



بسم الله الرحمن الرحيم



تصميم ومحاكاة منظومة لأسالة غاز الاوكسجين باستخدام برنامج (UNISIM)

Design and Simulation of an Oxygen Gas Liquefaction
System Using (UNISIM) Software

بحث تكميلي لنيل درجة البكالوريوس مرتبة الشرف في
الهندسة الميكانيكية

إعداد:

عبد الرحمن أنور بشير دسار

عبد الله الزاكي علي احمد

مصعب يوسف محمد عبد الله

إشراف:

أ/ عبد السلام عوض الله علي

كلية الهندسة

جامعة الشيخ عبد الله البدري

ابريل - 2026

الإستعمال

قال تعالى:

((لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا ۚ لَهَا مَا كَسَبَتْ وَعَلَيْهَا مَا اكْتَسَبَتْ ۗ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ

نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا ۗ رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إَصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا ۗ رَبَّنَا وَلَا

تَحْمِلْنَا مَا لَا طَاقَةَ لَنَا بِهِ ۗ وَاعْفُ عَنَّا وَارْحَمْنَا ۗ أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ

الكَافِرِينَ))

صدق الله العظيم

الإهداء

أهدي هذا البحث إلى من قال الحق فيهما:

((وَأَخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا

كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا))

صدق الله العظيم

الشكر والتقدير

الشُّكْرُ هو عبادةُ الأنبياءِ والأصفياءِ من كلِّ جيلٍ.. ولذلك فإنَّ المُتَّصِفِينَ بها
والعاملينَ لها في كلِّ زمنٍ قليلٌ.....

الحمدُ لله الذي خلقَ السمواتِ والأرضَ وجعلَ الظلماتِ والنورَ، الحمدُ لله كما ينبغي
لجلالِ وجهه، وعظيمِ سلطانِه، الحمدُ لله حمدُ الشاكرينَ، والشُّكْرُ له شكرُ
الحامدينَ، اللهم لك الحمدُ حتى تَرْضَى، ولك الحمدُ إذا رَضِيتَ، ولك الحمدُ بعد
الرِّضَى نحمد الله عز وجل الذي وفقنا الي إتمام هذا البحث العلمي.

من لا يشكر الناس لا يشكر الله:

نُقدم جزيل الشُّكر والتقدير إلى الأستاذ المشرف / عبد السلام عوض الله علي

على كُلِّ ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات قيمة ساهمت في إثراء موضوع
دراستنا في جوانبها المختلفة.

كما نَتَقَدِّم بجزيل الشكر إلى أساتذة كلية الهندسة جامعة الشيخ عبدالله البدري.

كذلك الشُّكر موصول للذين ساهموا معنا في إخراج هذا الجُهد المتواضع بفعل أو
قول أو أسرونا في دعواتهم في ظهر الغيب، وإلى أسْرنا التي جاهدت وتكبدت
المشاق في سبيل وصولنا لما أعاننا الله للوصول إليه ونسأل الله أن يُعيننا على رد
إحسانهم بأحسن مما قدموا لنا وجَزاَهم الله عنا خَير الجزاء.

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى تصميم ومحاكاة نظام لإسالة الاوكسجين من الهواء الجوي باستخدام برنامج UniSim Design Suite. تبرز أهمية البحث في الحاجة إلى تحسين كفاءة إنتاج الأكسجين السائل الحيوي للقطاعات الصناعية والطبية، وتقليل التكاليف المرتفعة للتصميم التقليدي. تم بناء نموذج محاكاة متكامل لخط الإنتاج يشمل ضواغط، مبادلات حرارية، صمام جول-طومسون، ووحدة الفصل، بالاعتماد على معادلة الحالة بينغ-روبينسون لمحاكاة سلوك الغازات بدقة. أظهرت النتائج قدرة النموذج على إنتاج أكسجين سائل عالي النقاء من خلال عمليات الضغط متعدد المراحل، التبريد، والتمدد المفاجئ. يقدم البحث نموذجاً رقمياً فعالاً يمكن استخدامه كمنصة اختبار آمنة ومرنة لتحسين تصميم وحدات إنتاج الأكسجين السائل، مما يسهم في خفض التكاليف وتطوير هذا القطاع الحيوي.

Abstract

This research aims to design and simulate a liquid oxygen (LOX) production line using UniSim Design Suite software. The importance of this study stems from the need to improve the production efficiency of liquid oxygen, which is vital for industrial and medical sectors, while reducing the high costs associated with traditional design methods. An integrated simulation model of the production line was developed, including compressors, heat exchangers, a Joule-Thomson valve, and a separator, relying on the Peng-Robinson equation of state to accurately simulate gas behavior. The results demonstrated the model's capability to produce high-purity liquid oxygen through multi-stage compression, cooling, and sudden expansion processes. This research presents an effective numerical model that can be used as a safe and flexible testing platform to optimize the design of liquid oxygen production units, contributing to cost reduction and the advancement of this vital industry.

فهرست المحتويات (Table of Contents)

I	المستخلص (ABSTRACT)
III	فهرست المحتويات (TABLE OF CONTENTS)
IV	قائمة الاشكال (LIST OF FIGURES)

الفصل الأول

1	المقدمة (INTRODUCTION)	1-1
1	مشكلة البحث (PROBLEM STATEMENT)	2-1
1	اهداف المشروع (OBJECTIVE OF THE PROJECT)	3-1
2	المنهجية (METHODOLOGY)	4-1
3	مفاهيم أساسية (BASIC CONCEPTS)	5-1
4	خصائص الغازات الأساسية (FUNDAMENTAL PROPERTIES OF GAS)	6-1
5	الأكسجين (OXYGEN)	7-1
5	خصائصه الأساسية (Fundamental Properties)	1-7-1
5	نبذة تاريخية عن الأكسجين (Historical Background of Oxygen)	1-7-2
19	الأكسجين السائل (Liquefied Oxygen)	1-7-3
23	اعتبارات السلامة (Safety Considerations)	4-7-1
24	دراسات سابقة (PREVIOUS STUDIES)	8-1

الفصل الثاني

27	مقدمة (INTRODUCTION)	1-2
27	وصف حركة الموائع (DESCRIPTION OF FLUID MOTION)	2-2
27	أنواع جريان المائع (TYPES OF FLUID FLOW)	2-3
29	معادلات نافير-ستوكس (Navier-Stokes Equation)	2-4
30	نطاق السائل (FLUID DOMAIN)	2-5
31	قانون الغاز المثالي (IDEAL GAS LAW)	6-2
31	القانون الأول للديناميكا الحرارية (FIRST LAW OF THERMODYNAMICS)	7-2
32	القانون الثاني للديناميكا الحرارية (SECOND LAW OF THERMODYNAMICS)	8-2
34	معادلات بنق-روبينسون (PENG ROBINSON EQUATION)	9-2
35	معادلات جول-ثومسون (JOULE-THOMSON EQUATION)	2-10

الفصل الثالث

37	مقدمه عن برنامج (UNISIM)	1-3
38	النمذجة (MODELING)	2-3
38	معادلات (Peng-Robinson Equation)	1-2-3
39	مكونات عملية الإزالة (Liquefaction Process Components)	2-2-3
41	المحاكاة (SIMULATION)	3-3
41	الضغط (Compression)	1-3-3
46	التسييل (Liquefaction)	2-3-3
51	الفصل (Separation)	3-3-3

الفصل الرابع

55	1-4 الخلاصة (CONCLUSION)
57	2-4 التوصيات (RECOMMENDATIONS)
58	المراجع (REFERENCES)

قائمة الاشكال (List of Figures)

4	(1.1) معادلة الغاز المثالي
6	(2-1) جهاز اسالة الاوكسجين قديماً
7	(3-1) راؤول بكتيه
8	(4-1) لويس بول كايتيه وجهازه لتسييل الاوكسجين
9	(5-1) كارل فون ليندة
9	(6-1) دورة تبريد ليندة
11	(7-1) منظومة اسالة الاوكسجين
12	(8-1) عملية فصل الهواء المبرد
14	(9-1) ضاغط الهواء
15	(10-1) مبادل حراري
16	(11-1) صمام جول-تومسون
16	(12-1) عملية فصل الهواء المبرد
18	(13-1) مستودعات الاوكسجين السائل
21	(14-1) الاوكسجين السائل في الطب
22	(15-1) الاوكسجين السائل في الإنتاج الصناعي
23	(16-1) استخدام الاوكسجين السائل في الفضاء
28	(1-2) أنواع الجريان
31	(2-2) نطاق السائل (FLUID DOMAIN): التدفق الداخلي (INTERNAL FLOW)
42	(1-3) الضاغط الأول (COMPRESSOR-1)
43	(2-3) المبرد الأول (COOLER-1)
44	(3-3) الضاغط الثاني (COMPRESSOR-2)
45	(4-3) المبرد الثاني (COOLER-2)
47	(5-3) المبادل الحراري الأول (HEAT EXCHANGER-1)
49	(6-3) المبادل الحراري الثاني (HEAT EXCHANGER -2)
50	(7-3) صمام جول-تومسون (JOULE THOMSON)
52	(8-3) الفاصل (SEPARATOR)
53	(9-3) المخطط التفصيلي لمنظومة اسالة الاوكسجين باستخدام برنامج UNISIM.

الفصل الأول

المقدمة والدراسات السابقة

(Introduction & Literature Reviews)

1-1 المقدمة (Introduction) :-

الغازات هي حالة من حالات المادة تتميز بتباعد جزيئاتها وحركتها العشوائية السريعة، مما يمنحها قابلية عالية للانضغاط والتمدد لملء أي فراغ، وتُعرف بخصائصها مثل تغير الشكل والحجم، وتُدرس قوانينها (مثل قانون الغاز المثالي) لفهم علاقة الضغط والحجم ودرجة الحرارة، وهي أساسية في فهم الظواهر الفيزيائية مثل الطقس وفي تطبيقات صناعية عديدة. يهدف هذا البحث إلى تصميم ومحاكاة خط انتاج أوكسيجين سائل باستخدام برنامج UNISIM.

2-1 مشكلة البحث (Problem Statement):

يشكل الأوكسجين السائل (LOX) ركيزة حيوية في العديد من القطاعات الصناعية والطبية والفضائية. ومع تزايد الطلب العالمي عليه، خاصة في ظل التوسع الصناعي والأزمات الصحية، تبرز الحاجة إلى تحسين عمليات إنتاجه من حيث الكفاءة التشغيلية، وتقليل استهلاك الطاقة، والمرونة في التعامل مع متطلبات النقاء والسعة المتفاوتة. تعتمد معظم وحدات تسييل الأوكسجين التقليدية على دورات تبريد مثل دورة ليندي أو دورة كلود، والتي تتطلب توازناً دقيقاً بين المعلمات التشغيلية لتحقيق الأداء الأمثل. ومع ذلك، فإن التصميم التقليدي والتشغيل التجريبي لهذه الوحدات يتسم بارتفاع التكلفة، واستهلاك الوقت، والمخاطر التشغيلية المحتملة، مما يحد من القدرة على استكشاف سيناريوهات تحسينية عديدة بشكل عملي. لذلك، تكمن المشكلة الأساسية في الحاجة إلى منهجية عملية واقتصادية تسمح بتصميم ومحاكاة وتحسين خط إنتاج تسييل الأوكسجين قبل مرحلة التنفيذ المادي، مما يقلل من التكاليف الرأسمالية والتشغيلية ويضمن تحقيق مواصفات المنتج المطلوبة بأعلى كفاءة ممكنة.

3-1 اهداف المشروع (Objective of the Project):

يهدف هذا البحث إلى تصميم ومحاكاة منظومة لإسالة غاز الأوكسجين باستخدام أداة المحاكاة المتقدمة Unisim Design Suite، وذلك من خلال تحقيق الأهداف التفصيلية التالية:

1. تصميم نموذج محاكاة ديناميكي ومتكامل لعملية إسالة الأوكسجين باستخدام برنامج Unisim، يعكس العمليات الديناميكية الحرارية بدقة.
2. تحليل واختيار دورة التبريد الأنسب بناءً على معايير الكفاءة في الطاقة (مثل الشغل المحدد) والجدوى الاقتصادية الأولية.

3. نمذجة المكونات الرئيسية للخط، مثل: (ضواغط الهواء، مبادلات حرارية، صمام التمدد، أبراج فصل الهواء) داخل بيئة Unisim.
4. إجراء دراسة تحليلية شاملة لأثر المتغيرات التشغيلية الأساسية، مثل: (ضغط الهواء الداخل، درجات الحرارة في نقاط مختلفة، نسب التدفق).
5. صنع بيئة رقمية مطابقة للواقع لخط انتاج الأوكسجين السائل (المحاكاة).

4-1 المنهجية (Methodology):

ستعتمد منهجية هذا البحث على المنهج الوصفي التحليلي والتجريبي الافتراضي، من خلال الاستخدام المكثف لمحاكاة العمليات باستخدام برنامج Unisim. وتتكون المنهجية من المراحل التالية:

1. مرحلة الدراسة النظرية وجمع البيانات:
جمع الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد (الهواء، النيتروجين، الأكسجين)، ومراجعة الأدبيات والتصاميم القائمة لدورات تسييل الغازات.
2. مرحلة النمذجة والمحاكاة (العمود الفقري للبحث):
 - **بناء النموذج الأولي:** إنشاء مخطط سريان العمليات (PFD) في Unisim واختيار الموائع المناسبة (بناءً على معادلة الحالة لبينق روبينسون Peng-Robinson).
 - **تضمين الوحدات الرئيسية:** إدخال وربط وحدات العمليات (Unit Operations) مثل الضواغط، والمبادلات، وصمامات التمدد (Expansion Valves)، وأبراج الفصل (Distillation Columns).
 - **ضبط الشروط والمعايير:** تحديد شروط الإدخال (هواء جوي) ومواصفات المخرج (نقاء الأكسجين السائل).
 - **تشغيل المحاكاة والتحقق:** تشغيل النموذج في الوضع المستقر (Steady-State) والتحقق من توازن الكتلة والطاقة.

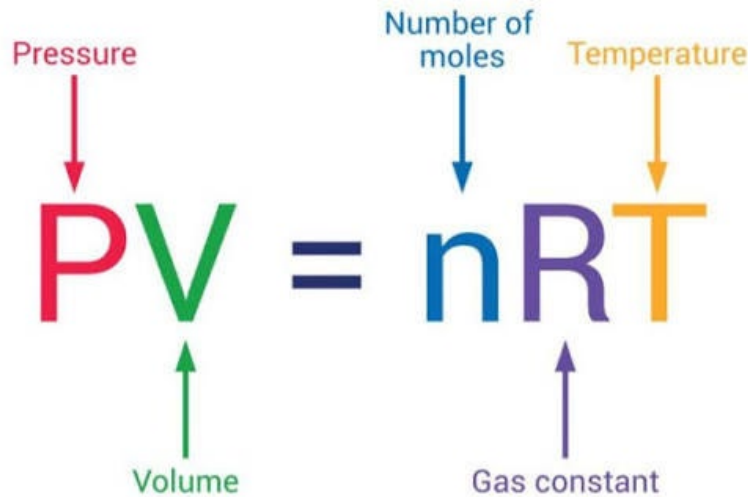
3. مرحلة التحليل والتحسين:

تحليل الحساسية: استخدام أدوات التحليل في Unisim لدراسة تأثير تغير متغير معين (مثل ضغط ما بعد الضاغط) على أداء النظام.

4. مرحلة التقييم وكتابة النتائج: تحليل مخرجات المحاكاة (تقارير التدفق، الخواص)، ومناقشة النتائج في ضوء الأهداف الموضوعية، واستخلاص التوصيات للتصميم النهائي ودراسات الجدوى. من المتوقع أن تساهم نتائج هذا البحث في تقديم نموذج رقمي فعال يمكن للباحثين والمهندسين الاعتماد عليه كمنصة اختبار آمنة ومرنة لتحسين عمليات فصل الهواء وتصميم وحدات تسييل الأكسجين، مما يساهم في تطوير هذا القطاع الصناعي المهم.

5-1 مفاهيم أساسية (Basic Concepts):

1. الغاز المثالي (Ideal Gas): نموذج افتراضي لجزيئات نقطية عديمة الكتلة لا تتفاعل، وهو أساس القوانين الفيزيائية.
2. الغاز الحقيقي (Real Gas): الغازات الموجودة في الواقع، وتدرس خصائصها من خلال متغيرات مثل (الضغط P ، الحجم V ، درجة الحرارة T ، عدد المولات n).
3. قوانين الغازات: تصف العلاقة بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة (مثل قوانين بويل وشارل).
4. في السياق الهندسي، تُدرس الغازات الحقيقية باستخدام معادلات الحالة مثل بينغ-روبينسون للتنبؤ بسلوكها أثناء الضغط أو التبريد.
5. هذه الخصائص أساسية لعمليات مثل الضغط والتبريد في إسالة الأكسجين.



1-1 معادلة الغاز المثالي

6-1 خصائص الغازات الأساسية (Fundamental Properties of Gas):

➤ جزيئات متباعدة (Intermolecular Distance):

توجد مسافات كبيرة بين جزيئات الغاز، مما يقلل قوى التجاذب بينها إلى حد كبير.

➤ حركة عشوائية (Random Molecular motion):

تتحرك الجزيئات بسرعة في اتجاهات عشوائية، وتصطدم ببعضها البعض وبجدران الوعاء.

➤ قابلية للانضغاط والتمدد (Compressibility and Expansibility):

يمكن ضغطها بسهولة لتصغير حجمها، وتتمدد لملء أي حاوية.

➤ متغيرة الشكل والحجم (Indefinite Shape and Volume):

لا تمتلك شكلاً أو حجماً ثابتاً، بل تتخذ شكل وحجم الوعاء الذي توجد فيه.

➤ الانتشار (Diffusion):

تنتشر الغازات وتختلط ببعضها البعض بسهولة.

7-1 الاوكسجين (Oxygen): -

غاز الأكسجين (O_2) عنصر حيوي أساسي للحياة، عديم اللون والرائحة والطعم، يمثل حوالي 21% من الهواء، وهو ضروري للتنفس الخلوي لإنتاج الطاقة، ويدعم الاحتراق، ويُنتج بالبناء الضوئي، وله تطبيقات طبية وصناعية واسعة، لكنه بتركيزات عالية قد يكون خطيرًا.

غاز الأكسجين (O_2) يتميز بكثافة (1.429 kg/m^3 عند 0°C) و(1 ضغط جوي) ، وزن جزيئي (32g/mol)، ومعامل انضغاطية ($Z \approx 0.998$) عند الظروف القياسية، لكنه ينحرف تدريجياً عند الضغوط العالية ($>10\text{bar}$) بسبب قوى فان دير فالس. خصائص فيزيائية دقيقة، نقطة الغليان الطبيعية (-182.95°C)، نقطة الانصهار (-218.79°C)، درجة الحرارة الحرجة (-118.57°C) وضغط حرج (50.43bar)، حيث يصبح سائلاً فائقاً فوق هذه النقطة.

1-7-1 خصائصه الأساسية (Fundamental Properties):

- رمز كيميائي: O، عدد ذري 8.
- الشكل: غاز ثنائي الذرة (O_2) في الظروف العادية.
- اللون والطعم والرائحة: عديم اللون والطعم والرائحة.
- مُساعد للاحتراق: غير قابل للاشتعال، ولكنه ضروري للاحتراق ويزيد شدته. أهميته ودوره.
- التنفس: ضروري لعملية التنفس الخلوي وتحويل الغذاء إلى طاقة (ATP).
- البيئة: جزء أساسي من الغلاف الجوي، ويُنتج بواسطة النباتات والطحالب عبر التركيب الضوئي.
- الصناعة والطب: يُستخدم في العلاج الطبي (الأكسجين العلاجي)، وفي عمليات اللحام، وإنتاج الصلب، وكاشف في التحاليل الطبية والمختبرات.

1-7-2 نبذة تاريخية عن الاوكسجين (Historical Background of Oxygen):

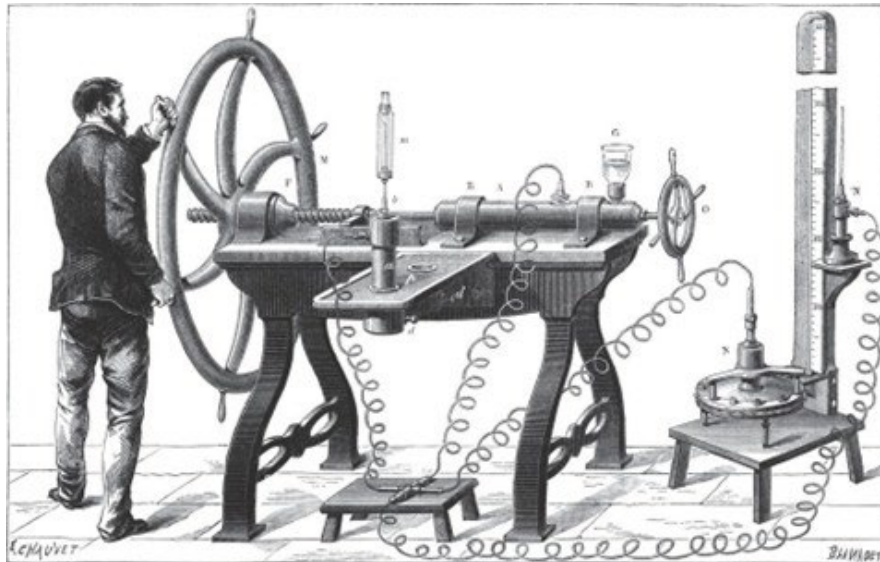
➤ أصل التسمية (Etymology of Oxygen):

الأكسجين هو عنصر كيميائي رمزه "O" وعدده الذري 8، ويقع ضمن عناصر الدورة الثانية وعلى رأس المجموعة السادسة عشر في الجدول الدوري، والتي تدعى باسم مجموعة (الكالكوجين) وهو عنصر مجموعة رئيسي. يصنّف الأكسجين ضمن اللافلزات، ويكون في الشروط العادية من الضغط ودرجة الحرارة على شكل غاز ثنائي الذرة O_2 ، ليس

له لون أو طعم أو رائحة. يتميز الأكسجين الذري بنشاطه الكيميائي الكبير، حيث إنّه من المؤكسدات القويّة، ويميل إلى الارتباط لتشكيل المركّبات الكيميائية، وخاصّة الأكاسيد. كما يعدّ أحد أهمّ العناصر الموجودة في الأرض، وهو واسع الانتشار، حيث يشكّل غاز الأكسجين 20.94% من تركيب الغلاف الجوّي للأرض؛ بالإضافة الي أنّه أكثر العناصر وفرة في القشرة الأرضية، حيث يوجد بنسبة 48.9 % وزناً، وهو يأتي في المرتبة الثانية بعد الحديد من حيث وفرة العناصر في تركيب الأرض ككل. يوجد الأكسجين الذري بوفرة في الكون، حيث يعدّ ثالث عنصر من حيث الوفرة بعد (الهيدروجين والهيليوم). هناك ثلاثة نظائر مستقرّة للأكسجين (O_{16} و O_{17} و O_{18}) ، أكثرها وفرةً هو الأكسجين-16، حيث تبلغ وفرته الطبيعيّة 99.8%. للأكسجين أهميّة حيويّة كبيرة جداً، حيث لا غنى عنه لاستمرار الحياة على سطح الأرض، فهو أساس عملية التنفّس الخلوي عند الإنسان والحيوانات، كما يدخل في عملية التركيب الضوئي عند النباتات. بالإضافة إلى ذلك فهو أساس عملية الاحتراق، كما يسهم في عمليات التآكل.

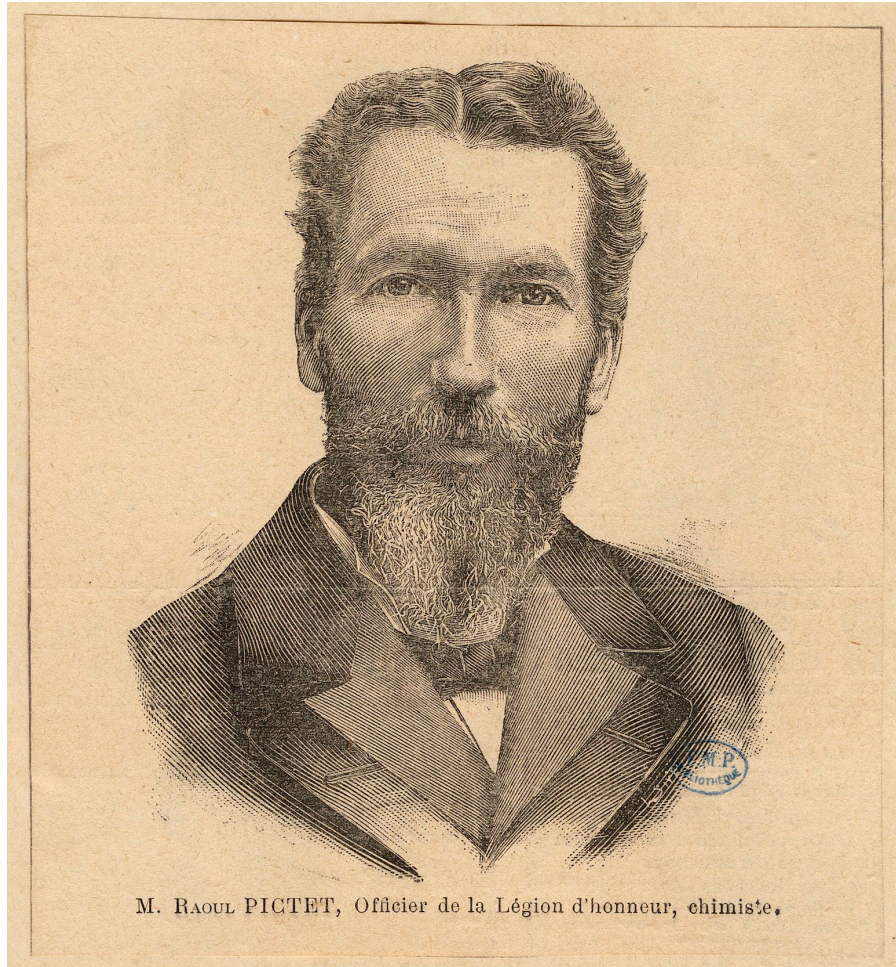
➤ الاكتشاف (Discovery):

اكتشفه بشكل مستقل كارل فلهلم شيله (1771) وجوزيف بريستلي (1774)، لكن أنطوان لافوازييه هو من فهم دوره في الاحتراق وأعطاه اسمه عام 1777.



(2-1) جهاز اسالة الاوكسجين
قديمًا

أيقن العلماء في أواخر القرن التاسع عشر أنّه يمكن إسالة الهواء، وبالتالي فصل مكوّناته وذلك عن طريق الضغط والتبريد. وكان الفيزيائي (راؤول بكتيه) أوّل من سيّل الأكسجين سنة 1877، وذلك عندما كان يعمل على تبخير ثنائي أكسيد الكبريت السائل من أجل إسالة ثنائي أكسيد الكربون، والذي تبخّر بدوره ليبرّد الأكسجين بشكل كافٍ لتسييله بشكل مؤقت. أرسل بكتيه برقية إلى الأكاديمية الفرنسيّة للعلوم لإعلامهم باكتشاف الأكسجين السائل.

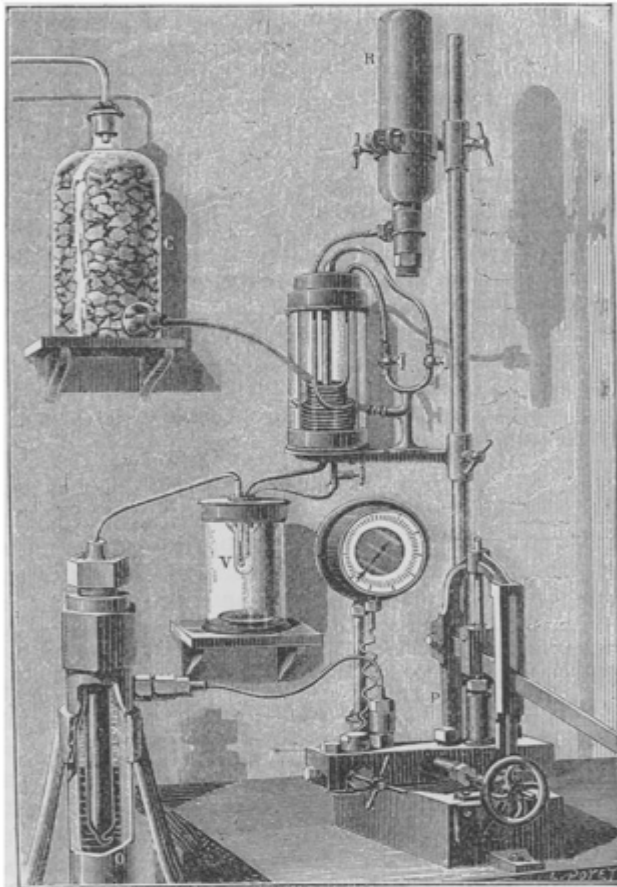
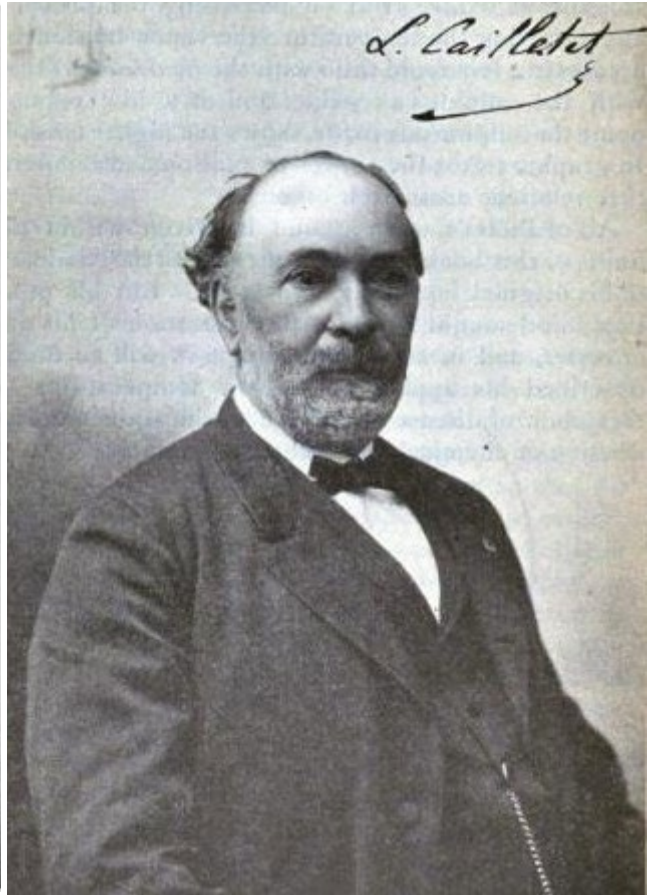


(3-1) راؤول بكتيه

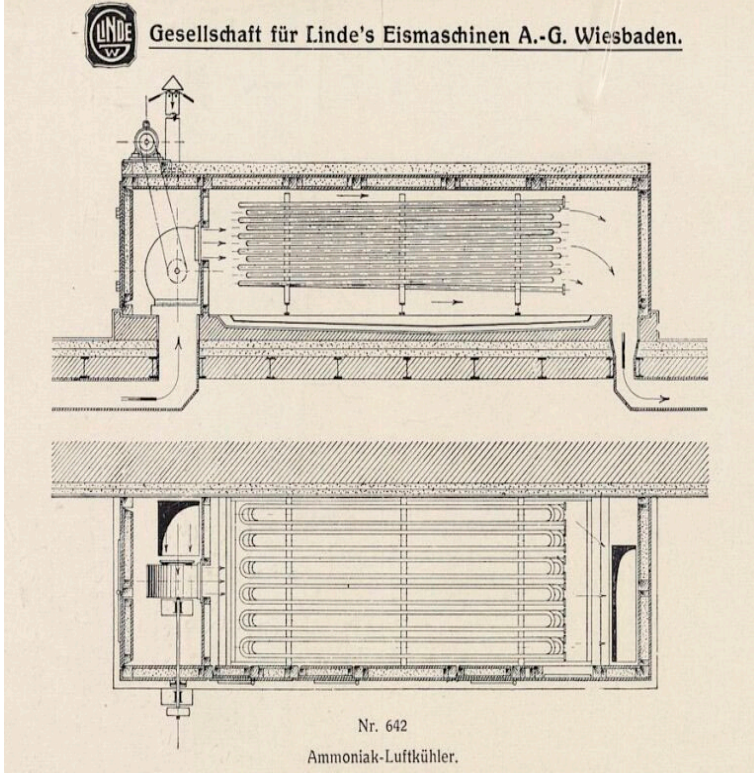
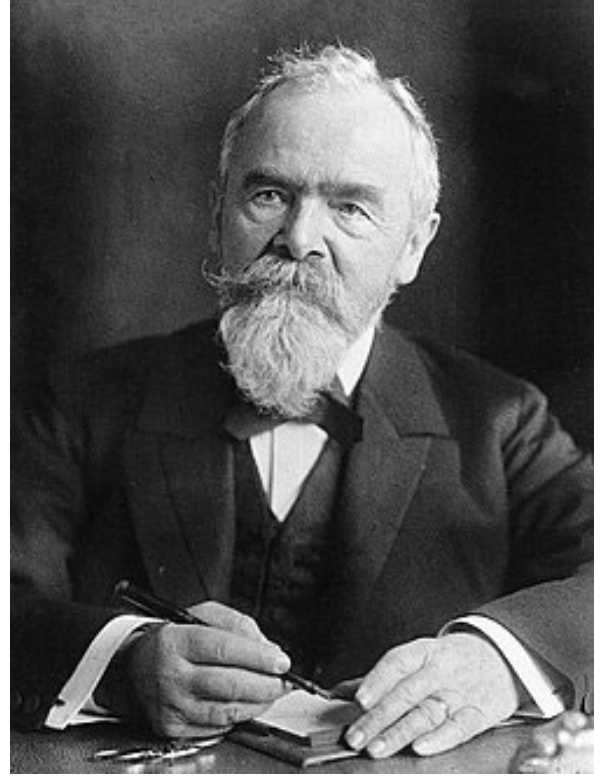
Raoul pictet

وبعد ذلك بيومين فقط، أعلن الفيزيائي (لويس بول كايثيه) طريقته الخاصة في إسالة الأكسجين الجزيئي. نجح في إنتاج قطرات من الأكسجين السائل في عام 1877 باستخدام طريقة مختلفة عن راؤول بكتيه فقد استخدم تأثير جول-طومسون حيث ضغط الأكسجين وبرده في آن واحد، ثم أتاح للأكسجين التمدد بسرعة ونتيجة للتمدد السريع فإنه يبرد فكانت النتيجة أن حصل على بضع قطرات من الأكسجين السائل.

في كلتا الحالتين، كانت كمية الأكسجين المسيل غير كافية للتوثيق، بالإضافة إلى عدم استقرار الحالة الفيزيائية للعينات، إلى أن تمكّن كل من (كارول أولشيفسكي وزيجمونت فروبليفسكي) في سنة 1883 من الحصول على الأكسجين السائل بحالة مستقرة. كان (كارل فون ليندة) أول من قام بإسالة الغازات على مستوى صناعي وذلك سنة 1895 من خلال عملية ليندة الصناعية.



(4-1) لويس بول كايثيه وجهازه لتسييل الاوكسجين



(6-1) دورة تبريد ليندة

(5-1) كارل فون ليندة

Carl von Linde

وفي سنة 1891 تمكّن العالم (جيمس ديوار) من الحصول على كمّيّة كافية من الأكسجين السائل لدراسته لاحقاً، وفي سنة 1901 ظهرت تقنية لحام باستخدام مزيج من الأسيتيلين والأكسجين المضغوط.

➤ الوفرة الطبيعيّة (Natural Abundance):

إنّ الأكسجين هو أكثر العناصر الكيميائيّة وفرةً في الأرض من حيث الكتلة. ويأتي الأكسجين في المرتبة الثالثة من حيث وفرة العناصر الكيميائيّة في الكون، وذلك بعد الهيدروجين والهيليوم تبلغ قيمة الكسر الكتلي للأكسجين في النظام الشمسي حوالي 0.8%، مما يوافق كسر عددي (ذري) بحوالي 500 جزء في المليون لا يوجد الأكسجين في الفضاء الخارجي بالشكل الجزيئي O_2 إلا بكميّات نادرة وقليلة جداً، حيث يكون في الغالب مرتبطاً في مركّبات مع ذرّات الغبار الكوني. إنّ كوكب الأرض غنيّ بالأكسجين وذلك بالمقارنة مع أقرانه من الكواكب القريبة،

حيث تبلغ نسبة الأكسجين في المريخ حوالي 0.1% حجماً، وهي أقلّ بذلك بكثير في كوكب الزهرة. ينتج الأكسجين في الكوكبين المذكورين بشكل حصري من الأشعة فوق البنفسجية التي يمكن أن تفكّك الجزيئات الحاوية على الأكسجين مثل ثنائي أكسيد الكربون. إنّ الأكسجين هو أكثر العناصر الكيميائية انتشاراً على سطح الأرض فبالإضافة إلى وجوده في غلاف الأرض الجوي، فهو يتوفّر في كل من غلاف الأرض الصخري وغلاف الأرض المائي وغلاف الأرض الحيوي. تبلغ قيمة الكسر الكتلي للأكسجين في الغلاف الأرضي ما نسبته 50.5% وذلك إلى عمق يصل إلى 16km في الغلاف الصخري. يشكّل الأكسجين 20.95% حجماً من الهواء والتي تعادل 23.16% كتلةً في حين أنّ نسبته في الماء تبلغ 88.8% تجدر الإشارة إلى أنّ نسبة الأكسجين في ماء البحر (86%) أقلّ منها في الماء العادي، وذلك بسبب وجود كمّيات كبيرة من الأملاح المنحلة التي لا تحوي في تركيبها على الأكسجين، مثل كلوريد الصوديوم.

➤ الإنتاج والتحضير (Production and Preparation): -

ينتج الأكسجين صناعياً في الوقت الراهن بشكل كامل تقريباً من إسالة الهواء وتقطيره بشكل مجزّأ ومستمر. تسمّى هذه العملية باسم عملية ليندة، ثمّ طورها جورج كلود لاحقاً لجعل العملية أكثر ربحية اقتصادياً كما يمكن الإنتاج من خلال عملية امتزاز الهواء على الزيوليت لفصل الغازات المرافقة والإبقاء على الأكسجين. يبلغ إنتاج الأكسجين من الطرق المعتمدة على الهواء حوالي 100 مليون طن سنوياً. من بين الطرق القديمة لإنتاج الأكسجين هناك طريقة تعتمد على التفاعلات الكيميائية لتوليد الأكسجين في جهاز مولد الأكسجين الكيميائي. تعتمد تلك الطريقة على تسخين أكسيد الباريوم بوجود الهواء إلى 500°C ، حيث ينتج فوق أكسيد الباريوم، والذي يسخن بدوره إلى 700°C ، مما يؤدي إلى تحرر الأكسجين نتيجة التفكك الحراري. كانت هذه الطريقة تمثل الخيار الوحيد للحصول على الأكسجين النقي قبل تطوير طريقة ليندة.

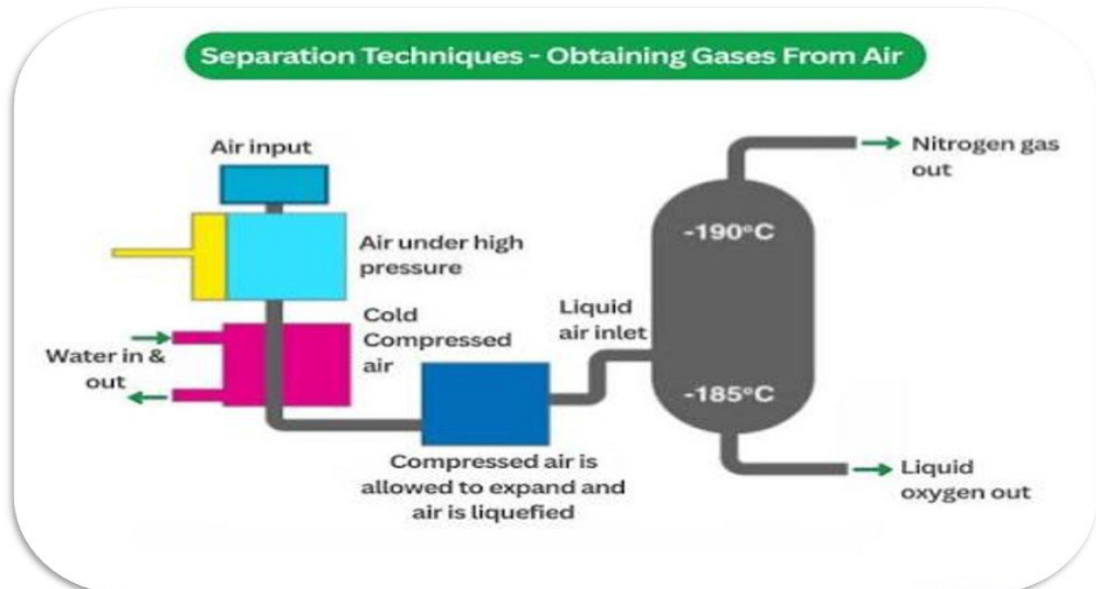
➤ سمية الأكسجين (Oxygen Toxicity):

يمكن أن يكون غاز الأكسجين O_2 ساماً عند ضغوط جزئية مرتفعة، الأمر الذي قد يؤدي إلى حدوث اختلاجات ومشاكل صحّية أخرى تبدأ ظاهرة التسمّم بالأكسجين بالظهور عند ضغوط جزئية أعلى من 50kpa، والتي تعادل نسبة من الأكسجين مقدارها 50% في الشروط العادية، أي حوالي 2.5 مرة من القيمة الطبيعية عند مستوى سطح البحر. لذلك فإنّ نسبة الأكسجين في تطبيقات غاز التنفس بالنسبة للمستشفيات أو بدلات الفضاء عادةً ما تكون حوالي 30kpa. أمّا بالنسبة للغوص، فإنّ احتمالية وقوع حالات تسمّم بالأكسجين تكون مرتفعة، إذ أنّ التنفّس

المطوّل لمزيج من الهواء يحوي على ضغط جزئي من الأكسجين يتجاوز 60kpa يمكن أن يؤدي إلى حدوث تليّف رئوي إنّ التعرّض إلى ضغوط جزئية من الأكسجين تتجاوز 160kpa (حوالي 1.6bar) يمكن أن يؤدي إلى اختلاجات مميتة. يمكن أن تحدث حالة حادة من التسمّم بالأكسجين عند الغواصين في حال تنفّس مزيج من الهواء الطبيعي (نسبة الأكسجين 21% عند أعماق تصل إلى 66m أو أكثر، ويمكن أن يحدث الأمر نفسه عند تنفّس الأكسجين النقي 100% عند عمق 6m أو أكثر).

➤ تكنولوجيا إنتاج الأكسجين السائل (Liquid Oxygen Production Technology):

تستخدم تكنولوجيا فصل الهواء المبرد على نطاق واسع في إنتاج الأكسجين السائل. تشير تقنية فصل الهواء المبرد، والتي تسمى أيضًا تقنية "الهواء المبرد"، إلى التكنولوجيا التي تستخدم التقطير المبرد لفصل مكونات الغاز المختلفة عن الهواء. علاوة على ذلك، فقد شاركت في العديد من الصناعات، وخاصة في إنتاج الأكسجين السائل عن طريق فصل الهواء المبرد، وقد أظهرت مزايا كبيرة، مما يعكس بشكل كامل الدور الأساسي والتفوق الفني لتكنولوجيا فصل الهواء المبرد في إنتاج الغاز.

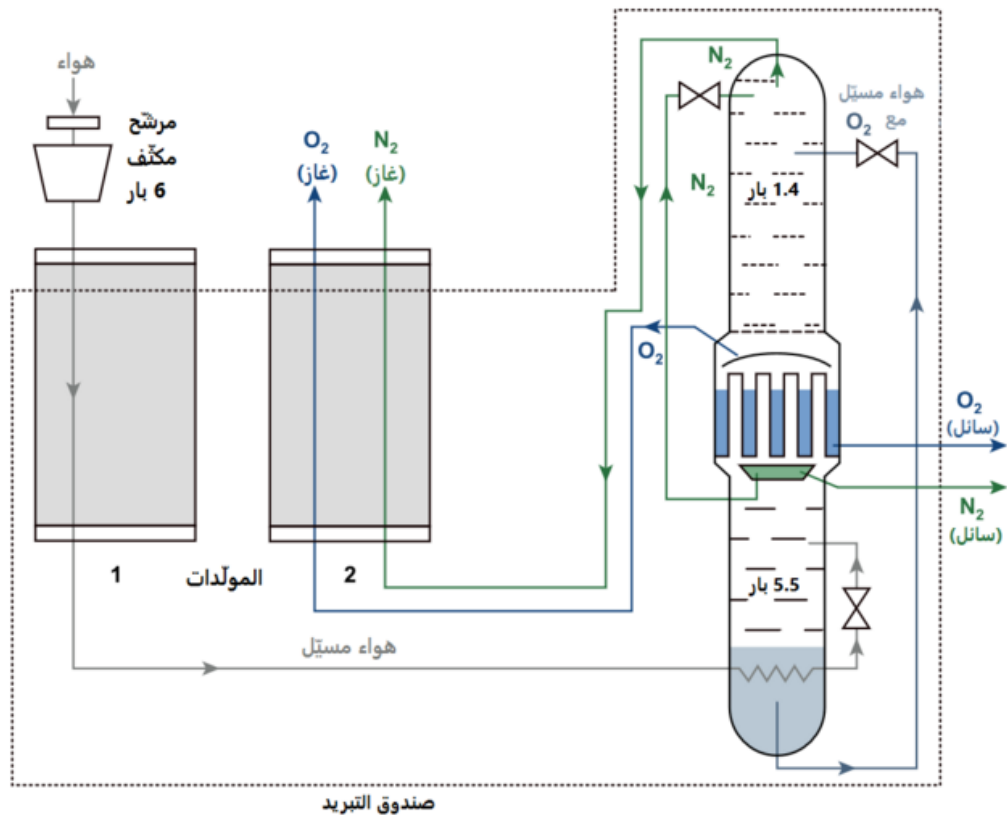


(7-1) منظومة اسالة الاوكسجين

➤ إنتاج الأكسجين السائل عن طريق فصل الهواء المبرد

:(Liquid Oxygen Production Using Cryogenic Air Separation)

يعتمد فصل الهواء المبرد على مجموعات مختلفة من نقاط الغليان في مكونات مختلفة في الهواء. عند درجات الحرارة المنخفضة، يتم فصل الهواء إلى منتجات الغاز المختلفة. وتشمل منتجاتها الرئيسية الغازات النادرة مثل الأكسجين والنيتروجين والدراج، حيث يعد الأكسجين السائل أحد المنتجات المهمة. جوهر هذه التكنولوجيا هو خلق واستخدام بيئة ذات درجة حرارة منخفضة لتحقيق فصل الهواء وتقطير الهواء.

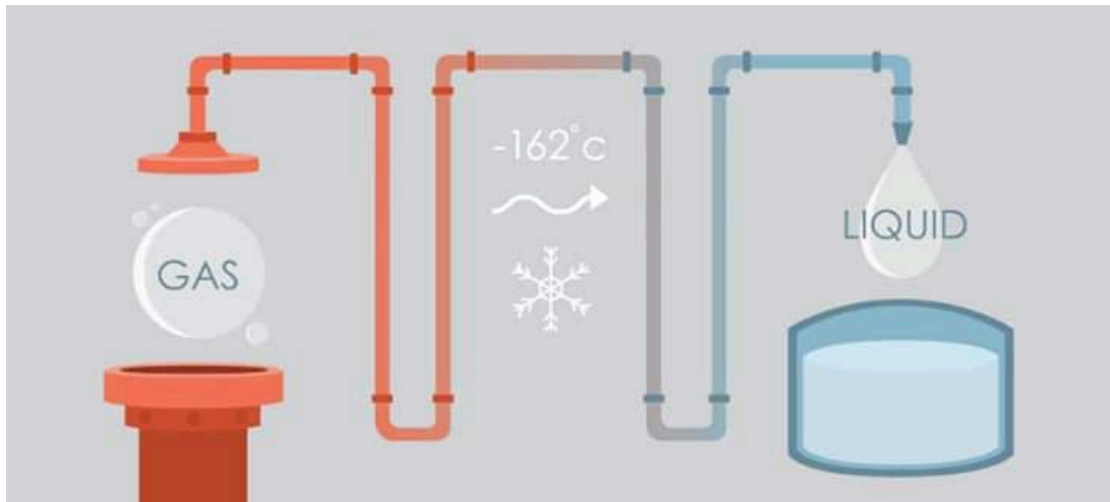


(8-1) عملية فصل الهواء المبرد

➤ مقارنة قيمة مكونات الهواء (Comparison of Air Constituents):

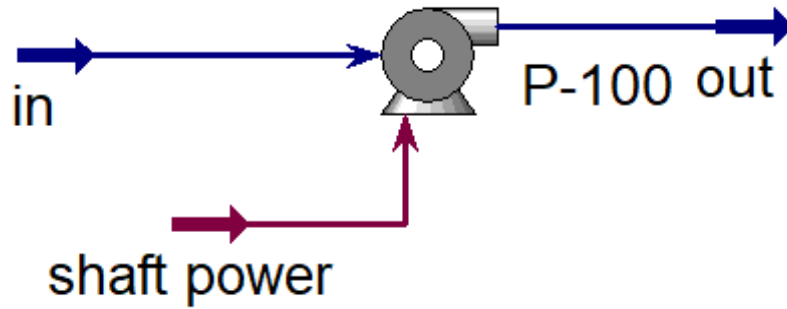
يتكون الهواء أساساً من حوالي 78% من النيتروجين، وحوالي 21% من الأكسجين، وكميات صغيرة أخرى من الغازات مثل الغاز الغازي وثاني أكسيد الكربون. تختلف نقطة غليان هذه الغازات عند درجات حرارة مختلفة. ومنها درجة غليان النيتروجين -195.8°C ، ودرجة غليان الأكسجين هي -183.0°C . مع اختلافات نقاط الغليان هذه، يمكن فصل الغازات المختلفة الموجودة في الهواء من خلال تقنية فصل الهواء المبرد.

➤ خطوات إنتاج الأكسجين السائل (Liquid Oxygen Production Process):



1. الهواء المضغوط (Air Compression):

أولاً، تم سحب الهواء من الغلاف الجوي إلى الضاغط. ستؤدي عملية الضغط إلى زيادة درجة حرارة الهواء، لذلك يحتاج الهواء إلى تبريد الهواء إلى درجة الحرارة العادية بواسطة المبرد لتقليل الطاقة المطلوبة للتبريد اللاحق.



(9-1) ضاغط الهواء

2. تنقية الهواء (Purification of Air):

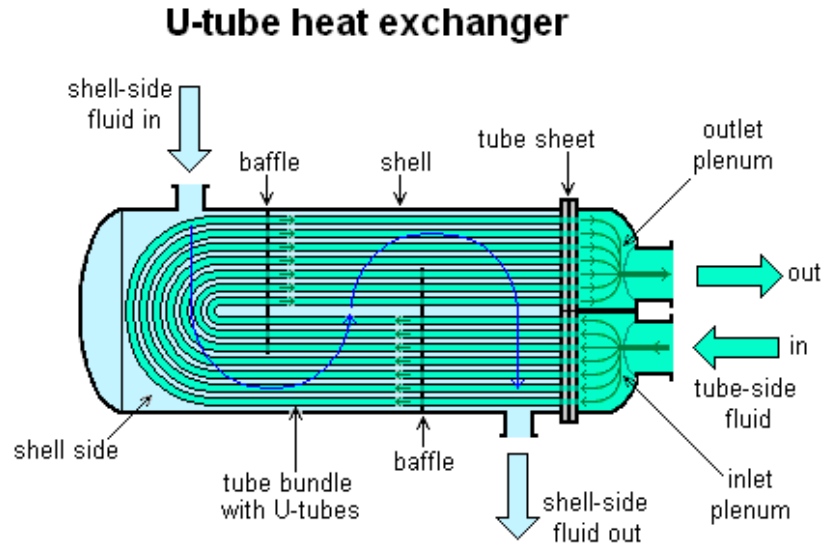
يحتوي الهواء المضغوط على شوائب مثل الرطوبة وثنائي أكسيد الكربون والهيدروكربونات. سوف تتجمد هذه الشوائب عند درجة حرارة منخفضة لعرقلة خط الأنابيب والتأثير على تأثير الانفصال. ولذلك، يجب إزالة هذه الشوائب من خلال نظام تنقية الهواء.

3. الهواء البارد مسبقاً (Pre-cooled Air):

يحتاج الهواء النقي إلى مزيد من التبريد لتقليل الحمل الحراري الذي يدخل إلى التبادل الحراري الرئيسي. عادة ما يتم الانتهاء من التبريد المسبق من خلال سلسلة من المبادلات الحرارية. تستخدم هذه المبادلات الحرارية الغاز المسال (مثل النيتروجين السائل) كوسيلة تبريد لتبريد الهواء ليقترّب من درجة حرارة التسييل.

4. تبريد التبادل الحراري الرئيسي (Heat Exchanger Cooling):

بعد الهواء البارد مسبقاً، يدخل الهواء إلى المبادل الحراري الرئيسي، وتتبادل الحرارة مع الغاز المتدفق بالهواء العائد من أعلى برج التقطير لمزيد من خفض درجة الحرارة. يعد تصميم جهاز التبادل الحراري الرئيسي أمراً بالغ الأهمية، ومن الضروري التأكد من وصول الهواء إلى درجة حرارة كافية قبل دخول برج التقطير.



(10-1) مبادل حراري

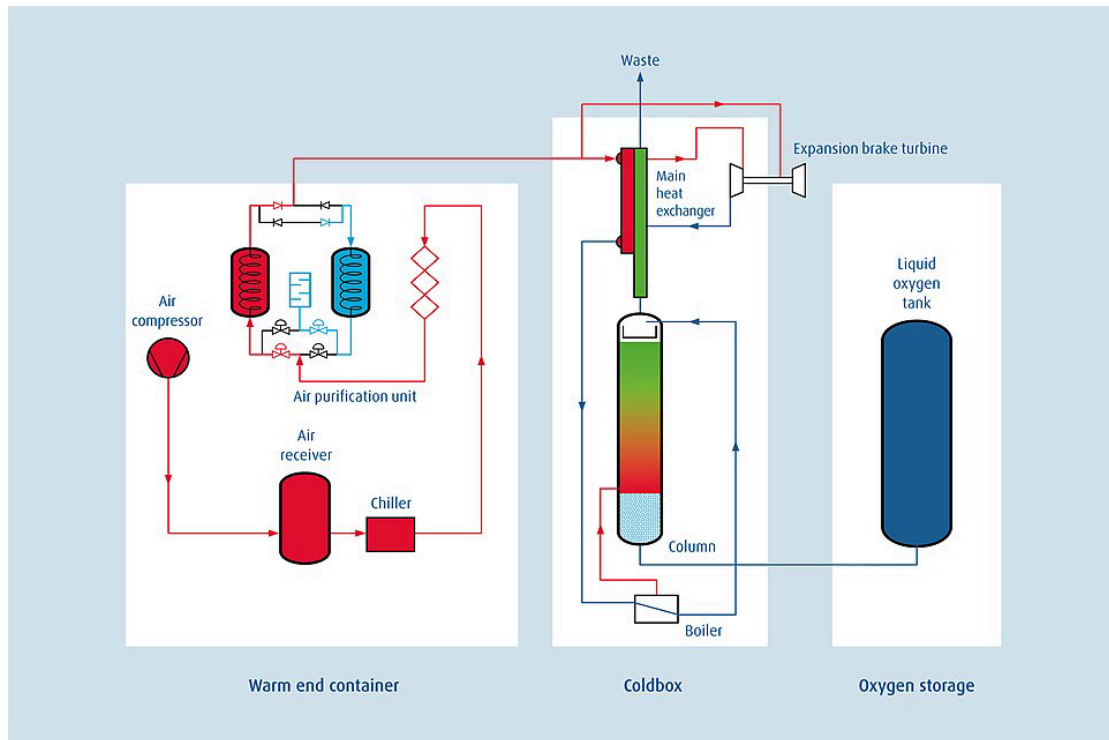
5. تسييل الهواء (Air Liquefaction):

انخفضت درجة حرارة الهواء بعد تبريد المبادل الحراري الرئيسي إلى حوالي -170°C ، وبدأ الهواء في التميع الجزئي في هذا الوقت. من أجل خفض درجة الحرارة بشكل أكبر، عادة ما يتم استخدام آلية التوسع. يقوم (صمام تومسون) أيضاً بتبريد الهواء إلى أقل من -190°C من خلال عملية التمدد الحراري، بحيث يتم تسييل الهواء بالكامل.



(11-1) صمام جول تومسون

6. فصل الهواء المبرد (Cryogenic Air Separation):



(12-1) عملية فصل الهواء المبرد

يدخل الهواء المسال إلى برج التقطير ويتم فصله حسب اختلاف نقاط الغليان لكل مكون. وينقسم برج التقطير إلى قسمين: برج علوي وبرج سفلي:

- البرج السفلي: يدخل الهواء المسال أولاً إلى البرج السفلي. عن طريق التبخر والتكثيف، يتم فصل النيتروجين والأكسجين. يتم توليد الغاز الغني بالنيتروجين في الجزء العلوي من البرج السفلي، ويتم توليد السائل الغني بالأكسجين في الأسفل.
- البرج العلوي: يدخل السائل الغني بالأكسجين الناتج عن البرج السفلي إلى البرج العلوي ويفصل كذلك الأكسجين السائل عالي النقاء. الجزء العلوي من البرج يولد النيتروجين عالي النقاء، والجزء السفلي يحصل على الأكسجين السائل عالي النقاء.

7. التخزين (Handling and Storage): -

تتم معالجة الأكسجين السائل المستخرج من أسفل برج الفصل، بعمليات مثل التصفية وإزالة الرطوبة وما إلى ذلك لضمان جودة المنتج. يمكن تخزين الأكسجين السائل في مخزن بدرجة حرارة منخفضة، ونقله إلى المستخدم من خلال نظام الضخ.



(13-1) مستودعات الاوكسجين السائل

➤ تطبيقات تكنولوجيا فصل الهواء المبرد (Cryogenic Air Separation)

: (Technology Application)

تستخدم تكنولوجيا فصل الهواء المبرد على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية والمعادن والطبية والفضاء وغيرها من المجالات. في الصناعة الكيميائية، يعتبر الأكسجين السائل عامل مؤكسد مهم يستخدم في تصنيع إنتاج المواد الكيميائية مثل الأمونيا والميثانول. في الصناعة المعدنية، يتم استخدام الأكسجين السائل لصهر الفولاذ، مما يحسن كفاءة الاحتراق وجودة المنتج. وفي المجال الطبي، يستخدم الأكسجين السائل لعلاج الجهاز التنفسي والإسعافات

الأولية. في مجال الطيران، يتميز الأكسجين السائل، كمروحة صاروخية، بخصائص كفاءة الطاقة العالية وحماية البيئة.

يعد إنتاج الأكسجين السائل عن طريق فصل الهواء المبرد طريقة فعالة وموثوقة لفصل الهواء. من خلال عملية التبريد والتقطير متعددة الخطوات، يمكن إنتاج الأكسجين السائل عالي النقاء. تتمتع هذه التكنولوجيا بأفاق تطبيق واسعة في العديد من المجالات، وسيولي اتجاه التطوير المستقبلي المزيد من الاهتمام لكفاءة الطاقة والتصغير والذكاء وحماية البيئة. من خلال الابتكار التكنولوجي المستمر والتحسين، سوف تلعب تكنولوجيا فصل الهواء المبرد دوراً أكبر في الإنتاج الصناعي وحماية البيئة.

3-7-1 الأكسجين السائل (Liquefied Oxygen):

1. خصائصه وتطبيقاته (Properties and Application):

الأكسجين السائل، هو الشكل السائل للأكسجين الجزيئي وله تطبيقات واسعة النطاق في مجال الفضاء والغواصات وصناعة الغاز.

2. الخصائص الفيزيائية (Physical Properties):-

الخصائص الفيزيائية الفريدة للأكسجين السائل تجعله ذا قيمة لا تقدر بثمن في مجالات مختلفة. وفيما يلي الخصائص الرئيسية للأكسجين السائل:

➤ الكثافة ودرجة الحرارة (Density and Temperature):

عند الضغط الجوي القياسي (101.325 كيلو باسكال)، تبلغ كثافة الأكسجين السائل 1.141 جم/سم³، وهي أعلى قليلاً من كثافة الماء السائل. يُظهر الأكسجين السائل نقطة تجمد منخفضة للغاية عند 50.5 كلفن (ما يعادل -222.65 درجة مئوية) ونقطة غليان تبلغ 90.188 كلفن (ما يعادل -182.96 درجة مئوية). يتيح هذا وجود الأكسجين السائل في ظل ظروف درجات حرارة منخفضة للغاية، مما يجعله مناسباً لتطبيقات مختلفة.

➤ عملية التسييل (Liquefaction):

يتضمن الإنتاج الصناعي للأكسجين السائل عادةً عملية تسمى التقطير الكسري. تتضمن هذه العملية ضغط الهواء وتبريده لفصل النيتروجين والأكسجين. ونظرًا لاختلاف نقاط غليانها، يتم فصل النيتروجين أولاً، تاركًا الأكسجين السائل النقي نسبيًا.

➤ المظهر والمغناطيسية (Appearance and Magnetic):

يتميز الأكسجين السائل بلونه السماوي الباهت وقدرته على المغناطيسية القوية. ويمكن تعليقه بين قطبي مغناطيس قوي على شكل حذوة حصان.

➤ إحداث هشاشة المواد وعامل مؤكسد قوي (Material Embrittle and Oxidizing):

(Oxidizing):

تصبح المواد التي تتلامس مع الأكسجين السائل هشة للغاية بسبب طبيعته المنخفضة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، يعد الأكسجين السائل عامل مؤكسد قوي، مما يتسبب في احتراق المواد العضوية بسرعة. يمكن لبعض المواد مثل قوالب الفحم والكربون الأسود وما إلى ذلك أن تنفجر بشكل غير متوقع عند نقعها في الأكسجين السائل وتعرضها لمصادر الاشتعال مثل اللهب أو الشرر أو الصدمات البسيطة. غالبًا ما تظهر البتروكيماويات، بما في ذلك الأسفلت، هذا السلوك.

➤ التطبيقات (Applications):

للأكسجين السائل تطبيقات واسعة النطاق، تمتد إلى عدة مجالات. وفيما يلي بعض تطبيقاته الأساسية.

1. الاستخدام الطبي (Medical Application):

في المجال الطبي، يتم استخدام الأكسجين السائل في العلاج بالأكسجين لضمان حصول المرضى على إمداد كافٍ من الأكسجين. كما تستخدم الطائرات عالية الارتفاع الأكسجين السائل لتوفير الأكسجين للركاب وأفراد الطاقم.



(14-1) الاوكسجين السائل في الطب

2. الإنتاج الصناعي (Industrial Production):

تتضمن عملية التصنيع الصناعي للأكسجين السائل التقطير الكسري للهواء السائل. وبنسبة توسعية تبلغ 1:861، يجد الأكسجين السائل استخدامًا واسع النطاق في الإنتاج الصناعي الحديث، بما في ذلك علم المعادن والهندسة الكيميائية وتصنيع الإلكترونيات. في العديد من التطبيقات الصناعية، يستخدم الناس الأكسجين السائل في العديد من التطبيقات الصناعية. مخرات محيطة لاستعادة حالته الغازية للاستخدام النموذجي.



(15-1) الاوكسجين السائل في الإنتاج الصناعي

3. في الفضاء (Aerospace Application):

يُستخدم الأكسجين السائل عادةً كمؤكسد، وخاصةً في دفع الصواريخ. ويُدمج مع أنواع مختلفة من الوقود مثل الهيدروجين السائل أو الكيروسين أو الميثان لتوفير قوة دفع كبيرة، وإطلاق المركبات الفضائية إلى المدار. ويلعب دورًا حاسمًا في هندسة الطيران والفضاء.



(16-1) استخدام الاوكسجين السائل في الفضاء

4-7-1 اعتبارات السلامة (Safety Considerations):

بسبب انخفاض درجة حرارته وخواصه المؤكسدة، يفرض الأكسجين السائل بعض المخاطر. فالنيتروجين السائل له نقطة غليان أقل من الأكسجين السائل، ويمكن للأوعية التي تحتوي على النيتروجين السائل أن تكثف الأكسجين من الهواء. وبالتالي، بعد تبخر معظم النيتروجين من مثل هذه الأوعية، يمكن للأكسجين السائل المتبقي أن يتفاعل بعنف مع المواد العضوية، مما يشكل خطر الانفجار. وعلى العكس من ذلك، يمكن إثراء النيتروجين السائل أو الهواء السائل بالأكسجين من خلال السماح لهما بالوقوف في الهواء الطلق، حيث يذوب الأكسجين الجوي فيهما، بينما يتبخر النيتروجين بشكل تفضيلي.

8-1 دراسات سابقة (Previous Studies):

➤ تحليل تسييل الأكسجين بمعدلات تدفق متغيرة لأنظمة الاستفادة من الموارد في الموقع

(ISRU) - آر. جروتينراث، أ. كاشاني، د. هاوزر، ودبليو. إل. جونسون- July

2022 . الاستيطان البشري على القمر والمريخ يتطلب الاستفادة من الموارد في الموقع (ISRU). يُعد توليد الوقود والمؤكسد أساسياً لتزويد المركبات بالوقود وتقليل الكتلة المطلوبة للهبوط. تشكل أنظمة التسييل خطوة محورية لإنتاج وتخزين الأكسجين السائل (LOX) بعد استخراجها من الماء أو الثرى القمري. ونظراً لتحديات الطاقة والبيئات المتغيرة بين النهار والليل، أُجري تحليل باستخدام Thermal Desktop لدراسة تأثير معدلات تدفق غاز الأكسجين المتغيرة على إنتاج الأكسجين السائل. يقدم هذا التحليل الأولي بصيرة حول التشغيل المتغير لأنظمة التسييل، ويساعد في توضيح الأسئلة التشغيلية التي يجب استكشافها تجريبياً.

➤ تطور عمليات التسييل المبرد على مدى خمسين عاماً -و. ف. كاسل- 2007

في العام الخمسين لمؤتمر هندسة التبريد العميق، يغطي هذا الاستعراض تطور عمليات التبريد العميق لإنتاج الأكسجين والنيروجين والهيدروجين السائل والغاز الطبيعي المسال خلال تلك الفترة الماضية. ويقتصر على العمليات ذات الأهمية التجارية، كما تطبق على الإنتاج واسع النطاق. في جميع القطاعات الثلاثة المدرجة في هذا الاستعراض، تم تحقيق تقدم مهم جداً نتيجة لقوى السوق. ويصف التقرير التطورات التي ساهمت في تحسين الكفاءة، ونطاق التطبيق، والجوانب الاقتصادية.

➤ دورة حياة الأكسجين الطبي من الإنتاج إلى الاستهلاك -مانيش جها، ناياتيكا غاير

2022 March. يُستخدم الأكسجين على نطاق واسع في الأمراض التي تصيب الجهاز التنفسي. في حالات الطوارئ مثل التي أحدثتها موجة كوفيد-19، زاد استهلاك الأكسجين بشكل هائل. تهدف هذه المقالة إلى تحسين فهمنا حول الأكسجين الطبي، وإنتاجه (وحدة فصل الهواء بالتسييل، الامتزاز بالضغط المتأرجح، مركّزات الأكسجين)، وسلسلة التوريد، وطرق التخزين، ونظام التسليم النهائي إلى المريض. تقدم هذه المقالة أيضاً مراجعة شاملة للإضافات في البنية التحتية الطبية خلال فترة أزمة الأكسجين في الهند، إلى جانب تقديم بعض الأساليب المبتكرة لإنتاج الأكسجين والحفاظ عليه. نهدف إلى تقليل الذعر بين قرائنا من خلال تقديم نظرة ثاقبة لهم حول المسار الكامن وراء إمداد الأكسجين في قناع الأكسجين ذلك.

➤ مقارنة طرق تسييل الأكسجين للاستخدام على سطح المريخ -و. إل. جونسون، د. إم. هاوزر، د. دبليو. بلاختا، إكس-واي. جيه. وانغ، ب. إف. بانكر، ب. إس. ديساي، جيه. آر. ستيفنز، إيه. إم. سوانجر -2018 March. لاستخدام الأكسجين المنتج على المريخ في أنظمة الدفع الكيميائي، يجب تحويله من الحالة البخارية إلى السائلة وتخزينه في خزانات الوقود. تمت دراسة خمسة تصاميم لتسييل وتخزين الأكسجين والميثان، هي: الأنبوب على الخزان، الأنبوب داخل الخزان، دورة لينديه المعدلة، البراد النبضي الأنبوبي، والمسيل في الخط. قورنت هذه التصاميم وفق ثماني فئات: الكتلة، الطاقة، قابلية التشغيل، التكلفة، التصنيع، الموثوقية، الحجمية، والتوسع. أظهرت النتائج أن تصميمي الأنبوب على الخزان والأنبوب داخل الخزان هما الأكثر جاذبية، لذا اختارت ناسا تطوير تقنية الأنبوب على الخزان وتركز أبحاثها عليها.

➤ لويس بول كايتيه: تسييل الأكسجين وظهور أبحاث درجات الحرارة المنخفضة

فايدرا بابانيلوبولو -2013 October. في عام 1877، قام لويس بول كايتيه في فرنسا وراؤول بيكتيه في سويسرا بتسييل الأكسجين على شكل ضباب. مثل تسييل أول ما يُسمى بالغازات الدائمة ميلاد أبحاث درجات الحرارة المنخفضة ويُوصف غالباً في الأدبيات بأنه بدأ "سباقاً" لتحقيق درجات حرارة منخفضة تدريجياً. في الواقع، بين عامي 1877 و1908، عندما تم تسييل الهيليوم، آخر الغازات الدائمة، كانت هناك العديد من النزاعات حول الأولوية – وهو أمر يميّز تماماً ظهور حقل بحثي جديد. تبحث هذه الورقة في مسار كايتيه نحو تسييل الأكسجين، وكذلك النقاش الذي دار بينه وبين الفيزيائي البولندي زيغمونت فروبلوسكي حول مساهمة الأخير في تسييل الغازات.

الفصل الثاني

النماذج الرياضية

Mathematical Approach

1-2 مقدمة (Introduction):

في محاكاة إسالة الغازات ببرنامج (Unisim)، تتركز المعادلات الحاكمة حول الموازنات المادية والحرارية، ومعادلات الحالة (Equation of State) مثل معادلة فان دير فالس أو معادلات أكثر تعقيداً مثل (Peng-Robinson) لتمثيل سلوك الغازات غير المثالية، بالإضافة إلى قوانين الديناميكا الحرارية التي تحكم عمليات التبريد والضغط، وتحديد الظروف الحرجة (الحرجة والضغط الحرج) لضمان التحول من الحالة الغازية إلى السائلة، مع استخدام وحدات مخصصة لتتبع خواص الموائع وحسابات الطاقة وتبادل الحرارة ضمن وحدات مثل المكثفات والمبخرات والمبردات.

2-2 وصف حركة الموائع (Description of Fluid Motion):

في ديناميكا الموائع، يتم وصف حركة السوائل رياضياً باستخدام كميات فيزيائية مثل سرعة الجريان (u)، ضغط الجريات (p)، كثافة المائع (ρ)، ولزوجة المائع (ν)، وتختلف سرعة الجريان أو ضغط الجريان من نقطة إلى أخرى داخل حجم المائع. الهدف من محاكاة الجريان هو تتبع تغيرات سرعة وضغط المائع في نقاط مختلفة من مجال الجريان.

3-2 أنواع جريان المائع (Types of Fluid Flow):

هناك العديد من أنواع جريان المائع. يمكن أن يكون الجريان :

• قابلاً للانضغاط (compressible) (ثابت $\rho \neq$) أو غير قابل للانضغاط (incompressible) (ثابت ρ)

• لزجاً (viscous) ($\nu \neq 0$) أو غير لزج (inviscid) ($\nu = 0$).

• مستقرًا (steady) ($\partial u / \partial t = 0$) أو غير مستقر (transient) ($\partial u / \partial t \neq 0$).

• طبقيًا (laminar) أو اضطرابيًا (turbulence).

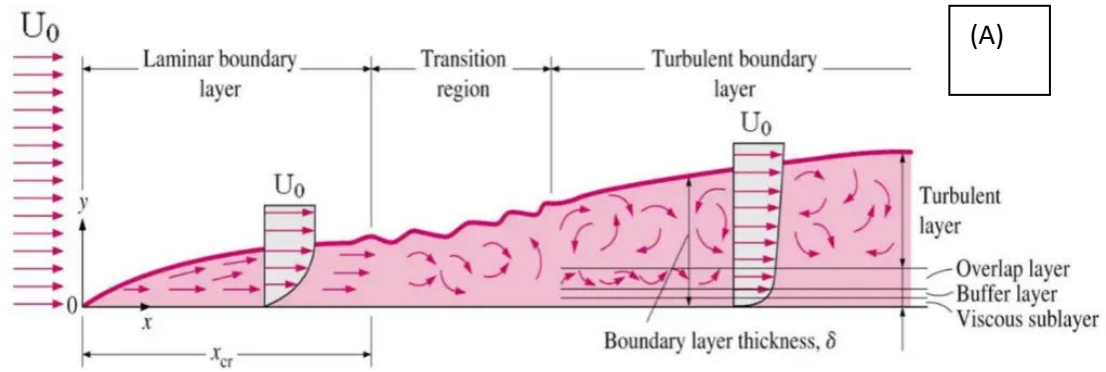
بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يكون المائع :

• نيوتونيًا (Newtonian) (إذا كانت اللزوجة تعتمد فقط على درجة الحرارة والضغط، وليس

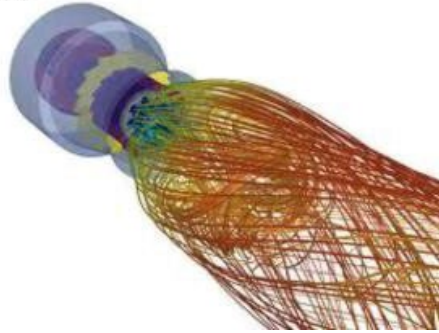
على القوى المؤثرة عليه؛ أي أن إجهاد القص هو دالة خطية لمعدل انفعال المائع).

• أو غير نيوتوني (Non-Newtonian) (إذا كانت اللزوجة تعتمد على القوى المؤثرة عليه؛

أي أن إجهاد القص هو دالة غير خطية لمعدل انفعال المائع).



(b)



(1-2) أنواع الجريان

(A) خطوط جريان طبقية و مضطربة

(b) خطوط الانسياب داخل غرفة الاحتراق

4-2 معادلات نافير-ستوكس (Navier-Stokes Equation):

في هذا الفصل ،نقتصر على دراسة جريان الموائع النيوتونية غير القابلة للانضغاط .جميع الموائع قابلة للانضغاط إلى حدٍ ما ،لكن يمكن اعتبار معظم السوائل الشائعة غير قابلة للانضغاط ،وئحكم حركتها بمعادلات نافير-ستوكس (N-S) التالية:

توضح هذه المعادلة أن التسارع $\partial u / \partial t$ لجسيم المائع يتحدد بتأثيرات مشتركة من :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\nabla u + v\nabla u^2 - \frac{\nabla p}{\rho} + F$$

- الانتقال بالحمل: $(u\nabla u)$.
- الانتشار باللزوجة: $(v\nabla^2 u)$.
- انحدار الضغط: $(\nabla p / \rho)$.
- القوى الجسمية: (f) .

يمكن اشتقاق معادلات نافير-ستوكس مباشرة من مبادئ حفظ الكتلة والزخم والطاقة .لكل جسيم في حقل المائع ،توجد مجموعة من معادلات نافير-ستوكس .يتأثر تغير سرعة الجسيم بدفع الجسيمات المحيطة له ،ومقاومة الوسط المحيط لحركته ،وتغير انحدار الضغط ،وتأثير القوى الخارجية مثل الجاذبية عليه . في الإحداثيات الديكارتية ثلاثية الأبعاد ،تصبح معادلات نافير-ستوكس :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

معادلة الاستمرارية (Continuity Equation)

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + f_x$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + f_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + f_z$$

معادلة الزخم (Momentum Equation)

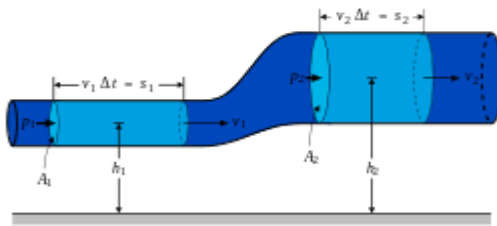
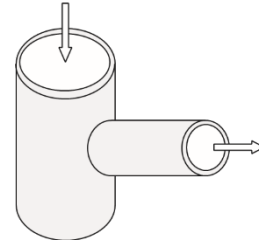
$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w E)}{\partial z} = - \frac{\partial p u}{\partial x} - \frac{\partial p v}{\partial y} - \frac{\partial p w}{\partial z} + S$$

معادلة الطاقة (Energy Equation)

حيث تمثل u ، v ، و w مركبات متجه سرعة الجسيم u .

5-2 نطاق السائل (Fluid Domain):

نطاق السائل هو منطقة مستمرة بالنسبة لسرعة السائل، وضغطه، وكثافته، ولزوجته، وما إلى ذلك. مثال على تدفق داخلي. بالنسبة للتدفق الداخلي انظر (الشكل-2-2)، يقتصر نطاق السائل على الأسطح المبلة للهيكال الذي يتصل بالسائل.



(2-2) نطاق السائل (Fluid Domain): التدفق الداخلي (Internal Flow)

6-2 قانون الغاز المثالي (Ideal Gas Law): -

هو معادلة تصف سلوك الغازات المثالية تحت ظروف مختلفة، الفكرة الأساسية منه انه يصف سلوك غاز مثالي حيث جزيئاته صغيرة جدا ولا تتفاعل مع بعضها.

تطبيقات القانون (Low Application): -

- حساب تغير إحدى المتغيرات عند تغير الأخرى (تأثير درجة الحرارة على الحجم).
- التنبؤ بسلوك الغازات في ظروف قريبة من المثالية (ضغط منخفض -درجة حرارة عالية).
- استخدام في مجالات مثل الكيمياء والفيزياء والهندسة.

الصورة الرياضية للقانون (Mathematical Form of Law):

$$PV = nRT$$

P: الضغط

V: الحجم

n: عدد المولات

R: ثابت عام

T: درجة الحرارة بالكلفن

7-2 القانون الأول للديناميكا الحرارية (First Law of Thermodynamics):

هو قانون حفظ الطاقة مطبقا على الأنظمة التي يحدث فيها انتقال للحرارة والشغل وهو حجر الأساس في فهم تحويلات الطاقة في العمليات الحرارية.

➤ تطبيقاته (Applications):

المحركات الحرارية (تحويل الحرارة إلى شغل).
الثلاجات والمكيفات (نقل الحرارة من مكان بارد إلى مكان ساخن ببذل شغل).
التوازن الحراري (تفسير انتقال الحرارة بين الأجسام).

➤ الصورة الرياضية للقانون (Mathematical Form of Law):

$$\Delta h = q - w$$

Δh : التغير في المحتوى الحراري (الانثاليبي).

q : الحرارة.

w : الشغل.

8-2 القانون الثاني للديناميكا الحرارية (Second Law of Thermodynamics)

:(Thermodynamics)

العمليات الطبيعية تسير في اتجاه واحد (كالحرارة تنتقل من الساخن إلى البارد أو الغاز ينتشر ولا يجمع نفسه). الانتروبيا الكلية للكون تزيد دائما مع الزمن. الكفاءة الحقيقية دائما أقل من المثالية بسبب زيادة الانتروبيا.

صيغة كلفن-بلانك للشغل (Kelvin-Planck Statement (Work)):

"من المستحيل بناء آلة تعمل في دورات وتستخلص حرارة من مصدر واحد وتحولها كلها إلى شغل بدون تأثيرات أخرى".

صيغة كلاسيوس للحرارة (Clausius Statement (Heat)):

"الحرارة لا تنتقل تلقائيا من الجسم البارد إلى الجسم الساخن".

تطبيقاته (Applications):

- أجهزة التبريد والتكييف.
- المحركات الحرارية.
- محطات تحلية المياه.

الصورة الرياضية للقانون (Mathematical Form of Law):

$$\Delta s \geq 0$$

Δs : التغير في الانتروبيا.

9-2 معادلات بنق-روبينسون (Peng Robinson Equation):

تعريف معادلة بينغ-روبينسون هي معادلة حالة مكعبة تُستخدم لوصف سلوك الغازات الحقيقية. تجمع هذه المعادلة بين قانون الغاز المثالي والتعديلات لتفاعلات الجزيئات وحجم الجزيئات المحدود، مما يجعلها مفيدة بشكل خاص في التنبؤ بسلوك الطور، خاصة في أنظمة الهيدروكربون. تلعب هذه المعادلة دورًا حيويًا في فهم كيفية انحراف الغازات الحقيقية عن السلوك المثالي، وتُستخدم غالبًا في تطبيقات متنوعة تشمل هندسة الكيمياء والديناميكا الحرارية. معادلة بينغ-روبينسون طُورت في عام 1976 على يد بينغ روبنسون لنمذجة سلوك الغازات الحقيقية بشكل أفضل في وجود تفاعلات غير مثالية. تعبر عن نفسها في شكل يشمل معاملات تتعلق بخصائص حرجة للمواد، مما يسمح بتخصيصها للغازات المحددة. يمكن لهذه المعادلة التنبؤ بتوازن السائل-البخار بدقة معقولة، مما يجعلها خيارًا شائعًا لحسابات الهندسة المتعلقة بمعالجة الغازات. على عكس بعض معادلات الحالة الأخرى، تشمل معادلة بينغ-روبينسون معاملًا خاصًا لحساب جاذبية الجزيئات، مما يعزز دقتها في التنبؤ بسلوك الطور. يمكن استخدامها في أنظمة المكون الواحد وفي الخلطات متعددة المكونات، مما يوفر تنوعًا في تطبيقاتها.

معادلة بينغ-روبينسون تحسن على معادلة فان دير فالس من خلال تقديم تمثيل أكثر دقة لسلوك الغازات الحقيقية عبر معاملات محسنة تأخذ في الاعتبار تفاعلات الجزيئات وأحجامها المحدودة. بينما وضع فان دير فالس الأساس من خلال معالجة حجم الجزيئات والقوى الجاذبة، قامت بينغ-روبينسون بتحسين هذه المفاهيم بإدخال تعديلات محددة تتيح تنبؤات أفضل لتوازن البخار-السائل، خاصة في الظروف القريبة من النقاط الحرجة.

تُعد معاملات النقطة الحرجة حاسمة في تطبيق معادلة بينغ-روبينسون لأنها تساعد في تحديد سلوك المادة بالقرب من حدود تحول الطور. من خلال دمج درجة الحرارة الحرجة والضغط والحجم الحرجي في بنيتها، تتيح المعادلة للمهندسين والكيميائيين إجراء تنبؤات أكثر موثوقية حول التغيرات في الطور للغازات الحقيقية. وهذا أمر بالغ الأهمية عند تصميم عمليات مثل التقطير أو استخراج الغاز، حيث يُعد فهم سلوك الطور مفتاح الكفاءة. استخدام معادلة بينغ-روبينسون في التطبيقات الصناعية له تداعيات كبيرة حيث تعزز دقة نمذجة العمليات التي تشمل الغازات الحقيقية تحت ظروف متنوعة. قدرتها على التنبؤ بتوازن البخار-السائل تجعلها لا غنى عنها في مجالات مثل هندسة الكيمياء، ومعالجة البترول، ودراسات البيئة. يؤدي هذا النمذجة

الدقيق إلى تحسين أفضل للعمليات، وإدارة الموارد، ويمكن أن يؤدي إلى تقليل التكاليف وزيادة السلامة في العمليات التي تتعامل مع الهيدروكربونات والخلطات المعقدة الأخرى.

$$P = \frac{RT}{v_m - b} - \frac{a(T)}{v_m(v_m + b) + b(v_m - b)}$$

- P: الضغط.
- R: ثابت الغازات العام.
- T: درجة الحرارة المطلقة.
- V: الحجم المولي.
- a(T): معامل الجاذبية الذي يعتمد علي درجة الحرارة.
- B: معامل حجم الجزيء.

10-2 معادلات جول-ثومسون (Joule-Thomson Equation):

$$\mu_{JT} = \frac{v}{C_p} (\alpha T - 1)$$

يصف تأثير جول-ثومسون التغير في درجة حرارة غاز حقيقي عند دفعه عبر صمام أو سدادة مسامية مع الحفاظ على عزله (عملية ايزنثالبية) عند ضغط معين، يكون للغاز درجة حرارة انعكاسية. إذا تمدد الي ما دون هذه الدرجة يبرد؛ وإذا تمدد الي ما فوقها، يسخن. يعد هذا التأثير التبريدي حجر الزاوية في تقنيات التبريد والتسييل الحديثة.

حيث:

- V: الحجم المولي.
- C_p: السعة الحرارية النوعية عند ضغط ثابت.
- α: معامل التمدد الحراري.
- T: درجة الحرارة المطلقة.

الفصل الثالث

نمذجة ومحاكاة اسالة الاوكسجين

Modeling and simulation of liquefaction

oxygen

1-3 مقدمه عن برنامج (UNISIM): -

هو برنامج محاكاة عمليات هندسيه متقدمة، ويستخدم لتصميم وتحسين العمليات من شركات الصناعية في الصناعات الكيمائية والبتروولية والطاقة وديناميكية ويتيح انشاء نماذج ثابتة بدقه عالية للخصائص الفزيائية والحركية مما يساعد المهندسين علي تقييم السيناريوهات وتحسين الانتاج. يوفر البرنامج واجه تفاعليه سهله الاختيار والمكونات الكيمائية ونماذج التحليل الحراري والمعدات، مثل المبادلات الحرارية والمفاعلات مع دعم للتفاعلات الكيمائية والحلقات. يقلل وقت الهندسة بنسبه ثلاثون بالمئه من خلال اعاده استخدام النماذج في مراحل التشغيل والصيانة، يستخدم في تصميم المصانع، مراقبه الاداء، استكشاف الاخطاء ودراسات السلامة. خاصه في الصناعات العملية؛ حيث يحقق نتائج واقيه مثبتة ميدانيا.

كمهندس، يعد اداة اساسيه لتحليل وتحسن الرحلة طوال دوره حياه المشروع. ويمكن ايضا استخدامه في عمليه اساله الغازات الطبيعية عن طريق محاكاة اعمده انتاج الاوكسجين مثل اعمده التقطير الهوائي، حيث يدعم نمزجه عمليات فصل الغازات الجوية بدقه عالية. يستخدم البرنامج لتصميم اعمده التقطير منخفضه الحرارة، لفصل الاوكسجين عن النتروجين، مع تحديد مراحل الضغط العالي والمنخفض، معدلات الارتداد وتبريد الغاز. يحسب البرنامج كفاءه الفصل، استهلاك الطاقة وتركيبه المنتجات الهندسية بناء على خصائص فزيائية مثل (بينج - روبنسون). يشمل ذلك محاكاة وحدات فصل الهواء مع تكامل المبادلات الحرارية ومضخات لتحسين الانتاج الصناعي والطبي، يدعم الوضع الديناميكي لدراسة الاستقرار اثناء التغيرات في التدفق او الضغط، يوفر مكونات غازيه دقيقه ونماذج متقدمة مما يقلل التكاليف التصميمية بنسبه تصل الي عشرين في المئه في المشاريع.

2-3 النمذجة (Modeling):

1-2-3 معادلات (Peng-Robinson Equation):

تُعرف معادلات "روبينسون" في برنامج UniSim بأنها معادلة الحالة (Peng-Robinson)، وهي نموذج ديناميكي حراري (Thermodynamic model) بالغ الأهمية لحساب خصائص السوائل في محاكاة قطاعات النفط والغاز والبتر وكيمويات. تتميز هذه المعادلات بقدرتها العالية على التنبؤ بسلوك الأطوار (بخار - سائل - ثلاثي الأطوار) وخصائص مثل الكثافة والمحتوى الحراري (Enthalpy)، خاصة لخليط الهيدروكربونات تحت ظروف تشغيل مختلفة.

1.1-2-3 الجوانب الرئيسية لمعادلات Peng-Robinson في UniSim:

- حساب خصائص السوائل: تستخدم المعادلة للربط بين الضغط، درجة الحرارة، والحجم المولي، مما يتيح حساب المحتوى الحراري، الإنتروبيا (Entropy)، وغيرها من الخصائص الضرورية.
 - التركيز على الهيدروكربونات: مصممة ومكيفة خصيصاً لمزيج الهيدروكربونات، مما يجعلها الخيار الأمثل لصناعة النفط والغاز.
 - سلوك الأطوار: تتنبأ بدقة بكيفية تصرف السوائل في الأنظمة أحادية الطور، ثنائية الطور (توازن البخار والسائل)، وحتى الأنظمة ثلاثية الأطوار.
 - التعامل مع المكونات: يمكنها إدارة الخلائط المعقدة التي تشمل مكونات نقية (مثل الماء، البروبان C3، والبيوتان C4) والمكونات الافتراضية (Hypothetical components) الناتجة عن توصيف النفط الخام.
 - معيار صناعي: يُوصى بها على نطاق واسع وتُستخدم كنموذج افتراضي أو مفضل في برامج المحاكاة مثل UniSim و HYSYS لتطبيقات معالجة الغاز وتطبيقات الهيدروكربونات العامة.
- باختصار: عند اختيارك لحزمة Peng-Robinson في UniSim، فإنك تختار أداة قوية لمحاكاة السلوك الفيزيائي لسوائل الهيدروكربون بدقة عالية في نموذج العملية الخاص بك.

2-2-3 مكونات عملية الإسالة (Liquefaction Process Components) :-

2.1-3-3 الضاغط (Compressor) :-

هو عنصر اساسي في البرنامج لمحاكاة ضغط الغازات في العملية الصناعية خاصة معالجه الغاز الطبيعي وانتاج الاوكسجين. الضاغط هو جهاز ميكانيكي يستخدم لزيادة ضغط الغازات عن طريق تقليل حجمها ويعتبر عنصرا اساسيا في الصناعات المختلفة مثل النفط والغاز والتبريد والتكيف وهناك عدة انواع للضاغط (الترددية - اللولبية - المحورية) ولكل نوع منها طريقه عمل مختلفة عن الاخر. يعمل الضاغط بناءً على قوانين الديناميكا الحرارية، حيث يتم ادخال الغاز بضغط منخفض واخر بضغط عال مع زيادة درجه الحرارة. يدعم برنامج (UNISIM) نماذج متعددة، مثل الضاغط المركزي مع منحنيات الاداء للمعدات الحقيقية والضاغط الترددي الذي يحاكي مع مراعاة حجم الفراغ والكفاءة، يمكن تحديد مراحل متعددة مع تبريد بيني للضغوط العالية.

2.2-3-3 المبرد (Cooler) :-

المبرد هو جهاز حراري يستخدم لخفض درجه الحرارة الغازات او السوائل عن طريق ازاله الحرارة ويعتبر عنصرا اساسيا في العمليات الصناعية للتحكم في درجات الحرارة والحفاظ على كفاءة العمليات. يعمل المبرد بناءً على المبادل حراري حيث يتم نقل الحرارة من التيار الساخن الي وسيط تبريد (هواء - ماء - مبرد عضوي) يستخدم في التبريد الصناعي ومعالجه الغاز الطبيعي ودورات التبريد لمنع الغليان او تحسين الفصل. في البرنامج يمثل المبرد وحده بسيطة ومرنه لمحاكاة التبريد، حيث تحدد درجه الحرارة المخرجة الضغط او الطاقة المفقودة مع حساب تلقائي لمعامل نقل الحرارة والحمل الحراري يدعم التدفقات متعددة الطور باستخدام حزم فزيائية مثل (بنق- روبنسون)، ويستخدم قبل الضواغط والأعمدة للتبريد البيني. يطبق في وحدات فصل الهواء للتبريد قبل التقطير، ضغط الغازات المتعددة المراحل وتحليل الطاقة في المصانع مع امكانيه الوضع الديناميكي لدراسة التأثيرات الزمنية والتحكم.

2.3-3-3 المبادل الحراري (Heat Exchanger) :-

هو جهاز ينقل الطاقة الحرارية بين تيارين سائلين او غازين دون اختلاطهما المباشر مما يستخدم للتسخين او التبريد في الصناعات المختلفة، يعمل على مبادئ التوصيل والتدفق المضاد

او المتوازي مع انواع رئيسيه مثل غلاف وانابيب لوحدة، محطات الطاقة يطبق في مصافي النفط والتكيف لاستعادته الحرارة تقليل الفاقد وتحسين الكفاءة.

اما في البرنامج يمثل وحده متقدمة تدعم تدفقين مع حساب متوسط فارق درجه الحرارة ومعامل نقل الحرارة والمساحة المطلوبة، يدعم نماذج صارمه مع توزيع درجات الحرارة فقدان الضغط وتكامل الطورين.

➤ الفرق بين المبادل الحراري والمبرد:

المبرد تيار واحد مع وسيط تبريد خارجي غير محسن بسيط لتبريد سريع دون تفاعل معقد، والمبادل الحراري تياران يتبادلان الحرارة مباشرة لاستعادته الطاقة أكثر كفاءة ودقه عالية وهو مفر للطاقة في الأنظمة الكبيرة.

2.4-3-3 صمام جول طومسون (Joule Thomson): -

هو صمام خانق يستخدم لتوسيع الغازات الحقيقية من ضغط عال الي منخفض في عمليه ايزنثاليه؛ مما يؤدي الي تغير درجه الحرارة بناء على تأثير جول -طومسون، يعتمد علي ظاهره فزيائية حيث يبرد معظم الغازات عند تمدد عبر صمام بسبب قوى الجذب بين الجزيئات بينما يسخن غازات مثل الهليوم عند درجه حرارة الغرفة، يطبق في تسيل الغازات الطبيعية التبريد الصناعي ومعالجه الغاز لاستخلاص المكثفات الذي تحدد مقدار التغير الحراري. في البرنامج تحدد الضغط المدخل والمخرج فقط ويقوم البرنامج تلقائيا بحساب انخفاض درجه الحرارة بناء على حزم فزيائية مع حساب الانثالي الثابت والطور الجديد. جول -طومسون يخفض الضغط فقط دون عمل خارجي مما يسبب التبريد او التسخين تلقائيا بأبسط واقل تكلفه.

2.5-3-3 وحدة الفصل (Separator): -

هو وعاء ضاغط، رئيسي في صناعة الغازات ويستخدم لفصل المائع المنتج الي مكوناته الأساسية (غاز وسائل) بالاعتماد على اختلاف الكثافة.

3-3 المحاكاة (Simulation): -

تمر عملية اسالة غاز الاكسجين عبر ثلاث خطوات أساسية: -

1-3-3 الضغط (Compression):

يدخل الهواء الي الضاغط في الظروف الجوية العادية (الضغط الجوي القياسي ودرجة حرارة الغرفة) ثم يتم ضغطه ويرتفع حتى يصل الي ما هو مناسب لدخوله للمرحلة التالية، ولكن بما ان الضغط يؤدي الي زيادة درجة الحرارة العالية؛ اذن لا بد من جعل عملية الضغط عملية ممرحلة.

1.1-3-3 الضاغط الأول (Compressor-1):

يتم فيه ضغط الهواء حتى يصل الي ضغط ودرجة حرارة مقبولة. يدخل الهواء الصافي وهو في الحالة الغازية، المتكون من 79% نيتروجين و21% اوكسجين إلى الضاغط الأول، بدرجة حرارة الغرفة العادية (25°C) وضغط جوي (100 Kpa) وتدفق مولاري يبلغ (426 Kgmole/hr) عن طريق المدخل (inlet).

ثم يتم ضغطه في الضاغط الأول الي (300 Kpa)، كما نعلم جيدا ان زيادة الضغط تتناسب طرديا مع زيادة الحرارة، اذن تزيد حرارة الهواء داخل الضاغط ايضا الي (135.9°C) ويظل التدفق المولاري ثابتا. ثم يخرج الهواء من الضاغط بحالته الجديدة عبر المخرج (outlet).

ال (Energy) في الضاغط يعبر عن الطاقة الداخلة الي الضاغط من مصدر اخر وسوف يتم توضيحها في الخطوة القادمة. كما في الشكل:

compressor1

Design

Connections

Parameters

Links

User Variables

Notes

Name

compressor1

Inlet

air

Fluid

Basis-1

Energy

E1

Outlet

comp out

Design

Rating

Worksheet

Performance

Dynamics

Sizing & Cost

Delete

OK

☒ On
 ☐ Ignored

compressor1

Worksheet

Conditions

Properties

Composition

PF Specs

Name	air	comp out	E1
Vapour	1.0000	1.0000	<empty>
Temperature [C]	25.00	135.9	<empty>
Pressure [kPa]	100.0	300.0	<empty>
Molar Flow [kgmole/h]	426.0	426.0	<empty>
Mass Flow [kg/h]	1.233e+004	1.233e+004	<empty>
LiqVol Flow [m3/h]	14.02	14.02	<empty>
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-8.254	3203	<empty>
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	118.3	118.3	<empty>
Heat Flow [kJ/h]	-3516	1.364e+006	1.368e+006

Design

Rating

Worksheet

Performance

Dynamics

Sizing & Cost

Delete

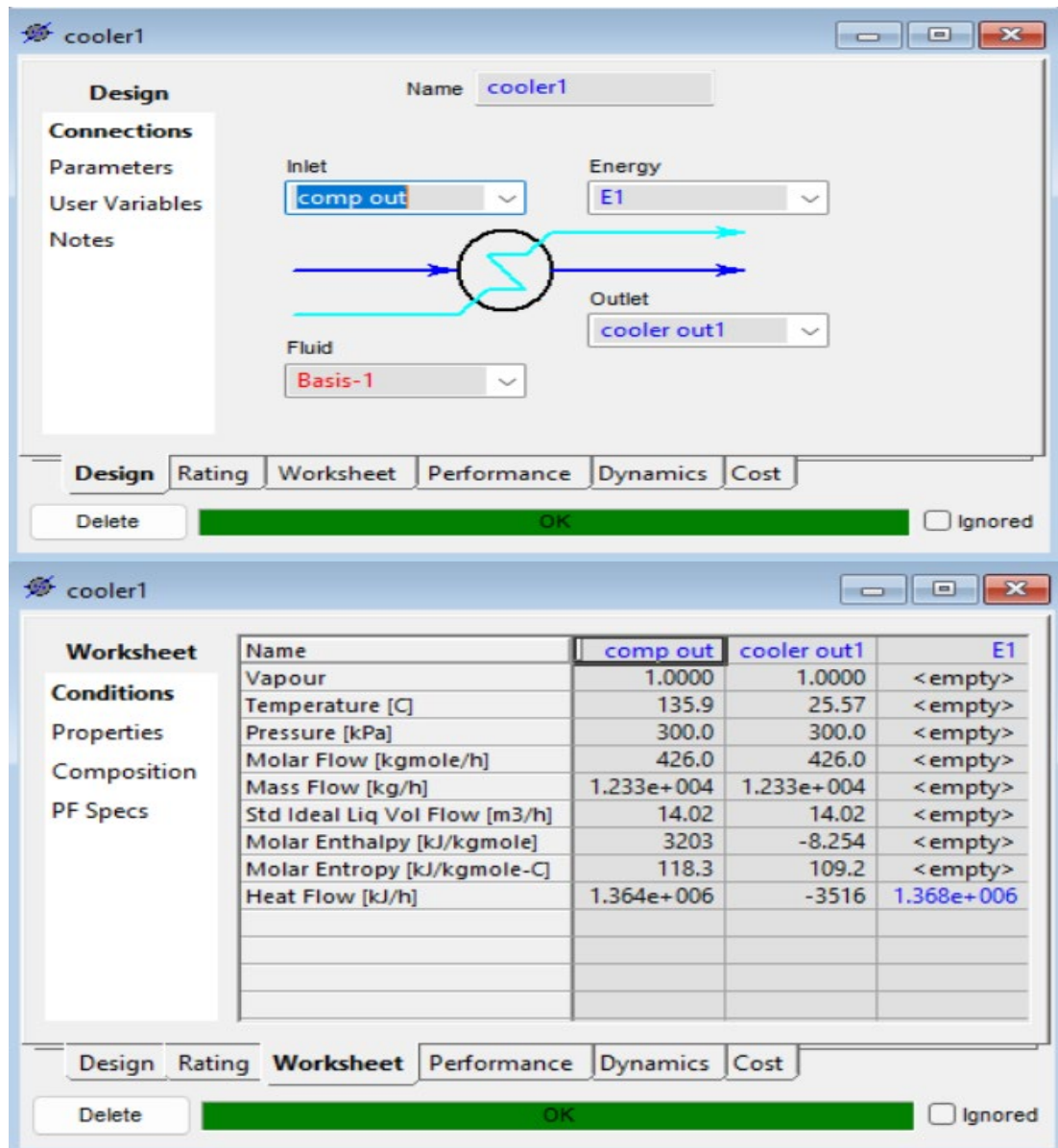
OK

☒ On
 ☐ Ignored

(1-3) الضاغط الأول (COMPRESSOR-1)

1.2-3-3 المبرد الأول (Cooler-1):

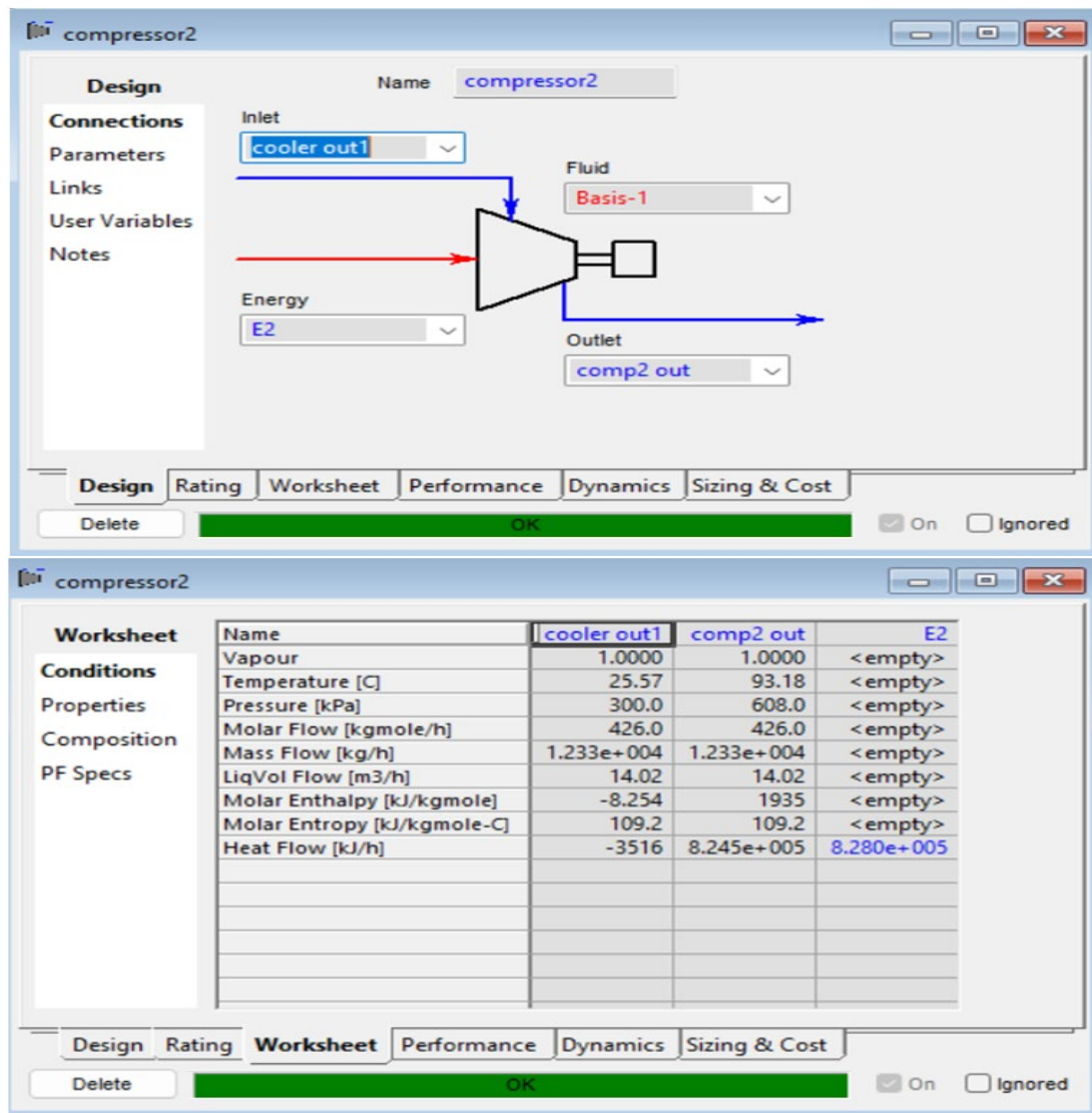
كما ذكرنا سابقا ان الضغط يتناسب طرديا مع الحرارة إذا عند زيادة الضغط تزيد الحرارة وهنا لا بد من مبرد لخفض درجة الحرارة. يدخل الهواء (القادم من مخرج الضاغط الأول) الي المبرد عن طريق مدخل المبرد (inlet) ثم يقوم المبرد بخفض درجة الحرارة المرتفعة بواسطة الضاغط، من (135.9 C°) الي (25.57 C°) مع ثبوت الضغط. والطاقة الناتجة عن عملية التبريد هنا (Energy) يتم إدخالها أي الضاغط باعتبارها طاقة إضافية له. كما في الشكل التالي:



(2-3) المبرد الأول
(COOLER-1)

1.3-3-3 الضاغط الثاني (Compressor-2):

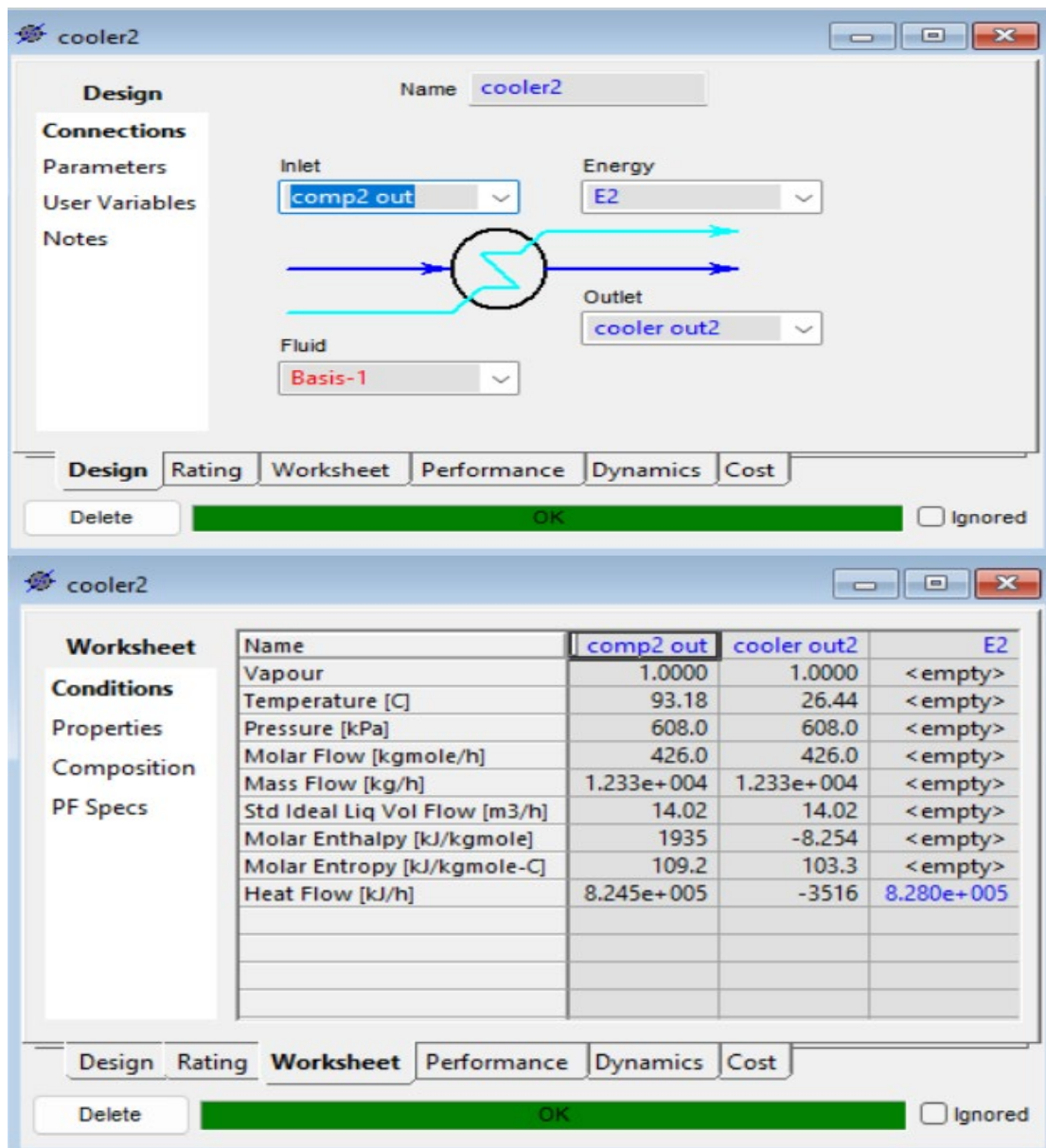
وكما ذكرنا ان عملية زيادة الضغط عملية ممرحلة إذا لا بد من ضاغط اخر ليوصلنا الي الضغط المناسب. هنا يأتي دور الضاغط الثاني، بعد خروج الهواء من المبرد يدخل الي الضاغط الثاني عن طريق مدخل الضاغط (Inlet) وفي هذا الضاغط يتم رفع ضغط الهواء مرة اخري من (300 to 608 Kpa). وكما علمنا سابقا فان زيادة الضغط تصحبها زيادة في درجة الحرارة، اذن تزيد درجة الحرارة من الدرجة التي توصل اليها المبرد الأول ($25.57\text{ }^{\circ}\text{C}$) الي ($93.18\text{ }^{\circ}\text{C}$) ومع ثبوت التدفق المولاري دون تغير. ثم يخرج الهواء عبر المخرج (Outlet) بعد تغيرات الضاغط. كما في الشكل:



(3-3) الضاغط الثاني
(COMPRESSOR-2)

1.4-3-3 المبرد الثاني (Cooler-2) :-

وأيضاً نحتاج الي مبرد اخر لخفض درجة الحرارة. وعمله كعمل المبرد الأول، بعد دخول الهواء (الخارج من الضاغط الثاني) عبر مدخل المبرد (inlet) يتم تبريده من ($93.18\text{ }^{\circ}\text{C}$) الي ($26.44\text{ }^{\circ}\text{C}$) وتعتبر هذه الحرارة المناسب للهواء لدخول مرحلة التسييل، وأيضاً الطاقة (Energy) الناتجة عن عملية التبريد تذهب الي الضاغط كما حدث في الضاغط الأول. كما في الشكل:



(4-3) المبرد الثاني
(COOLER-2)

2-3-3 التسييل (Liquefaction):

عملية التسييل أيضا كسابقتها تتكون من عدة مراحل لنحصل على النتائج المطلوبة، لان التبريد المفاجئ يؤدي الي تجمد الرطوبة وثاني أكسيد الكربون على الجدران مما يسد الممرات ويقلل الكفاءة، وتتكون من:

2.1-3-3 المبادل الحراري الأول (Heat Exchanger-1):

بعد ان تم ضغط الهواء الي الضغط المطلوب والمناسب يتم ادخال الهواء الي المبادل وتبريده عن طريق النيتروجين السائل الي درجة حرارة معينة. يتكون المبادل الحراري دائما من جزئين:

- الانبوب الداخلي (Tube side) وهو ما يحتوي على المائع المراد تبريده
 - الطبقة او القشرة الخارجية (Shell side) وهي ما تحتوي على مائع التبريد
- يدخل الهواء عن طريق ال (Tube inlet) بدرجة حرارة (26.44 C°) وضغط (608Kpa)، ويكون التدفق المولاري ثابتا كما سبق أيضا (426kgmole/h)، ثم يخرج عن طريق (Tube outlet) بدرجة حرارة (-70 C°)، يحدث انخفاض بسيط جدا في الضغط ويكاد يكون غير ملحوظ بمقدار (0.1Kpa) بسبب انخفاض درجة الحرارة، فيصبح (607.9Kpa) ، في نفس وقت يدخل مائع التبريد (النيتروجين السائل) عن طريق (shell inlet) بدرجة حرارة (-197.8 C°) وضغط (150Kpa) ، ويخرج المائع عن طريق (shell outlet) بعد اكماله لعملية تبريد الهواء بدرجة حرارة (-180 C°) ويحدث انخفاض في الضغط أيضا بمقدار (0.1Kpa) فيصبح (149.9Kpa) ، هنا يكون التدفق المولاري بمقدار (195kgmole/h) ثابتا عند دخول مائع التبريد وعند خروجه. كما في الشكل:

2.2-3-3 المبادل الحراري الثاني (2-Heat Exchanger):

ويتم فيه التبريد بمادة النيتروجين السائل كسابقتها ونحصل على درجة الحرارة المطلوبة، يدخل الهواء عن طريق (Tube inlet) بدرجة حرارة (-70 C°) وضغط (607.9Kpa)، ويكون التدفق المولاري ثابتا كما سبق أيضا (426kgmole/h).

ثم يخرج عن طريق (Tube outlet) بدرجة حرارة (-150 C°)، يحدث انخفاض بسيط جدا في الضغط ويكاد يكون غير ملحوظ بمقدار (0.1Kpa) بسبب انخفاض درجة الحرارة، فيصبح (607.8Kpa).

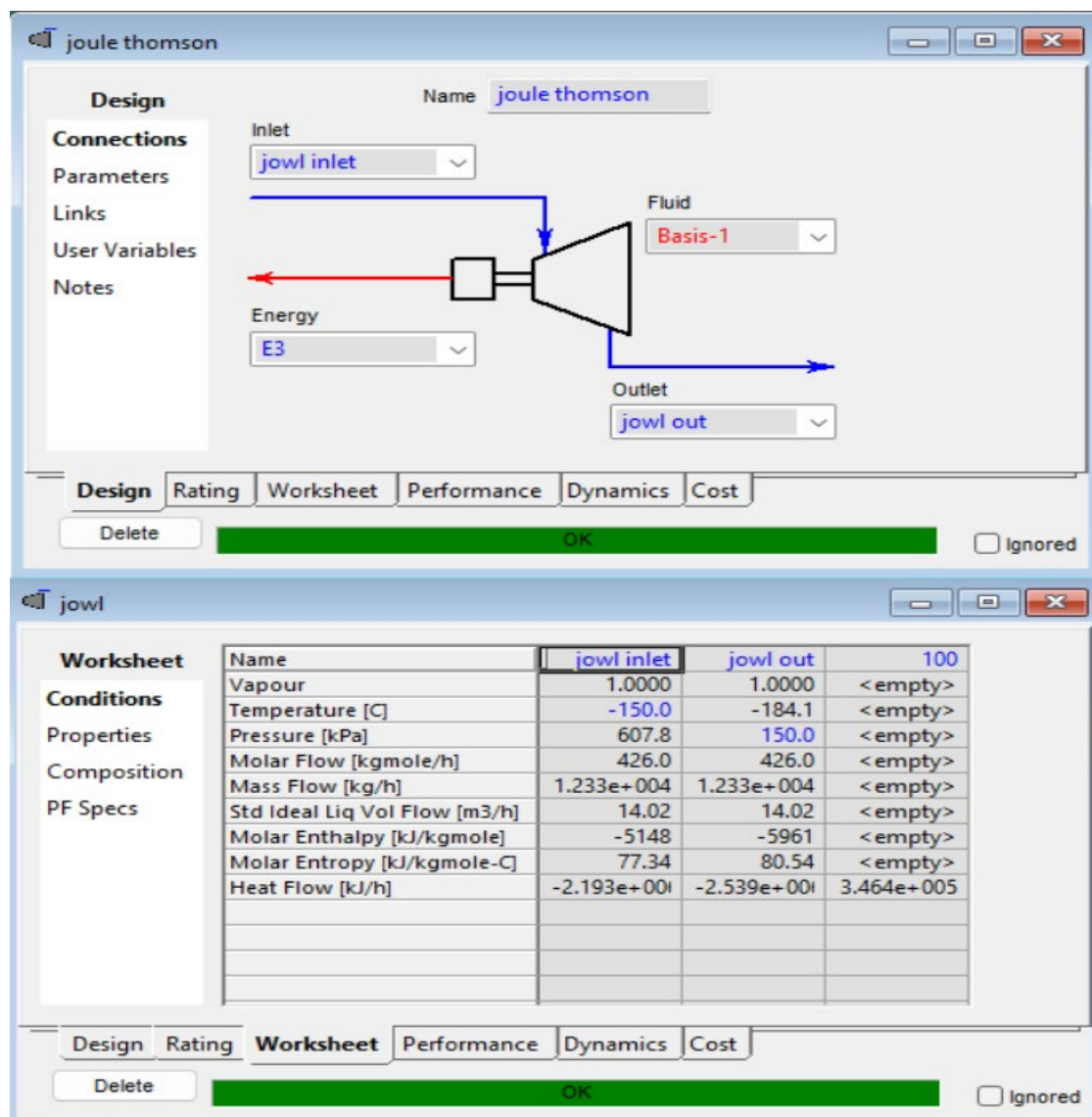
في نفس وقت يدخل مائع التبريد (النيتروجين السائل) عن طريق (shell inlet) بدرجة حرارة (-195.9 C°) وضغط (100Kpa).

ويخرج المائع عن طريق (shell outlet) بعد اكماله لعملية تبريد الهواء بدرجة حرارة (-180 C°) ويحدث انخفاض في الضغط أيضا بمقدار (0.1Kpa) فيصبح (99.9Kpa).

هنا يكون التدفق المولاري بمقدار (195kgmole/h) ثابتا عند دخول مائع التبريد وعند خروجه. كما في الشكل:

2.3-3-3 صمام جول-ثومسون (Joule Thomson):

وكما ذكرنا سابقا فهذا الصمام يعتمد على تغير الضغط من عالي الي منخفض بشكل مفاجئ لإتمام عملية الاسالة يدخل الهواء المبرد الي الصمام عن طريق (inlet) بدرجة حرارة (-150 C°) وضغط (607.8Kpa) . داخل الصمام يحدث انخفاض مفاجئ في الضغط يؤدي الي انخفاضه الي (150Kpa) هذا الانخفاض المفاجئ يعمل على خفض درجة الحرارة تباعا الي (-184.1 C°) ، وفي هذه المرحلة يصبح الهواء سائلا بعد خروجه من الصمام عن طريق (outlet) مع وجود طاقة ناتجة عن عمل الصمام وخفض الضغط (E3) تكون طاقة بسيطة جدا وغير مؤثرة. وفقا لما في الشكل:



(7-3) صمام جول-ثومسون
(Joule Thomson)

3-3-3 الفصل (Separation):

وهي العملية الأخيرة في منظومة التسييل وتعتمد بشكل كبير على برج الفصل الذي يعمل بمبدأ تغير الكثافة. حيث يترسب غاز الاوكسجين ذو الكثافة العالية عند درجة حرارة التسييل الخاصة به ويتصاعد غاز النيتروجين المشتق من الهواء نسبتاً لخفته وقلة كثافته عند درجة حرارة تسييل الاوكسجين.

3.1-3-3 برج الفصل (Separator):

يدخل الهواء المسال الي أبراج الفاصل عن طريق (inlet) ولا يحدث له أي تغيير في درجة الحرارة او الضغط او تدفقه المولاري.

ثم يتم فصله الي مكونين يخرجان من منفذين مختلفين:

- **Vapour:** و يخرج منه غاز النيتروجين لان درجة حرارته لم تصل الي درجة حرارة الاسالة و ظل في حالته الغازية كما هو.
- **Liquid outlet:** و يخرج منه الاوكسجين المسال بعد ان وصل الي درجة حرارة الاسالة. كما في الشكل:

separator

Design

Connections

Parameters

User Variables

Notes

Name separator

Inlets

jowl out
<< Stream >>

Energy (Optional)

Vessel Fluid Basis-1

Vapour

nitrogen gas

Extra Outlets

<< Stream >>

Liquid Outlet

liquefied oxygen

Design

Reactions

Rating

Worksheet

Dynamics

Sizing & Cost

Delete

OK

Ignored

separator

Worksheet

Conditions

Properties

Composition

PF Specs

Name	jowl out	liquefied ox	nitrogen ga
Vapour	1.0000	0.0000	1.0000
Temperature [C]	-184.1	-184.1	-184.1
Pressure [kPa]	150.0	150.0	150.0
Molar Flow [kgmole/h]	426.0	0.0000	426.0
Mass Flow [kg/h]	1.233e+004	0.0000	1.233e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	14.02	0.0000	14.02
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-5961	-1.128e+00	-5961
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	80.54	16.02	80.54
Heat Flow [kJ/h]	-2.539e+00	-0.0000	-2.539e+00

Design

Reactions

Rating

Worksheet

Dynamics

Sizing & Cost

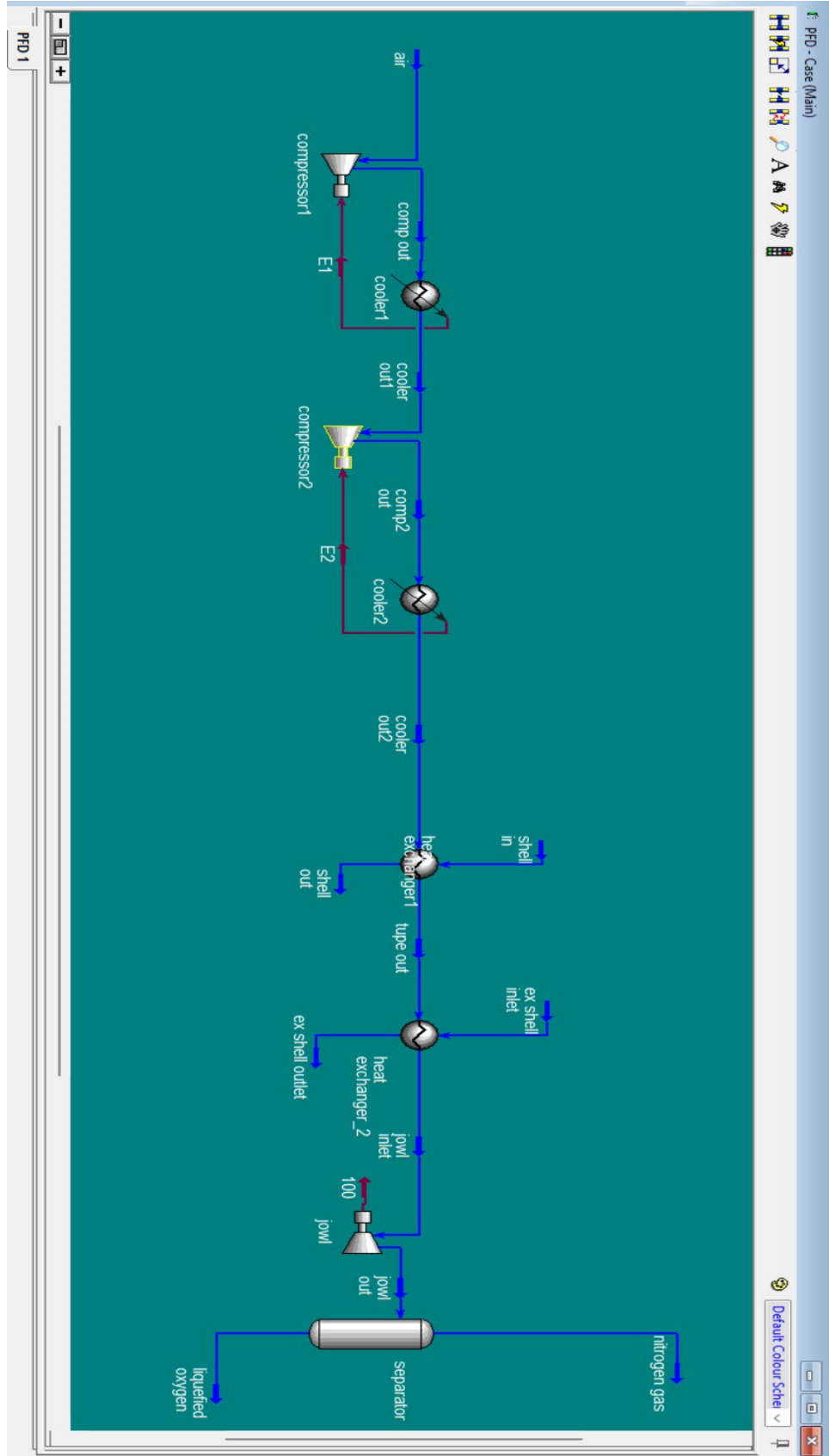
Delete

OK

Ignored

(Separator) الفاصل (8-3)

➤ المخطط التفصيلي للمنظومة:



(9-3) المخطط التفصيلي لمنظومة اسالة الاوكسجين باستخدام برنامج UNISIM.

الفصل الرابع

الخلاصة والتوصيات

Conclusion and Recommendations

1-4 الخلاصة (Conclusion)

يُعد هذا البحث استجابة تقنية وعلمية للحاجة المتزايدة للأكسجين السائل في القطاعات الطبية والصناعية، حيث ركز بشكل أساسي على بناء بيئة رقمية تحاكي الواقع لعمليات الإسالة. وقد خلص البحث إلى مجموعة من الاستنتاجات الجوهرية التي تعكس نجاح منهجية المحاكاة المتبعة:

➤ كفاءة المحاكاة العددية (Numerical Simulation Efficiency):

أثبتت النتائج أن استخدام برنامج (UniSim Design Suite) بالاعتماد على معادلة الحالة (Peng-Robinson) يوفر دقة عالية في التنبؤ بسلوك الأكسجين تحت ظروف الضغط العالي والتبريد الشديد. هذا النموذج الرقمي يمثل منصة اختبار آمنة ومرنة تتيح للمهندسين دراسة المنظومة قبل الانتقال لمرحلة التنفيذ المادي، مما يقلل بشكل كبير من التكاليف الرأسمالية والمخاطر التشغيلية.

➤ فعالية دورة الإسالة (Effectiveness of the Liquefaction Cycle):

أظهرت المحاكاة أن الوصول إلى درجة تسييل الأكسجين (حوالي -183°C) يتطلب تسلسلاً دقيقاً للعمليات يبدأ بالضغط متعدد المراحل لرفع كفاءة المنظومة، يليه تبريد مسبق لتقليل الحمل الحراري على المبادلات الرئيسية.

➤ دور صمام جول-طومسون (Role of the Joule-Thomson Valve):

أكدت الدراسة أن التمدد الفجائي عبر صمام جول-طومسون هو المرحلة الحاسمة التي تسببت في الانخفاض الحاد لدرجة الحرارة، مما مكن من تحويل الحالة الغازية إلى سائلة بكفاءة عالية.

➤ نقاء واستقرار المنتج (Product Purity and Stability):

من خلال نموذج برج الفصل المعتمد على اختلاف الكثافة ونقاط الغليان، نجحت المنظومة في فصل الأكسجين السائل وتخزينه بظروف مستقرة، مما يضمن تلبية الاحتياجات الطبية والصناعية المحددة في أهداف البحث.

➤ تحليل المتغيرات التشغيلية (Operational Parameters Analysis):

أوضحت المحاكاة وجود علاقة طردية بين كفاءة الإسالة وضغط الهواء الداخل، حيث ساهم التحكم الدقيق في نسب التدفق ودرجات الحرارة في الوصول إلى الحالة المستقرة (Steady-State) المطلوبة للمشروع

2-4 التوصيات (Recommendations)

بناءً على المخرجات التي تم التوصل إليها، نوصي بالآتي لتطوير البحث مستقبلاً:

➤ تحسين استهلاك الطاقة (Energy Consumption Optimization):

إجراء دراسات إضافية حول "تحليل الإكسرجي" (Exergy Analysis) لتقليل الفقد في الطاقة داخل المبادلات الحرارية والضواغط، مما يرفع الكفاءة الكلية للمنظومة.

➤ تطوير دورات التبريد (Refrigeration Cycles Development):

نقترح دراسة ومحاكاة دورات تبريد أكثر تعقيداً مثل "دورة كلود" (Claude Cycle) المتقدمة أو استخدام التوربينات التمددية (Turbo-expanders) بدلاً من صمامات التمدد التقليدية لزيادة كمية السائل المنتج.

➤ دراسة نقاء المنتج (Product Purity Study):

التوسع في محاكاة "أبراج التقطير المجزأ" (Fractional Distillation Columns) لضمان فصل الأكسجين عن النيتروجين والأرجون بنسب نقاء طبية وصناعية فائقة (أعلى من 99%).

➤ نظام التحكم والأمان (Control and Safety System):

إضافة دراسة محاكاة ديناميكية (Dynamic Simulation) لاختبار استجابة المنظومة لحالات الطوارئ وتغير الأحمال، وتصميم أنظمة تحكم آلي (Control Systems) لضمان استقرار التشغيل.

➤ الجدوى الاقتصادية (Economic Viability):

نوصي بإجراء دراسة جدوى مالية مفصلة تربط بين نتائج المحاكاة وتكاليف المعدات الحقيقية في السوق المحلي لتشجيع الاستثمار في هذا القطاع الحيوي.

المراجع (References) :-

- Adrian J. Finn, Hydrocarbon Processing, Developments in natural gas liquefaction, April 1999.
- R. Grotenrath, A. Kashani, D. Hauser, and W.L. Johnson, Materials Science and Engineering, Analysis of oxygen liquefaction with transient flow rates for ISRU systems,2022.
- Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood, Handbook of Liquefied Natural Gas, frt.ed.2014.
- Manish Jha, Nayanika Gaur, Journal of Family Medicine and Primary Care, Life cycle of medical oxygen from production to consumption,2022.
- Yaoyao Chen, Zhen Wang, Xueli Mei, Qunying Wang, Hongtao Xie, Yizhao Li, Energy Mater, Nitrogen and oxygen-codoped dense porous carbon enhancing ion adsorption for high-volumetric performance supercapacitors,2025.
- Faidra Papanelopoulou, Royal Society, LOUIS PAUL CAILLETET: THE LIQUEFACTION OF OXYGEN AND THE EMERGENCE OF LOW-TEMPERATURE RESEARCH,2013.
- SCIENCE, THE LIQUEFACTION OF OXYGEN.1,1885.