

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NİTROJEN JENERATÖRLERİNİN TERMODİNAMİK
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GİZEM TÜRKER

DENİZLİ, OCAK - 2022

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



NİTROJEN JENERATÖRLERİNİN TERMODİNAMİK
MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GİZEM TÜRKER

DENİZLİ, OCAK - 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

GİZEM TÜRKER

İMZA

ÖZET

**NİTROJEN JENERATÖRLERİNİN TERMODİNAMİK
MODELLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
GİZEM TÜRKER
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. RASİM KARABACAK)**

DENİZLİ, OCAK - 2022

Hava ayrıştırma endüstrisi; pratikte yaygın olarak kullanılan oksijen, nitrojen ve argon gazlarının üretimini ele alır. Herhangi bir tesisin anlık ihtiyacı olması durumunda bu elementlerin elde edilebilmesi amacıyla çalışılmıştır.

Saflık oranının maksimum düzeyde olabilmesi için kriyojenik hava ayrıştırma yöntemi seçilerek, membranlı ve adsorpsiyonlu hava ayrıştırma yöntemlerine nazaran yüksek saflıkta nitrojen eldesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, hava ayrıştırma ünitesinin ChemSemp programı üzerinde simülasyonu yapılmış olup, gerçekçi bir simülasyon olması için bir firmadaki yaygın kullanılan sistem, termodinamik açıdan yeniden optimize edilmiştir. Girdi parametreleri olarak 100 kg/s debi, 1,1 bar basınç ve 25°C sıcaklıktaki hava seçilmiştir. Simülasyonda her bir sistem elemanı için isimlendirme yapılmış, sistemin akış şeması oluşturulmuştur.

Simülasyon sonuçlarında sistemin tüm elemanlarının düğüm noktalarına ait toplam entalpi ve toplam entropi değerleri hesaplanmıştır. Nitrojen üretiminde kritik öneme sahip yüksek basınç kolonu için simülasyon programında ayrı çözümlenmeler yapılarak; N₂ üretim düğümlerindeki basınç-entalpi ve sıcaklık-entropi değerleri bulunmuştur. Ayrıca üretim tesisindeki anlık son ürün debileri N₂ için <1 ppm Ar saflıkta 1,1 bar basınçta 14,4 kg/s, O₂ için %98,5 saflıkta 1,1 bar basınçta 17,07 kg/s, Ar için <1 ppm O₂ saflıkta 1.2 bar basınçta 0,31 kg/s debi elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: nitrojen, distilasyon, hava ayrıştırma ünitesi

ABSTRACT

THERMODYNAMIC MODELLING OF NITROGEN GENERATORS

MSC THESIS

GİZEM TÜRKER

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. RASİM KARABACAK)

DENİZLİ, JANUARY 2022

Air separation industry deals with the production of oxygen, nitrogen and argon gases commonly used in practice. This study aims to obtain these elements in case of instantaneous need of any facility.

In order to maximize the purity rate, the cryogenic air separation method was chosen, and it was aimed to obtain high purity nitrogen compared to the membrane and adsorption air separation methods.

In this study, the air separation unit was simulated in the ChemSemp program, and the system widely used in a company was thermodynamically re-optimized and made into a realistic simulation. Air at 100 kg/s flow rate, 1.1 bar pressure and 25°C temperature was selected as input parameters. In the simulation, naming was made for each system elements and the flow chart of the system was created. In the simulation results, the total enthalpy and total entropy values of the nodes of all the elements of the system were calculated. By making separate analyzes in the simulation program for the high pressure column, which is critical in nitrogen production; Pressure-enthalpy and temperature-entropy values in N₂ generating nodes were found. In addition, instant end product flows in the production facility were obtained as 14.4 kg/s flow rate at 1.1 bar pressure with < 1 ppm Ar purity for N₂, 17.07 kg/s flow rate at 1.1 bar pressure with 98.5% purity for O₂, and 0.31 kg/s flow rate at 1.2 bar pressure with < 1 ppm O₂ purity for Ar, respectively.

KEYWORDS: nitrogen, distillation, air separation plant

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. ÇALIŞMANIN ENDÜSTRİDEKİ ÖNEMİ.....	7
3.1 Havanın Özellikleri	7
3.2 Hava Ayırma Teknolojileri.....	10
3.2.1 Kriyojenik Hava Ayırma Yöntemi	13
3.2.1.1 Kriyojenik Hava Ayırma Yöntemi.....	14
3.2.2 Havanın Temizlenmesi	19
Karbondiyoksit uzaklaştırılması:.....	19
Asetilenin uzaklaştırılması:	20
3.2.3 Havanın Sıkıştırılması.....	20
3.2.4 Havanın Soğutulması	22
3.2.5 Havanın Distilasyonu.....	22
Hava Distilasyon Kolonu	23
3.3 Hava Ayırma Ürünleri ve Diğer Uygulamalar	24
3.3.1 Oksijen:	24
3.3.1.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler.....	24
3.3.1.2 Kullanım Alanları ve Faydaları.....	25
3.3.1.3 Endüstriyel Kullanım Alanları	26
3.3.2 Nitrojen	26
3.3.2.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler.....	27
3.3.2.2 Kullanım Alanları ve Faydaları:.....	27
3.3.2.3 Endüstriyel Kullanım Alanları	28
3.3.3 Argon	28
3.3.3.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler.....	28
3.3.3.2 Kullanım Alanları ve Faydaları.....	29
3.3.3.3 Endüstriyel Kullanım Alanları	29
3.3.3.4 Fiziksel ve kimyasal özellikler.....	30
3.3.3.5 Kullanım Alanları ve Faydaları.....	30
3.3.3.6 Endüstriyel kullanım	30
3.4 Düşük Sıcaklıklarda Hava Ayırma Teknolojileri.....	31
3.4.1 Joule-Thomson Etkisi	32
3.4.2 Havanın Sıvılaştırılması Prosesi (Dr. Carl von Linde Prensi) ..	33
4. BİR HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ EKİPMANLARININ TANITILMASI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ	35
4.1 HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ SOĞUK BÖLÜMÜ.....	36
4.1.1 Hava Emiş Filtresi	36
4.1.2 Havanın Basınçlandırılması	37

4.1.3	Sprey Kule	38
4.1.3.1	Evaporatif Kule	40
4.1.4	Molsieve Ünitesi	41
4.1.5	Booster Hava Kompresörü.....	42
4.1.6	Genleşme Türbini ve Körüğü	42
4.2	HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ SOĞUK BÖLÜMÜ.....	43
4.2.1	Ana Isı Değişiriciler.....	44
4.2.2	Yüksek Basıncılı (Alt) Kolon	44
4.2.3	Düşük Basıncılı (Üst) Kolon.....	45
4.2.4	Kondenser (Reboiler).....	45
4.2.5	Ham Argon Kolonları	46
4.2.6	Saf Argon Kolonu	46
5.	ÇALIŞMANIN TERMODİNAMİĞİ	47
5.1	Devre Ekipmanlarının Termodinamik Modellenmesi.....	47
5.2	Kompresör Verimliliği	49
5.3	Genleşme Türbini Verimi.....	51
5.4	Güç Tüketimleri.....	54
6.	ÇALIŞMANIN SİMÜLASYONU	56
6.1	ChemSep Programının Algoritma Mantığı	56
6.2	Çalışmanın Simülasyonu	57
7.	SONUÇLAR.....	66
8.	KAYNAKLAR.....	76
9.	EKLER	78
	EK A	78
	EK B	79
	EK C	80
10.	ÖZGEÇMİŞ.....	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Havanın bileşenleri	7
Şekil 3.2: Havanın yoğunluğunun basınç ve sıcaklıklara göre değişimi	10
Şekil 3.3: Hava ayırma şeması	11
Şekil 3.4: Nitrojen üretim süreci seçim diyagramı	12
Şekil 3.5: Oksijen üretim süreci seçim diyagramı	13
Şekil 3.6: Basit adımlarla hava ayırıştırma tesisi	16
Şekil 3.7: Kriyojenik hava ayırma akış diyagramı	18
Şekil 3.8: Hava sıkıştırmalı ve su soğutmalı soğutma makinesinin şeması ve h-s diyagramı	20
Şekil 3.9: Hava distilasyon kolonu	23
Şekil 3.10: Joule-Thomson Efektine göre T-S diyagramı	32
Şekil 3.11: Türbinin T-S diyagramı	32
Şekil 3.12: Linde prensibi ile havanın likitleştirilmesi	33
Şekil 3.13: Kaynama diyagramı	34
Şekil 4.1: Proses akış şeması	35
Şekil 4.2: Ana hava kompresörü kademe ve soğutucuları akış şeması	38
Şekil 4.3: Sprey kule akış şeması	39
Şekil 4.4: Sprey kule ve evaporatif su soğutma sistemi akış şeması	40
Şekil 4.5: Molsieve ünitesi akış şeması	41
Şekil 4.6: Booster hava kompresörünün kademe ve soğutucuları akış şeması	42
Şekil 4.7: Genleşme türbini ve körüğü akış şeması	43
Şekil 5.1: Genleşme türbinindeki sıcak ve soğuk kısım için T-s diyagramı ..	53
Şekil 6.1: ChemSep programının denge halinin şematik diyagramı.....	56
Şekil 6.2: 1. kademe kompresör şeması	58
Şekil 6.3: 2. kademe kompresör şeması.....	59
Şekil 6.4: 3. kademe kompresör şeması.....	60
Şekil 6.5: Sistemin simülasyon programında konfigüre edilmesi.....	64
Şekil 7.1: Hava ayırma ünitesindeki akış profilleri	66
Şekil 7.2: Basınç-entalpi değişimi (12. Düğüm noktası)	67
Şekil 7.3: Sıcaklık-entropi değişimi (12. Düğüm noktası)	68
Şekil 7.4: Basınç-entalpi değişimi (13. Düğüm noktası)	69
Şekil 7.5: Sıcaklık-entropi değişimi (13. Düğüm noktası)	70
Şekil 7.6: Basınç-entalpi değişimi (14. Düğüm noktası)	71
Şekil 7.7: Sıcaklık-entropi değişimi (14. Düğüm noktası)	72
Şekil 7.8: Son ürün debileri	73

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Hava Bileşenlerinin Bazı Özellikleri	8
Tablo 3.2: 175-500 K sıcaklık aralığında havanın bazı özellikleri	9
Tablo 4.1: Filtre sınıfları ve uygulama alanları	35
Tablo 6.1: C1 kompresörünün simülasyon sonuçları.....	57
Tablo 6.2: H1 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları	57
Tablo 6.3: C2 kompresörünün simülasyon sonuçları	58
Tablo 6.4: H2 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları	59
Tablo 6.5: C1 kompresörünün simülasyon sonuçları.....	59
Tablo 6.6: H3 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları	60
Tablo 6.7: S1 demet ayırıcısının simülasyon sonuçları	60
Tablo 6.8: H4 eşanjörünün simülasyon sonuçları.....	61
Tablo 6.9: H5 eşanjörünün simülasyon sonuçları.....	61
Tablo 6.10: HPC yüksek basınç kolonunun simülasyon hesapları	62
Tablo 6.11: LPC düşük basınç kolonunun simülasyon hesapları	62
Tablo 7.1: ChemSep simülasyon programı ile Aspen simülasyon programının karşılaştırılması.....	72

SEMBOL LİSTESİ

μm	: mikrometre
E	: enerji
U	: iç enerji (kJ)
PE	: potansiyel enerji (kJ)
KE	: kinetik enerji (kJ)
P	: basınç (bar, Pa)
m	: kütle (kg)
g	: yer çekimi (m/s^2)
z	: yükseklik (m)
$V_{\text{ç}}$: sistemden çıkan akış hızı (m/s)
V_{g}	: sisteme giren akış hızı (m/s)
η	: verim
h	: entalpi (J/mol)
s	: entropi (J/mol K)
η_1	: 1.yasa verimi
η_{11}	: 2.yasa verimi
η_T	: türbin izantropik verimi
η_K	: kompresör izantropik verimi
η_p	: pompa izantropik verimi
\dot{m}	: kütleli debi (kg/s, mol/s)
W	: iş (Nm, J)
W_s	: izentropik özgül iş (J/kg.K)
Q	: ısı (J)
\dot{S}	: entropi üretimi (J/mol.K)
W_{tr}	: tersinir iş (J)
W_y	: faydalı iş (J)
T_y	: yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
W_e	: elektrik enerjisi girişi (J)
Q_e	: ısı çıkışı (J)
h_g	: giriş entalpisi (kJ/kmol)
$h_{\text{ç}}$: çıkış entalpisi (kJ/kmol)
$h_{i\text{ç}}$: ideal çıkış entalpisi (kJ/kmol)
$Q_{\text{gerçek}}$: kompresörden çekilen gerçek ısı (kJ/kmol)
Q_{ideal}	: kompresörden çekilen ideal ısı (kJ/kmol)
η_K	: kompresör verimi
c_p, c_v	: özgül ısı kapasitesi (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)
μ	: dinamik viskozite (Pa.s)
v	: kinematik viskozite (m^2/s)
k	: termal iletkenlik (W/mK)
D	: özgül nem oranı (kg su buharı/hava)
H	: ıslak havanın entalpisi (kJ/kg)

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda tez konumun belirlenmesinden son aşamaya gelmesine kadar bana yol gösteren ve değerli vaktini esirgemeyen, çalışmanın her safhasında desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Rasim Karabacak'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyerek çalışmama katkıda bulunan Sayın Öğretim Görevlisi Abdullah M. Mutluel'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Sayın Sevcan Türker hanımefendiye, kardeşim, yoldaşım Fatoş Türker'e, aileme teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Yerküreyi çevreleyen bir atmosferik gazın olduğu bilinmektedir. Kimyasal teknoloji göz önünde bulundurulduğunda havada bulunan bileşenlerin (Nitrojen, Oksijen, Argon vb.) endüstride yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu atmosferik gazların en önemli bileşenlerinden birisi nitrojen (azot) dir. Atmosferik kuru havanın %79'u nitrojen gazından meydana gelmektedir. Havanın ayrıştırılması prosesleri araştırıldığında nitrojenin atıl bir gaz olması nedeniyle kullanım alanları içinde kimyasal prosesler olarak öne çıkmaktadır. Dünya üzerinde çelik, kimya, yarı iletken, havacılık, ilaç sanayi başta olmak üzere bitkisel yağ üretiminde, plastik enjeksiyon üretim proseslerinde, ısıl işlem proseslerinde, denizcilik, petrokimya endüstrisinde ve yangın önleme, laboratuvar ve genel endüstriyel alanlar dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde büyük miktarlarda yüksek saflıkta hava ürünleri kullanılmaktadır.

Hava çok düşük sıcaklıklarda (-196°C) sıvı hale gelir ve böylece hava ayrıştırılarak bileşenlerine ayrılabilir. Endüstriyel ölçekte yüksek saflıkta oksijen, nitrojen, argon elde edilebilmesi için havanın damıtılması kullanılan en yaygın hava ayrıştırma yöntemidir. Burada hava ayırma ünitesi ile nitrojen ve oksijen sistemden elde edilmektedir. Yüksek saflıkta oksijen ve nitrojen gerektiren sistem ise Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi (IGCC) prensibi ile çalışmaktadır.

1895'te Dünyanın ilk pilot hava sıvılaştırma tesisi üretim yapabilme kabiliyetinde yapılmıştır. Ticari anlamda büyük yol kat edilen bu uygulamadan sonra 1904 yılında dünyanın ilk hava ayırma tesisi ile nitrojen üretimi sağlanmıştır. 1910 yılında çift kolon kullanan dünyanın ilk hava ayırma tesisi yapılmıştır. 1950 yılında ise basınçlı ve geri dönüşümsüz taş dolgulu reaktörlü oksijen tesisi ilk olarak Linde-Frankl ve 1954 yılında emiciler kullanılarak dünyanın ilk hava ayrıştırma tesisi yapılmıştır. 1984 yılında dünyanın en büyük değişken oksijen ayarlı VAROX hava ayırma tesisi, 1990 yılında ise dünyanın ilk insansız hava kontrollü hava ayrıştırma tesisi ile saf argon elde edilmiştir. 1991 yılında dünyanın en büyük dolu kolonlu hava ayrıştırma tesisi, 1992 yılında mega hava ayrıştırma tesisleri saf gazlar üretmeye

başlamıştır. 1997 yılında Linde yeni bir dönüm noktası oluşturarak; hava ayırıştırma tarihinde bir ilke imza atmıştır. Her biri kendi içinde dört nitrojen üretim hattı sağlayarak; şimdiye kadar yapılmış en büyük hava ayırma tesisini oluşturmuştur. Azot kapasitesi 40.000 ton/gün olarak kaydedilmiştir. 2000 yıllarında ise çok kademeli kondenserin geliştirilmesiyle nitrojen, oksijen ve argonun ayrılarak günümüz teknolojisinde elde edilmesi sağlanmıştır (Linde, 2002).

Hava ayırma teknolojisinin kullanımı, birçok üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası haline geldi. Hava ayırıştırma prosesi ile elde edilen oksijen, nitrojen ve argon gazlarının endüstride yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Oksijen için en büyük pazarlar birincil metal üretimi, kimyasallar ve gazlaştırma, kil, cam ve beton ürünleri, petrol rafinerileri ve kaynak prosesleri en yaygın kullanılan alanlardandır. Tıbbi oksijen kullanımı ise günümüzde artan bir pazar haline gelmiştir. Gaz halindeki nitrojen (azot), kimya ve petrol endüstrilerinde kullanılmakta olup, ayrıca inert bir gaz olan azot özellikleri nedeniyle elektronik ve metal endüstrileri tarafından da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı nitrojen, plastiklerin kriyojenik öğütülmesinden gıda dondurmaya kadar değişen uygulamalarda kullanılmaktadır. Havanın üçüncü ana bileşeni olan argon ise; esas olarak kaynak, çelik üretimi, ısıl işlem ve elektronik üretim süreçlerinde inert bir malzeme olarak kullanım bulmuştur.

Havanın bileşenlerine ayrılması, yüksek yoğunluklu bir süreçtir. Geçmişte hava ayırma proseslerini tasarlayan şirketler, nitrojen üretimi açısından değişikliklere giderek, gerekli enerjiyi, birçok yaygın tüketici ürününden daha az olan belirli bir noktaya kadar düşürmüşlerdir. Fakat bu ilgi çeken sonuç, süreç tasarımı, süreç operasyonu, üretim yaklaşımları ve teknikleri ve tedarik zinciri yönetimindeki gelişmeler ile sağlamıştır. Proses tasarımları, kütle ve enerji entegrasyonunu giderek daha fazla kullanılmaya başlamıştır. İkame edilen süreç operasyonları ise gereksinimlere göre daha geniş bir ürün yelpazesinde verimli çalışma yeteneğini ve üretkenlik miktarını önemli ölçüde arttırmıştır. Tedarik zinciri iyileştirmeleri, iyileştirilmiş satın alma uygulamalarından, ürün teslimatının optimize edilmiş zaman yönetiminden ve ayrı tesislerin koordineli çalışmasına kadar uzanmaktadır.

Bu çalışma, ısı değişimi ve kriyojenik ayırıştırma dahil olmak üzere hava ayırma sürecini tanımlamayı amaçlamaktadır. Havanın en önemli bileşenleri nitrojen (N_2), oksijen (O_2) ve argon (Ar)dur. Bu bileşenlerin ayırıştırılması prosesinde her

bileşeni ilgilendiren farklı durumlar söz konusudur. Bu durumları açıklamak için nitrojen (N_2), oksijen (O_2) ve argonun (Ar) bir simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hava ayrıştırma prosesleri ile ilgili literatürde yer alan araştırmalardan oluşan çalışmalar aşağıda sunulmaktadır:

Tesch ve diğ. (2017) endüstriyel çapta bir hava ayrıştırma tesisini incelemiştir. İnceleme yaptıkları bu çalışmada enerji ve ekserji konularını araştırmışlardır. Tesisin ekserji analizi çalışmasında dört ayrı durum için sistem konfigürasyonu yaparak ekserji verimini hesaplamışlardır. Yaptıkları hesaplamalar farklı durumlar için %42,85 ila %54,34 arasında değişiklik göstermiştir.

Aneke ve diğ. (2015) hava ayrıştırma tesislerinde, ASPEN Plus programı ile modelleme ve simülasyon yöntemi kullanılarak hava ayrıştırma proseslerinin enerji verimliliğinin artırılması potansiyelini araştırmışlardır. Isı değiştiricilerinde soğutma sıvısı olarak kullanılan su, ikinci modelde soğutucu akışkan R134a ile değiştirilerek meydana gelen ısı kaybı geleneksel hava ayrıştırma sistemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarında kriyojenik hava ayrıştırma sistemlerinin enerji yoğunluklu prosesler olduğunu vurgulamışlardır. Enerji tüketiminin büyük bir kısmının nitrojen kompresörleri ve hava kompresörlerinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Tesiste enerji verimliliği sağlanarak yüksek saflıkta ürün üretilmesi için kompresörler ve ısı değiştiricilerinin enerji verimliliklerinin farklı soğutucu sistemleri kullanılarak iyileştirilmesi ve tam zamanlı kontrol sistemlerinin kullanılarak enerji tasarrufunun sağlandığı çalışma bulguları ile gösterilmiştir.

Thorogood (1991) yapmış olduğu çalışmada, son birkaç yılda hava ayrıştırma teknolojisindeki önemli gelişmeleri incelemiştir. Çalışmada nitrojen üretiminde enerji tüketimini azaltmak ve argon geri kazanımını arttırmak için gerçekleştirilen önemli iyileştirmeleri, yeni oksijen teknolojilerinin, gaz türbini kombine çevrimi ile enerji üretimi prosesini ele almışlardır. Araştırmalarının sonucuna göre yeni teknolojiler ile nitrojen ve argon üretim miktarlarının, son on yıl içerisinde %50 ile %60 oranında arttığını belirtmiştir.

Ebrahimi ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmalarında, endüstriyel alanda saf oksijen ve nitrojen üretimi için kullanılan iki kolonlu kriyojenik hava ayrıştırma tekniğini araştırmışlardır. Simülasyon verilerini kullanarak enerji, ekserji ve ekonomik

değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Sonuçlar damıtma ve sıkıştırma ünitelerinde sırası ile %34,48 ve %52,89 ekserji yıkımı olduğunu göstermiştir. Çalışmada sistemin ekonomisi incelenmiştir.

Mahmutoğlu (2016) yaptığı çalışmasında; bir hava ayırıştırma tesisinde proses aşamalarını ayrıntılı olarak işlemiş olup, Joule-Thomson teoremini açıklamıştır. Uygulamaları ve gelişen sistemlerde aktifleşmesi için teorem irdelenmiştir. Aynı zamanda tesis için yatırım ve üretim maliyet analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda kurulum maliyetinin 5 yılda geri kazanılabileceği belirtilmiştir.

Karabuğa (2016) çalışmasında hava ayırıştırma ünitesine entegre gerçek bir nitrojen sıvılaştırma ünitesinin enerji ve ekserji analizini incelemiştir. Yapılan nümerik hesaplamalarda ve grafik çizimlerinde EES programı kullanılmıştır. Termodinamik yasalar çerçevesinde incelenen nitrojen sıvılaştırma ünitesinin $COP_{gerçek}$ ve $COP_{tersinir}$ değerlerini sırasıyla 0,28 ve 0,77 olduğu tespit edilmiştir. Sistemin ekserji verimi ise %36 olarak hesaplanmıştır.

Ersoy (2015) çalışmasında, 250 ton/gün kapasiteli bir kriyojenik hava ayırıştırma ünitesini termodinamik ve ekonomik olarak incelemiş olup, sistemin cihaz ve ekipmanların enerji ve ekserji verimliliklerini belirlemiştir. Tesisin şebekeden 7,77 MW güç ile beslenmesi durumu için birim ürün maliyetini hesaplamıştır. Mevcut tesisin, trijenerasyon sistemi ile entegre olarak çalıştığı belirtilmiştir. Trijenerasyon sisteminde elde edilen enerjinin kullanımı ile harcanan 7,7 MW güç, 5,5 MW'a düşürülmüştür. Hava Ayırıştırma Tesisi için tüm gücün trijenerasyondan karşılanması hedeflenerek bir 5,5 MW elektrik üretimi kapasitesine sahip, gaz türbinli, doğalgaz yakıtlı, tek kademe absorpsiyona sahip soğutma sistemli trijenerasyon ünitesi tasarlanmıştır. Çalışma sonucunda kompresör ekserji veriminin %18, enerji veriminin %25 arttığı görülmüştür. Tesisin enerji verimi %63'ten %82'ye, ekserji verimi %23'ten %35'e yükselmiştir. Trijenerasyon ile işletilecek tesisin ürün maliyetinde %33 azalma olduğu görülmüştür.

M. Variny ve diğ. (2019) bir hava ayırıştırma prosesinde Humayun ve diğ. (2019)'nin çalışmasına atıfta bulunarak buradaki eksiklikleri ortaya çıkarmışlardır. Aşırı basitleştirilmiş olan çalışmasındaki simülasyon için yanlış araçların seçilmesi ve bazı teknolojik yönlerin ihmal edilmesi nedeniyle zayıf noktalarını bulmuşlardır. Bu

çalışmada Peng-Robinson denklemlerini kullanan Variny vd. Aspen Plus ve Aspen HYSYS programlarını kullanarak bilimsel açıdan zayıflıkları listelemişlerdir.

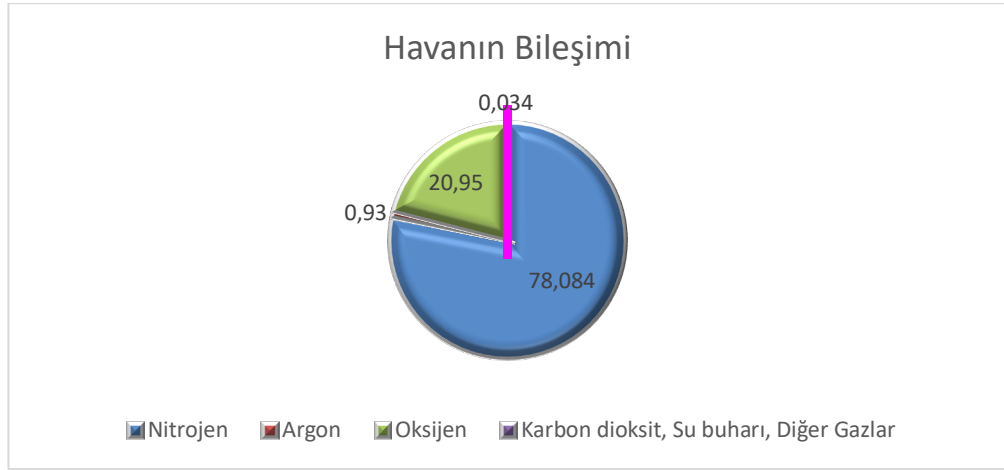
Q. Fu ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada kendinden ısı geri kazanım teknolojisine dayalı, oksijen yanma için gelişmiş bir kriyojenik hava ayırma işlemi önerilmiştir. Klasik kriyojenik hava ayırma işlemindeki çift kolonların aksine, önerilen süreçte sadece tek bir damıtma kolonu kullanılmaktadır. Kendi kendine ısı geri kazanım teknolojisi kullanılarak, tek damıtma kolonundan gelen N_2 ürün gazının ısısı, alt ve besleme akışlarındaki sıvı O_2 ile ısı alışverişi yapmaktadır. Burada yeniden sirküle edilmesi sonucunda enerji gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Fu ve vd. yaptıkları çalışmaları Peng-Robinson durum denklemini kullanarak tesisi simüle etmişlerdir ve sonuç olarak önerilen kriyojenik hava ayırma işleminin enerji gereksiniminin, düşük saflıkta (%95 mol) O_2 üretirken geleneksel işleme kıyasla %20,2 oranında azaldığını göstermişlerdir. Kompresör veriminin, ana kondenserdeki minimum sıcaklık farkının ve O_2 ürün saflığının enerji ihtiyacı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

D.K. Bhunya (2014) yapmış olduğu çalışmada, kriyojenik hava ayırma tesisini Aspen HYSYS simülasyon programında modellemiştir. Bu çalışma sonucunda %98,889 saflıkta Oksijen, %99,1513 saflıkta Nitrojen, %100 saflıkta Argon elde etmiştir. Başlangıçta 101,3 kPa çalışma basıncı ve 4521 kmol/h debili hava ile sisteme giriş yaptığı kabul edilmiştir. Buradan molar akış oranlarını Oksijen için 943,1 kgmol/h, Nitrojen için 3553 kgmol/h Argon için ise 16,90 kgmol/h olarak hesaplamıştır.

3. ÇALIŞMANIN ENDÜSTRİDEKİ ÖNEMİ

3.1 Havanın Özellikleri

Havanın bileşenleri incelendiğinde, yaklaşık %78 nitrojen, %21 oksijen ve %0,1'lik kısım ise inert gaz olan argon, karbondioksit ve diğer gazlardan meydana geldiği bilinmektedir. Havanın bileşenlerinin oranları atmosfer basınç koşullarında Şekil 3.1'de gösterilmektedir. İntert olarak nitelendirilen diğer gazlar neon, helyum, kripton ve ksenon olarak Tablo 3.1'de belirtilmiştir.



Şekil 3.1: Havanın bileşenleri.

Kuru Hava: Kuru hava, ana bileşenler için incelendiğinde bileşim bakımından nispeten saf madde gibidir. Ortam havası, atmosfer basıncı koşullarında hacimce yaklaşık %5'e kadar su içeriğine sahip olabilmektedir. Bu nedenle hava ayırma ve ürün saflaştırma proseslerinde bir veya daha fazla noktada uzaklaştırılan ve genellikle eser miktarda yer alan bir dizi başka gazlar bulunmaktadır.

Kuru havadaki en baskın iki bileşen: Oksijen ve Nitrojen'dir. Oksijen atomik birim kütlesi 16 ve Nitrojen atomik birim kütlesi ise 14'tür. Bu öğelerin her ikisi de havada iki atomlu (O_2 ve N_2) olarak yer almaktadır. Oksijenin moleküler kütlesi 32 ve Nitrojenin moleküler kütlesi ise 28'dir. Tablo 3.1'de hava bileşenlerinin bazı özellikleri gösterilmiştir. Tablo 3.2'de ise 170-500 K arasında havaya ait bileşenlerin özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Hava bileşenlerinin bazı özellikleri.

Gaz Tipi	Kuru Havaya Göre Oran		Moleküler Kütle M,kg/kmol	Kimyasal Sembol	(K)
	Hacim Olarak	Ağırlık Olarak			
Oksijen	20,95	23,20	32,00	O ₂	90,2
Nitrojen	78,09	75,47	28,02	N ₂	77,4
Karbon Dioksit	0,03	0,046	44,01	CO ₂	194,7
Hidrojen	0,00005	0	2,02	H ₂	20,03
Argon	0,933	1,28	39,94	Ar	84,2
Neon	0,0018	0,0012	20,18	Ne	27,2
Helyum	0,005	0,00007	4,00	He	4,2
Kripton	0,0001	0,0003	83,8	Kr	119,8
Ksenon	9. 10 ⁻⁶	0,00004	131,29	Xe	165,1

Havadaki Diğer Bileşenler

- Sülfür Dioksit (SO₂)-1,0 ppm
- Metan (CH₄)-2.0 ppm
- Nitrojen Dioksit (NO₂)-0,5 ppm
- Ozon (O₃)-0,5 ppm
- İyot (I₂)-0,01 ppm
- Karbon Monoksit (CO), Amonyum (NH₄⁺)

175 – 500 K arasında değişen sıcaklıklarda kuru hava özellikleri Tablo 3.2’de belirtilmiştir.

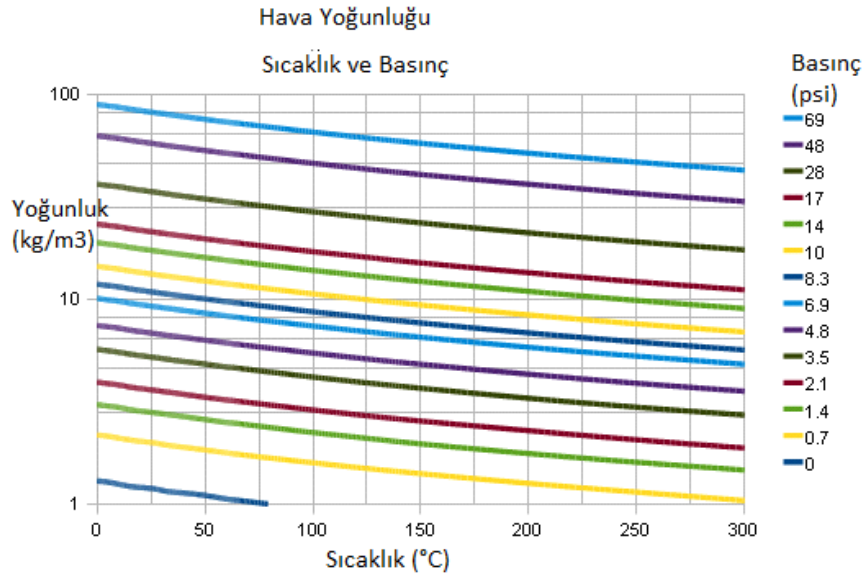
Tablo 3.2: 175-500 K sıcaklık aralığında havanın bazı özellikleri.

Sıcaklık (K)	Özgül Isı Kapasitesi		Özgül Isıların Oranı	Dinamik Viskozite (μ) (Pa. s)	Termal iletkenlik (k) $\left(\frac{W}{m. K}\right)$	Prandtl Sayısı (Pr)	Kinematik Viskozite (ν) $\left(\frac{m^2}{s}\right)$	Yoğunluk (ρ) (kg/l)
	(c_p) $\left(\frac{kcal}{kg. ^\circ C}\right)$	(c_v) $\left(\frac{kcal}{kg. ^\circ C}\right)$						
175	1,0023	0,7152	1,401	1,182	1,593	0,744	0,586	2,017
200	1,0025	0,7154	1,401	1,329	1,809	0,736	0,753	1,765
225	1,0027	0,7156	1,401	1,467	2,020	0,728	0,935	1,569
250	1,0031	0,7160	1,401	1,599	2,227	0,720	1,132	1,412
275	1,0038	0,7167	1,401	1,725	2,428	0,713	1,343	1,284
300	1,0049	0,7178	1,400	1,846	2,624	0,707	1,568	1,177
325	1,0063	0,7192	1,400	1,962	2,816	0,701	1,807	1,086
350	1,0082	0,7211	1,398	2,075	3,003	0,697	2,056	1,009
375	1,0106	0,7235	1,397	2,181	3,186	0,692	2,317	0,9413
400	1,0135	0,7264	1,395	2,286	3,365	0,688	2,591	0,8824
450	1,0206	0,7334	1,391	2,485	3,710	0,684	3,168	0,7844
500	1,0295	0,7424	1,387	2,670	4,041	0,680	3,782	0,7060

Ortak basınç birimleri sıklıkla atmosfere alternatif olarak kullanılmakta olup
760 mmHg atmosfer basıncı cıva sütunu;

- 29,921 in
- 10,332 mss
- 406,78 inH₂O
- 33,899 ftH₂O
- İnç Kare Başına 14.696 Pound-Kuvvet
- 2116,2 Pound-Foot Kare Başına Kuvvet
- 1,033 Kilogram-Santimetre Kare Başına Kuvvet
- 101,33 kPa değerine eşittir.

Oksijen, üç ana bileşendeki O₂, N₂, Ar) en yüksek kaynama noktasına sahip elementidir ve alçak basınç (LP) sütununun altında yer almaktadır. Nitrojen, alçak basınç veya yüksek basınç kolonlarının tepesinden alınır. Bir argon zengin akışı, düşük basınç kolonunun ortasından çekilen diğer damıtma kolonlarında ürün olabilir. Hava yoğunluğunun basınç ve sıcaklığa göre değişimi Şekil 3.2 de verilmiştir (URL-1: www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html).

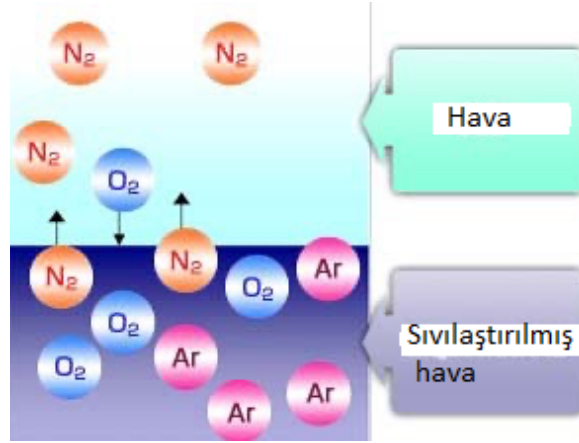


Şekil 3.2 : Havanın yoğunluğunun basınç ve sıcaklıklara göre değişimi (URL 1: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html)

3.2 Hava Ayırma Teknolojileri

Hava ayırma tesisleri, havanın sıkıştırılması, soğutulması, sıvılaştırılması ve damıtılması yoluyla havadan oksijen, nitrojen ve argon üretmek üzere tasarlanmıştır. Oksijen, nitrojen ve argon bazı özel durumlarda – diğer nadir gazların (kripton, ksenon, helyum, neon) üretimi için havanın kriyojenik ayrıştırması ile gerçekleşir. Ürünler, boru hattı beslemesi için gaz halinde veya kamyonla depolama ve dağıtım gerekli ise kriyojenik sıvı olarak üretilebilirler. Hava ayırma tesislerinin, en çok örneklerini gördüğümüz üreticilerinden biri Alman Linde Şirketi'dir. Yaklaşık 80'den fazla ülkede 2.800 kriyojenik hava ayırma tesisi inşa ettiği bilinmekte olup hava ayırma teknolojileri için pazarda lider konumda yer almaktadır (URL 2: <http://tn-sanso-plant.com/en/air.html>).

Genel olarak hava ayırma işlemi ve hava ayrıştırmanın basit kimyasal olaylar dizini Şekil 3.3 de şematik olarak gösterilmiştir. Burada kaynama noktası farkından nitrojen ve oksijenin ayrıştığı görülmektedir.



Şekil 3.3: Hava ayırma şeması (Air Separation Book).

Hava, özel ünitelerde damıtma yoluyla bileşenlerine ayrılabilir. Hava ayırma tesisleri, sıvı ve gaz halinde, yüksek saflıkta, nitrojen, oksijen ve argon üretmek için ve ayrı bileşenleri birbirinden ayırmak amacıyla kriyojenik arıtma olarak bilinen bir termal işlem kullanmaktadır.

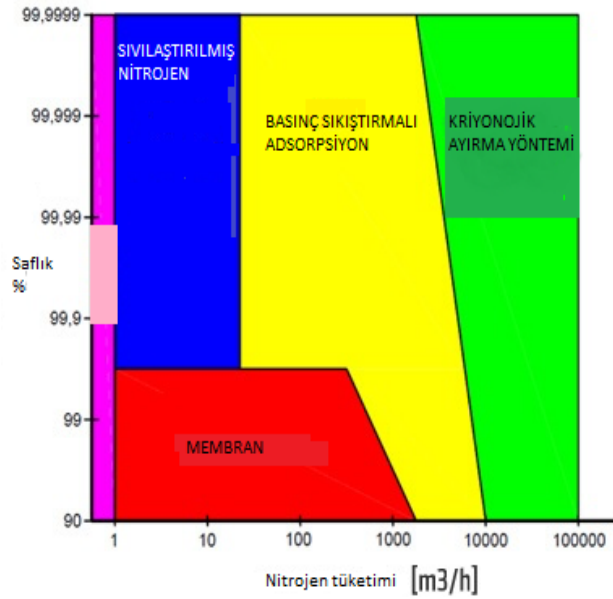
Geçmişten günümüze farklı tipte hava ayırma teknolojileri geliştirilmiştir (Linde, 2002):

- Kriyojenik Hava Ayırma Yöntemi
- Membran ile Hava Ayırma Yöntemi
- Basınç Salımlı Adsorpsiyon ile Hava Ayırma Yöntemi
- Diğerleri

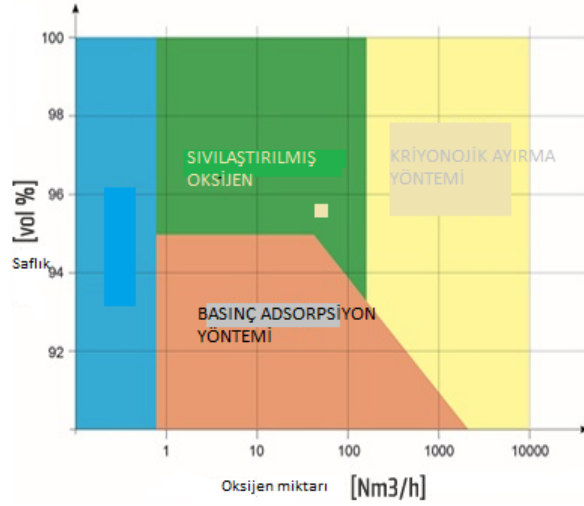
Ürünlerin miktarı ve saflığı ile ilgili farklı gereksinimler için farklı teknolojiler uygulanabilir. Şekil 3.4. oksijen üretim süreci seçim diyagramını göstermektedir. Farklı nitrojen proseslerinin uygulanabilir olduğu aralıkları açıklayan benzer bir grafik Şekil 3.5'te görülebilir. Her iki diyagram için de istenilen saflık dereceleri yöntemin belirlenmesinde önemlidir.

Hava doğada bol miktarda bulunan bir bileşendir ve içerisinde bulunan azot, oksijen ve diğer gazlar endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu gazlardan azot ve oksijen açısından bakıldığında ise endüstriyel alanda iki farklı kalitede ürün elde edilmesi ve müşteriye sunulması beklenmektedir. Bu durum, ürünlerin yüksek saflık ve düşük saflık olmasına göre farklılık gösterecektir. Yüksek saflık için oksijen ve azotta istenilen saflık oranı %98'dir. Düşük saflıkta ise saflık oranının %85 – 98 arasında olması beklenir (Campestrini 2014; Arpentiner 2001).

Ürünlerin miktarı ve saflığı ile ilgili farklı gereksinimler için farklı teknolojiler uygulanabilir. Şekil 3.3'te Nitrojen üretim süreci seçim diyagramını göstermektedir. Farklı oksijen proseslerinin uygulanabilir olduğu aralıkları açıklayan benzer bir grafik Şekil 3.4'te görülebilir. Membran ayırma işlemi gibi yöntemler de mevcuttur, ancak şu anda diğer iki yöntemle göre yaygın olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 3.4: Nitrojen üretim süreci seçim diyagramı (URL 3: <https://www.omega-air.si/news/news/nitrogen-and-oxygen-production>).



Şekil 3.5: Oksijen üretim süreci seçim diyagramı (URL 4: <https://www.omega-air.si/news/news/nitrogen-and-oxygen-production>)

3.2.1 Kriyojenik Hava Ayırma Yöntemi

Bu çalışmada pratikteki yaygın kullanımı dikkate alınarak kriyojenik hava ayırma yöntemi üzerinde durulmuştur.

Kriyojenik hava ayırma işlemi, orta ila büyük ölçekli tesislerde sıklıkla kullanılan en yaygın hava ayırma işlemlerinden biridir. Gaz ve/veya sıvı ürünler olarak nitrojen, oksijen ve argon üretimi için en çok tercih edilen ve yüksek üretim oranlı tesisler için en uygun maliyetli teknoloji olduğu düşünülen yöntemdir. Günümüz piyasasında, neredeyse tüm sıvılaştırılmış endüstriyel gaz üretim tesisleri, sıvı ürünler üretmek için kriyojenik teknolojiden yararlanmaktadır.

Endüstriyel gaz ürünleri üretmek için kriyojenik hava ayırma işlemi kullanıcı gereksinimlerindeki farklılıklardan yola çıkarak yapılması en uygun olanıdır.

İşlem döngüsü şunlara bağlıdır (Linde,2002):

- Gerekli ürün çeşidi ve sayısı (sadece oksijen veya nitrojen hem oksijen hem nitrojen veya nitrojen, oksijen ve argon),
- Ürünler için gerekli saflıklar,

- Gaz halindeki ürün dağıtım basınçları,
- Ürünlerin sıvı halde saklanması gerekip gerekmediği.

Kriyojenik gaz işlemede, damıtma kolonları, ısı eşanjörleri, soğuk ara bağlantı boruları vb. gibi çok düşük sıcaklıklarda çalışan ve bu nedenle iyi yalıtılması gereken çeşitli ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar kapalı, “cold box” olarak isimlendirilen soğuk kutular içinde bulunur. Cold box’lar, yuvarlak veya dikdörtgen kesitli uzun yapılar olup; tesis tipine, büyüklüğüne ve kapasitesine bağlı olarak çeşitli yüksekliklerde olabilmektedir.

3.2.1.1 Kriyojenik Hava Ayırıştırma Yöntemi

Birinci Adım:

Herhangi bir kriyojenik hava ayırma tesisindeki ilk adım, havayı filtrelemek ve sıkıştırmaktır. Filtrelemeden sonra basınçlı hava, hava soğutmalı veya su soğutmalı ısı eşanjörlerinden geçerek yaklaşık ortam sıcaklığına ulaşacak şekilde soğutulur. Bazı durumlarda mekanik bir soğutma sisteminde çok daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. Bu, iyi bir kirlilik giderme sağlar ve ayrıca güç tüketimini en aza indirir. Tesis performansını etkileyebilecek mevsimsel olarak atmosferik sıcaklıktaki değişiklikler nedeniyle olabilecek etkilerden tesisin korunmasını da sağlayacaktır. Soğutma ve sıkıştırmanın her aşamasından sonra yoğuşma haline geçen su yani kondens olarak nitelendirilen ve elde edilecek ürünün saflık derecesini tehlikeye atacak ürünler havadan uzaklaştırılır.

İkinci Adım:

İkinci adım, müşterinin ürün kalite özelliklerini karşılamak için sistemden atılması gereken kalan karbondioksit ve su buharından oluşmaktadır. Hava, tesisin damıtma bölümüne girmeden önce bahsedilen karbondioksit ve su buharı her zaman çıkarılmalıdır. Bu kısım, çok düşük sıcaklıkta, proses ekipmanı içindeki yüzeyler üzerinde birikebilecek olan su ve karbondioksiti dondurabileceği kısımdır. Su buharı ve karbondioksitten kurtulmanın iki temel yöntemi vardır. Bunlardan birisi moleküler elek üniteleri diğeri ise eşanjörlerdir.

Üçüncü Adım:

Kriyojenik hava ayırımındaki üçüncü adım, hava beslemesini kriyojenik sıcaklığa getirmek için ürüne ve atık gaza karşı ek ısının aktarılması işlemini sağlamaktadır. Soğutma genellikle lehimli alüminyum ısı eşanjörlerinde yapılır. Gelen hava beslemesi ile soğuk ürün arasındaki ısı alışverişini ve atık gaz akımlarının hava ayırma işlemini terk etmesini sağlarlar. Kriyojenik ürünlerin damıtılması için gereken çok düşük sıcaklıklar, bir veya daha fazla yüksek basınçlı işlem akışının genişlemesini içeren bir soğutma işlemiyle oluşturulmaktadır.

Dördüncü Adım:

Bu adım, havayı istenen ürünlere ayırmak için damıtma kolonlarının kullanılmasını içerir. Örneğin, oksijen için damıtma sisteminde kolonlar hem “yüksek” hem de “düşük” basınca sahiptir.

Azot tesisleri bir veya iki sütuna sahip olabilir. Damıtma kolonunun altından oksijen çıkarken, üstten azot çıkar. Argon, oksijeninkine benzer bir kaynama noktasına sahiptir ve oksijenle birlikte kalır. Bununla birlikte, yüksek saflıkta oksijene ihtiyaç duyulursa, bir ara noktada argonun damıtma sisteminden atılması gerekir. Daha yüksek basınçlı damıtma kolonunda üretilen saf olmayan oksijen, daha düşük basınç kolonunda saflaştırılır. Yüksek saflıkta oksijen, nitrojen veya diğer kriyojenik gazlar üreten tesisler daha fazla damıtma aşaması gerektirir.

Şekil 3.6, MESSER tarafından önerilen kriyojenik hava ayırma işleminin temel adımlarını göstermektedir. İşlem prosesleri numaralandırılarak anlatılmıştır. 1 numaradan 6 numaraya kadar işlem sırasıyla anlatılmaktadır.



Şekil 3.6: Basit adımlarla hava ayırma tesisi.

Bu teknolojinin temel adımları şu şekilde açıklanmaktadır:

1 numaralı eleman havanın sıkıştırılması işlemi temsil eder: Ortam havası bir kompresör tarafından içeri çekilir, filtrelenir ve yaklaşık 6 bar basınca kadar sıkıştırılır.

2 numaralı eleman havanın ön soğutma işlemi temsil eder: Havayı bileşenlerine ayırmak için önce çok düşük bir sıcaklıkta sıvılaştırılmalıdır. İlk adım olarak, sıkıştırılmış hava soğutulmuş su ile önceden soğutulur.

3 numaralı eleman havanın saflaştırılması işlemi temsil eder: Su buharı ve karbon dioksit gibi kirlilikler daha sonra moleküler elek adı verilen bir yöntemle havadan uzaklaştırılır.

4 numaralı eleman havanın soğutulması işlemi temsil eder: Havayı oluşturan gazlar sadece çok düşük sıcaklıklarda sıvılaştığından, ana ısı eşanjöründeki arıtılmış hava sıvılaştırılmaktadır (yaklaşık -175°C). Soğutma, işlem sırasında üretilen soğuk gaz akışlarının basınçlı havayı soğuttuğu dahili ısı değişimi vasıtasıyla sağlanır. Basıncın hızlı bir şekilde düşürülmesi, sıkıştırılmış havanın daha fazla soğumasına

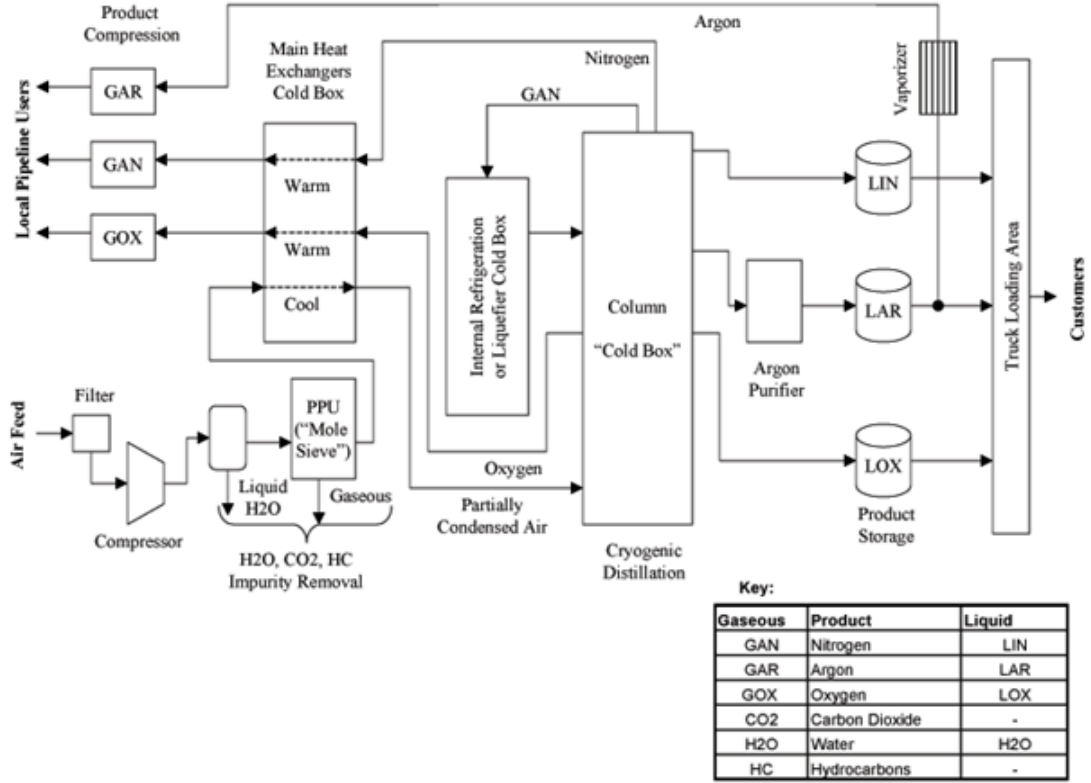
neden olur ve bu sayede kısmi sıvılaşmaya maruz kalır. Artık hava, asıl ayırmanın gerçekleştiği ayırma kolonu için hazırdır.

5 numaralı eleman havanın ayrılması işlemini temsil eder: Havanın saf oksijen ve saf nitrojene ayrılması, orta basınçlı ve düşük basınçlı Kolonlar olmak üzere iki sütunda gerçekleştirilir. Bileşenlerin kaynama noktasındaki fark, ayırma işlemi için kullanılır. Oksijen -183°C 'de sıvı hale gelir ve -196°C 'de nitrojen olur. Yükselen buhar ve alçalan sıvı arasındaki yoğun madde ve ısı alışverişinin neden olduğu sürekli buharlaşma ve yoğuşma, düşük basınçlı kolonun tepesinde saf nitrojen ve altta saf oksijen üretir. Argon, ek sütunlarda ayrılır ve süreçte bazı ek adımlar içerir.

6 numaralı eleman ayırma ve depolama işlemini temsil eder: Gaz halindeki oksijen ve nitrojen, kullanıcılara taşınmak üzere boru hatlarına beslenir. Sıvı halde oksijen, nitrojen ve argon tanklarda depolanır ve tanker kamyonlarla müşterilere ulaştırılır (URL-5:http://acetylen.pl/de/Produkte_und_Loesungen/luftzerlegung/index.html?iLangID=1).

Kriyojenik Hava Ayırma Akış Diyagramı:

Şekil 3.7'de verilen kriyojenik hava ayırma akış şeması belirli bir tesisi temsil etmemektedir ve hem gaz hem de sıvı ürünler olarak oksijen, nitrojen ve argon üretiminde yer alan birçok önemli adımı genel bir şekilde göstermektedir.



Şekil 3.7: Kriyojenik hava ayırma akış diyagramı (URL 6: <http://www.uigi.com/cryodist.html>).

LIN Yardımcı Tesisleri:

LIN tesisleri, nispeten düşük üretim oranlarında ve uygun maliyetli gaz halinde nitrojen üretebilen özel kriyojenik tesis türleridir. Kendi mekanik soğutma sistemlerine sahip olmadıkları için “normal” kriyojenik tesislerden farklıdır. Yeterli nitrojen üretimi için gereken soğutmayı, yüksek hacimli, yüksek verimli ticari sıvı tesisinden etkin bir şekilde “ithal ederler”. Bunu, damıtma işlemine sürekli olarak az miktarda sıvı nitrojen enjekte ederek gerçekleştirirler. “İthal” LIN, damıtma için geri akış sağlar, daha sonra yerel olarak üretilen gaz halindeki nitrojen ile buharlaşır ve karışır dolayısı ile nihai ürün akışının bir parçası haline gelir. Bu düzenleme tesisi basitleştirir, kendi soğutma döngüsüne sahip “normal” bir kriyojenik tesise kıyasla sermaye maliyetini düşürür. Standart soğutma çevrimi ile doğru koşullar altında, tamamen dökme sıvı tedarikinden veya yeni bir kriyojenik nitrojen tesisinden daha iyi bir genel ekonomi sağlayabilir (URL 6: <http://www.uigi.com/cryodist.html>)

3.2.2 Havanın Temizlenmesi

Damıtmadan önce hava farklı kirliliklerden ve bileşenlerden arındırılmalıdır. Kondens, karbondioksit ve havadaki diğer yabancı maddeler gibi safsızlıklara neden olacak ürün çıkışları hava damıtmasında problemler yaratır. Bu yüzden bu işlemden önce havayı temizlememiz gerekir.

Havanın Temizlenmesi ve Kurutulması:

Havadaki atık bileşen içeriği yaklaşık $0,002 - 0,02 \text{ g/m}^3$ olduğundan havayı bu kirlilikten arındırmak için yağ filtreleri kullanılır. Hava bu filtrelerden geçer ve atık bileşenlerden temizlenir. Geniş ürün kapasitesine sahip büyük bir tesiste, bir yamalı veya lokomotif bölümü olan birkaç otomatik filtre bölümünü kullanarak bu işlemin yapılması sağlanmaktadır. Havadaki nem, havanın durumuna bağlıdır. Tabloda hava %100 doygunluğa ulaştığında havadaki ıslaklığın değeri gösterilmektedir. Havanın kurutulması $\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$ ile adsorpsiyon yapılması, aktif $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ ile adsorpsiyon ve buzlama yöntemi ile sağlanmaktadır.

Karbondioksitin Uzaklaştırılması:

Sodyum hidroksit veya potasyum hidroksitin çözünmesi ile yıkanan alkali yıkayıcıdaki havayı CO_2 'den temizlenir. Aynı zamanda oksijen ve nitrojen rejeneratörlerinde de bu işlem yapılır. Rejeneratörlerden hava geçişi sırasında CO_2 , O_2 , N_2 'nin emicisi üzerinde donar. Dondurulmuş CO_2 daha sonra havadan ve CO_2 'den emici temizleme üzerine yönlendirilen O_2 ve N_2 tarafından temizlenir. Periyodik sistem üzerinde çalışan iki rejeneratör de vardır ve birkaç dakika aralıklarla yerlerini alırlar. Alkali ve rejeneratör yıkayıcıdan sonraki CO_2 içeriği $15 - 20 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ sıvı ve hava halde bir bileşenden oluşan süspansiyon olacaktır. Karbondioksitin uzaklaştırılmaması durumunda valflerde sorunlara neden olabilir ve kuledeki ayırmada plakaların deliğini kapatabilir.

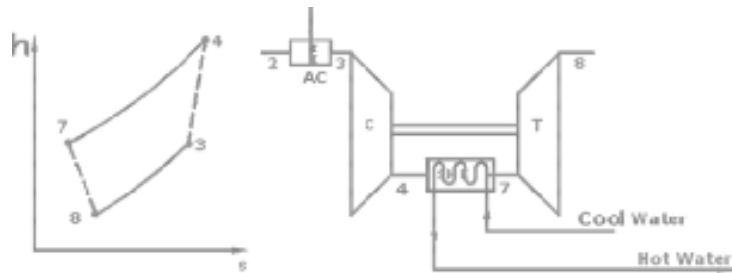
Asetilenin Uzaklaştırılması:

Havanın asetilenden temizlenmesi, hava ayırma tesisi için çok tehlikelidir. Çünkü asetilenin toplanması tesis içerisinde patlamalara sebebiyet verebilir. Bu nedenle havayı temizlemek önemlidir. Asetilenin havadaki kısmi basıncı düşüktür, bu nedenle eşanjör ve rejeneratörde uzaklaştırılmaz ve sıvı içinde birikir. Asetilenin hava, oksijen ve nitrojende çözünürlüğü düşük olduğundan ancak $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ filtrelerinde kolaylıkla temizlenebilir.

3.2.3 Havanın Sıkıştırılması

Hava sıkıştırımlı soğutma çevrimi uzun zaman önce çalışılmıştır. Bunun dezavantajı; soğutmada havanın çalışma sıvısı olarak kullanılmasını engellemesidir. Bunlardan en önemlisi, düşük hacimsel soğutma etkisinden doğan kompresör ve genişleticinin düşük verimlilikleri ve düşük COP konularını içermesidir. 1930'larda CFC'nin (kloroflorokarbonlar) icadından sonra, insanlar hava sıkıştırımlı soğutma sistemine çok az ilgi göstermişlerdir:

Soğutma makinesi ve soğuk su ile soğutulan sıcak su için bir açık hava sıkıştırımlı soğutma sisteminin entalpi-entropi koordinatları üzerindeki temsili ve devre şeması Şekil 3.8'de gösterilmiştir. 2'deki dış hava atomize edilen odaya çekilir, doymuş hava haline soğutulur. Daha sonra ince su damlacıkları ile 3'teki hale ve daha sonra da bir aksenal kompresör tarafından sıkıştırılmaktadır. Daha yüksek sıcaklık olan T_4 ve yüksek basınç olan P_4 ile 4°C 'de bir sıkıştırılmış hava akışı elde edilir. Daha sonra, 4'teki koşullara dek sıkıştırılmış hava, aksenal kompresör çıkışından sonra bir ısı eşanjöründe soğuk su ile T_7 sıcaklığında 7 durumunda doymuş havaya soğutulur.



Şekil 3.8: Hava sıkıştırımlı ve su soğutmalı soğutma makinesinin şeması ve h-s diyagramı (Air Separation Course Document)

Şekil 3.8’de Soğutma makinesi ve soğuk su ile soğutulan sıcak su için bir açık hava sıkıştırılmalı soğutma sisteminin entalpi-entropi koordinatları ve devre şeması üzerindeki gösterimini vermektedir.

Soğuk su, yüzey ısı eşanjöründe ısıtılır. Eksenel kompresörden önce su enjeksiyonu, sıkıştırma işleminde hem çalışma sıvısının sıcaklığını düşürmeyi amaçlar. Böylece, bazı sıkıştırma işlerinden tasarruf edilebilmektedir. Bu yöntem, bir savaş uçağı hızını arttırmak amacıyla bir jet motorunda kullanılmıştır. Sıkıştırılmış havadaki su buharı, bir yüzey ısı eşanjörü ile kolayca çıkarılabilir. Aynı sıcaklıkta, yüksek basınçtaki P₄ doymuş ıslak havanın nem oranı, P₃ basıncındaki sadece P₃/P₄ ’ü kadardır. Kuru hava elde etmek için basınçlı hava kullanma yöntemi bazı çalışmalarda kullanılmıştır, yukarıdaki sistem geleneksel bir hava çevrim sisteminden farklıdır. Bu hava-buhar soğutma çevriminin birçok özelliğı vardır.

Yukarıdaki sistemde öncelikle bir eksenel kompresör ve bir türbin kullanılmaktadır.

Turbo makinelerin özellikleri, büyük kütle akış hızı ve yüksek verimliliklidir. Diğer kompresör ve genişletici türleri yukarıdaki avantajların hiçbirine sahip değildir. İkinci olarak, bu soğutma sistemi, ince su damlacıkları ile önceden soğutulmuş ıslak havayı alır ve 4'ten 7'ye kadar, hava soğutması sırasında, bir miktar buhar yoğunlaşır.

Yüksek basınçlı ıslak havadan çıkarılan su miktarı 18–30 g/kg'a ulaşabilir ve yoğunlaşan buhardan atılan gizli ısı miktarı, yaklaşık 45–75 kJ/kg'dır ve hissedilir ısıyı (30–50 kJ/kg) aşar. Bu nedenle, açıklanan hava-buharlı soğutma sistemindeki soğutma yükü, hissedilebilir bileşenlerin bir kombinasyonuna bağlıdır (Air Separation Course Document).

Islak havanın özgül nem oranı, D, denklem 3.1 kullanılarak elde edilir.

$$D = \frac{621.98P_{vap}}{B - P_{vap}} \text{ (kgsu buharı / hava)} \quad (3.1)$$

Islak havanın entalpisi, H, şu şekilde hesaplanır:

$$H = 1.006t + 0.001D (2501 + 1.805t) \text{ (kJ/kg)} \quad (3.2)$$

3.2.4 Havanın Soğutulması

Hava soğutma, ısıyı dağıtma yöntemidir. Soğutulacak maddenin daha geniş bir yüzey alanına sahip olmasını sağlayan ara soğutucu eşanjörler ile eşanjör yüzeyinde sıcaklığı düşürmek gereklidir. Hava, doğrultma kolonunun ana ısı eşanjöründeki ters akışlı gaz halindeki oksijen, gaz halindeki nitrojen ve atık nitrojen tarafından havanın sıvılaştırma sıcaklığına kadar soğutulmalıdır.

Soğutma, sıvı fazın buharlaşmasıyla oluşturulur. Bu sıvılara soğüğün bileşeni denir. Örneğin NH_3 , SO_2 , CO_2 , C_3H_8 , C_4H_{10} vb. buharlaştığında ortam ısı buharlaşma için kullanılır ve ortam sıcaklığı düşer. Daha sonra buharlaşan gazlar kompresörde sıkıştırılarak önce basınçlandırılmaktadır. Daha sonra farklı eşanjörler ile soğutularak kriyojenik sıcaklıklarda, sıvı hale getirilerek kullanılır.

Genel olarak soğutma işlemini yapmak için aşağıdaki gibi üç farklı yöntem kullanılır:

1. Kademeli buharlaşma
2. Gaz iletimi ile hızlı basınç düşüşü
3. Gazın adyabatik olarak genişlemesi

3.2.5 Havanın Distilasyonu

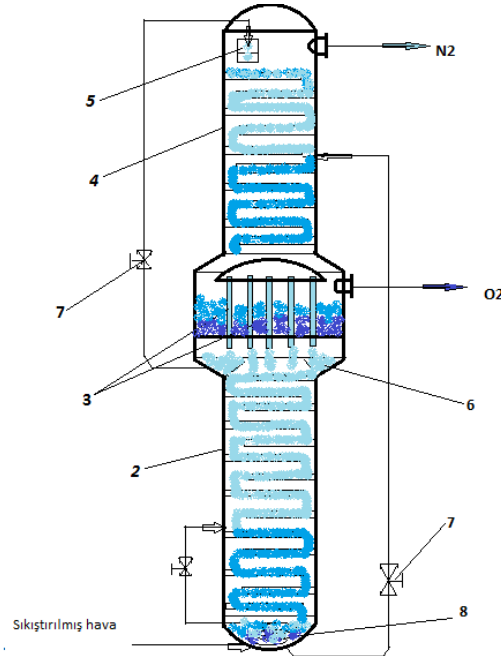
Havayı kriyojenik işlemle ayırmak ve böylece oksijen, nitrojen ve Argon geri elde etmek için bir hava ayırma ünitesinde dubleks tip doğrultma kulesi kolonu kullanılır. Hava, daha yüksek basınçla alt kolona beslenir. Sıvı nitrojen, alt kolondan bir geri akış olarak üst kolona verilir ve alt kolonun altından elde edilen bir oksijen akımı, üst kolonun tabanına beslenir. Üst kısımda yer alan yüksek basınç kolonunda damıtılmış saf Nitrojen, bu kolonun alt kısmındaki düşük basınç kolonunda Oksijen elde edilmektedir.

Hava Distilasyon Kolonu

Hava distilasyon ayırma kolonu şekil 3.9’da gösterilmiştir. Alt kolon (2), kondenser ve kaynatıcı (3) ve üst kolondan (4) birleştirilmiş damıtma kolonu bölümlerinden oluşur. Alt kolon 5,5-6,5 atm basınç altında çalışır ve havanın nitrojene ön damıtılması ve %60 – 65 nitrojen ve %35 – 40 oksijen içeren oksijen ve hava karışımı için teminini mümkün kılar. Karışım havanın nitrojen ve oksijene damıtılması için 1,3 – 1,4 atm basınçta ve üst sütunda çalışılır.

Şekil 6 da hava distilasyon kolonunun kısımları gösterilmiştir.

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1-Sıvı oksijen ve hava | 5 – Aşamalar |
| 2- Alt kolon | 6- Sıvı nitrojen paketi |
| 3- Kondenser – Kazan | 7- Valf |
| 4 –Üst Sütun | 8- Borular |



Şekil 3.9: Hava distilasyon kolonu (Air Separation Course Document).

Alt (2) ve üst (4) kolon kondenser (3) ve reboiler grubunda, alt kolonda nitrojen yoğuşması ve üst kolonda buharlaşan oksijen bulunur. Alt kolondaki nitrojenin yoğuşma sıcaklığı 96 – 97 K, üst kolondaki oksijen buharlaşma sıcaklığı 92 – 93 K'dir.

Hava distilasyonu kolonu ile üretilen azot (N₂), oksijen (O₂) ve argon (Ar) saflığı:

Oksijenin mol fraksiyonu oranı %98,7, nitrojen mol fraksiyonu oranı %99,0, argon mol fraksiyonu oranı %99,5 olarak elde edilebilir.

3.3 Hava Ayırıştırma Ürünleri ve Diğer Uygulamalar

Hava oksijen, nitrojen, Argon ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Burada havanın bileşenleri, kimyasal formülleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile kullanım alanları ve faydaları ele alınmıştır.

3.3.1 Oksijen:

Oksijen soluduğumuz havanın %21'ini oluşturur. Vücudumuzun yaşamı desteklemek için oksijene ihtiyacı vardır, bu nedenle oksijenin birçok tıbbi ve sağlık hizmeti kullanımı vardır.

Oksijen ayrıca birçok endüstride, bulutlu metal ve cam imalatında, kimyasallar ve petrol işlemede, kağıt hamuru ve kağıtta, havacılıkta, atık su arıtmada ve hatta balık yetiştiriciliğinde kullanılmaktadır.

Kimyasal formül: O₂ olup; diğer isimleri ise; oksijen gazı, gaz halindeki Oksijen (GOX), sıvı oksijen (LOX) şeklindedir.

3.3.1.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler

Oksijenin rengi ve kokusu yoktur. Oksijen havadan biraz daha ağırdır ve suda az çözünür. Oksijen, "oksitler" adı verilen bileşikler oluşturmak için birçok elementle

kolayca birleşir. Bir örnekle anlatacak olursak; oksijen ve nem bir arada bulunduğunda demir üzerinde oluşan demir oksit veya pastan oluşmaktadır. Oksijenin kendisi yanıcı olmamasına rağmen, yanıcı maddeler oksijende daha güçlü yanar. Çoğu uygulamada gaz halinde oksijen kullanılmasına rağmen, aşırı düşük sıcaklıklarda (-297°F/-183°C) uçuk Mavi bir sıvıya dönüşebilir.

3.3.1.2 Kullanım Alanları ve Faydaları

Kan dolaşımımız, vücudumuzdaki hücreleri beslemek için ciğerlerimizdeki havadaki oksijeni emer. Sağlık hizmeti sağlayıcıları, ameliyattaki hastalar ve nefes almada zorluk çekenler için tıbbi oksijen kullanır. Evde kullanım için hafif Portatif oksijen tüpleri, hastalara gut hastalığına toplum içinde girme özgürlüğü verir. Oksijenle çalışırken ve oksijen seviyelerinin artmadığından emin olunmalıdır. Çünkü artan miktarı yangın tehlikesi oluşturabilmektedir.

Oksijen yanmayı teşvik eder, bu nedenle üreticilerin elde ettiği fazla enerjiden tasarruf etmesine ve karbondioksit, nitrojen oksit veya kükürt oksit gibi sera gazlarının emisyonunu azaltmasına yardımcı olur.

Oksijenle zenginleştirilmiş havanın kullanılması çelik, roket yakıtı, cam, kimyasal ve metalürji açısından işleme uygulamalarında üretim verimliliğini artırır.

Alüminyum, bakır, altın ve kurşun üreticileri, metalleri cevherden daha verimli bir şekilde çıkarmak için oksijen kullanır. Sonuç olarak, genellikle doğal kaynaklarımızı korumaya ve genişletmeye yardımcı olan düşük dereceli cevherleri ve hammaddeleri üreticiler kullanabilirler. Oksijen genellikle metalleri kesmek ve kaynaklamak için asetilen, propan (C₃H₈) ve diğer gazlarla birlikte kullanılır.

Kimya ve petrol endüstrileri, antifriz, plastik ve naylon gibi ürünler yapmak için oksijeni hidrokarbon yapı taşlarıyla birleştirir.

Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi, diğer ağartma kimyasallarına olan ihtiyacı azaltırken kağıdın beyazlığını artırmak için oksijen kullanır. Ayrıca kokuları ve diğer emisyonları azaltmak için kullanırlar. Belediye ve endüstriyel atık su tesisleri, arıtma sürecini daha verimli hale getirmek ve tesis genişlemeleri veya tesis bozulmaları

sırasında havza kapasitesini artırmak için oksijen kullanır. Belediye su tesisleri, içme suyundan tat, koku ve rengi gidermek için oksijeni ozon sistemlerine besleme gazı olarak kullanır. Oksijenli su, balık yetiştiriciliği operasyonları için balıkların sağlığını ve boyutunu da iyileştirir, böylece dünya çapındaki çiftçiler yüksek kaliteli gıda tedarik edebilir.

3.3.1.3 Endüstriyel Kullanım Alanları

Oksijen, yüksek basınçlı gaz veya soğuk sıvı olarak kullanılır. Genellikle büyük miktarlarda oksijen sıvı halde gönderilir ve depolanır. Çünkü bu şekilde daha az yer kaplarlar. Müşterilerin kullandığı oksijen gazı miktarına bağlı olarak yüksek basınçlı silindir ve tüplerde depolayıp sevk edilmektedir. Endüstri yönergeleri, sıkıştırılmış gaz silindirlerinin depolanmasını ve taşınmasını kapsar. İşçiler, sıkıştırılmış gaz tüplerini tutarken sağlam iş eldivenleri, yan siperli güvenlik gözlükleri ve güvenlik ayakkabıları kullanmalıdır. Düşük sıcaklığı nedeniyle sıvı oksijen cilt ile temas etmemelidir. İşçiler sıvı oksijen kaplarıyla uğraşıyorsa, gözleri ve yüzü korumak için güvenlik gözlüklerinin üzerine tam yüz koruyucu takmak zorundadır.

Havadaki oksijen seviyeleri normalden yüksek olduğunda yangın riski artar. Giysiler ve saçlar oksijeni kolayca tutar ve oldukça yanıcıdır. Oksijenle çalışırken iyi bir havalandırmaya sahip olmak ve oksijen seviyelerinin artmadığından ve yangın tehlikesi oluşturmadığından emin olmak için kapalı alanlardaki ortamları periyodik olarak test etmek önemlidir. Personel riski bilmeli, alanı yanıcı maddelerden uzak tutmalı ve “Sigara İçilmez” levhaları asmalıdır.

3.3.2 Nitrojen

Nitrojen, soluduğumuz havanın yüzde 78'ini oluşturur. Azotun birçok ticari kullanımını vardır. Aslında, hacim olarak diğer herhangi bir inorganik kimyasaldan daha fazla nitrojen satılmaktadır.

Azot, petrol ve gaz endüstrilerinde, metal işlemede, elektronikte, gıda işlemede ve birçok üretim prosesinde kullanılmaktadır.

Kimyasal formül: N₂ diğer isimleri ise; nitrojen gazı, gaz halindeki Azot (GAN), sıvı nitrojen (LIN)

3.3.2.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler

Azotun rengi ve kokusu yoktur. Yanmaz. Havadan biraz daha hafiftir ve suda az çözünür. Azot inerttir, yani birçok malzeme ile reaksiyona girmez. Ancak belirli koşullar altında bileşikler oluşturabilir. Örneğin, yüksek sıcaklıklarda nitrojen oksijenle reaksiyona girerek çeşitli nitrojen oksitleri oluşturur. Katalizörlerin varlığında başka bileşikler de oluşturabilir. Aşırı düşük sıcaklıklara (-321 °F/-196°C) soğutulduğunda, sıvı halde nitrojen bulunur.

3.3.2.2 Kullanım Alanları ve Faydaları:

Endüstriler hem sıvı nitrojen hem de nitrojen gazı kullanır. Azot, birçok endüstriyel işlemin işçiler ve halk için daha güvenli olmasına yardımcı olur.

Rafineriler, petrokimya tesisleri ve deniz tankerleri, kullandıkları ekipmandaki buharları ve gazları temizlemek için gaz halindeki nitrojeni kullanır. Endüstriler ayrıca, proses ve depolama ekipmanındaki kimyasallar üzerinde "örtülü" veya inert koruyucu bir atmosfer sağlamak için gaz halinde nitrojen kullanır. Metal imalatçıları, termal sprey kaplamada proses sıcaklıklarını kontrol etmeye yardımcı olmak için sıvı nitrojen kullanır, bu da prosesi daha verimli hale getirir. Makine atölyeleri, işleme operasyonlarında kesme sıvıları yerine sıvı nitrojen kullanır, bu da yağ bazlı ürünlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Üreticiler, yumuşak veya ısıya duyarlı malzemeleri öğütmek için soğutmak için sıvı nitrojen kullanır. İlaçlar, baharatlar, plastikler ve pigmentler üretmek için kriyojenik yöntem kullanırlar. Geri dönüştürücüler, plastik ve kauçuk dahil polimerleri soğutmak için sıvı nitrojen kullanır, böylece onları öğütebilir ve yeni ürünler üretmek için kullanılan temel hammaddeleri geri kazanabilirler. Örneğin, kauçuk hurda lastikleri, lastiği çöp sahasına atmak yerine sentetik koşu parkurları gibi Kullanılabilir ürünlere dönüştürmek için nitrojen kullanırlar. Yediğimiz yiyeceklerin çoğu nitrojen soğutmalı dondurucularda dondurulur. Azot çok soğuk olduğu için, genellikle donmuş gıda ürünlerinin kalitesini artırır. Sıvı nitrojen, floro

karbonlar ve amonyak gibi, işleme ekipmanından sızdıklarında çevre veya sağlık sorunlarına neden olabilecek geleneksel soğutucuların yerini alır. Azot, yiyeceği soğuttuktan sonra, nitrojen güvenli bir şekilde havaya geri döner.

3.3.2.3 Endüstriyel Kullanım Alanları

Nitrojen yüksek basınçlı gaz veya soğuk sıvı olarak endüstriyel sahalara gönderilmektedir. Gazlar, genellikle sıvı halde gönderilir ve depolanırlar çünkü bu şekilde çok daha az yer kaplarlar. Nitrojen gazı iki farklı kap şeklinde depolanır ve gönderilir. Müşterinin ne kadar kullandığına bağlı olarak gazı yüksek basınçlı tüp ve diğer tüpler olmak üzere kullanıcıya sağlamak amaçlanmaktadır. Endüstri yönergeleri, sıkıştırılmış gaz silindirlerinin depolanmasını ve taşınmasını içerir. İşçiler, sıkıştırılmış gaz tüplerini tutarken sağlam iş eldivenleri, yan siperli güvenlik gözlükleri ve güvenlik ayakkabıları kullanmalıdır. Ayrıca farklı tipte depolanan tanklar; Dewar's, kriyojenik sıvı silindirleri ve kriyojenik sıvı tanklarından oluşmaktadır. Nefes darlığını önlemek için nitrojenle çalışırken iyi havalandırma olması önemlidir. Kapalı çalışma alanları, girişten önce oksijen seviyeleri açısından test edilmelidir. Oksijen seviyesi %19,5'ten düşükse, kurtarma çalışanları da dahil olmak üzere personel, bağımsız bir temiz solunum havası kaynağı sağlayan özel solunum ekipmanı olmadan alana girmemelidir.

3.3.3 Argon

Argon, soluduğumuz havanın yüzde 1'inden biraz daha azını oluşturur. Argon, metal üretimi, işlenmesi ve imalatı ve elektronik imalatında kullanılır.

Kimyasal formül: Ar- diğer isimleri ise; argon gazı, gazlı argon (GAR), sıvı argon (LAR).

3.3.3.1 Fiziksel ve kimyasal özellikler

Argonun rengi ve kokusu yoktur. Yanmaz. Havadan ağırdır ve alçak alanlara yerleşme eğilimi gösterir. Argon suda az çözünür.

Argon, "asal" veya "inert" gazlar olarak bilinen özel bir gaz grubunun üyesidir. Bu gruptaki diğer gazlar helyum, neon ve kriptonudur. Asal terimi, kimyasal olarak diğer malzemelerle kolayca birleşmeyecekleri anlamına gelir. Aşırı düşük sıcaklıklara (-303°F/-186°C) soğutulduğunda, argon, kriyojenik sıvı olarak bilinen sıvı hale dönüşebilmektedir.

3.3.3.2 Kullanım Alanları ve Faydaları

Metaller ve yarı iletken imalat endüstrileri, kullandıkları ekipmandaki buharları ve gazları temizlemek için argon kullanır.

Metal üreticileri ve yarı iletken üreticileri ayrıca istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşmasını önlemek için metaller ve silikon kristalleri üzerinde "örtülemek" veya inert bir koruyucu atmosfer sağlamak için argon kullanır. Kaynak gibi metal üretim süreçlerinde, argon kaynağı, erimiş kaynak boncuğu oksijen ile temas ederse oluşacak metal oksit safsızlıklarına karşı korur. Argon gazı, diğer soğutma gazlarının parçaları olumsuz etkileyebileceği durumlarda parçaları soğutmak için ısıtım fırınlarında da kullanılır.

Aydınlatma endüstrisi, akkor ampulleri doldurmak için argon kullanır, çünkü filamanla reaksiyona girmez. Diğer nadir gazlarla birlikte argon, genellikle "neon ışıkları" olarak adlandırılan özel renk efektleri yaratır. Argon, evlerimizin termal verimliliğini artırmak için yalıtımlı cam pencerelerdeki boşluğu doldurmak için de kullanılır.

3.3.3.3 Endüstriyel Kullanım Alanları

Argon, gaz veya kriyojenik sıvı olarak kullanılır. Gazları genellikle sıvı halde gönderilir ve depolanır çünkü bu şekilde çok daha az yer kaplarlar.

3.3.3.4 Fiziksel ve kimyasal özellikler

Argonun rengi veya kokusu yoktur. Yanmaz. Havadan ağırdır ve alçak alanlara yerleşme eğilimi gösterir. Argon suda az çözünür.

Argon, "asil" veya "inert" gazlar olarak bilinen özel bir gaz grubunun üyesidir. Bu gruptaki diğer gazlar helyum, neon ve kriptonudur. "Asil" terimi, kimyasal olarak diğer malzemelerle kolayca birleşemeyecekleri anlamına gelir. Aşırı düşük sıcaklıklara (-303°F/-186°C) soğutulduğunda, argon, kriyojenik sıvı olarak bilinen sıvı halde bulunur.

3.3.3.5 Kullanım Alanları ve Faydaları

Metaller ve yarı iletken imalat endüstrileri, kullandıkları ekipmandaki buharları ve gazları temizlemek veya temizlemek için argon kullanır.

Metal üreticileri ve yarı iletken üreticileri ayrıca istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşmasını önlemek için metaller ve silikon kristalleri üzerinde "örtülemek" veya inert bir koruyucu atmosfer sağlamak için argon kullanır. Kaynak gibi metal üretim süreçlerinde, argon kaynağı, erimiş kaynak boncuğu oksijen ile temas ederse oluşacak metal oksit safsızlıklarına karşı korur. Argon gazı, diğer soğutma gazlarının parçaları olumsuz etkileyebileceği durumlarda parçaları soğutmak için ısıtım fırınlarında da kullanılır.

Aydınlatma endüstrisi, akkor ampulleri doldurmak için argon kullanır, çünkü filamanla reaksiyona girmez. Diğer nadir gazlarla birlikte argon, genellikle "neon ışıkları" olarak adlandırılan özel renk efektleri yaratır. Argon, evlerimizin termal verimliliğini artırmak için yalıtımlı cam pencerelerdeki boşluğu doldurmak için de kullanılır.

3.3.3.6 Endüstriyel kullanım

Argonu gaz veya kriyojenik sıvı olarak gönderilir. Gazlar genellikle sıvı halde gönderir ve depolanır çünkü bu şekilde çok daha az yer kaplarlar.

Müşterinin ne kadar argon gazı kullandığına bağlı olarak yüksek basınçlı silindir ve tüplerde depolayıp sevk edilir. Endüstri yönergeleri, sıkıştırılmış gaz silindirlerinin depolanmasını ve taşınmasını kapsar. İşçiler, sıkıştırılmış gaz tüplerini tutarken sağlam iş eldivenleri, yan siperli güvenlik gözlükleri ve güvenlik ayakkabıları kullanmalıdır. Ayrıca sıvı argonu üç farklı kap tipinde depoluyor ve gönderilir. Dewar's, kriyojenik sıvı silindirleri ve kriyojenik sıvı tankları düşük miktarlardaki üretim taleplerini karşılamada en efektif çözümdür. Daha yüksek kapasitelere ulaşmak için birden fazla küçük kapasiteli modül bir araya getirilir (www.uigi.com).

3.4 Düşük Sıcaklıklarda Hava Ayırma Teknolojileri

Kriyojenik hava ayırma işlemi, orta ila büyük ölçekli tesislerde sıklıkla kullanılan en popüler hava ayırma işlemlerinden biridir. Gaz ve/veya sıvı ürünler olarak nitrojen, oksijen ve argon üretimi için en çok tercih edilen ve yüksek üretim miktarlı tesisler için en uygun maliyetli teknoloji olduğu düşünülen sistemlerdir. Günümüz piyasa koşullarında, tüm sıvılaştırılmış endüstriyel gaz üretim tesisleri, sıvı ürünler üretmek için kriyojenik teknolojiden yararlanmaktadır.

Endüstriyel gaz ürünleri üretmek için kriyojenik hava ayırma döngülerinde kullanıcı gereksinimlerindeki farklılıklardan kaynaklanan farklı yaklaşımlar vardır. İşlem döngüsü şunlara bağlıdır:

- Gerekli olan ürün çeşitliliği (sadece oksijen veya nitrojen, hem oksijen hem nitrojen veya nitrojen, oksijen ve argon)
- Ürünler için gerekli saflıklar
- Gaz halindeki ürün basınçları
- Ürünlerin sıvı halde saklanması gerekip gerekmediği şeklindedir.

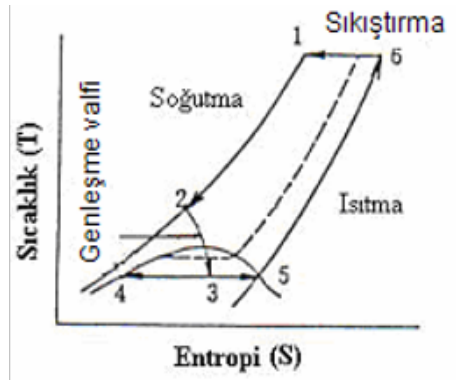
Kriyojenik gaz işlemede, damıtma kolonları, ısı eşanjörleri, soğuk ara bağlantı boruları vb. gibi çok düşük sıcaklıklarda çalışan ve bu nedenle iyi yalıtılması gereken çeşitli ekipmanlar kullanılır. Bu öğeler kapalı "soğuk kutular" içinde bulunur. Soğuk kutular, yuvarlak veya dikdörtgen kesitli uzun yapılardır. Soğuk kutular, tesis tipine,

büyüklüğüne ve kapasitesine bağlı olarak 15 ila 60 metre uzunluk ile 2 ila 4 metre yüksekliğe sahip olabilir.

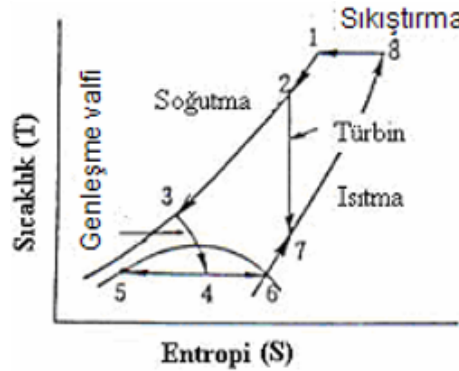
3.4.1 Joule-Thomson Etkisi

İki İngiliz fizikçi olan Wiliam Thomson ve James Prescott Joule 1852’ de yaptıkları deneylerde, basınç altında tutulan bir gazın sıcaklığı, adyabatik olarak genişletildiğinde düşer. Bu da soğukluk üretimi anlamına gelmektedir. İzoentalpik genişleme deneyleri yapıldıktan sonra bu olay Joule-Thomson Etkisi adını almıştır. (Air Separation Technique Course Information Document)

Genleştirici ile Likitleştirme: Gazın sıcaklığı, genişleme türbininde genişletildiğinde düşer. Bu proses izentropik genişlemedir. Şekil 3.10 ve şekil 3.11’de bu prosesler gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Joule-Thomson Etki'sine göre T-S diyagramı (Air Separation Course Document).

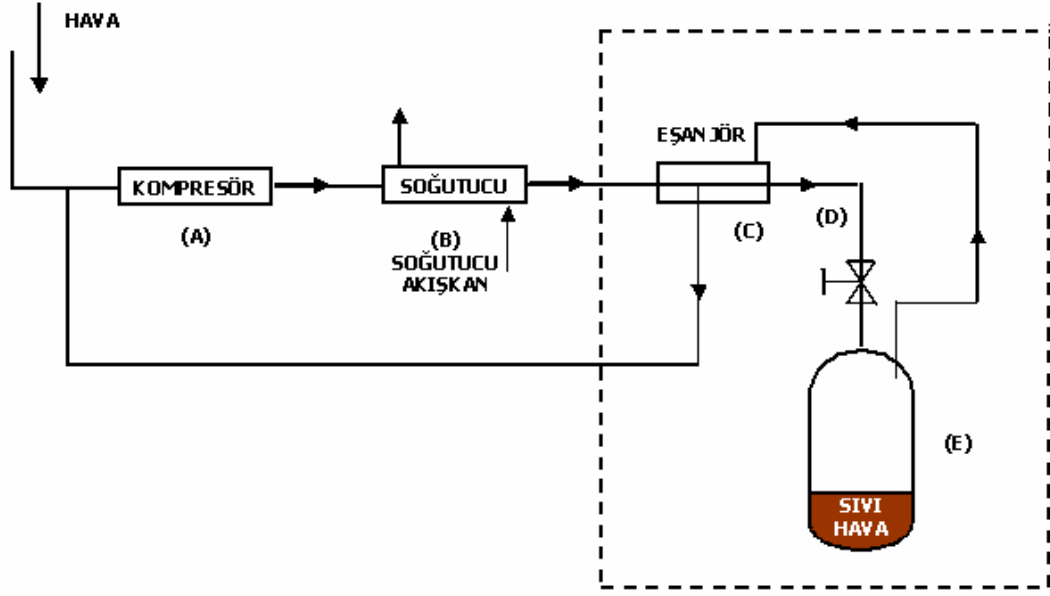


Şekil 3.11: Türbinin T-S diyagramı (Air Separation Course Document).

3.4.2 Havanın Sıvılaştırılması Prosesi (Dr. Carl von Linde Prensi)bi)

Linde prensibinde, Joule-Thomson Etkisi'nden faydalanılarak sıvı hava üretimi gerçekleşir. Sıvı hava ayırıştırma kolonları vasıtasıyla Oksijen ve Azot gazlarına ayırıştırılır. Sıvı hava üretiminde soğukluk üretici olarak genişleme valfi ve genişleme türbini kullanılır. (Air Separation Technique Course Information Document)

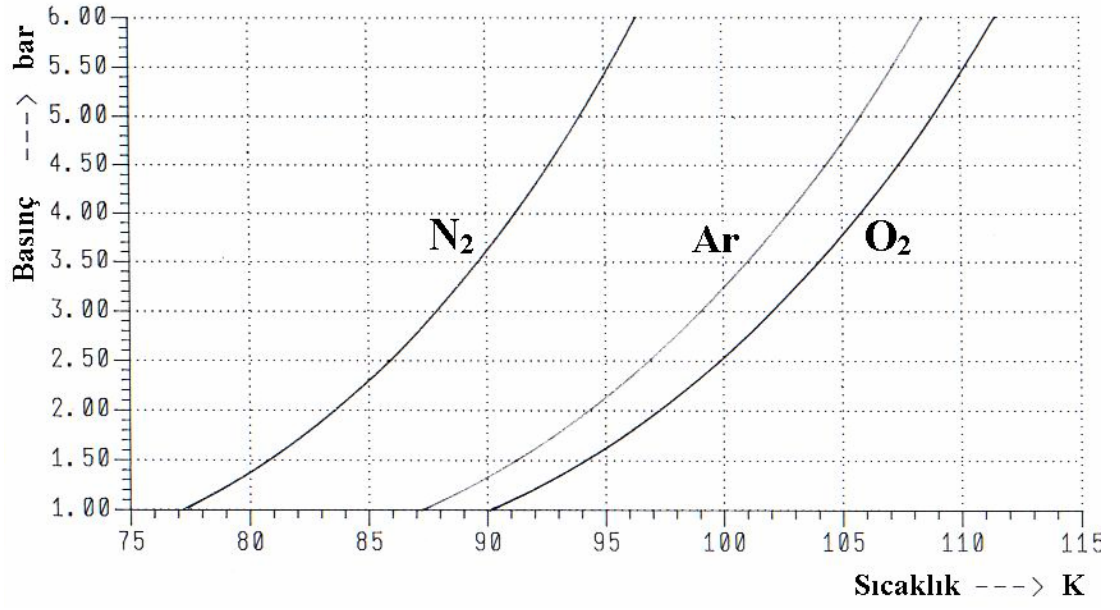
Şekil 3.12'de bu metot şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Linde prensibi ile havanın likitleştirilmesi (Air Separation Technique Course Information Document)

Düşük sıcaklıkta hava ayırıştırma prosesleri ayırma ve ürün saflığını sağlamak için kaynama sıcaklıkları farkından faydalanır. Düşük sıcaklık sistemleri likit ürünler üretebilen tek sistemlerdir (www.uigi.com).

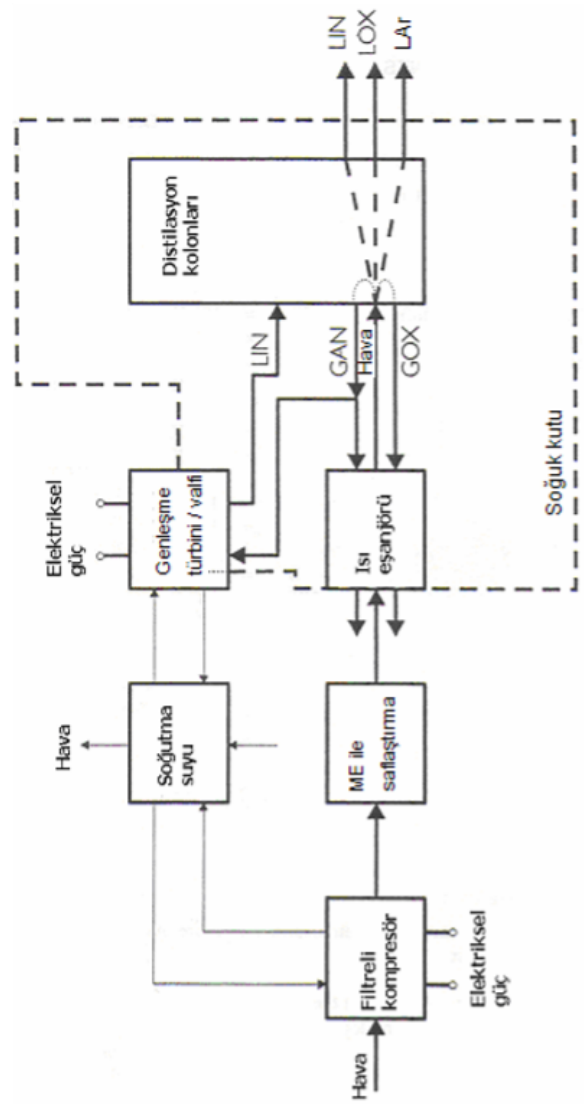
Şekil 3.13'te N_2 , O_2 ve Ar'nın basınç ve sıcaklığa göre kaynama eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.13: Kaynama diyagramı (Air Separation Plants Book).

4. BİR HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ EKİPMANLARININ TANITILMASI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bir hava ayırıştırma tesisinin daha iyi anlaşılması amacıyla bölümleri tanıtılmasına ihtiyaç vardır. Burada bir demir-çelik fabrikasının oksijen, azot, argon ihtiyacını karşılamak amaçlı kurulmuş olan hava ayırıştırma tesisinin ekipmanları referans alınmış ve Şekil 4.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Proses akış şeması. (Air Separation Technique Course Information Document)

4.1 HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ SOĞUK BÖLÜMÜ

4.1.1 Hava Emiş Filtresi

Hava emiş filtreleri, havanın tesise ilk alınması sırasında büyük önem teşkil eden ekipmanlardan birisidir. Çünkü hava filtresi, kompresörün içine emilen havanın süzülmesini, toz, pislik ve her çeşit yabancı maddenin sebep olduğu aşınmadan kompresörü ve tesisin korunmasını sağlamakta olan bir ekipmandır.

Kullanılan hava filtreleri kompresörün büyüklüğüne bağlı şekilde değişkenlik göstermektedir. Hava filtrelerinin seçiminde, kullanılacak olan sektör ve ortamdaki toz partikül büyüklüğü göz önüne alınarak ihtiyaç duyulan filtre sınıfı belirlenir. Hava filtrelerinin geçirgenlikleri mikron birimi ile ölçülür. Bir hava filtresinin geçirgenliği ne kadar az ise kompresöre emilen hava içerisinde yer alan oldukça küçük çapta toz ya da partikülleri tutabilecektir. Tablo 4.1’de filtrelerin uygulama alanları ve sınıfları verilmektedir. Aynı zamanda hava filtresinin özelliklerine bağlı şekilde kompresörün çıkarmış olduğu sesin çok büyük bir kısmını kesebilmektedir (Özdemir 2020).

Tablo 4.1: Filtre sınıfları ve uygulama alanları (Özdemir 2020)

Partikül Boyutu	Filtre Sınıfı	Uygulamalar
10 µm <	G1-G2	Kompakt cihazlarda haşarat koruması vb.
	G3-G4	Klima vb kirlenme korunması (ön filtreleme)
1µm ≤ partikül ≤ 10µm	F5	Dış hava filtresi (depo, garaj vb.)
	F5-F6-F7	Çalışma ortamlarında bulunan klima vb. son filtre.
	F7-F8-F9	Üretim tesisleri, hastaneler vb. son filtre.
1 µm >	H10-H11- H12	Laboratuvarlar, gıda üretim tesisler vb. mekanlardaki mikrop, bakteri, tütün dumanı, metal oksit dumanı, aerosoller vb filtreleme uygulamaları.
	H11	
	H12-H13	
	H14-H15- H16	

Bir hava ayrıştırma tesisinde, atmosfer basınç ve sıcaklığındaki hava emilerek, kompresör girişinde bulunan filtre odasında filtrelendir ve kompresöre girmektedir. Havanın filtre edilmesi genelde ön ve arka kademe olmak üzere iki kademe filtrelenmektedir. Büyük katı parçacıkların tutulmasını ön filtre sağlamaktadır. Arka filtrelerin geçirgenlikleri ise ön filtreye göre daha sık olup, ön filtrede tutulamayan parçacıkların bu aşamada tutulması temin edilmektedir. Bu filtrelerin kirlilik derecelerini ölçmek amacı ile basınç fark sistemleri kullanılmaktadır.

Kompresör emiş hattında en fazla tercih edilen filtre çeşitleri; kaset filtre, torba tip filtre, silindirik tip filtredir. Analizi yapılan tesiste silindirik tip filtreler kullanılmaktadır (Özdemir 2020).

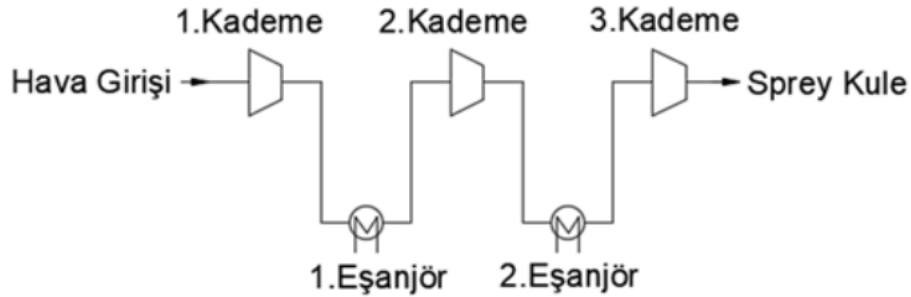
4.1.2 Havanın Basınçlandırılması

Hava ayrıştırma tesislerinde kullanılacak olan kompresörler, gaz ve hava basılması amacıyla kullanılacak olan turbo dinamik kompresörlerdir. Turbo kompresörler, çarkların oluşturmuş olduğu santrifüj kuvvetin etkisiyle gaza ya da havaya kinetik enerji kazandıran ve bu kinetik enerjinin yolunun kısılması ile yayıcı da basınç enerjisine dönüştürüldüğü kompresör tipidir. Turbo kompresörlerde havanın santrifüj kuvvetle (kompresör çarkı dışına) savrulurak hızlanması ve çark çıkışında yığılması, taşıdığı kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüşmesini sağlar.

Hava ayırma ünitesinde kullanılacak olan en temel hava kompresörü 3 kademedir oluşmaktadır. Ana hava kompresörü sistemin ihtiyaç duyduğu bütün havayı temin etmektedir. Kompresör fanları, redüktör üzerine monte edilmiş olan pinyon dişliler vasıtasıyla hareket kazanmaktadır. Ana hava kompresörü elektrik motorundan aldığı tahriki redüktöre ve redüktör üstünde bulunan pinyon dişliler vasıtasıyla fanlara iletmekte ve onlara hareket kazandırmaktadır. Hava kompresörlerinde enerji tüketimleri; akışkan debisine, havanın her bir kademe giriş sıcaklığına ve basınç oranına bağlıdır. Tüm şartlar sabit kalmak koşulu ile hava debisinde görülen %10 artış, enerjinin tüketimini aynı oranda arttırmaktadır (Mahmutoğlu 2006)

Kademelerdeki sıkıştırma işlemi sırasında gazların hacmi küçülürken, sıkıştırma etkisi ile sıcaklık yükselmektedir. Sıcaklık malzeme ve sistemi olumsuz yönde etkileyecek seviyeye gelir. Genellikle yüksek kapasiteli ve yüksek basınçlara çıkabilen kompresörlerde kademe soğutucuları kullanılır. Verimli bir sıkıştırmanın gerçekleştirilebilmesi amacı ile her sıkıştırma işleminden sonra bulunan kademe soğutucuları ile hava soğutulur (Özdemir 2020)

Şekil 4.2’de hava ayrıştırma tesisinde, havanın filtreleme işlemi sonrası en temel hava kompresöründe izlediği yol gösterilmiştir. Filtreleme işlemi ile katı partiküllerden ayrılan hava, 98 kPa ve 20 °C ile en temel hava kompresörünün 1. Kademesine girmektedir. 1. Kademe sonunda 129 kPa, 2. Kademe sonunda 312 kPa ve 3. Kademe sonunda 494 kPa basınç değerine ulaşarak kompresörü terk etmektedir. Her kademe sonrası sıkışarak ısınan hava kademe soğutucularından geçirilerek soğutulmaktadır. 1. Kademe sıkışarak ısınan hava 1. Kademe soğutucusuna yaklaşık 100 °C sıcaklıkta girerek yaklaşık 25 °C’ye soğutulmaktadır. 2. Kademe basınçlandırılan hava 2. Kademe soğutucusuna ise 95 °C sıcaklık ile girip 23 °C’de çıkmaktadır. (Özdemir 2020)



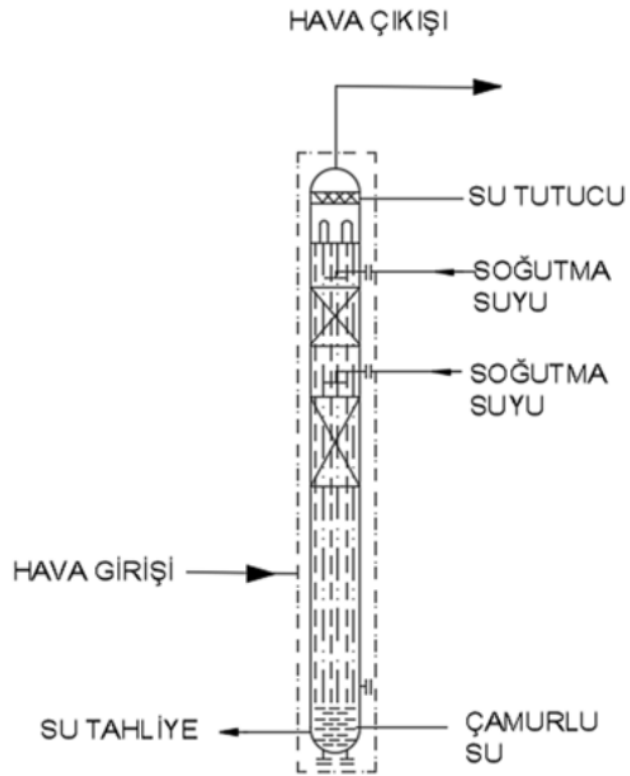
Şekil 4.2: Ana hava kompresörü kademe ve soğutucuları akış şeması (Özdemir 2020).

4.1.3 Sprey Kule

Sprey kulede, soğutma kulesinden gelen soğuk su ve evaporatif kuleden gelen soğutulmuş su, en temel hava kompresöründen ayrılan basınçlı havanın üstüne püskürtülerek soğutma sürecini gerçekleştirmektedir. Sprey kule

pompaları vasıtasıyla soğutma kulesinden gelen su basınçlandırılır. Ana hava kompresöründen 73 °C sıcaklıkta ayrılan hava işlem neticesinde 25 °C'nin altına düşürülmektedir. Tesislerindeki proses havası, hava emiş filtrelerinde filtrelenmesine rağmen katı parçacıklar eksiksiz olarak tutulamaz. Sprey kuleye giren havanın üzerine duşlama yöntemi ile su püskürtülür. Böylece hava hem soğutulmuş hem de içindeki katı parçacıklar kulenin altına çöktürülmüş olur. Sprey kuledeki duşlama işlemi Şekil 4.2'de gösterildiği gibi iki kademedede gerçekleşmektedir. Basınçlı hava sprej kulenin altından girerek öncelikle soğutma kulesinden gelen soğutma suyuyla duşlama yapılır. İkinci duşlama ise evaporatif kulede atık azot kullanılarak soğutulmuş suyla gerçekleştirilir. Soğutulan ve katı partiküllerden arınan proses havası sprej kuleden alınarak molsieve ünitesine gönderilir.

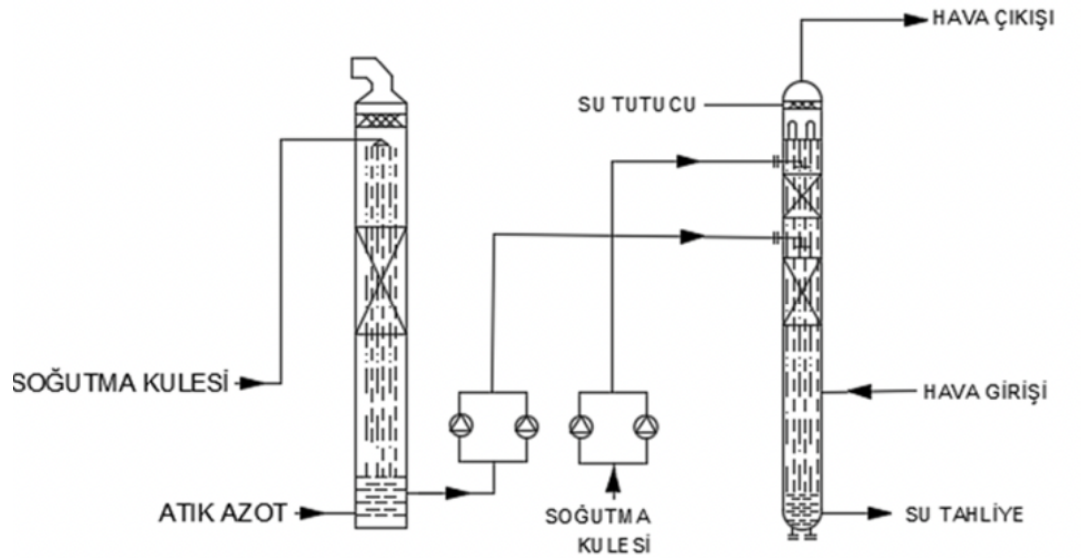
Duşlamalı soğutma sistemlerinde su ve havanın temas yüzeylerini arttırmak amacıyla rashing halkası adı verilen paslanmaz ya da polipropilen kullanılarak yapılan malzemeler kullanılıyor. Rashing halkaları kule içerisinde rastgele doldurulmuş şekildedir.



Şekil 4.3: Sprey kule akış şeması (Özdemir 2020)

4.1.3.1 Evaporatif Kule

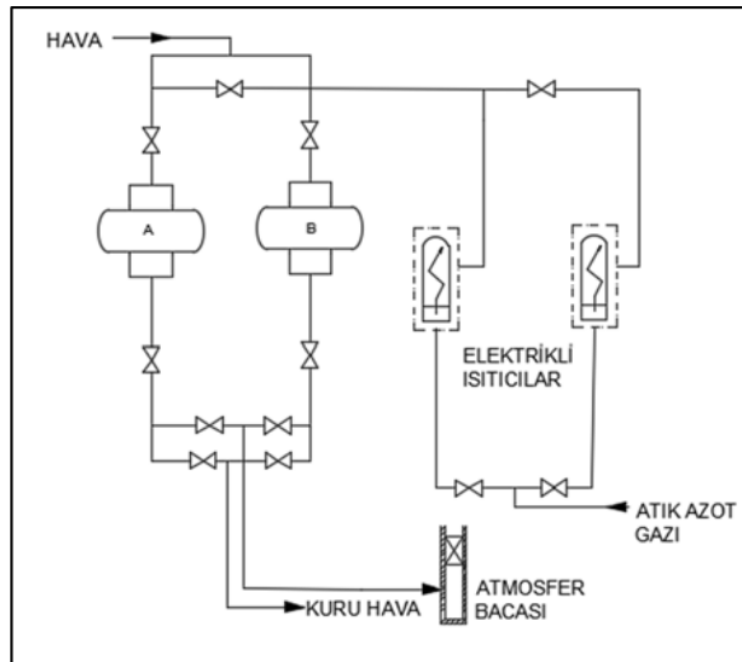
Sprey kulede havanın soğutulması ve duşlanması için kullanılacak olan soğutma kulesi suyunun daha fazla soğutulduğu bölümdür. Burada su, cold-box ünitesinden gelen atık azot yardımı ile soğutulur. Soğutulacak olan su evaporatif kulenin üzerinden, atık azot ise evaporatif kulenin alt kısmından girerek birbirleriyle herhangi bir yardımcı eleman olmadan temas ederek ısı transferi gerçekleştirirler. Sprey kulede olduğu gibi evaporatif kule içerisinde de yüzey alanını arttırmak amacıyla kullanılacak olan rashing halkaları bulunur. Bu durumda soğutma kulesinden gelen su soğur ve evaporatif kulenin altından pompalar vasıtası ile sprey kuleye havanın soğutulması amacıyla gönderilmektedir. Şekil 4.4 Sprey kule ve evaporatif su soğutma sistemi akış şeması verilmektedir. Isınan atık azot ise evaporatif kulenin tepesinden atmosfere verilir. Evaporatif kuleye giren suyun sıcaklığı 22 °C olup çıkışta yaklaşık 10 °C'ye kadar soğutulur (Özdemir 2020)



Şekil 4.4: Sprey kule ve evaporatif su soğutma sistemi akış şeması (Özdemir 2020).

4.1.4 Molsieve Ünitesi

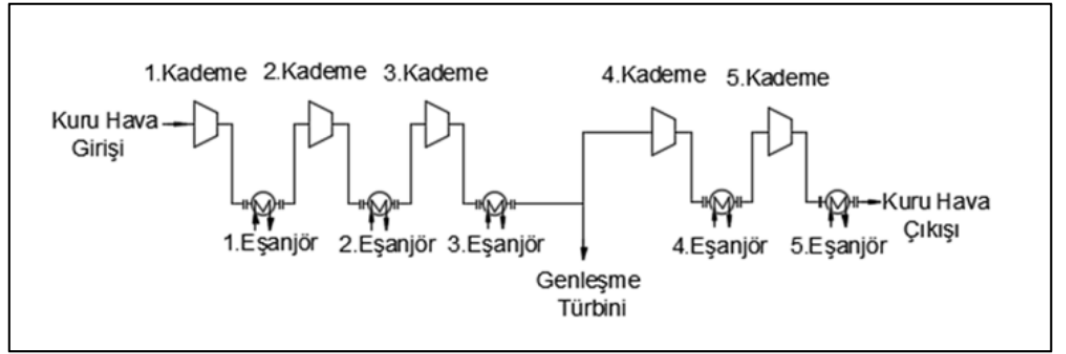
Havanın içerisinde CO₂, su ve hidrokarbonların sisteme zarar vermesini önlemek amacıyla molsieve ünitesi kullanılmaktadır. Bu sistem Şekil 4.5'te görülmüş olduğu gibi birbiri ile belli periyotlar ile çalışan, içerisinde zeolit, alümina taşları ve silikajel bulunan absorpsiyon tüpü, sıcak gaz temin eden elektrikli ısıtıcı ve ısı depolayıcıdan (ısı akümülatörü) meydana gelmektedir. Molsieve ünitesi, rejenerasyon ve adsorpsiyon işlemlerini gerçekleştirmektedir. Adsorpsiyon işlemi, alümina ve zeolit taşları kullanılarak havayı nem, CO₂, ve hidrokarbonlarından ayırma işlemidir. Alüminanın nem tutma kapasitesi zeolit taşına göre daha yüksek olduğundan adsorber tüplerinin alt kısmına konulur ve hava adsorber tüpüne alt kısımdan girer. Bir süre sonra absorpsiyon tüpleri tesis kapasitesine göre havanın içindeki nemi, suyu ve CO₂'yi tutamamaya başlar. Bu durumda rejenerasyon (yenileme) işlemine geçilir. Rejenerasyon işleminde tesiste üretilen atık azotun, elektrikli ısıtıcılar vasıtası ile ısıtılarak absorpsiyon tüplerine hava akışının ters yönünde üflenilmesi ile gerçekleşir. Molsieve ünitesinde bulunan iki tüpün biri havayı temizlerken/kuruturken, diğeri rejenerasyon aşamasını gerçekleştirmektedir. Rejenerasyon süreleri tesis kapasitesine göre değişmekte olup, tesisi kontrol eden yazılımlar ile otomatik şekilde gerçekleşmektedir (Özdemir 2020).



Şekil 4.5: Molsieve ünitesi akış şeması (Özdemir 2020).

4.1.5 Booster Hava Kompresörü

Booster kompresörü yapı olarak en temel hava kompresörü ile aynıdır. Fakat booster kompresörü beş kademedan oluşmaktadır. Kompresör kademelerine hava aksel doğrultuda girerek çarkta dönme hareketi kazanır ve radyal doğrultuda yayıcıya gönderilir. Booster kompresör, en temel hava kompresöründe yaklaşık 450-600 kPa basınç aralığına sıkıştırılıp son olarak molsieve ünitesinde kurutularak gelen havayı 3800-5000 kPa basınç değerine ulaştıran kompresördür. Booster kompresörünün amacı havanın içinde bulundurduğu bileşenlerin ayrıştırılması aşamasında kritik basınç değerine ulaşmalarını sağlamaktır. Booster hava kompresörünün en temel hava kompresöründen farkı son kademesinde de soğutucu ünite bulunmasıdır. Bu aşamadan sonra amaç havanın ileri derecelere soğutulmasıdır (Özdemir 2020)

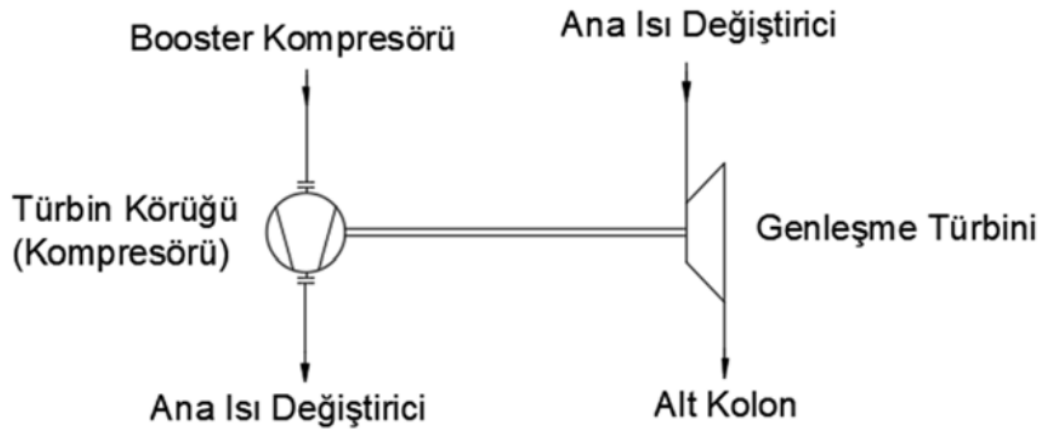


Şekil 4.6 : Booster hava kompresörünün kademe ve soğutucuları akış şeması.

4.1.6 Genleşme Türbini ve Körüğü

Genleşme türbini, Joule Thomson ifadesi ile açıklanan “havanın bir valften geçirilerek basıncının düşürülmesi ile soğumaya uğraması” prensibine göre çalışmaktadır. Genleşme türbini, soğumanın hızlı ve enerji harcamadan havanın basınç düşümünden meydana gelen işin enerjiye çevrilme prensibine göre çalışan ekipmandır. Türbin ve körüğü bir mil ile birleştirilmiş olup, türbin hemde kompresörü çalıştırmaktadır. Türbin körüğü ise bu sırada oluşan enerjiden faydalanılarak kompresörden çıkan havanın basıncını daha yüksek değerlere çıkarmak amacıyla kullanılıyor (Mahmutoğlu 2006).

Şekil 4.7’de genişleme türbini ve körüğü akış şeması gösterilmektedir. Booster kompresörü 3. kademedan 2800 kPa basınç ve 35 °C sıcaklığında ayrılan hava genişleme türbin körüğüne girerek yaklaşık 88°C ve 4200 kPa basınç değerine ulaşarak körükten ayrılmaktadır. Ana ısı değiştiriciden yaklaşık 4000 kPa ve 110 °C sıcaklıkta ayrılan hava, genişleme türbinine girmektedir. Burada basıncı düşürülen ve aşırı soğutulan hava yaklaşık 500 kPa ve -173°C değerlerinde genişleme türbininden ayrılarak cold-box’a yol almaktadır (Özdemir 2020)



Şekil 4.7: Genleşme türbini ve körüğü akış şeması (Mahmutoğlu 2006).

4.2 HAVA AYRIŞTIRMA TESİSİ SOĞUK BÖLÜMÜ

Bu ünite, atmosfer bölümünde basınçlandırılmış, kurutulmuş ve saflaştırılmış havanın içerisinde bulunan oksijen, azot ve argon gazlarının distilasyon yöntemi ile ayrıştırılarak sıvılaştırılması işlemi yapılmaktadır. Cold-box, havanın ayrıştırma ve saflaştırılma işleminin yapıldığı bölümdür. Ayrıştırma işlemi havanın bileşenlerinde bulunan gazların kaynama noktalarının farklılıklarından yararlanılarak yapılmaktadır. Hava bileşenlerinin 100 kPa basınç altında kaynama noktaları birbirine çok yakın olması sebebiyle birden fazla distilasyon düzeneği kullanılmaktadır. Burada gerçekleştirilen ayrıştırma işlemi ayrımsal (fraksiyonlu) damıtma yöntemidir. Bu ünite içerisinde ana ısı değiştiricileri, yüksek basınçlı kolon, kondense, düşük basınçlı kolon, ham argon kolonu, saf argon kolonu, genişleme valfleri ve kriyojenik pompalar meydana gelmektedir. Kolonlardaki distilasyon işlemlerinin gerçekleşebilmesi için

delikli tepsiler ve yapısal dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Yapısal dolgu malzemeleri tek başlarına kullanılacakları gibi delikli tepsilerle de beraber kullanılabilir. Günümüzde modern tesislerde düşük basınç kolonlarında yapısal dolgu malzemesi, yüksek basınç kolonlarında ise delikli tepsiler kullanılmaktadır (Gürsoy 2017).

4.2.1 Ana Isı Değiştiriciler

Cold-box'ta sıvı halde elde edilen oksijen ve azotun ısısının proses havasına aktarılmasını sağlayarak havanın soğumasını, sıvı oksijen ve azotun da gazlaşarak şebekeye gönderilmesini sağlayan ekipmandır. Sıvı ürünler burada gazlaşarak şebekeye gönderilir. Ana ısı değiştiricilerde farklı basınç ve sıcaklık değerlerine sahip sıvı ve gaz ürünler arasında gerçekleşen ısı transferi ile ürünlerin sıcaklıkları ve faz durumları istenilen değere ulaştırılır. Ana ısı değiştirici sayısı, ısı değiştiricilerden geçirilen ürünlerin miktarı, debisi ve tesis kapasitesine göre değişmekle birlikte ürünlerin basıncına göre alçak ve yüksek basınçlı ana ısı değiştirici olarak sınıflandırılmaktadır (Gürsoy 2017)

4.2.2 Yüksek Basınçlı (Alt) Kolon

Yüksek basınç kolon, düşük sıcaklıkta gelen havanın gaz azota ve oksijence zengin havaya ayrıştırıldığı bölümdür. Beş kademeli booster kompresörü bulunan bir sistemde 3. kademe çıkışında bir dağıtıcı bulunur. Havanın belirli bir kısmı booster kompresörün 5. kademesinden, ana ısı değiştiriciden ve genişleme valfinden geçerek sıvı-gaz ayırıcısına gider. Dağıtıcıdan geriye kalan hava ise türbin körüğünde tekrar sıkıştırılıp ana ısı değiştiricisinden geçirilerek genişleme türbini ve yüksek basınç kolonuna yönlendirilir. Ana hava kompresöründen çıkan havanın büyük bir kısmı booster hava kompresörüne giderken geri kalan kısımda moleküler elek sisteminden geçirilerek ana ısı değiştiricilerinde soğutulmuş olarak kolona girmektedir. Bu kolonun basınçlı kolon olarak adlandırılmasının nedeni yaklaşık 0,45 – 0,6 MPa basınç aralığında çalışması ve üst kolona göre basıncının yüksek olmasıdır. Molsieve ünitesi ve genişleme türbini çalışma basınçları bu kolonun çalışma basıncına uygundur. Ancak

booster kompresörden gelen havanın basıncı yaklaşık 5,5 MPa' dır ve genişleme valfi kullanılarak kolonun çalışma basıncına düşürülür (Özdemir 2020)

4.2.3 Düşük Basıncı (Üst) Kolon

Hava ayrıştırma tesislerinde yüksek basınçlı kolona düşük basınç kolon eklenerek saf oksijen ve nitrojen aynı anda elde edilebilmektedir. Yüksek basınç kolonundan gelen ürünler reflux akış yapılması ve genişleme valflerinden geçirilip 0,05 – 0,15 MPa basınç arasında çalışması sebebiyle bu kolon düşük basınç kolonu olarak adlandırılmaktadır (Gürsoy 2017) Düşük basınç kolonunun sıcaklığı basınç düşümünden dolayı yüksek basınçlı kolona göre daha düşüktür. Düşük basınç kolonunda da akışkanların birbirleriyle ısı transferi gerçekleştirebilmeleri için genellikle yapısal dolgu malzemeleri kullanılmaktadır.

4.2.4 Kondenser (Reboiler)

Düşük basınçlı kolonun en alt kısmında içerisinde bulunan gaz azotun sıvılaştırılmasını sağlayan bir ısı değiştiricidir. Yüksek basınçlı kolondan gelen ve genişleme valfi yardımıyla düşük basınçlı kolona reflux akış yaptırılan oksijence zengin sıvı hava yapısal dolgu malzemelerinden süzülerek kolonun en altında bulunan kondensenin dış hacmini doldurmaktadır. Kondensenin iç hacminde yüksek basınçlı kolonda meydana gelen ayrıştırma işlemi sonucu ortaya çıkan gaz azot bulunmaktadır. Azot gazının sıcaklığı kondensenin dış hacminde biriken oksijence zengin sıvı havadan daha yüksek olması nedeniyle aralarında ısı transferi gerçekleşir. Gerçekleşen ısı transferi sonucunda kondensenin içerisinde bulunan azot gazı sıvı faza geçerek sıvı azot, kondensenin dış hacminde bulunan oksijence zengin hava içindeki azot ve argon ise buharlaşarak saf sıvı oksijen elde edilmiş olur (Özdemir, 2020).

4.2.5 Ham Argon Kolonları

Düşük basınçlı kolonun argon transfer bölgesinden alınan ve içerisinde yaklaşık %9,9 Ar, %90 O₂ ve %0,1 N₂ bulunan gazın oksijenden arındırıldığı bölümdür. Ham argonun içerisinde bulundurduğu oksijen içeriği argon ürün saflığı olarak adlandırılır ve bu saflık 1 ppm O₂'den küçüktür. O₂'nin ham argon kolonundan alınmasının nedeni; çok fazla ısı transfer yüzeyine ihtiyaç duyulmasıdır. İşlem sonucunda basınç kaybı artacaktır. Bu basınç kaybını minimize etmek için yapısal dolgu malzemesi kullanılmaktadır (Özdemir 2020).

4.2.6 Saf Argon Kolonu

Ham argon kolonunda meydana gelen işlemler sonucu argon içerisinde yaklaşık 1ppm O₂ ve %1 N₂ bulunmaktadır. Sıvı-gaz seperatöründen çıkan argon gazı genişleme valfinden vasıtasıyla -183 °C'de saf argon kolonu orta kısımdan giriş yapar. Saf argon kolonu içerisinde bulunan yapısal dolgu malzemesi üzerinden yükselerek kolon tepesinde bulunan kondenseri dolduran argon gazı burada sırasıyla kondense ile aşırı soğutucudan geçirilerek gelen sıvı azot ile ısı transferi gerçekleştirerek sıvılaşır. Sıvı faz durumuna geçen argon tekrar yapısal dolgu malzemesi üzerinden süzülür ve kolonun en alt kısmındaki evaporatörün etrafına dolmaktadır. Sıvı argon ile yüksek basınçlı kolonun tepesinden gelen gaz azot arasında ısı transferi ile azotun buharlaştırılması sağlanarak saf argon üretilir. Sıvılaşan azot ise genişleme valfinden geçerek kolonun üst kısmında bulunan kondenserin etrafına dolarak gaz argonu sıvılaştırmaya yardımcı olur. Her ne kadar argon içerisindeki oksijen ve azot miktarı azaltılmaya çalışılsa da her zaman argon içerisinde bir miktar N₂ ve O₂ bulunmaktadır. Argon içerisinde en fazla ≤ 3 ppm N₂ ve ≤ 2 ppm O₂ olması beklenmektedir. Saf argon kolonu kondenserinde argonu sıvılaştırmak amacıyla kullanılan sıvı nitrojen gazlaşarak düşük basınçlı kolonun tepe noktasından çıkan atık azot ile birleşerek molsieve ünitesi, evaporatif kule ve prosesin çeşitli ekipmanlarında kullanılmak üzere yönlendirilir. Argonu sıvılaştırırken gaz fazına geçmeyen nitrojen sıvı olarak eject adı verilen bacadan tahliye edilmektedir (Özdemir 2020).

5. ÇALIŞMANIN TERMODİNAMIĞI

Bu çalışmada, oksijen, nitrojen ve argon üreten kriyojenik hava ayırma tesisinin kritik tesis elemanlar incelenmiştir. Sistemin ekipmanlarından kompresör, genişleme türbini, pompa başta olmak üzere kritik kısımların Termodinamiğin I. ve II. Kanununa bağlı olarak analizleri simülasyon programı üzerinden yapılmıştır. Analiz için aşağıdaki hususlar göz önüne alınmıştır:

- Tasarım programının analiz sonuçlarını elde etmede verimlilik açısından araştırması yapılmalıdır.
- Kimyasal bir prosesin termodinamik açısından incelenmesi söz konusu olduğundan kimyasal bileşenleri içeren bir tasarım programı seçilmiştir.
- Kimyasal prosesin elemanlarının kolayca seçilebilmesi için hem termodinamik hem kimyasal denklemler göz önünde bulundurularak bir tasarım programı seçilmiştir.
- Simülasyon programı ayırıcılar, döner parçalar, ısı transferi, matematiksel modelleme gibi birçok modüle ulaşım sağlamada yardımcı olmaktadır.
- Mevcut çalışmalarda kullanılan Aspen Plus programının yeterliliği her ne kadar kanıtlanmış olsa da program ücretlidir ve eğitim sürümü ücretlidir. Bu programa muadil olarak ChemSep programının olduğu görülmüştür.
- Çalışmaların doğruluğunun kanıtlanması amacıyla ChemSep simülasyon programının seçilmesi uygun bulunmuştur.

5.1 Devre Ekipmanlarının Termodinamik Modellenmesi

Enerji, iş yapabilme yeteneğidir. Termodinamikteki tanımı; değişiklik meydana getirilebilme kabiliyeti, kapasitesi olarak tanımlanabilmektedir.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesini ifade etmektedir. Yani enerji var edilemez ve yok edilemez. Sisteme enerji geçişi; kütle, ısı ve iş yolu

ile gerçekleşir. Hal değişimi esnasında enerjinin korunumu ilkesi denklem (5.1)'deki gibi ifade edilebilir;

$$E_g - E_ç = \Delta E_{\text{sistem}} \quad (5.1)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde sistemin toplam enerjisi genellikle potansiyel, kinetik ve iç enerjiden oluşur. Diğer enerji türlerinin etkileri bu sistemlerde göz ardı edilebilir. Sistemin toplam enerjisi eşitlik (5.2) ile hesaplanmaktadır (Karakoç 2012)

$$E = U + KE + PE = U + \frac{mv^2}{2} + mgz \quad (5.2)$$

Birden fazla girişi ve çıkışı olan sürekli akışlı açık sistemlerde, kütlelerin korunumu denklem (5.3)'teki gibi yazılmaktadır.

$$\Sigma_g \dot{m}_g = \Sigma_ç \dot{m}_ç \quad (5.3)$$

Açık sistem için enerjinin korunumu ilkesi gereği enerji ilişkisi akış enerjisini de kapsayacak şekilde tanımlamak istendiğinde iç enerjiyi de kapsayan entalpi adı verilen bir terim ile sistemin enerji ilişkisi denklem (5.4)'teki gibi yazılabilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma_ç \dot{m}_ç \left(h_ç + \frac{v_ç^2}{2} + g + z_ç \right) - \Sigma_g \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + g + z_g \right) \quad (5.4)$$

Enerji eşitliğinde sistem için $\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$ olarak yazıldığında genel enerji denklemi (5.4), denklem (5.5)'teki hali alır.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma_ç \dot{m}_ç h_ç - \Sigma_g \dot{m}_g h_g \quad (5.5)$$

Kompresör, türbin, pompa, ısı değiştiriciler ve kısılma vanası gibi ekipmanların potansiyel ve kinetik enerjileri gözardı edilebilmektedir. Sistem adyabatik ise ısı terimi Q, sıfır olmaktadır. Kısılma vanaları gibi yüzey alanı küçük ekipmanlar adyabatik kabul edilebilmektedir. Diğer ekipmanların da çevreyle ısı transfer ilişkileri ihmal edilebilir düzeyde ise adyabatik kabul edilebilmektedir (Rosen 2014). Sürekli akış altında çalışan bu ekipmanlar için adyabatik koşullar altında izentropik veya adyabatik verimli olarak hesaplanmaktadır.

Türbin izantropik verimi denklem (5.6) ile hesaplanabilir;

$$\eta_T = \frac{\text{Gerçek türbin işi}}{\text{İzantropik türbin işi}} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \quad (5.6)$$

Kompresörlerin izantropik verimi denklem (5.7)'de belirtildiği gibidir;

$$\eta_K = \frac{\text{Gerçek Kompresör İşİ}}{\text{İzantropik Kompresör İşİ}} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (5.7)$$

Pompaların izantropik verimi eşitlik (5.8)'de verildiği gibidir;

$$\eta_P = \frac{\text{Gerçek Pompa İşİ}}{\text{İzantropik Pompa İşİ}} = \frac{W_a}{W} = \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1} \quad (5.8)$$

Hal değişimi ve entropi artışı ilkesi uyumlu ilerlemek zorundadır. Bir diğer ifade ile hal değişimi ile üretilen entropi, $S_{\text{üretim}} \geq 0$ olmalıdır. Bu ilkeyi sağlamayan bir hal değişimi olamaz.

Toplam entropi değişimi yalnızca tersinir hal değişimleri sırasındakorunmaktadır ve gerçek tüm hal değişimlerinde artmaktadır. Entropinin sabit kaldığı hal değişimleri izantropik hal değişimi olarak ifade edilmektedir. Entropi üretimi denklem (5.9)'da gösterildiği gibidir. Üretilen entropi hal değişimi ile meydana gelen tersinmezliklerin bir ölçütü olup, mühendislik sistemlerindeki verimlerin saptanması için kullanılan bir kriterdir (Rosen 2014).

$$S_{\text{üretim}} = \sum_c \dot{m}_c s_c - \sum_g \dot{m}_g s_g - \sum \frac{\dot{Q}_s}{T_s} \geq 0 \quad (5.9)$$

O indisi ölü hal şartını göstermek üzere akış ekserjisinin ifadesi Denklem (5.10)'da gösterilmektedir.

$$\Psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (5.10)$$

5.2 Kompresör Verimliliği

Kompresör için verimlilik, shaft mil işinin ne kadarlık kısmının gaz basıncını yükseltmek için kullanıldığıdır. Kompresörde meydana gelen sıkıştırma ile sıcaklık artmaktadır ve ısı dışarı atılmalıdır.

Verimlilik için kompresörün dizaynına, ara çark sayısına ve ara kademe soğutucu sayısına önem verilmelidir. 4 kademeli bir kompresörün 4 çarkı ve 3 ara soğutucusu bulunmalıdır. Operasyonel verimlilik açısından 3 kademeli ve 2 kademeli kompresörlerden verimi yüksektir.

Burada hesaplanan izotermal verimliliktir. Çok sayıda çarka ve ara soğutucuya sahip olan kompresör sabit sıcaklıkta sıkıştırılmış ise en düşük enerji tüketimi ile sistemin elemanının optimizasyonu sağlanacaktır.

Burada emiş sıcaklığı, basınç, akış ve dağıtım basıncı not edilmiş ve izotermik enerjiyi hesaplamak için kullanılmıştır (Air Separation Technique Course Information Document).

Basınç: 1016 mbar

Hava sıcaklığı: 30 °C

Soğutma suyu sıcaklığı: 39 °C

Kompresörün izotermal gücünü veren denklem:

$$W = m/M.R.[T_1.\ln(P_2/P_1) + T_2.\ln(P_3/P_2) + \dots + T_n.\ln(P_{n+1}/P_n)] \quad (5.11)$$

Kütlesel akış Nm³/h biriminden kg/s birimine çevrilecektir. Burada hava ait yoğunluk 1,29 kg/Nm³ ile çarpılarak 3600 s/h'ye bölünecektir.

Verim, her bir kademe için izotermal gücün toplamının veya $T_1.\ln(P_{\text{çıkış}}/P_1)$ ifadesinin gerçek güç tüketimine bölünmesi ile elde edilir.

M = 100 kg/s

T₁ = 30 °C = 303 K

T₂ = 40 °C = 313 K

T₃ = 36 °C = 309 K

T₄ = 37 °C = 310 K

$$P_1 = 1,01 \text{ bar}$$

$$P_2 = 1,78 \text{ bar}$$

$$P_3 = 2,26 \text{ bar}$$

$$P_4 = 3,42 \text{ bar}$$

$$P_{\text{çıkış}} = 6,35 \text{ bar}$$

$$W = 100/28,96,8,314.[303.\ln(1,78 / 1,01)+313 .\ln(3,42 / 1,78)+309 .\ln(3,42/2,26)+ 310.\ln(6,35 / 3,42)]$$

$$=2895 \text{ kW}$$

$$\text{İzotermal iş} = 2895 \text{ kW}$$

$$\text{Şaft Gücü} = 4739 \text{ kW}$$

$$\% \text{ Verim} = \text{izotermal güç} / \text{şaft gücü} = \%61$$

5.3 Genleşme Türbini Verimi

Verim, gerçek çekilen ısı miktarının, ideal olarak çekilen ısı miktarına bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu genleşme türbininde entalpi farklarının debi ile çarpılmasıyla soğutma yükleri hesaplanabilmektedir.

İdeal olarak çekilen ısı, sabit entropide, izantropik olarak genişlemektedir. Bu sebeple genleşme türbininin verimi izantropik verim olarak isimlendirilir.

Şekil 5.1’de türbinin soğuk tarafındaki genleşmeyi sembolize eden T_1 ve sıcak tarafını temsil eden T_2 çizgileri çizilmiştir. Giriş ve çıkış noktalarındaki basınç ve sıcaklık değerleri işaretlenmiştir.

T_2 çizgisindeki çıkış değerlerini bulmak için, giriş noktasından aşağı doğru dik inilerek entropi sabitlenmiştir. Dik inilen çizgi çıkış basıncı değerinde bitirilmiş olup, bitirilen noktadaki entalpi değeri seçilebilir. Giriş noktası olarak 7400 ve 7600

kJ/kmol çizgileri arasında çıkış noktasının ise 5000 ve 5200 kJ/kmol arasında entalpi değerleri okunmaktadır. İdeal çıkış noktasını Şekil 5.1'deki grafikten 4800-5000 kJ/kmol aralığında olduğu bulunur. Cetvel vasıtasıyla entalpi değerleri okunabilir. Bu okumaya göre:

$h_g = 7575$ kJ/kmol, $h_ç = 5110$ kJ/kmol, $h_{iç} = 4850$ kJ/kmol olarak bulunmuştur. Buradaki h_g , giriş entalpi değeri, $h_ç$, çıkış entalpi değeri, $h_{iç}$ ise ideal çıkış entalpi değeridir.

$$Q_{gerçek} = h_g - h_ç \text{ (kJ/kmol)} \quad (5.12)$$

$$Q_{gerçek} = 7575 - 5220 = 2465 \text{ kJ/kmol}$$

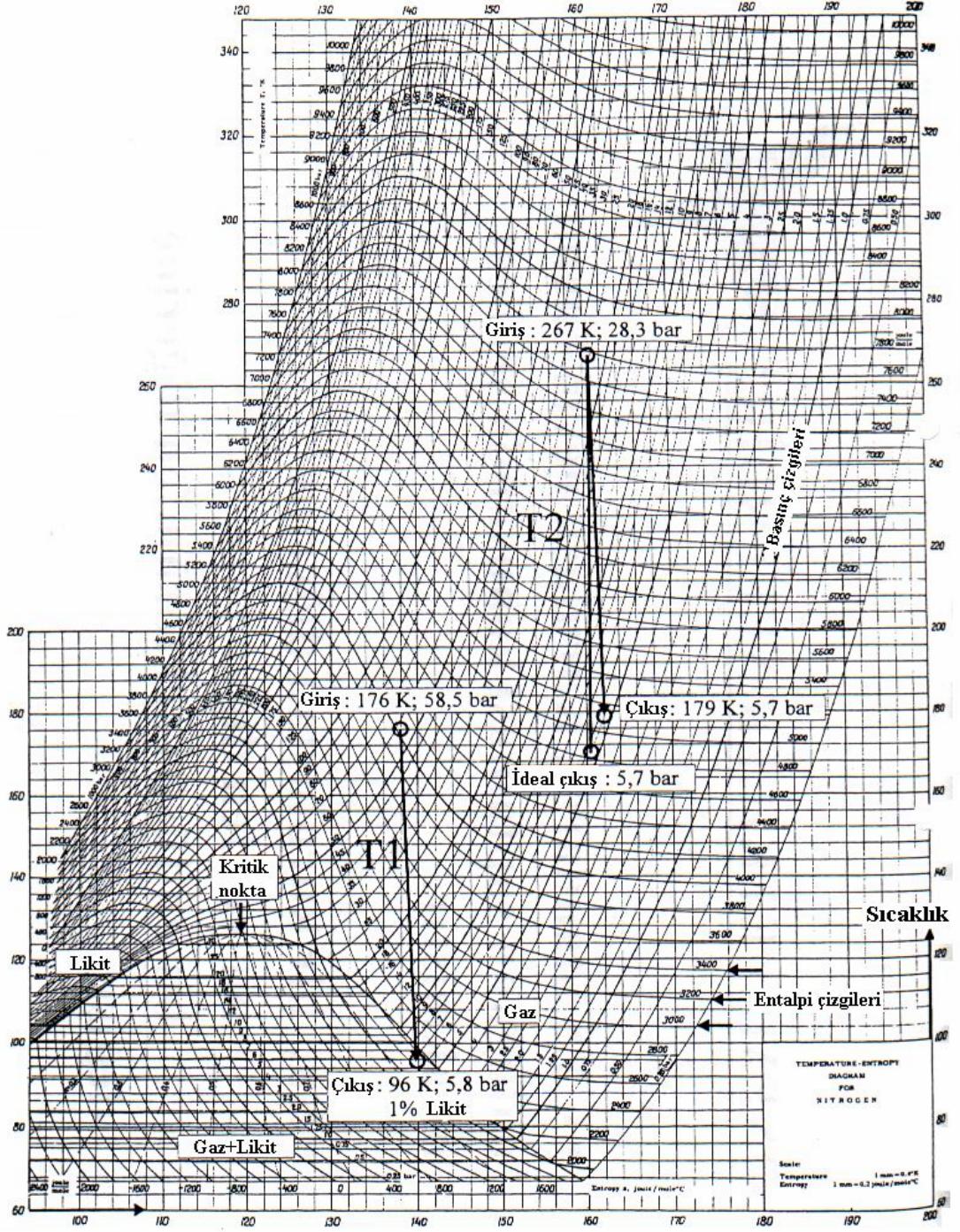
$$Q_{ideal} = h_g - h_{iç} \text{ (kJ/kmol)} \quad (5.13)$$

$$Q_{ideal} = 7575 - 4850 = 2725 \text{ kJ/kmol}$$

$$\eta_{izantropik} = \frac{Q_{gerçek}}{Q_{ideal}} \quad (5.14)$$

$$\eta_{izantropik} = \frac{2465}{2725} = 0,904$$

Burada bulunan %90,4'lük verim, genişleme türbininin T_2 (sıcak) kısmındaki verim ifadesidir. T_1 (soğuk) kısmındaki türbin için verim hesabı yapmak imkansızdır. Çünkü türbin içerisinde çok düşük bir miktar dahi olsa sıvı (likit) bulunmaktadır.



Entropi

Şekil 5.1: Genleşme türbinindeki sıcak ve soğuk kısım için T-s diyagramı.

5.4 Güç Tüketimleri

Burada katalog değerlerinden yola çıkılarak güç tüketim hesapları yapılmıştır.

Hava Kompresörü için;

Voltaj=13,2 kV

Akım=311 A

Güç Faktörü = 0,765

$$\text{Güç} = \sqrt{3} \cdot \text{Voltaj} \cdot \text{Akım} \cdot \text{Güç Faktörü} \quad (5.15)$$

$$\text{Güç} = \sqrt{3} \cdot 13,2 \cdot 311 \cdot 0,765 = 5439,4 \text{ kW}$$

Hava Kompresörü Yağ Tankı Egzost Fanı için;

Güç: 0,4 kW (katalog değeri alınmıştır.)

Hava Kompresörü Susturucu Fanı için;

Güç: 3 kW (katalog değeri alınmıştır.)

N₂ Çevrim Kompresörü için;

Güç = 5000 kW (katalog değeri alınmıştır.)

N₂ Çevrim Kompresörü Yağ Tankı Egzost Fanı için;

Güç: 0,4 kW (katalog değeri alınmıştır.)

N₂ Çevrim Kompresörü Susturucu Fanı için;

Güç: 3 kW (katalog değeri alınmıştır.)

Genleşme Türbini Yağ Pompası için;

Güç: 3,7 kW (katalog değeri alınmıştır.)

Su Soğutma Kulesi Fanları için;

Voltaj: 373,2 V

Akım: 88 A (1 nolu fan)

81,7 A (2 nolu fan)

Güç Faktörü: 0,937

Güç Denklem 5.15'ten elde edilebilir:

$Güç = \sqrt{3} \cdot Voltaj \cdot Akım \cdot Güç Faktörü$

$Güç = \sqrt{3} \cdot 0,3732 \cdot 88 \cdot 0,937 = 53,3 \text{ kW (1 nolu fan)}$

$Güç = \sqrt{3} \cdot 0,3732 \cdot 81,7 \cdot 0,937 = 49,5 \text{ kW (2 nolu fan)}$

Su Soğutma Kulesi Su Pompaları:

Voltaj: 373,2 V

Akım: 135,7 A (1 nolu pompa)

136,1 A (2 nolu pompa)

Güç Faktörü: 0,86

Güç Denklem 5.15'ten elde edilebilir:

$Güç = \sqrt{3} \cdot Voltaj \cdot Akım \cdot Güç Faktörü$

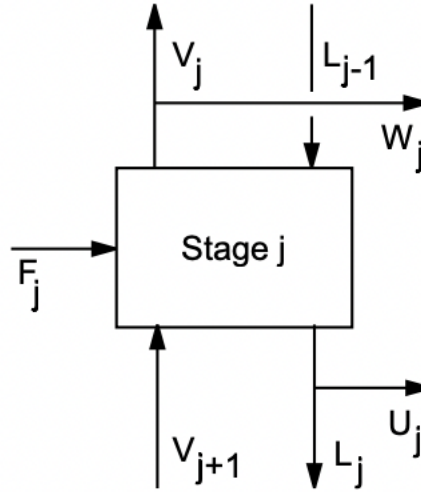
$Güç = \sqrt{3} \cdot 0,3732 \cdot 135,7 \cdot 0,86 = 75,4 \text{ kW (1 nolu pompa)}$

$Güç = \sqrt{3} \cdot 0,3732 \cdot 136,1 \cdot 0,86 = 75,6 \text{ kW (2 nolu pompa)}$

6. ÇALIŞMANIN SİMÜLASYONU

6.1 ChemSep Programının Algoritma Mantığı

ChemSep simülasyon programı denge aşamalarını kontrolde esas alan bir programdır. Denge modeli ilk olarak Sorel (1893) tarafından alkolün ayrıştırılmasında kullanılmıştır. O zamandan bu yana birçok ayrıştırma prosesi için kullanılmıştır: damıtma, rektifikasyon, absorpsiyon, azeotropik, petrol rafinerisi distilasyon olmak üzere birçok ayrıştırma yönteminde kullanılmaktadır.



Şekil 6.1: ChemSep programının denge halinin şematik diyagramı (The ChemSep Book, 2015).

Denklem modellemede denge aşaması işlemlerini çözmek için ve önerilen yöntemleri daha iyi anlamak için, temel simülasyon modeline aşina olmak gerekmektedir. Bir denge aşamasının şematik modeli Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Aşağıdaki aşamadan gelen buhar ve yukarıdaki aşamadan gelen sıvı, herhangi bir taze veya geri dönüşüm beslemesi ile bir iterasyon gerçekleştirir. İterasyondan çıkan buhar ve sıvının birbirini ile denge halinde olduğu varsayılmaktadır. Tam bir ayrıştırma işlemi, bu denge aşamalarının bir dizi halinde modellenmesi ile elde edilmektedir.

ChemSep programı; damıtma, absorpsiyon ve ekstraksiyon işlemleri için kullanılan ve kolonların analiz edilmesinde kullanılan bir simülasyon programıdır.

Klasik denge aşaması kolon modelini hıza dayalı bir kolon modeliyle tek bir arayüzde birleştirmektedir. Yaklaşık 400 kimyasalı ve 40'a yakın bileşeni kapsayan veri tabanını kullanmaktadır. CAPE-OPEN modülü ile akış simülasyon modelinde kolon tasarımı yapılmasını sağlamaktadır. Chemsep hız tabanlı model, doğrulanmış kütle transfer katsayısı, basınç düşüşü ve kapasite modelleri içermektedir. Entegre tasarım modu, tepsili ve paketlenmiş sütunlar için basınç düşüşü modelleri dahil olmak üzere tasarımı sağlamaktadır. McCabe-Thiele ve işlem diyagramları gibi simülasyon sonuçlarını analiz etmeyi sağlamaktadır.

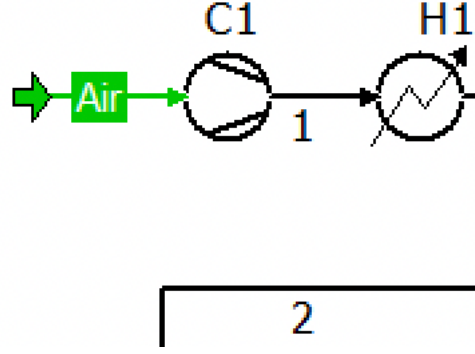
Bütün bu özelliklerine rağmen ısı transferi açısından incelendiğinde kısıtlamalar bulunmaktadır. Kolonun paketlenmiş sütun içerisinde tasarlanması nedeni ile ısı transfer yüzey alanlarının kontrol edilmesi zor bir hale gelmektedir. Ayrıca kolonun iki parça olarak incelenmesi dengesiz faz noktalarının analizinde zorluklara neden olmaktadır (ChemSep Book, 2014).

6.2 Çalışmanın Simülasyonu

Bu çalışmada 30°C sıcaklık ve 1 atm basınçta 100 kg/s hava geçen bir kriyonejik hava ayırma tesis modeli oluşturulmaya çalışılmış ve ChemSep programında simüle edilmiştir. Hava ayırma ünitesindeki elemanları Ek A'da tanıtılmıştır. Ek B'de sistemin düğüm noktaları ve elemanları gösterilmiştir. Ek C'de düğüm noktalarının hesaplamasına ait kalan değerler sistemin daha anlaşılabilir olmasını sağlamak amacıyla sunulmuştur.

Hava ayırma ünitesinde ilk olarak atmosferik bölüme giren hava sıvılaştırma ünitesinde saflaştırma ve filtreleme işlemine tabi tutulmaktadır. Burada kurutucu yatakların içerisinde moleküler parçacıkların ayrıştırılması sağlanmaktadır.

Şekil 6.2'de gösterildiği gibi hava ilk olarak C1 kompresörüne girerek 1. Kademe sıkıştırma işlemini gerçekleştirmektedir. Hava, 1 atm basınçta ve 30°C sıcaklıkta C1 kompresörüne girmektedir. Atmosfer koşullarında birinci kompresörde sıkıştırılan hava 1,98 bar basınçta ve 110 °C sıcaklıkta H1 eşanjörüne girerek burada sıcaklığı bir miktar düşürülerek 1,78 bar basınçta 40 °C de 2. Düğüm noktasından çıkmakta ve ara soğutma için H1 eşanjörüne girmektedir.



Şekil 6.2: 1. kademe kompresör şeması.

Simülasyon programı ChemSemp ile C1 kompresörüne ait değerler hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 6.1’de verilmektedir.

Eşanjör tasarımında kullanılan enerji denklemleri denklem 6.1-6.3’te belirtilmiştir.

$$(\dot{Q}_{giren}) = (\dot{Q}_{çıkan}) \quad (6.1)$$

$$\sum (h_{giren}) = \sum (h_{çıkan}) \quad (6.2)$$

$$\dot{m} \cdot h_{giren} = \dot{m} \cdot h_{çıkan} \quad (6.3)$$

Burada \dot{Q}_{giren} eşanjöre birim zamanda giren toplam enerji, $\dot{Q}_{çıkan}$ birim zamanda çıkan toplam enerjiyi ifade etmektedir. Buradan toplam entalpi (\dot{H}) değerleri kütleli debi (\dot{m}) ile çarpımı neticesinde elde edilmiş olup, Tablo 6.1-6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.1: C1 kompresörünün simülasyon sonuçları

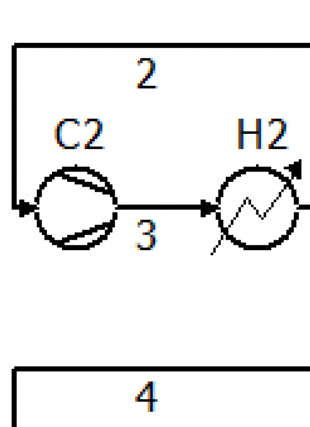
	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	100	474899	17786,7	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	8,5058e+06	22071,4	2697,57	723,426	32,1139

Şekil 6.2’de gösterildiği gibi C1 kompresöründe sıkıştırılmış hava buradan H1 eşanjörüne girerek ara soğutma sağlanacaktır. H1 eşanjörüne ait hesaplamalar simülasyon programında yapılmış ve eşanjöre ait değerler hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 6.2’de yer almaktadır.

Tablo 6.2: H1 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	100	8,5058e+06	22071,4	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	1,46252e+06	4822,06	2697,57	723,426	32,1139

H1 eşanjöründen geçirilmiş hava, Şekil 6.3'te gösterildiği gibi 2. kademe kompresörü olan C2 kompresörüne girmektedir. 2. düğüm noktasında 1,78 bar basınç ve 40 °C sıcaklıkta C2 kompresörüne giren hava 3,46 bar basınçta ve 122 °C sıcaklıkta H2 eşanjörüne 3. düğüm noktasından girmektedir. 3. ve 4. düğüm noktasında eşanjör vasıtasıyla soğutulan hava buradan 3.42 bar basınç ve 40 °C sıcaklıkta çıkmaktadır.



Şekil 6.3: 2. kademe kompresör şeması.

Simülasyon programı ChemSemp'de C2 kompresörüne ait değerler hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 6.3'te verilmektedir.

Tablo 6.3: C2 kompresörünün simülasyon sonuçları

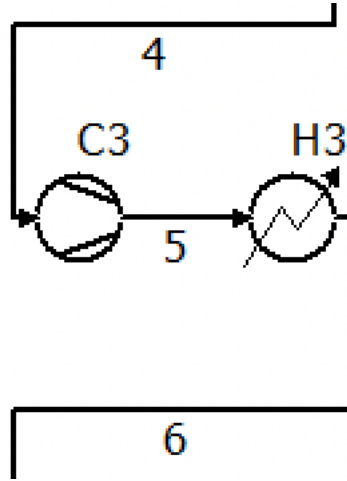
	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	100	1,46252e+06	4822,06	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	9,68434e+06	9076,33	2697,57	723,426	32,1139

C2 kompresöründen çıkan hava H2 eşanjöründe ara soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. H2 eşanjörüne ait değerler Tablo 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4: H2 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	100	1,46252e+06	4822,06	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	9,68434e+06	9076,33	2697,57	723,426	32,1139

Şekil 6.4'te de gösterildiği gibi 4. düğüm noktasından çıkarak 2. kademe sıkıştırma işlemi tamamlanan hava buradan 3. kademe (son kademe) için C3 kompresörüne girmektedir. C3 kompresöründe basınçlandırılan hava 3,26 bar basınçtan 6,35 bar basınca kadar sıkıştırılmaktadır. Bu esnada sıcaklık 40 °C'den 121 °C'ye kadar yükselmektedir. C3 kompresöründen çıkan hava H3 eşanjörüne girerek burada 6,1 bar basınçta ve 30 °C sıcaklıkta çıkmaktadır.



Şekil 6.4: 3. kademe kompresör şeması.

C3 kompresöründeki simülasyon hesaplamaları Tablo 6.5'te yer almaktadır.

Tablo 6.5: C1 kompresörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H})	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
--	--------------	------------------------------------	---------------------------------	-------------------	------------------	----------------

		W (J/kg).(kg/s)				
Toplam Giren	100	1,42519e+06	-12653,2	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	9,68434e+06	9076,33	2697,57	723,426	32,1139

H3 ara soğutma eşanjörüne ait değerler Tablo 6.6'da yer almaktadır.

Tablo 6.6: H3 ara soğutucu eşanjörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{S}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	100	-9.67347e+06	-8388,59	2697,57	723,426	32,1139
Toplam Çıkan	100	338127	-34134	2697,57	723,426	32,1139

Eşanjörden çıkan hava 7. ve 11. düğüm noktalarına iki farklı debi ile ulaşmaktadır. Burada S1 demet ayırıcısına giren hava şekilde gösterildiği gibi sırasıyla H4 ve H5 eşanjörlerine girerek sıcaklıkları kriyojenik sıcaklıklara getirilmektedir. Bu esnada çıkan ürünün bir kısmı sıvılaştırılmaktadır. 7. düğüm noktasından 15 kg/s debisinde giren hava buradan H4 eşanjörüne girerek sıcaklığı -133,2 °C'de ve basıncı 5.9 bar basınca getirilmektedir. H4 eşanjöründen çıkan hava buradan doğrudan ekspandere verilecek ve oradan da LPC dediğimiz düşük basınç kolonuna 9. Düğüm noktasında girecektir. 9. Düğüm noktasında düşük basınç kolonuna giriş sıcaklığı -173,3 °C olarak hesaplanmıştır.

S1 demet ayırıcıya ait simülasyon hesapları Tablo 6.7'de verilmiştir. 6 noktasından gelen giriş debisi, 7 ve 11 nolu düğümlere sırasıyla % 15 ve % 85 oranlarında ayrılarak devam etmektedir.

Tablo 6.7: S1 demet ayırıcının simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi W (\dot{H}) (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{S}) W/K (J/kg K)(kg/s)	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
6	100	338127	34134	2697,57	723,426	32,1139
7	-15	-50719,1	5120,1	-404,635	-108,514	-4,81709
11	-85	-287408	29013,9	-2292,93	-614,486	-27,183

H4 ve H5 eşanjörlerinde kriyojenik sıcaklıklara getirilen hava demet ayırıtıcı ile de iki farklı debide kollara ayrılmaktadır. H4 ve H5 eşanjörleri için hesaplamalar yapılmış ve sırasıyla Tablo 6.8 ve Tablo 6.9’da verilmiştir.

Tablo 6.8: H4 eşanjörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{S}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	15	50719,1	-5120,1	404,635	108,514	4,81709
Toplam Çıkan	15	3,04708e+06	-21713	404,635	108,514	4,81709

Tablo 6.9: H5 eşanjörünün simülasyon sonuçları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{S}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
Toplam Giren	85	287408	-29013.9	2292,93	614,912	27,2968
Toplam Çıkan	85	-2,13134e+07	-162749	2292,93	614,912	27,2968

Nitrojen, ilk sütunda 5,7 bar basınçta ayrılır ve daha düşük bir seviyede kaynayan oksijen ise ekspander yardımıyla basıncı düşürülerek yaklaşık 1,2 barda oksijene yoğunlaştırıldığı için LPC olarak adlandırılan düşük basınç kolonuna girmektedir. Bu iki sütun, yoğunlaşan nitrojen ile buharlaşan oksijen arasındaki sıcaklık farkını minimum düzeye indirmek için aynı sütun yüzeyini paylaşırlar. Sıvı fazdaki alt ürünü veren yüksek basınç kolonu oksijen bakımından zengindir ve basınç düşürülmüştür. Joule-Thomson (JT) etkisi ile bu zengin sıvı soğur ve argonu ayıran bir yan kondansatörünü çalıştırmak için kullanılabilir şekilde oksijen takviyesinde bulunur. Tüm süreç doğrudan basınçlı havayı besleyen bir genişletici kullanılarak elde edilebilecek ek soğutma gerektirir ve bu işlem düşük basınç kolonunda gerçekleşir. Böylelikle havanın belirli bir kısmı ayrılamaz ancak üniteden bir atık akışı gerçekleşir.

HPC kolonuna ait hesaplamalar simülasyon programında elde edilmiş ve Tablo 6.10'da yer almaktadır. 12. düğüm noktasından çıkan hava ısı eşanjörüne girerek sıcaklığı bir miktar daha düşürülerek 15. Düğüm noktasından genleşme türbinine gönderilmektedir. Buhar fazına eşanjör vasıtasıyla geçmeyen kısım ise sisteme 14. düğüm noktasından yeniden gönderilmektedir. Entropi değerlerindeki tutarsızlığın sebebi 13. Düğüm noktasından çıkan hava 14. ve 15. düğüm noktalarına ayrılıyor. Burada 15. düğüm noktasının görülmemesinden dolayı hesapta hatalara yol açmaktadır.

Tablo 6.10: HPC yüksek basınç kolonunun simülasyon hesapları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
12	85	-2,13134e+07	- 162749	2292,93	614,912	27,2968
14	-23,0408	9,02896e+06	81783	-822,488	-6,66156e- 07	- 0,000575742
13	-0,671825	148738	1184,4	-23,9822	-1,94238e- 08	-1,67875e- 05
RL	-61,2874	2,34891e+07	197032	-1446,46	-614,912	-27,2968

LPC kolonuna ait hesaplamalar simülasyon programında yapılmıştır ve Tablo 6.11'de yer almaktadır.

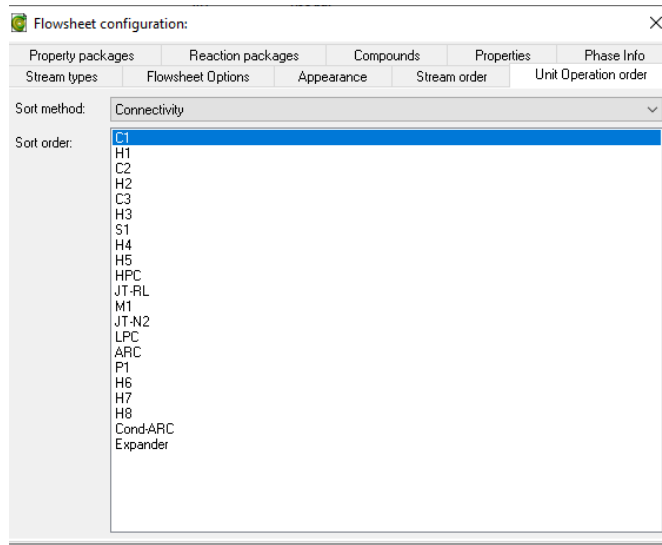
Tablo 6.11: LPC düşük basınç kolonunun simülasyon hesapları

	Debi kg/s	Toplam Entalpi (\dot{H}) W (J/kg).(kg/s)	Entropi (\dot{s}) W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
28	7,12745	- 2,72794e+06	-22885,5	3,71952e- 08	195,613	21,73
19	44,3637	- 1,83801e+07	-156453	937,098	538,052	22,4122
18	16,9237	- 3,74899e+06	-21566,2	509,366	76,8602	4,88404
20	- 13,7319	3,17083e+06	20002,4	-490,189	- 2,46701e- 07	- 0,000159292
27	- 7,43333	1,31403e+06	7263,39	-1,2193e- 07	195,613	-29,3869

25	-68,1283	1,53514e+07	90216,1	-2207,38	-176,493	-16,1279
30	-17,8339	7,05533e+06	59967,3	-3,21089e-14	546,934	-8,32894

Ürünler gaz halindeki azot ve oksijen ile sıvı argondur. Sadece birkaç Kelvin derecelik sıcaklık farkı ısı eşanjörlerinde meydana gelir. Bu durum birbirine bağlı sütunlar arasında önemli bir etkileşime neden olur çünkü etkili değişkenlerden herhangi birisinde bir bozulma olduğunda kolon kontrollü değişkenleri etkiler. Nitrojen ve argondaki saflıklar tipik olarak çok yüksektir yaklaşık nitrojen ve oksijen ürünlerinin saflığı, %97,5 ila %99,5 arasında değişir.

Simülâtörde hava ayırma prosesine ait değerler girilmiştir. Her girilen değer ve iterasyonlar ekran görüntüsü alınarak açıklanmıştır. Burada hava ayırma prosesinin ChemSemp adlı bir simülâtör yardımıyla çözümlenmesi yapılmış ve termodinamik açıdan değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler iterasyonlarla tekrarlanarak en optimum değere ulaşılmıştır. Burada programın bağıl toleransı yani kütle dengesi bağıl toleransı 0,001 olarak ayarlanmıştır. Çevrimin bağıl toleransı dediğimiz göreceli durumda çevrim toleransı 1e-05 olarak belirlenmiştir. Bu değerler programın kullanım kılavuzu incelenerek elde edilmiştir. Sistemin düğüm noktaları ve sistemin elemanları girilmiştir. Hava ayırıştırmada besleme için kullanılan akışlar nitrojen, oksijen ve argon olarak belirlenmiştir (Ek A). Şekil 6.5'te gösterildiği gibi çizilen sistem elemanları simülasyon programına atanarak analizi elde edilmiştir.

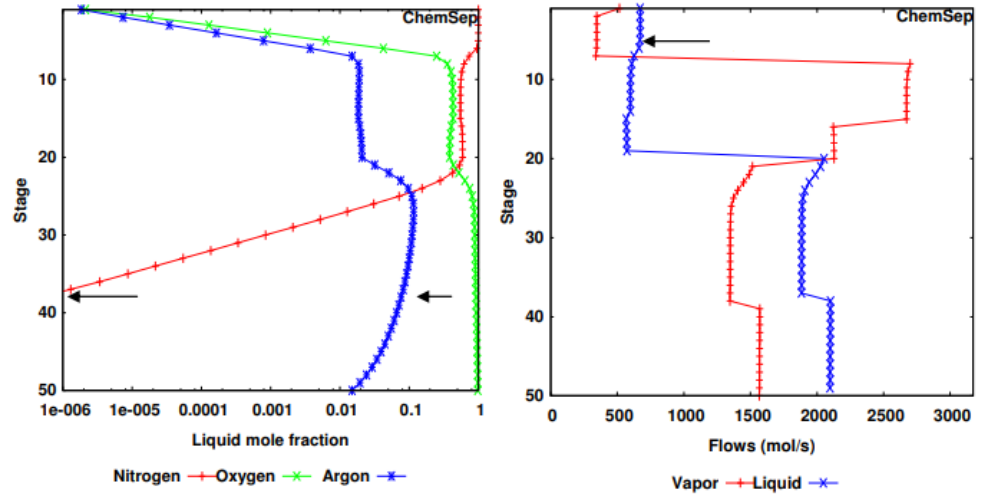


Şekil 6.5: Sistemin simülasyon programında konfigure edilmesi.

Ek B’de gösterilen HPC düşük basınç kolonu gösterilmiştir. Bu akış şeması argon sütunundan (Ar-C) düşük basınç sütununa (LPC) sıvı akışı belirlenen 22 tepsisinde gerçekleşmektedir. Normalde argon kolonu sıvının dibinde yerçekimi vasıtasıyla düşük basınç kolonuna geri akar. Bu durumda, alttaki sıvının basıncını yükselten bir pompa kullanılarak simüle edilir. Alttaki sıvının bir basınç farkına doğru akacağı konusunda uyarır (argon sütunu, düşük basınç kolonundan daha düşük basınç). Ayrıca, burada buhar ve sıvı çekilmektedir ve kontrol amaçlı olarak yüksek basınç kolonunun kondansatörü incelenmelidir. Bu, yüksek basınç sütunun (HPC), kondansatörü ve düşük basınç sütunu kazan görevlerinin bir kontrolör tarafından eşleştirilmesine olanak tanır. Kombine akış, düşük basınçlı sütunun tepesine (bir ayırıcı aracılığıyla) beslenerek, zengin sıvı dip ürününü yüksek basınç sütununa yönlendirir. Burada ısı girişi, argon tarafının kondansatör görevine eşit olarak ayarlanır. Doğrultucu gaz halindeki ürün akışları, ısının geri kazanılması için giriş hava akışına ters yönde ısıtılmaktadır.

7. SONUÇLAR

Düşük basınç kolonundaki (LPC) derişik bileşim akış profilleri LPC kolonunda gösterilmektedir. LPC kolonundaki nitrojen üst ürünü elde etmek için yüksek saflıkta (%95 oranında) nitrojen gazına ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda düşük basınç (LPC) kolonundan, Argon kolonuna (Ar-C) geçiş sırasında nitrojen derişiminin az olması beklenmektedir.

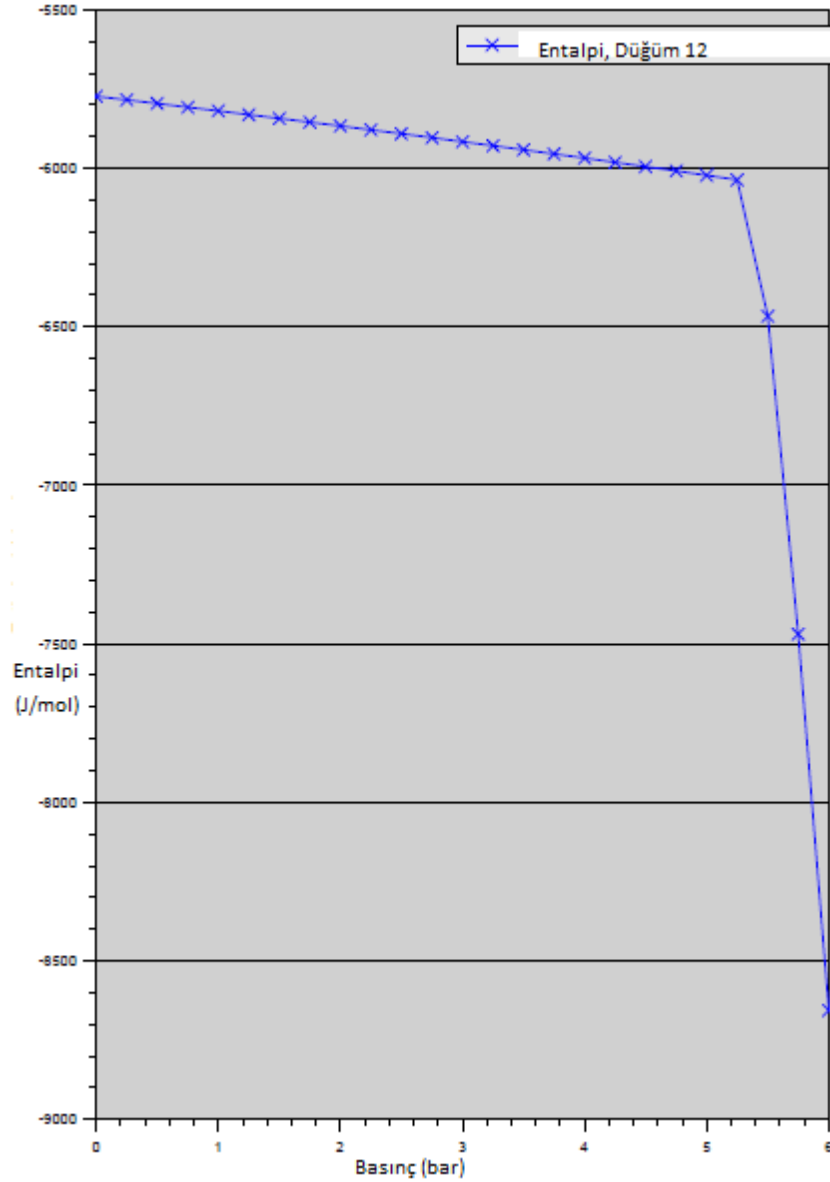


Şekil 7.1: Hava ayırma ünitesindeki akış profilleri.

Şekil 7.1’de sol tarafta yer alan grafikte yüksek basınç kolonundaki ayırıştırma tepsilerindeki oluşan sıvı mol oranı verilmiştir. Yine aynı grafikte, ilk 10 ayırıştırma tepsisi sistemi optimize ederken, yaklaşık 10-20. tepsileri arasında 0,95-0,96 saflıkta nitrojen elde edilirken; 21. tepsi ve sonrasında yüksek basınç kolonunda Ar birikmesi başladığından dolayı nitrojenin saflığında düşüş gözlenmekte ve grafik lineer olarak sifira yaklaşmaktadır. Bu durum Argon ve Oksijen ayırıştırma tepsilerinde de görülmektedir. Şekil 7.1’in sağ tarafındaki grafikte ise, simülasyon programı Chemsemp’in ilk 10 ayırıştırma tepsisinde sıvı-buhar akışını optimize ettiği görülmekte olup, 10-20 ayırıştırma tepsileri arasında maksimum seviyede ayırıştırma görülürken; 21. Ayırıştırma tepsisinden sonra ayırıştırma prosesinin normal şekilde devam ettiği görülmektedir.

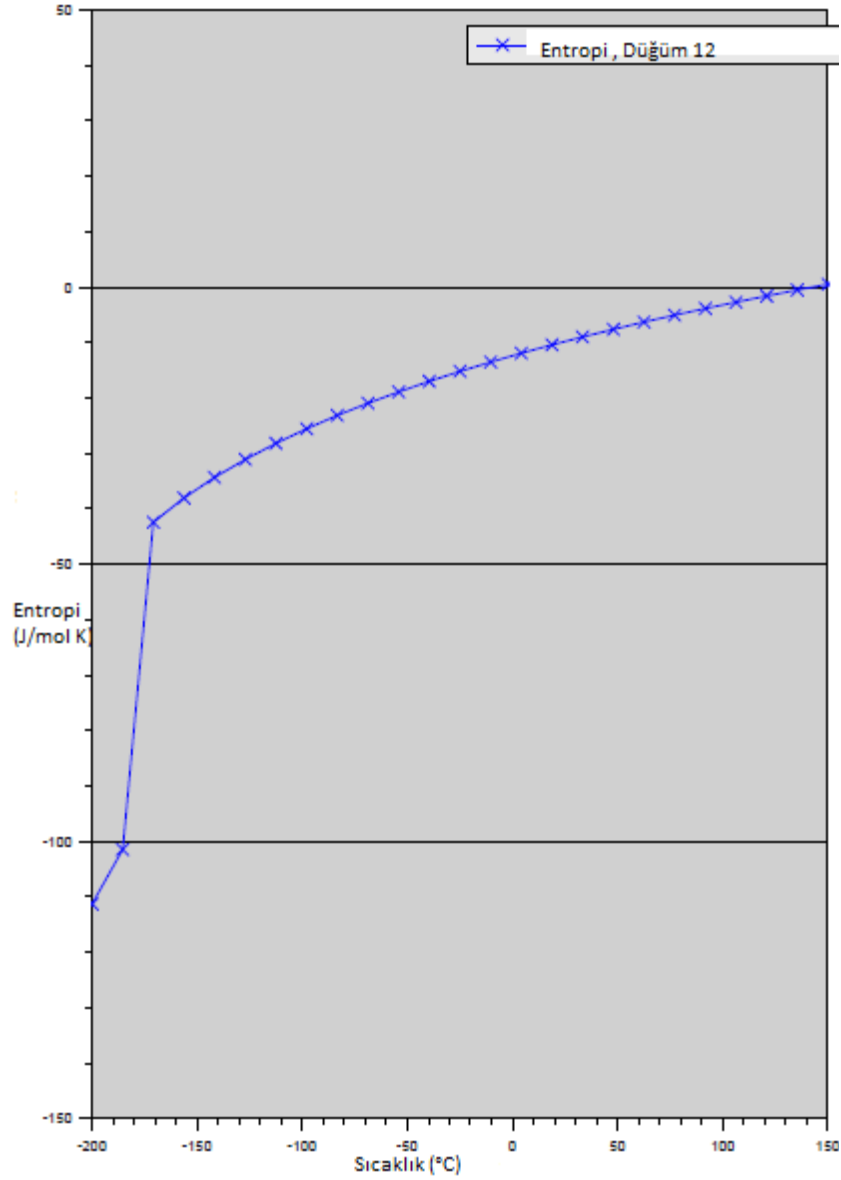
Bu çalışmada, nitrojenin termodinamik modellenmesi üzerinde durulmaktadır. Bu nedenle yüksek basınç kolonu (HPC) düğüm noktaları olan 12., 13. ve 14. düğüm noktalarına ait veriler grafik olarak programda çözdürülmüştür.

12. düğüm noktasına ait basınç-entalpi değişimi Şekil 7.2’de gösterilmiştir. 12. Düğümün çalışma basıncı olan 5,7 bar basınç göz önüne alındığında entalpi değerinin -7289,84 J/mol olduğu görülmektedir.



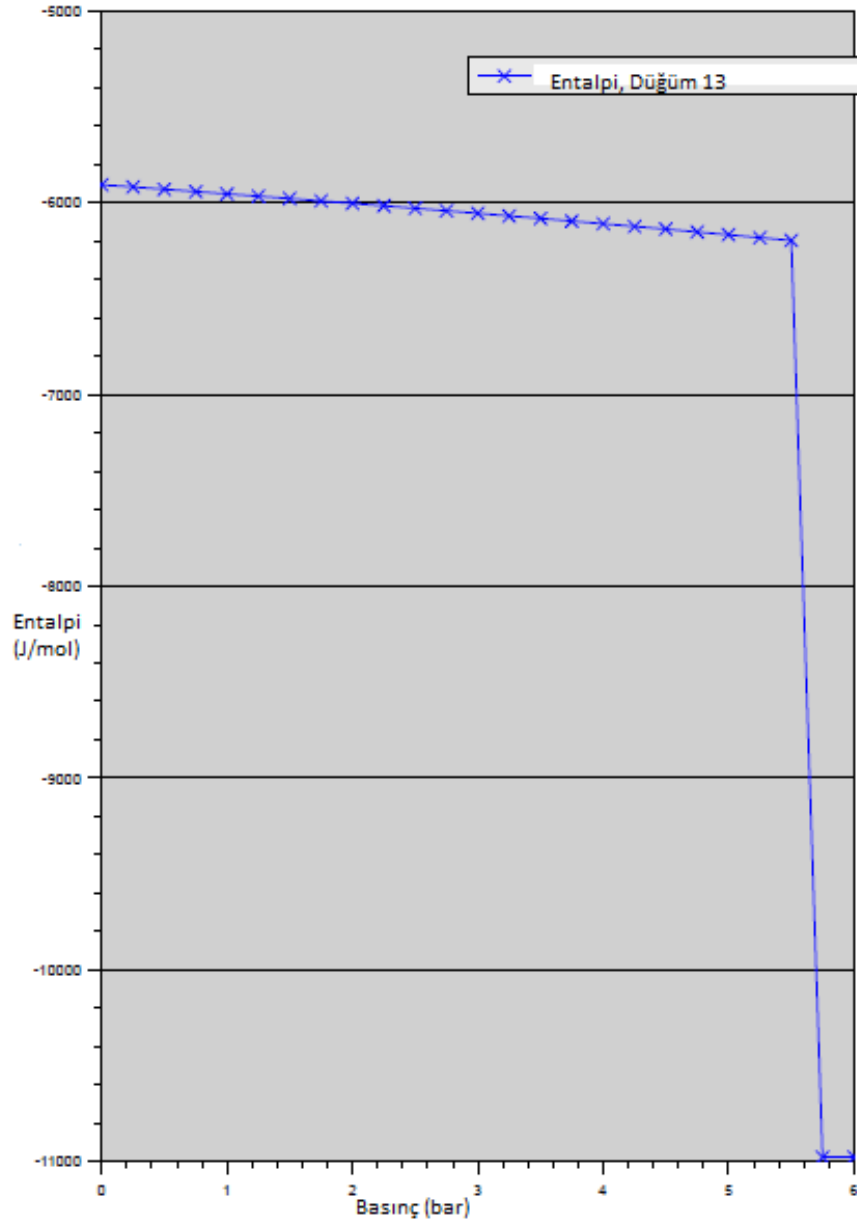
Şekil 7.2: Basınç-entalpi değişimi (12. Düğüm noktası).

12. düğüm noktasına ait sıcaklık-entropi değişimi Şekil 7.3'te gösterilmiştir. 12. Düğüm noktasının çalışma sıcaklığı olan $-173,99\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de entropi değerinin $-54,0275\text{ J/mol K}$ olduğu görülmektedir.



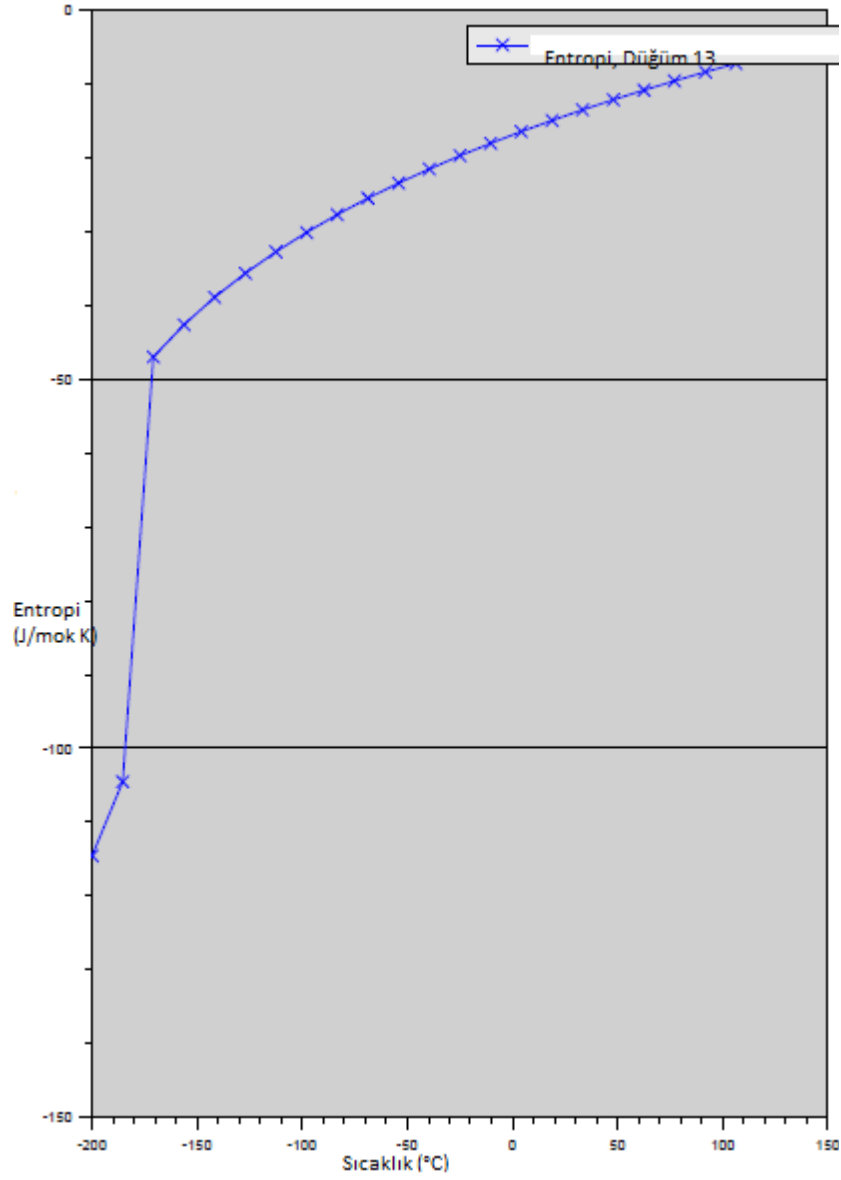
Şekil 7.3: Sıcaklık-entropi değişimi (12. Düğüm noktası).

13. düğüm noktasına ait basınç-entalpi değişimi Şekil 7.4'te gösterilmiştir. 13. düğüm noktasının çalışma basıncı olan 5,6 bar göz önüne alındığında, entalpi değerinin $-8206,25\text{ J/mol}$ olduğu görülmektedir.



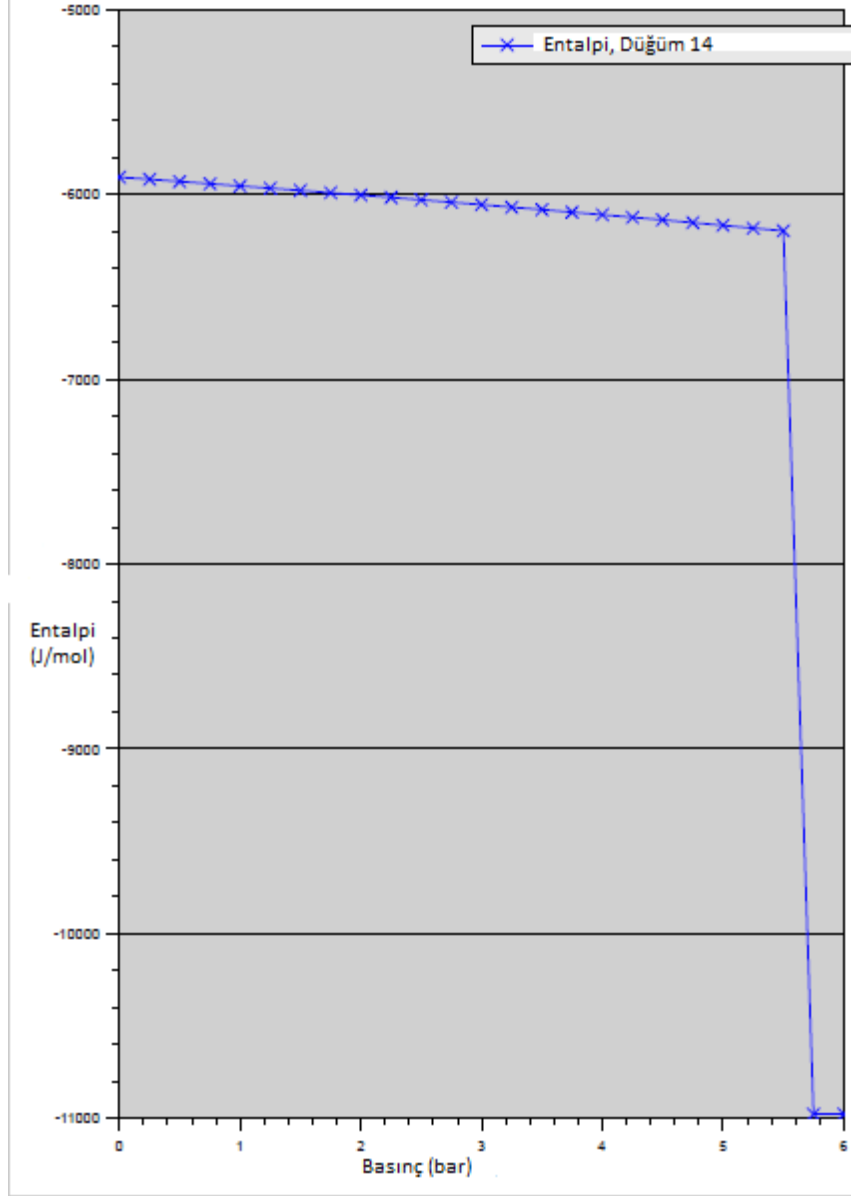
Şekil 7.4: Basınç-entalpi değişimi (13. Düğüm noktası).

13. düğüm noktasına ait sıcaklık-entropi değişimi Şekil 7.5'te gösterilmiştir. 13. Düğüm noktasının çalışma sıcaklığı olan $-177,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık için $-8520,1\text{ J/mol}$ entropi değeri elde edilmiştir.



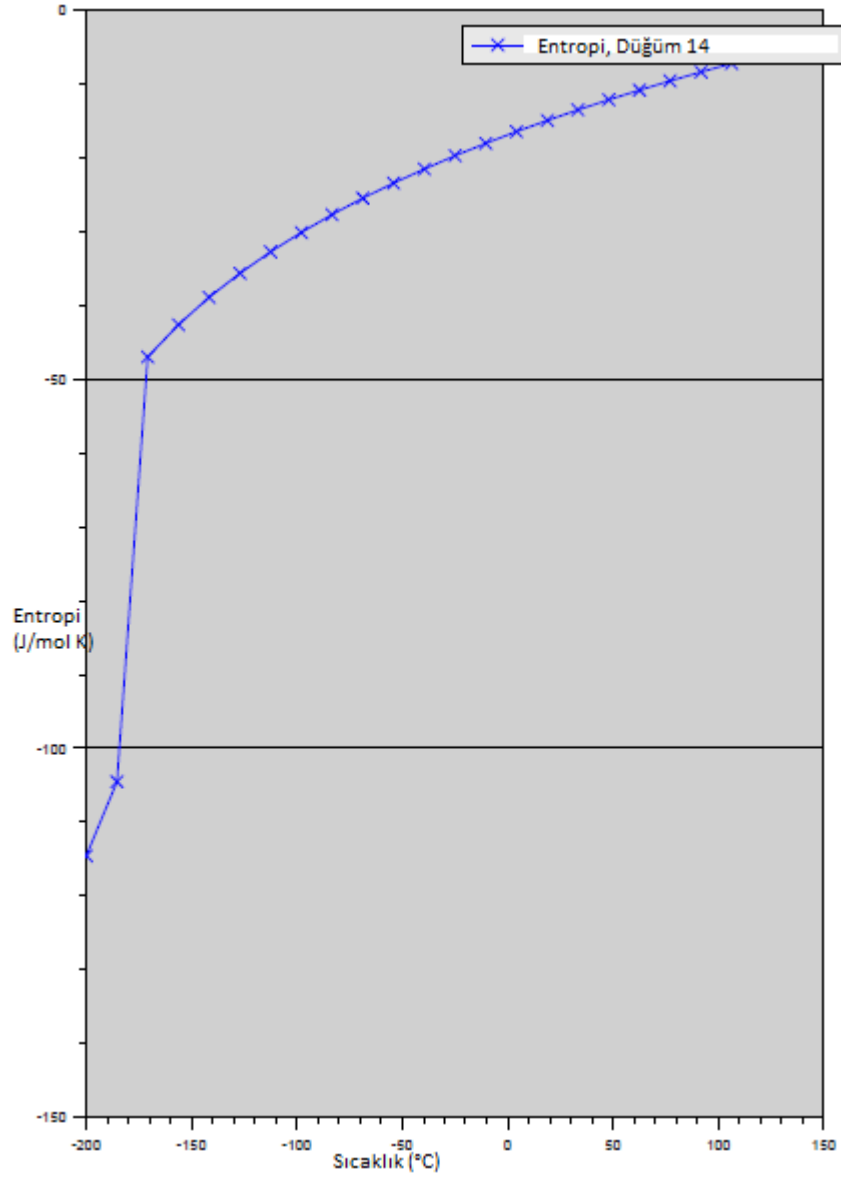
Şekil 7.5: Sıcaklık-entropi değişimi (13. Dügüm noktası).

14. düğüm noktasına ait basınç-entalpi değişimi Şekil 7.6'de gösterilmiştir. 14. düğüm noktasının çalışma basıncı göz önüne alındığında 5,6 bar basınçta, entalpi değerinin -8467,6 J/mol olduğu görülmektedir.



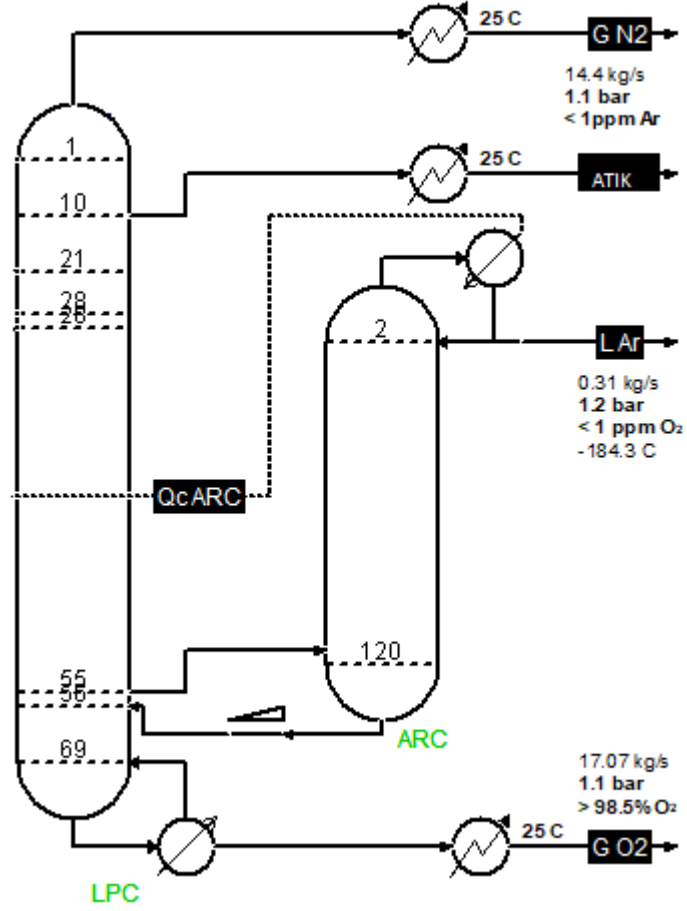
Şekil 7.6: Basınç-entalpi değişimi (14. Dügüm noktası).

14. düğüm noktasına ait basınç-entalpi değişimi Şekil 7.7’de gösterilmiştir. 14. düğüm noktasının çalışma sıcaklığı göz önüne alındığında $-177,735$ °C sıcaklık için entropi değerinin $-73,8173$ J/mol.K olduğu görülmektedir.



Şekil 7.7: Sıcaklık-entropi değişimi (14. Düğüm noktası).

Yüksek basınç kolonu (HPC), düşük basınç kolonu (LPC) ve Argon kolonundan (Ar-C) çıkan nihai ürünlere ait debiler Şekil 7.8’de verilmiştir. Prosesin tamamlanması sonucunda 1,1 bar basınçta 14,4 kg/s N₂, 1.2 bar basınçta 0,31 kg/s Ar(sıvı), 1,1 bar basınçta 17,07 kg/s O₂ elde edilmiştir.



Şekil 7.8: Son ürün debileri.

Tablo 7.1: ChemSep simülasyon programı ile Aspen simülasyon programının karşılaştırılması (Bhunya, 2014).

	N ₂ saflık oranı (%)	O ₂ saflık oranı (%)	Ar saflık oranı (%)
ChemSep	99,9999	98,500	99,9999
Aspen HYSYS	99,1513	98,889	100

Çalışmada modellenen kriyojenik hava ayırıştırma tesisi ChemSep programında modellenmiştir. Tablo 7.1’de ise kriyojenik hava ayırıştırma tesisinin Aspen HYSYS simülasyon programında elde edilen sonuçlarla karşılaştırması yapılmış ve nitrojen, oksijen ve argon için saflık değerleri verilmiştir.

Sonuç ve Öneriler:

1. Hava ayrıştırma ünitesi soğutma havası daha yüksek basınca sıkıştırılmaz, bu daha düşük verimlilik sağlar. İncelemede basit Peng-Robinson durum denklemi simülasyon için kullanılmış olup, bu da JT etkisinden dolayı beklenen soğutma hatalarına yol açmıştır.
2. Giriş parametreleri, Peng Robinson denklemi kullanılarak çözdürülmüştür.
3. Chemsep programı, kimyasal prosesler ve termodinamik analiz açısından yeterli bir program olarak görülmüş, her bir düğüm noktasında sadece bir adet durum denklemi kullanımına izin vermesi, sistemde kullanılması zorunlu olan kompresör, ısı değiştirici vb. parçaların verimliliklerinin manuel olarak girişine izin vermemesi gibi engelleyici durumlara sebebiyet verdiği için gerçek sonuçlara ulaşmakta zorluklara neden olmaktadır.
4. Kriyojenik sıcaklıklarda hava ayırma işlemi maliyeti yüksek prosesler içermektedir. Soğutma prosesindeki yapılacak herhangi bir iyileştirme maliyeti düşürecektir.
5. Hava, yüksek basınç kolonuna ısı eşanjöründen geldiğinden, ısı eşanjöründeki verim kaybını engellemek için ön filtreleme yapılması zorunlu hale gelmektedir.
6. Chemsemp programında simüle edilmiş sistemden veri çıktılarını alırken sistemin çalışma koşullarını ele almadan, parametre aralıklarını kullanıcıdan manuel giriş ile istemektedir. Bu da yapılan sistemde maksimum-minimum noktalarının gözlemlenmesinde kullanıcıya zorluk çıkartmaktadır.
7. ChemSemp simülasyon programından çıkarılmış grafikler üzerinde fare ile değerlerin değiştiği görülmekte, çıkartılan grafikler koordinat sistemine göre kodlandığından; farenin grafik üzerinde olmadığı durumlarda istenilen değer hesaplanmasında problemlere neden olmaktadır.
8. Programın temel amaçlarından olan sistem tasarımının simüle edilmesi, en az sayıda makine kullanılarak ve enerji harcayarak gerçekleştirilmesi gerekirken; programın tek kolonu iki kolon gibi

göstererek ayrı ayrı simüle etmesi, yerçekimi ivmesinin simülasyona entegre edilmemesi durumlarından dolayı:

- Toplam verimin hesaplanmasında eksiklikleri bulunmaktadır.

- Kullanılan her bir sistem elemanında enerji hesaplamalarında hatalara sebebiyet vermektedir.

9. Simülasyon programı ChemSep ve Aspen HYSYS programı karşılaştırıldığında Aspen HYSYS programının gerçeğe daha yakın olduğu görülmektedir. ChemSep programının hata payları oksijen için %0,39, nitrojen için %0,85 ve argon için ise milyonda birden daha az olduğu hesaplanmıştır.
10. ChemSep programı, uygun maliyetli olması ve kullanım kolaylığı açısından avantajlıdır.
11. ChemSep programının kullanılması ile tesis kurulumuna geçmeden harcanabilecek giderler ve kriterler göz önünde bulundurularak optimizasyon sağlanmaktadır.

8. KAYNAKLAR

Aneke, M. and Wang, M., "Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles", *Applied Thermal Engineering*, 81: 223–231 (2015).

Caliskan, H., Dincer, I., and Hepbasli, A., "Energy and exergy analyses of combined thermochemical and sensible thermal energy storage systems for building heating applications", *Energy And Buildings*, 48: 103–111 (2012).

Cengel, Yunus, Boles, M., "Thermodynamics: An Engineering Approach", Mc Graw Hill, New York, 1-977 (2019).

Bhunya D.K., "Simulation Study of Cryogenic Air Separation Unit Using Aspen Hysys At Rourkela Steel Plant" National Institute of Technology Rourkela (2014).

Ebrahimi, A., Meratizaman, M., Akbarpour Reyhani, H., Pourali, O., and Amidpour, M., "Energetic, exergetic and economic assessment of oxygen production from two columns cryogenic air separation unit", *Energy*, 90 (2): 1298–1316 (2015).

Ersoy, S., "Linde Prosesinin Termodinamik Analizi ve Trijenerasyonla İşletilmesi Durumunun Değerlendirilmesi", *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 263 (2016): 10–17 (2015).

Fu, Q., Kansha, Y., Song, C., Liu, Y., Ishizuka, M., and Tsutsumi, A., "A cryogenic air separation process based on self-heat recuperation for oxy-combustion plants", *Applied Energy*, 162: 1114–1121 (2016).

Gürsoy, Emrehan, Yiğit, M., "Havanın fraksiyonlu rektifikasyon distilasyon yöntemi ile ayrıştırılması", *Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği*, 111 (2017).

Karabuğa, A., "Azot sıvılaştırma prosesinin enerji ve ekserji analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 96 (2016).

Karakoç, T. H., Karakoç, N., Erbay, B., and Aras, H., "Enerji Analizi", *Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*, 171 (2012).

Kooijman H., Taylor R., "The ChemSep Book", Amsterdam, Chapter 3, (2015).

Linde, "Air Separation Plants Book" (2002)

Linde, "Air Separation Technique Course Information Document" (2002).

Mahmutoğlu, B., "Hava ayrıştırma tesislerinde oksijen, azot, argon'un üretimi ve karışım gazlı Joule-Thomson düşük sıcaklık soğutucusu", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 191 (2006).

Özdemir H., "Oksijen, azot ve argon üreten bir hava ayrıştırma tesisinin enerji, ekserji ve termoeekonomik analizi" Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, 14-26 (2020).

Rosen, M. A. and Dincer, I., "Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems", International Journal Of Thermal Sciences, 43 (2): 121–133 (2004).

Tesch, S., Morosuk, T., and Tsatsaronis, G., "Exergetic and economic evaluation of safety-related concepts for the regasification of LNG integrated into air separation processes", Energy, 141: 2458–2469 (2017).

Thorogood, R. M., "Developments in air separation", Gas Separation & Purification, 5 (2): 83–94 (1991).

Zhu, Y., Liu, X., and Zhou, Z., "Optimization of cryogenic air separation distillation columns", Proceedings Of The World Congress On Intelligent Control And Automation (WCICA), Dalian, 7702-7705 (2006).

Web adresi 1: www.engineeringtoolbox.com/dry-air-propertiesd_973.html

Web adresi 2: <http://tn-sanso-plant.com/en/air.html>

Web adresi 3: <https://www.omega-air.si/news/news/nitrogen-and-oxygen-production>

Web adresi 4: <https://www.omega-air.si/news/news/nitrogen-and-oxygen-production>

Web adresi 5:

http://acetylen.pl/de/Produkte_und_Loesungen/luftzerlegung/index.html?iLangID=1

Web adresi 6: <http://www.uigi.com/cryodist.html>

Web adresi 7: <https://www.sciencedirect.com/>

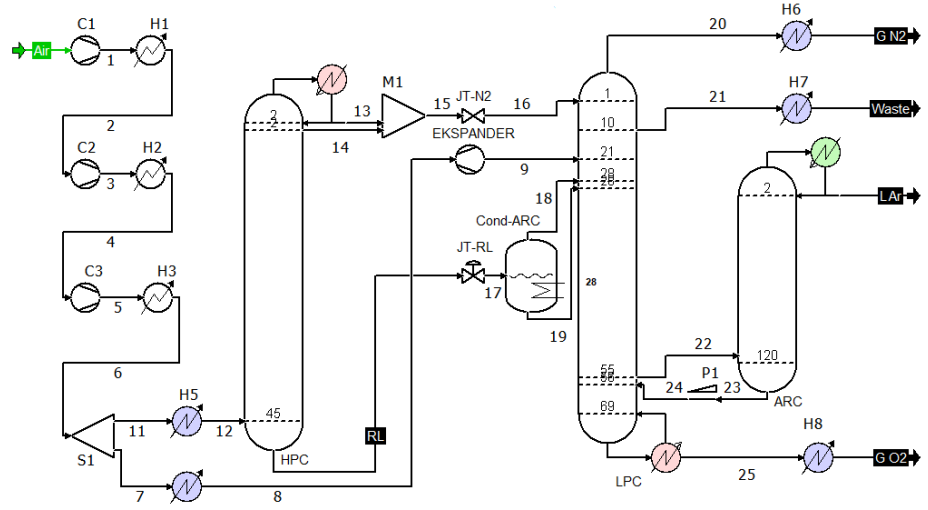
9. EKLER

EK A

C1	1. kademe kompresörü
H1	1. kademe ara soğutucu eşanjör
C2	2. kademe kompresörü
H2	2. kademe ara soğutucu eşanjör
C3	3. kademe kompresörü
H3	3. kademe ara soğutucu eşanjör
S1	Splitter demet ayırıcısı
H5	HPC kolonuna giden havaya ait eşanjör
H4	LPC kolonuna giden havaya ait eşanjör
HPC	Yüksek basınç kolonu
M1	Splitter demet birleştirici
JT-N2	Joule Thomson kısılma vanası
JT-RL	Joule Thomsan kısılma vanası
LPC	Düşük basınç kolonu
ARC	Argon kolonu
P1	Pompa
H6	Isı değiştirici eşanjör-Nitrojen
H7	Isı Değiştirici eşanjör-Atık
H8	Isı Değiştirici eşanjör-Oksijen

EK B

Şekil B.1



EK C

Tablo C.1

Düğüm noktası	Hava (Air)	1	2	Birim
Başlangıç	Hava	C1	H1	
Bitiş	C1	H1	C2	
Sıcaklık	30	109.689	40	°C
Basınç	1.01315	1.98	1.78	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.7812	0.7812	0.7812	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.2095	0.2095	0.2095	
Mol fraksiyonu Argon	0.0093	0.0093	0.0093	
Debi	100	100	100	kg / s

Tablo C.2

Düğüm noktası	3	4	5	Birim
Başlangıç	C2	H2	C3	
Bitiş	H2	C3	H3	
Sıcaklık	121.514	40	121.821	°C
Basınç	3.46	3.26	6.35	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.7812	0.7812	0.7812	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.2095	0.2095	0.2095	
Mol fraksiyonu Argon	0.0093	0.0093	0.0093	
Debi	100	100	100	kg / s

Tablo C.3

Düğüm noktası	6	7	11	Birim
Başlangıç	H3	S1	S1	
Bitiş	S1	H4	H5	
Sıcaklık	30	30	30	°C
Basınç	6.1	6.1	6.1	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.7812	0.7812	0.7812	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.2095	0.2095	0.2095	
Mol fraksiyonu Argon	0.0093	0.0093	0.0093	
Debi	100	15	85	kg / s

Tablo C.4

Düğüm noktası	12	RL	14	Birim
Başlangıç	H5	HPC	HPC	
Bitiş	HPC	JT-RL	M1	
Sıcaklık	-173.75	-174.301	-177.727	°C
Basınç	5.701	5.7	5.6	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.7812	0.692528	0.999999	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.2095	0.294403	8.09927e-10	
Mol fraksiyonu Argon	0.0093	0.0130687	7e-07	
Debi	85	61.2874	23.0408	kg / s

Tablo C.5

Düğüm noktası	13	15	16	Birim
Başlangıç	HPC	M1	JT-N2	
Bitiş	M1	JT-N2	LPC	
Sıcaklık	-177.727	-177.727	-193.709	°C
Basınç	5.6	5.6	1.3	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.999999	0.999999	0.999999	
Mol fraksiyonu Oksijen	8.09927e-10	8.09927e-10	8.09927e-10	
Mol fraksiyonu Argon	7e-07	7e-07	7e-07	
Debi	0.671825	13.5778	10.1348	kg / s

Tablo C.6

Düğüm noktası	22	23	24	Birim
Başlangıç	LPC	ARC	P1	
Bitiş	ARC	P1	LPC	
Sıcaklık	-180.949	-181.113	-181.094	°C
Basınç	1.31739	1.3	1.8	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	5.4191e-10	1.71136e-10	1.71136e-10	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.869391	0.90002	0.90002	
Mol fraksiyonu Argon	0.130609	0.0999801	0.0999801	
Debi	7.4333	7.12745	7.12745	kg / s

Tablo C.6

Düğüm noktası	21	20	25	Birim
Başlangıç	LPC	LPC	LPC	
Bitiş	H7	H6	H8	
Sıcaklık	-192.421	-194.428	-180.322	°C
Basınç	1.21957	1.2	1.35	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.919741	1	5.78265e-17	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.0735387	5.03277e-10	0.985	
Mol fraksiyonu Argon	0.00671995	3.2496e-07	0.015	
Debi	68.1283	13.7319	17.8339	kg / s

Tablo C.7

Düğüm noktası	17	19	18	Birim
Başlangıç	JT-RL	Cond-ARC	Cond-ARC	
Bitiş	Cond-ARC	LPC	LPC	
Sıcaklık	-190.806	-190.529	-190.529	°C
Basınç	1.32	1.32	1.32	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.692528	0.625749	0.861711	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.294403	0.359285	0.130027	
Mol fraksiyonu Argon	0.0130687	0.0149658	0.0082625	
Debi	61.2874	44.3637	16.9237	kg / s

Tablo C.8

Düğüm noktası	8	9	L-Ar	Birim
Başlangıç	H4	EKSPANDER	ARC	
Bitiş	EKSPANDER	LPC	ÜRÜN	
Sıcaklık	-168.15	-189.527	-184.332	°C
Basınç	5.9	1.32	1.2	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.7812	0.7812	1.10664e-08	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.2095	0.2095	7e-07	
Mol fraksiyonu Argon	0.0093	0.0093	0.999999	
Debi	15	15	0.30588	kg / s

Tablo C.9

Düğüm noktası	Waste	G N ₂	G O ₂	Birim
Başlangıç	H7	H6	H8	
Bitiş	ÜRÜN	ÜRÜN	ÜRÜN	
Sıcaklık	25	25	25	°C
Basınç	1.11957	1.1	1.25	bar
Mol fraksiyonu Nitrojen	0.919741	1	5.78265e-17	
Mol fraksiyonu Oksijen	0.0735387	5.03277e-10	0.985	
Mol fraksiyonu Argon	0.00671995	3.2496e-07	0.015	
Debi	68.1283	13.7319	17.8339	kg / s

Tablo C.10: H6 eşanjörüne ait değerler

	Debi kg/s	Entalpi W	Entropi W/K	Nitrojen mol/s	Oksijen mol/s	Argon mol/s
20	13.7319	- 3.17083e+06	-20002.4	490.189	2.46701e- 07	0.000159292
G N ₂	-13.7319	4143.95	346.655	- 490.189	- 2.46701e- 07	- 0.000159292
Toplam Giren	13.7319	- 3.17083e+06	-20002.4	490.189	2.46701e- 07	0.000159292
Toplam Çıkan	13.7319	-4143.95	-346.655	490.189	2.46701e- 07	0.000159292