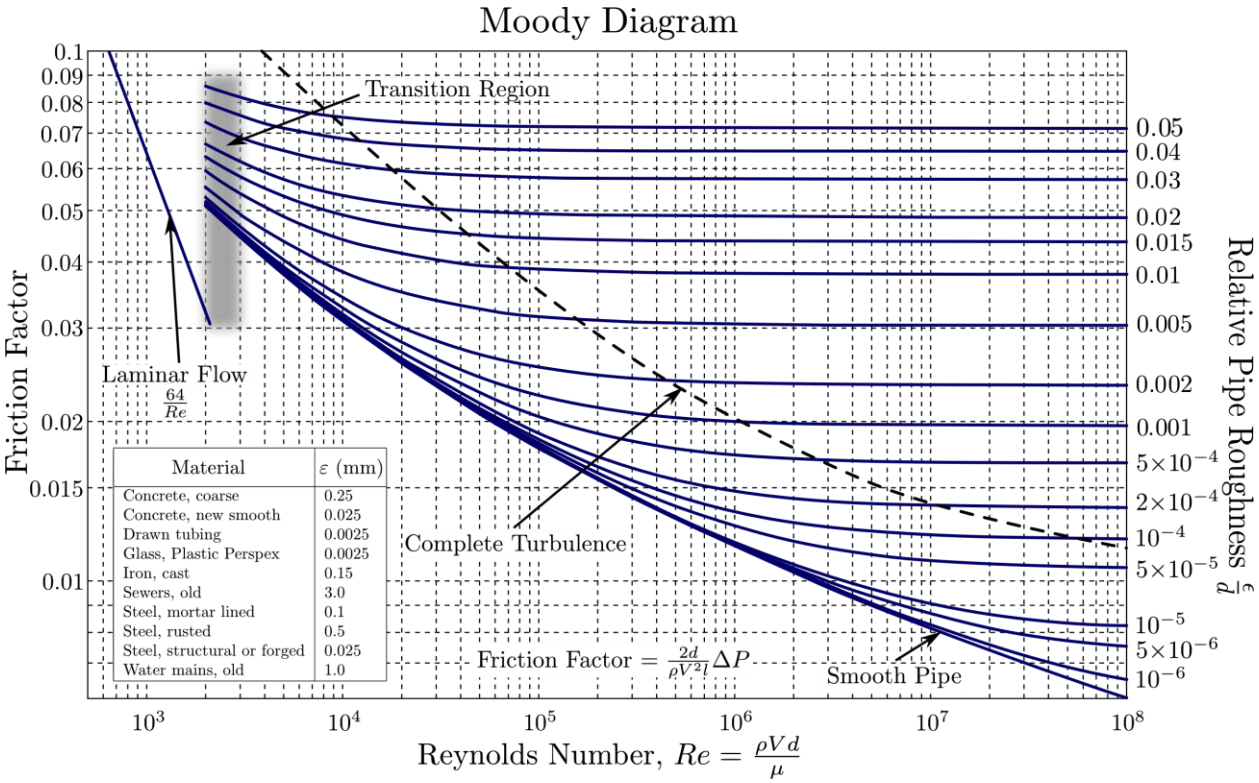
$$D_H = \frac{4A}{P} \qquad (۵)$$

در معادله بالا A برابر با مساحت سطح مقطع لوله و P محیط تر شده است. در شکل‌های زیر قطر هیدرولیکی برای چند مقطع مختلف آورده شده‌اند.

$D_H = \dfrac{4(\pi \frac{D^2}{4})}{\pi D} = D$	
$D_H = \dfrac{4a^2}{4a} = a$	
$D_H = \dfrac{4ab}{2(a+b)} = \dfrac{2ab}{a+b}$	

شکل ۳. قطر هیدرولیکی برای سه شکل هندسی

از دیگر عواملی که در آشفته شدن جریان درون لوله موثر است، میزان اصطکاک سطح لوله با جریان خواهد بود. «نمودار مودی[۵]» میزان آشفتگی جریان را بر حسب عدد رینولدز و زبری سطحِ لوله، نشان می‌دهد. این نمودار روشی عملی به منظور محاسبه افت فشارِ جریان سیالی است که درون لوله حرکت می‌کند. اگر توجه داشته باشید در نمودار زیر ناحیه‌های آشفته و لایه‌ای بر حسب ضریب اصطکاک و رینولدز جریان نشان داده شده‌اند.



Material	ε (mm)
Concrete, coarse	0.25
Concrete, new smooth	0.025
Drawn tubing	0.0025
Glass, Plastic Perspex	0.0025
Iron, cast	0.15
Sewers, old	3.0
Steel, mortar lined	0.1
Steel, rusted	0.5
Steel, structural or forged	0.025
Water mains, old	1.0

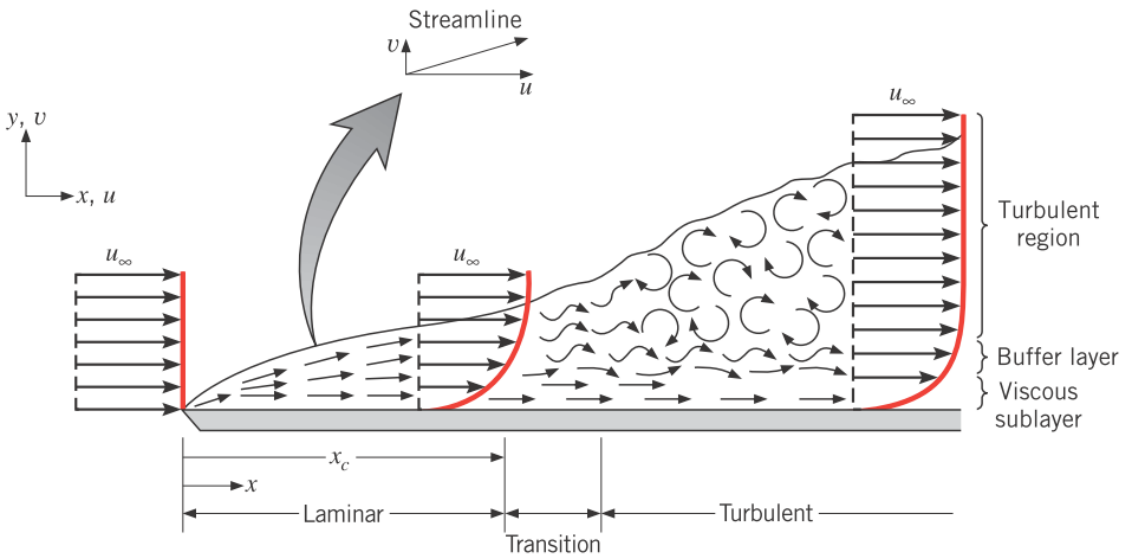
شکل ۴. دیاگرام مودی [3]

- **جریان خارجی**

به جریانی که روی اجسام به حرکت در می‌آید، جریان خارجی گفته می‌شود. برای نمونه جریان روی یک صفحه تخت، جریان روی کره یا سیلندر همگی از نوع جریان‌های خارجی هستند. در سال ۱۹۱۴ «لودویگ پرانتل[۶]» ، دانشمند آلمانی مفهوم لایه‌مرزی را ارائه کرد. او دریافت که لایه‌مرزی به رینولدز و شکل سطح وابسته است. در شکل زیر جریانی را روی سطحی تخت نشان می‌دهد. در نقطه x_c جریان شروع به آشفته شدن می‌کند.

[۵] Moody Chart

[۶] Ludwig Prandtl

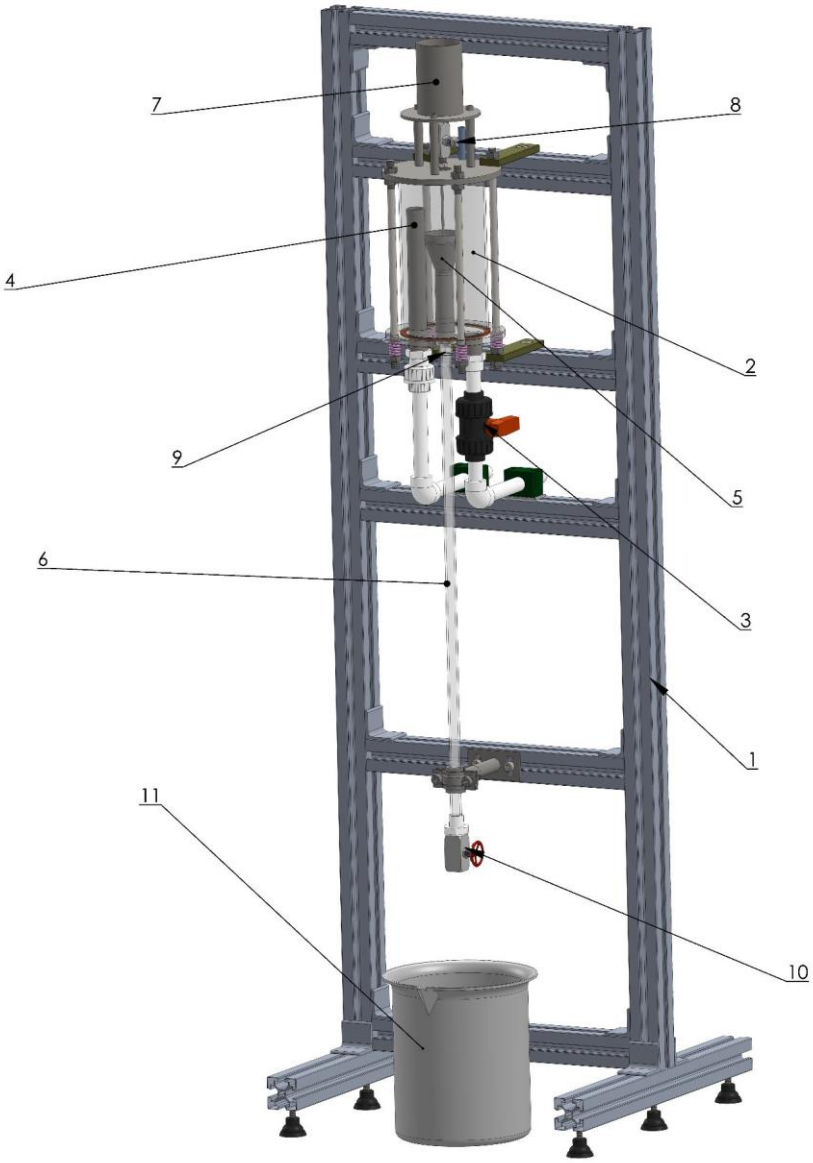


شکل ۵. رژیم جریان بر روی یک صفحه تخت[4]

در حالت کلی با حرکت جریان رو به جلو، سیال منبسط و البته ناپایدارتر می‌شود. این ناپایداری منجر به افزایش رینولدز شده و نهایتا آشفته شدن جریان را در پی دارد. رینولدز بحرانی برای جریان روی سطح باید بیشتر از مقدار زیر باشد.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V x}{\mu} \geq 3\times10^5 \ \ to \ \ 3\times10^6 \qquad (۶)$$

شکل دستگاه



شکل ۶. اجزای دستگاه آزمایش رینولدز

۱- چهارچوب آلومینیومی
۲- تانک ذخیر آب
۳- ورودی آب تانک
۴- قسمت سرریز
۵- ناحیه ورودی قیف مانند
۶- لوله آزمایش از جنس شیشه پلکسی
۷- مخزن جوهر
۸-شیر تنظیم دبی جوهر
۹- نازل تزریق جوهر
۱۰- شیر آب‌کشی
۱۱- ظرف مدرج

شرح دستگاه

این دستگاه به منظور بررسی و نمایش آزمایش های آزبرن رینولدز و برای جریان عمودی یک مایع از درون لوله ی شیشه ای دقیقی طراحی شده است. از قابلیت های این دستگاه نمایش جریان های آرام و آشفته است. جریان آب همراه با جوهر به کمک لوله ای شفاف قابل رؤیت شده است. عمودی بودن لوله، تأثیر هر گونه اختلاف اندک بین دانسیته های رنگ و سیال محیط را جبران می کند. در لوله افقی وجود بین دانسیته ها سبب بروز انحرافات عمودی در مسیر جوهر می شود.

سیال وارد مخزنی استوانه ای با هد ثابت میشود و از میان بستری از ذرات عبور کرده تا از هرگونه تغییرات نامطلوب سرعت سیال درون تانک جلوگیری شود. در نتیجه این مخزن شرایطی یکنواخت، با هد سرعت پایین، در بالادست جریان ورودی به لوله آزمایش فراهم می آورد. سپس سیال با عبور از دهانه ی ایمن ورودی (به منظور شتابدار شدن یکنواخت سیال بدون به وجود آمدن هیچگونه اثرات نامربوط اینرسی) وارد لوله شفاف میشود. محلول جوهر، از طریق لوله ی استیل باریکی به ناحیه آزمایش راه می یابد، و دبی جریان جوهر به وسیله ی شیر مربوطه در خروجی مخزن آن، کنترل میشود.

روش انجام آزمایش

- دستگاه را در محلی مناسب و نزدیک به ورودی آب شهر و خروجی فاضلاب، قرار دهید.
- شلنگ آب شهر را به شیر ورودی تانک آب (۵) متصل کنید.
- مسیر خروجی سرریز(۴) را به کمک شلنگ به خروجی فاضلاب متصل کنید.
- مخزن جوهر(۷) را از ماده رنگی پر کنید. شیر زیر این مخزن(۰) باید بسته باشد.
- شیر خروجی آب از لوله آزمایش ۱۰ را ببندید.
- جریان آب ورودی به مخزن ذخیره آب را بر قرار کنید.
- شیر ورودی مخزن آب ۳ را به میزانی باز کنید که سطح آب درون مخزن ثابت شود و اطمینان حاصل کنیدکه آب با دبی کمی از سرریز تانک خارج شود.
- اجازه دهید تا جریان آب برای ۳ دقیقه در سیستم بماند.
- شیر خروجی آب از لوله آزمایش را اندکی باز کنید وشیر زیر مخزن جوهر را به گونه ای تنظیم کنید تا دبی اندکی از آب به همراه جوهر درون لوله آزمایش حاصل شود.
- با تنظیم شیر خروجی لوله، شرایط جریان آرام و ناحیه جریان گذرا را مشاهده کنید.
- به کمک زمانسنج و ظرف مدرجی دبی های خروجی را ثبت کنید.
- فرآیند فوق را برای دبی های بالاتر تکرار کنید.

نتایج و محاسبات

۱- برای هر یک از داده های آزمایش با توجه به دبی حجمی اندازه گیری شده مقدار عدد رینولدز را محاسبه کرده و درباره درستی قضاوتی که از روی الگوی حرکت جوهر در ستون آب درباره رژیم جریان داشتید، تحقیق نمایید.

۲- رینولدز بحرانی را تعریف کنید. مقدار عدد رینولدز بحرانی را با توجه به داده ای خود برای حالتی که از جریان آرام به آشفته و از جریان آشفته به آرام می رویم محاسبه کنید. چرا این دو مقدار با یکدیگر تفاوت دارند؟

۳- معادله دیفرانسیل تغییرات سرعت در لوله را برای جریان آرام از راه نوشتن موازنه نرخ تکانه برای یک المان دیفرانسیلی در لوله به دست آورید و با حل آن با توجه به شرایط مرزی توزیع سرعت سهموی سیال برای جریان آرام در لوله دایره ای را به دست آورید.

۴- توزیع سرعت در لوله، برای جریان های آرام و آشفته را به صورت کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.

۵- درباره خطاهای این آزمایش و تاثیر آنها بر داده های دریافتی بحث کنید.

منابع

[1] Mattioli, F., 2008. *Elements Of Fluid Dynamics*. [ebook] Franco Mattioli, pp.95-102. Available at: <http://www.fluiddynamics.it/ELEMENTS.HTM> [Accessed 29 July 2020].

[2] Osborne Reynolds. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. [image on Internet]. 1883 [updated 1883 Mar 15; cited 2020 Jul 28]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reynolds_fluid_turbulence_experiment_1883.jpg#mw-jump-to-license

[3] S Beck and R Collins. Moody Diagram. [image on Internet]. 2016 [updated 2016 Mar 15; cited 2020 Jul 28]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moody_EN.svg

[4] Incropera, Frank P., and David P. DeWitt. 2002. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley.