

**YENİ GELİŞTİRİLEN KARBON DİOKSİT TUTAN
ORGANİK SIVILARIN ABSORPSİYON VE ULTRASONİK
DESORPSİYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**THE INVESTIGATION OF ABSORPTION AND
ULTRASOUND-ASSISTED DESORPTION OF CO₂ FROM
NOVEL CARBON DIOXIDE BINDING ORGANIC
LIQUIDS**

YASEMİN KELEŞ

PROF. DR Hülya YAVUZ ERSAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

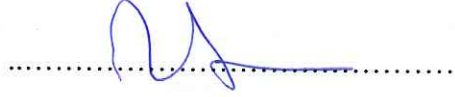
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

YASEMİN KELEŞ'in hazırladığı "Yeni Geliştirilen Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvıların Absorpsiyon Ve Ultrasonik Desorpsiyon Performanslarının İncelenmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zümriye AKSU

Başkan



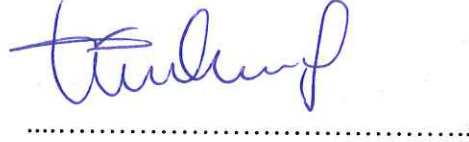
Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN

Danışman



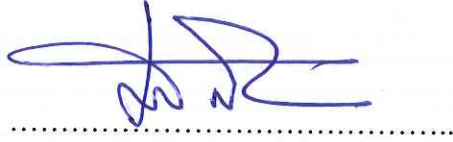
Prof. Dr. Tülay DURUSOY

Üye



Prof. Dr. Süleyman Ali TUNCEL

Üye



Doç. Dr. Hakan KAYI

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Canım Aileme,

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20 / 06 / 2019



YASEMİN KELEŞ

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan *“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”* kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

20 /06 /2019


YASEMİN KELEŞ

ÖZET

YENİ GELİŞTİRİLEN KARBON DİOKSİT TUTAN ORGANİK SIVILARIN ABSORPSİYON VE ULTRASONİK DESORPSİYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Yasemin KELEŞ

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN

Haziran 2019, 109 sayfa

İklim değişikliği, 21. yüzyılda insanlığın en büyük problemlerinin başında gelir. Ekosistemler, insan sağlığı, ve başka birçok sosyo-ekonomik probleme yol açacağından dolayı son yıllarda uluslararası gündemde ele alınmaya başlanmıştır. İklim değişikliğine sebep olan sera gazlarından en büyük paya sahip CO₂'yi yakalamak ve depolamak çözülecek zorlu problemlerin başında gelmeye başlamıştır. Günümüzdeki kısıtlı kaynaklarımızdan dolayı çok enerji harcayan olgun teknolojilerin yerine yeni, daha az enerji harcayan alternatif çözümler aramak gerekmektedir.

Bu yenilikçi çözümlerden bir tanesi organik baz ve iyonik sıvı kullanarak sulu amin çözeltilerine göre daha az enerji harcayarak absorpsiyon yapmaktır. İkinci bir yenilik ise ultrasonik su banyosu kullanarak daha kısa sürede ve daha düşük sıcaklıkta desorpsiyon yaparak enerji tasarrufuna katkı sağlamaktır. Bu sebeple bu tez çalışmasında DBN, TBD ve BTMG organik bazları kullanılmış ve çözücü olarak da 1-Hekzanol, 1-Propanol ve 1-Bütanol kullanılarak organik bazlı iyonik çözeltiler hazırlanmıştır.

Özel olarak tasarlanmış gaz-sıvı temas reaktöründe 30°C sıcaklıkta absorpsiyon gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerle çözeltilerin CO₂ tutma kapasiteleri ve başlangıç absorpsiyon hızları hesaplanmıştır. Absorpsiyon işlemi ardından ultrasonik su banyosunu farklı güçlerde (%60, %80, %100) ve sıcaklıklarda (60°C, 70°C, 80°C) çalıştırarak desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon işleminin sonucunda elde edilen verilerle çözeltilerin CO₂ desorplama kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri incelenmiştir. Çözeltilerin tekrarlanabilirliklerinin ölçülebilmesi için bu işlemler 5'er kez tekrarlanmıştır.

Deneilerin sonucunda DBN bazlı sistemlerin diğerlerine oranla daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bazların 1-Hekzanol ile kütlece %10'luk çözeltileri karşılaştırıldığında DBN, TBD ve BTMG bazlarının CO₂ absorpsiyon kapasiteleri sırasıyla; 0,0287 mol, 0,0179 mol ve 0,0149 mol olarak bulunmuştur. Çözeltilerin tekrarlanabilirlikleri için olası performans kayıpları tartışılmıştır. Ultrasonik desorpsiyon işleminin desorpsiyon süresini kısalttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, hem organik bazlı iyonik sıvı hem de ultrasonik su banyosu kullanımı ile 100°C'nin altında desorpsiyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon işleminde ise kendi içinde su banyosu farklı güç ve sıcaklık değerlerinde çalıştırıldığında oluşan performans değişimleri değerlendirilmiştir. Ultrasonik banyo 80°C sıcaklık ve %100 güçte çalıştırıldığında diğer koşullara göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CO₂ absorpsiyonu, Ultrasonik desorpsiyon, KD-TOS, Karbon dioksit tutma ve depolama, Karbon dioksit tutan organik sıvılar

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF ABSORPTION AND ULTRASOUND-ASSISTED DESORPTION OF CO₂ FROM NOVEL CARBON DIOXIDE BINDING ORGANIC LIQUIDS

Yasemin KELEŞ

Master of Science, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN

July 2019, 109 pages

Climate change is one of the biggest problems of humanity in the 21st century, and this situation has been considered in the international agenda in recent years as it may lead to human health, especially ecosystems, and many other socio-economic problems. Capturing and storing CO₂, which has the largest share of greenhouse gases that cause climate change, is one of the most challenging problems to solve. It is necessary to look for new, less energy consuming alternative solutions instead of mature technologies that consume a lot of energy due to our limited resources.

One of these innovative solutions is to make the absorption by using organic base and ionic liquid, which use less energy than aqueous amine solutions. A second innovation is to contribute to energy savings by desorption at a lower temperature and in less time by using an ultrasonic water bath. For this reason, DBN, TBD and BTMG organic bases

were used in this thesis and organic based ionic solutions were prepared by using 1-Hexanol, 1-Propanol and 1-Butanol as the solvent.

In the specially designed gas-liquid contact reactor, absorption was carried out at 30 °C and the CO₂ absorption capacity and initial absorption rates of the solutions were calculated with the data obtained. Desorption was carried out by running the ultrasonic water bath at different powers (60%, 80%, 100%) and temperatures (60 °C, 70 °C, 80 °C). The data obtained as a result of the desorption process were analyzed for CO₂ desorption capacity and desorption time of the solutions. These processes were repeated 5 times to measure the repeatability of the solutions.

As a result of the experiments, it has been observed that DBN based systems are more successful than the others. When 1-Hexanol and 10% by mass solutions of all bases are compared, the CO₂ absorption capacities of DBN, TBD and BTMG bases are as follows; 0.0287 mol, 0.0179 mol and 0.0149 mol. Possible performance losses for the reproducibility of the solutions are discussed. It was concluded that the ultrasonic desorption process shortened the desorption time. In addition, desorption below 100 °C has been successfully performed with the use of both an organic-based ionic liquid and an ultrasonic water bath. In the desorption process, the performance changes that occur when the water bath is operated at different power and temperature values are evaluated. It has been observed that the ultrasonic bath is more successful than other conditions when it is operated at 80 °C and 100% power.

Keywords: CO₂ absorption, Ultrasonic desorption, CO₂-BOL, Carbon dioxide capture and storage, Organic liquids holding carbon dioxide

TEŞEKKÜR

Eğitimim boyunca bana her konuda yardımcı olan ve beni her zaman destekleyen değerli tez danışmanım Hũlya YAVUZ ERSAN'a,

Daima engin tecrũbelerinden yararlandığım saygıdeğer hocam Erdoğan ALPER'e,

Tez çalışmalarım boyunca bana yol gũsteren, bilgi ve tecrũbelerini esirgemeyen sevgili hocam Őzge YŐKSEL ORHAN'a,

YŐksek lisansa başlamam için beni cesaretlendiren ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sũleyman Ali TUNCEL'e

Benim her zaman yanımda olan hiçbir desteklerini esirgemeyen, tũm eksiklerimi kapatan canım laboratuvar arkadaşlarım Emine, Anıl ve Neslişah'a,

Çalışmada gerçekleştirilen tũm Özel analizleri bũyũk bir çabayla gerçekleştiren Belgin ASLAN'a,

Tũm okul hayatım boyunca adeta benimle okuyan, bũtũn diplomalarımnda hakkı olan canım annem Arife KELEŞ'e,

Her ihtiyacım olduğunda yanımda olan, tũm çalışmalarım boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen yol arkadaşım, sevgili eşim Hasan YAVUZ'a,

Hayatımın bũtũn dũnũm noktalarında benimle aynı duyguları paylaşan canım babam Őnal KELEŞ ve canım ablam Elif KELEŞ'e,

Tũm lisans ve yŐksek lisans hayatımda beni destekleyen sevgili hocam Tũlay DURUSOY'a,

Tũm lisans ve yŐksek lisans hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen bũlũm başkanımız Zũmriye AKSU'ya,

Tez çalışmamın başarıyla tamamlanmasına katkıda buldukları için sonsuz teřekkũrlerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. CO ₂ Emisyon Kaynakları	5
2.2. CO ₂ Yakalama Teknikleri	6
2.2.1. Yanma Sonrası Karbondioksit Yakalanması.....	7
2.2.2. Yanma Öncesi Karbondioksit Yakalanması	7
2.2.3. Oksi Yanma Sistemi ile Karbondioksit Yakalanması	8
2.3. CO ₂ Ayırma Teknolojileri	9
2.3.1. Membran ile Ayırma	9
2.3.2. Kriyojenikler ile CO ₂ Ayrılması.....	10
2.3.3. Sorbentlerle / solventlerle CO ₂ Ayrılması	10
2.4. Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvılar	11
2.5. Ultrasonik Desorpsiyon.....	14
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	16
3.1. Kimyasal Malzemeler	16
3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Ekipmanlar	17
3.2.1. Gaz-Sıvı Temas Sistemi ve Bileşenleri	17
3.2.2. Ultrasonik Banyo Teknik Özellikleri	26
3.3. Yapılan Diğer Analizler	28
3.3.1. Fourier Infrared Transform Spektroskopisi (FTIR) Analizleri.....	28

3.3.2. Termal Gravimetrik Analizler	28
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	29
4.1. FT-IR Analizi Sonuçları	29
4.2. Termal Gravimetrik Analiz Sonuçları	30
4.3. Gaz-Sıvı Temas Reaktörü Deney Sonuçları	31
4.3.1. DBN-Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi	31
4.3.2. TBD-Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi.....	45
4.3.3. BTMG -Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi	50
5. YORUM.....	58
6. KAYNAKLAR	60
EK 1 – Desorpsiyon Kapasite ve Süre Grafikleri	63
EK 2 – FT-IR Sonuçları.....	66
EK 3 – TGA Sonuçları.....	94
EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar	107
EK 5 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	108
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1.2014 yılı IPCC raporuna göre sera gazları dağılımı	4
Şekil 2. 2.2016 yılı EPA'ya göre sera gazları dağılımı	4
Şekil 2. 3.Amerika'daki 2016 karbondioksit emisyonunun sektörlere göre dağılımı	6
Şekil 2. 4.Karbondioksit yakalama teknolojileri	7
Şekil 2. 5.Oksi Yanma Karbondioksit tutma diagramı	8
Şekil 2. 6.Karbondioksit Ayırma Yöntemleri Diagramı	9
Şekil 2. 7.(1) DBN (1,5-Diazabisiklo[4.3.0]non-5-en), (2) (TBD) 1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en, (3) (BTMG) 2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine	12
Şekil 2. 8.Üç molekül (termoleküler) reaksiyon mekanizması	13
Şekil 2. 9.(a) Durum I: Düşük ultrasonik ışınlama gücü için (a.1) I. durumda sıvı yüzey bozulmasının görüntüleri (a.2) I. durumda ultrasonik akış kuvveti tarafından oluşturulan konvektif dinamik akımın şematik diyagramı.....	15
(b) Durum II: Yüksek ultrasonik ışınlama gücü için (b.1) II. durumda ultrasonik alanın görüntüleri (b.2) II durumdaki ultrasonik alan ve ultrasonik atomizasyona bağlı olarak oluşan konvektif dinamik akımın şematik gösterimi (b.3) II durumunda oluşan ultrasonik alanın görüntüsü.....	15
Şekil 3. 1.Gaz-sıvı temas sisteminin absorpsiyon işlemi sırasındaki görünümü	18
Şekil 3. 2.Gaz-sıvı temas sisteminin desorpsiyon işlemi sırasındaki görünümü	19
Şekil 3. 3.Gaz-sıvı temas sisteminin şematik görünümü	19
Şekil 3. 4.Gaz-sıvı temas reaktörü absorpsiyon ekipman dizilimi	21
Şekil 3. 5. Kütlece %10 DBN 1-Propanol sistemi için örnek absorpsiyon çıktısı	22
Şekil 3. 6.Gaz-sıvı temas reaktörü desorpsiyon ekipman dizilimi.....	23
Şekil 3. 7. CO ₂ desorpsiyon prosesi için bilinen kütleli akış hızı grafiği	24
Şekil 3. 8.Kütleli akış ölçer ve denetleyici verileri arasında kalan alanın dikdörtgen parçalara ayrılması [15].....	25
Şekil 3. 9.Kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltisi için karbondioksit yükleme grafiği .	25
Şekil 3. 10.Şekil 3.9'daki CO ₂ yükleme grafiğinin eğiminin bulunması	26

Şekil 4. 1.(Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol ultrasonik banyo verimi %100, 80°C sıcaklıkta desorpsiyon) Yukardan aşağıya sırayla: Saf çözelti, 1. Absorpsiyon, 1.Desorpsiyon sonrası FT-IR sonuçları	29
Şekil 4. 2.(Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol ultrasonik banyo verimi %80, 80°C sıcaklıkta desorpsiyon) Yukardan aşağıya sırayla: Saf çözelti, 1. Absorpsiyon, 1.Desorpsiyon sonrası FT-IR sonuçları	30
Şekil 4. 3.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisi 1. Desorpsiyon sonrası TGA analizi (bozunma sıcaklığı 132,96°C)	31
Şekil 4. 4.%10 DBN 1-Hekzanol çözeltisinin 1. Absorpsiyon işlemi için CO ₂ gazının akış hızının zamana karşı grafiği	32
Şekil 4. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO ₂ Soğurması (1. Absorpsiyon).....	33
Şekil 4. 6.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin Başlangıç absorpsiyon Hızının Hesaplanması	34
Şekil 4. 7.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Grafiği.....	35
Şekil 4. 9.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol çözeltisinin zaman karşı mol grafiği (1. Absorpsiyon).....	42
Şekil 4. 10.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO ₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)	46
Şekil 4. 11.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO ₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)	47
Şekil 4. 12.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO ₂ Soğurması (1. Absorpsiyon).....	49
Şekil 4. 13.Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO ₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)	51
Şekil 4. 14.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol çözeltisinin zamana karşı mol grafiği.....	53
Şekil 4. 15.Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol Çözeltisinin Zamana Karşı CO ₂ Mol Grafiği	55
Şekil 4. 16. DBN Bazının Deney Haritası	57
E.2. 1.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	66

E.2. 2.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	66
E.2. 3.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	67
E.2. 4.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	67
E.2. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	68
E.2. 6.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	68
E.2. 7.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	69
E.2. 8.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	69
E.2. 9.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	70
E.2. 10.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	70
E.2. 11.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	71
E.2. 12.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	71

E.2. 13.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	72
E.2. 14.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	72
E.2. 15.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	73
E.2. 16.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	73
E.2. 17.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	74
E.2. 18.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	74
E.2. 19.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	75
E.2. 20.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	75
E.2. 21.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	76
E.2. 22.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	76
E.2. 23.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	77

E.2. 24.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	77
E.2. 25.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	78
E.2. 26.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	78
E.2. 27.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	79
E.2. 28.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	79
E.2. 29.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	80
E.2. 30.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	80
E.2. 31.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	81
E.2. 32.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	81
E.2. 33.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	82
E.2. 34.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	82

E.2. 35.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	83
E.2. 36.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	83
E.2. 37.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	84
E.2. 38.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	84
E.2. 39.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	85
E.2. 40.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	85
E.2. 41.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	86
E.2. 42.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	86
E.2. 43.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	87
E.2. 44.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları	87
E.2. 45.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları.....	88

E.2. 46.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	88
E.2. 47.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	89
E.2. 48.Kütlece %10 TBD 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	89
E.2. 49.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	90
E.2. 50.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	90
E.2. 51.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	91
E.2. 52.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	91
E.2. 53.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	92
E.2. 54.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	92
E.2. 55Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları	93
E.2. 56.Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları.....	93

E.3. 1.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği.....	94
E.3. 2.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği.....	94
E.3. 3.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği.....	95
E.3. 4.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği.....	95
E.3. 5.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği	96
E.3. 6.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği	96
E.3. 7.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 60°C) TGA Grafiği	97
E.3. 8.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği	97
E.3. 9.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği	98
E.3. 10.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği.....	98
E.3. 11.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%100, 60°C) TGA Grafiği.....	99
E.3. 12.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği.....	99
E.3. 13.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği.....	100
E.3. 14.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği	100
E.3. 15.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği	101
E.3. 16.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (%100, 60°C) TGA Grafiği	101
E.3. 17.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği.....	102
E.3. 18.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği.....	102
E.3. 19.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği.....	103
E.3. 20.Kütlece %10 TBD 1-Propanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiğ	103
E.3. 21.Kütlece %10 TBD 1-Propanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği	104
E.3. 24.Kütlece %10 BTMG 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği	105
E.3. 25.Kütlece %10 BTMG 1-Propanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4. 1.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	34
Çizelge 4. 2. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	36
Çizelge 4. 3.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %80 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	36
Çizelge 4. 4. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %60 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	37
Çizelge 4. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 60°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	38
Çizelge 4. 6.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 70°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	38
Çizelge 4. 7. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri	38
Çizelge 4. 12.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin 1. Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları.....	43
Çizelge 4. 13.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 80°C için)	43
Çizelge 4. 14.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%80 güç ve 80°C için)	44
Çizelge 4. 15.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%60 güç ve 80°C için)	44
Çizelge 4. 16.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 70°C için)	44
Çizelge 4. 17.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 60°C için)	45
Çizelge 4. 18.Kütlece %10 TBD- 1 HEKZANOL - 80°C-%100 Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri	46
Çizelge 4. 19.Kütlece %10 TBD- 1 Propanol - 80°C-%100 Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	48

Çizelge 4. 20.Kütlece %10 TBD- 1 Bütanol - 80°C-%100 Çözeltilsinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	49
Çizelge 4. 21.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol - 80°C-%100 Çözeltilsinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	51
Çizelge 4. 22.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol çözeltilsinin desorpsiyon kapasiteleri ve süreleri (%100 güç ve 80°C sıcaklık)	52
Çizelge 4. 23.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol çözeltilsinin desorpsiyon kapasiteleri ve süreleri (%80güç ve 80°C sıcaklık)	52
Çizelge 4. 24.Kütlece %10 BTMG 1-Propanol Çözeltilsinin CO ₂ yükleme kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	54
Çizelge 4. 25.Kütlece %10 BTMG- 1 Bütanol - 80°C-%100 Çözeltilsinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları	55
E.1. 1.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C).....	63
E.1. 2.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C).....	63
E.1. 3.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C).....	63
E.1. 4.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 70°C).....	64
E.1. 5.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C).....	64
E.1. 6.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
E.1. 7.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
E.1. 8.Kütlece %10 BTMG1-Bütanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C).....	64
E.1. 9.Kütlece %10 BTMG1-Bütanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C).....	65
E.1. 10.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltilsinin CO ₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C).....	65

E.1. 11.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltisinin CO2 desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)	65
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R	Absorpsiyon hızı ($\text{kmol/m}^2\text{s}$)
a	Kütle transferinin gerçekleştiği yüzey alanı (m^2)
[A*]	CO ₂ gazının gaz-sıvı ara yüzeyindeki derişimi (kmol/m^3)
k ₂	Tepkime hız sabiti ($\text{m}^3/\text{kmol s}$)
D _A	Karbon dioksitin yayınma hızı sabiti (m^2/s)
B ^o	Çözeltideki reaktant maddenin derişimi (kmol/m^3)

Kısaltmalar

BTMG	2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine
CCS	Carbondioxide Capture and Storage
CO ₂	Karbondioksit gazı
CO ₂ -TOS	CO ₂ tutan organik sıvılar
DBN	1,5-Diazabisiklo[4.3.0]non-5-en
EPA	United States Environmental Protection Agency
FT-IR	Fourier Infrared Transform Spektroskopisi
KAD	Kütlesel Akış Denetleyici
KAÖ	Kütlesel Akış Ölçer
KD-TOS	KarbonDioksit Tutan Organik Sıvılar
KTD	Karbon Tutma ve Depolama
MEA	Mono-etanolamin
SSCM	Standart cm^3/dk
TBD	1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en
TGA	Termal Gravimetrik Analiz

1. GİRİŞ

Küresel ısınma (ya da iklim değişikliği), ormansızlaştırma, fosil yakıtların kullanımı ve endüstri süreçleri gibi insan etkinliklerinden ortaya çıkan sera gazlarının atmosfere salınması ile hızlı artış ile birikmesi sonucunda yerkürenin ortalama yüzey sıcaklığı artışı ve iklimde meydana gelen değişiklikleri tanımlar. Son yıllarda ise CO₂ emisyonu kaynaklı küresel ısınma sorunu dünya çapında dikkat çekmiştir. CO₂ konsantrasyonu sanayi öncesi dönemden bu yana yaklaşık % 40 artmıştır. Fosil yakıtların yanması sonucu benzeri görülmemiş bir oranda yılda yaklaşık % 0,4 kez artmaya devam etmektedir [1]. Karbon dioksit emisyonunun artması ve sebep olduğu sera gazı etkisinden dolayı uluslararası konu haline gelmiştir ve kontrolsüz emisyon Kyoto protokolü ile ülkelere sınırlama ve azaltım yükümlülükleri getirilmiştir. 2012 yılında Doha'da düzenlenen 18. Taraflar Konferansı'nda ülkeler arasında uzlaşma yaşanmış ve Protokol'ün 2020 yılına kadar devam etmesi kararı alınmıştır. Böylece, Kyoto Protokolü'nde ikinci taahhüt dönemi 2013-2020 yılları olarak belirlenmiştir [2]. Bu nedenle karbon dioksitin önce gaz karışımlarından seçici ayrılması ve -ilk aşamada- zararlı depolanması ("CO₂ sequestration") dünyanın gündemindedir ve bu amaç doğrultusunda çeşitli uygulamalar başlamıştır [3].

CO₂ emisyonunu azaltarak küresel ısınmayı azaltmayı sağlamak için CO₂ yakalama/tutma yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Karbon dioksitin kimyasal ya da fiziksel olarak yakalanıp depolanması işlemi "Karbon Tutma ve Depolama (KTD)" olarak bilinmektedir. CO₂ yakalama için çeşitli teknolojiler vardır, kimyasal/fiziksel absorpsiyon, adsorpsiyon, membran dahil ayrılma ve biyolojik fiksasyondur [1].

Tüm bu teknolojiler arasında, amin bazlı kimyasal absorpsiyon, çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda CO₂ giderimi için kullanılan en uygun yöntem olarak düşünülmektedir [1]. En az bir hidroksil (-OH) ve amino grubu içeren aminler "Alkanolaminler" olarak adlandırılır. Amino grubunun absorpsiyona sebep olan sudaki alkaliniteyi sağladığı, hidroksil grubunun ise buhar basıncını düşürdüğü ve sudaki çözünürlüğü arttırdığı, düşünülmektedir [4]. Amin-su bazlı sistemlerinin çözülmesi gereken bazı problemleri bulunmaktadır. Bunlar; belirli CO₂ tutma kapasitesi, korozyona sebep olabilmesi, desorpsiyon boyunca oluşabilen çözücü kaybı, suyun fazla kullanımı nedeniyle artan pompalama ve ısıtma giderleri gibi [5, 6]. Bu problemler, CO₂ ile çok hızlı tepkimeye

giren ve kararsız karbamata dönüşerek yüksek miktarda karbondioksit soğurabilen sterik engelli aminler ve amin çözeltilerinin popüler olmasını sağlamıştır [5]. Ancak, bu şekilde kararsız karbamata sahip aminlerin tepkime hızları düşüktür. Bu sebeple bir aktivatör (piperazin vb.) kullanımı önerilmektedir [5-6, 22-24]. CO₂-sulu amin işlemi 100°C'den yüksek sıcaklıklarda CO₂'nin sulu sistemlerden termal ayrılması sebebiyle geri kazanılması gereken çok fazla buharlaşmış çözücü kayıplarına neden olur [5]. Bu prosesin çok fazla enerji ihtiyacı olduğundan alternatif absorpsiyon/desorpsiyon sistemleri bir çok çalışmanın ilgi alanı olmaktadır [7]. Bu alternatiflerden biri olan CO₂ tutan organik sıvılar (CO₂-TOS) alkanolamin sistemlerinin yerine kullanılacak CO₂ yakalama sistemlerindedir.

Bu yeni alternatif sistemin amin çözeltilerine kıyasla en önemli özelliği düşük ısı kapasitesine sahip olması ve desorpsiyon işleminde düşük enerji ile çalışabilmesidir [25]. Birincil ve ikincil aminler karbondioksit ile reaksiyona girdiklerinde karbamat oluşur. Karbondioksit tutan organik sıvılar karbon dioksit ile tepkimeye girdiklerinde daha düşük sıcaklıklarda rejenere olan amidinyum veya guanidinyum alkilkarbonat meydana gelir [27-30]. CO₂-TOS'lar uygun baz çiftleri ve alkoller ile hazırlandığında karbondioksit ile tepkimeye girerek CO₂ tutma alanında yaygın olan iyonik sıvıları oluşturmaktadır [31]. Düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi sanayi uygulamalarında, sıyırma prosesinde buhar kullanmak yerine basit bir ısı değiştirici kullanılması ile çözeltilerin geri kazanımı mümkün olacaktır. CO₂'yi kimyasal olarak bağlayan organik yüksek kaynama noktalı sıvı bileşiklere geçiş, CO₂ sıyırma işlemi sırasında solvent kaybını azaltır, su ile ilişkili yüksek özgül ısıları azaltır ve sistem korozyonunu azaltarak CO₂ yakalama için hacimsel ve gravimetrik kapasiteyi geliştirir [5].

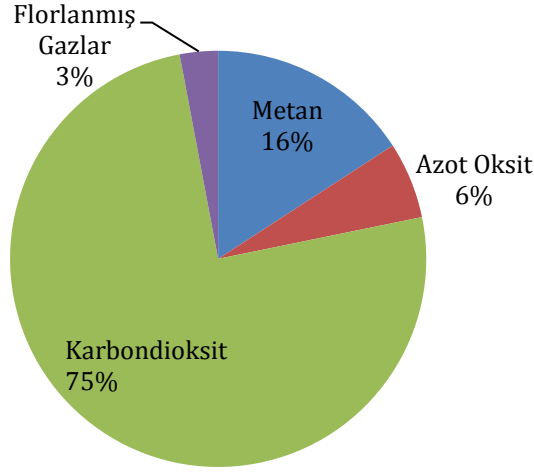
Bu çalışmada, yeni ve özgün çözeltiler olan CO₂-Tutan Organik Sıvıların (KD-TOS) mevcut alkanolamin çözeltilerine iyi bir alternatif olabileceği önerilmektedir. Bu çözeltilerin yüksek kaynama noktaları ve düşük özgül ısılarının CO₂ tutma kapasitesini arttıracığı öngörülmüştür [29]. DBN (1,5-Diazabisiklo[4.3.0]non-5-en), TBD (1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en) ve BTMG (2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine) gibi organik bazlarla, 1- Hekzanol, 1-Butanol, 1-Propanol gibi alkollerin birleşimleriyle oluşan karbon dioksit tutan organik sıvıların karbon dioksit absorpsiyon performansı, karıştırmalı mini reaktör tekniği kullanılarak ele alınmıştır. Kısaca sulu amin çözeltileri yerine CO₂ yakalayan yeni bir tür reaktif organik sıvı sistemi önerilmektedir. Bu sistem

amidin (ya da guanidin) ile değişik lineer alkollerden oluşmaktadır. Oluşturulan KD-TOS sistemleri tamamen özgün olup literatürde hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır.

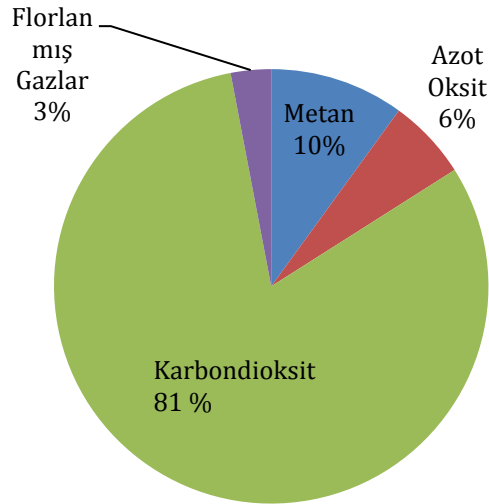
Tezin diğer bir özgün değeri ise radikal bir çözüm olarak “ultrasound” eşliğinde CO₂ desorpsiyonu kullanılmasıdır. Ultrasonik desorpsiyon teknolojisi henüz konsept aşamasında olup, KD-TOS sistemleri için ilk kez bu tez kapsamında çalışılmıştır. Ultrasonik desorpsiyon tekniğiyle CO₂'in düşük sıcaklıklarda (faz değişimi olmadan) uzaklaştırılacağı ön görüldüğünden ciddi enerji tasarrufu söz konusu olacağı tahmin edilmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Atmosferdeki ısıyı tutan gazlara sera gazı denir. İnsan faaliyetlerinin ürettiği sera gazları, 1750'den bu yana Dünya'nın ikliminde genel bir ısınmaya neden olmuştur. Bu ısınmaya neden olan sera gazlarından en fazla katkıyı karbondioksit yapmaktadır [8].



Şekil 2. 1.2014 yılı IPCC raporuna göre sera gazları dağılımı [8]



Şekil 2. 2.2016 yılı EPA'ya göre sera gazları dağılımı [8]

İki grafikte görülebileceği gibi CO₂ emisyonu diğer sera gazlarına göre en büyük paya sahip olup yıllar geçtikçe de miktarında artış gözlemlenmektedir. Karbondioksit,

atmosfere fosil yakıtlar (kömür, yağ ve doğal gaz), katı atıklar, ağaçlar ve odun ürünleri ile ayrıca bazı kimyasal reaksiyonlar sonucunda yayılır. CO₂ iklim sisteminde çok uzun süre kalır: CO₂ emisyonları, binlerce yıl sürecek atmosferik CO₂ konsantrasyonlarında artışa neden olur.

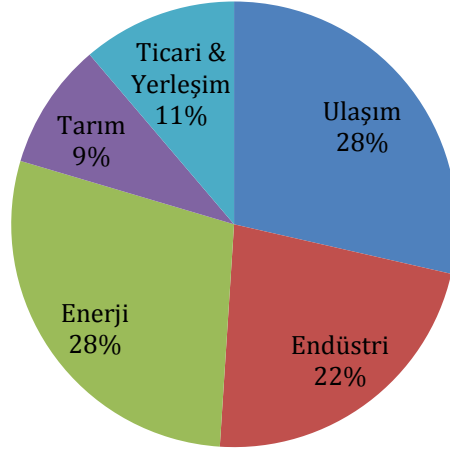
Atmosfere salınan bu CO₂'nin azaltılması için yapılabilecek çalışmaları 4 başlık altında toplayabiliriz. Bunlar: (1) enerji verimliliği; (2) enerji tasarrufu; (3) yakıt değiştirme; (4) CO₂ yakalama ve depolama. İlk seçenekte bahsedilmek istenen binaların yalıtımını iyileştirmek, daha fazla yakıt tasarrufu sağlayan araçlarda seyahat etmek ve daha verimli elektrikli cihazlar kullanarak CO₂ emisyonunu azaltmaktır. İkinci seçenek için; kullanımda olmadığı ışıkları ve elektroniği kapatarak kişisel enerji kullanımını azaltmak ve böylece enerji ihtiyacının azalması ile CO₂ salınımını azaltmak gibi örnekler verilebilir. Üçüncü seçenek ise yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmak ve daha düşük karbon içerikli yakıtları kullanarak karbon emisyonlarını azaltabilmektir. Son ve bu tez kapsamında da ele alınan seçenek olan karbondioksit yakalama ve depolama, yeni ve mevcut kömür ve gaz yakıtlı enerji santrallerinden, endüstriyel proseslerden ve diğer sabit CO₂ kaynaklarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını potansiyel olarak büyük ölçüde azaltabilen bir dizi teknoloji ile salınımı engellenemeyen CO₂'nin azaltılmasını içermektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde mevcut karbondioksit kaynakları ve bazı CO₂ emisyonu örnekleri ile yakalama teknikleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

2.1. CO₂ Emisyon Kaynakları

Karbon dioksit atmosferde Dünya'nın karbon döngüsünün bir parçası olarak doğal olarak bulunur. İnsan faaliyetleri, hem atmosfere daha fazla CO₂ ekleyerek hem de ormanlar gibi doğal lavaboların atmosferdeki CO₂'yi çıkarma yeteneğini etkileyerek karbon döngüsünü değiştirmektedir [9].

Nerdeyse bütün sektörlerdeki bir takım proseslerden dolayı CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Endüstrinin geliştiği ülkelerdeki durumu örneklemek adına aşağıda Amerika Çevre Koruma Ajansı (*İng.* United States Environmental Protection Agency - EPA)'nın 2016 yılı için yayınladığı veriler bulunmaktadır [10].



Şekil 2. 3.Amerika'daki 2016 karbondioksit emisyonunun sektörlere göre dağılımı [10]

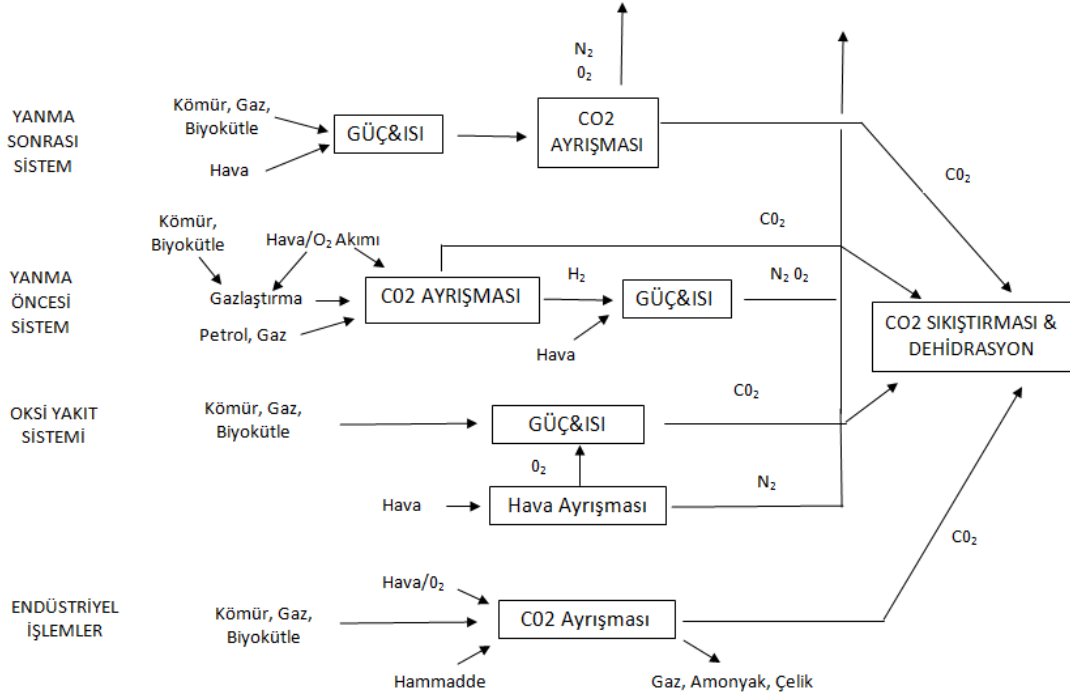
Şekil 2.3'te görüldüğü gibi CO₂ kaynağı olarak en önemli paya sahip sektörler ulaşım ve fosil yakıtlarına bağlı olarak çalışan güç santralleridir. Bunlar toplam Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşen CO₂ emisyonlarının %56'sını oluştururken endüstriden kaynaklanan CO₂ emisyonu 2016 yılında toplam Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşen emisyonların %22'sini oluşturmuştur ve ulaşım ve enerji sektörlerinden sonra en büyük 3. katkıyı sağlamıştır [8]. Endüstriden kaynaklanan sera gazı emisyonları öncelikle tesislerde enerji için yakılan fosil yakıtları içermektedir. Bu sektör aynı zamanda enerji tüketimi ve atık yönetimi faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlarla ilgili olmayan kimyasal, metalurjik ve mineral dönüşüm süreçlerinden kaynaklanan emisyonları da içermektedir [9].

2.2. CO₂ Yakalama Teknikleri

Karbondioksit yakalama ve depolama (*ing.* Carbondioxide Capture and Storage, CCS), CO₂'nin endüstriyel ve enerji ile ilgili kaynaklardan ayrıştırılması, depolama yerine taşınması ve atmosferden uzun süreli izolasyondan oluşan bir işlemdir. CCS, genel emisyon azaltma maliyetlerini azaltma ve sera gazı emisyonu azaltılması hedefine ulaşma esnekliğini artırma potansiyeline sahiptir [11].

Üç farklı tipte CO₂ yakalama sistemi vardır: yanma sonrası, yanma öncesi ve oksijen yanma sistemi olarak ayrılır. Gaz akışındaki CO₂ konsantrasyonu, gaz akışının basıncı

ve yakıt tipi (gaz veya katı olması), soğurma sisteminin seçilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu üç farklı sistemin şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2. 4.Karbondioksit yakalama teknolojileri [15]

2.2.1. Yanma Sonrası Karbondioksit Yakalanması

Bu teknolojiye yanma işleminden sonra ortaya çıkan CO₂ uygun bir çözücü içinde absorbe edilerek baca gazından ayrılabilir. Buna yanma sonrası yakalama denir. Emilen CO₂ çözücünden serbest bırakılır ve taşıma ve depolama için sıkıştırılır. Bu teknolojiye birçok ayırma tekniği kullanılabilir. Bunlar; yüksek basınçlı membran filtrasyonu, adsorpsiyon/desorpsiyon işlemleri ve kriyojenik ayırmadır[12]

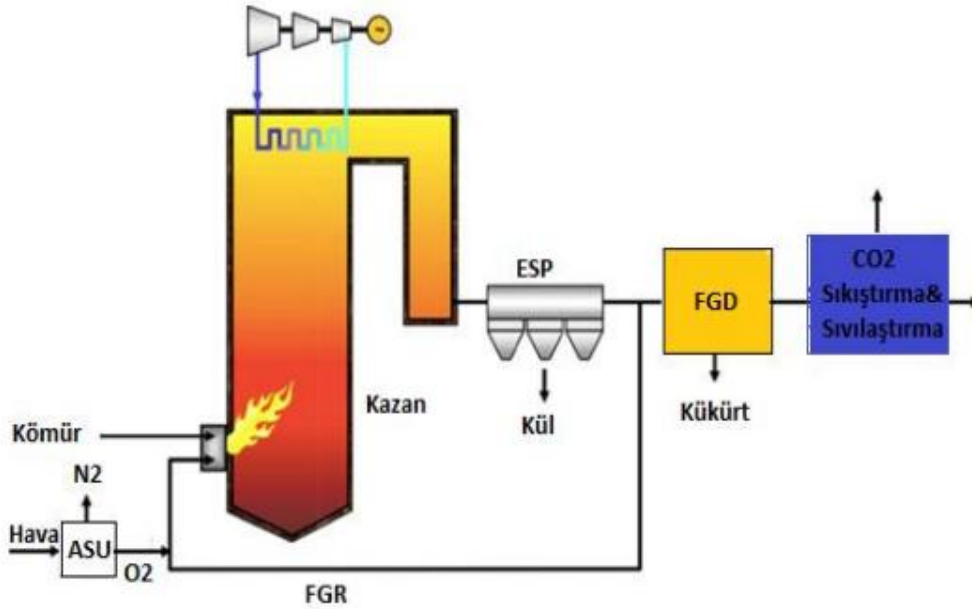
2.2.2. Yanma Öncesi Karbondioksit Yakalanması

Ön yanma sistemi, önce "gazlaştırma" veya "yeniden düzenleme" gibi bir dizi işlemde birini kullanarak, katı, sıvı veya gaz halindeki yakıtı yüksek basınç altında bir hidrojen ve karbon dioksit karışımına dönüştürmeyi içerir. Gazın dönüştürülmesi iyi bilinen olgunlaşmış bir süreçtir ve halihazırda dünyanın dört bir yanındaki rafinerilerde ve

kimyasal tesislerde kullanılmaktadır. Gazlaştırma dünya çapında yaygın bir şekilde uygulanmaktadır ve bazı açılardan, şehir gazı yapımında kullanılanlara benzerdir [17].

2.2.3. Oksi Yanma Sistemi ile Karbondioksit Yakalanması

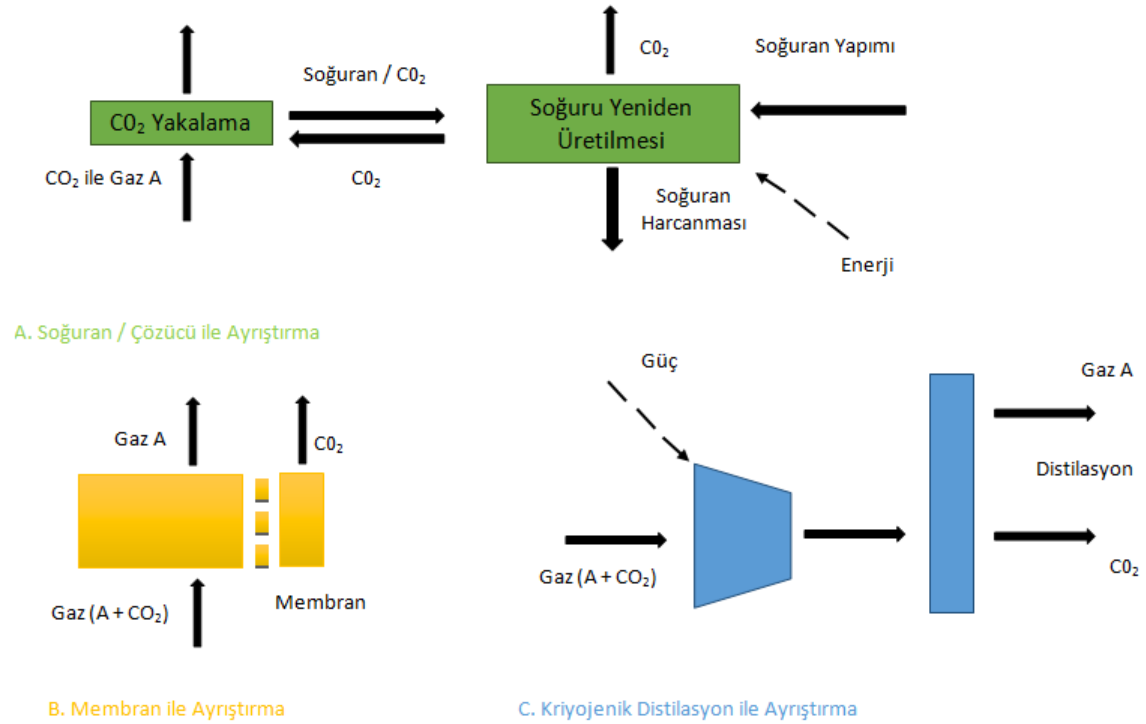
Oksi yanması, yanma sonrası yakalama metodundan farklı olarak yakıt hava yerine çok az miktarda seyreltilmiş oksijenle yakılır. Gerekli olan oksijen, yanmadan önce havadan ayrılır ve yakıt, hava yerine geri dönüştürülmüş baca gazı ile seyreltilen oksijende yanar. Bu oksijen bakımından zengin, azot içermeyen atmosfer, esas olarak CO₂ ve H₂O (su)'dan oluşan nihai baca gazları ile sonuçlanır, böylece daha kolay saflaştırma için daha konsantre bir CO₂ akımı üretir. Prosesin Şekil 2.5.'te şematik gösterimi bulunmaktadır [17].



Şekil 2. 5.Oksi Yanma Karbondioksit tutma diagramı [17]

2.3. CO₂ Ayırma Teknolojileri

Genel olarak, enerji santrallerinden üretilen CO₂'yi ekonomik olarak ayırmak için ilk önce nispeten saf, yüksek basınçlı bir gaz akımı üretilmelidir. 3 çeşit ayırıştırma tekniği bulunmaktadır. Bu tekniklerin şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir [12].



Şekil 2. 6. Karbondioksit Ayırma Yöntemleri Diagramı [12]

2.3.1. Membran ile Ayırma

Membran ile ayırma, sürekli bir yapının moleküler düzenlemesindeki malzemeleri gözenekler ve/veya dakika boşlukları yoluyla seçici olarak ayıran bir teknolojidir. Gaz ayırma membranları çalışma prensibi, bir gaz akışındaki bir bileşenin diğerlerinden daha hızlı geçmesine izin vermesi ile ayrılmanın gerçekleşmesini sağlamasına dayanır. Gözenekli inorganik membranlar, paladyum membranlar, polimerik membranlar ve zeolitler dahil olmak üzere pek çok farklı gaz ayırma membran türü vardır [12].

Membranlar genellikle yüksek derecelerde ayrılma sağlayamaz, bu nedenle akışlardan birinin birden fazla aşaması ve/veya geri dönüşümü gereklidir. Bu artan karmaşıklık, enerji tüketimine ve maliyetlere yol açar [12].

Yüksek saflıkta CO₂'yi ayırmak için farklı özelliklere sahip birkaç membran gerekebilir. Solvent destekli membranlar, membranların ve solvent yıkama en iyi özelliklerini birleştirmek için geliştirilmektedir. Enerji santrallerinde yakalama için membranların geniş çapta kullanılmasından önce çok gelişme gerekmektedir [21].

2.3.2. Kriyojenikler ile CO₂ Ayrılması

Karbondioksitin kriyojenikler ile ayrılması, düşük sıcaklıklar kullanılarak uygulanan bir prosestir. CO₂, soğutma ve yoğuşma yöntemleri ile diğer gazlardan ayrılabilir. Kriyojenik ayırma, ticari olarak yüksek CO₂ konsantrasyonlarına sahip akışlar (genellikle >90%) için kullanılır, ancak daha seyreltik CO₂ akışları için kullanılmaz [12].

Kriyojenik ayırma, gemi ile taşıma gibi belirli taşıma seçenekleri için gerekli olan sıvı CO₂ üretimini sağlama avantajına sahiptir.

CO₂'nin kriyojenik olarak ayrılmasının en büyük dezavantajı ise özellikle seyreltilmiş gaz akışlarında soğutmayı sağlamak için gereken enerji miktarıdır [3].

2.3.3. Sorbentlerle / solventlerle CO₂ Ayrılması

2.3.3.1. Solventlerle CO₂ Ayrılması

Amin ile yıkama teknolojisi, 60 yıldan daha uzun bir süre önce, petrol ve kimya endüstrilerinde, hidrojen sülfid ve CO₂'nin gaz akımlarından uzaklaştırılması için kullanılmaya başlanmıştır. CO₂ tutumu için mevcut tekniklerin en olgunlaşmış olanıdır ve bir baca gazı akışının oksitleyici ortamının karşısına kimyasal olarak indirgenir [12].

Mono-etanolamin (MEA) CO₂ yakalaması için yaygın olarak kullanılan bir amin türüdür. % 98'lik CO₂ geri kazanım oranları ile %99'dan fazla ürün saflığı elde edilebilir. Bununla birlikte, bir baca gazının oksitleyici ortamında bozulma oranı ve desorpsiyon için gereken enerji miktarının (90°C-120°C arasında desorpsiyon gerçekleşmektedir.) fazla olması dezavantajına sahiptir. Gelişmiş çözücüler ile geleneksel MEA çözücülerine kıyasla enerji gereksinimini %40'a kadar azaltabilir [12].

2.3.3.1. Sorbentlerle CO₂ Ayrılması (Adsorpsiyon)

Adsorpsiyon sıvı içinde çözülmüş şekilde yer alan bileşenlerin katı bir sorbent yüzeyine tutunması yoluyla ayrılmasına prensibi ile yüzey fazında gerçekleşen prosestir.

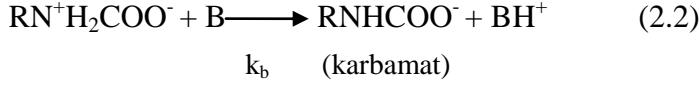
Adsorplayan madde yüzeyi ile adsorplanan kimyasal arasındaki çekim kuvvetlerine göre üç çeşit adsorplama yöntemi vardır. (1) Fiziksel adsorpsiyon: Adsorplanan madde molekülleri ile katı yüzey arasında çekim kuvvetleri sonucunda oluşan prosestir. Bu olayda işlem tersinirdir ve zayıf van der Waals kuvvetleri etkinlik gösterir. Adsorpsiyon sonucu yoğunlaşma enerjisini biraz daha aşan ısı açığa çıkar. (2) Kimyasal Adsorpsiyon: Katı yüzey ile adsorplanan madde arasındaki fonksiyonel grupların kimyasal etkileşimi ile gerçekleşen olaydır. Adsorpsiyon işlemi tersinmezdir. Adsorpsiyon sırasında reaksiyon ısısından daha büyük ısı açığa çıkar. (3) İyonik Adsorpsiyon: Adsorplanan madde elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle iyonlar yüzeydeki yüklü bölgelere tutunmaktadır. Bu olayda adsorplayan ile adsorplananın iyonik güçlerine göre tutunma durumlarında değişiklik gerçekleşir [18].

CO₂'yi gaz karışımlarından ayırmak için Zeolitler ve aktif karbon gibi katı adsorbanlar kullanılabilir. Adsorpsiyon, CO₂'nin baca gazından büyük ölçüde ayrılması için çok tercih edilmez, çünkü mevcut adsorbanların kapasitesi ve CO₂ seçiciliği düşüktür. Ancak, başka bir yakalama teknolojisi ile kombinasyon halinde başarılı olabilir [12].

2.4. Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvılar

Kimyasal olarak seçici olan birçok CO₂ yakalama teknolojisi, amin çözelti sistemine dayanır ve bir çözücü olarak suyun gerekliliği, CO₂ yakalamasının verimliliğini azaltır. Amin bazlı sistemler için su ideal bir çözücü değildir, çünkü CO₂'nin su içinde çözünürlüğü düşüktür. Ayrıca, alkanolamin sistemlerinin çok fazla enerjiye ihtiyaç duyması alternatif çözüm arayışlarına sebep olmuştur. CO₂ yakalama işleminde sulu bir amin çözeltisi yerine su kullanılmayan organik sistem kullanılırsa sulu amin çözeltilerine göre daha az enerji harcayarak CO₂ yakalanabilir [4, 13]. Bunlardan biri de karbon dioksit tutan organik sıvı, kısaca KD-TOS, çözeltileridir.

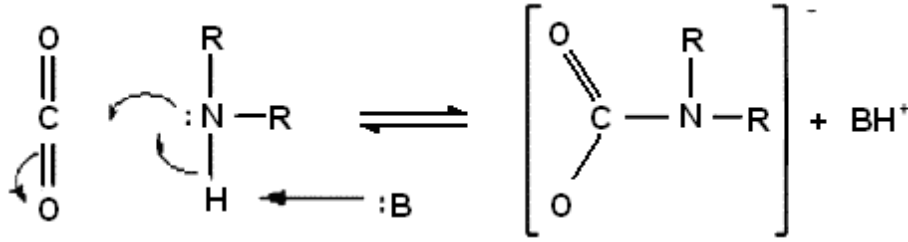
KD-TOS, asit gazlarının kimyasal olarak tutulması üzerine iyonik sıvılara dönüşen organik sıvılardır. KD-TOS'lar, güçlü bir organik amidin veya guanidin bazı ve bir alkol (ikili bileşen) veya alkol ile işlevselleştirilmiş güçlü bir organik amidin veya guanidin bazı (tek bileşen) karışımından oluşur. Amidin ve guanidin bazıları, karbondioksite karşı düşük reaktivite ve güçlü baziklikleri nedeniyle CO₂ yakalamada



Amin ve karbamat kararlı olduğunda ortaya çıkan reaksiyon aşağıdaki gibidir.

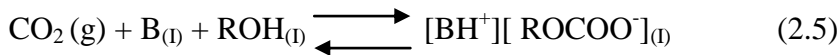


CO_2 ve amin sistemleri arasındaki reaksiyonun mekanizmalarından ikincisi olan üç moleküllü (termoleküler) tepkime mekanizması bir aminin hem karbondioksit molekülü hemde baz molekülü ile tek basamakta tepkimeye girdiğini varsayar. Bu varsayımın gösterim Şekil 2.8’de ilgili eşitlik de Eşitlik 2.4’te verilmiştir [32].



Şekil 2. 8.Üç moleküllü (termoleküler) reaksiyon mekanizması

Aminidin veya guanidin bazı ve doğrusal alkol içeren karbon dioksit tutan organik sıvılar için modifiye edilmiş termoleküler reaksiyon mekanizması eşitlik 2.5’te gösterilmiştir. KD-TOS’un bir kısmı, alkil karbamat tuzu oluşturmak için amin veya alkol molekülünün ikinci bir molekülü ile reaksiyona girerken, elde edilen ara maddenin bir kısmı, reaktif moleküller oluşturmak üzere parçalanır [32].



Karbon dioksit tutan organik sıvı alkol sistemi mekanizması için geçerli tepkime hız eşitliği, Eşitlik 2.6 ve Eşitlik 2.7’de verilmiştir.

$$R_{\text{obs}} = k_o [\text{CO}_2] \quad (2.6)$$

$$k_o = \{ k_B[\text{B}] + k_{\text{ROH}}[\text{ROH}] \} [\text{B}] \quad (2.7)$$

Psödo-birinci dereceden koşullar için alkol konsantrasyonunun fazla olduğu varsayıldığı için, ROH sabit olarak kabul edilebilir ve yeni bir hız sabiti, k, Eşitlik 2.8 ile gösterilebilir.

$$k = k_{ROH} [ROH] \quad (2.8)$$

$$k_o = \{ k_B[B] + k \}[B] \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9'a göre eğer amin bazı alkole göre nispeten baskınsa reaksiyon derecesi 1 ile 2 arasında değişebilir. Eğer alkol baskın ise sistem birinci dereceden reaksiyon verir. Bununla ilgili Eşitlik 2.10'da verilmiştir [32].

$$k_o = k[B] \quad (2.10)$$

Özet olarak KD-TOS'ların hız sabitleri Eşitlik 2.9 ve 2.10 kullanılarak elde edilmiştir.

2.5. Ultrasonik Desorpsiyon

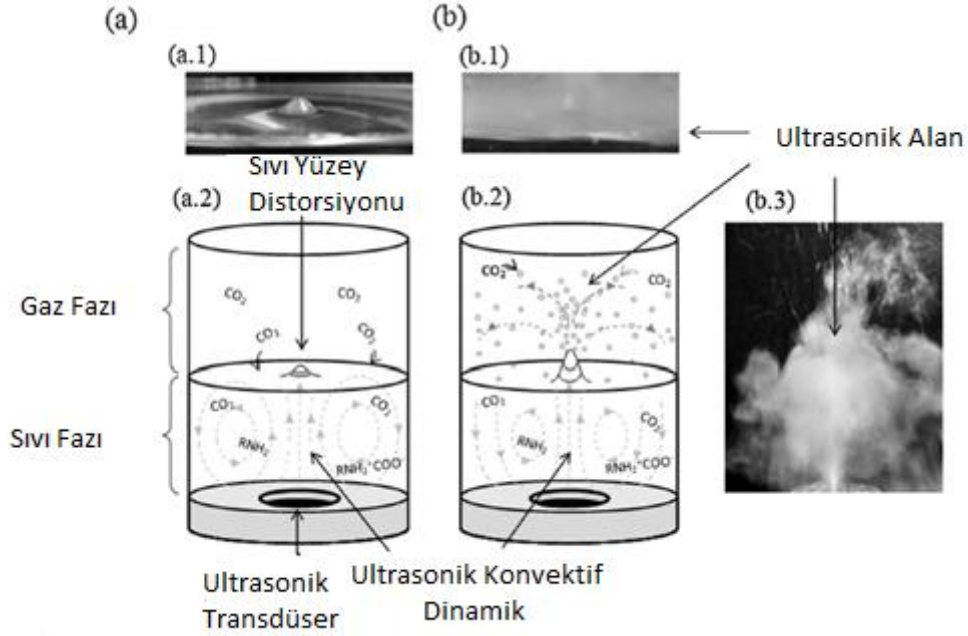
Karbon yakalama ve depolama alanındaki gelecekteki araştırma faaliyetlerinin temel kaygısı, çözücü desorpsiyonu için enerji talebinin azaltılmasıdır. Bu aynı zamanda, daha verimli CO₂ emicilerin geliştirilmesinin yanı sıra, alternatif desorpsiyon yöntemlerinin araştırılmasını da içerir. Gerekli olan yüksek sıcaklığı düşürebilmek için ultrasonik teknoloji denenmeye başlanmıştır. Çalışmalar 80°C ve altındaki çalışma sıcaklıklarını hedeflemektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda ultrasonik dalgalar başka sıvıların/çözeltilerin absorpsiyon ve desorpsiyon performansını artırdığı görülmüştür [33].

Ultrasonik emilim, akış türbülans etkisi ve ultrasonik gücün neden olduğu ultrasonik alan ile yüksek frekans ve basınç altında geliştirilebilir. Bu etki sıvıyı tabandan sıvı yüzeyine taşıyarak karıştırıcı gibi işlev görür ve sıvıda dinamik akım yaratır [34].

Sıvı damlacıklarının, gaz-sıvı ara yüzeyindeki kuvvetli titreşim tarafından sıkıştırılmış hali ultrasonik alan ve atomizasyon olayı olarak adlandırılır. Bu olayın şematik gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir. Atomizasyon etkili ultrasonik alan yeterli miktarda ultrasonik güç kaynağı altında oluşturulur. Üretilen ince sıvı damlası, kütle transfer işlemi için damlacık boyutunun ultrasonik frekans ile değiştirilebildiği geniş bir yüzey alanı sağlar. Yüksek frekansta damlacık boyutları küçülerek kütle transferi için yüzey alanını artırır. Bu da desorpsiyonun daha hızlı gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca daha

yüksek ultrasonik güç altındaki CO₂ desorpsiyonunun düşük ultrasonik güçteki durumdan önemli ölçüde daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir [34].



Şekil 2. 9.(a) Durum I: Düşük ultrasonik ışınlama gücü için (a.1) I. durumda sıvı yüzey bozulmasının görüntüleri (a.2) I. durumda ultrasonik akış kuvveti tarafından oluşturulan konvektif dinamik akımın şematik diyagramı

(b) Durum II: Yüksek ultrasonik ışınlama gücü için (b.1) II. durumda ultrasonik alanın görüntüleri (b.2) II durumdaki ultrasonik alan ve ultrasonik atomizasyona bağlı olarak oluşan konvektif dinamik akımın şematik gösterimi (b.3) II durumunda oluşan ultrasonik alanın görüntüsü

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında 1-hekzanol, 1-propanol ve 1-bütanol ortamında organik baz olarak 1,5-Diazabisiklo[4.3.0]non-5-en (DBN), 1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en (TBD) ve 2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine (BTMG) içeren KD-TOS'ların karbon dioksit tutma performansları tartışılmıştır.

CO₂ –TOS sisteminin karbon dioksit tutma performans analizi, gaz-sıvı temas cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan sistemler üzerinde döngüsel olarak daha önceki tez çalışmaları da incelenerek beşer kez absorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler boyunca otomatik olarak her 10 saniyede bir reaktöre giren ve çıkan gazın kütleli akış hızları ölçülmüştür. Absorplanan karbon dioksit miktarı gerekli birim değişiklikleri yapılarak ve sistemin otomatik olarak bilgisayarda Excel verisi olarak tuttuğu veriler kullanılarak hesaplanmıştır ve çözeltiler tarafından yakalanan molce CO₂ miktarının zamana karşı grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlar ile çözeltilerin başlangıç absorpsiyon hızları hesaplanmıştır. Yapılan 5'er tekrarda absorpsiyon ve desorpsiyon miktarları ölçülerek çözeltilerin tekrarlanabilirlikleri de tartışılmıştır.

Desorpsiyon işlemi ise literatürden farklı olarak ultrasonik desorpsiyon banyosu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada parametre olarak hem sıcaklık hem de ultrasonik banyonun çalışma verimleri göz önünde bulundurulmuştur.

Sonuçları anlamlandırmak için iki ayrı analiz yöntemine daha başvurulmuştur. Bunlardan ilki çözeltilerin tekrarlanabilirliğini tartışabilmek ve performans kaybı olup olmadığını araştırmak için Fourier Infrared Transform Spektroskopisi (FTIR) analizleri yapılmıştır. Diğeri ise Termal Gravimetrik analiz (TGA) olarak isimlendirilen analizdir. Bu sayede karbon dioksit absorpsiyonundan sonra desorpsiyon bozunma sıcaklığı tespiti yapılarak uygun desorpsiyon sıcaklıklarının tespit edilmesinde kullanılmıştır.

3.1. Kimyasal Malzemeler

Bu tez çalışmasında kullanılan kimyasalların adları, kısaltmaları ve temin edildikleri yerlere ait bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1.Tez çalışmasında kullanılan kimyasallar

KİMYASAL ADI	KISALTMA	ÜRETİCİ FİRMA	SAFLIK	CAS NO
1,5-Diazabisiklo[4.3.0]non-5-en	DBN	Sigma- Aldrich	%98	3001-72-7
1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en	TBD	Sigma- Aldrich	%98	5807-14-7
2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine	BTMG	Sigma- Aldrich	≥%97	29166-72-1
1-Hekzanol	-	Sigma- Aldrich	%98	111-27-3
1-Propanol	-	Sigma- Aldrich	≥%99	71-23-8
1-Bütanol	-	Sigma- Aldrich	%99.9	71-36-3
Karbondioksit	CO ₂	Linde		
Azot	N ₂	Linde	%99.998	

3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Ekipmanlar

3.2.1. Gaz-Sıvı Temas Sistemi ve Bileşenleri

Bu çalışmada absorpsiyon ve desorpsiyon işlemine tabi tutulan, performansları ve tekrarlanabilirlikleri ölçülen çözeltilerin çalışmaları, Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı 5 numarada bulunan daha önceki çalışmalarda da kullanılmış yerel bir firmaya özel olarak ürettirilen gaz-sıvı temas cihazı kullanılmıştır. Gaz-sıvı temas cihazında bulunan ekipmanlar aşağıdaki gibidir.

- Bir adet paslanmaz çelik reaktör
- Bir adet akış ölçer
- Bir adet akış denetleyici

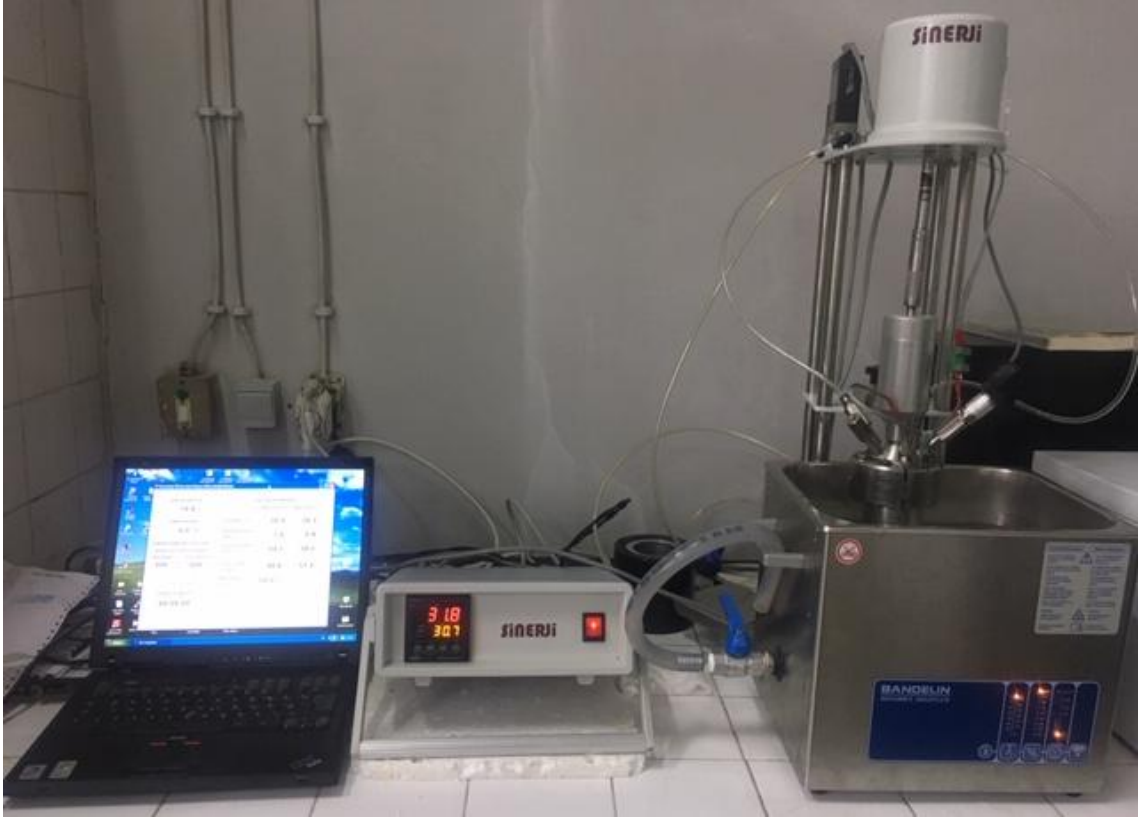
- Bir adet ısıtmalı ceket
- PID kontrollü güç ünitesi
- Verilerin kaydedilmesi için bir adet bilgisayar

Gaz-sıvı temas sisteminin absorpsiyon Şekil 3.1 ve desorpsiyon Şekil 3.2 durumundaki görünümü ve şematik görünümü Şekil 3.3'te verilmiştir.

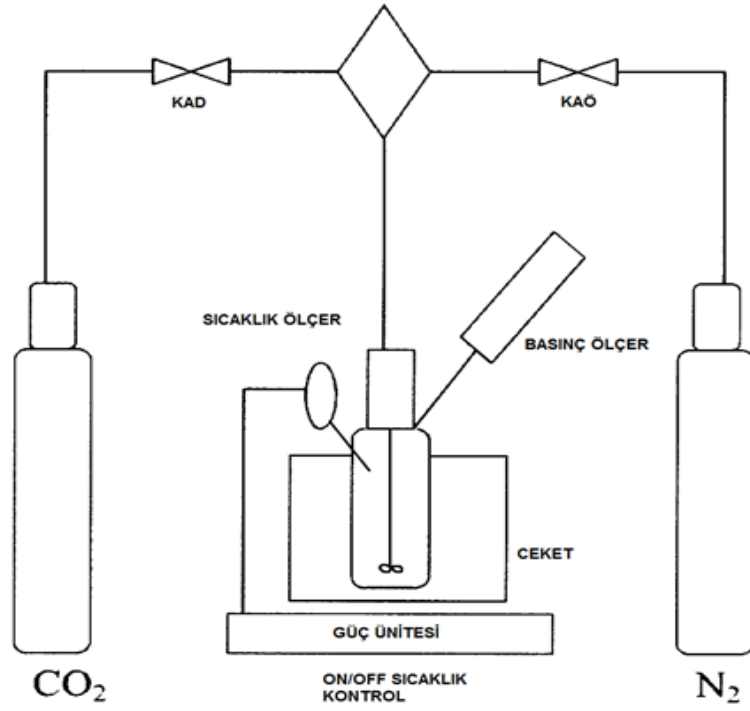


Şekil 3. 1.Gaz-sıvı temas sisteminin absorpsiyon işlemi sırasındaki görünümü

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi absorpsiyon işlemi gerçekleşirken ısı sağlayan ceket ile sıcaklık kontrolü yapılmaktadır. Şekil 3.2'de de desorpsiyon işlemi yapmak için yerleştirilmiş ultrasonik banyo bulunmaktadır.



Şekil 3. 2.Gaz-sıvı temas sisteminin desorpsiyon işlemi sırasındaki görünümü



Şekil 3. 3.Gaz-sıvı temas sisteminin şematik görünümü

Gaz-sıvı temas cihazının reaktörüne ait teknik bilgiler Çizelge 3.2’de yer almaktadır. Bu reaktöre uygun olarak konumlandırılmış bir termofit ve basınç sensörü sayesinde güç sistemine bağlı bulunan ve CSTR isimli yazılım yüklü olan bilgisayara eş zamanlı olarak veri aktarılmaktadır ve her 10 saniyede bir bu veriler kaydedilmektedir. Bu sayede deney süresi boyunca tüm parametrelerin kontrolü sağlanmaktadır.

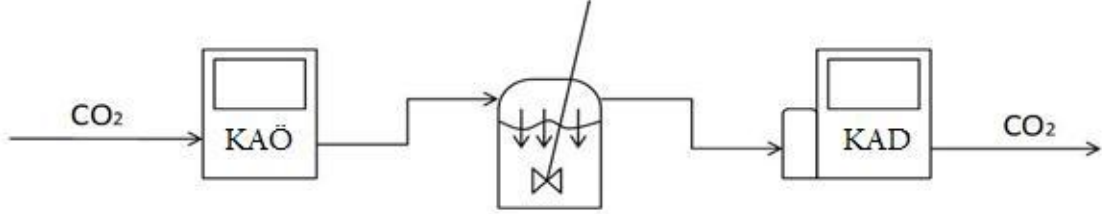
Çizelge 3. 2.Gaz-sıvı temas cihazı özellikleri [15]

Model	RD-CSTR 200
Reaktör Tank Hacmi	200 ml
Reaktör Kilit Sistemi	Bolted Split Rings
Karıştırma Sistemi	Manyetik sürücü, Direct Coupled Servo Motor (optik geribeslemeli)
Karıştırıcının Hız Kontrolü	50-500 rpm
Kütleli Akış Ölçerler	1-100 cm ³ /dak
Akış Kontrolü	1% to 100% (Tam kontrol)
Reaktör Desteği	Tezgâh üstü
Basınç	0-10 bar
Basınç Ölçümü	Dijital ölçüm (basınç sensörü ile)
Sıcaklık Kontrolü	PID Denetleyici, 20- 110 °C
Reaktör Malzemesi	AISI 316 L

Gaz-sıvı temas sisteminin bu bölümün başında bahsedilen bir adet akış ölçer ve bir adet akış denetleyicinin her ikisi de anlık olarak kütleli ve hacimsel akış hızlarını ölçer ve hafızasındaki veri tabanı sayesinde standart hacimsel akış hızına çevirebilmektedir. Bu sistemde, sıcaklık, standart hacimsel hız ve basınç gibi özellikler deneysel koşullara bağlı değildir. Bunu belirtebilmek için akış ölçerler bundan sonra kütleli akış ölçer (KAÖ) ve kütleli akış denetleyicisi (KAD) olarak isimlendirilecektir. Bu sistemde kütleli akış denetleyici PID (Oransal, İntegral, Türevsel Denetleyici) kontrol yapma özelliğine sahiptir. Bu özelliği sayesinde KAD reaktöre beslenen veya reaktörden çıkan gaz miktarını kontrol eder. KAÖ sayesinde de diğer akımdaki değişiklikler ölçülmektedir.

Karbon dioksit tutan organik sıvıların absorpsiyon ve desorpsiyon performanslarını incelemek için cihaz bağlantıları farklı şekillerde yapılmıştır. Absorpsiyon işlemi için

Karbon dioksit tüpünden beslenen karbondioksitin miktarının ölçülerek reaktöre beslenebilmesi için kütleli akış ölçere gelir ve hazırlanan organik sıvı tarafından bir kısmı absorplanır. Daha sonra kalan gaz kütleli akış denetleyiciye gider akış kontrolü yapılır ve sistemden çıkar. Proses boyunca basınç ve sıcaklık sabit tutulmuştur. Bu proses için kullanılan ekipman dizilimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 4.Gaz-sıvı temas reaktörü absorpsiyon ekipman dizilimi [15]

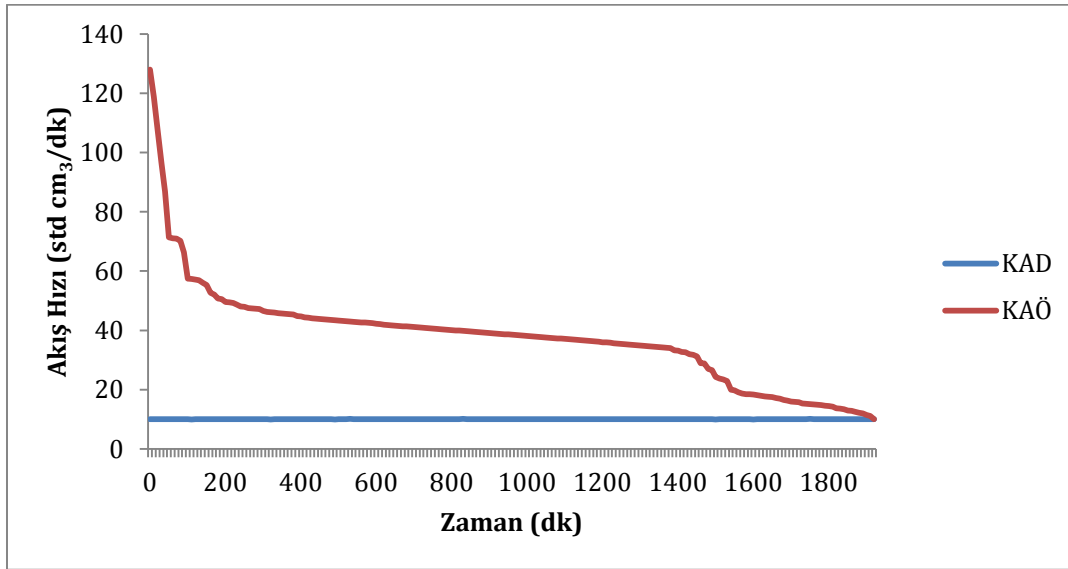
Proseste saf karbon dioksit kullanıldığı için giriş ve çıkıştaki gazın akış hızları arasındaki fark, absorplanan hacimsel hızı elde etmemizi sağlar ve gerekli birim değişiklikleri yapılarak molce absorpsiyon hızı hesaplanabilir. Bilinen CO₂ ara yüzey ve yayınma sabiti, derişim değerleri ve tepkime hız sabitiyle soğurulma hızı Eşitlik 3.1 yardımıyla teorik olarak hesaplanabilir [15].

$$Ra = a[A^*]\sqrt{k_2 D_A B^0} \quad (3.1)$$

- Formülde R (kmol/m²s) absorpsiyon hızını,
- a (m²) kütle transferinin gerçekleştiği yüzey alanını,
- [A*] (kmol/m³) karbon dioksit gazının gaz-sıvı ara yüzeyindeki derişimini,
- k₂ (m³/kmol s) tepkime hız sabitini,
- D_A (m²/s) karbon dioksitin yayınma hızı sabitini,
- B⁰ (kmol/m³) da çözeltideki reaktant maddenin derişimini (KD-TOS hibrit sistemlerinde organik bazın derişimini) ifade eder.

Sisteme giren gazın niteliğinde bir değişiklik olmadığı için ve reaktör kesit alanı da bilindiği için akış ölçerler arasındaki hacimsel akış hızı farkı hesaplanarak (standart cm³/dak) ve gerekli birim değişiklikleri ile absorpsiyon hızı, R hesaplanabilir [20].

DBN, TBD ve BTMG içeren 1-Hekzanol, 1-Propanol ve 1-Bütanol kullanılarak hazırlanmış çözeltilerin absorpsiyon ve desorpsiyon performansları incelenmesi için özel olarak üretilen gaz-sıvı temas reaktörü kullanılmıştır. Absorpsiyon deneylerinde reaktör 30°C sıcaklıkta ve 2 bar mutlak karbondioksit basıncında tutularak kütleli akış ölçer ise 10 standart cm^3/dk 'ya (sccm) ayarlanmıştır. Soğurma işlemi sabit basınç altında gerçekleştirilmiştir ve bu sayede soğurulan karbon dioksit kadar sisteme gaz girişi olacağından çözeltilerin zamanla absorpladığı gaz miktarı azalmıştır. Çözelti doyuma noktasına geldiğinde ise gaz akışı başta ayarlanan 10 sccm'ye gelecektir. Sürece ait örnek deneysel çıktı Şekil 3.5'te verilmiştir.

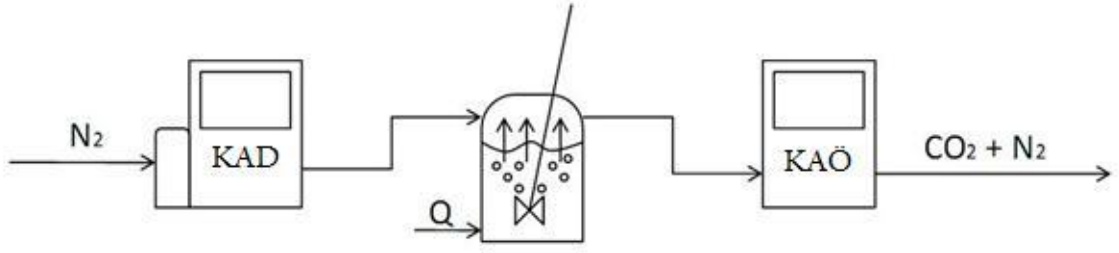


Şekil 3. 5. Kütlece %10 DBN 1-Propanol sistemi için örnek absorpsiyon çıktısı

Çözeltinin karbondioksitle ilk buluşma anından doygunluğa ulaştığı zamana kadar olan reaksiyon seyirinde deney başlangıç hızı zamanla azalmıştır. Elde edilen KAD ve KAÖ verileriyle akış hızına karşı zaman grafiği çizilir. Bu grafikte KAD ve KAÖ eğrisi arasındaki alan bize deney boyunca absorplanan karbondioksit miktarını verir.

Absorpsiyon işleminin bitiminin hemen ardından gaz bağlantıları değiştirilerek desorpsiyon işlemine başlanılır. Bu süre zarfında çok fazla vakit kaybetmemeye özen gösterilmiştir. Bunun sebebi çözeltinin küçük miktarda da olsa oda sıcaklığında bile desorpsiyona başlamasıdır.

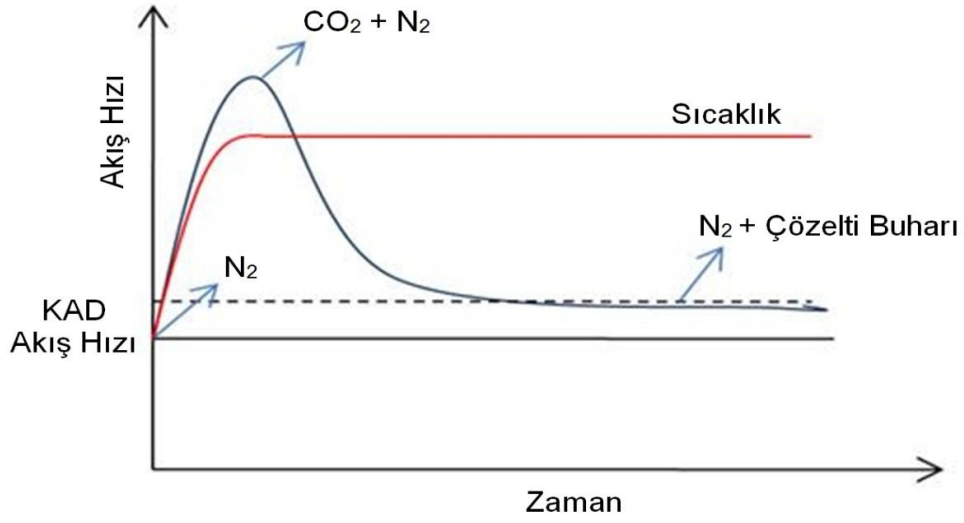
Bölümün başında belirtildiği gibi desorpsiyon işlemi için farklı ekipman dizilimi kullanılmıştır. Kullanılan bu ekipman dizilimi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3. 6. Gaz-sıvı temas reaktörü desorpsiyon ekipman dizilimi

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi Azot tüpünden gelen saf azot gazı önce kütleli akış denetleyiciye gelir ve ayarlanan akış hızında kontrollü şekilde reaktöre girer. Desorpsiyon için sisteme azot gazı verilir çünkü azot gazının süpürücü etkisiyle karbondioksitin reaktörde birikmeden sistemden uzaklaşmasını sağlar. Bu sayede sistemdeki olası basınç artışı da önlenmiş olur. Karbondioksitin daha hızlı bir şekilde sistemden uzaklaşabilmesi için reaktör farklı sıcaklıklarda ultrasonik banyoya maruz bırakılmıştır. Literatürde daha önce yapılan sadece ısı ile işlemlenmiş uzaklaştırmalardan yola çıkılarak ve ultrasonik su banyosunun maksimum ulaşabileceği sıcaklık göz önünde bulundurularak en uygun desorpsiyon sıcaklıkları belirlenmiş ve deneyler buna göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ultrasonik banyonun daha az enerji ile verim alınıp alınmayacağına bakılmak için farklı çalışma verimlerinde deneyler yapılmıştır. Ultrasonik su banyosunun ayrıntılı özellikleri ilerleyen bölümde anlatılacaktır.

Desorpsiyonun verimli gerçekleşmesi için azot gazının akış hızı da önem taşımaktadır. Akış hızının artması desorpsiyon performansını artırır. Ancak kullandığımız akış ölçerlerimizin aralıkları 0-128 sccm'dir. Bu sebeple yüksek akış hızında çıkış akımı analiz etmek çok zorlaşabileceğinden optimum KAD akış hızı olarak 50 sccm seçilmiştir. Deney boyunca kütleli akış ölçerler azot gazı hacimsel akış hızını hesaplamasını Poiseuille denklemi prensibine dayanarak yapmaktadır. Dolayısıyla akış ölçerlerin çalışma prensibi azot gazının viskozitesini ölçme üzerinedir. Akış ölçerler sadece azot gazı akış hızını ölçmeye ayarlanmıştır. Bu sebeple aslında gaz karışımı halinde bulunan azot ve karbondioksiti azotun tek bir gazmış gibi azotun viskozitesine göre ölçer ve hataya sebep olur. Ancak bu şekilde olsa bile sistemden ayrılan karbondioksit önce fazlayken sonraları zamanla azalacaktır. Buna paralel olarak hep yüksek miktarda azot gazı çıkışı olacağı için başta gerçekleşecek hata tüm deney süresine yayıldığında oldukça azalacaktır [15].



Şekil 3. 7. CO₂ desorpsiyon prosesi için bilinen kütleli akış hızı grafiği [15]

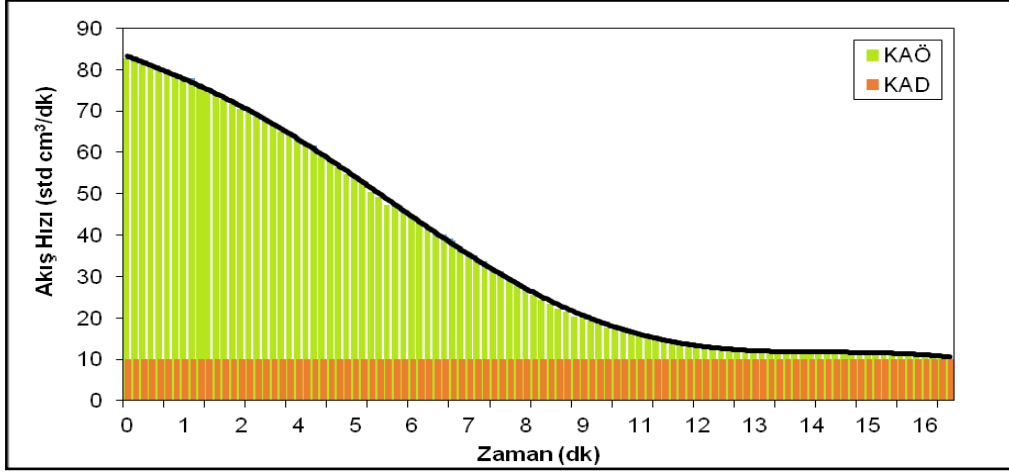
Şekil 3.7'de de görüldüğü gibi artan sıcaklık ile beraber ultrasonik su banyosunun da etkisiyle ortamda karbondioksit gazı da bulunmaya başlar ancak zamanla karbondioksit çıkışı azalır ve çıkış değerinde azot gazı ve ihmal edilebilir ölçüde çözelti buharı kalır.

Gaz sıvı temas sisteminde gerçekleştirilen bu deneylerde hazırlanan çözeltilerin absorpsiyon desorpsiyon tekrarlanabilirliklerine ve endüstriye aktarılabilirliğine bakılmıştır.

3.2.1.1. Elde Edilen Verilerin Hesaplanması

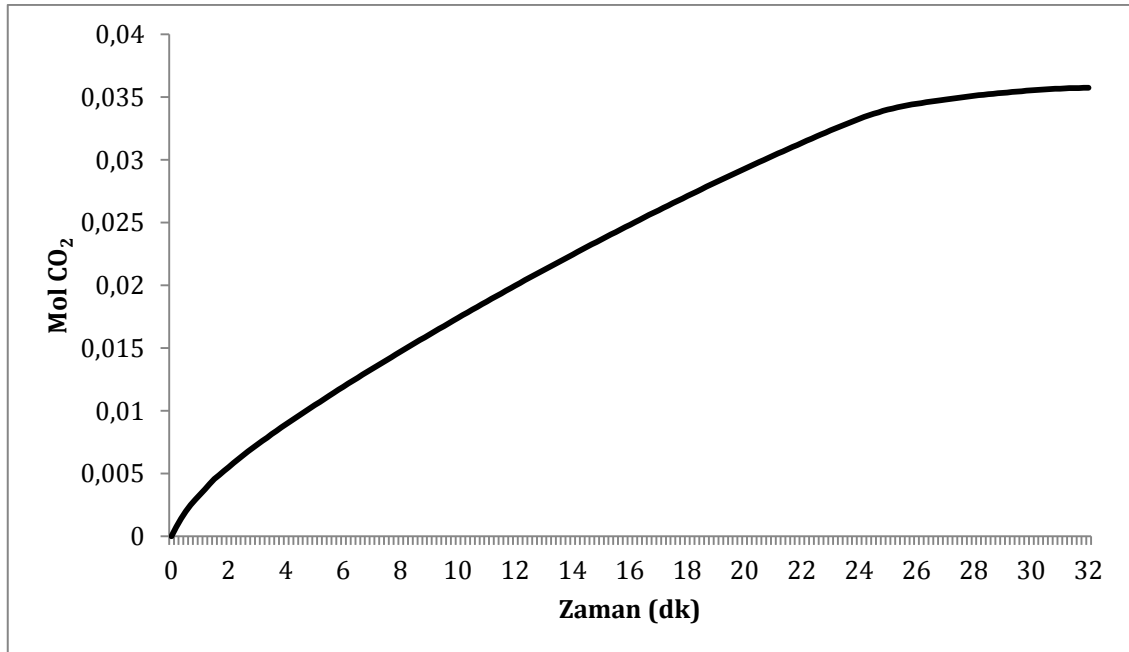
Bu tez çalışmasında oluşturulan karbon dioksit tutan organik sıvıların kapasitelerinin ve başlangıç absorpsiyon hızlarının hesaplanması ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda gaz-sıvı temas reaktöründe gerçekleştirilen deney boyunca akış ölçerler yardımıyla giren ve çıkan akımlardaki gazın hacimsel akışı gözlemlenmiştir. Sistemin deney sonucunda bize verdiği veriler ile çözeltinin doygunluğa ulaşana kadarki yakalanan karbondioksit miktarı hesaplanmıştır. Bunu hesaplamak için KAD ve KAÖ grafikleri çizilmiş ve altında kalan eğriler hesaplanmıştır. Akış ölçer her 10 saniyede bir veri alır. Grafikte bu 10s'lik periyotların altında kalan küçük dikdörtgen alanların toplanarak absorplanan karbondioksit miktarı hesaplanır (Reiman toplamı). Bu yöntem deneyin herhangi bir zaman aralığındaki toplam soğurulan karbon dioksit miktarının hesaplanabilmesini sağlar.

Aşağıda bulunan Şekil 3.8'te görüldüğü gibi veri aralıkları 10'ar saniye olduğu için küçük dikdörtgenler toplamı eğrinin toplam alanına çok yakındır.



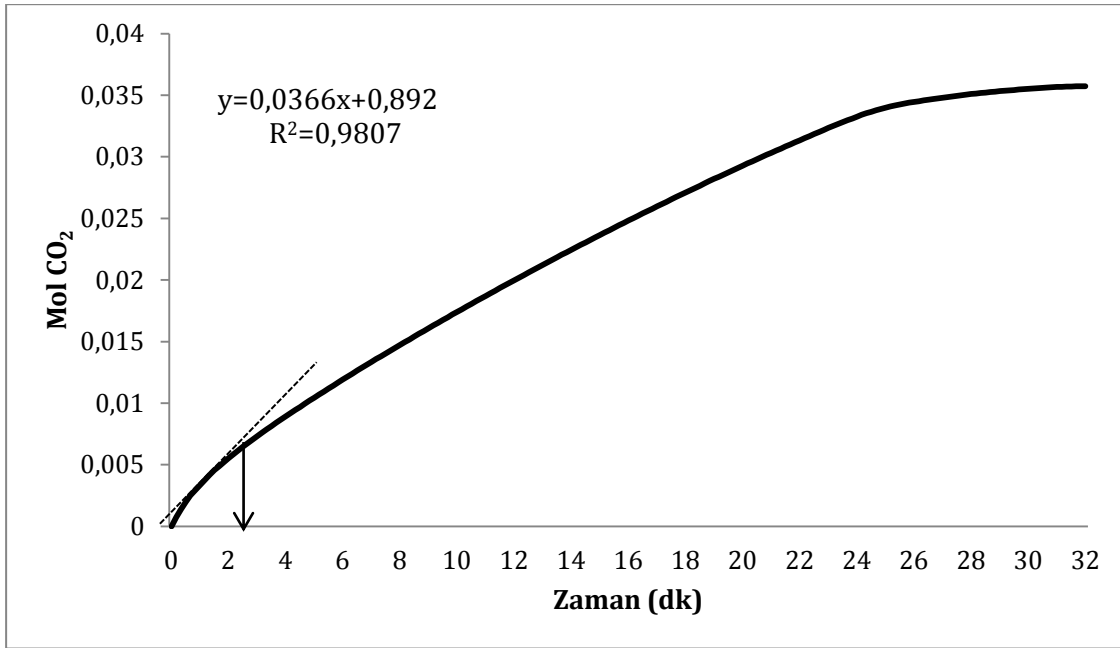
Şekil 3. 8.Kütlesel akış ölçer ve denetleyici verileri arasında kalan alanın dikdörtgen parçalara ayrılması [15].

Akış ölçerler daha önce bahsedildiği gibi standart hacimsel akış hızında ölçüm yapmaktadır. Karbon dioksitin standart koşullardaki bilinen fiziksel özellikleri ile gerekli birim değişiklikleri yapılarak her 10s'de alınan verilerle çözeltinin absorpladığı karbon dioksit molce hesaplanmıştır. Molce karbondioksitin zamana karşı değişim grafiği Şekil 3.9'da verilmiştir. Çözelti absorpsiyon kapasitesi ve başlangıç absorpsiyon hızı bu grafikler kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 9.Kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltisi için karbondioksit yükleme grafiği

Şekil 3.9’da gözlemlenebildiği gibi çözelti tazeyken karbon dioksit hızlı bir şekilde absorplanmış ancak zamanla reaktantın (DBN) derişimi azaldığı için soğurulan CO₂ miktarı dengeye ulaşmıştır. Denge anına kadarki grafiğin altında kalan alan hesaplanarak CO₂ yükleme miktarı hesaplanmıştır. Grafiğin seyrine bakıldığında başlangıçta grafiğin doğrusal olmasından dolayı başlangıçta belli bir süre zarfında çözeltinin soğurma hızının aynı olduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrusal bölgenin eğimi alınarak karbondioksit yükleme hızı hesaplanmaktadır. Bu yükleme hızı (mol/s) bilinen reaktör kesit alanına bölünüp ve absorpsiyon başlangıç hızı (mol/m².s) hesaplanmaktadır. Eğimi hesaplamak için farklı deneylerin grafikleri çizilerek incelenmiş ve doğrusal eğim çizgisinin elde edilen verileri genellikle 3,5 dakikadan sonra kestiği tespit edilmiştir. Bu sebeple grafiklerin doğrusal olduğu ilk 3,5 dakika dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Eğim değerini daha net görebilmek için absorplanan karbon dioksit miktarları 1000 ile çarpılmıştır. Örnek eğim hesabı Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3. 10.Şekil 3.9’daki CO₂ yükleme grafiğinin eğiminin bulunması

3.2.2. Ultrasonik Banyo Teknik Özellikleri

Desorpsiyon işleminde performansın artması için BANDELIN marka SONOREX DIGIPLUS modeli ultrasonik su banyosu kullanılmıştır. Ultrasonik banyonun görünümü Şekil 3.11’deki gibidir.



Şekil 3. 11.Bandelin marka ultrasonik su banyosu

Ultrasonik su banyosunun teknik özellikleri:

- % 20 ile % 100 arasında güç kontrolü yapılabilmektedir.
- 20 ° C 'den 80 °C'ye kadar ısıtma, termostatik olarak ayarlanabilmektedir.
- İstenilen sıcaklıkta sabit çalışabilmek için ultrasonik dalgaların verilmesi el ile ayarlanabilmektedir.
- Geri sayım veya sürekli işlem için zamanlayıcı vardır. Bu sayede istenilen zaman aralıklarında ultrasonik dalga verilebilmiştir.
- Güvenli dozaj için dolun seviyesinin işareti bulunmaktadır.
- Deney sonrasında suyu tahliye edebilmek için bir adet tahliye vanası bulunmaktadır.

Desorpsiyon boyunca cihazın en sık aralıklarla yapabildiği bir dakikada bir ultrasonik dalgalar verilmiştir. Ultrasonik su banyosunun da daha az enerji ile verim sağlanıp sağlanmadığını ölçebilmek için üç farklı verimde çalışılmıştır. Parametre olarak hem banyonun güç ayarı hem de sıcaklık değiştirilmiştir. %60, %80 ve %100 güç ayarlarında ve 60° C, 70° C ve 80° C sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri seçilirken literatür bölümünde de bahsedildiği gibi 100°C'nin altında çalışabilmek ilk amaç olmakla beraber ultrasonik banyonun teknik özelliklerinde de belirtilen ısınabileceği maksimum sıcaklık 80°C olduğu için çalışılacak en yüksek sıcaklık olarak 80°C seçilmiştir. Ardından belirli aralıklar ile gözlem yapabilmek amacıyla 10'ar derece düşürülerek sıcaklığın desorpsiyona etkisi gözlemlenmiştir. Çalışılacak güç seçilirken de ultrasonik banyonun maksimum çalışabileceği en yüksek 3

güç seçilmiştir. Ultrasonik banyonun güç aralıkları 20'şer olarak değiştiği için %60, %80 ve %100 değerleri ile çalışılmıştır.

3.3. Yapılan Diğer Analizler

3.3.1. Fourier Infrared Transform Spektroskopisi (FTIR) Analizleri

Yukarıda anlatılan hesaplamaların dışında hazırlanan çözeltilerin tekrarlanabilirliğini gözlemlemek amacıyla FT-IR analizleri yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle çözelti hazırlandığında herhangi bir işlem görmemişken ve absorpsiyon ve desorpsiyon sonralarında analiz için numune alınmıştır.

Alınan bu numunelerin analizleri Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Thermo Scientific marka NICOLET 6700 model FT-IR cihazıyla yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda karakteristik C=O bağının parmak izleri 1500-1600 dalga boyunda olduğu belirlenmiştir. Taze çözelti ile karşılaştırıldığında absorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri sonucunda bahsedilen dalga boylarında piklerde değişiklikler gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen analizlere dair FT-IR sonuçları sonuçlar kısmında bir örnek üzerinden incelenip diğerleri Ek-2 kısmında sunulmuştur.

3.3.2. Termal Gravimetrik Analizler

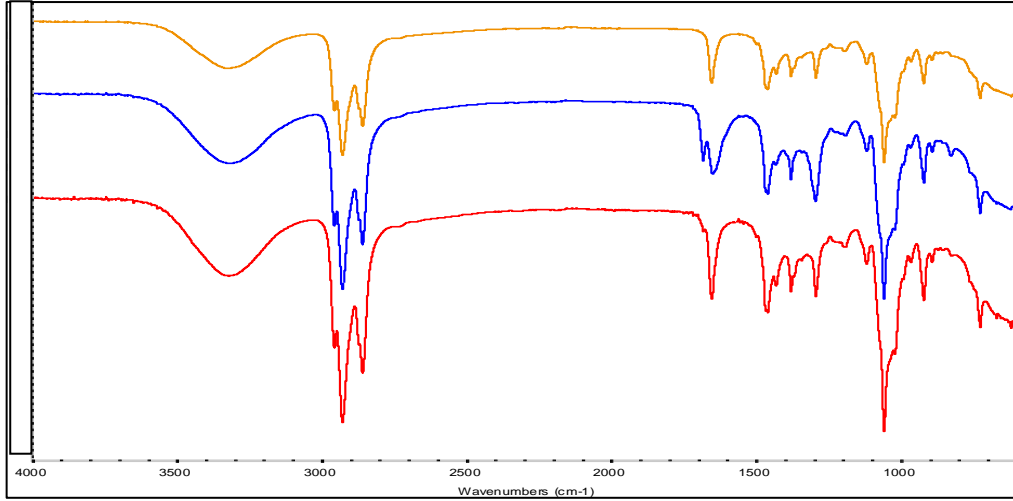
Bu yöntem genellikle örneklerde sıcaklık veya zamanla birlikte oluşan kütle kaybı veya kazanımlarını belirlemek için kullanılır [19]. Bu tez kapsamında hazırlanan organik karbondioksit tutucu çözeltilerin doğru desorpsiyon sıcaklıklarında çalışıldığı tespiti yapılabilmesi için "Termal Gravimetrik Analiz(TGA)" yöntemi kullanılmıştır. Yine Kimya Mühendisliği Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan SII marka TG/DTA 6300 modeli TGA cihazı kullanılarak taze çözelti, CO₂ absorplamış ve desorplamış çözeltilerin kütle kayıpları kıyaslanarak çalışılan desorpsiyon sıcaklıklarının uygunluğu bulunmaya çalışılmıştır. Bu analizler CO₂ içeren ve içermeyen çözeltiler, azot gazı ortamında 10°C/dk. ısıtma hızında 300 °C sıcaklığa kadar çıkarak gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

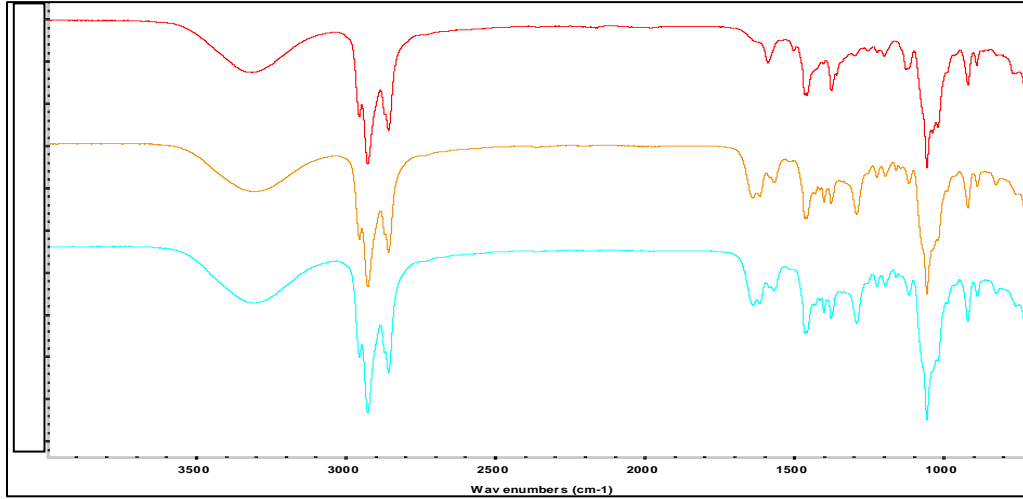
Bu tez çalışması kapsamında metotlar bölümünde anlatıldığı gibi DBN, TBD ve BTMG bazlı hazırlanan çözeltilerin absorpsiyon ve desorpsiyonun gerçekleştirildiği gaz-sıvı temas sisteminde elde edilen verilerle CO₂ absorpsiyon kapasiteleri ve başlangıç absorpsiyon hızları hesaplanmıştır. FT-IR çekimleri ile çözeltilerin tekrarlanabilirlikleri ve performans kayıplarının olup olmadığı tartışılmıştır.

4.1. FT-IR Analizi Sonuçları

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi çözeltilerin tekrarlanabilirliğini ölçmek için çözelti ilk defa hazırlandığında, absorpsiyon sonrasında ve desorpsiyon sonrasında numuneleri alınarak FT-IR analizleri yapılmıştır. Hazırlanan çözeltilerden DBN bazlı olan çözeltilerin tekrarlanabilirliğe uygun olduğu gözlemlenirken TBD ve BTMG bazlı çözeltilerin tekrarlanabilirlik olarak çok iyi bir performans göstermediği gözlemlenmiştir. 1500-1600 dalga boyundaki piklerin absorpsiyon ve desorpsiyon işlemlerinden sonra farklı karakterler gösterdiği ve piklerin DBN bazlı çözeltilerde belirgin bir şekilde çözelti absorpsiyon yaptıktan sonraki değişiminin desorpsiyon yaptıktan sonraki durumda taze çözelti görünümüne çok yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bahsedilen bu sonuçlara ait örnek deney çıktıları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 1.(Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol ultrasonik banyo verimi %100, 80°C sıcaklıkta desorpsiyon) Yukardan aşağıya sırayla: Saf çözelti, 1. Absorpsiyon, 1.Desorpsiyon sonrası FT-IR sonuçları



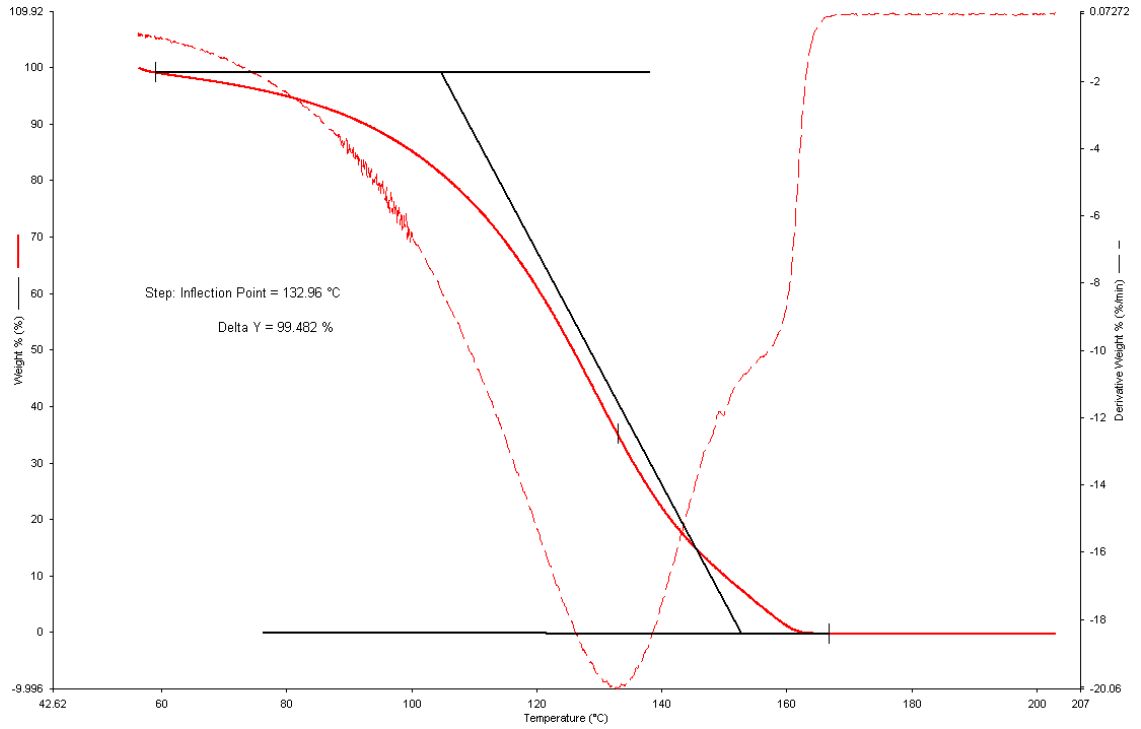
Şekil 4. 2.(Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol ultrasonik banyo verimi %80, 80°C sıcaklıkta desorpsiyon) Yukardan aşağıya sırayla: Saf çözelti, 1. Absorpsiyon, 1.Desorpsiyon sonrası FT-IR sonuçları

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi DBN bazlı çözeltinin aksine saf çözülden sonra CO₂ yüklenmiş çözelti FT-IR çıktısında değişiklik gözlemlemeyi beklediğimiz dalga boyunda bir değişiklik gözlemlenmiş ancak desorpsiyon sonrası saf çözüleğe yaklaşma konusunda çok iyi bir sonuç alınmamıştır. Buradan tekrarlanabilirlik açısından BTMG’nin çok da uygun bir organik baz olmadığı sonucuna varabiliriz.

Diğer FT-IR sonuçları Ek-2’de verilmiştir.

4.2. Termal Gravimetrik Analiz Sonuçları

DeneySEL çalışmalar bölümünde bahsedildiği gibi çözeltilerin TGA analizi yapılarak bozunma sıcaklıklarına bakılmıştır. Böylece absorpsiyon ve desorpsiyonda uygulanan sıcaklıkların uygun olup olmadığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre desorpsiyon prosesinde uygulanan 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıkların çözeltilerin bozunma sıcaklığından düşük olduğu ve bu sıcaklıkların uygulanabilir olduğu kararına varılmıştır. Örnek TGA çıktısı aşağıda verilmiştir.



Şekil 4. 3.Kütlice %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisi 1. Desorpsiyon sonrası TGA analizi (bozunma sıcaklığı 132,96°C)

Diğer çözeltiler ile ilgili TGA grafikleri Ek-3 bölümünde verilmiştir.

4.3. Gaz-Sıvı Temas Reaktörü Deney Sonuçları

Tez çalışması boyunca yapılan deneyler için 30 ml toplam hacimde kütlice %10'luk organik baz içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Absorpsiyon işlemi 30 °C ve 1 barg'da gerçekleştirildi. Absorpsiyon sonrasında yapılan TGA analizleri sonucunda karar verilen uygun desorpsiyon sıcaklıklarında 0,1 barg azot basıncı altında desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca akış hızı ve sıcaklıktaki değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler boyunca kütle transfer hızını artırmak için sistemin en yüksek karıştırma hızı 500 rpm'de karıştırma yapılmıştır. Bu sebeple hesaplamalar yapılırken çözeltinin çok iyi karıştığı varsayılmıştır.

4.3.1. DBN-Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi

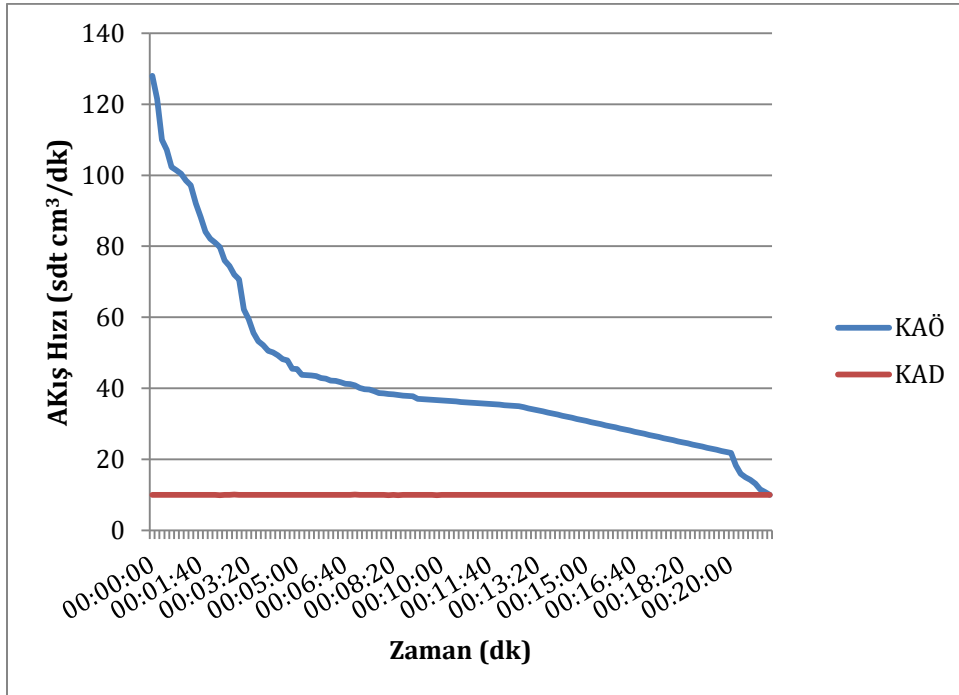
Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi bu tez çalışmasında kullanılan farklı organik bazların dışında 3 farklı alkolün de karbondioksit yakalama performansına etkileri araştırmak amacıyla 1-Hekzanol, 1-Propanol ve 1-Bütanol kullanarak çözeltiler hazırlanmıştır. Toplam 30 ml hacme sahip 3 farklı alkol ile DBN bazlı çözeltiler oluşturulmuş ve gerekli analizleri yapılmıştır.

4.3.1.1. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltilisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

DeneySEL çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi çalışılmak istenen kombinasyonlarda çözeltiler hazırlanarak aynı koşullarda (1 barg, 30°C) absorpsiyon daha sonrasında ultrasonik banyo %100, %80 ve %60 güçte çalıştırılarak 80°C’de ve %100 güçte çalıştırarak 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıkta desorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde farklı güçlerdeki desorpsiyonlar ayrı başlıklarda incelenmiş, farklı sıcaklıklardaki desorpsiyonlar ise aynı başlık altında incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

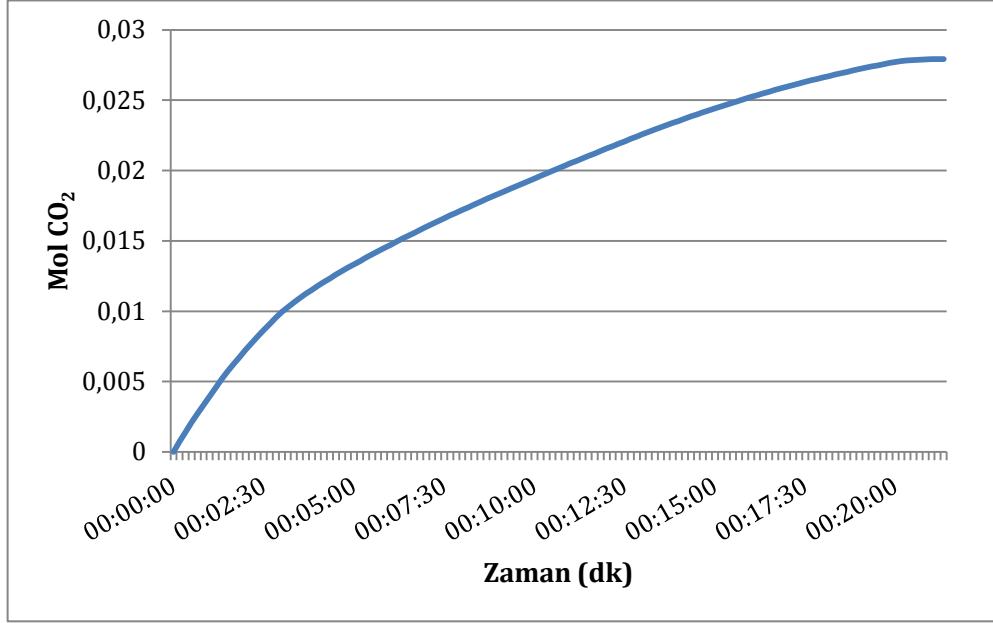
Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltilisinin Absorpsiyon ve %100 güç 80°C için Desorpsiyon Performansı İncelenmesi

DBN 1- Hekzanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek için 30 ml hacimli 0,02 mol DBN içeren kütlece %10 DBN 1 Hekzanol çözeltilisinin 30 °C sıcaklık ve 1 barg basınçta CO₂ absorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney reaktöre giren ve çıkan standart gaz akış hızları birbirine eşitlenene kadar sürdürülmüştür. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltilisinin 1. Absorpsiyon işlemi için CO₂ gazının akış hızının zamana karşı grafiği Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



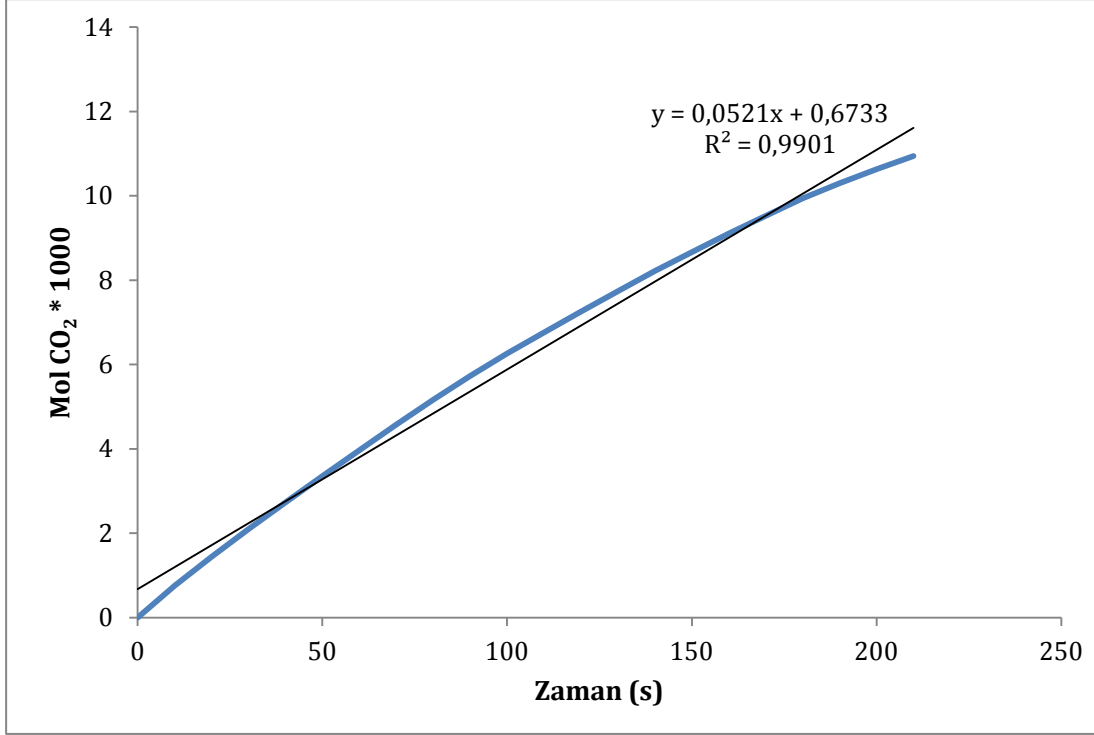
Şekil 4. 4.%10 DBN 1-Hekzanol çözeltilisinin 1. Absorpsiyon işlemi için CO₂ gazının akış hızının zamana karşı grafiği

Grafikte (Şekil 4.4) görüldüğü gibi başlangıçta reaktöre yoğun bir gaz girişi olurken zamanla çözelti doygunluğa ulaştıkça gaz girişi yavaşlamış en son da giriş çıkış akışı eşitlenmiştir. Yani çözelti dengeye gelmiştir. Grafikteki KAD ve KAÖ eğrileri arasında kalan alan deney süresinde yakalanan toplam CO₂ miktarını vermektedir. Sayısal integrasyon yöntemi ile bu alan hesaplanarak çözelti tarafından soğurulan CO₂ bulunmuş ve aşağıdaki zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisinin CO₂ yükleme grafiğinden çözelti kapasitesi 0,0287 mol CO₂ olduğu hesaplanmıştır. Grafikte gözlemlenebildiği gibi deneyin ilerleyen dakikalarında CO₂ miktarı maksimum kapasiteye ulaştıktan sonra absorpsiyonu zamanla yavaşlamıştır. Bunun nedeni çözeltinin karbon dioksit doymasıdır. Bu sebeple çözelti doygunluk noktasına yaklaştıkça absorpsiyon yavaşlamıştır. Çözeltinin başlangıç absorpsiyon hızı yükleme grafiğinin eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Başlangıç absorpsiyon hızlarının diğer çözeltilerle de kıyaslanabilmesi için genellikle grafiğin doğrusal devam ettiği ilk 210 saniyelik kısmın eğimi alınmıştır. Bahsedilen bu eğim grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltilisinin Başlangıç absorpsiyon Hızının Hesaplanması

Grafiğin (Şekil 4.6) eğim değeri olan $0,0521 \times 10^{-3}$ mol/s değeri karbondioksitin yükleme hızını vermektedir. Bu değer gerekli birim değişiklikleri yapıldığında ve reaktör kesit alanına bölüldüğünde başlangıç hızı değeri $3,49 \times 10^{-5}$ olarak hesaplanmıştır.

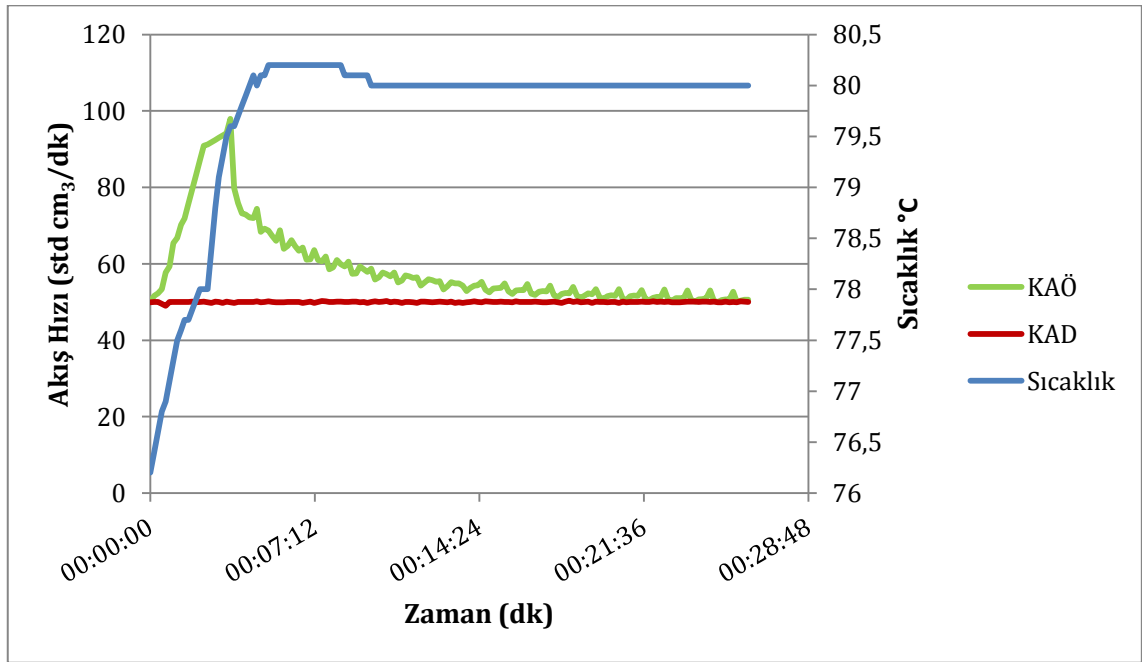
Çizelge 4. 1.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltilisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

DBN 1 Hekzanol 80°C %100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı (kmol/m ² .s) x10 ⁻⁵
1. Absorpsiyon	0,0287	2,27
2. Absorpsiyon	0,0270	2,56
3. Absorpsiyon	0,0208	2,20
4. Absorpsiyon	0,0181	2,10
5. Absorpsiyon	0,0159	1,89

Çizelge 4.1'de gözlemlendiği gibi 1. Absorpsiyon ile 5. Absorpsiyon arasında karbonsioksit emiliminde bir düşüş gözlemlense de çok fazla bir performans kaybı görülmediğinden çözeltinin tekrarlanabilirliği uygun görünmektedir. Tekrar sayısı

arttıkça kapasite ve başlangıç absorpsiyon hızı düşme sebebi ilk absorpsiyonda tutulan karbondioksitin desorpsiyon sırasında yeterince salınmamış olması olabilir.

Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisinin tekrarlanabilirliği için 30 °C sıcaklıkta absorpsiyon işlemi gerçekleştikten sonra 80 °C sıcaklık ve 0,1 barg basınçlı azot ortamında desorpsiyon işlemi uygulanmıştır. Reaktörün giriş ve çıkış azot gazı hızlarının eşitlendiği 50 standart cm³/dk değerine kadar deney sürdürülmüştür. Bu işlemler 5 kez tekrarlanmıştır. Şekil 4.7'de kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisinin azot gazı akış hızının zamana karşı değişim grafiği çizilmiştir. Gerçekleştirilen 5 desorpsiyon için çözelti kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri ise Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 7.%10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Grafiği

Grafikten görüldüğü gibi azot gazı verilmeye başlandığı andan itibaren sıcaklığın artması ve ultrasonik banyonun da çalıştırılmasıyla hızlı bir desorpsiyon işlemi başlamıştır. Çözeltideki CO₂ oranı azaldıkça desorpsiyon yavaşlamıştır ve ardından dengeye ulaşmıştır.

Çizelge 4. 2. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 80°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,0130	00:26:50
2. Desorpsiyon	0,0105	00:24:00
3. Desorpsiyon	0,0100	00:22:50
4. Desorpsiyon	0,0111	00:35:50
5. Desorpsiyon	0,0117	00:26:10

Daha önceki çalışmalarda daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan desorpsiyona göre kıyaslandığında desorpsiyon sürelerinin azalmış olduğu gözlemlenmiştir [15].

Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve %80 güç 80°C için Desorpsiyon Performansı İncelenmesi

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi yine 30 ml hacimli 0,02 mol DBN kullanarak hazırlanmış çözelti 1 barg ve 30°C sıcaklıkta CO₂ absorpsiyonu yapması sağlanmıştır. Sonrasında ultrasonik banyonun %80 güç ile 80°C'de çalışarak desorpsiyon yapması sağlanmıştır. Desorpsiyon işlemleri ile ilgili bilgiler Çizelge 4.3'deki gibidir.

Çizelge 4. 3. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %80 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 80°C %80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,01209	00:38:50
2. Desorpsiyon	0,0134	00:36:30
3. Desorpsiyon	0,00871	00:26:00
4. Desorpsiyon	0,00734	00:26:40
5. Desorpsiyon	0,0101	00:28:20

Çizelgeye bakıldığında ultrasonik banyonun gücü %80 de çalıştırıldığı için %100 güç ile çalıştırılmasına göre kapasitede küçük bir düşüş ve desorpsiyon sürelerinde az da olsa artış gözlemlenmiştir.

Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve %60 güç 80°C için Desorpsiyon Performansı İncelenmesi

Diğer iki çözeltide olduğu gibi aynı şekilde hazırlanan çözelti ile yine aynı koşullarda absorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiş ve ultrasonik banyo %60 güçte çalıştırılarak yine 80°C'de desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Absorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri ardışık olarak 5'er kez tekrarlanmıştır.

Çizelge 4. 4. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %60 güç 80°C'de gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 80°C %60		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,011	00:51:50
2. Desorpsiyon	0,0116	00:35:00
3. Desorpsiyon	0,0103	00:27:40
4. Desorpsiyon	0,00842	00:26:40
5. Desorpsiyon	0,0058	00:24:20

Ultrasonik banyo gücü %60'a düşürüldüğünde %80 ve %100 güç ile çalıştığına oranla karşılaştırıldığında desorpsiyon kapasitesinde düşüş ve sürelerde uzama tespit edilmiştir. Kendi içinde 1. desorpsiyon ve 5. desorpsiyon arasındaki süre kısalmasının sebebi ise çözeltinin her tekrarda performansı düştüğü için azalan CO₂ desorpsiyon kapasitesi ile birlikte sürenin de kısaldığı tahmin edilmektedir.

Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve %100 güç 60°C, 70°C ve 80°C için Desorpsiyon Performansı İncelenmesi

Ultrasonik desorpsiyon performansına sıcaklık etkisini incelemek deneysel çalışmalar bölümünde de anlatıldığı gibi 3 farklı sıcaklıkta (60°C, 70°C, 80°C) deneyler tekrarlandı. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilerle hazırlanan desorpsiyon kapasitesi ve sürelerini özetleyen çizelgeler aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 60°C'de gerçekleşen

1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 60°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00769	00:38:10
2. Desorpsiyon	0,00285	00:51:00
3. Desorpsiyon	0,00638	00:25:40
4. Desorpsiyon	0,00657	00:30:00
5. Desorpsiyon	0,00643	00:35:10

Çizelge 4. 6.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 70°C'de gerçekleşen

1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 70°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,0096	00:28:20
2. Desorpsiyon	0,00838	00:31:50
3. Desorpsiyon	0,00874	00:21:30
4. Desorpsiyon	0,0064	00:29:20
5. Desorpsiyon	0,00693	00:26:50

Çizelge 4. 7. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Çözeltisinin %100 güç 80°C'de

gerçekleşen 1. Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

DBN 1 Hekzanol 80°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,0130	00:26:50
2. Desorpsiyon	0,0105	00:24:00
3. Desorpsiyon	0,0100	00:22:50
4. Desorpsiyon	0,0111	00:35:50
5. Desorpsiyon	0,0117	00:26:10

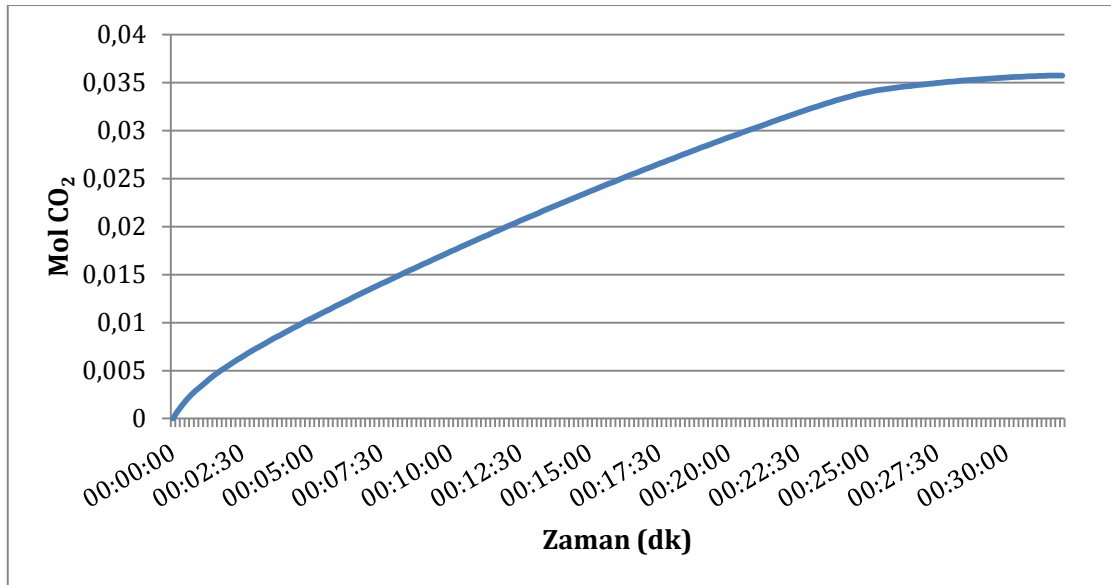
Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'ye bakıldığında sabit ultrason gücü uygulandığı koşullar altında (%100), sıcaklık artışının desorpsiyon kapasitesini arttırdığı ve daha kısa sürede desorpsiyon işleminin tamamlandığı görülmüştür. 60°C sıcaklıkta daha önce desorpsiyon gerçekleşemezken ultrason destekli proses ile desorpsiyonun gerçekleşebildiği göstergesi önemli bir çıktı olmuştur [7].

4.3.1.2. Kütlece %10 DBN 1-Propanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

Bir önceki çözeltilde olduğu gibi kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltisi de aynı koşullarda (1 barg, 30°C) absorpsiyon daha sonrasında ultrasonik banyo %100, %80 ve %60 güçte çalıştırılarak 80°C’de ve %100 güçte çalıştırarak 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıkta desorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde ayrıntılı incelendiği ve bu sistemde de benzer sonuçlar çıktığı için farklı güçlerdeki ve farklı sıcaklıklardaki desorpsiyonlar ise aynı başlık altında incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Kütlece %10 DBN 1-Propanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve %100, %80 ve %60 güç 80°C için Desorpsiyon Performansı İncelenmesi

DBN 1- Propanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek amacıyla 0,0199 mol DBN kullanılarak hazırlanan 30 ml’lik çözelti ile 30°C sıcaklık ve 1 barg’da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 8. Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sisteminde 30°C 1 barg’da CO₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltisinin karbondioksit yükleme grafiğinden çözelti kapasitesi 0,03890 mol CO₂ olduğu hesaplanmıştır. Grafikte gözlemlenebildiği gibi deneyin ilerleyen dakikalarında CO₂ miktarı maksimum

kapasiteye ulaştıktan sonra absorpsiyonu zamanla yavaşlamıştır. Bunun nedeni çözeltilinin karbon dioksit doymasıdır. Bu sebeple çözeltili doygunluk noktasına yaklaştıkça absorpsiyon yavaşlamıştır.

Kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltilisinin tekrarlanabilirliğini gözlemlemek için işlemler 5'kez gerçekleştirilmiş, sonucunda da çözeltili kapasiteleri ve başlangıç absorpsiyon hızları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8.%10 DBN 1-Propanol Çözeltilisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

10 DBN- 1 PROPANOL - 80°C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s) x10 ⁻⁵
1. Absorpsiyon	0,0389	1,79
2. Absorpsiyon	0,0376	1,66
3. Absorpsiyon	0,0365	1,59
4. Absorpsiyon	0,0248	1,40
5. Absorpsiyon	0,0223	1,35

Tabloda (4.8) görülebileceği gibi gerçekleştirilen absorpsiyon işlemlerinden sonra her seferinde kapasite ve başlangıç absorpsiyon hızlarında düşüş görülmektedir. Bunun sebebi daha önceki sonuçlarda da belirtildiği gibi absorpsiyon işlemi sonrası gerçekleştirilen desorpsiyonun tam işlevini gerçekleştirememesinden ve karbon dioksiti çözeltilide yeterince iyi uzaklaştıramamasından dolayı çözeltili yeniden aynı oranda CO₂ absorplayamadığı tahmin edilmektedir.

Aynı şartlarda gerçekleştirilen absorpsiyon işlemlerinden sonra 80°C sıcaklık ve ultrasonik su banyosunun %100, %80 ve %60 güçte çalıştırılarak gerçekleştirilen desorpsiyon işlemlerine ait kapasite ve desorpsiyon sürelerinin özetlendiği çizelgeler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4. 9.%10 DBN 1-Propanol Çözeltilisinin %100 güç 80°C de Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

10 DBN- 1 Propanol- 80°C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00914	00:27:50
2. Desorpsiyon	0,00862	00:29:30
3. Desorpsiyon	0,00939	00:25:20
4. Desorpsiyon	0,00653	00:27:20
5. Desorpsiyon	0,00649	00:24:30

Aynı güçte ve sıcaklıkta desorpsiyona uğramış kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisine göre desorpsiyon süreleri kısalmış gibi görünse de absorplanan karbon dioksit miktarına göre desorpsiyon miktarı da azalmıştır. Sürelerin daha kısa görünme sebebinin bu olduğu tahmin edilmektedir. 5 desorpsiyon kendi içinde değerlendirildiğinde ise bir önceki bölümde bahsedildiği gibi desorpsiyonun karbondioksiti tamamen çözüldüğüden uzaklaştırılmamış olması olabilir.

Çizelge 4. 10.%10 DBN 1-Propanol Çözeltisinin %80 güç 80°C de Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

10 DBN- 1 Propanol- 80°C-%80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00905	00:33:50
2. Desorpsiyon	0,00848	00:29:00
3. Desorpsiyon	0,00830	00:30:20
4. Desorpsiyon	0,00750	00:22:50
5. Desorpsiyon	0,00700	00:27:00

Çizelge 4.10'daki veriler incelendiğinde Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisinde de gözlemlendiği gibi 80°C sıcaklık ve %100 güç ile çalıştığına göre desorpsiyon kapasitelerinde düşüş gözlemlenmiştir.

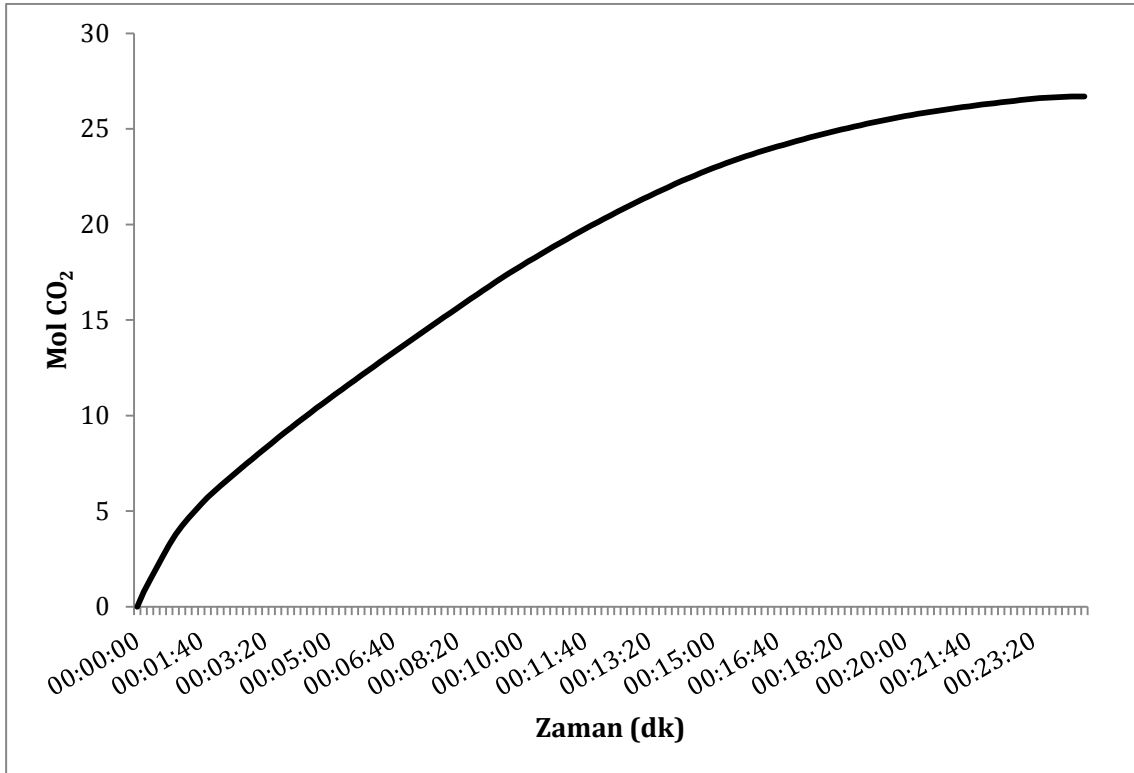
Çizelge 4. 11.%10 DBN 1-Propanol Çözeltisinin %60 güç 80°C de Desorpsiyon Kapasiteleri ve Süreleri

10 DBN- 1 Propanol- 80°C-%60		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00892	00:28:00
2. Desorpsiyon	0,00766	00:25:00
3. Desorpsiyon	0,00682	00:25:00
4. Desorpsiyon	0,00538	00:25:10
5. Desorpsiyon	0,00530	00:26:00

Çizelge 4.11 verilerine göre desorpsiyon kapasitesinin düşmesi ile birlikte süreler de kısalmıştır. Su banyosunun %100 güç ile çalıştırıldığındaki kadar, çözeltinin karbon dioksiti desorplayamamasının performans kaybı gerçekleştiğine bunun da sürenin kısalmasına sebep olduğu tahmin edilmektedir.

4.3.1.3. Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

DBN 1- Bütanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek amacıyla 30 ml hacme sahip 0,199 mol DBN, kullanılarak hazırlanan çözelti ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve Şekil 4.9'da gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 9.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol çözeltisinin zaman karşı mol grafiği (1. Absorpsiyon)

Çizelge 4. 12.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin 1. Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

10 DBN- 1 BUTANOL- 80°C -%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s) x10 ⁻⁵
1. Absorpsiyon	0,0275	1,68
2. Absorpsiyon	0,0267	1,62
3. Absorpsiyon	0,0248	1,62
4. Absorpsiyon	0,0242	1,60
5. Absorpsiyon	0,0236	1,59

Çizelge 4.12'ye bakıldığında absorpsiyon-desorpsiyon döngüsü tekrarlandıkça absorpsiyon kapasitelerinde ve başlangıç absorpsiyon hızı düşmüştür. Kütlece %10 DBN 1-Propanol çözeltisine göre çözelti kapasitesi daha düşük çıkmıştır. Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisine göre de az da olsa daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Diğer çözeltilerde olduğu gibi her absorpsiyon işleminden sonra üç farklı güçte (%60, %80, %100) ve 3 farklı sıcaklıkta (60°C, 70°C, 80°C) desorpsiyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara ilişkin çizelgeler (4.13-17) aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4. 13.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 80°C için)

10 DBN- 1 BUTANOL- 80°C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00967	00:29:00
2. Desorpsiyon	0,00817	00:27:20
3. Desorpsiyon	0,00881	00:26:10
4. Desorpsiyon	0,00762	00:27:10
5. Desorpsiyon	0,00608	00:32:00

Çizelge 4. 14.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%80 güç ve 80°C için)

10 DBN- 1 BUTANOL- 80°C-%80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00770	00:27:10
2. Desorpsiyon	0,00760	00:27:00
3. Desorpsiyon	0,00984	00:30:00
4. Desorpsiyon	0,00851	00:26:10
5. Desorpsiyon	0,00969	00:30:00

Çizelge 4. 15.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%60 güç ve 80°C için)

10 DBN- 1 BUTANOL- 80°C-%60		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi
1. Desorpsiyon	0,00716	00:27:30
2. Desorpsiyon	0,00925	00:24:00
3. Desorpsiyon	0,00725	00:25:30
4. Desorpsiyon	0,00749	00:25:10
5. Desorpsiyon	0,00747	00:24:40

DBN bazlı diğer çözeltilerde de gözlemlendiği gibi Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15’de verilen desorpsiyon kapasiteleri ultrasonik banyo gücü düştükçe azalırken desorpsiyon sürelerinde de bir artma meydana gelmiştir. Gücün değişiminin desorpsiyon kapasitesinden çok süreye daha fazla etki ettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. 16.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 70°C için)

10 DBN- 1 BUTANOL- 70°C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi
1. Desorpsiyon	0,00749	00:27:40
2. Desorpsiyon	0,00686	00:25:00
3. Desorpsiyon	0,00836	00:28:40
4. Desorpsiyon	0,00882	00:28:40
5. Desorpsiyon	0,00864	00:30:30

Çizelge 4. 17.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Çözeltisinin Desorpsiyon Kapasiteleri ve Desorpsiyon Süreleri (%100 güç ve 60°C için)

10 DBN- 1 BUTANOL- 60°C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi
1. Desorpsiyon	0,00649	00:29:00
2. Desorpsiyon	0,00395	00:29:10
3. Desorpsiyon	0,00834	00:26:50
4. Desorpsiyon	0,00699	00:26:30
5. Desorpsiyon	0,00640	00:29:40

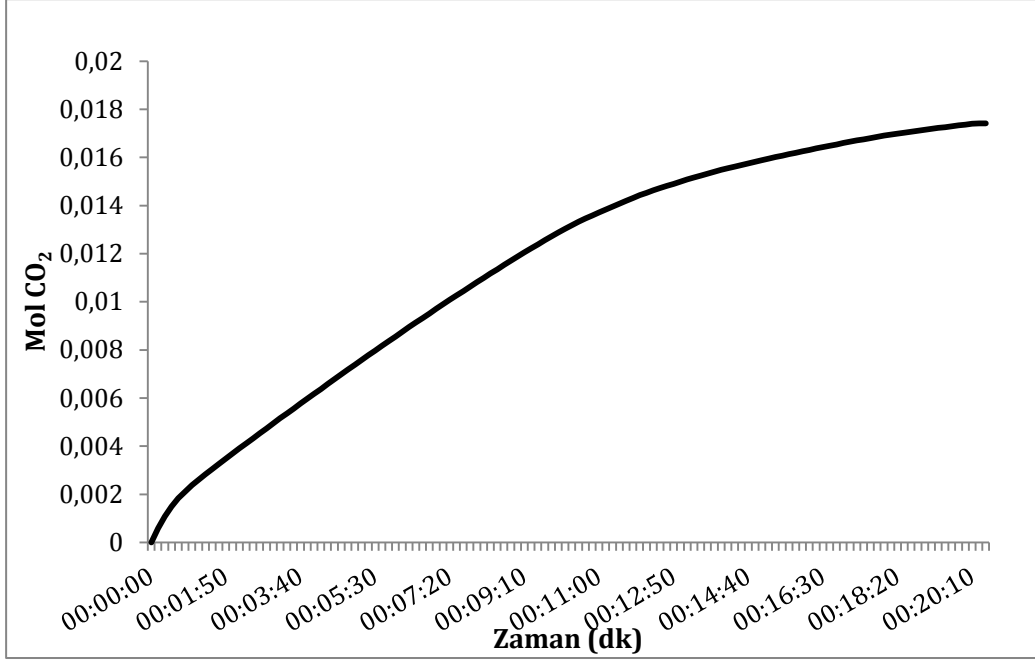
DBN bazlı tüm sistemlere bakıldığında sıcaklığın desorpsiyon kapasitesine daha fazla etki ettiği görülmüştür. Çizelge 4.13, 4.16 ve 4.17 ye bakıldığında 80°C’de yapılan deneye göre 70°C ve 60°C’de desorpsiyon kapasiteleri belirgin derecede düşüş göstermiştir. Buna karşılık desorpsiyon süreleri benzer karakteristik özellik göstermektedir.

4.3.2. TBD-Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi

Bir guanidin türevi olan TBD (1,5,7-Triazabisiklo[4.4.0]dek-5-en) organik bazı ile 3 farklı alkol kullanılarak hazırlanan 30 ml’lik çözeltiler ile TBD’nin bu tez kapsamında incelenen diğer organik bazlara göre absorpsiyon ve desorpsiyon performansları incelenmiştir.

4.3.2.1. Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

TBD 1- Hekzanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek amacıyla 30 ml hacme sahip 0,179 mol TBD, kullanılarak hazırlanan çözelti ile 30°C sıcaklık ve 1 barg’da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve Şekil 4.10’da gösterilen (%100 ve 80°C için) zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 10.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO2 Soğurması
(1. Absorpsiyon)

Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol çözeltisinin başlangıç absorpsiyon hızları hesaplanamayacak kadar küçük çıkmıştır. Bu sebeple Çizelge 4.18'de belirtilmemiştir. Bu durumun nedeni TBD bazının yüksek viskozitede olması ve katı formda olmasından dolayı olduğu tahmin edilmektedir. Hazırlandığında çözeltide iyi çözülmüş olan TBD, CO2 ile temasıyla bikarbonat tuzlarına dönüşmesi ve zamanla jelleşme yaşanması da bir ikinci tahmindir.

Çizelge 4. 18.Kütlece %10 TBD- 1 HEKZANOL - 80°C-%100 Çözeltisinin
Absorpsiyon Kapasiteleri

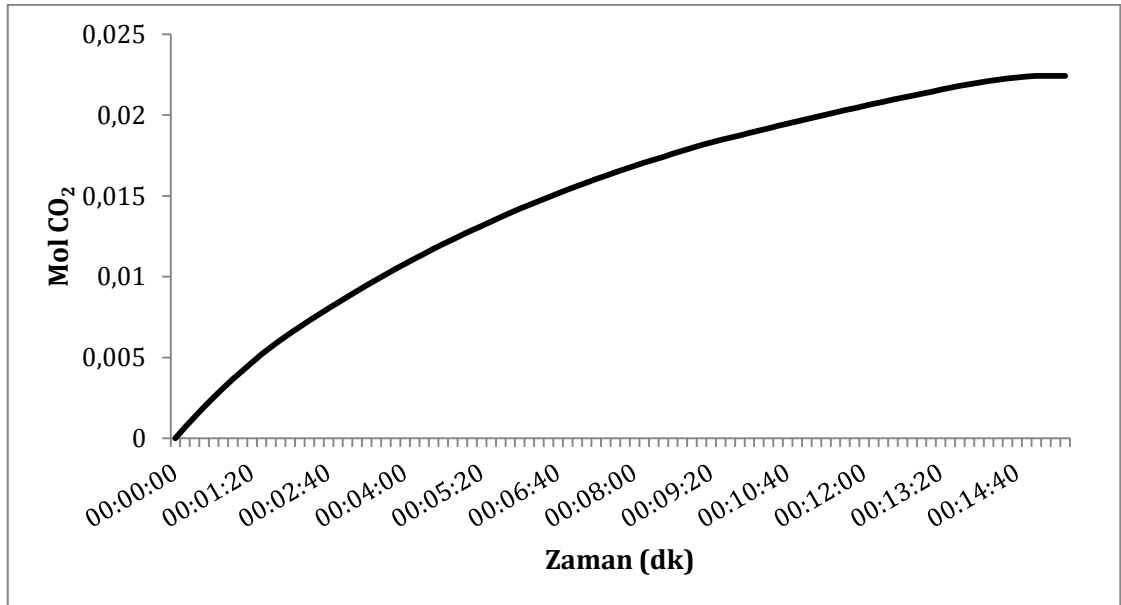
%10 TBD- 1 HEKZANOL - 80°C-%100	
	Absorplanan Mol CO ₂
1. Absorpsiyon	0,01860
2. Absorpsiyon	0,01790
3. Absorpsiyon	0,01640
4. Absorpsiyon	0,01430
5. Absorpsiyon	0,01180

Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol çözeltisi kütlece %10 TBD 1-Hekzanol çözeltisine göre daha iyi çıksa da absorplama kapasitesi olarak çok kötü sonuçlar elde edilmemiştir. Kullanılan TBD mol sayısına göre absorpsiyon miktarları çok az değildir. Ancak başlangıç absorpsiyon hızlarının çok küçük çıkması, TBD bazlı çözeltilerin DBN bazlı hazırlanan çözeltilerden daha iyi olmayabileceği tahmininde bulunmamıza sebep olmuştur.

Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol çözeltisinin farklı ultrasonik banyo güçlerinde ve sıcaklıklarında gerçekleştirilen desorpsiyon deneylerinde DBN bazlı çözeltilerde olduğu gibi çok benzer sonuçlar çıktığı için ilgili çizelgeler EK-1 kısmında verilmiştir.

4.3.2.2. Kütlece %10 TBD 1-Propanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

TBD 1- Propanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek amacıyla 30 ml hacme sahip 0,0178 mol TBD, kullanılarak hazırlanan çözelti ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da karbon dioksit absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda gösterilen zamana karşı mol grafiği (Şekil 4.11) çizilmiştir.



Şekil 4. 11.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO₂ Soğurması
(1. Absorpsiyon)

Şekil 4.11'e baktığımızda kütlece %10 TBD 1- Propanol sisteminin 1. absorpsiyon yükleme kapasitesi 0,0232 mol olarak hesaplandığı görülmüştür. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi Şekil 4.11'deki grafiğin ilk üç buçuk dakikasındaki doğrusal artış bölümünün eğiminden yararlanılarak çözeltinin başlangıç absorpsiyon kapasitesi hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 19.Kütlece %10 TBD- 1 Propanol - 80°C-%100 Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

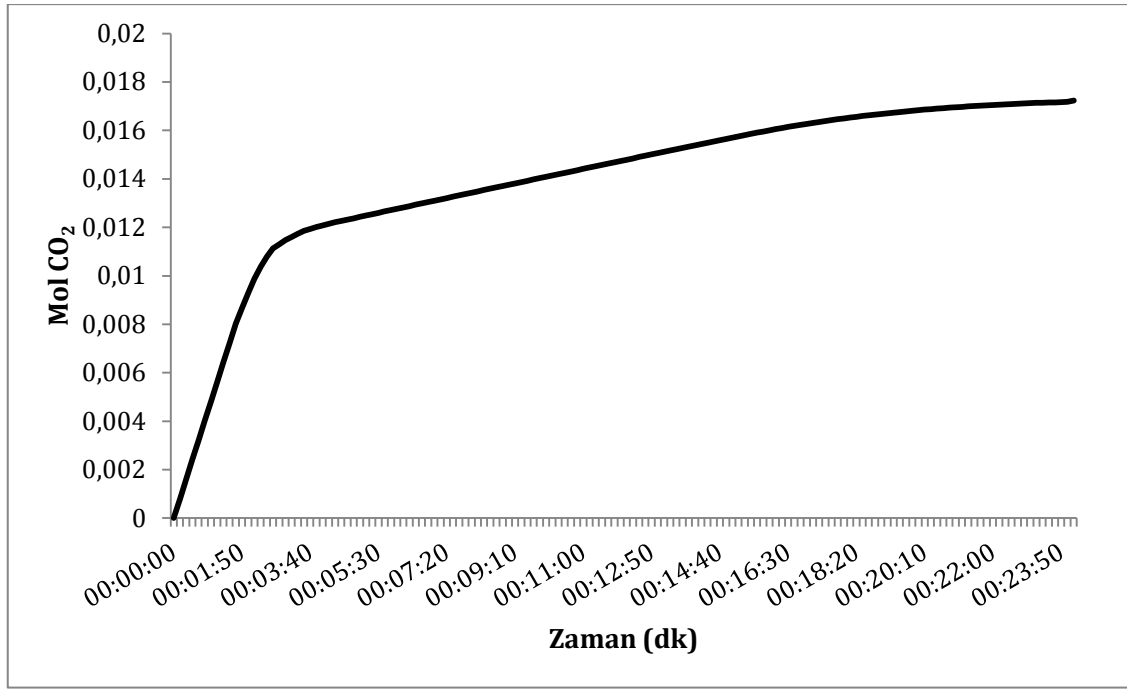
10 TBD- 1 PROPANOL 80 °C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s) x10 ⁻⁵
1. Absorpsiyon	0,0275	1,46
2. Absorpsiyon	0,0267	1,22
3. Absorpsiyon	0,0248	0,045
4. Absorpsiyon	0,0242	-
5. Absorpsiyon	0,0236	-

Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltisinde olduğu gibi 4. ve 5. absorpsiyonun başlangıç absorpsiyon hızları çok küçük olduğu için hesaplanamamıştır. Bu sebeple çizelgede bulunmamaktadır.

Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltisinin farklı ultrasonik banyo güçlerinde (%60, %80, %100) ve sıcaklıklarında (60°C, 70°C, 80°C) gerçekleştirilen desorpsiyon deneylerinde DBN bazlı çözeltilerde olduğu gibi çok benzer sonuçlar çıktığı için ilgili çizelgeler EK'ler kısmında verilmiştir.

4.3.2.3. Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

TBD 1- Bütanol sisteminin absorpsiyon performansını gözlemlemek amacıyla 30 ml hacme sahip 0,0179 mol TBD, kullanılarak hazırlanan çözelti ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 12.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO₂ Soğurması (1. Absorpsiyon)

Şekil 4.12'de görülebileceği gibi kütlece %10 TBD 1-Bütanol çözeltisinin 1 absorpsiyon yükleme kapasitesi 0,0180 mol olarak hesaplanmıştır. 5 absorpsiyon-desorpsiyon sonucunda elde edilen absorpsiyon kapasiteleri ile başlangıç absorpsiyon hızları Çizelge 4.20'de de verilmiştir.

Çizelge 4. 20.Kütlece %10 TBD- 1 Bütanol - 80°C-%100 Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

10 TBD- 1 BUTANOL- 80 °C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s) x10 ⁻⁵
1. Absorpsiyon	0,0180	1,25
2. Absorpsiyon	0,0172	0,050
3. Absorpsiyon	0,0156	0,032
4. Absorpsiyon	0,0149	-
5. Absorpsiyon	0,0132	-

Kütlece %10 TBD 1- -Bütanol çözeltisinde olduğu gibi 4. ve 5. absorpsiyonun başlangıç absorpsiyon hızları çok küçük olduğu için hesaplanamamıştır. Bu sebeple çizelgede bulunmamaktadır.

Kütlece %10 TBD 1--Bütanol çözeltisinin farklı ultrasonik banyo güçlerinde (%60, %80, %100) ve sıcaklıklarında (60°C, 70°C, 80°C) gerçekleştirilen desorpsiyon

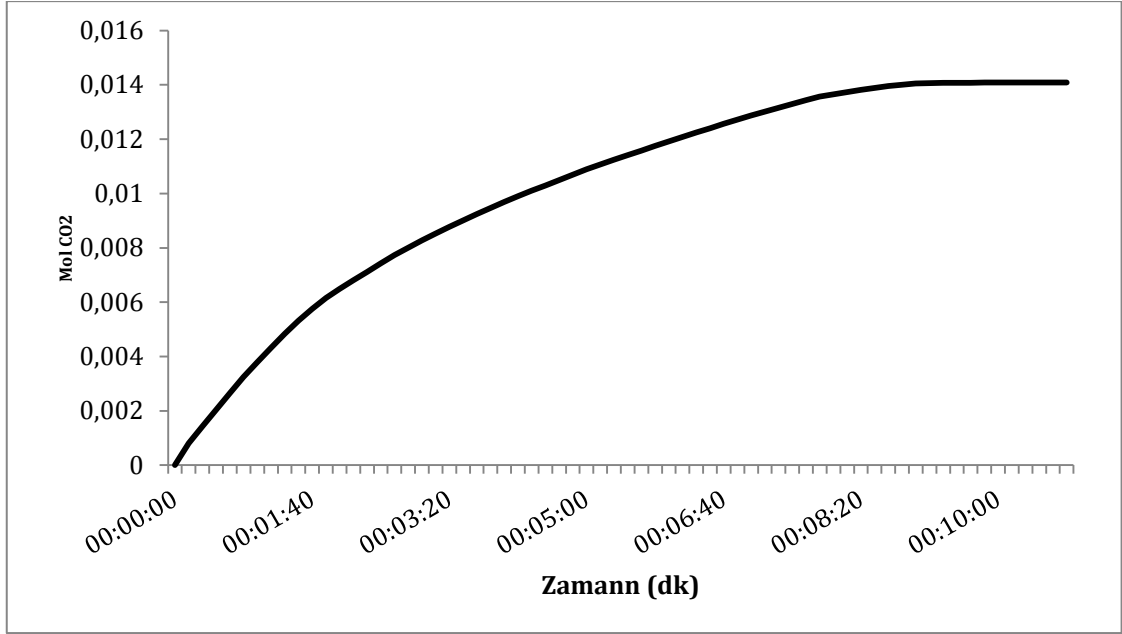
deneylerinde DBN bazlı çözeltilerde olduğu gibi çok benzer sonuçlar çıktığı için ilgili çizelgeler EK'ler kısmında verilmiştir.

4.3.3. BTMG -Alkol Çözeltilerinin Performans Analizi

Bir çok uygulamada geleneksel inorganik bazlara iyi bir alternatif olan BTMG (2-tert-Butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine) organik bazı ile 3 farklı alkol kullanılarak hazırlanan 30 ml'lik çözeltiler ile BTMG'nin bu tez kapsamında incelenen diğer organik bazlara (DBN ve TBD) göre absorpsiyon ve desorpsiyon performansları incelenmiştir. Desorpsiyon parametrelerinin incelendiği ultrasonik banyodaki %60, %80 ve %100 güçlerinde yapılan deneyler ile 60 °C, 70°C ve 80°C sıcaklıkların tamamı için bu deneyler tamamlanamamıştır. Bunun sebebi BTMG kimyasalının çok pahalı olması ve gerekli tüm parametreler için elimizde yeterli miktarda bulunmamasıdır. Ayrıca yapılan deneylerde çok iyi sonuçlar elde edilemediğinden diğer kimyasallarda yapılan ve en iyi sonuç alınan parametreler ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.3.3.1. Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol Çözeltilisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

BTMG 1- Hekzanol sisteminin absorpsiyon performansını incelemek amacıyla 30 ml hacimli 0,0149 mol BTMG kullanılarak hazırlanan KD-TOS çözeltisi ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 13.Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol Sisteminde 30°C 1 barg'da CO₂ Soğurması
(1. Absorpsiyon)

Çizelge 4.13'e göre diğer çözeltilerde gözlemlendiği gibi absorpsiyon işlemi tekrarlandıkça CO₂ yükleme kapasitesinde düşüş görülmektedir. Ancak ilk absorpsiyon sonrası çözelti kapasitesinde ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, ilk absorpsiyondan sonra CO₂'nin çözeltiye kararlı olarak bağlanmış olması ve CO₂ desorpsiyon işlemi sonucunda çözeltilerden tam olarak sıyrılamaması olarak tahmin edilmektedir. Diğer bir ihtimal ise BTMG'nin içinde bulunan az miktarda suyun CO₂ ile tepkimesi sonucu karbamat tuzu oluşmasıdır. Bu tuz normal koşullarda 120°C sıcaklıkta bozunmaktadır. 80°C olarak belirlenen desorpsiyon sıcaklığının bu kararlı karbamatları tam olarak rejenere edemediği düşünülmektedir [7]. Başlangıç absorpsiyon hızı ilk absorpsiyonda çok çok küçük çıktığı için diğer absorpsiyonlar için hesaplanamamıştır.

Çizelge 4. 21.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol - 80°C-%100 Çözeltisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

10 BTMG- 1 HEKZANOL- 80°C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s)
1. Absorpsiyon	0,0149	1,75 x 10 ⁻⁸
2. Absorpsiyon	0,0118	-
3. Absorpsiyon	0,0111	-
4. Absorpsiyon	0,0106	-
5. Absorpsiyon	0,0096	-

Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol çözeltisinin CO₂ absorpsiyon kapasitelerine baktığımızda DBN ve TBD çözeltilerine göre daha düşük olduğunu görmekteyiz. Diğer çözeltilerde olduğu gibi 5. absorpsiyona geldikçe CO₂ yükleme kapasitesi düşmektedir. TBD bazlı çözeltilerde olduğu gibi başlangıç absorpsiyon hızları çok çok küçük çıktığı için hesaplanamamıştır.

Çizelge 4.22 ve 4.23'de %80 ve %100 güçte çalıştırılan ultrasonik su banyosuna göre elde edilen sonuçlar bulunmaktadır.

Çizelge 4. 22.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol çözeltisinin desorpsiyon kapasiteleri ve süreleri (%100 güç ve 80°C sıcaklık)

BTMG 1 Hekzanol 80°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk.)
1. Desorpsiyon	0,00156	00:16:20
2. Desorpsiyon	0,00146	00:17:00
3. Desorpsiyon	0,00068	00:05:50
4. Desorpsiyon	0,00134	00:05:10
5. Desorpsiyon	-	-

1. Desorpsiyondan 4. desorpsiyona kadar desorpsiyon sürelerinin ani düşüşü ve çok kısılması sebebiyle verilerinde bekleneni verememesinden dolayı 5. tekrar yapılamamıştır. BTMG çok pahalı bir kimyasal ve yeterince elimizde bulunmamasından dolayı daha çeşitli deney yapabilmek için bu deney tekrarlanmamıştır.

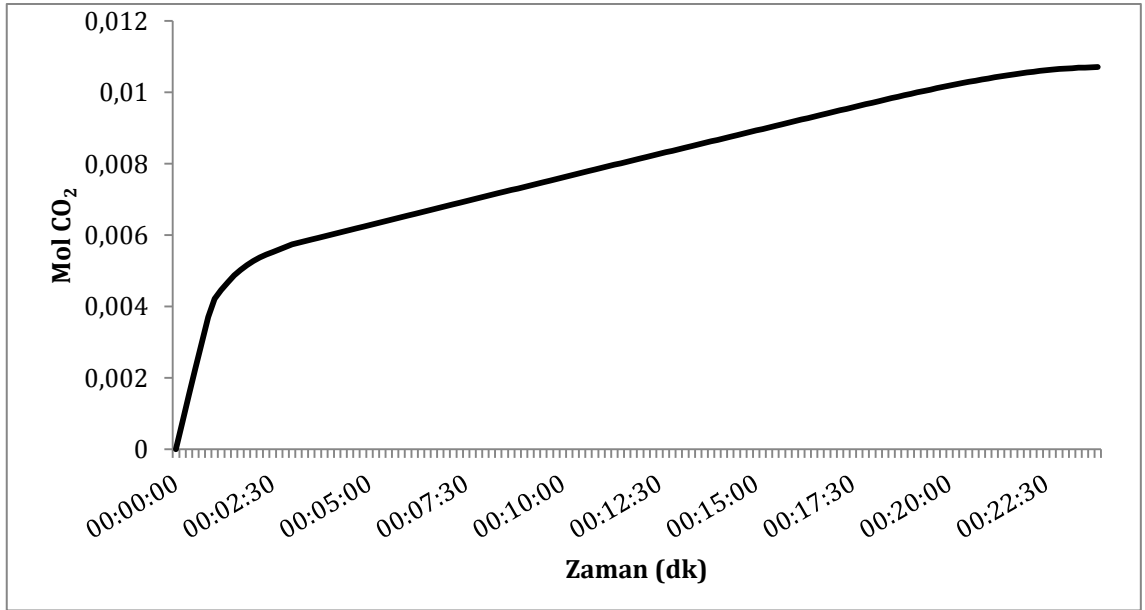
Çizelge 4. 23.Kütlece %10 BTMG- 1 Hekzanol çözeltisinin desorpsiyon kapasiteleri ve süreleri (%80 güç ve 80°C sıcaklık)

BTMG 1 Hekzanol 80C %80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk.)
1. Desorpsiyon	0,00213	00:20:10
2. Desorpsiyon	0,00179	00:19:30
3. Desorpsiyon	0,00187	00:25:50
4. Desorpsiyon	0,01597	00:19:50
5. Desorpsiyon	0,001612	00:20:50

BTMG çözeltisinde %80 ve %100 güçte çalışılan ultrasonik su banyosu ile gerçekleştirilen deneyler sonucu doğru bir karşılaştırma yapılabilecek tutarlı veriler elde edilememiştir. Bunun yerine daha iyi sonuç veren DBN bazlı çözeltilere odaklanılmıştır.

4.3.3.2. Kütlece %10 BTMG 1-Propanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

BTMG 1- Propanol çözeltisinin absorpsiyon performansını incelemek amacıyla 30 ml hacimli 0,0174 mol BTMG kullanılarak hazırlanan KD-TOS çözeltisi ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda (Şekil 4.14) gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 14.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol çözeltisinin zamana karşı mol grafiği

Şekil 4.14'e göre kütlece %10 BTMG 1-Propanol çözeltisinin 1. CO₂ yükleme kapasitesi 0,0112 mol olarak hesaplanmıştır. Tekrarlanan absorpsiyonlar için hazırlanan CO₂ yükleme kapasiteleri ve başlangıç absorpsiyon hızlarına ait bilgiler Çizelge 4.24'te verilmiştir.

Çizelge 4. 24.Kütlece %10 BTMG 1-Propanol Çözeltisinin CO₂ yükleme kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

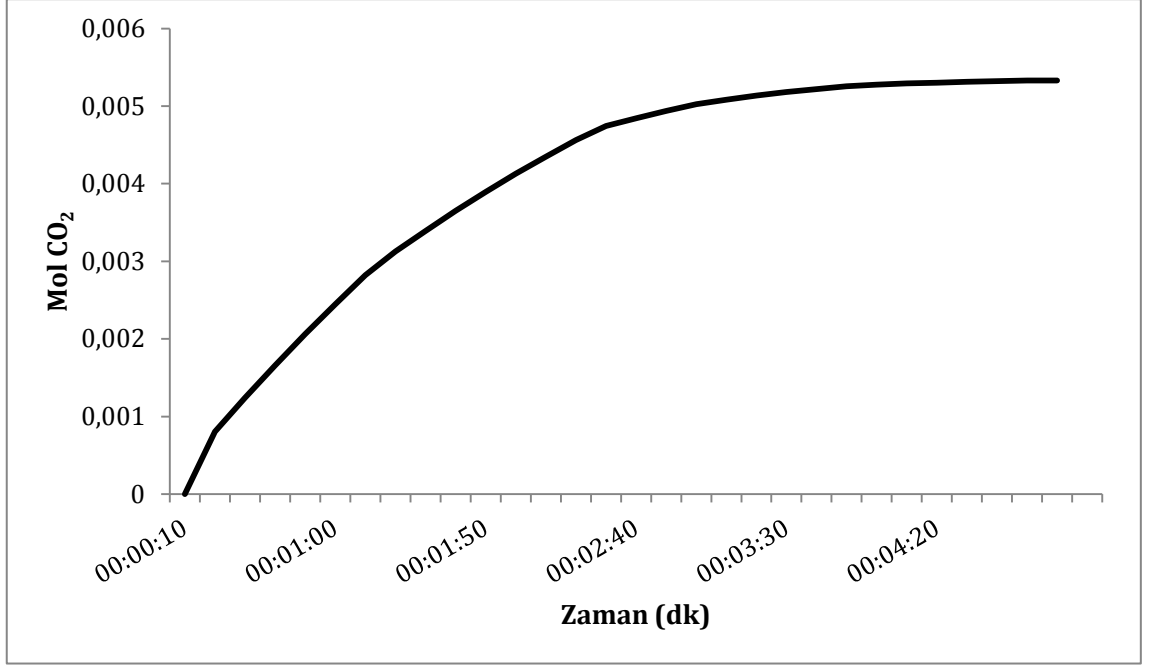
10 BTMG- 1 Propanol- 80°C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s)
1. Absorpsiyon	0,0112	1,18 x 10 ⁻⁸
2. Absorpsiyon	0,0108	-
3. Absorpsiyon	0,0102	-
4. Absorpsiyon	0,0100	-
5. Absorpsiyon	0,0093	-

Diğer sonuçlar ile benzer sonuçlar göstererek absorpsiyon tekrarları boyunca çözelti kapasitelerinde azalış gözlemlenmiştir. Başlangıç absorpsiyon hızları 1. Absorpsiyon için verildiği gibi çok küçük çıktığı için diğerleri için hesaplanamamıştır.

Bir önceki bölümde açıklanan sebeplerden dolayı Kütlece %10 BTMG 1- Propanol çözeltisi için de desorpsiyon işlemi 2 parametre için gerçekleştirilebilmiştir. Ultrasonik banyonun güç değerinin %100 ve %80 durumlarındaki çalıştırılmaları durumu karşılaştırılmıştır. DBN ve TBD bazlı çözeltilerdeki gibi benzer bir şekilde güç düştüğünde kapasitede azalma ve desorpsiyon sürelerinde artış gözlenmiştir. Bu desorpsiyonlara ait desorpsiyon kapasite ve desorpsiyon sürelerini içeren çizelgeler Ek'ler kısmında verilmiştir.

4.3.3.3. Kütlece %10 BTMG 1-Bütanol Çözeltisinin Absorpsiyon ve Desorpsiyon Performansı

BTMG 1- Bütanol çözeltisinin absorpsiyon performansını incelemek amacıyla 30 ml hacimli 0,0175 mol BTMG kullanılarak hazırlanan KD-TOS çözeltisi ile 30°C sıcaklık ve 1 barg'da CO₂ absorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen hesaplamalar bu çözelti için de gerçekleştirilmiştir ve aşağıda gösterilen zamana karşı mol grafiği çizilmiştir.



Şekil 4. 15.Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol Çözeltilisinin Zamana Karşı CO₂ Mol Grafiği
Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol çözeltisinin 1. absorpsiyon CO₂ yükleme kapasitesi 0,00613 mol olarak hesaplanmıştır. Diğer absorpsiyon sonucunda elde edilen yükleme kapasiteleri ve başlangıç absorpsiyon hızları Çizelge CC de verilmiştir.

Çizelge 4. 25.Kütlece %10 BTMG- 1 Bütanol - 80°C-%100 Çözeltilisinin Absorpsiyon Kapasiteleri ve Başlangıç Absorpsiyon Hızları

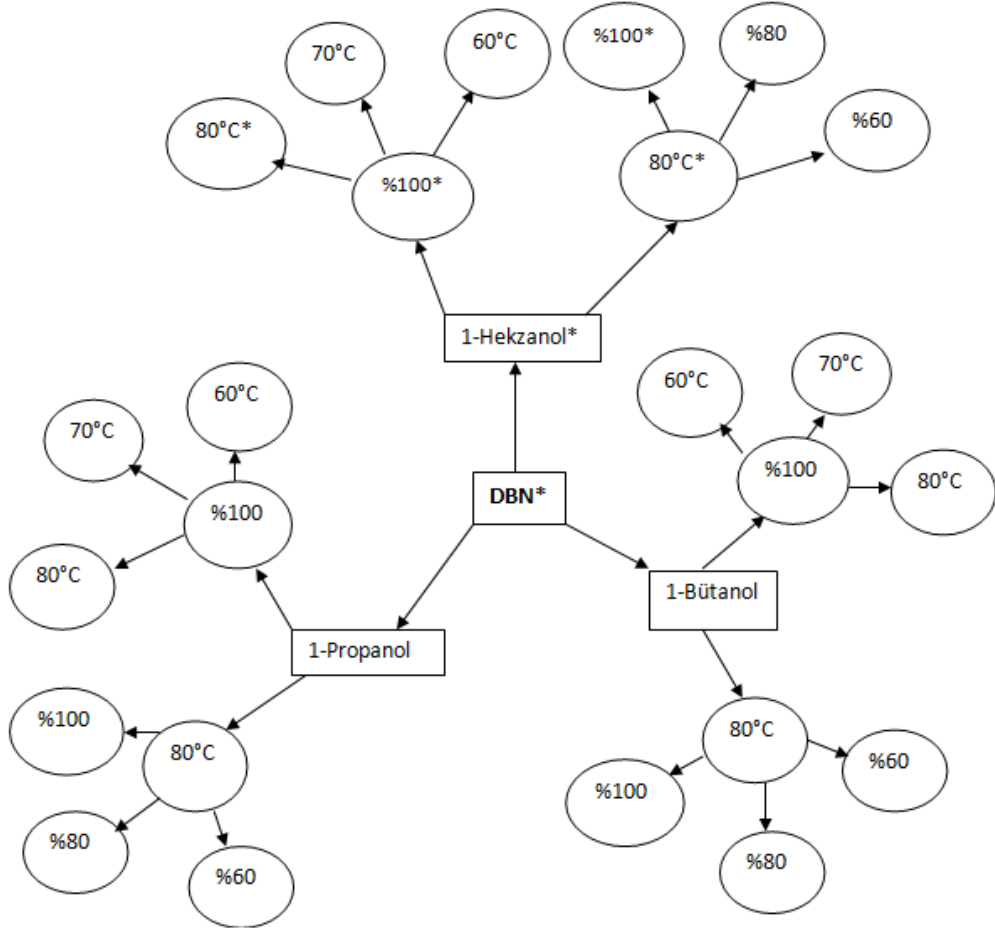
10 BTMG- 1 Propanol- 80°C-%100		
	Absorplanan Mol CO ₂	Başlangıç abs. Hızı(kmol/m ² .s)
1. Absorpsiyon	0,00613	1,20 x 10 ⁻⁸
2. Absorpsiyon	0,00610	-
3. Absorpsiyon	0,00632	-
4. Absorpsiyon	0,00620	-
5. Absorpsiyon	0,00601	-

Diğer sonuçlar ile benzer sonuçlar göstererek absorpsiyon tekrarları boyunca çözelti kapasitelerinde azalış gözlemlenmiştir. Başlangıç absorpsiyon hızları 1. Absorpsiyon için verildiği gibi çok küçük çıktığı için diğerleri için hesaplanamamıştır.

Bir önceki bölümde açıklanan sebeplerden dolayı Kütlece %10 BTMG 1- Bütanol çözeltisi için de desorpsiyon işlemi ultrasonik banyonun güç değerinin %100 ve %80

durumlarındaki çalıştırılmaları durumu karşılaştırılmıştır. DBN ve TBD bazlı çözeltilerdeki gibi benzer bir şekilde güç düştüğünde kapasitede azalma ve desorpsiyon sürelerinde artış gözlenmiştir. Bu desorpsiyonlara ait desorpsiyon kapasite ve desorpsiyon sürelerini içeren çizelgeler Ek'ler kısmında verilmiştir.

Yukarıda anlatıldığı üzere çözeltilerde kullanılan bazlar arasında en iyi sonucu veren DBN organik bazdır ve bu bazla ilgili deney haritası Şekil 4.16'da verilmiştir. Üç farklı alkolle hazırlanan çözeltilerde 1-Propanol ile hazırlanan çözeltilerin absorpsiyon ve desorpsiyon performansı çok büyük fark olmamasına karşı daha iyi çıkmıştır. Ancak; fark büyük olmadığından ve bulunan aradaki performans farkı sonucunun daha güvenilir olabilmesi için daha fazla deney yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, ticari anlamda daha uygun olması ve ulaşılabilirliğinden dolayı Hekzanol önerilmektedir. Bu bölümün diğer kısımlarında çizelge ve grafiklerle anlatıldığı üzere ultrasonik desorpsiyon uygulanırken ultrasonik su banyosunun %100 güçte ve 80°C sıcaklıkta çalıştırıldığı koşullarda tüm çözeltiler için desorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 16. DBN Bazının Deney Haritası

* Bu çalışma kapsamında çalışılan DBN bazı kullanılarak hazırlanan çözeltiler için önerilen deney koşulları

5. YORUM

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda 10 tane önemli sonuç elde edilmiştir ve aşağıda listelenmiştir.

1- Amin çözeltilerine alternatif olarak üretilen KD-TOS sistemlerinin amin sistemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda absorpsiyon yapabilmeleri enerji tasarrufu için önemli bir çıktı olmuştur.

2- Özel olarak üretilmiş olan gaz-sıvı temas cihazı ile gerçekleştirilen 5'er kez tekrar edilen kütlice %10'luk DBN, TBD ve BTMG organik bazları ve 1-Hekzanol, 1-Bütanol, 1-Propanol iyonik sıvıları ile 30ml'lik hacme sahip olarak hazırlanan çözeltilerin absorpsiyon ve desorpsiyon performanslarına bakılmıştır.

3- Gaz-sıvı temas sisteminden elde edilen veriler kullanılarak çözeltilerin zamana karşı mol grafikleri çizilmiş CO₂ absorpsiyon ve desorpsiyon kapasiteleri (performansları) hesaplanmıştır. Elde edilen grafiğin eğim çizgisinden yararlanılarak çözeltilerin başlangıç absorpsiyon hızları hesaplanmıştır.

4- DBN, TBD ve BTMG bazlarının 1-Hekzanol (karşılaştırmanın aynı alkol ile hazırlanan çözeltilerin olduğunu belirtmek amacıyla 1-Hekzanol örnek verilmiştir.) ile hazırlandığı çözeltilerinin CO₂ yakalama kapasiteleri sırasıyla DBN>TBD>BTMG olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre içlerinden performansı en iyi DBN'nin kullanıldığı çözeltiler olarak gözlemlenmiştir.

5- Ultrasonik desorpsiyon teknolojisi KD-TOS sistemleri için ilk kez bu tez kapsamında çalışılmıştır. Ultrasonik desorpsiyon sağlayan su banyosunu farklı güçlerde çalıştırarak ultrasonik dalgaların desorpsiyona etkileri incelenmiştir. Buna göre %60, %80 ve %100 güç verilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Gücün artışının desorpsiyonu hızlandırdığı sonucuna varılmıştır.

6- Desorpsiyon prosesinde ultrasonik banyonun gücü dışında başka bir etken olarak sıcaklık da değiştirilerek çözeltilerin desorpsiyon performansı incelenmiştir. Literatürde de desorpsiyon işleminin sıcaklık 80°C ve altındayken gerçekleştiğini göstermek için çalışmalar tespit edilmiştir. Bu tez çalışması sıcaklık 80°C, 70°C, ve 60°C iken desorpsiyonun gerçekleştiğini göstermiştir. 100°C'nin altında desorpsiyon gerçekleşmesi KD-TOS çözeltilerinin ve ultrasonik banyonun endüstriyel anlamda kullanılması halinde ciddi bir enerji tasarrufu sağlayacağı tahmin edilmektedir.

7- En iyi desorpsiyon koşulu %100 ultrasonik güç ve 80°C koşulunda gerçekleşmiştir. Ancak %80 güçte ve 80°C sıcaklıkta da performansta çok büyük bir kayıp yaşanmadığı gözlenmiştir. Endüstriyel anlamda kullanılması için daha ayrıntılı bir inceleme ile bu performans düşüşünün yok sayılması ve daha az enerji ile desorpsiyon gerçekleştirilmesi ihtimali beklenmektedir.

8- Sıcaklık ve ultrasonik güç değerleri kıyaslığında, sıcaklığın daha çok desorpsiyon kapasitesinde etkili olduğu görülmüştür. Sıcaklık arttıkça desorpsiyon kapasitesi artmıştır. Ultrasonik su banyosunun farklı güç değerlerinde çalıştırılmasıyla ise daha çok desorpsiyon süreleri etkilenmiştir. % Güç değerleri arttıkça desorpsiyon sürelerinde kısalma gözlemlenmiştir.

9- FT-IR analizleri ile çözeltilerin tekrarlanabilirlikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Saf çözeltiden alınan numune sonucuna göre karşılaştırıldığında CO₂ absorpsiyon sonrası CO₂ parmak izi 1500-1600 dalga boylarında gözlemlenmiş ve desorpsiyon sonrası belirtilen dalga boyunun tekrar saf çözelti durumundaki haline geçip geçmediğine bakılmıştır. DBN ile hazırlanan çözeltilerde sonuçlar bekleneni verirken TBD ve BTMG için aynı yorum yapılamamaktadır.

10- Hazırlanan KD-TOS çözeltilerinin bozunma sıcaklığını bulabilmek için yapılan termal gravimetrik analizler sonucu, çözeltilerin yüksek sıcaklıklara kadar dayanabildiğini gözlemlenmiştir. Bu sayede kullanılan ultrasonik banyonun uygulanabilecek en yüksek sıcaklığı olan 80°C'nin desorpsiyon işlemi için uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Liu, S. Zhao, F. Zhou, C. Yao, G. Chen, Ultrasonic Enhancement of CO₂ Desorption from MDEA Solution in Microchannels, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 2019, 1711-1719.
- [2] Anonim, Kyoto Protokolü, T.C Dışişleri Bakanlığı, <http://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa> (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019).
- [3] IPCC, The Scientific Basis, Impacts, Adaptation and Vulnerability Mitigation, International Panel on Climate Change, IPCC Report, 2001.
- [4] J. Li, Henni, A., Tontiwachwuthikul, P., Reaction Kinetics of CO₂ in Aqueous Ethylenediamine, Ethyl Ethanolamine and Diethyl Monoethanolamine Solutions in the Temperature Range of 298-313 K: Using Stopped-Flow Technique, 2008.
- [5] D.J. Heldebrant, C.R. Yonker, P.G. Jessop, L. Phan, CO₂ -Binding Organic Liquids (CO₂ BOLs) for Post-Combustion CO₂ Capture, *Energy Procedia*, 2009, 1187-1195.
- [6] A. Peeters, N., M., Faaij, A., P., C., Turkenburg, W., C., Techno-Economic Analysis of Natural Gas Combined Cycles with Post-Combustion CO₂ Absorption, Including a Detailed Evaluation of the Development Potential, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 396-417.
- [7] Ö. Yuksel-Orhan, E. Alper, Yeni Geliştirilen Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvıların Absorpsiyon ve Ultrasonik Desorpsiyon Performanslarının İncelenmesi BAP Projesi Sonuç Raporu, 2016.
- [8] Anonim, Greenhouse Gas Emissions, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>, (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019)
- [9] Anonim, CO₂ Emission, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/>, (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019)
- [10] Anonim, Overview Greenhouse Gases, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>, (Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2019)
- [11] I. Bert Metz, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, 2005.

- [12] Anonim, CO₂ Capture Project, www.co2captureproject.com, (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019)
- [13] D.J. Heldebrant, P.K. Koech, J.E. Rainbolt, F. Zheng, CO₂ -Binding Organic Liquids, an Integrated Acid Gas Capture System, *Energy Procedia*, 4, 2011, 216-223.
- [14] D.J. Heldebrant, P.K. Koech, J.E. Rainbolt, F. Zheng, T. Smurthwaite, C.J. Freeman, M. Oss, I. Leito, Performance of Single-Component CO₂-Binding Organic Liquids (CO₂BOLs) for Post Combustion CO₂ capture, *Chemical Engineering Journal*, 171, 2011, 794-800.
- [15] Ö. Yüksel-Orhan, Karbon Dioksit Gazının İyonik Sıvı-CO₂ Tutan Organik Sıvı Hibrit Çözücülere Absorpsiyonunun Kinetiği, Doktora Tezi, 2014.
- [16] A. Őeker, Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvılarda (CO₂TOS) Farklı Alkollerin Kullanımının Karbon Dioksit Tutma Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [17] Anonim, CCS Capture Post-Combustion, <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/capture/post-combustion-capture/>, (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019).
- [18] Anonim, Adsorpsiyon Nedir, <https://www.cevreportal.com/adsorpsiyon-nedir/>, (Erişim Tarihi: 23 Mart 2019).
- [19] Anonim, Termogravimetrik Analiz, <http://merlab.metu.edu.tr/tr/termogravimetrik-analiz-cihazı>, (Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [20] P.V. Danckwerts, The Reaction of CO₂ with Ethanolamines, *Chem. Eng., Sci.*, 34, 443, 1979.
- [21] Anonim, Membrane, https://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso_1.html, (Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [22] A. Kohl, R. Nielsen, Gas Purification, 5. Edition, Gulf Publishing Company, Texas, 1997.
- [23] CO₂ Capture and Geological Storage: State of the Art, *Oil & Gas Science and Technology*, 60, 2005, 3.
- [24] S. Bishnoi, G.T. Rochelle, Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Piperazine: Reaction Kinetics, Mass Transfer and Solubility, *Chem. Eng. Sci.*, 55, 2000, 5531.

- [25] C.S. Ume, P. Gördesli, E. Alper, Kinetics of Carbon Dioxide Reaction with Aqueous Mixture of Piperazine and 2-amino-2-ethyl-1,3-propanediol, *International Journal of Chemical Kinetics*, 2012.
- [26] P. Gordesli, E. Alper, The Kinetics of Carbon Dioxide Capture by Solutions of Piperazine and N-Methyl Piperazine, *Int.Journal of Warming*, 3, 2011, 67-76.
- [27] C.A. Eckert, C.L. Liotta, D. Bush, J.S. Brown, J.P. Hallett, Sustainable Reactions in Tunable Solvents, *J. Phys. Chem.*, 108, 2004, 18108-18118.
- [28] L. Phan, P.G. Jessop, D. Chiu, D.J. Heldebrant, H. Huttenhower, E. John, X. Li, P. Pollet, R. Wang, C.A. Eckert, C.L. Liotta, Switchable Solvents Consisting of Amidine/Alcohol or Guanidine/Alcohol Mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 2008, 539-545.
- [29] S. Gantert, D. Möller, Ultrasonic desorption of CO₂: A New Technology to Save Energy and Prevent Solvent Degradation, *Chem. Eng. Technol*, 35(3), 2012, 576 – 578.
- [30] M. Saxena, W. Flintoff, *Engineering and Economics of CO₂ Removal and Sequestration: Hydrocarbon Processing*, GULF Publishing Co., Houston, Texas, 2006.
- [31] Ö. Yüksel-Orhan, M.Ç. Öztürk, Kinetics and Performance Studies of a Switchable Solvent TMG (1,1,3,3-tetramethylguanidine)/1-propanol/Carbon Dioxide System. *Turkish Journal of Chemistry*, 39, 2015, 13-24.
- [32] Ö. Yüksel-Orhan, H. Tankal, H. Kayi, E. Alper, Kinetics of CO₂ Capture by Carbon Dioxide Binding Organic Liquids: Experimental and Molecular Modelling Studies, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 49, 2016, 379–386.
- [33] S. Gantert, D. Möller, Ultrasonic Desorption of CO₂ – A New Technology to Save Energy and Prevent Solvent Degradation, Brandenburg University of Technology Cottbus, Berlin, Germany, 2012, 576-578.
- [34] W.H. Tay, K.K. Lau, A.M. Shariff, High Frequency Ultrasonic-Assisted CO₂ Absorption in a High Pressure Water Batch System, 2015.

EK 1 – Desorpsiyon Kapasite ve Süre Grafikleri

E.1. 1.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)

10 TBD- 1 HEKZANOL - 80 °C-%80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00194	00:31:00
2. Desorpsiyon	0,00173	00:25:40
3. Desorpsiyon	0,00144	00:23:00
4. Desorpsiyon	0,00157	00:26:00
5. Desorpsiyon	0,00134	00:23:20

E.1. 2.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)

10 TBD- 1 BUTANOL - 80 °C-%80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00149	00:27:20
2. Desorpsiyon	0,00108	00:21:00
3. Desorpsiyon	0,00148	00:26:50
4. Desorpsiyon	0,00147	00:19:50
5. Desorpsiyon	0,00168	00:26:50

E.1. 3.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C)

10 TBD- 1 PROPANOL - 80 °C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00087	00:12:00
2. Desorpsiyon	0,00082	00:18:40
3. Desorpsiyon	0,00099	00:20:10
4. Desorpsiyon	0,00117	00:19:00
5. Desorpsiyon	0,00099	00:21:30

E.1. 4.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 70°C)

10 TBD- 1 PROPANOL - 70 °C-%100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00167	00:27:10
2. Desorpsiyon	0,00200	00:23:30
3. Desorpsiyon	0,00100	00:22:50
4. Desorpsiyon	0,00179	00:23:40
5. Desorpsiyon	0,00192	00:24:30

E.1. 5.Kütlece %10 TBD 1-Propanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)

10 TBD- 1 PROPANOL - 80 °C-%80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00169	00:20:50
2. Desorpsiyon	0,00192	00:23:00
3. Desorpsiyon	0,00185	00:28:10
4. Desorpsiyon	0,00198	00:23:10
5. Desorpsiyon	0,00111	00:19:50

E.1. 6.Kütlece %10 BTMG1-Bütanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C)

BTMG 1 Bütanol 80°C %100		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,000583	00:16:50
2. Desorpsiyon	0,00186	00:25:00
3. Desorpsiyon	0,00177	00:18:00
4. Desorpsiyon	0,00146	00:26:25
5. Desorpsiyon	0,000389	00:23:15

E.1. 7.Kütlece %10 BTMG1-Bütanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%100, 80°C)

BTMG 1 Bütanol 80°C %80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00204	00:23:20
2. Desorpsiyon	0,00204	00:21:10
3. Desorpsiyon	0,00229	00:23:30
4. Desorpsiyon	0,00196	00:25:50
5. Desorpsiyon	0,00198	00:22:30

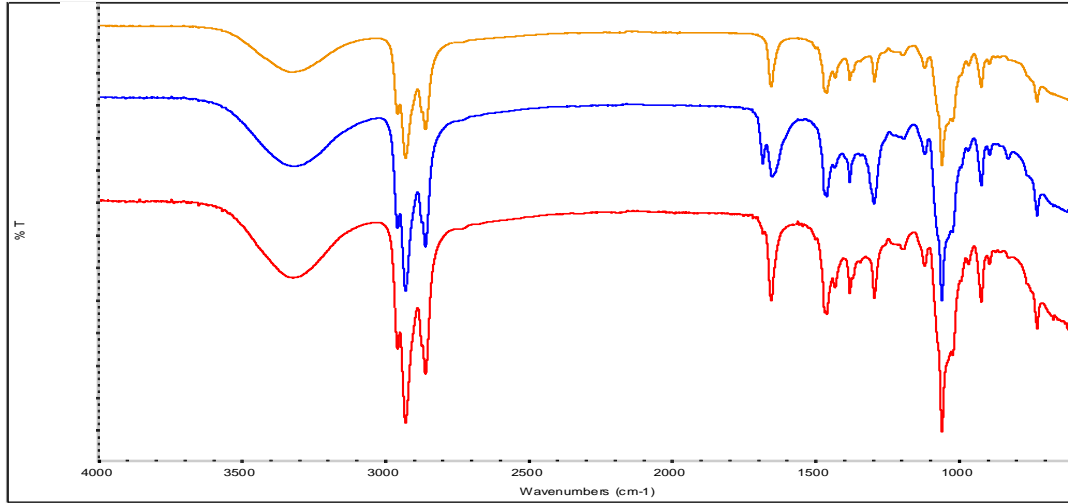
E.1. 8.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)

BTMG 1 Propanol 80°C %80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00179	00:25:00
2. Desorpsiyon	0,00226	00:27:40
3. Desorpsiyon	0,00276	00:26:40
4. Desorpsiyon	0,00260	00:24:00
5. Desorpsiyon	0,00157	00:23:00

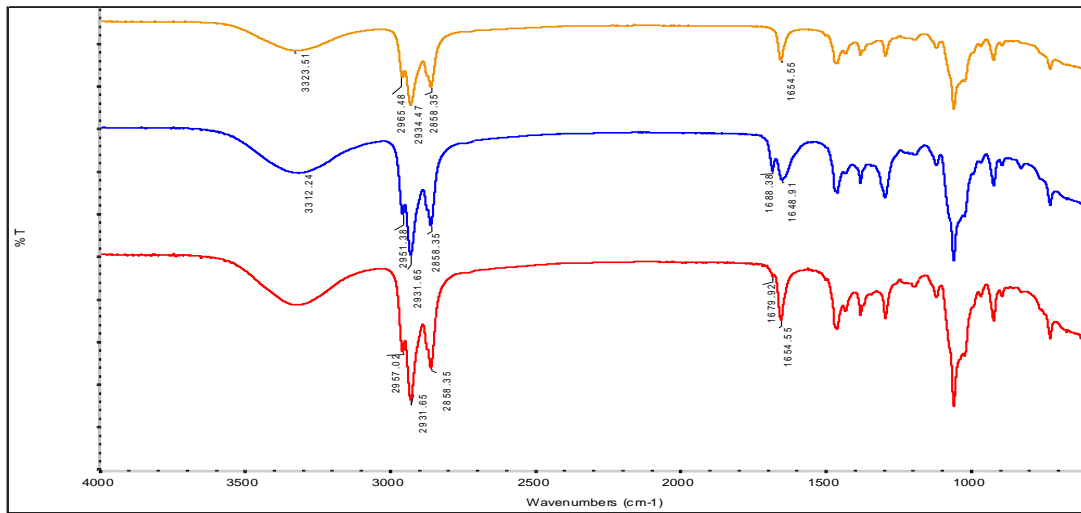
E.1. 9.Kütlece %10 BTMG1-Hekzanol çözeltisinin CO₂ desorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon süreleri (%80, 80°C)

BTMG 1 Propanol 80°C %80		
	Desorplanan Mol CO ₂	Desorpsiyon Süresi (dk)
1. Desorpsiyon	0,00170	00:26:00
2. Desorpsiyon	0,00168	00:25:30
3. Desorpsiyon	0,00175	00:26:40
4. Desorpsiyon	0,00162	00:24:10
5. Desorpsiyon	0,00157	00:23:20

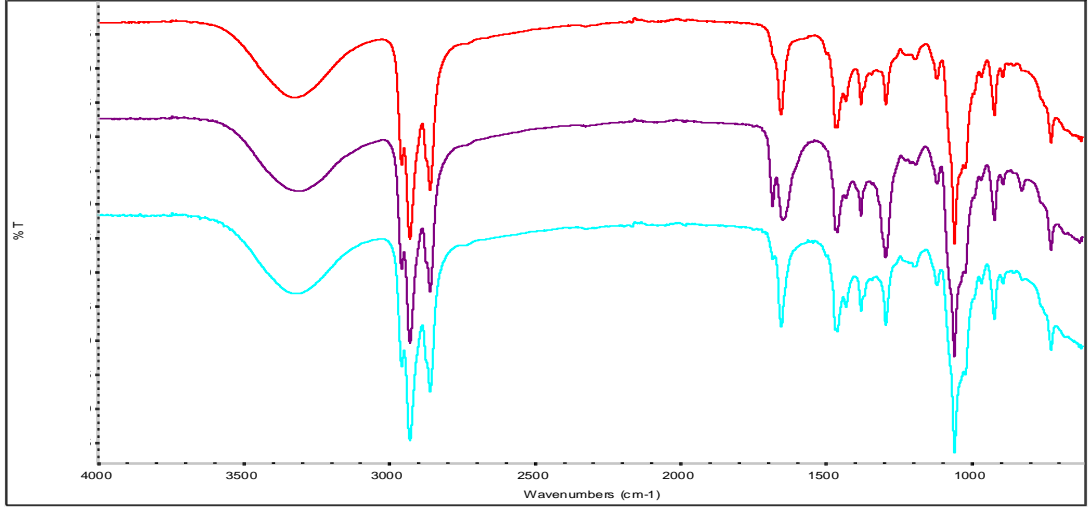
EK 2 – FT-IR Sonuçları



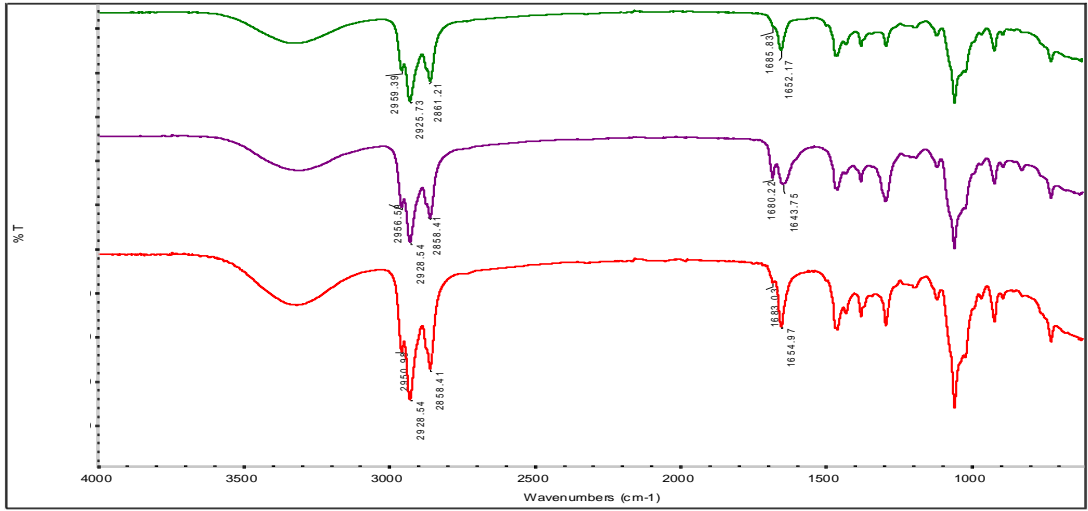
E.2. 1.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



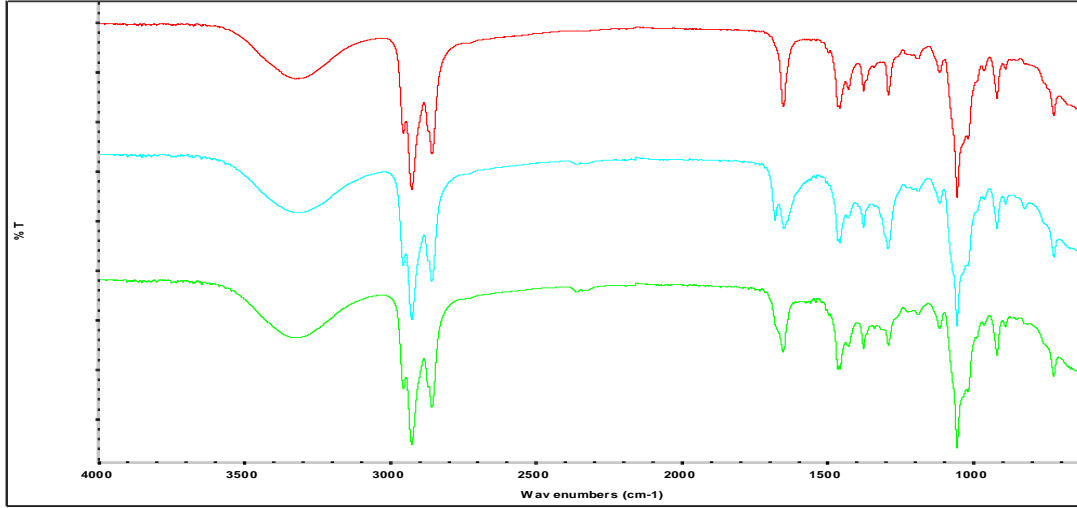
E.2. 2.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



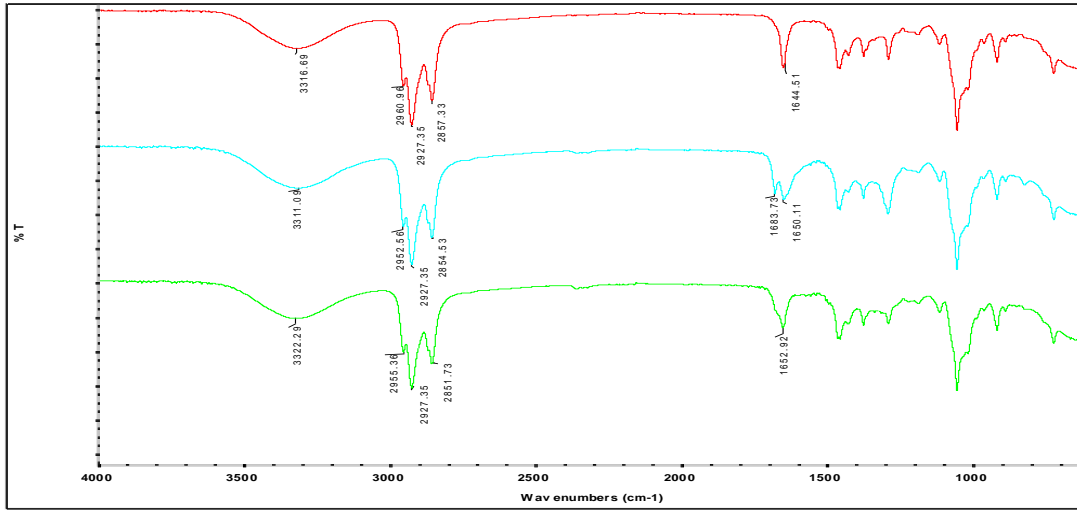
E.2. 3.Küttelece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



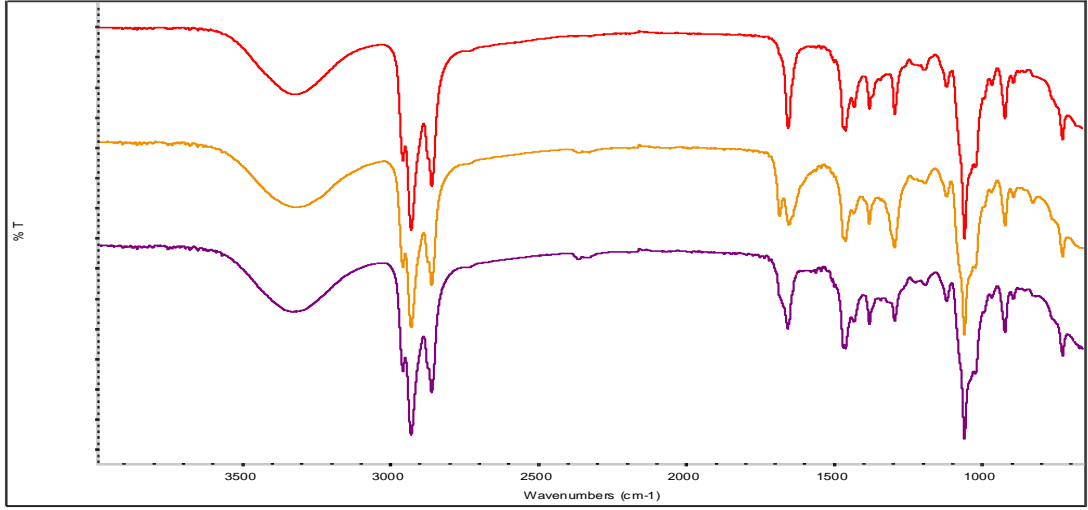
E.2. 4.Küttelece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



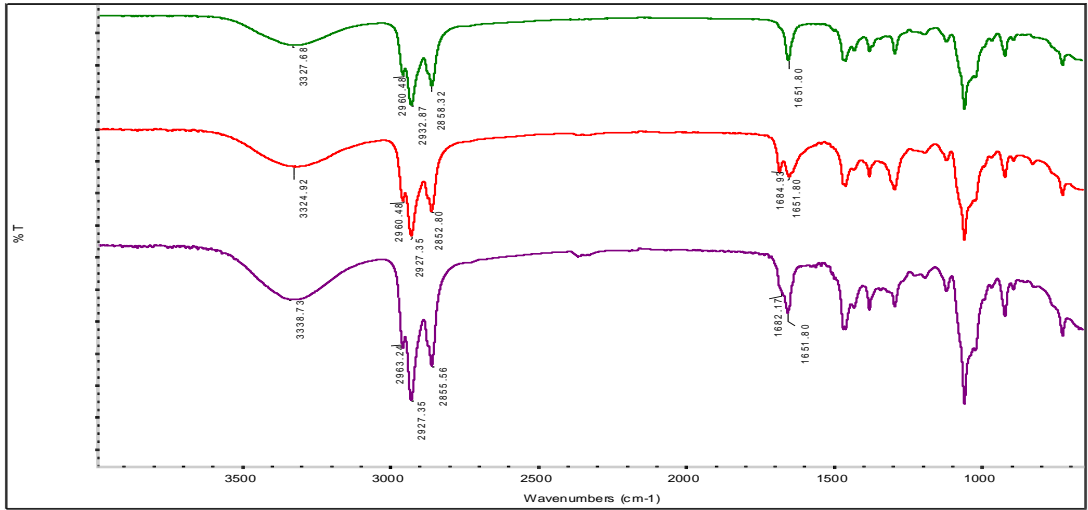
E.2. 5.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



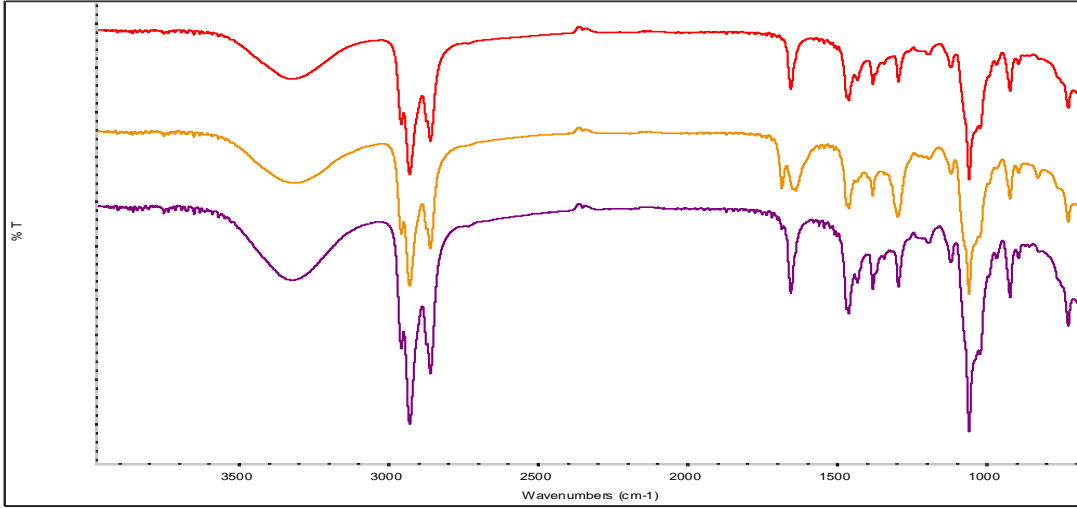
E.2. 6.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



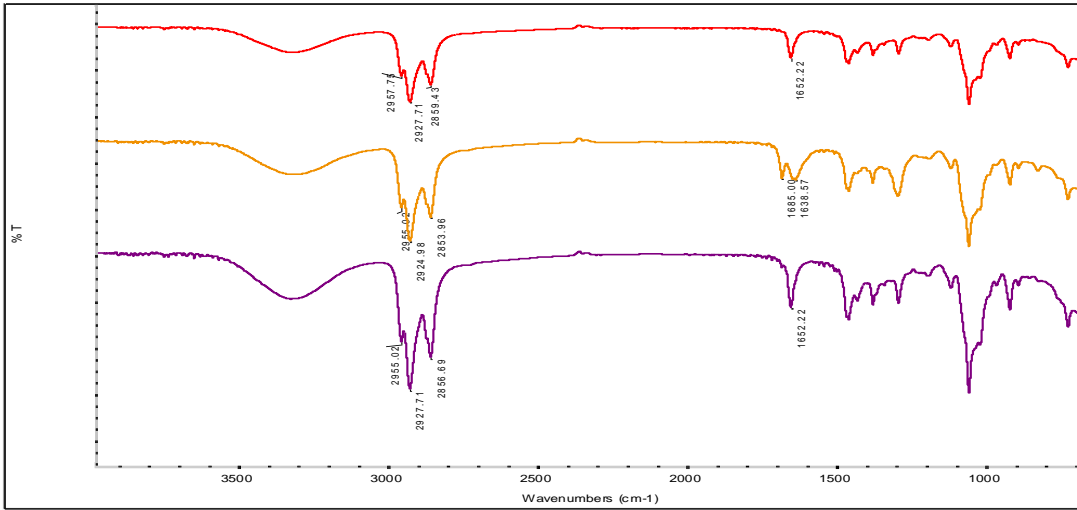
E.2. 7. Küttelece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



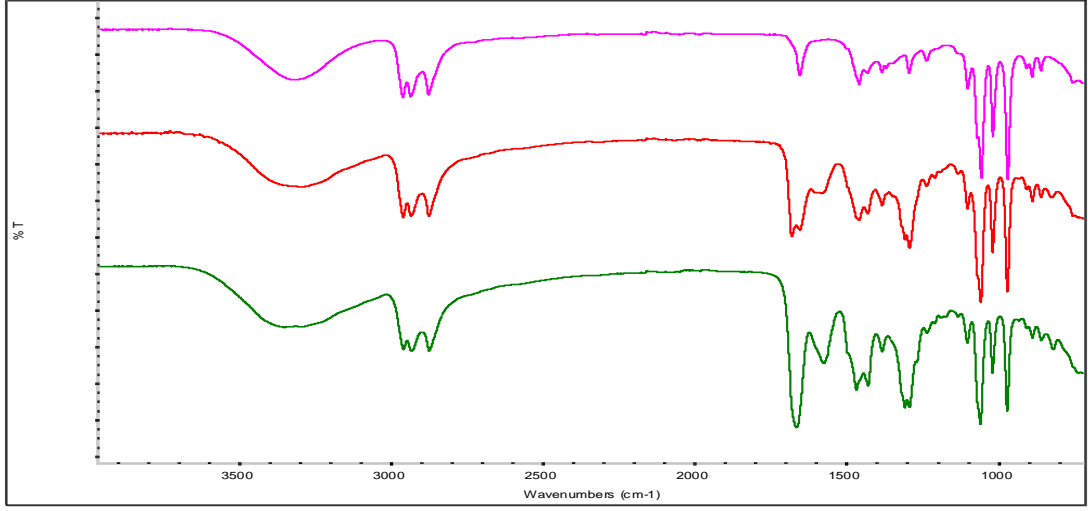
E.2. 8. Küttelece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



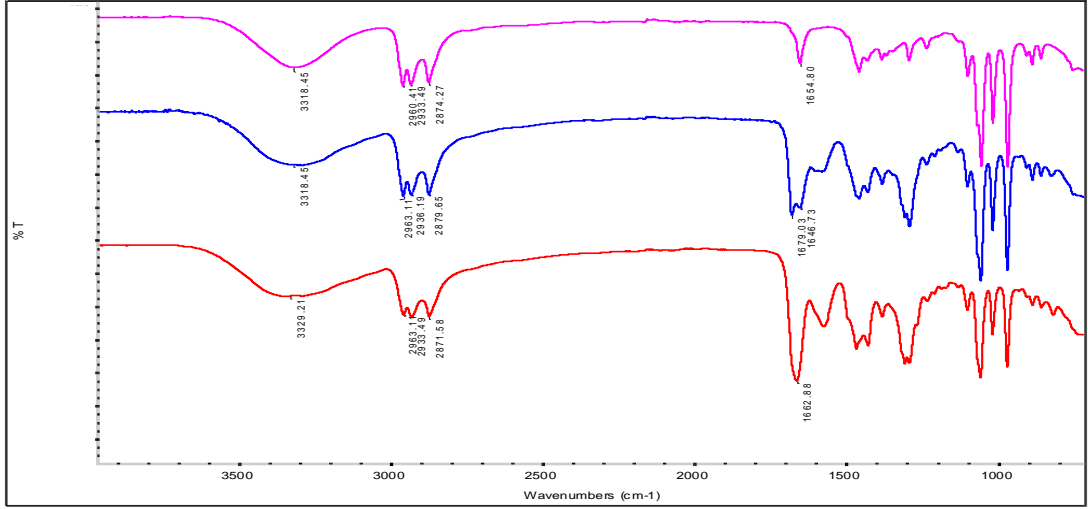
E.2. 9.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



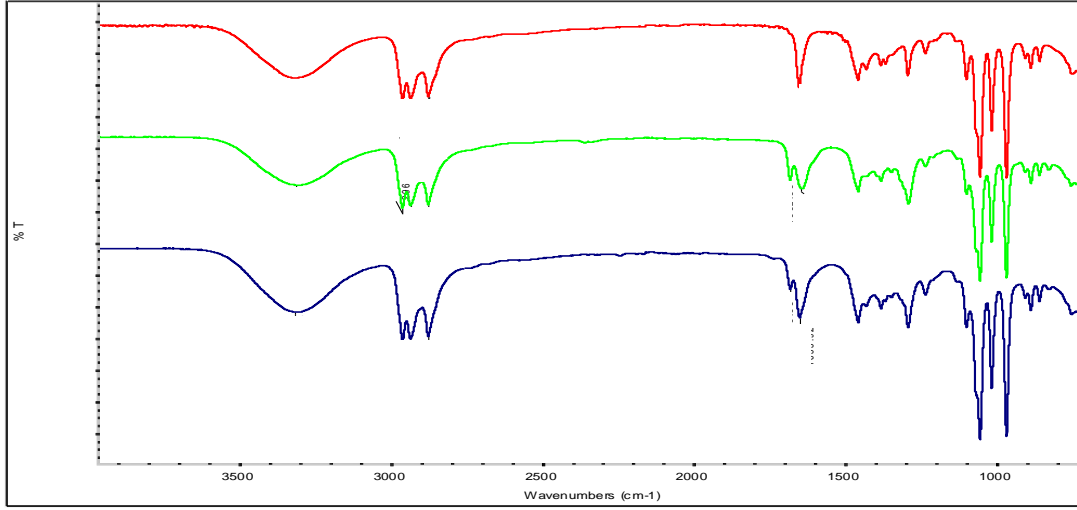
E.2. 10.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



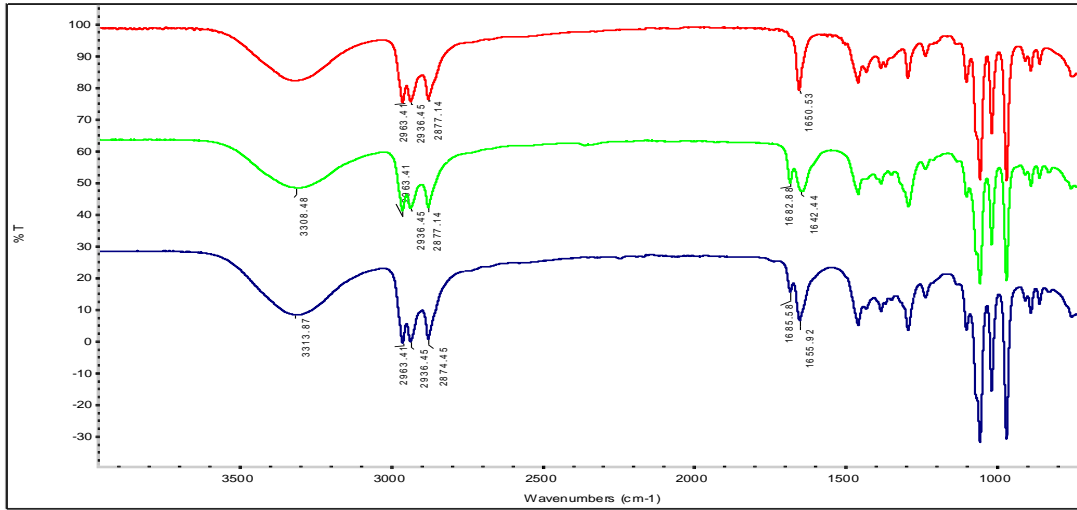
E.2. 11.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



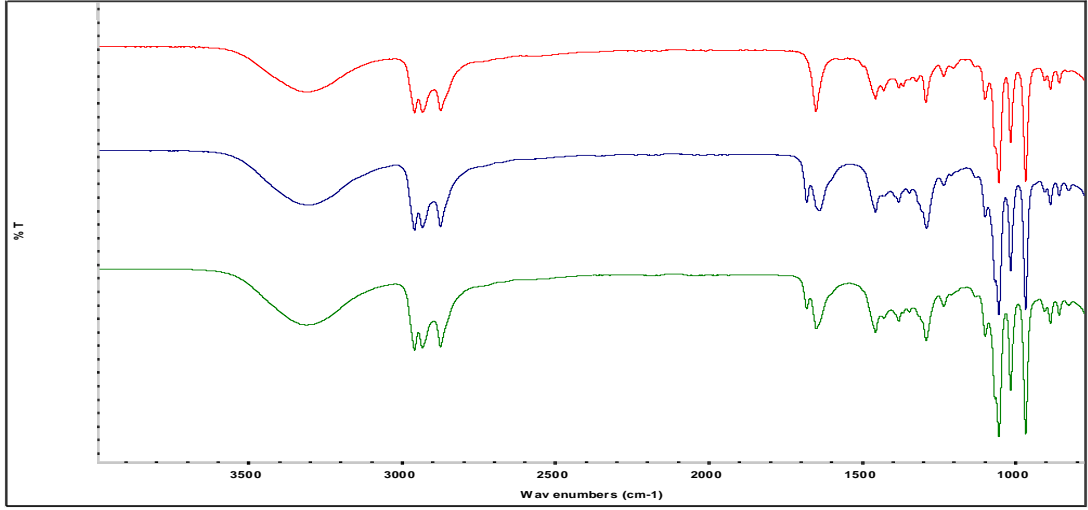
E.2. 12.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



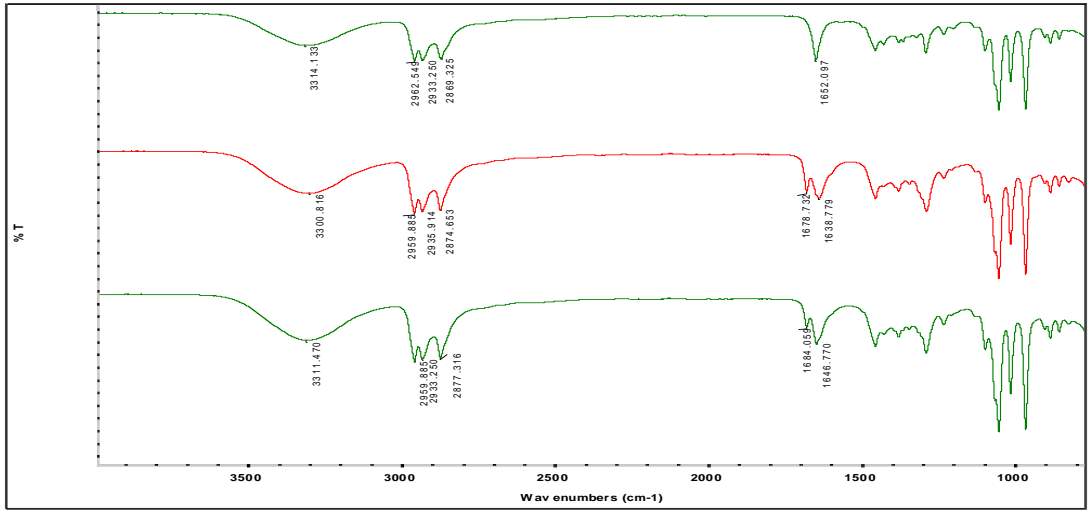
E.2. 13.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



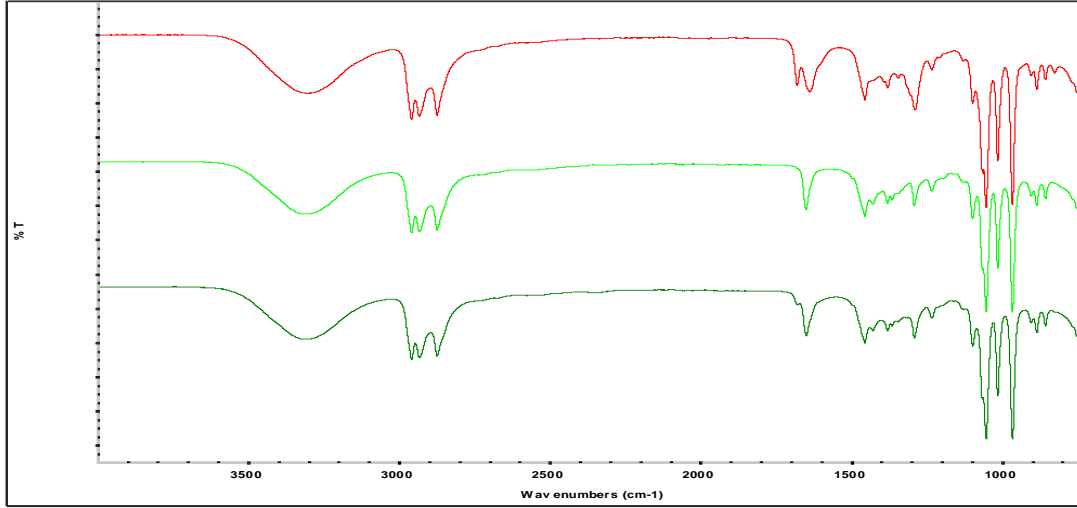
E.2. 14.Kütlece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



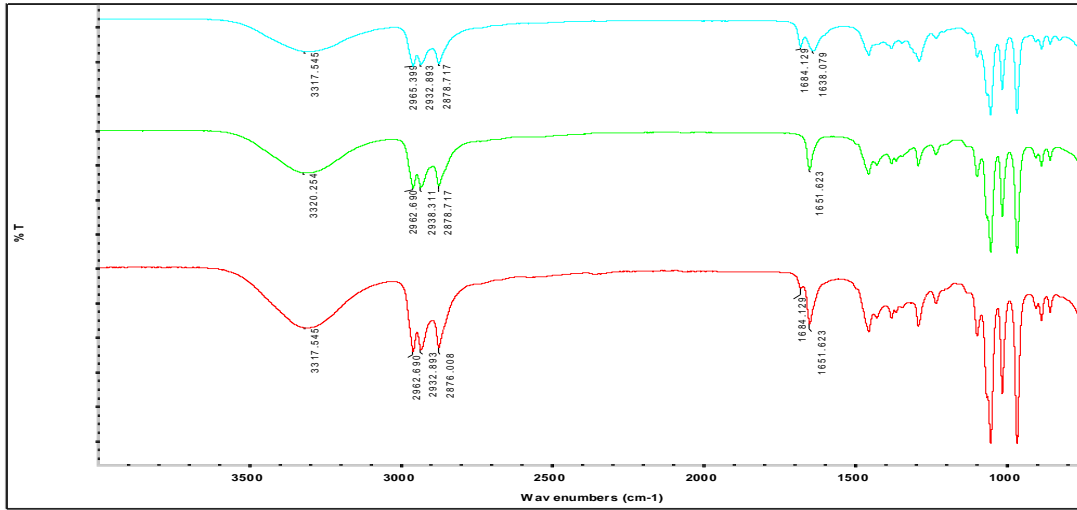
E.2. 15. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



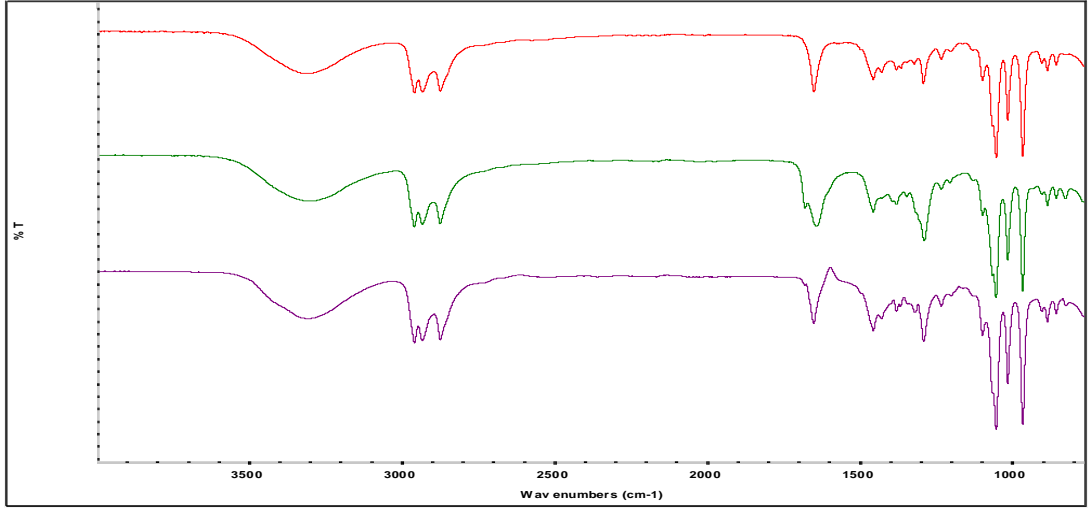
E.2. 16. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



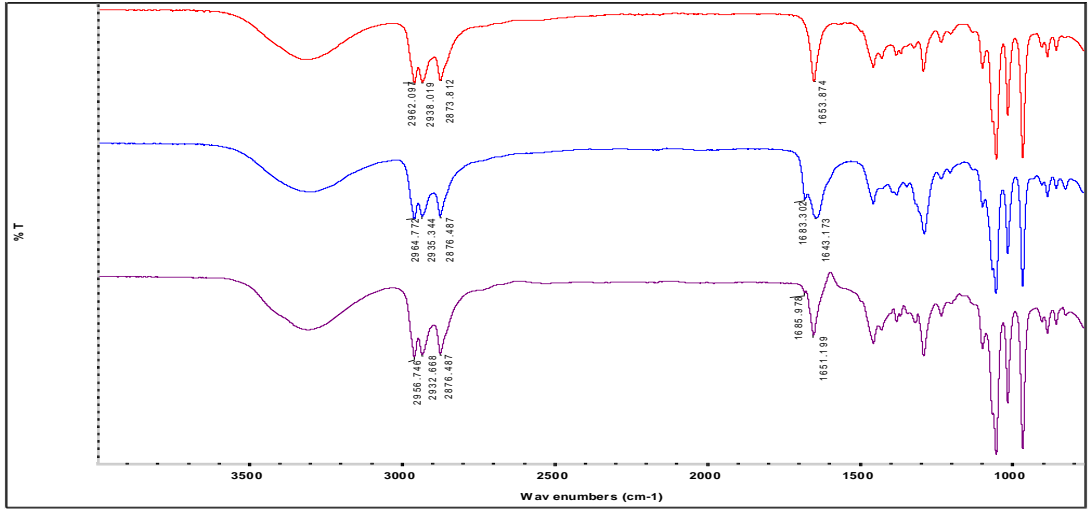
E.2. 17. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



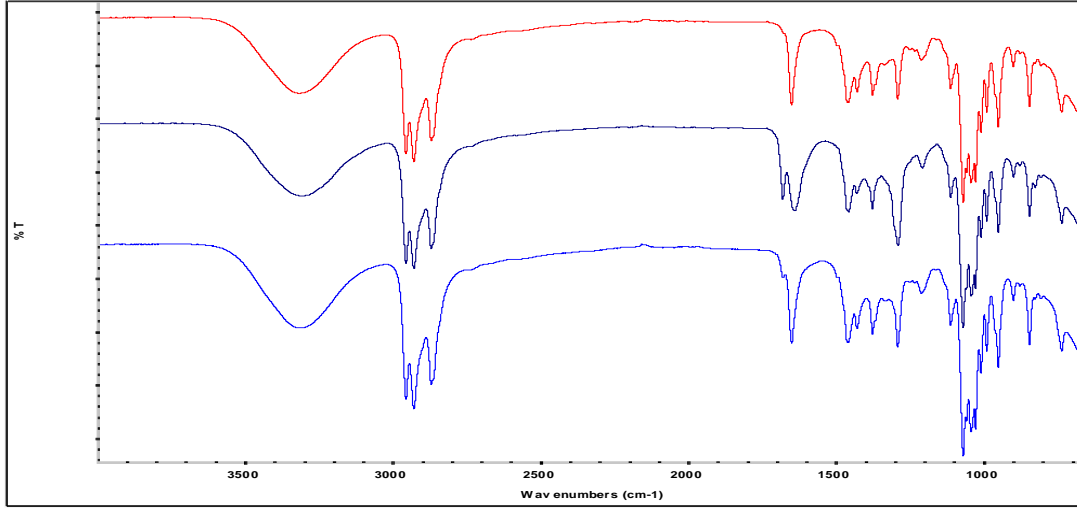
E.2. 18. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



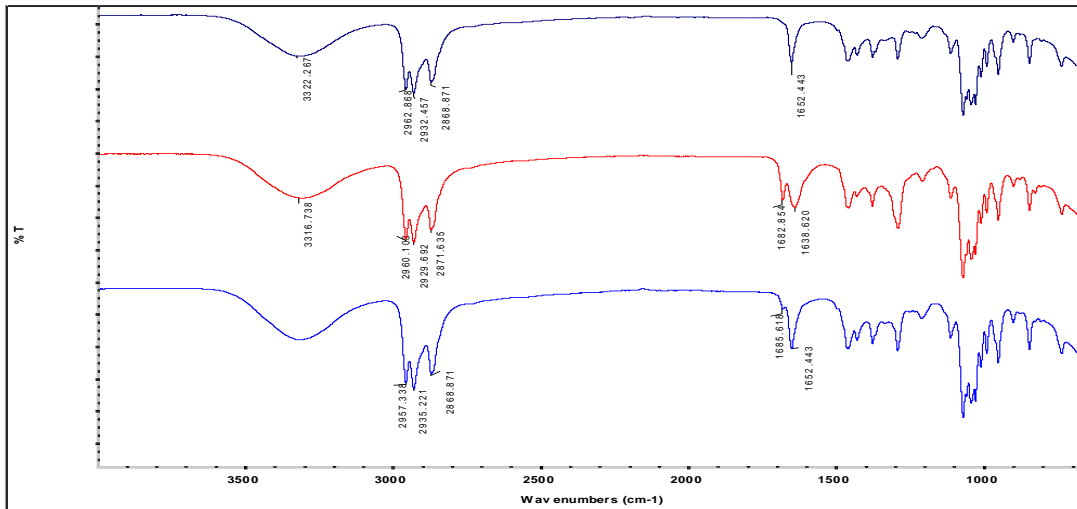
E.2. 19. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



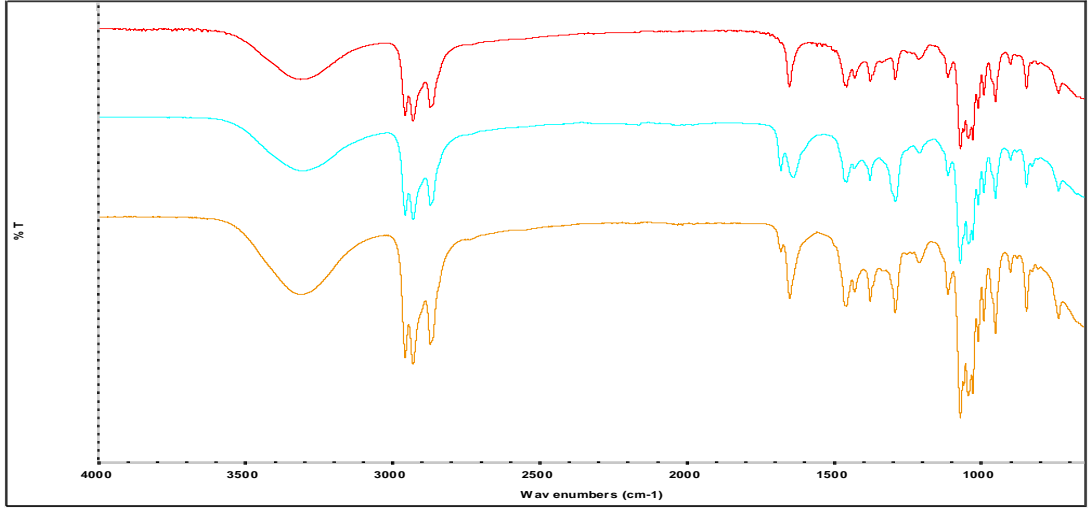
E.2. 20. Küttelece %10 DBN 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



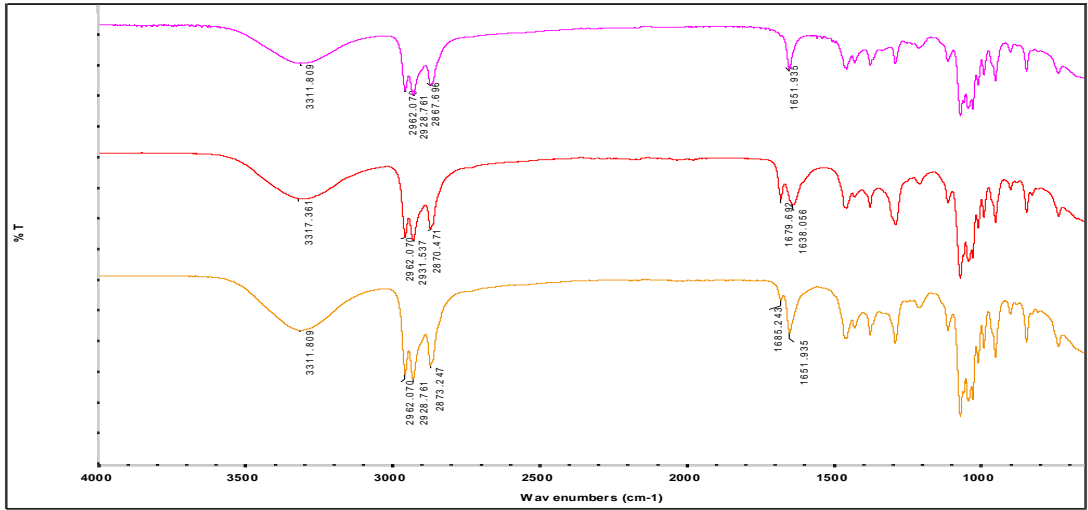
E.2. 21.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



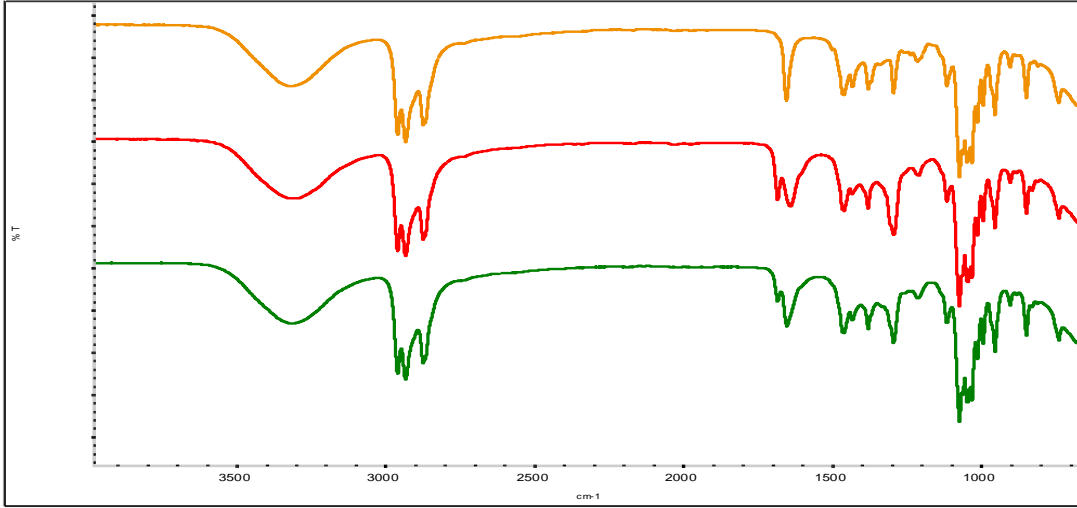
E.2. 22.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



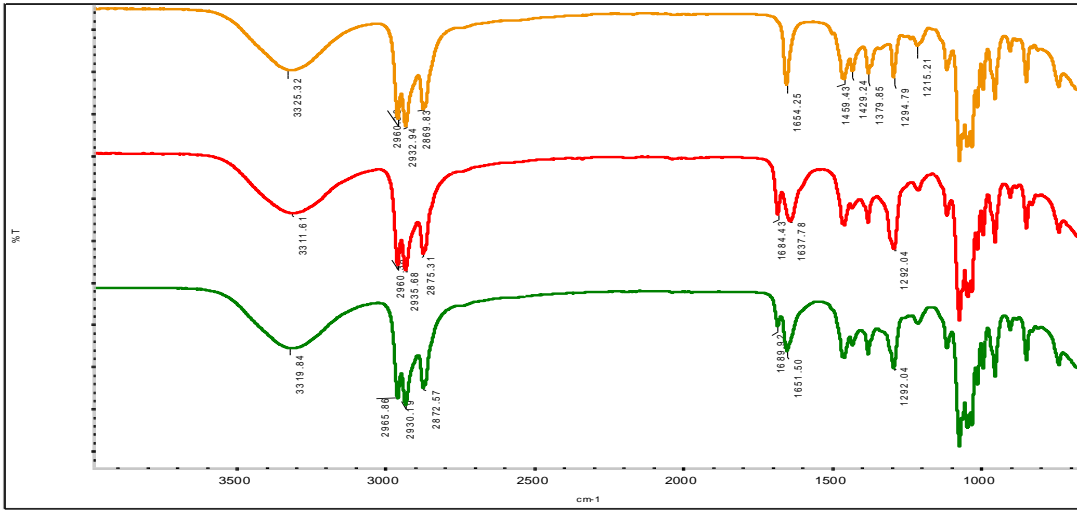
E.2. 23.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



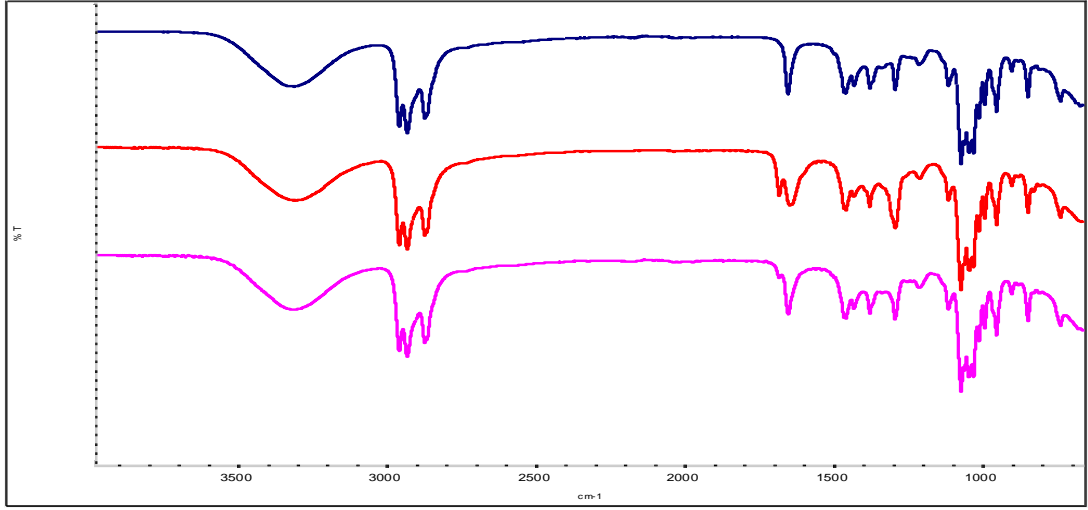
E.2. 24.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



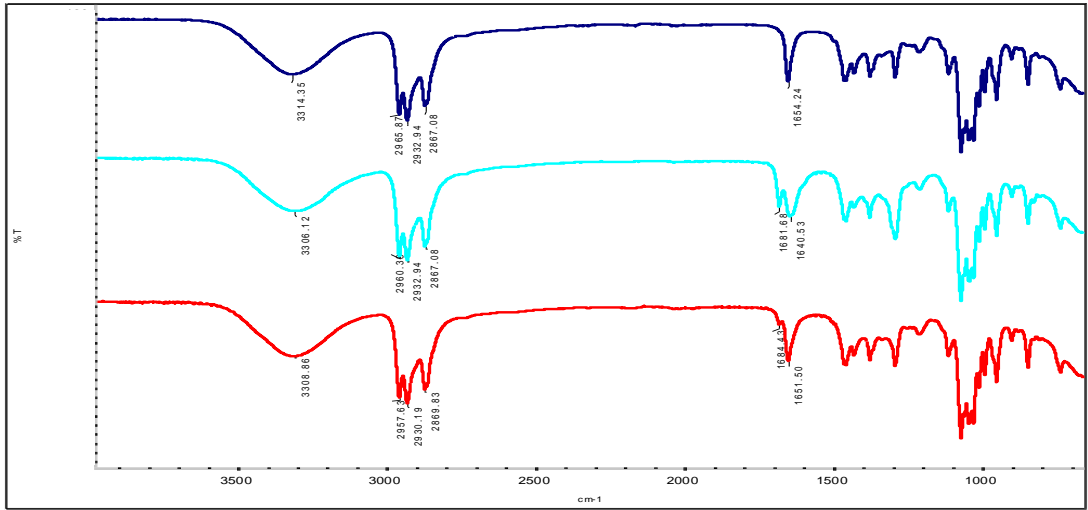
E.2. 25.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



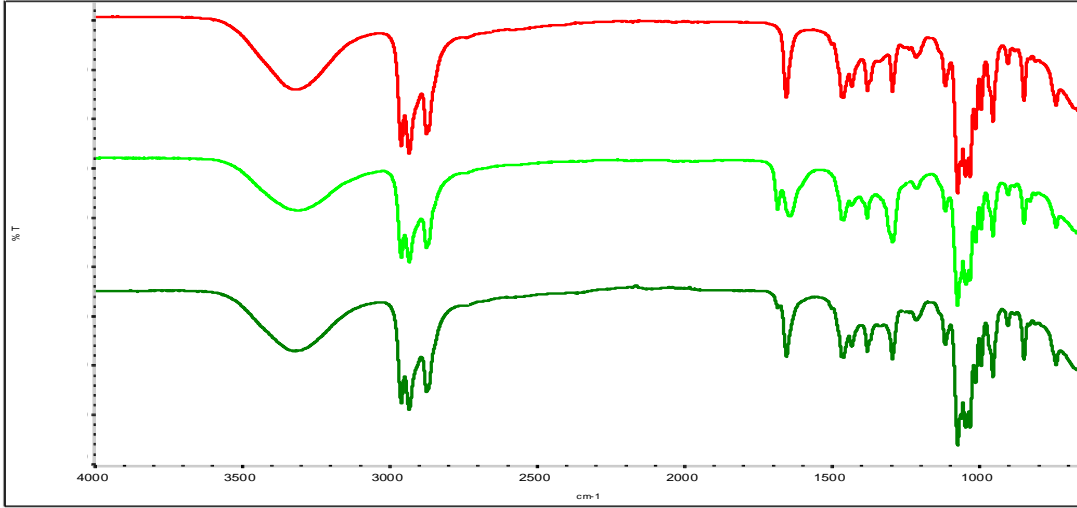
E.2. 26.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



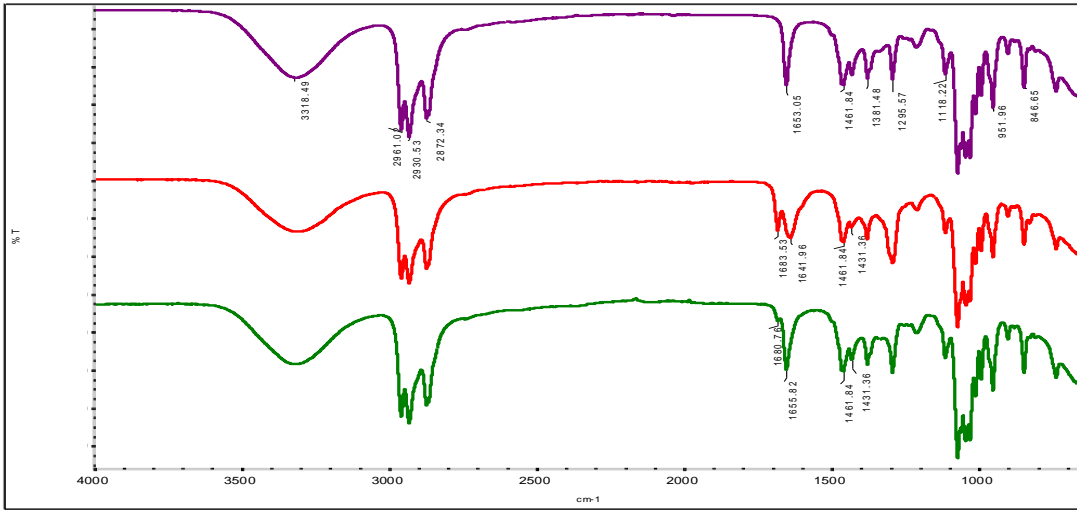
E.2. 27.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



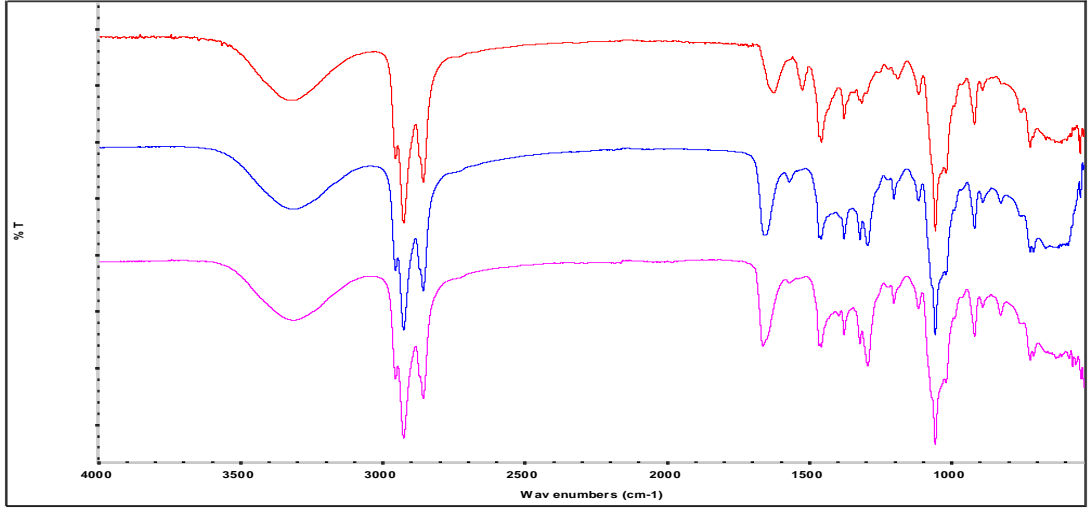
E.2. 28.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



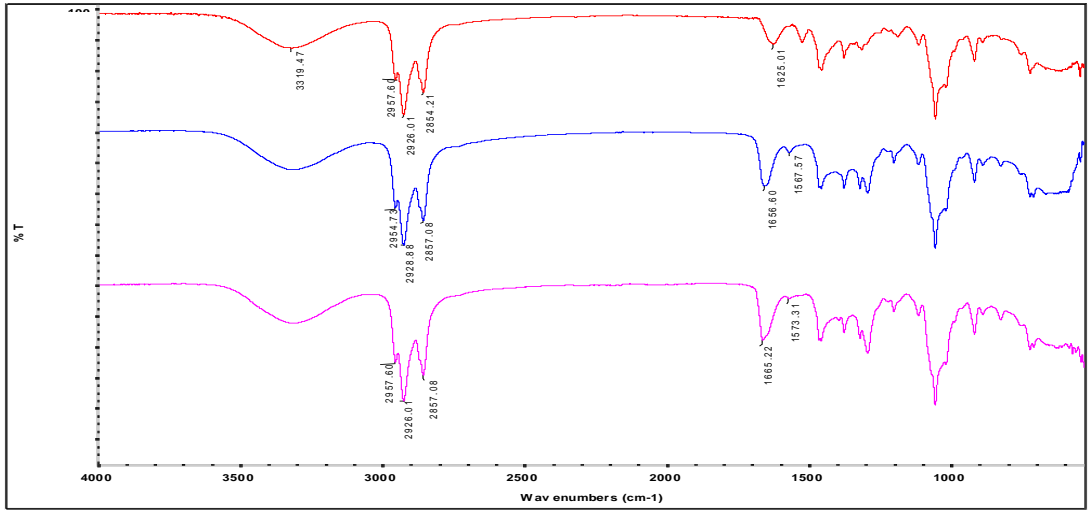
E.2. 29.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



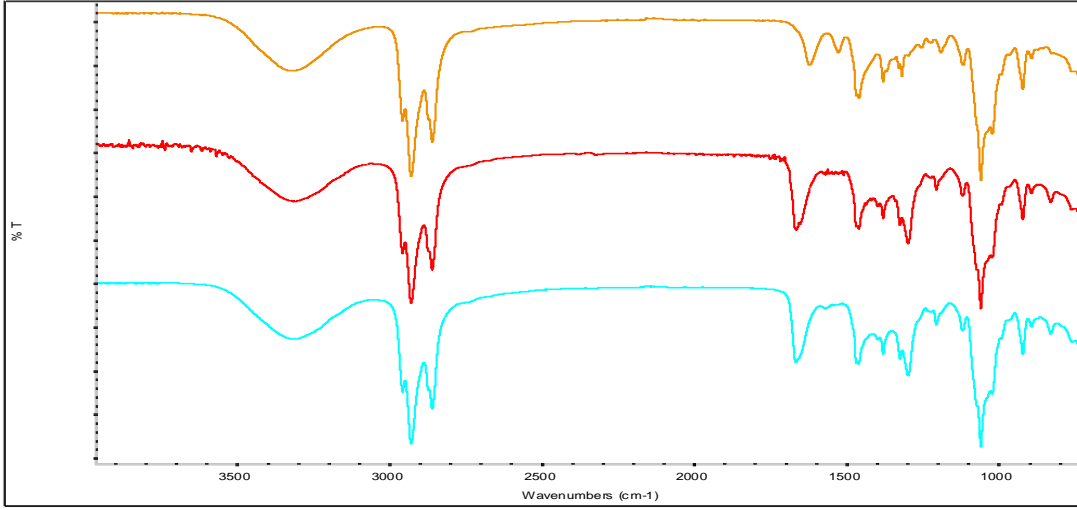
E.2. 30.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%60, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



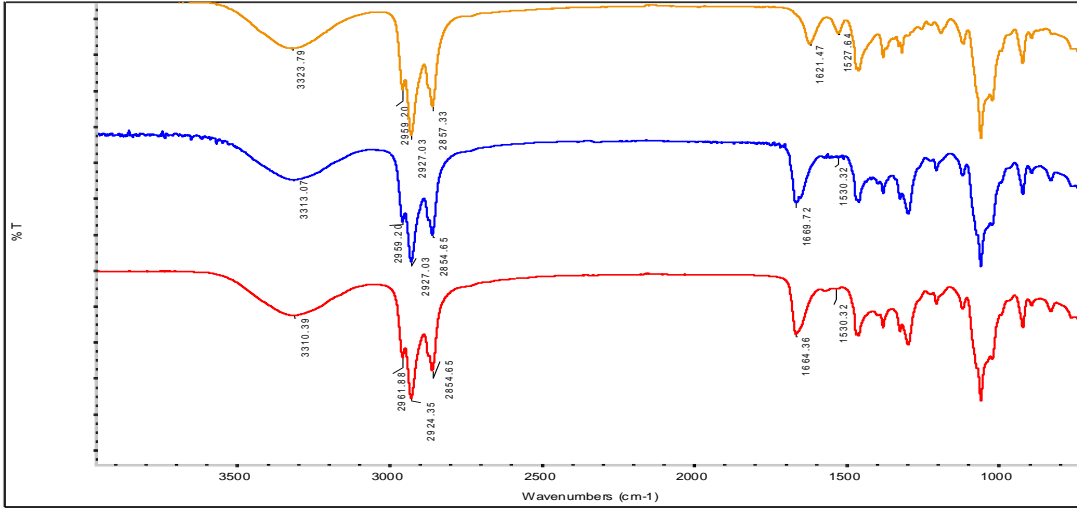
E.2. 31.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



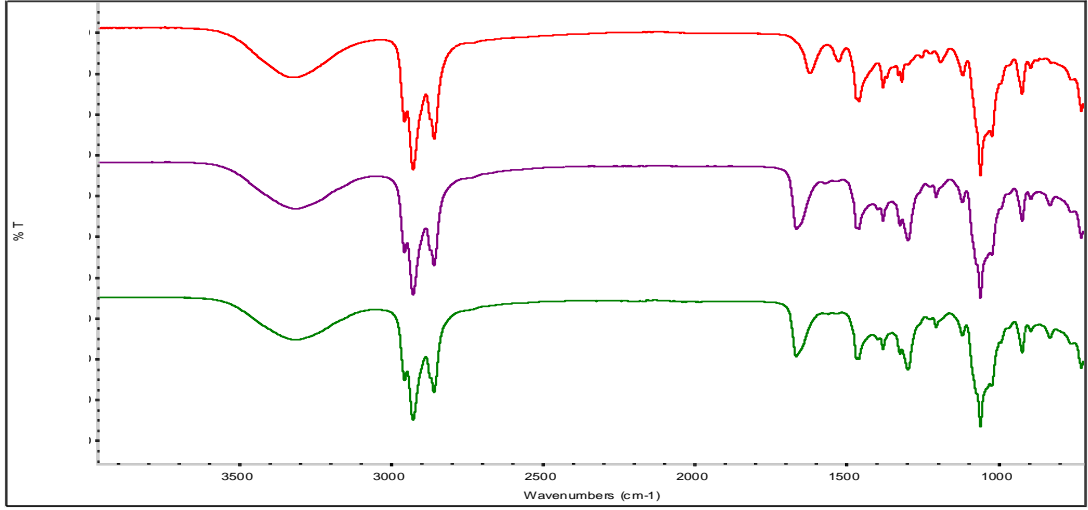
E.2. 32.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



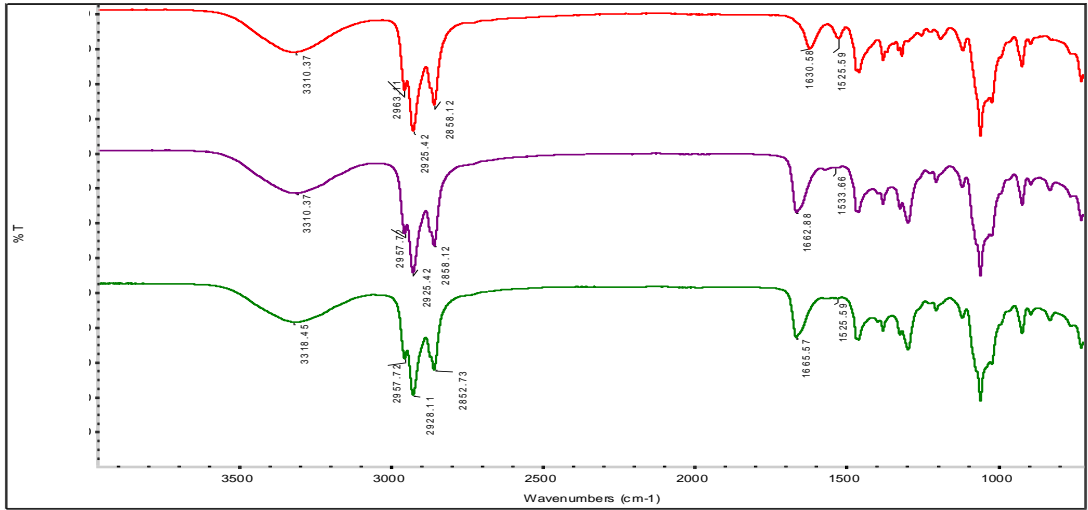
E.2. 33.Kütlice %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



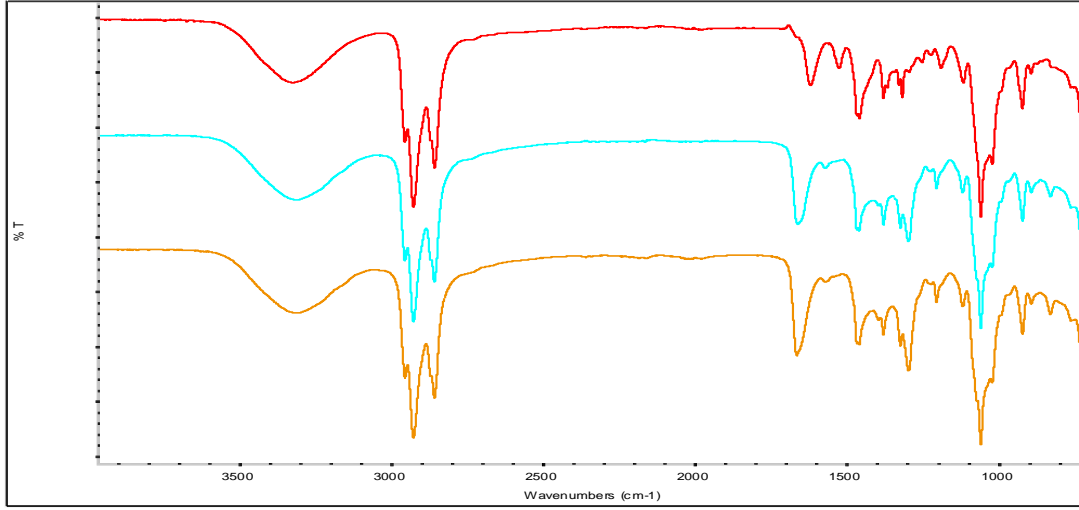
E.2. 34.Kütlice %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



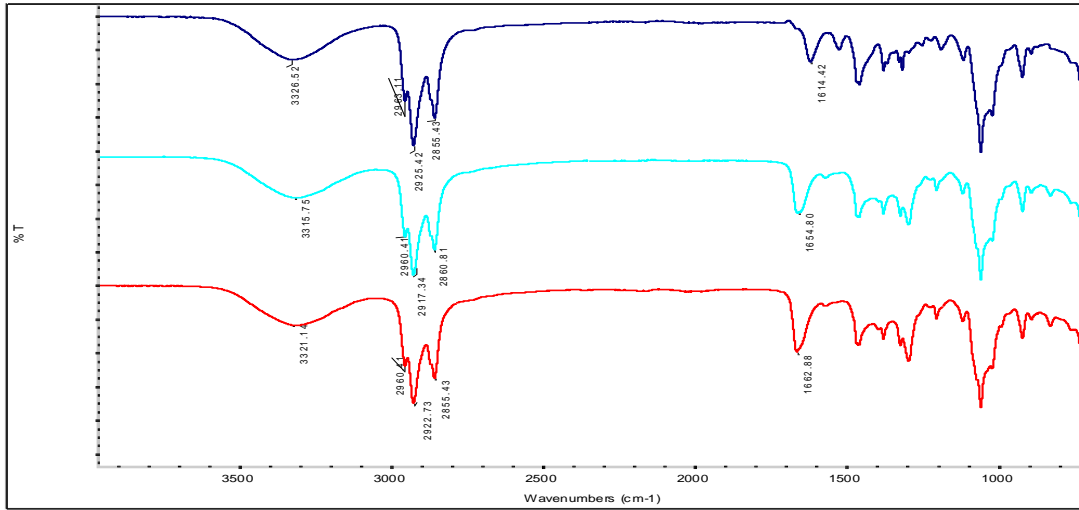
E.2. 35.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



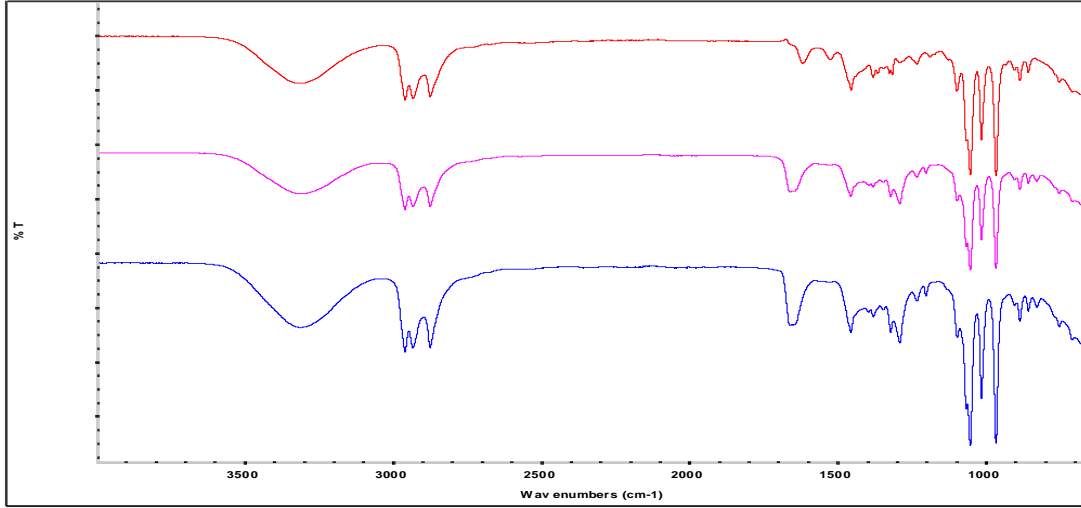
E.2. 36.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 60°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



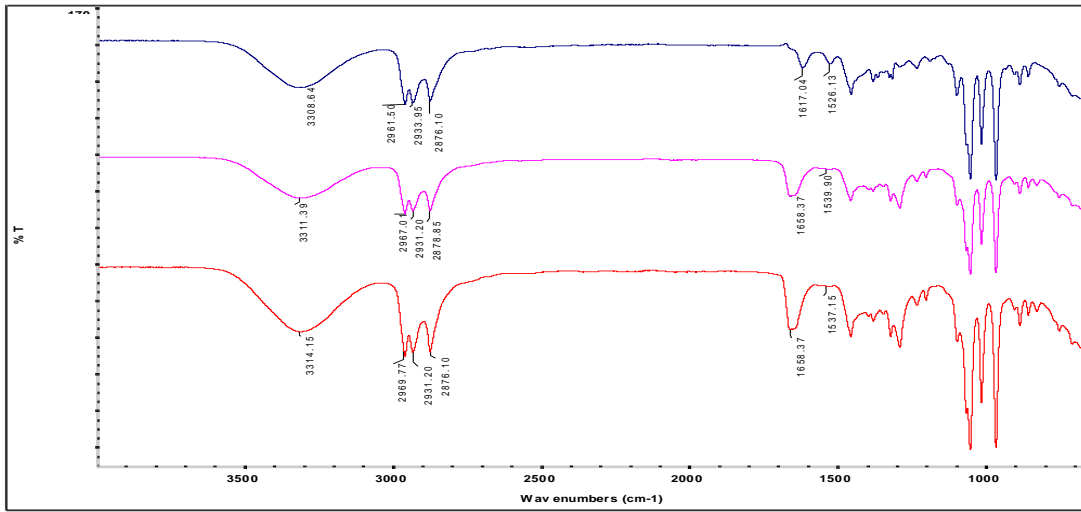
E.2. 37.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



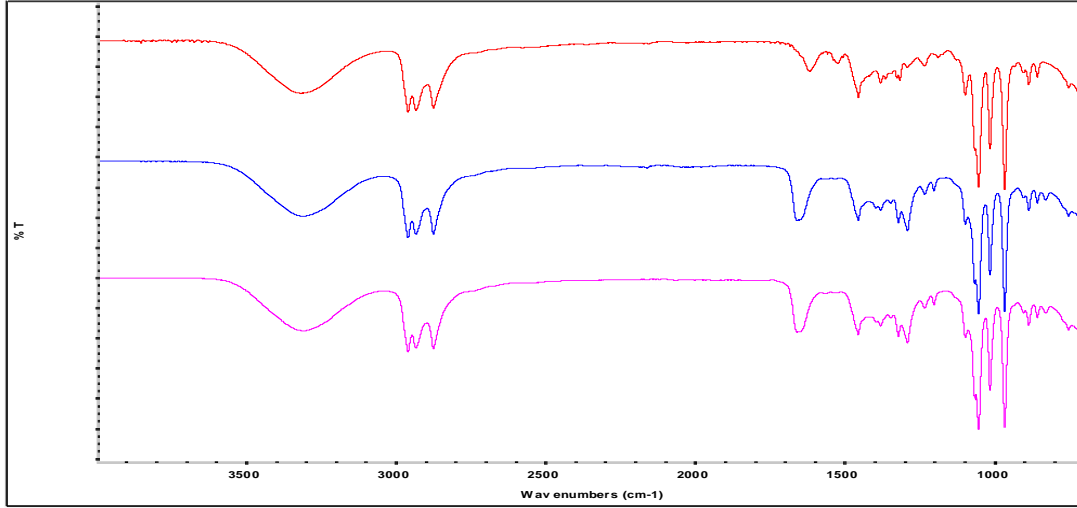
E.2. 38.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



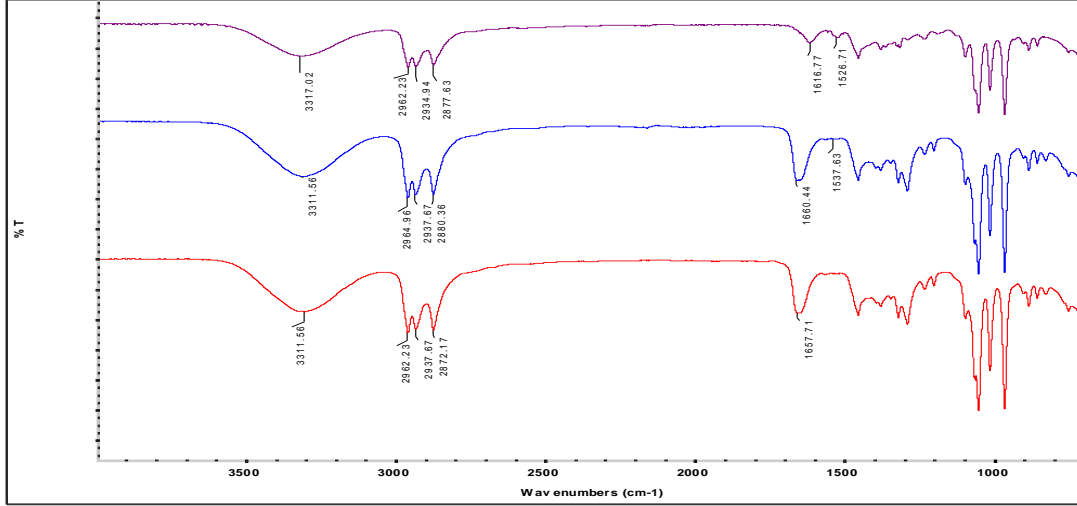
E.2. 39.Kütlice %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



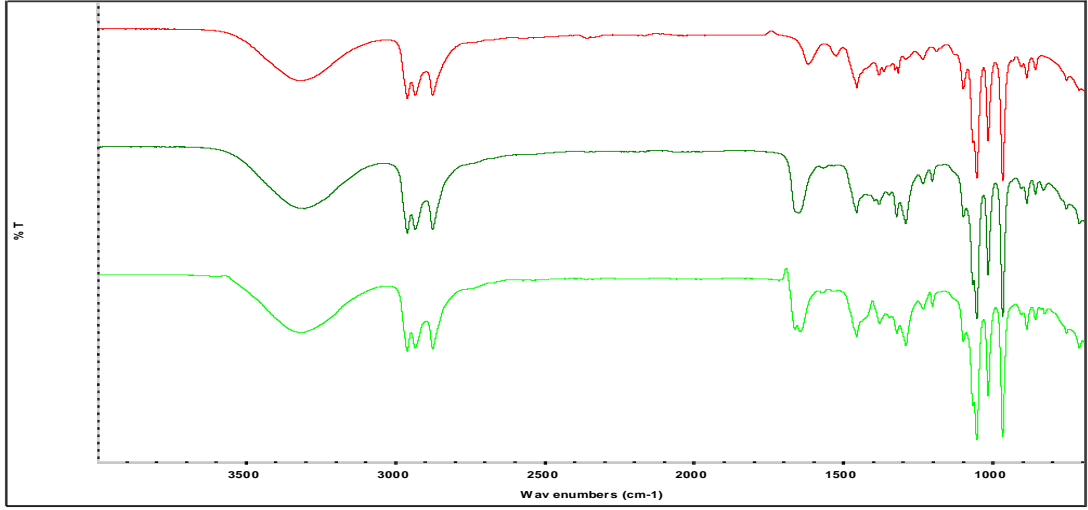
E.2. 40.Kütlice %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



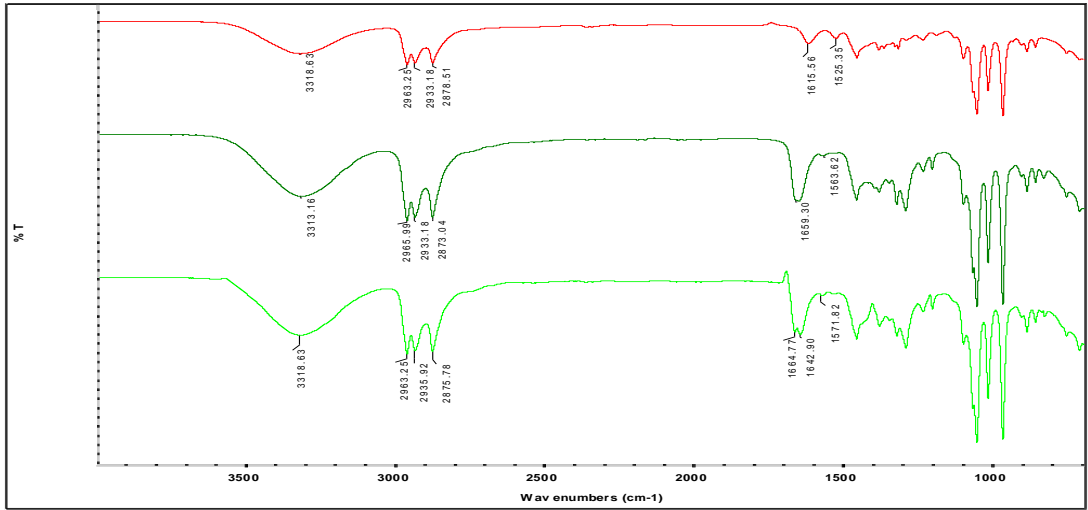
E.2. 41.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



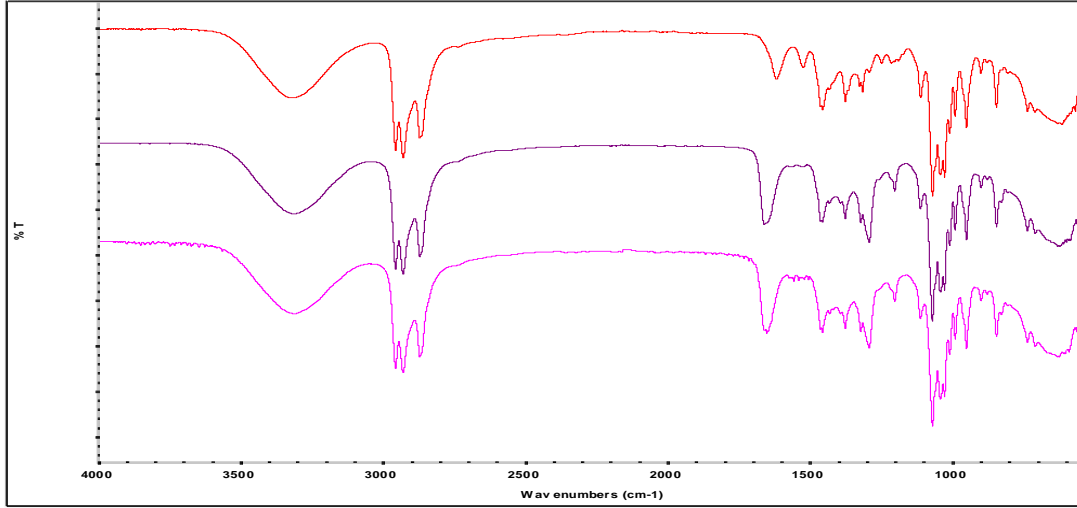
E.2. 42.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



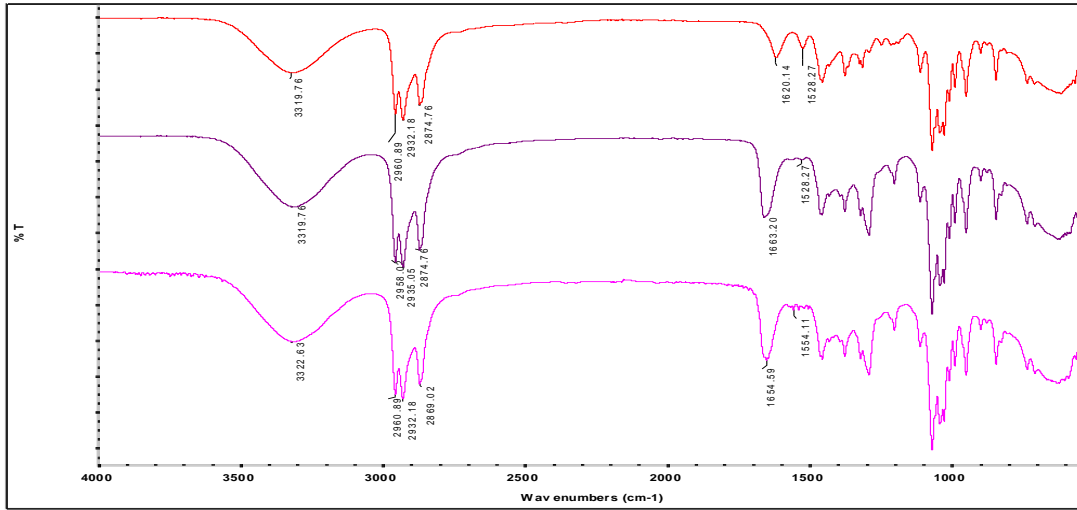
E.2. 43.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



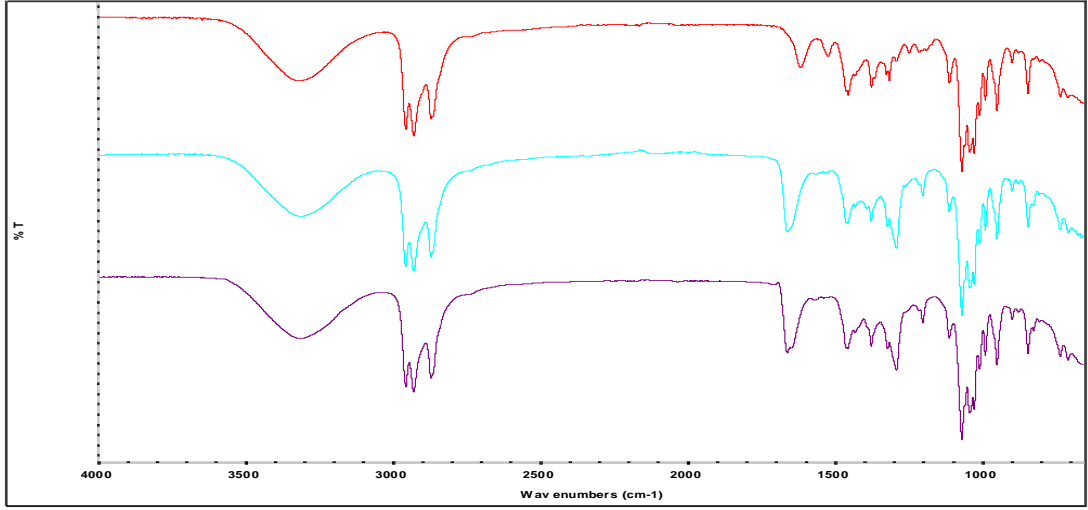
E.2. 44.Kütlece %10 TBD 1-Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



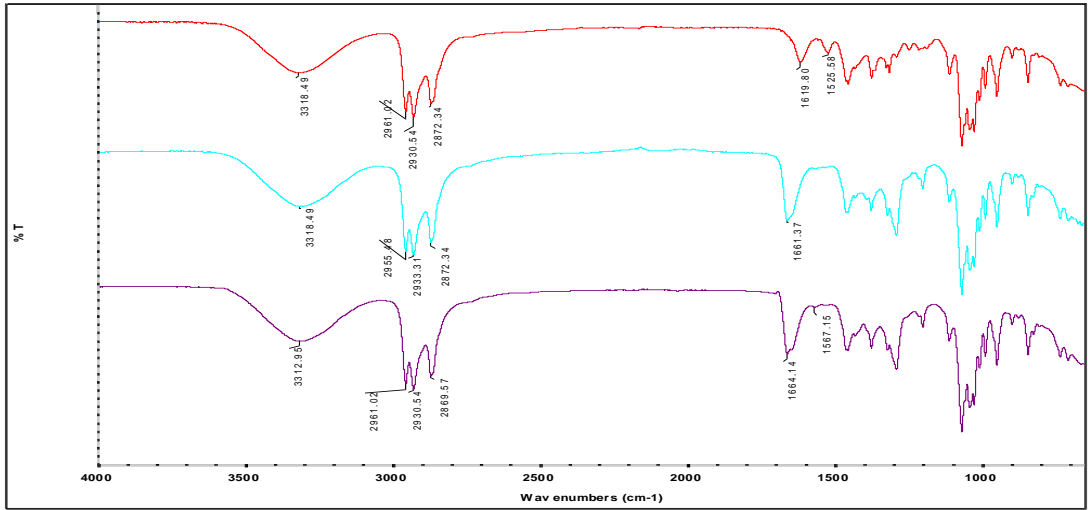
E.2. 45.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



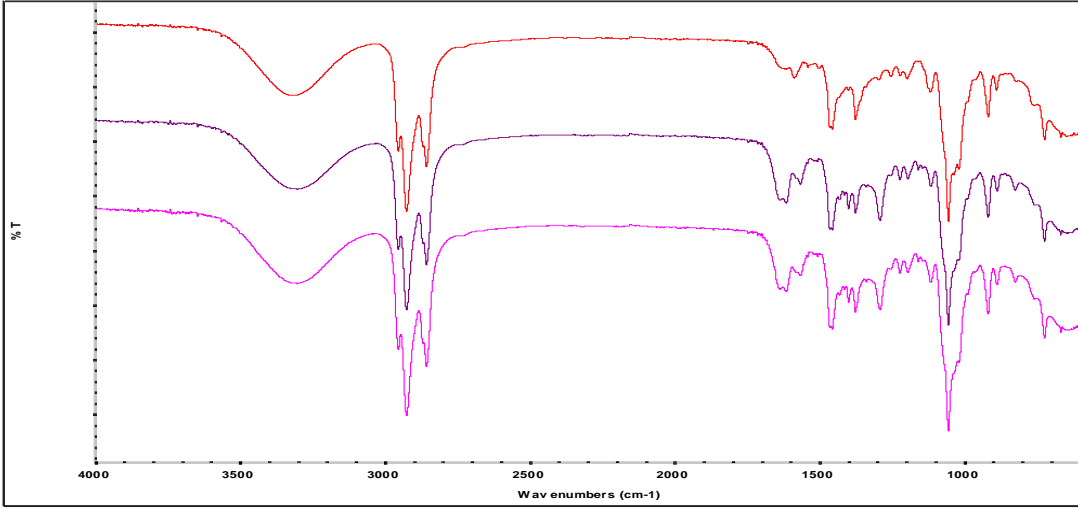
E.2. 46.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 70°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



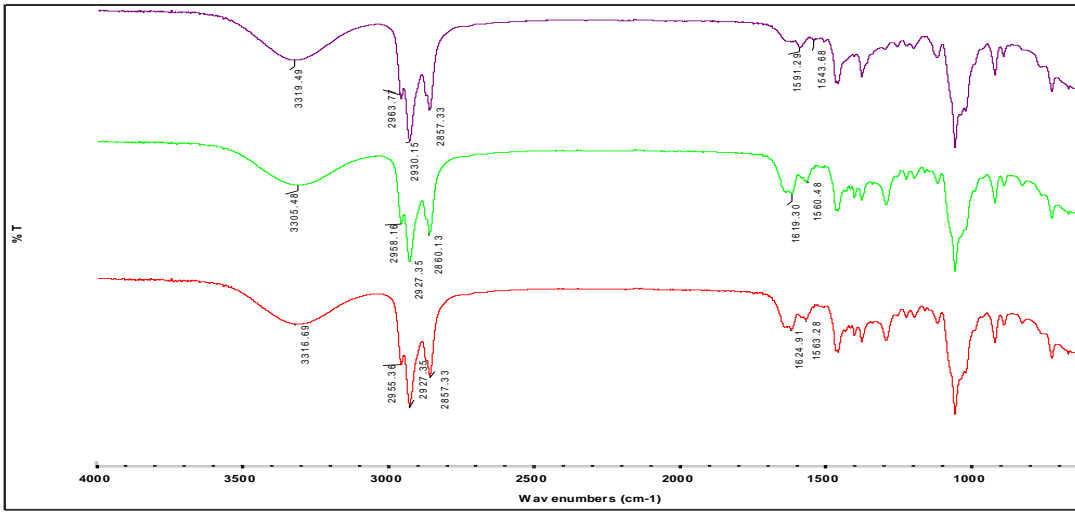
E.2. 47.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



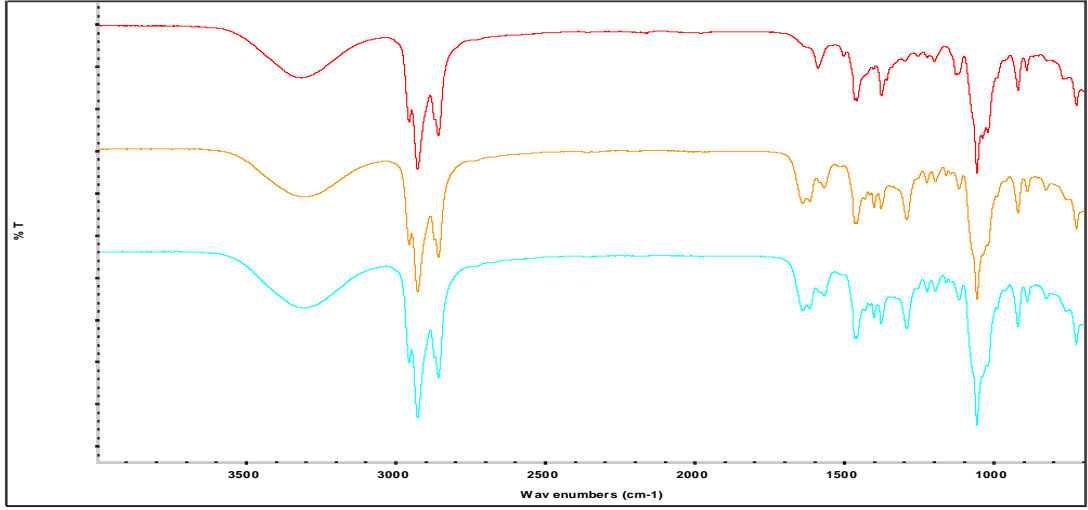
E.2. 48.Kütlece %10 TBD 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



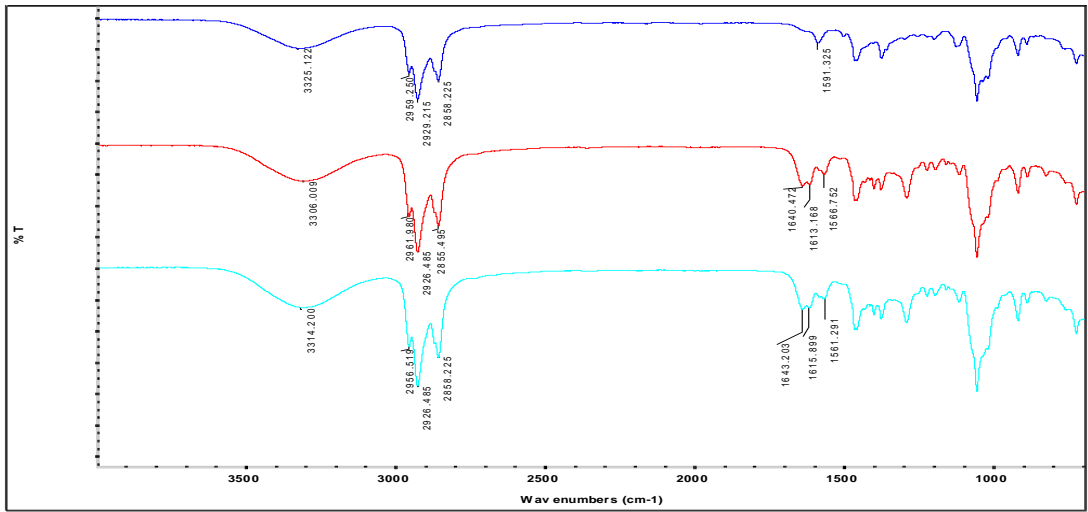
E.2. 49.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



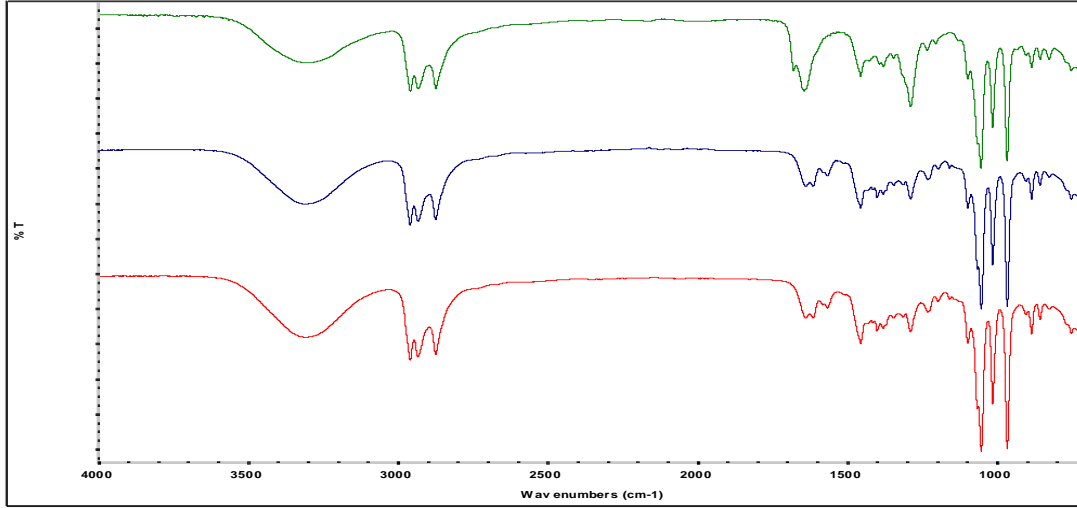
E.2. 50.Kütlece %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%100, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



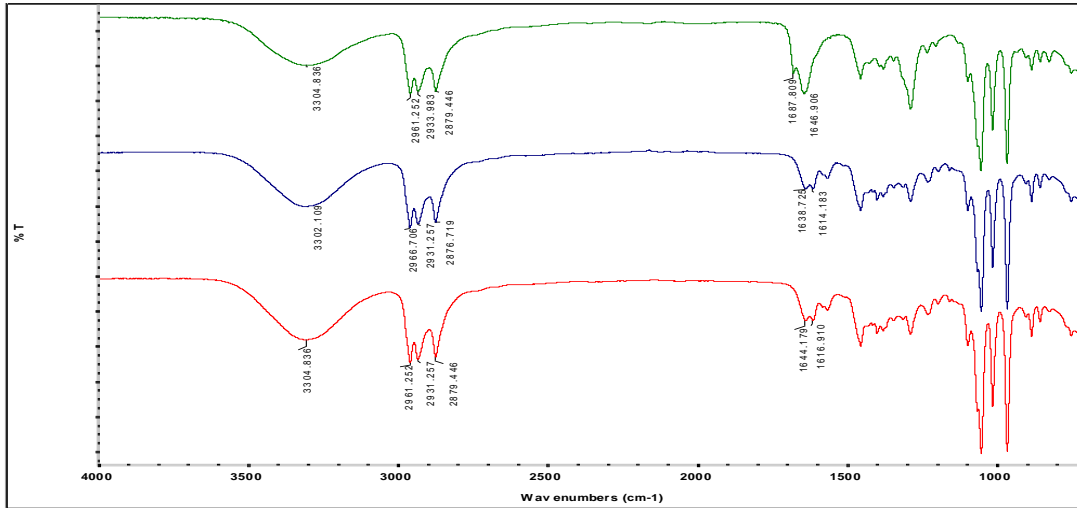
E.2. 51.Kütlice %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



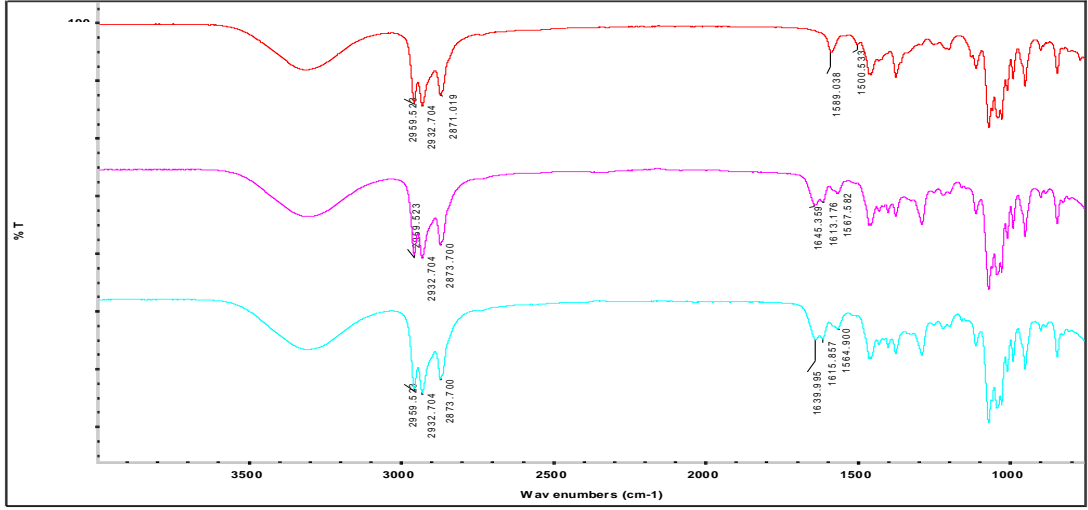
E.2. 52.Kütlice %10 BTMG 1- Hekzanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları



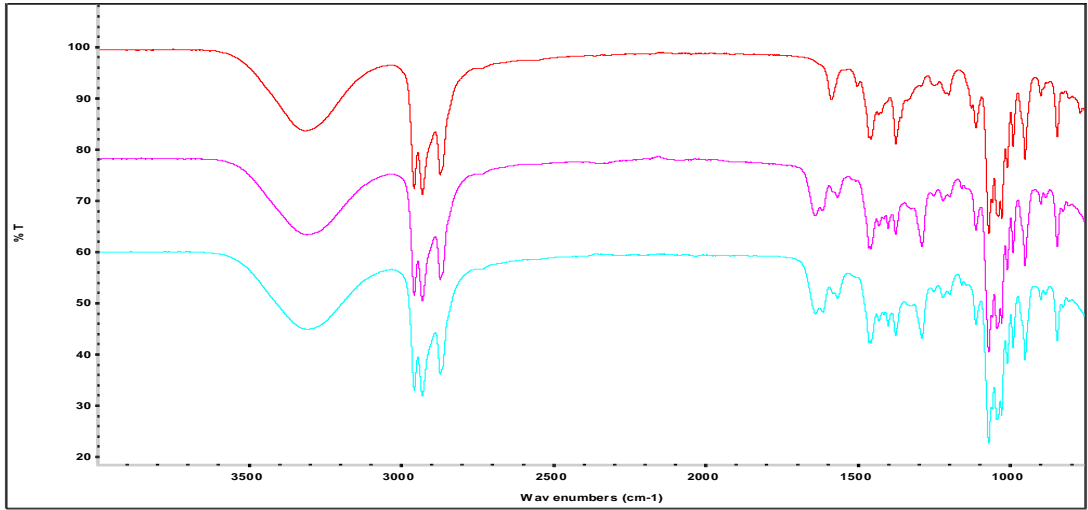
E.2. 53.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları



E.2. 54.Kütlece %10 BTMG 1- Propanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları

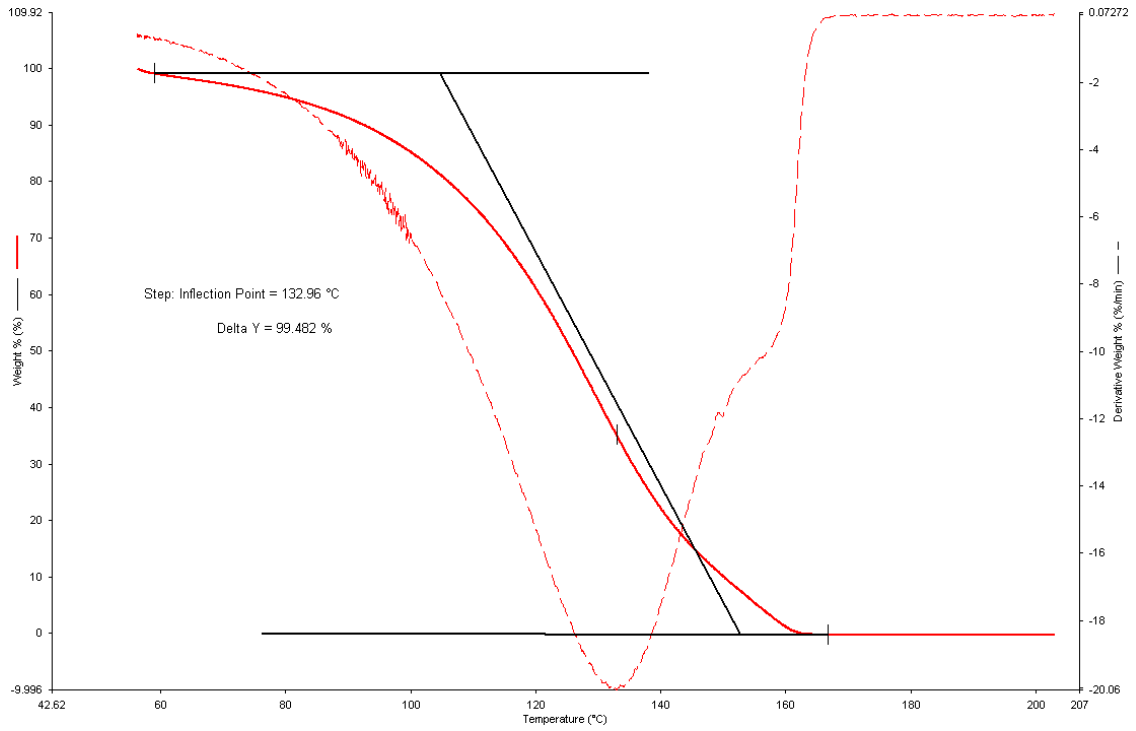


E.2. 55Küttelece %10 BTMG 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası FT-IR analiz sonuçları

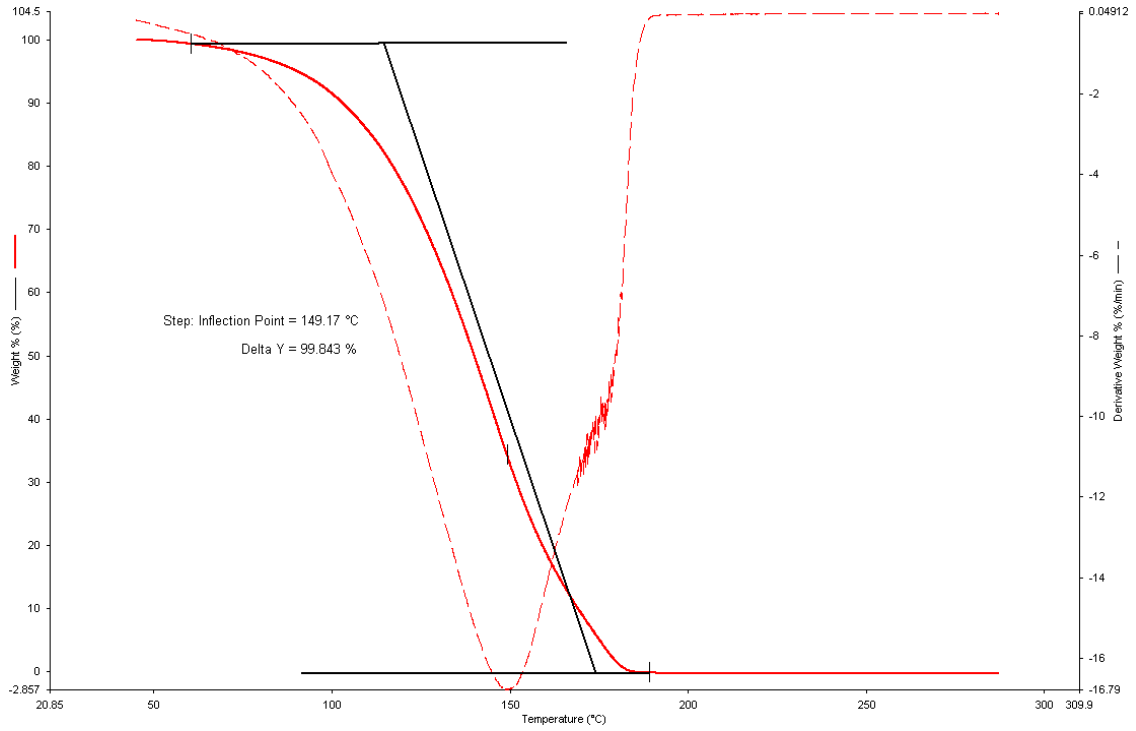


E.2. 56.Küttelece %10 BTMG 1- Bütanol Sistemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla; saf çözelti, ilk absorpsiyon ve ilk desorpsiyon (%80, 80°C) sonrası (pikli) FT-IR analiz sonuçları

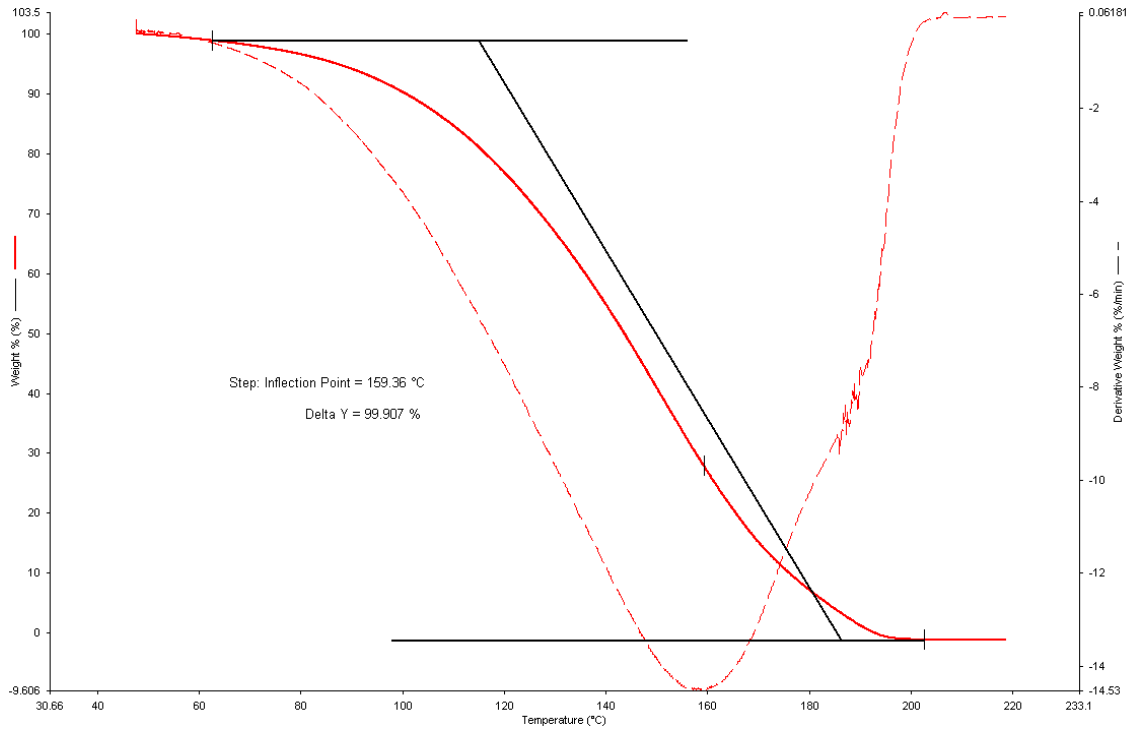
EK 3 – TGA Sonuçları



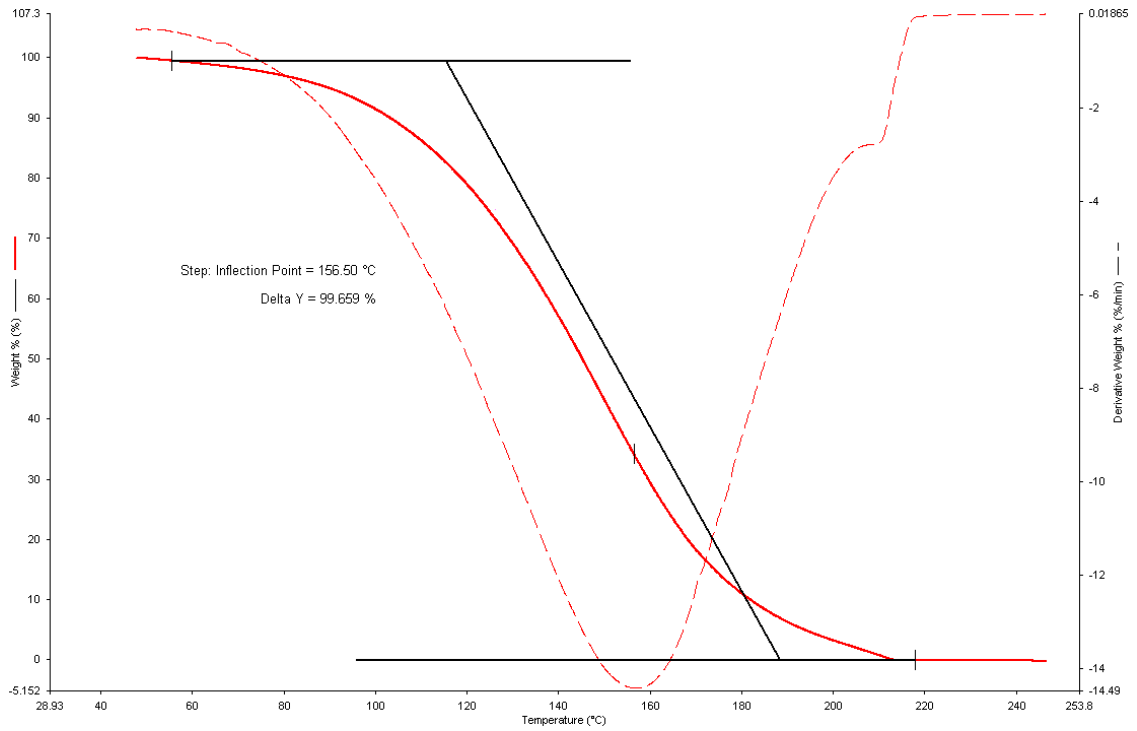
E.3. 1.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



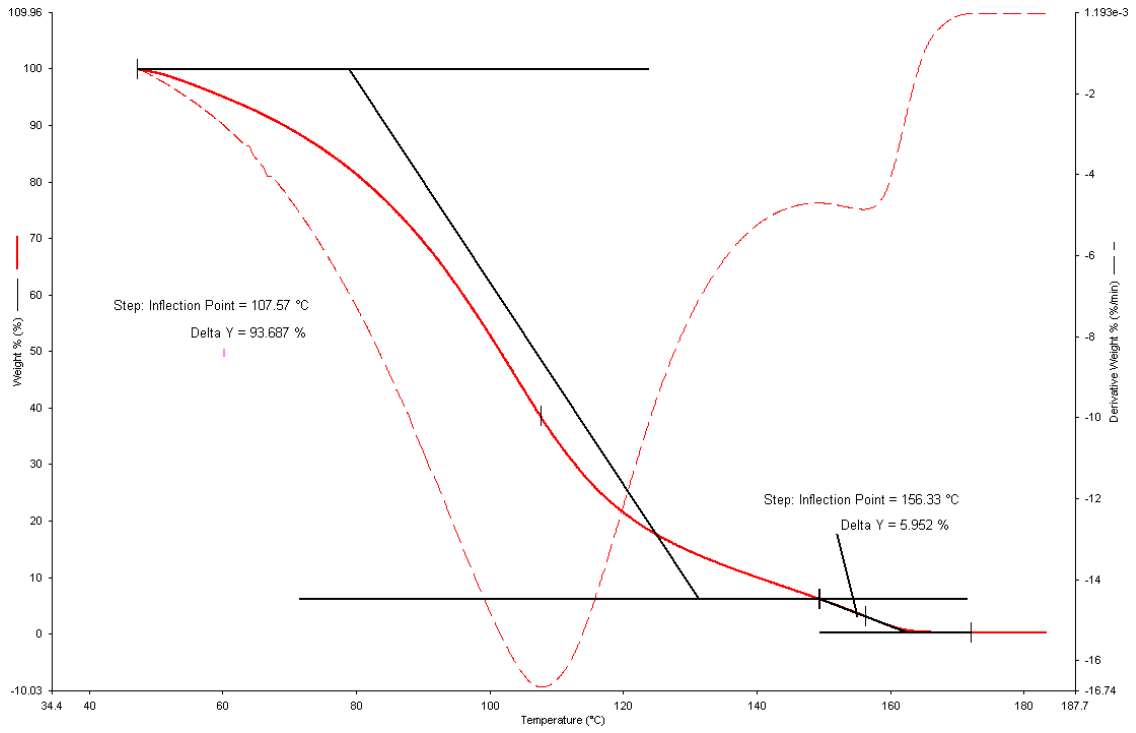
E.3. 2.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği



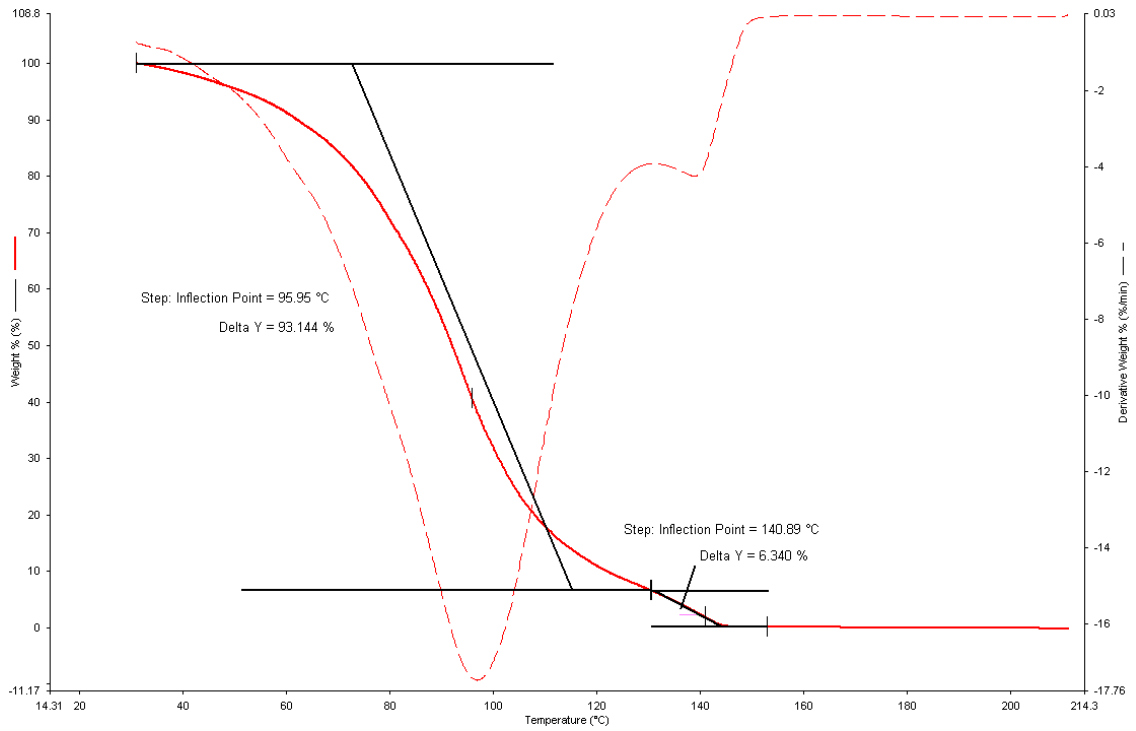
E.3. 3.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği



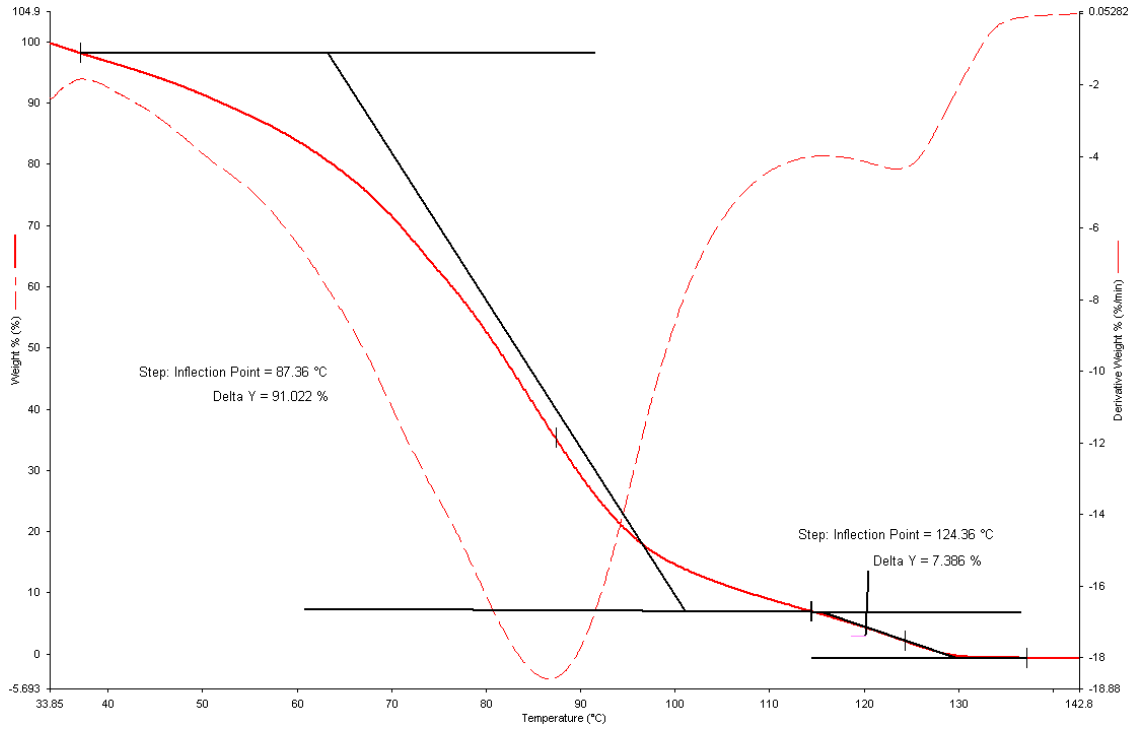
E.3. 4.Kütlece %10 DBN 1-Hekzanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği



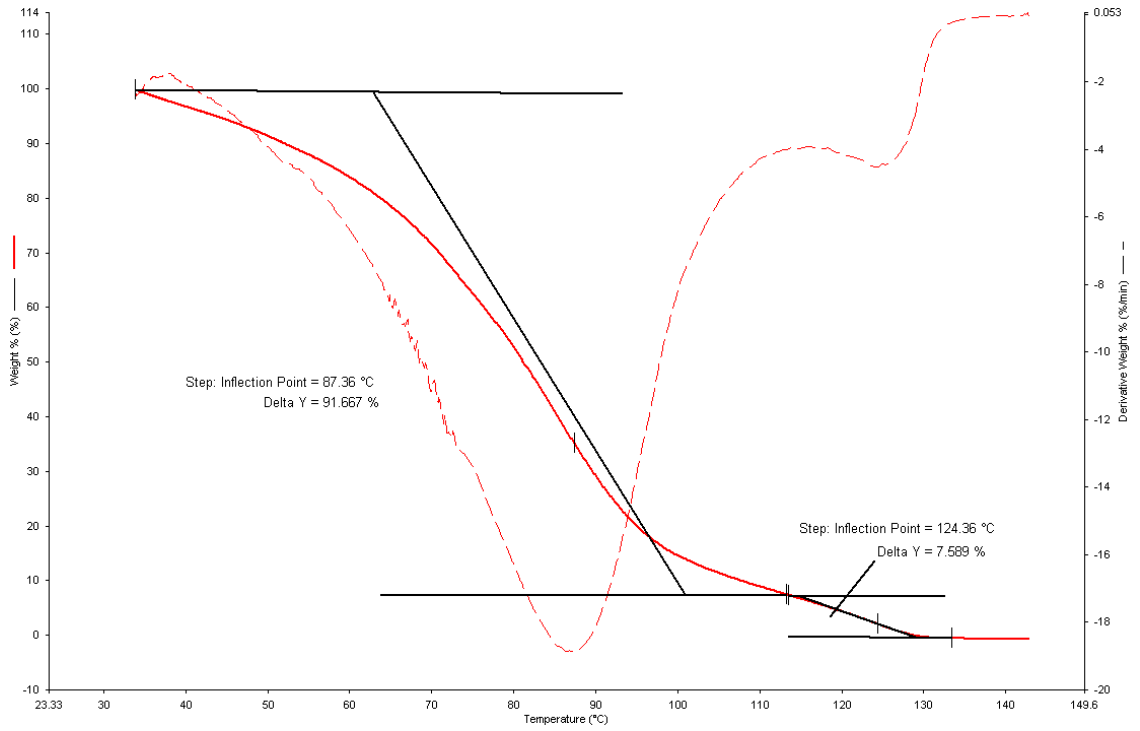
E.3. 5.Küttelece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



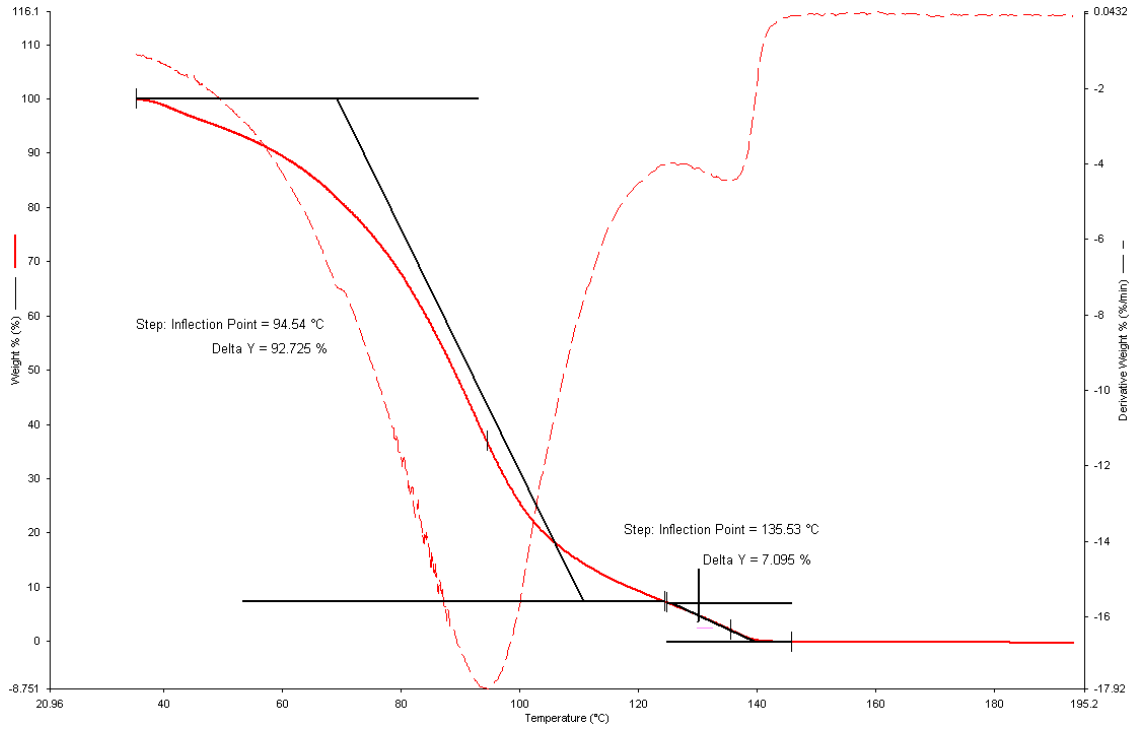
E.3. 6.Küttelece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği



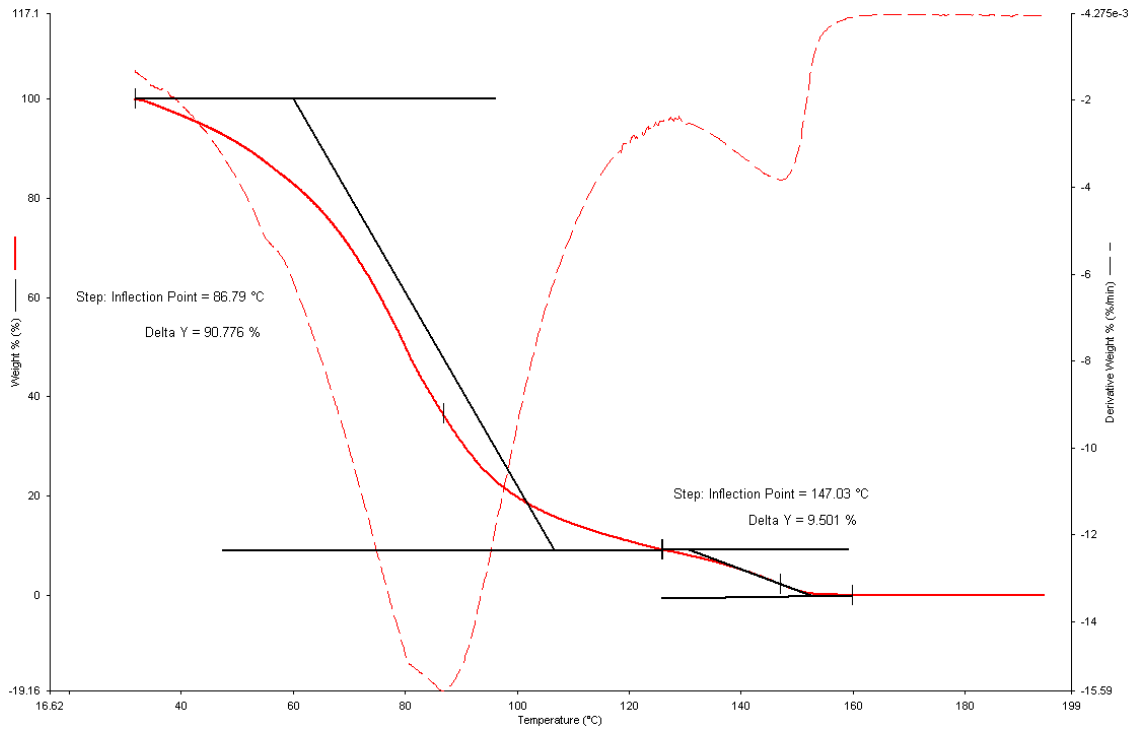
E.3. 7.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%100, 60°C) TGA Grafiği



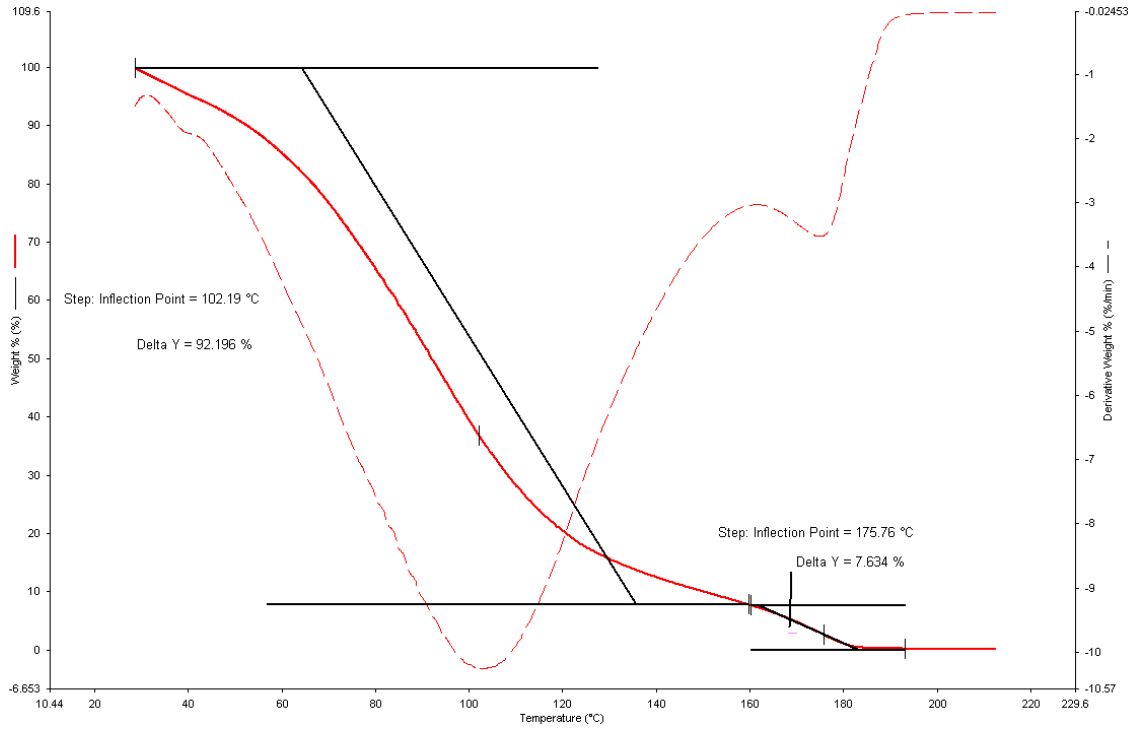
E.3. 8.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği



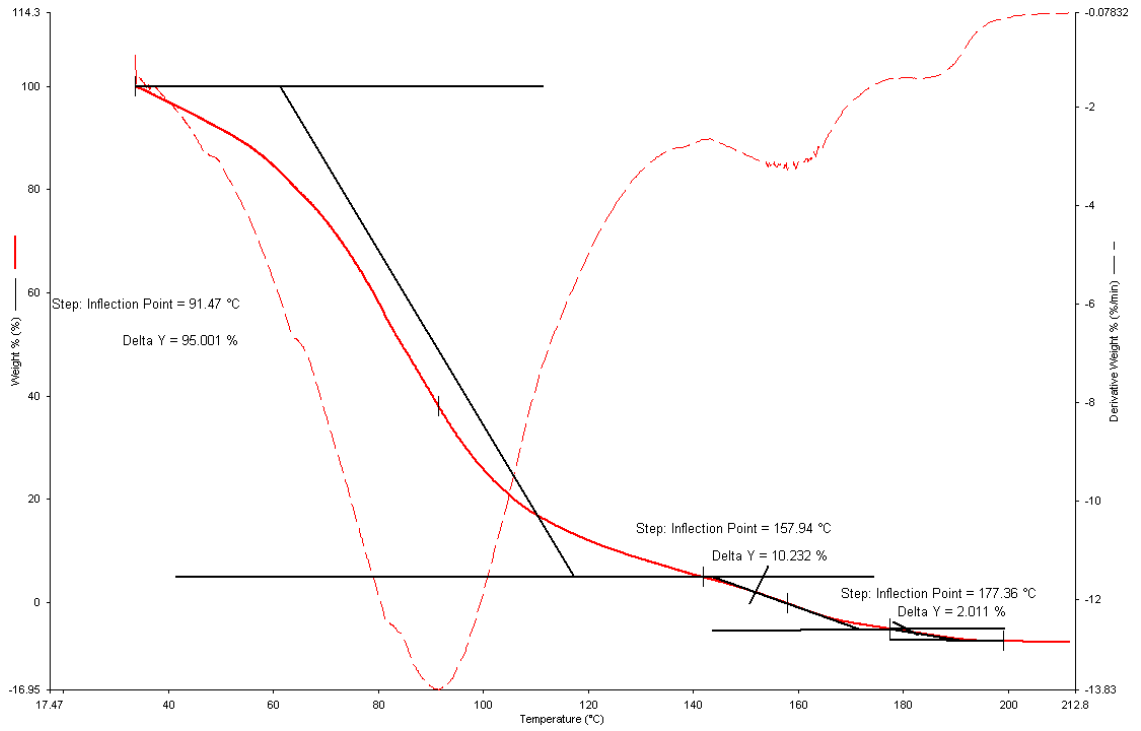
E.3. 9.Kütlece %10 DBN 1-Bütanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği



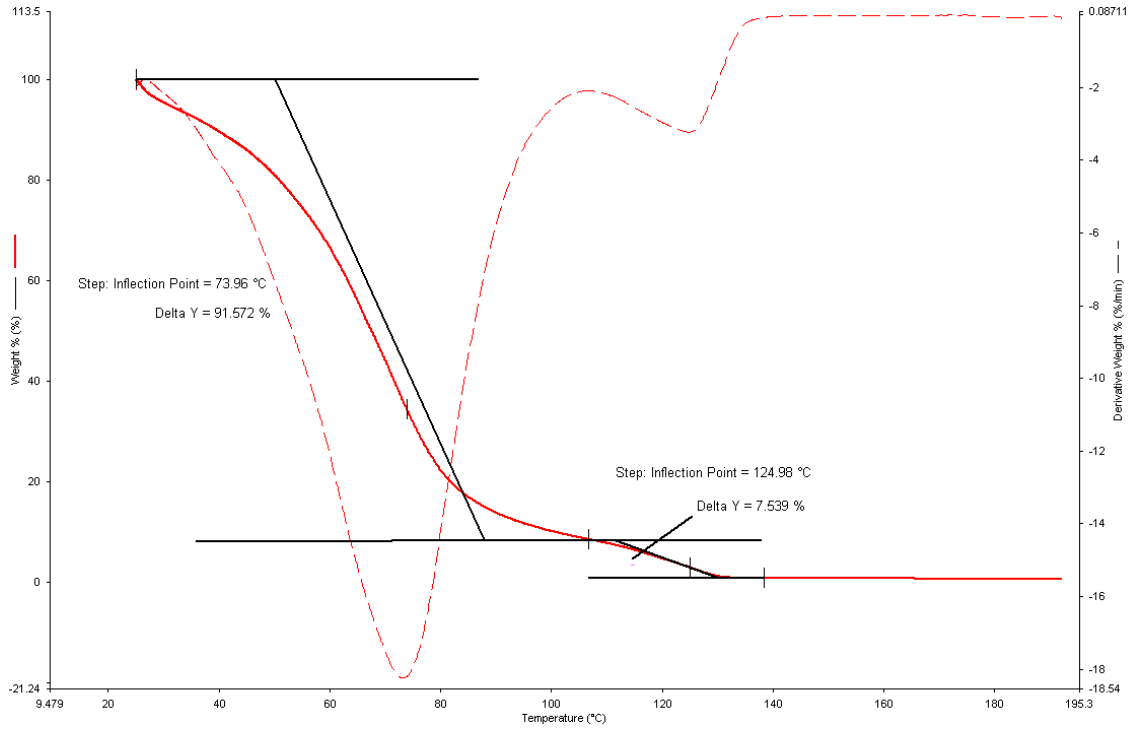
E.3. 10.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği



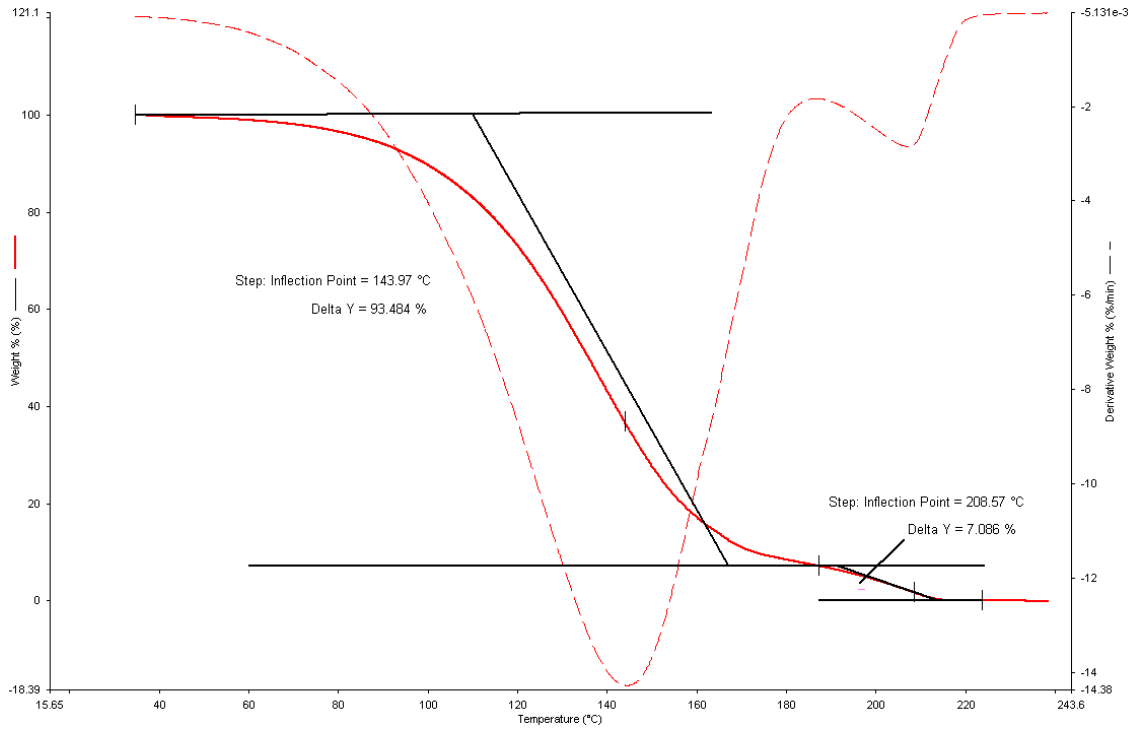
E.3. 11.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%100, 60°C) TGA Grafığı



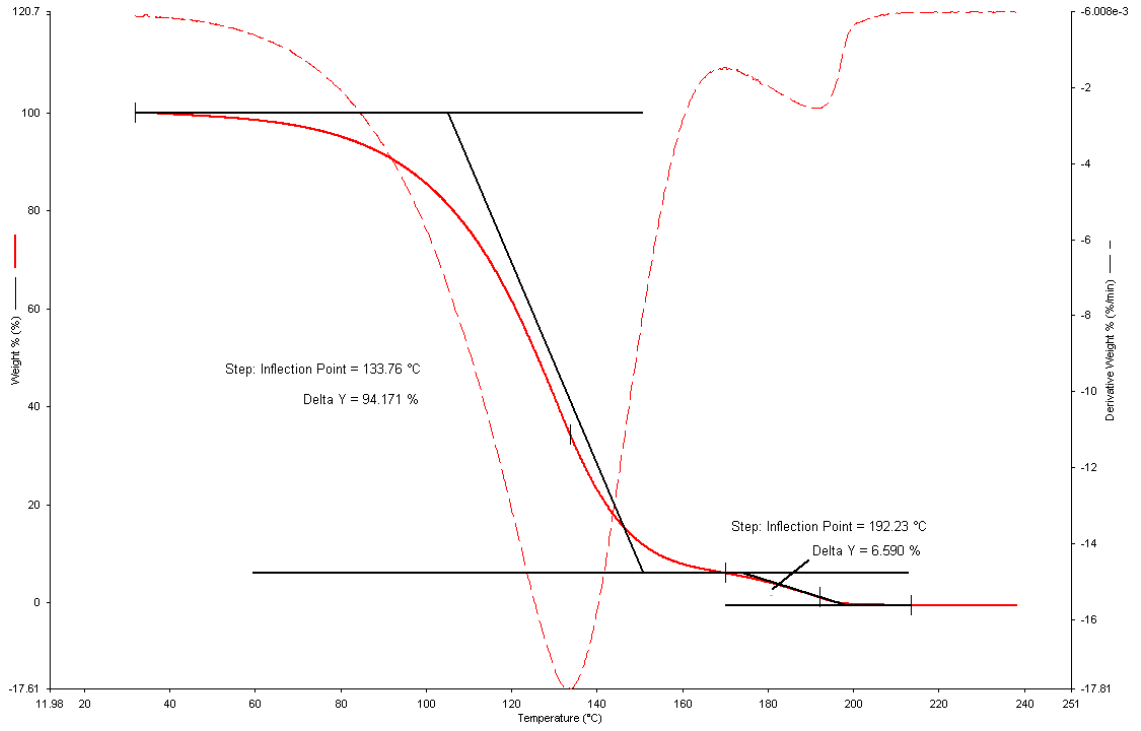
E.3. 12.Kütlece %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafığı



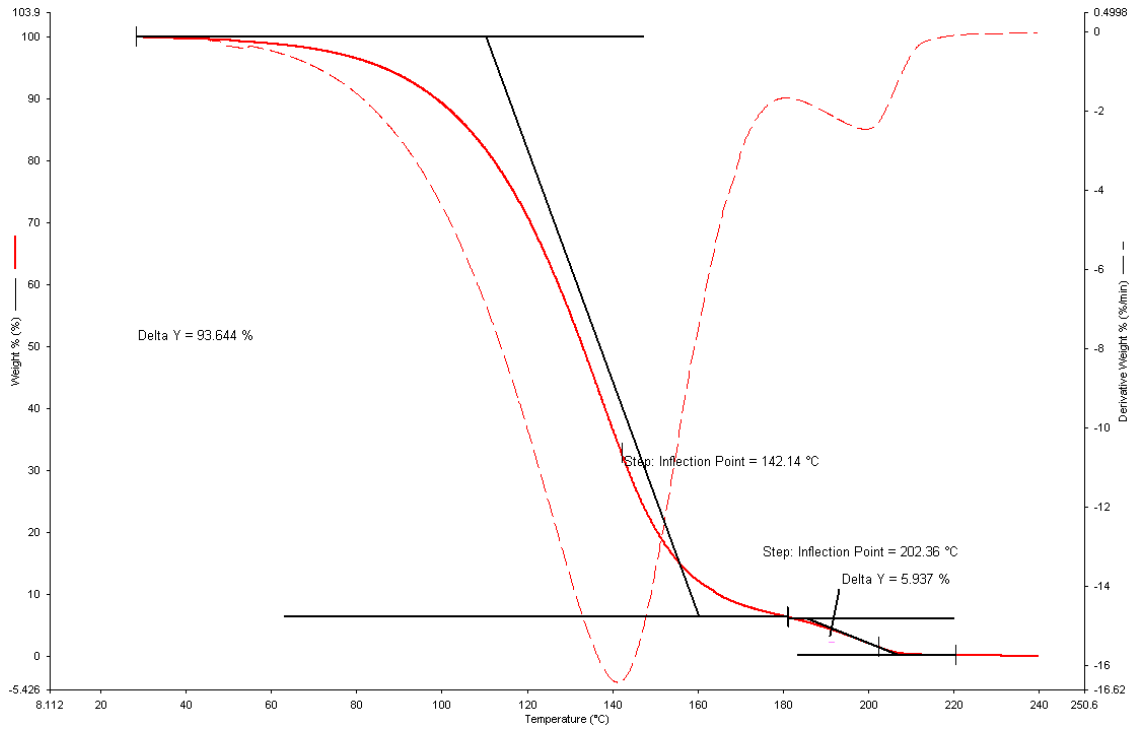
E.3. 13.Kütüce %10 DBN 1-Propanol sisteminin (%60, 80°C) TGA Grafiği



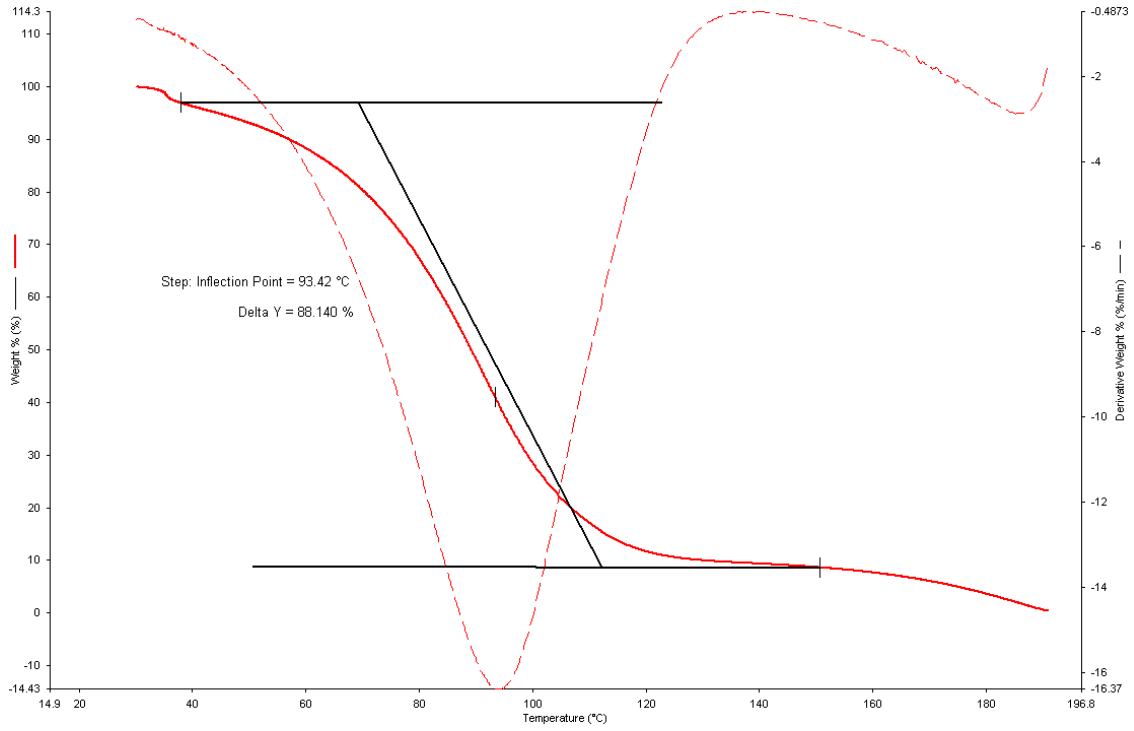
E.3. 14.Kütüce %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



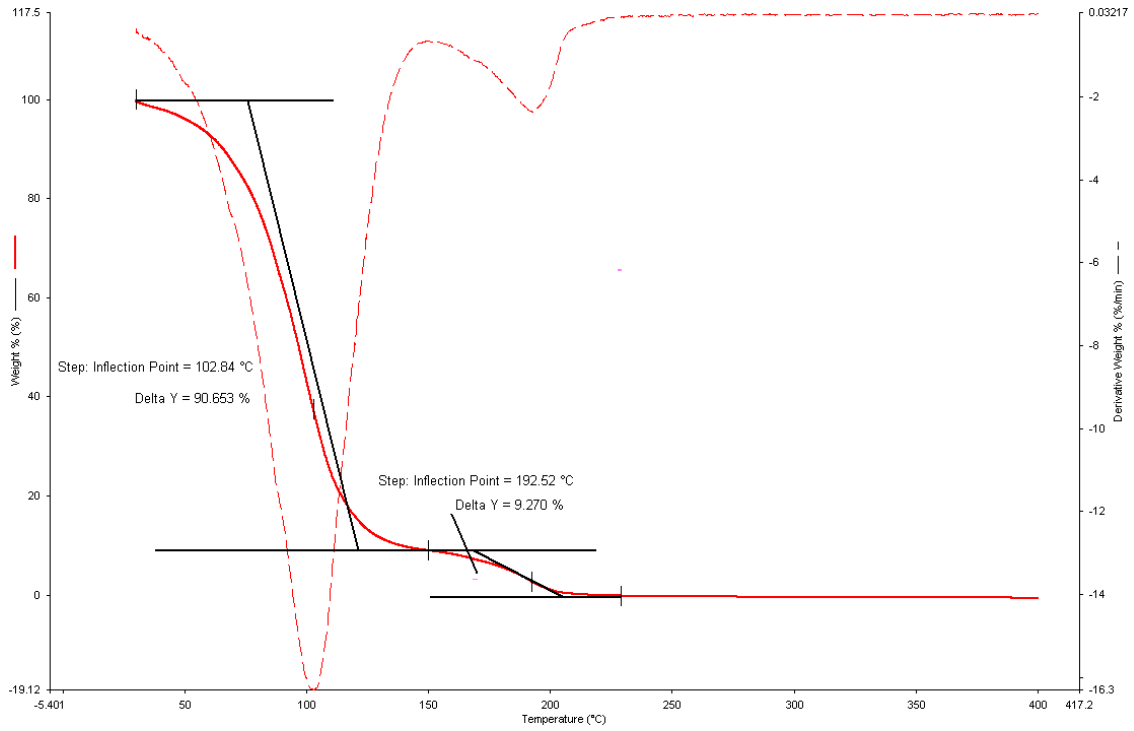
E.3. 15.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (% 100, 70°C) TGA Grafiği



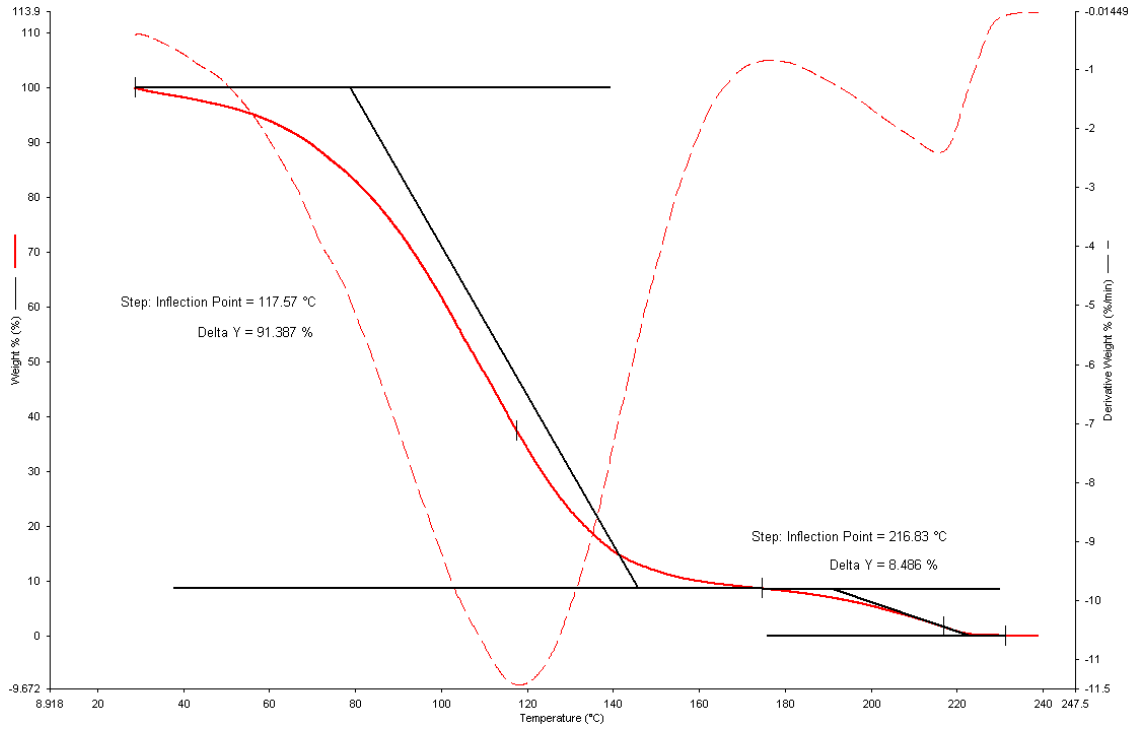
E.3. 16.Kütlece %10 TBD 1-Hekzanol sisteminin (% 100, 60°C) TGA Grafiği



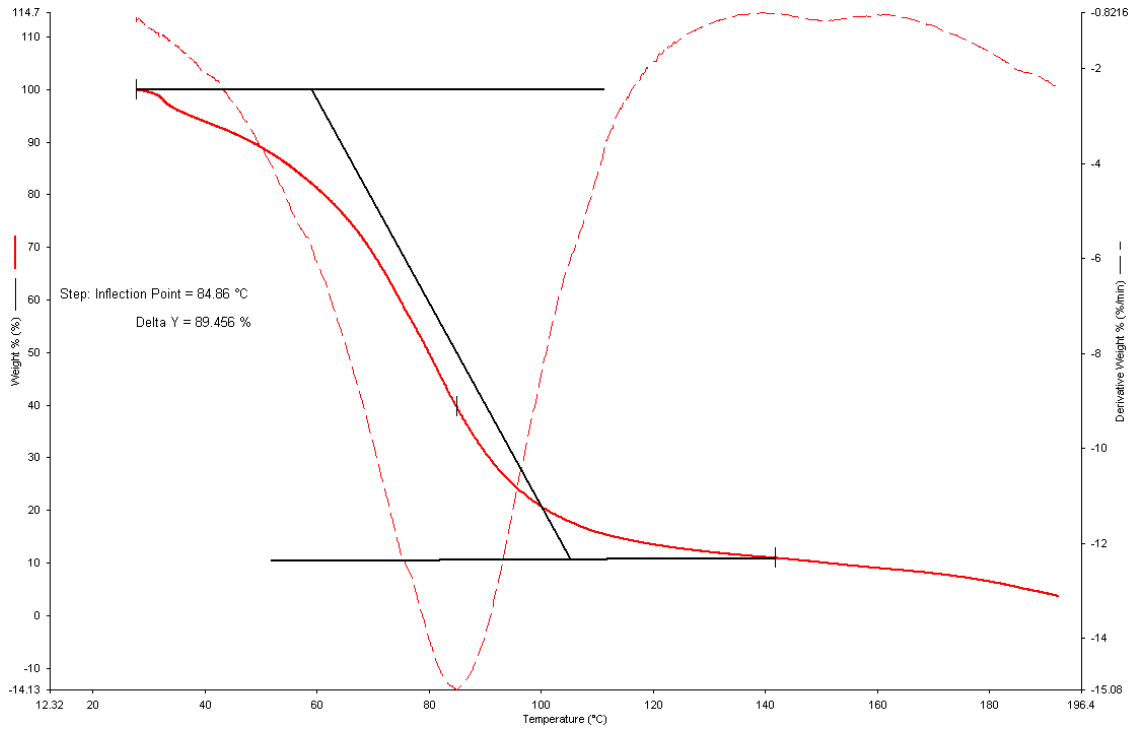
E.3. 17.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



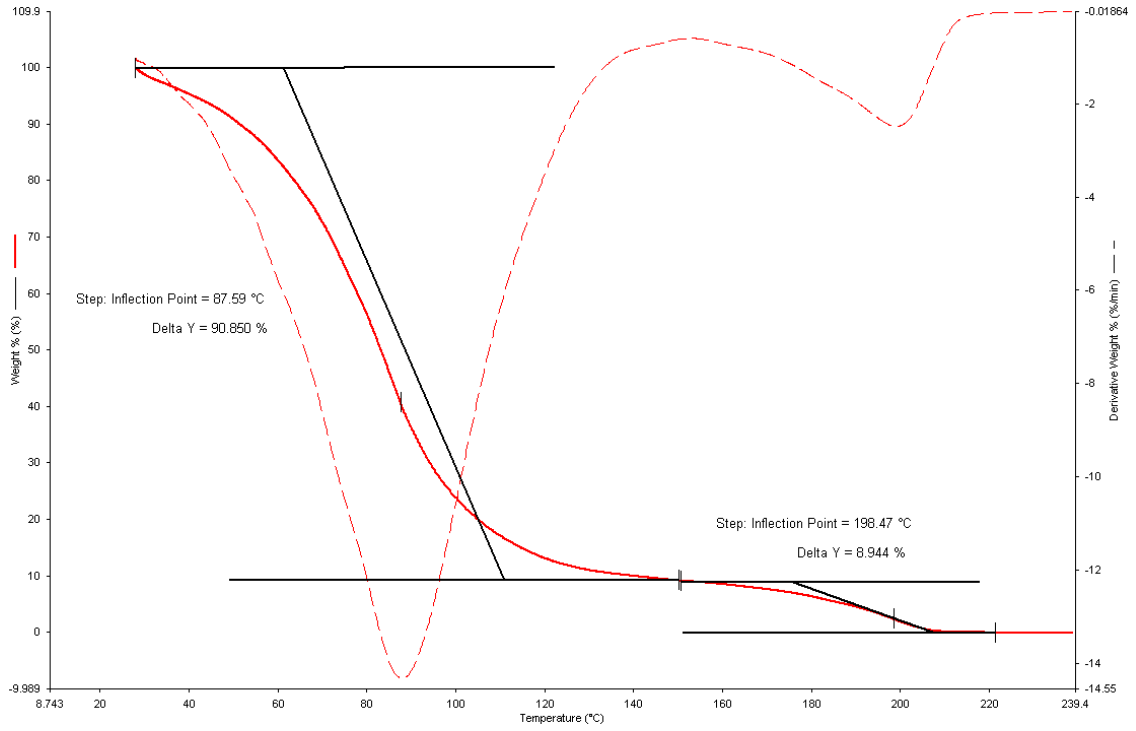
E.3. 18.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği



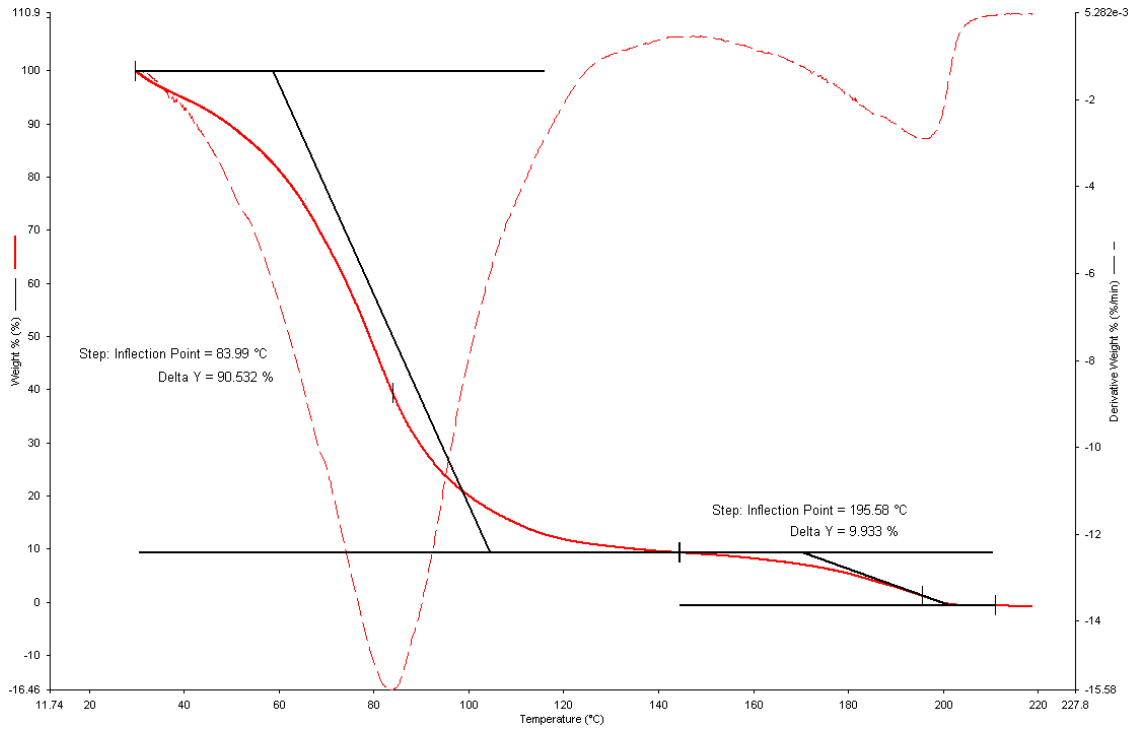
E.3. 19.Kütlece %10 TBD 1-Bütanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği



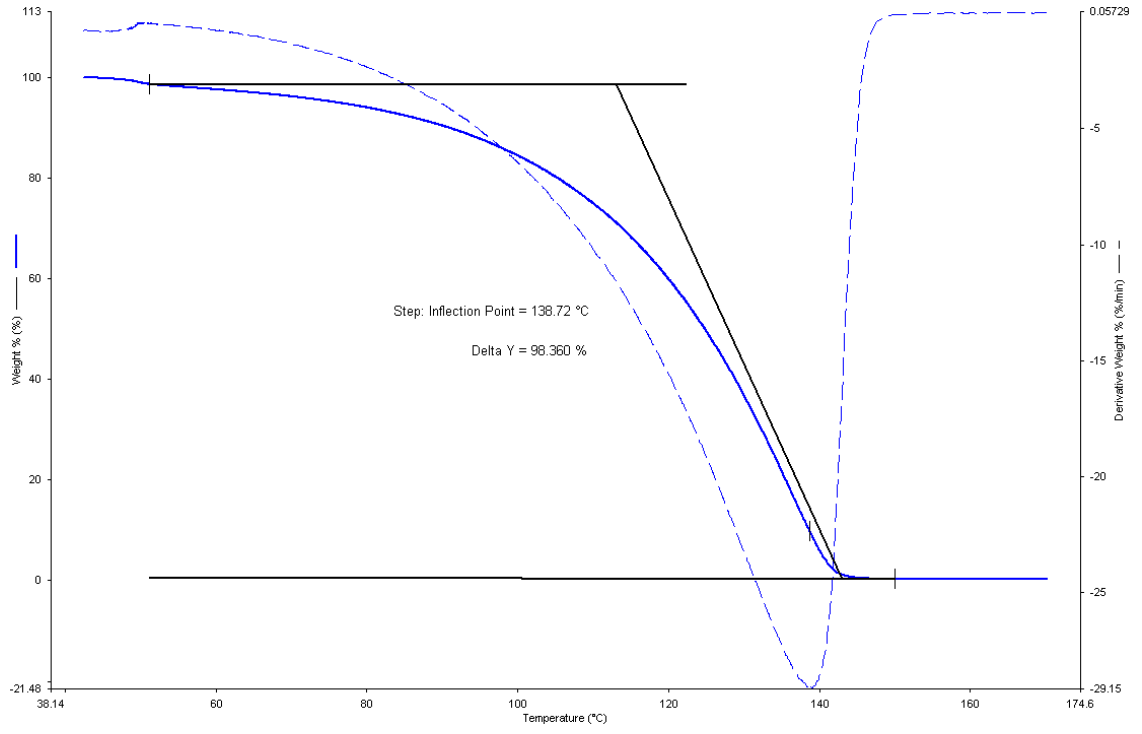
E.3. 20.Kütlece %10 TBD 1-Propanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



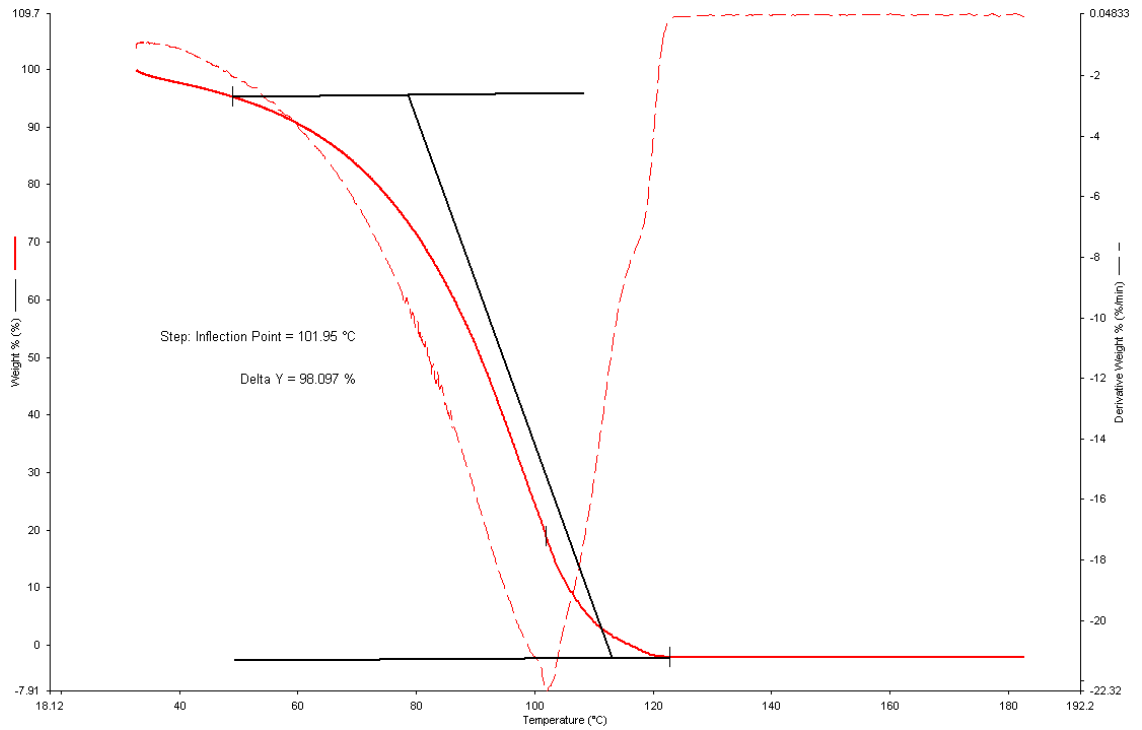
E.3. 21.Kütlece %10 TBD 1-Propanol sisteminin (%100, 70°C) TGA Grafiği



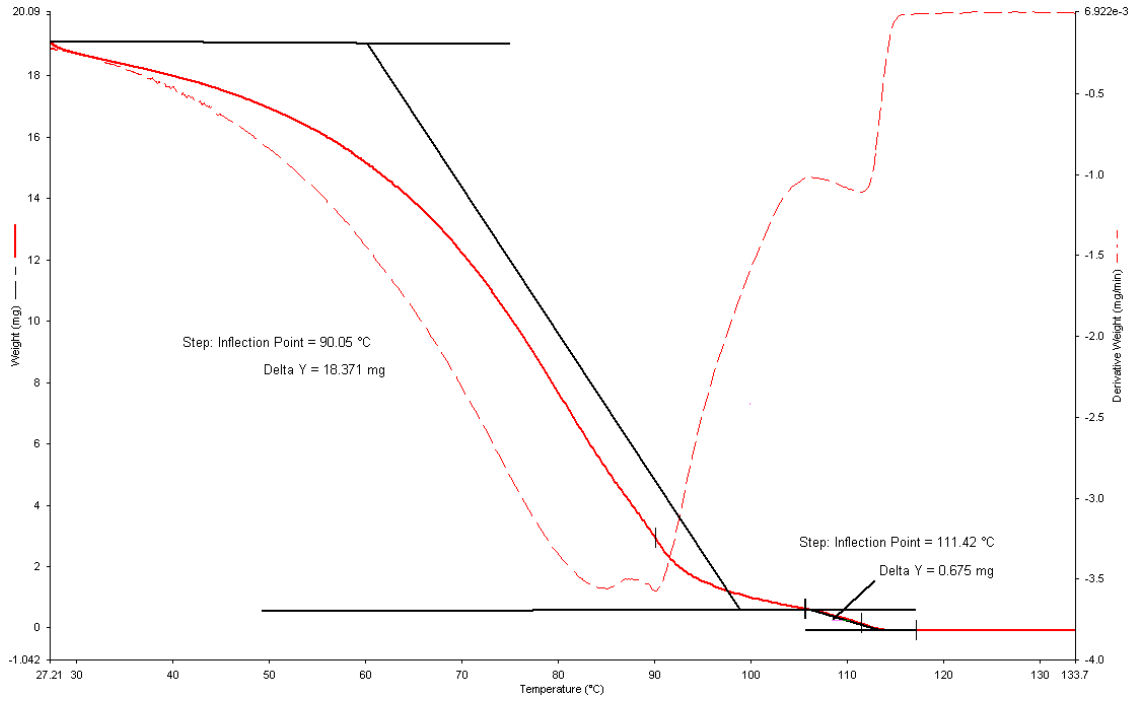
E.3. 22.Kütlece %10 TBD 1-Propanol sisteminin (%80, 80°C) TGA Grafiği



E.3. 23.Kütlece %10 BTMG 1-Hekzanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



E.3. 24.Kütlece %10 BTMG 1-Bütanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği



E.3. 25.Kütlece %10 BTMG 1-Propanol sisteminin (%100, 80°C) TGA Grafiği

EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

Yuksel-Orhan, O., Keles, Y., Yavuz-Ersan, H., Alper, E. Ultrasound-assisted Desorption of CO₂ from Carbon Dioxide Binding Organic Liquids. 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18, 2016.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 11/07/2019

Tez Başlığı / Konusu: Yeni Geliştirilen Karbondioksit Tutan Organik Sıvıların Absorpsiyon ve Ultrasonik Desorpsiyon Performanslarının İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 65 sayfalık kısmına ilişkin, 09./07./2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'mı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

11/07/2019
Yasemin

Adı Soyadı: Yasemin KELEŞ YAVUZ
Öğrenci No: N14324115
Anabilim Dalı: Kimya Mühendisliği
Programı: Tezli Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Hülya YAVUZ ERSAN
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yasemin Keleş
Doğum yeri : Beypazarı
Doğum tarihi : 11/10/1991
Medeni hali : Evli
Yazışma adresi : Gülseren Sokak 24/6 Anıttepe Ankara
Telefon : 0507 382 85 07
Elektronik posta adresi : yaseminkeles91@gmail.com
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü,
2014
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü,
2019

İş Tecrübesi

2017-.....: SDT Uzay ve Savunma Teknolojileri A.Ş
2016-2017: Ekodenge Danışmanlık Mühendislik A.Ş
2015-2016: AFS Boru Sanayi A.Ş