İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STABİLİZASYON AŞAMASI OLMADAN KARBON KÖPÜK ÜRETİMİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Müh. Esra IŞIKSAL

Anabilim Dalı : Kimya Mühendisliği

Programı : Kimya Mühendisliği

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STABİLİZASYON AŞAMASI OLMADAN KARBON KÖPÜK ÜRETİMİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çevre Müh. Esra IŞIKSAL
(506041017)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Ferhat YARDIM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ (IÜ)
Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL (İTÜ)

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklarda AR Mezofaz zifften stabilizasyon aşaması atlanılarak karbon köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi ve basınç boşaltım süreleri değiştirilmiş ayrıca hammaddeye ağırlıkça farklı oranlarda Güneydoğu Anadolu asfaltiti ilave edilerek üretilen karbon köpüklerin yapısal özellikleri, yoğunluk, dayanım ve porozite değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

Öncelikle, hazırlık ve deneysel aşamalarda, yardımını ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Ferhat YARDIM'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca, akademik ve kişisel tavsiyelerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ'ye teşekkür ederim.

Desteklerinden dolayı Araş. Gör. Ayşenur GÜL'e, karakterizasyon işlemleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Kimya Yük. Müh. IşıkYavuz'a, basma dayanımı ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Araş. Gör. Özgür ÇELİK'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında aynı laboratuarı paylaştığım arkadaşlarım Deniz BARAN ve Gaye DEMİR' e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca hep yanımda bulunan, yardımlarını ve dostluklarını esirgemeyen Başak BİTLİS, Pelin DEMİRÇİVİ, Serdar BAKIRCI, İnci DURAN, Turgay ÖNCÜL, Arife KARAHAN, Güzide AKARSU ve Nisa GÜL'e teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan maddi manevi desteğini ve fedakarlığını esirgemeyen aileme özellikle babam Ahmet IŞIKSAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2009

Esra IŞIKSAL

Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR vii
ÇİZELGE LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ xi
ÖZET xv
SUMMARY xvii
1. GİRİŞ 1
2. KARBON HAKKINDA GENEL BİLGİ 5
2.1 Karbon 5
2.2 Karbon Atomunun Allotropları 7
2.2.1 Elmas 7
2.2.2 Grafit 8
2.2.3 Fulleren 8
2.3 Karbon Yapıları 9
2.3.1 Grafitik Karbonlar 9
2.3.2 Grafitize edilebilen ve grafitize edilemeyen karbonlar 10
2.4 Karbon Köpük 12
2.5 Karbon Köpüğün Tarihçesi 15
2.6 Karbon Köpüğü Hammaddeleri ve Üretim Yöntemleri 16
2.6.1 Mezofaz zift bazlı karbon köpüğü 16
2.6.2 Kömür bazlı karbon köpüğü 19
2.6.3 Petrol veya katran zifti bazlı karbon köpüğü 20
2.6.4 Diğer üretim yöntemleri 21
2.7 Karbon Köpüğü Üretim Aşamaları ve Köpükleşme Mekanizması 23
2.7.1 Karbon köpük oluşum prosesi 23
2.7.2 Köpükleşme mekanizması 24
2.7.3 Stabilizasyon 26
2.7.4 Karbonizasyon 27
2.7.5 Grafitizasyon 27
2.8 Karbon Köpüğünün Kullanım Alanları 27
2.8.1 Isı değiştiriciler 28
2.8.2 Soğutucular (Heat Sinks) 30
2.8.3 Yakıt hücresi elektrotları 31
2.8.4 Uzay teknolojisi ve uzay sanayi 32
2.8.5 Diğer alanlar 33
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 37
3.1 Mezofaz Zift 37
3.2 Deneylerin Yapılışı 38
3.3 Karbon Köpük Üretiminde Farklı Proses Parametrelerinin İncelenmesi 43
3.3.1 Basıncın Etkisi 43
3.3.2 Sıcaklığın Etkisi 43
3.3.3 Son Sıcaklıkta Bekleme Süresinin Etkisi 43
3.3.4 Basınç Boşaltma Süresinin Etkisi 44

3.3.5 Asfaltit Eklenmesi.....44
3.4. Karakterizasyon Ekipmanları.....44
3.4.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....44
3.4.2 Dayanım Testi.....45
3.4.3 Yoğunluk Hesaplanması.....46
3.4.4 Porozite.....46
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....47
4.1 Proses Basıncının Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi.....47
4.1.1 Atmosferik Basınç Altında Gerçekleştirilen Deney Setlerinin İncelenmesi.....47
4.1.2 Sistemde Basınç Oluşturularak Gerçekleştirilen Deney Setlerinin İncelenmesi.....49
4.2 Proses Sıcaklığının Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi 62
4.3 Son Sıcaklıkta Bekleme Süresinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi..... 67
4.4 Basınç Boşaltma Süresinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi.....73
4.5 Hammaddeye Ağırlıkça Belirli Yüzdelerde Asfaltit İlavesinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi.....78
5. GENEL SONUÇLAR.....89
6. ÖNERİLER.....91
KAYNAKLAR.....93
EKLER.....99
ÖZGEÇMİŞ.....105

KISALTMALAR

PAN	:Poliakrilonitril
ORNL	:Oak Ridge Ulusal Laboratuarı
THF	:Tetrahidrofuran
SFE	:Süper Kritik Sıvı Ekstraksiyonu
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
THR	:Komple Kemik Değişimi
İTÜ	:İstanbul Teknik Üniversitesi

ÇİZELGE LİSTESİ

		Sayfa
Çizelge 2.1:	Karbon Elementinin Özellikleri……..	6
Çizelge 2.2:	Karbon Elementinin İzotopları…….....	6
Çizelge 2.3:	ORNL Karbon Köpüğü Deneysel Sonuçları ve Alüminyum ile Karşılaştırılması……..	14
Çizelge 2.4:	Çeşitli başlatıcı malzemelerden elde edilen köpüklerin özellikleri ve uygulama alanları……	23
Çizelge 2.5:	Karbon Köpüğün Uygulama Alanları…….	28
Çizelge 3.1:	Mezofaz Ziftin Fiziksel ve Toksikolojik Özellikleri……..	39
Çizelge 3.2:	Karbonizasyon İşlemi Aşamaları……	40
Çizelge 4.1:	Farklı Sıcaklıklarda Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin Yoğunluk ve Dayanım Sonuçları……..	61
Çizelge A.1:	Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları……	99
Çizelge A.2:	Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları……..	99
Çizelge A.3:	Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri…….....	99
Çizelge A.4:	623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları……	100
Çizelge A.5:	623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları…….	100
Çizelge A.6:	623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri ……..	100
Çizelge A.7:	Farklı Proses Sıcaklıkları Uygulanarak Üretilmiş Karbon Köpüklerin Yoğunlukları……	100
Çizelge A.8:	Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları…….……	101
Çizelge A.9:	Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Sonuçları…….	101
Çizelge A.10:	Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları.....	101
Çizelge A.11:	Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları……	101
Çizelge A.12:	Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri……..	101
Çizelge A.13:	Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları……	102
Çizelge A.14:	Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları…….	102
Çizelge A.15:	Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri…….……	102

Çizelge A.16: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunlukları…….... 102
Çizelge A.17: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımları…….... 102
Çizelge A.18: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Sonuçları... 103
Çizelge A.19: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunlukları…… 103
Çizelge A.20: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımları…… 103
Çizelge A.21: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerleri……. 103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Elmasın Yapısı 7
Şekil 2.2: Grafitin Yapısı 8
Şekil 2.3: Fullerenin Yapısı 9
Şekil 2.4: (a) grafitize edilemeyen, (b) kısmen grafitize edilebilen, (c) grafitize 10
edilebilen karbon yapı modelleri 10
Şekil 2.5: Marsh-Griffiths 'in karbonizasyon/grafitizasyon prosesi modeli 11
Şekil 2.6: (a)Anizotropik Karbon, (b) İzotropik Karbon 11
Şekil 2.7: Karbon Köpük 12
Şekil 2.8: a) Düşük Sıcaklıkta Üretilmiş Karbon Köpük b) Yüksek Sıcaklıkta 13
Üretilmiş Karbon Köpük 13
Şekil 2.9: Mezofaz ziftlerin Yapısı 18
Şekil 2.10: AR Mezofaz Zifti Üretimi Blok Diyagramı 18
Şekil 2.12: Kömür Bazlı Karbon Köpüğüğün SEM görüntüsü 20
Şekil 2.13: (d) Petrol Zifti Karbon Köpüğü (f) Katran Zifti Karbon Köpüğü 21
Şekil 2.16: Karbon Köpüğün Yapısının Analizinde Kullanılan Terimler 26
Şekil 2.17: Isı Değiştiricinin Şematik Gösterimi 29
Şekil 2.18: Radyatör 30
Şekil 2.19: Günlük Hayatta Kullanılan Radyatörlere Örnekler 30
Şekil 2.20: Karbon Köpüğünden Ve Alüminyumdan Yapılmış Isı Alıcılar 31
Şekil 2.21: a) Alüminyumdan Yapılmış Bir Isı Alıcı b) Karbon Köpüğünden 31
Yapılmış Bir Isı Alıcı 31
Şekil 2.22: Yakıt hücresinin yapısı 32
Şekil 2.23: Nozül Yapımında Kullanılan Karbon Köpükler 33
Şekil 2.24: Uzay Mekiğinin Yapısı 33
Şekil 2.25: (a) Karbon Köpük Yapısı (b) Kemik Yapısı 34
Şekil 2.26: Karbon Köpüğünden Yapılmış Bir Zımpara 34
Şekil 2.27: Otomobillerde Tampon Bölgesinde Kullanılan Karbon Köpüğü 35
Şekil 2.28: Karbon Köpükten Yapılan Katalitik Konvertörler 35
Şekil 3.1: Karbon Köpük Hazırlama ve Oluşum Şeması 37
Şekil 3.2: (a) Pelet halindeki Mezofaz Zift (b) Toz hale getirilmiş Mezofaz zift 38
Şekil 3.4: Reaktör 40
Şekil 3.5: Reaktör sıcaklık ve basınç kontrolünü sağlayan bilgisayar yazılımının
giriş menüsü 40
Şekil 3.6: Isıtıcı ve Reaktör Sıcaklıklarının Zamanla Değişimi 41
Şekil 3.7: Karbonizasyon İşleminin Uygulandığı Fırın 42
Şekil 3.8: Karbonizasyon İşleminde Sıcaklığın Zamanla Değişimi 42
Şekil 3.9: Taramalı Elektron Mikroskobu 45
Şekil 3.10: Dayanım Testi Ekipmanı 45
Şekil 3.11: Küp biçiminde şekillendirilen karbon köpük örneği 46
Şekil 3.12: Hook Tarzı Mettler Marka Yoğunluk Ölçme Cihazı 46
Şekil 4.1: Atmosferik Basınçta, Farklı Sıcaklıklarda Üretilen Karbon Köpüklerin
Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri 48

Şekil 4.2: Farklı iki sıcakıkta üretilen karbon köpüklerin fotoğrafları (a) 548 K'de (b) 573 K' de 49
Şekil 4.3: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri 50
Şekil 4.3 (Devam)**:** Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 51
Şekil 4.4: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpük Yoğunluklarının Basınçla Değişimi 53
Şekil 4.5: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Basınçla Değişimi..... 54
Şekil 4.6: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Basınçla Değişimi..... 54
Şekil 4.7: 623 K Sıcaklığında Uygulanan Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri..... 55
Şekil 4.7 (Devam)**:** 623 K Sıcaklığında Uygulanan Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri 56
Şekil 4.8: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunluklarının Basınçla Değişimi 58
Şekil 4.9: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Basınçla Değişimi..... 58
Şekil 4.10: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Basınçla Değşimi..... 59
Şekil 4.11: T=783 K Sıcaklıkta Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin SEM Fotoğrafları..... 60
Şekil 4.12: T=823 K Sıcaklıkta Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin SEM Fotoğrafları..... 61
Şekil 4.13: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dört Farklı Boyuttaki Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 63
Şekil 4.14: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunluklarının Sıcaklıkla Değşimi 64
Şekil 4.15: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Sıcaklıkla Değişimi 65
Şekil 4.16: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi..... 66
Şekil 4.18: Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 68
Şekil 4.18 (Devam)**:** Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 69
Şekil 4.19: Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Bekleme Süresiyle Değişimi 71
Şekil 4.20: Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Bekleme Süresi ile Değişimi..... 71
Şekil 4.21: Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Bekleme Süresi ile Değişimi 72
Şekil 4.22: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 73
Şekil 4.22 (Devam)**:** Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri..... 74
Şekil 4.23: Karbon Köpüklerin Yoğunlarının Boşaltım Süresi ile Değişimi 76
Şekil 4.24: Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Boşaltım Süresi ile Değişimi 76

Şekil 4.25: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafiksel Gösterimi.....77
Şekil 4.26: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri.....79
Şekil 4.26 (Devam)**:** Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri.....80
Şekil 4.27: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Grafik Üzerinde Gösterimi.....81
Şekil 4.28: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Grafik Üzerinde Gösterimi.....82
Şekil 4.29: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafik Üzerinde Gösterimi Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri.....84
Şekil 4.30 (Devam)**:** Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri.....85
Şekil 4.31: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Grafiksel Gösterimi.....86
Şekil 4.32: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Grafiksel Gösterimi.....87
Şekil 4.33: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafiksel Gösterimi.....87

STABİLİZASYON AŞAMASI OLMADAN KARBON KÖPÜK ÜRETİMİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Hızla gelişen endüstri ve teknoloji ile birlikte mukavemeti yüksek, hafif, düşük yoğunluklu ve ucuz malzeme talebi ileri malzeme teknolojisinin doğmasına neden olmuştur. Artan çalışmalarla karbon malzemelerin özel dayanım, yüksek iletkenlik ve düşük yoğunluk özellikleri ile kullanılan diğer malzemelere göre avantajlı olduğu görülmektedir. Karbon malzemeler aynı zamanda yüksek sıcaklıklar (2273 K) özel mekanik özellikleri ve bu sıcaklıklar altında okside olmamaları nedeni ile de diğer malzemelerden ayrı bir yere sahiptirler.

Özellikleri, birçok alanda kullanımıyla beraber getirdiği kolaylıklar ve yenilikler sayesinde karbon köpüğü bu karbon malzemeler için iyi bir örnektir. Karbon köpüğü 1960'lardan beri değişik ham maddelerden üretilmektedir. 2000'li yıllarda mezofaz zifften elde edilen karbon köpüğünün popülaritesi özellikle açık gözenek yapısı, yüksek ısıl iletkenliği ve düşük yoğunluğundan dolayı diğer ham maddelerden üretilen köpüklere kıyasla artış göstermiştir.

Karbon köpük, kullanım alanı bakımından havacılık ve uzay, otomotiv, enerji, medikal, savunma sanayii, gemi sanayii olarak yedi ana başlık altında incelenebilmektedir. Karbonize edilmiş köpük yalıtım uygulamalarında tercih edilirken grafitizasyon prosesi sonrasında kazandığı yüksek termal iletkenlik sebebiyle ısı iletimine yönelik uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bakır ve alüminyum ile kıyaslandığında grafitik yapıdaki karbon köpüğünün dört-beş kat daha fazla spesifik termal iletkenliğe sahip olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklarda AR mezofaz ziftden elde edilen karbon köpüğü, stabilizasyon aşaması atlanarak, 1323 K sıcaklıkta karbonize edilerek daha önceleri iki aşamada gerçekleştirilen prosesin (stabilizasyon, karbonizasyon) stabilizasyonun kaldırılmasıyla tek aşamada gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda toz haldeki mezofaz zift yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışan reaktörün içerisine silindirik alüminyum kap içerisinde konulur. Reaktöre önceden belirlenen değerde basınç verildikten sonra önceden belirlenen sıcaklık değerine çıkarılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra reaktördeki basıncın hızlı bir şekilde boşaltılmasıyla karbon köpük elde edilmiş olur. Bu çalışmada basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi ve basınç boşaltma süresi temel parametreler olarak seçilmiştir. Ayrıca bu çalışmada şimdiye kadar mezofaz ziftin Japonya'dan tedarik edilmesi nedeni ile teknolojik olarak söz konusu olan dışa bağımlılık Doğu Anadolu Asfaltitlerinin katkı maddesi olarak kullanılması yoluyla azaltılması amaçlanmıştır. Bu sebeple Japonya'dan temin edilen AR Mezofaz zifte belirli oranlarda ve çeşitli kül içeriğine sahip asfaltit katılarak bu katkı maddesinin karbon köpüğün yapısını, yoğunluğunu ve dayanımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Elde edilen tüm karbon köpük örnekleri 1323 K sıcaklıkta karbonizasyon işlemine tabi tutulmuştur.

Üretilen karbon köpüklerin kıyaslanabilmesi için taramalı elektron mikroskobunda görüntüleri çekilmiş, yoğunluğu ölçülüp dayanım testi sonucu sıkışma dayanımları bulunmuştur.

Yapılan deneylerin sonucunda, karbon köpük yapısının artan basınç ve sıcaklıkla daha homojen bir forma dönüştüğü, yoğunluk ve dayanımın arttığı ancak porozitenin azaldığı görülmüştür. Son sıcaklıkta bekleme süresinin belli bir süreye kadar artmasının yapıyı olumlu yönde etkilediği, yoğunluk ve dayanım değerlerini arttırdığı fakat porozite değerlerinde azalmaya sebebiyet verdiği gözlenirken, belli bir süreden sonra karbon köpük yapısının bozulduğu, yoğunluk ve dayanım değerlerinin düştüğü fakat porozite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Basınç boşaltma süresinin artışı sonucunda ise üretilen karbon köpüklerin yapıları dağılarak yoğunluk, dayanım ve porozite değerlerindeki azalmalar saptanmıştır. AR Mezofaz zifte ağırlıkça çeşitli oranlarda Doğu Anadolu asfaltitlerinin ilavesiyle yapılan çalışmalarda katkı maddesinin karbon köpük yapısının homojenliğini bozarak yoğunluk ve dayanım değerlerini düşürdüğü ortaya çıkmıştır. Eklenen asfaltit içeriğindeki kül miktarının artmasıyla yapılan deneyler sonucunda ise artan kül içeriğine paralel olarak yoğunluk ve dayanım değerlerinin arttığı ancak porozitenin aldığı gözlemlenmiştir.

EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON CARBON FOAM WITHOUT STABILIZATION

SUMMARY

Recent developments of advanced materials' technology has been driven by the requirements for improved strength, low-weight and low-cost in structural engineering materials. The studies on carbon materials, day by day, are showing that they are advantageous to be used in various fields for their stiffness, specific strength, high thermal conductivity and low density. Furthermore, carbon materials are also advantageous with their stable behavior, for instance, remaining unchanged in with the characterized mechanic properties or not getting oxidized under high temperatures (2273 K).

An important form of carbon is the carbon foam due to its high thermal conductivity, light weight, high compressive and tensile strengths and excellent material characteristics attributed after high temperature graphitization treatment are the main reason for its unique position. Various precursors to obtain carbon foam have been known since 1960's. In 2000s, mesophase pitch-based carbon foams have been popular in the field of carbon materials, due to its producing high pore structure, high thermal conductivity and low density. Carbon foam can be investigated under seven main field-of-use titles, which are aeronautics and space, automotive, energy, commercial, medical, military and ship building sectors. While carbonized foams are preferred for insulation, graphitized foams having high thermal conductivity can be widely used in thermal management applications. Carbon foams have four or five times greater specific thermal conductivity when compared with copper and aluminum because of the material's high thermal conductivity and low density.

In this study, carbon foam which is obtained from AR mesophase pitch in high temperatures, has been carbonized at the temperature of 1323K, skipping the stabilization step, and the process realized at two steps (stabilization and carbonization) before, has been obtained at one step. In order to get mesophase pitch based carbon foam, powdered mesophase sample is placed in an autoclave using specially shaped aluminum mold. Reactor is then pressurized to a defined value, and the reactor is raised to a specified temperature. The system is held for a certain period of time. Then the pressure in the reactor is released sharply and thus, the carbon foam is obtained. In this study, pressure, temperature, soak time the highest temperature and pressure release time have been taken as the main parameters for the investigation. Furthermore, in this study, the technological dependence on foreign sources has been goaled to be minimized by using Eastern Anatolian asphaltite instead of mesophase pitch supplied from Japan. Therefore asphaltite and its various ash content have been added to AR mesophase pitch that is supplied from Japan at definite ratios. Then it has been observed how this addition affected the structure, density, compressive strength and the porosity of carbon foam. All carbon foam samples obtained have been subjected to the stabilization process at 1323K. In order to make comparisons, the results of SEM micrographs have been taken, its density

has been measured and its compressive strengths have been found as the outcome of the resistance test.

As a result of these experiments, it has been observed that carbon foam turned into a more homogenous form and its density and strength increased, however, its porosity decreased with the increasing pressure and temperature.

It has been observed that a certain increase at the soaking time at the final temperature affected the structure positively and increased the values of its density and strength, but caused a decrease at porosity values. On the other hand, it has been seen that carbon foam became worse, the values of its density and strength decreased and caused an increase at its porosity values after a certain time. As a result of an increase in the pressure release time, it has been observed that the carbon foam which was obtained disintegrated and its density, compressive strength and porosity values decreased. It has been also discovered that the addition of Eastern Anatolian asphaltite at various weightinesses to AR mesophase pitch deformed the homogenity of carbon foam and lowered the density and the compressive strength values. It has been observed that the density and compressive strength of the carbon foam increased but its porosity decreased proportinally to the ash content of the asphaltite added.

1. GİRİŞ

Son yıllardaki malzemeler üzerinde yapılan yoğun araştırmalar sonucunda karbon malzemelerin kullanılan diğer malzemelere göre daha avantajlı olduğu görülmüştür [1]. İnsan ihtiyaçları, bilim ve teknolojide sürekli yeni malzemelerin ortaya çıkmasına ve gelişimine neden olmuştur. Karbon teknolojisinin ilerlemesi var olan teknolojilerde kullanılabilirliğinin artması bu teknolojilerin daha kolay ve iyi sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Karbon malzemelerin dayanım, yüksek iletkenlik ve düşük yoğunluk özelliklerinden dolayı kullanılan diğer malzemelere göre avantajlı olduğu görülmektedir. Karbon malzemeleri aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda (2273 K) özel mekanik özelliklerini ve bu sıcaklıklar altında okside olmama durumlarını korumaları ile de diğer malzemelerden ayrı bir konuma sahiptirler [2].

1950'li yılların sonunda kompozit malzemelerin üretimiyle ilgili araştırmalar, yüksek sertlik ve düşük spesifik ağırlığa sahip olan karbon fiberlerin keşfine öncülük etmiştir. Günümüzde endüstrinin hızla gelişmesi ile birlikte yüksek dayanımlı, hafif ve ekonomik malzeme gereksinimi ileri teknoloji ürünü malzemelerin geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte karbon fiberlerin yanı sıra onun yerine veya ilave amaçlarla kullanılabilecek daha iyi özelliklerdeki yeni malzeme arayışına girilmiştir. Yapılan yeni araştırmalarla gelişen teknolojiye uygun karbon malzemelerin üretimine çalışılmıştır ve bu çalışmalar sonucunda bir karbon malzemesi olan karbon köpük ortaya çıkmıştır.

Karbon malzemeler arasında yer alan karbon köpüğü, ısı yalıtkanlığı ve iletkenliği, hafifliği, dayanma gücünün yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı pek çok alanda kullanılmaktadır. Yoğunluğu alüminyumdan 6, bakırdan 50 kere daha düşük olan karbon köpüğünün termal iletkenliği, üretildiği hammadde ve üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Karbon köpüğün termal iletkenliği alüminyuma göre dört kat, bakıra göre ise altı kat daha fazladır [3]. Karbon köpük bu özelliklerinden dolayı pek çok kullanım alanına sahiptir.

Karbon köpüğü kullanım alanı bakımından havacılık ve uzay, otomotiv, enerji, ticari, medikal, savunma, gemi sanayisi olarak yedi ana başlık altında incelenebilmektedir [4].

Karbon köpük ilk olarak 1960'lı yıllarda Walter Ford tarafından organik polimer köpüklerin ısıl işleme tabi tutulması ile üretilmiştir. Daha sonraları Googin, üretime başlangıç malzemesi olarak üretan-polimer kullanarak yapısal özellikleri kontrol edilebilen ilk karbon köpüğünü elde etmiştir. İlerleyen yıllarda birçok araştırmacı tarafından bu malzemelerin kullanım alanları araştırılmıştır. 1970'lı yıllarda Klett, R. tarafından üretilen karbon köpükleri maliyet bakımından daha avantajlı olup ısı yalıtımında daha elverişli hale getirilmiştir.

1990'lı yıllarda mezofaz zift bazlı karbon köpüğü üretim yöntemleri gelişmiş olup bal peteğine benzer bir yapısı bulunmaktadır. Daha sonra üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla West Virginia Üniversitesinde kömürün başlangıç malzemesi olarak kullanıldığı mükemmel ısı yalıtım özelliklerine ve yüksek dayanıklılığa sahip olan karbon köpükleri üretilmiştir [1]. Dünyada karbon köpüğü ticari olarak 1990'lardan sonra üretilebilmiştir. C-foam Co. [4] ve Pocofoam Co. [5], karbon köpüğünün üretimini ve pazarlamasını yapan en bilinen şirketlerdir.

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklarda AR mezofaz ziftden elde edilen karbon köpüğü, stabilizasyon aşaması atlanarak, 1323 K sıcaklıkta karbonize edilerek daha önceleri iki aşamada gerçekleştirilen prosesin (stabilizasyon, karbonizasyon) stabilizasyonun kaldırılmasıyla tek aşamada gerçekleşmesi sağlanmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında altı farklı giriş basıncı sisteme iki farklı şekilde beslenerek hem basınç artışının sistem üzerindeki etkileri hem de basıncın oda sıcaklığında sisteme beslenmesi ile mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta (623 K) beslenmesi sonucunda üretilen karbon köpükler kıyaslanarak, basıncın iki farklı şekilde uygulanmasının karbon köpük yapısına etkileri incelenmiştir. Daha sonra üretilen karbon köpüklerin karakterizasyonları yapılarak optimum basınç değerine karar verilmiştir. Bu aşamadan sonra bu optimum basınç değerinde üç farklı sıcaklıkta karbon köpük üretilmiş ve üretilen köpüklerin karakterizasyonları yapılıp optimum sıcaklık değeri seçilmiştir. Optimum basınç ve sıcaklık değerinin belirlenmesinden sonra altı farklı son sıcaklıkta bekleme süresinde karbon köpük üretimi yapılarak bekleme süresinin artmasının karbon köpüğün gözenek büyüklüğü, dayanım, yoğunluk gibi özelliklerini nasıl etkilediğine bakılarak optimum son

sıcaklıkta bekleme süresi seçilmiştir. Daha önce belirlenen optimum basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme sürelerinde beş farklı gaz boşaltım süresi uygulanarak karbon köpük yapısı incelenerek optimum boşaltma süresi belirlenmiştir. Bu çalışmada son olarak Japonya'dan temin edilen AR Mezofaz zifte belirli oranlarda ve çeşitli kül içeriğine sahip asfaltit katılarak bu katkı maddesinin karbon köpüğün yapısını, yoğunluğunu ve dayanımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında şimdiye kadar mezofaz ziftin Japonya'dan tedarik edilmesi nedeni ile teknolojik olarak söz konusu olan dışa bağımlılık Doğu Anadolu Asfaltitlerinin katkı maddesi olarak kullanılması yoluyla azaltılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın sonunda, üretilen karbon köpüğün basıncının ve sıcaklığının artmasıyla yapının daha homojenleştiği, ligament ve bağlantı noktası oluşumlarının iyileştiği, yoğunluk ve basma sıkışma dayanımının arttığı görülmüştür. Son sıcaklıkta bekleme süresinin belli bir süreye kadar artmasıyla yapının iyileşerek yoğunluk ve dayanım değerlerinin arttığı gözlenmiş, belli bir süreden sonra karbon köpük yapısının bozularak, yoğunluk ve dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Basınç boşaltma süresinin artışı sonucunda ise üretilen karbon köpüklerin yapıları dağılarak yoğunluk ve dayanım değerlerindeki azalmalar görülmüştür. AR Mezofaz zifte Doğu Anadolu asfaltitlerinin ilavesiyle yapılan çalışmalarda katkı maddesinin karbon köpük yapısının homojenliğini bozarak yoğunluk ve dayanım değerlerini düşürdüğü ortaya çıkmıştır.

2. KARBON HAKKINDA GENEL BİLGİ

2.1 Karbon

Dünyada hem doğal halde, hem de başka elementlerle bileşik halinde bulunan karbon, ağırlık olarak yerkabuğunun yaklaşık % 0,2'sini oluşturur. Karbon, bilinen elementlerin en çok yönlü olanıdır. Bileşiklerin % 94'ü (4 milyondan çoğu) karbon içerir [6].

Yaşamın dayandığı temel işlevleri yerine getirmek için yeterli çeşitlilikte ve karmaşıklıkta düzenlemeler oluşturarak başka elementlerle birleşme yeteneği yalnızca karbonda vardır. Belirli karbon bileşikleri, canlılardaki maddenin yaklaşık % 18'ini oluşturur (geri kalanı çoğunlukla sudur). Bu bileşikler, canlı hücrelerin planı olarak, hücre yapımında kullanılan yapıtaşları olarak işlev görürler. Yakıt işlevi gören başka karbon bileşikleri de, yeşil bitkilerde ışıl bileşimle sürekli olarak yenilenir. Organizma öldüğü zaman, çevreyle karbon alışverişi durur ve geriye kalan radyoaktif karbon-14 izotopu miktarı, biyolojik kökenli maddelerin yaşını belirlemekte kullanılabilir. Kalkınmış ülkelerin ekonomilerinin büyük bir bölümü, karbon içeren yakıtların, plastiklerin, kimyasal maddelerin, dokumaların ve ilaçların işlenmesine ve üretimine dayanır. Karbon temelli sentetik bileşiklerin üretilmesi ve kullanılması, bir çok ülkede yaşama düzeyini etkilemiştir [6,7].

Simgesi C, atom sayısı 6, atom ağırlığı 12,011 olan karbon, periyodik çizelgenin IVA grubunda silisyum, germanyum, kalay ve kurşun elementleriyle birlikte yer alır. Bu elementlerin en hafifi ve en az metalik olanıdır. Periyodik çizelgedeki başka birçok grubun tersine, IVA grubu elementleri, kimyasal bakımdan birbirinden çok farklıdır; grubu temsil edici davranışı en az gösteren de karbondur [6].Karbon elementine ait bazı özellikler Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Karbon elementinin doğada üç farklı izotopu bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Karbonun en bol bulunan izotopu, doğal karbonun % 98,89'unu oluşturan karbon-12'dir. Tam olarak 12 dalton (atom kütlesi birimi) değerinde olan bu izotop, atom ağırlığı konusunda uluslararası standart olarak kullanılır. Doğal karbonun % 1,11'ini oluşturan karbon-13, ikinci kararlı izotoptur. Karbonun beş

radyoaktif izotopu bilinmektedir; bunlardan karbon-14 (yarılanma süresi 5730 yıl) en kararlı ve en yararlı olanıdır.

Çizelge 2.1: Karbon Elementinin Özellikleri [6]

Atom numarası	6
Atom ağırlığı	12.011 g/mol
Elektron dizilimi	$1s^2\ 2s^2\ 2p^2$
Yoğunluk	2.267 g/cm³
Ergime noktası	3823 K (3550°C)
Kaynama noktası	4098 K (3825°C)
Ergime ısısı	100 kJ/mol
Buharlaşma ısısı	120 kJ/mol
Isı kapasitesi	8.517 J/(mol·K) (grafit) 6.115 J/(mol·K) (elmas) (25°C)

Çizelge 2.2: Karbon Elementinin İzotopları [8]

	Proton	Nötron	Kütle Numaraları
Karbon 12	6	6	12
Karbon 13	6	7	13
Karbon 14	6	8	14

Bağlar serbest karbon atomunun 1s kabuğunda iki elektron, 2s ve 2p kabuklarındaysa bağ oluşturmaya hazır dört değerlik elektronu bulunur. Metallerden ve ametallerin birçoğundan farklı olarak, karbonda bağ oluşumu genellikle iyonik değil, kovalent (ortaklaşa) niteliktedir. Bunun nedenlerinden biri, karbonun atom sayısının küçük olması, bu nedenle de, atom çekirdeğine yakın olan değerlik elektronlarını çok sıkı tutmasıdır. Ayrıca, bir karbon atomunun kararlı bir iyon haline gelmesi için dört elektron alması ya da yitirmesi gerekir. Bu da oldukça büyük enerji isteyen bir olaydır. Ortaklaşa bağlanmada, her karbon atomu, değerlik elektronlarını karşılıklı olarak başka atomlarla paylaşır. Karbon bileşiklerinin çoğunda, bitişik bir atom, 1–3 arasında elektron verir; buna karşılık karbon da eşit sayıda elektron katkısı yapar ve tek, çift ya da üçlü bağ oluşur [6].

2.2 Karbon Atomunun Allotropları

Kimyasal özellikleri aynı, fiziksel özellikleri ve uzayda dizilişleri birbirinden farklı aynı cins atomlara allotrop atomlar denir. Karbonun elmas, grafit ve fulleren olmak üzere 3 tane allotropu vardır.

2.2.1 Elmas

Arı elmas, bilinen en sert maddedir. Renksiz ve saydam olmasına karşın, başka minerallerle arılığı bozulduğu zaman, pastel renklerden mat siyaha kadar uzanan çeşitli renklerde bulunabilir. Elmas, kimyasal bakımdan eylemsizdir; ama yüksek sıcaklıklarda havada yanması sağlanabilir. Isıyı iyi iletmez ve elektrik yalıtkanıdır. 1955'e kadar, yanardağ kökenli doğal yataklar tek elmas kaynağıyken, o tarihten bu yana aletlerde ve pikap iğnelerinde kullanılan elmaslar, grafitin yüksek basınçlara ve sıcaklıklara uğratılmasıyla yapay olarak üretilmektedir (mücevher niteliğinde elmaslar bu yolla elde edilemez). Şekil 2.1'de elmas yapısı gösterilmektedir.



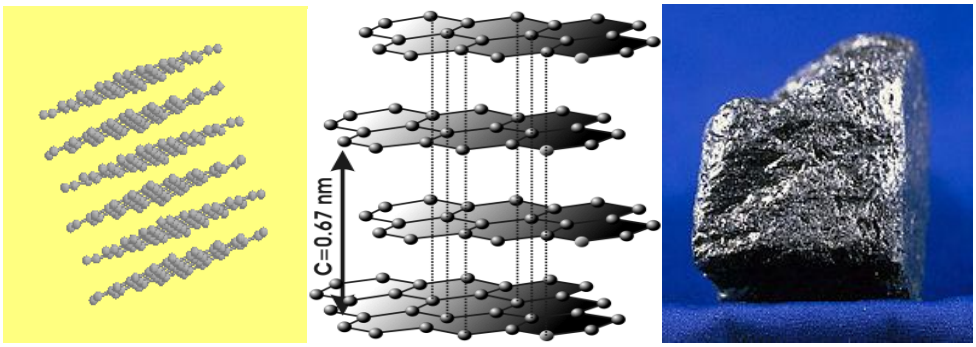
Şekil 2.1: Elmasın Yapısı [6,9,10].

Elmasın özellikleri, bütünüyle birbirine kenetlenmiş dörtyüzlü karbon atomlarının oluşturduğu billur yapısından kaynaklanır. Bu atomların her biri, en yakın dört komşusuna ortaklaşa bağlanmıştır. Elmasta karbon atomları sp^3 hibritleşmesi yaparak tetrahedral bir düzendedir. Karbon atomları arasındaki bağlar çok kuvvetlidir. Bu nedenle de çok sert ve kararlı bir yapıya sahiptir. Mavi elmas (yarı iletken) hariç elektriği iletmezler. Moleküller arasındaki kuvvetli bağlar nedeniyle ısı iletkenliği diğer elmas çeşitlerine göre iyidir [6,9,10].

2.2.2 Grafit

Grafit çok daha değişiktir. Yumuşak, yağlı, kağıtta iz bırakan, siyah renkli bir katı maddedir. Grafit, yağ haline getirilip makinelerde, çalışan parçaların birbirine sürtünürken aşılmasını azaltmak ya da engellemek amacıyla yağlayıcı olarak kullanılır. Kurşun kalemlerin içindeki uç da, içine kil katılarak biraz sertleştirilmiş grafittir. Grafit çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir, ayrıca çok iyi bir elektrik iletkenidir. Son dönemlerde, uzay kapsüllerinin ısı kalkanlarının yapımında da grafitten yararlanılmaya başlanmıştır.

Elmasta her karbon atomu, dört başka karbon atomuna bağlanarak üç boyutlu katı bir yapı oluşturur. Grafitte ise karbon atomları hegzagonal halkalar oluşturur ve tabakalı bir yapı oluşturur. Her karbon atomu diğer 3 karbon atomuna sp^2 hibritleşmesi yaparak sigma bağları ile bağlanır. Karbon atomlarının 4. elektronları π bağlarında kullanılır. Bu π bağı lokalize olmadığından grafit elektriği iletir. Grafit atomları, üst üste yığılmış geniş, yassı levhalar oluşturacak biçimde, iki boyutlu düzlemde birbirlerine bağlanmıştır. Bu levhalar birbirlerinin üzerinden kolayca kayar; grafitin iyi bir yağlayıcı olma özelliği de bundan kaynaklanır. Grafitin kağıt üzerinde iz bırakmasının nedeni de, bu ince atom levhalarının grafitten ayrılarak kağıdın üzerinde birikmesidir. Karbonun öteki biçimlerinin, belirgin, kendilerine özgü bir yapısı ya da biçimi yoktur. Grafitin aktif karbon, is, kemik kömürü gibi mikro kristal yapıya sahip pek çok şekli mümkündür [6,11,12]. Şekil 2.2'de grafitin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Grafitin Yapısı [6,11,12]

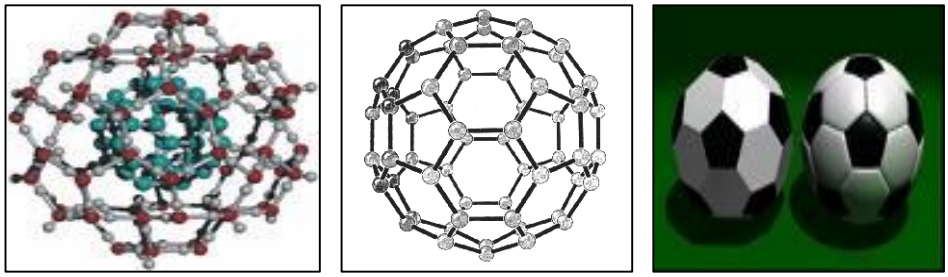
2.2.3 Fulleren

Kısa bir döneme kadar karbonun grafit ve elmas olmak üzere sadece 2 tane allotropu olduğu bilinmekteydi fakat 1980'lerin sonuna doğru keşfedilen fulleren molekülü bu

görüşü değiştirmiştir. Molekül formülü C_{60} olan ve saf karbondan oluşan fulleren molekülü, futbol topunu andıran yapısıyla ayrı bir allotrop olarak kimya literatüründe yerini almıştır [13].

Fulleren genellikle 6 karbon atomunun düzlemsel olarak birbiri ile bağlanarak oluşturduğu içi boş küresel, silindirik ve halkasal yapılardır. 5'li veya 7'li halkalar şeklinde birleştiği zaman yapı düzlemsellikten uzaklaşır. En küçük boyutu 60 karbonludur ve yapısı futbol topuna benzemektedir.

Fullerenin, grafite benzeyen bağ kararlılığı nedeniyle reaktif bir madde değildir ve birçok çözücü içerisinde çözünmez [11]. Şekil 2.3'de fullerenin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Fullerenin Yapısı [14,15]

2.3 Karbon Yapıları

2.3.1 Grafitik Karbonlar

Yapısal kusurların varlığına bakılmaksızın grafitin allotrop formunda bulunan element karbonu içeren her türlü madde çeşidi de grafitik karbondur. Doğal grafit, mükemmel kristal yapısına rağmen grafitik karbon içeren bir mineraldir. Bazı doğal grafitler, yüksek oranda kusursuzken çoğunluğu diğer mineral maddelere sahip olan tabaka grafitler olarak çıkarılmaktadır. Sentetik grafitler, büyük oranda grafitik karbon içeren maddeler olarak tanımlanmaktadır. Grafitik olmayan karbonunun grafitizasyon ısıl işlemine tabi tutulmasından ya da 2073 K' den yüksek sıcaklıklarda kimyasal buhar çökeltme ile hidrokarbonlardan grafitik yapıya sahip bir çökelti oluşturulmasıyla grafitik karbon elde edilmektedir [16,17].

Grafitik olmayan karbonlar, iki boyutta uzun aralıklı düzenli yapıda ve düzlemsel hekzagonal bir ağ oluşturan fakat düzlemlere dik üçüncü yönde kristalografik düzeni olmayan karbon atomlarına sahip element karbonlarını yüksek oranda içeren

maddelerdir. Birçok grafitik olamayan karbon, 2473 K ve üzeri sıcaklıktaki ısıl işlemler vasıtası ile grafitik karbona dönüştürülebilir [16,17,18].

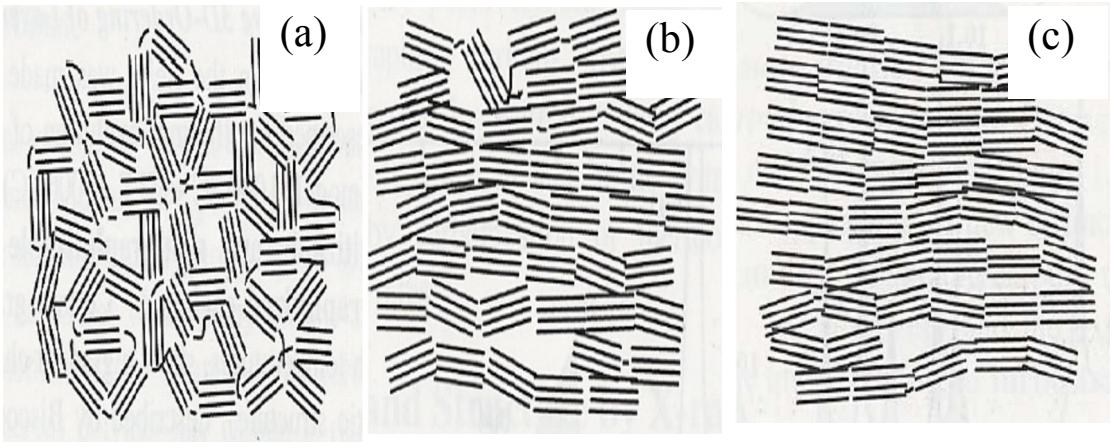
2.3.2 Grafitize edilebilen ve grafitize edilemeyen karbonlar

Grafitize edilemeyen karbonlar, atmosfer basıncı ya da düşük basınçlar altında 3273 K ve üstü sıcaklıktaki ısıl işlemlerle dahi grafitik karbona dönüştürülemeyen karbonlardır.

Grafitize edilemeyen karbonlar; odun ve fındık kabuğu gibi maddelerden üretilmektedir. Isıl işlem sırasında sıcaklık arttıkça sadece küçük moleküller yapıdan ayrılır, makromoleküler grafitize edilemeyen karbonların yapısı ise değişmez ve aynı zamanda daha fazla çapraz bağ yapısı oluşturur [16,17,18].

Grafitize edilebilen karbonlar, daha düzenli bir yapıya sahiptir. Bu da grafitik tabakaların birbiri üzerinde kaymasında daha az enerji ihtiyacına yol açmaktadır. Daha düzensiz yapılar ise grafitik tabakaların oluşturulmasında yüksek enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Diğer yandan, yapının daha düzensiz kısımları alifatik özellikteyken düzenli kısımları ise aromatik bileşiklere sahipir [19].

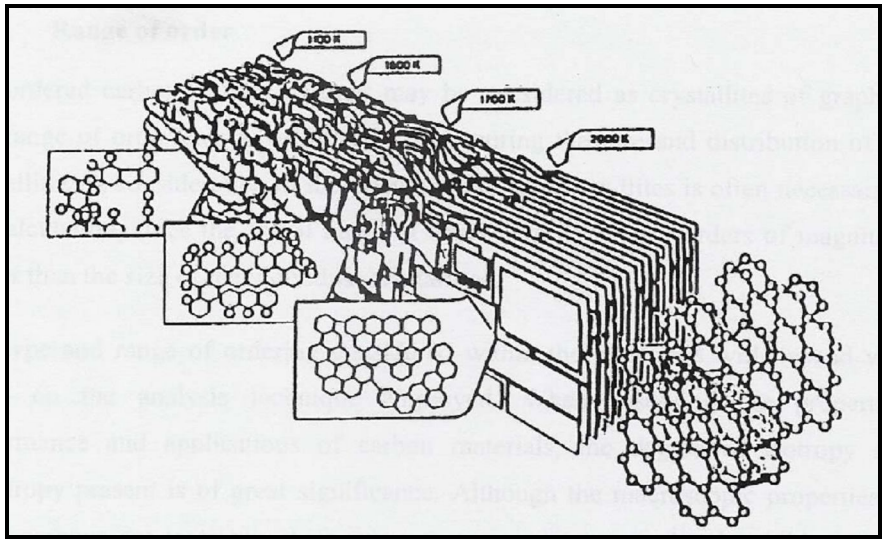
Şekil 2.4'de grafitizasyon sırasında uzun aralıklı düzenli yapının oluşmasını göstermektedir.



Şekil 2.4: (a) grafitize edilemeyen, (b) kısmen grafitize edilebilen, (c) grafitize edilebilen karbon yapı modelleri [20]

Grafitize edilebilen karbonlar, sıvı faza ısıl işlem sırasında geçebilmektedir. Moleküller büyüyebilir ve büyük aromatik moleküller oluşturulabilir. Böylece birbirleriyle aynı hizada sıralanarak grafitik yapıyı oluşturabilirler [16].

Şekil 2.5' de karbonizasyon ve grafitizasyon esnasında düzensiz yapıların daha düzenli bir yapıya dönüşme modeli gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, daha yüksek sıcaklıklar uçucu maddelerin yapıyı daha büyük oranda terk etmesini sağlamaktadır [19].

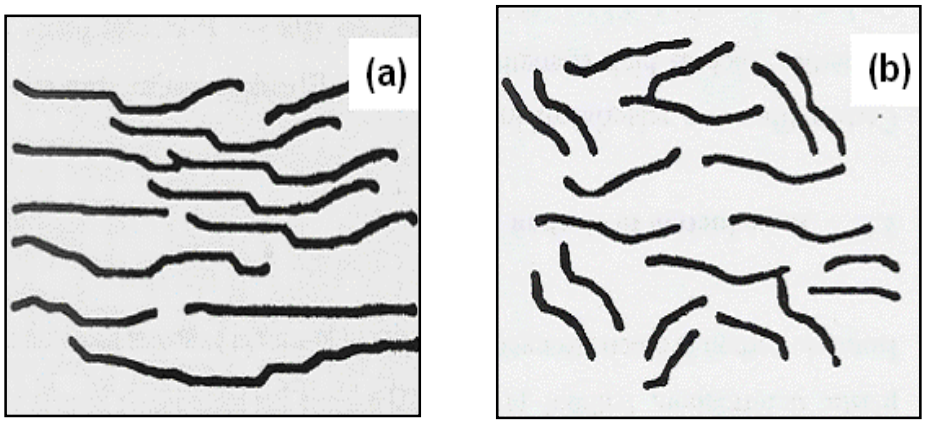


Şekil 2.5: Marsh-Griffiths 'in karbonizasyon/grafitizasyon prosesi modeli [19]

Grafitize edilebilen yapılar anizotropik karbonlar olarak adlandırılırken grafitize edilemeyen yapılar ise izotropik karbonlar olarak tanımlanmaktadır [21].

Şekil 2.6a' da görüldüğü gibi anizotropik karbonlar ince tabakaların birbirine paralel dizilişine sahiptir. Anizotropik karbonlar, naftalin gibi aromatik hidrokarbonlardan elde edilmiş mezofaz ziftinden, petrol zifti ya da kömür katranı ziftinden üretilmektedir.

Şekil 2.6 (b)'de görüldüğü gibi izotropik karbonlar ise rastgele bir tabaka dağılımına sahiptir. İzotropik karbonlar odun gibi polimerik maddelerden üretilmektedir.



Şekil 2.6: (a)Anizotropik Karbon, (b) İzotropik Karbon [21]

Yüksek dayanıma sahip karbon köpük elde edebilmek için köpükleşme öncüsünün izotropik yapıda olması gerekmektedir. Diğer yandan yüksek ısıl elektrik iletkenliği için anizotropik zift kullanmak gerekmektedir [22].

2.4 Karbon Köpük

Köpük kelimesi genelde gözenekli ve düşük yoğunluğa sahip malzemeler için kullanılan bir kelimedir. Köpükleşme olayı gaz baloncuklarının, katı veya sıvı maddeler içinde dağılımıyla oluşan bir olaydır [23]. Bazı malzemelerin köpüklerinin elde edilmesiyle o malzemelere pek çok alanda uygulama imkanı sağlamaktadır. Bu malzemelerin başında da karbon gelmektedir ve elde edilen karbon köpük sahip olduğu özellikleriyle eşsiz bir malzeme haline gelip yeni nesil bir teknolojik malzeme olmuştur. Şekil 2.7'de karbon köpük örneği verilmektedir.

Karbon köpüğün sahip olduğu özelliklerin başında düşük yoğunluk (200–800 kg/m^3), yüksek mekanik dayanım (20 MPa'a kadar), sıcaklıkla artan mekanik dayanım, sıcaklığa bağlı olarak farklılık gösteren yüksek termal iletkenlik, düşük ısıl genleşme, gözenekli yapı, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık (3273 K), düşük fiyat ve kullanılacağı alana göre şekil alabilme gibi özellikler gelmektedir [22,24].



Şekil 2.7: Karbon Köpük

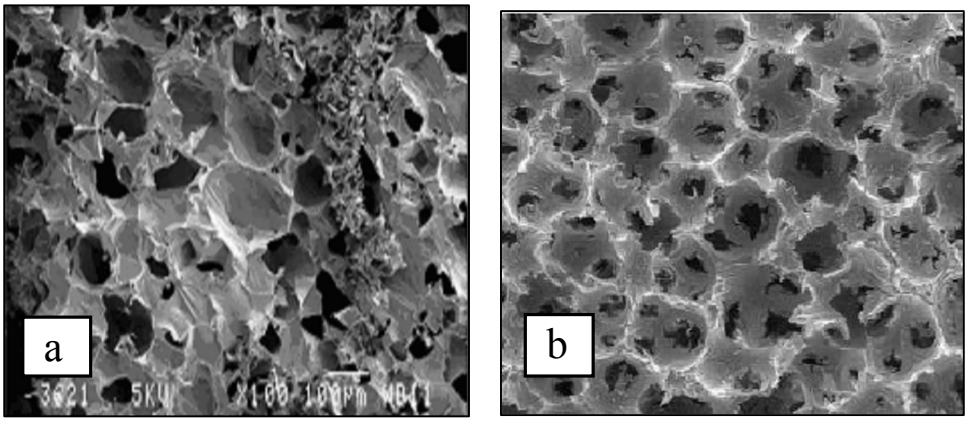
Karbon köpük 1960'lardan bu güne; sentetik mezofaz zift [25,26], petrol ve katran bazlı zift [27], kömür [28], poliakrilonitril PAN [29], poliüretan [22], vinilidin klorit polimeri [21], fenolik polimer [30] ve piroliz edilebilir organik bileşikler [27] gibi çeşitli başlatıcı malzemeler kullanılarak üretilmektedir.

Karbon köpüğü, düşük ağırlık, yüksek mukavemet, ısı yalıtkanlığı veye iletkenliği gibi özelliklere sahip olup bu özelliklere göre farklı uygulama alanlarında kullanılır [4,30].

Köpükler, gözenek yapıları baz alınarak açık hücreli ve kapalı hücreli köpükler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadırlar. Bunlardan ilki olan açık hücreli köpüklerde, gözenekler birbirleriyle bağıntılıdır ve bu hücrelerde gaz giriş çıkışı olmaktadır. Kapalı hücreli köpükler ise gözeneklerinin birbirleriyle hiçbir bağıntısı olmayan ve herhangi bir gaz taneciğinin bile giriş-çıkış yapamadığı tür köpükler olarak tanımlanmaktadırlar. Genellikle kapalı hücreli köpükler, açık hücreli köpüklere göre daha yüksek dayanıma sahiptirler [23,27].

Karbon köpüğünün fiziksel özellikleri üretim yöntemlerine göre değişiklikler göstermektedir [31]. Basınç ve sıcaklık karbon köpük üretiminde önemli birer parametredir. Üretim aşaması sırasında değişik basınç ve sıcaklıklar uygulandığında köpüğün hücre yapısı, yoğunluk, dayanım, ısıl iletkenlik gibi özelliklerin de değiştiği gözlenir [32].

Şekil 2.8'de düşük ve yüksek sıcaklıklarda üretilmiş iki karbon köpük örneği verilmektedir. Örneklerden de görüldüğü gibi başlangıç sıcaklıklarında hücre yapıları belirsiz karbon köpüğü elde edilirken sıcaklık değeri arttıkça hücre yapıları daha belirgin hale gelmektedir [33].



Şekil 2.8: a) Düşük Sıcaklıkta Üretilmiş Karbon Köpük b) Yüksek Sıcaklıkta Üretilmiş Karbon Köpük

Karbon köpüğünü alüminyum ve bakır gibi ısıl iletkenliği çok olan maddelerle mukayese edilecek olursa bakırdan altı ve alüminyumdan dört kat daha fazla spesifik ısıl iletkenliğe sahiptir ayrıca bu maddelerden daha hafiftir [34,35].

Çizelge 2.3'de Oak Ridge Ulusal Laboratuarından alınan tabloda üç farklı yöntemde üretilen karbon köpüğünün ve alüminyumun karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.3: ORNL Karbon Köpüğü Deneysel Sonuçları ve Alüminyum ile Karşılaştırılması [36]

	Köpük I	**Köpük II**	**Köpük III**	**Alüminyum 6061**	
Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk	0.57	0.59	0.70	2.88	g/cm^3
Gözeneklilik	0.75	0.74	0.69	0	
Açık Gözeneklilik Oranı	0.98	0.98	--	0	
Ortalama Hücre Boyutu	350	60	350–400	--	μm
Mekanik Özellikler					
Basma Kuvveti	2.1	5.0	5.1	--	MPa
Basma Katsayısı	0.144	0.180	0.413	70	GPa
Gerilme Kuvveti	0.7	--	--	180	MPa
Isıl Özellikler					
Isıl İletkenlik	218	313	250	63	$(W/m \cdot K)/(g/cm^3)$
Isıl yayılım	4.53	3.1	3.52	0.81	cm^2/s
Isı Kapasitesi	691	691	691	890	L/kg.K

Karbon köpük; düşük sıcaklıklarda (1273 K'nin altında) üretildiğinde düşük ısıl iletkenliğe sahip iken yüksek sıcaklıklarda üretildiğinde (2773 K ve üzeri) yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür [30].

2.5 Karbon Köpüğün Tarihçesi

Karbon köpük ilk olarak Walter Ford tarafında 1960'lı yıllarda organik polimerlerin ısıl işleme tabi tutulmasıyla elde edilmiştir [37].

1967 yılında Googin ve arkadaşları başlangıç maddesini üretan-polimer olarak değiştirerek, karbon köpüğünün yapısal ve fiziksel özelliklerinin kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir [38].

Sonraki yıllarda birçok araştırmacı karbon köpüklerinin kullanım alanları hakkında elektrotlardan yalıtıma kadar birçok alanda yenilikler keşfetmişlerdir. 1970'lere gelince araştırmalar alternatif başlangıç materyalleri üzerinde odaklanmıştır [27,39,40,41,42,43,44,45].

1976 yılında Raley ve arkadaşları vinilidin klorit polimerinin sıvı amonyakla karıştırılmasıyla sigara filtrelerinde kullanılan karbon köpükleri imal etmişlerdir [39]. 1981 yılında Bonzom ve arkadaşları başlatıcı malzeme olarak petrol ve kömür katranı zifti kullanarak ısı ve ses yalıtımında kullanılabilen karbon köpük üretmişlerdir [27].

Hopper ve arkadaşları 1988 yılında toz haline getirdikleri sodyum klorit ve fenolik polimer reçinelerini tetrahidrofuran (THF) içerisinde çözerek başlatıcı malzeme olarak kullanmıştır [42].

Diğer çalışmalarda ise değişik üretim süreçleri ve hammaddeler kullanarak köpüğün özelliklerini geliştirmek ve maliyetini düşürmek amaçlanmıştır. Üretilen bu karbon köpükleri çoğunlukla ısıl yalıtım için kullanılmaktadır [30].

1990'lı yılların başında Wright Patterson Hava Kuvvetleri Laboratuarlarında araştırmacılar mezofaz türevli karbon köpüğü üretiminde öncü olmuşlardır. Bu köpükler maliyeti çok yüksek olan polimer kaynaklı köpüklerin yerini doldurmaktadır. Araştırmacıların çalışmaları hafif ve kuvvetli bir karbon köpüğü üretmek üzerinde yoğunlaşmıştır [30].

Karbon köpüğü maliyetinin azaltılması amacıyla West Virginia Üniversitesinde başlangıç maddesi kömür kullanılarak geliştirilen yöntemle mükemmel ısıl yalıtkanlık ve çok yüksek dayanıklılığa sahip köpükler üretilmiştir [30].

1997 yılında Oak Ridge Laboratuarında Klett, J. ilk mezofaz zift bazlı yüksek spesifik ısıl iletkenliğe sahip karbon köpüğünü açıklamıştır. Bu spesifik ısıl iletkenliği önceleri 40 W/m.K civarında iken mezofaz zift bazlı karbon köpüğü üretilmesinin bulunması ile spesifik ısıl iletkenlik 180 W/m.K'ya kadar çıkmıştır. Karbon köpüğünün bu özelliği sayesinde ısı değiştiricilerde meydana gelen problemler çözülmüştür [30,32,43,46].

2.6 Karbon Köpüğü Hammaddeleri ve Üretim Yöntemleri

Karbon köpüğü üretiminde kömür, kömürden ve petrolden elde edilen ziftler, bazı polimerler, mikro hücre yapısında olan PAN (poliakrilonitril) gibi malzemeler kullanılmaktadır. Farklı malzemelerden üretilen bu karbon köpüklerinin fiziksel özellikleri de geniş bir aralıkta değişmektedir. Örnek olarak yoğunlukları 320–670 kg/m^3 ve basınca karşı mukavemetleri 2.5–18.7 MPa aralığında değişebilirken fiziksel olarak izotropik ve anizotrop yapıda oldukları gözlenmiştir. Karbon köpüğü üretim mekanizması ile üretilmiş olan köpüklerin yapısal özellikleri karşılaştırıldığında, üretime başlanan malzemelerin akışkanlık ve genleşme özelliklerinin ürünün performansında etkili olduğu gözlenmiştir [22].

2.6.1 Mezofaz zift bazlı karbon köpüğü

Mezofaz zift ilk olarak 1965'de Brooks ve Taylor tarafından keşfedildi. Mezofaz terimi genellikle maddenin katılaşmadan hemen önceki mozaik hali için kullanılır [47]. Ziftler 673 K'den daha düşük sıcaklıklarda distilasyon prosesleriyle organik maddelerden üretilen bir karbon malzemedir. Mezofaz zift aromatik hidrokarbonların kompleks karışımlarından oluşmaktadır ve bu yüzden de kimyasal bileşimlerini incelemek oldukça zordur [48]. Ziftleri kimyasal bileşimleriyle tanımak zor olduğundan ziftler genelde yumuşama sıcaklığı, koklaşma değeri, kül içeriği, yoğunluğu ve çözündüğü çözücülerle tanınır.

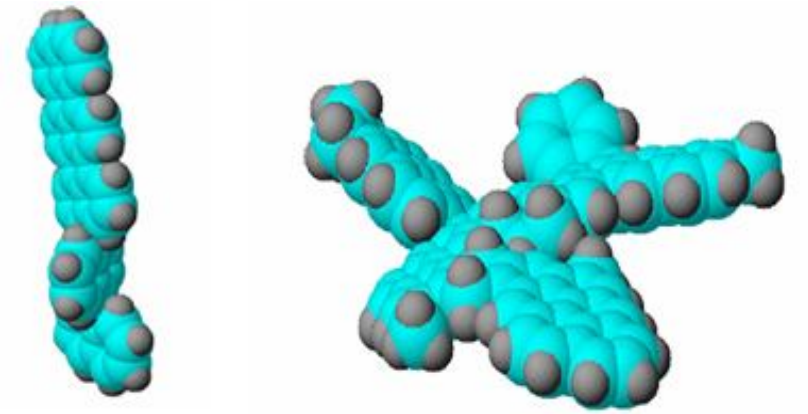
Son yıllarda mezofaz ziftler yüksek performanslı yeni nesil teknolojik malzemelerin üretiminde kullanılmaya başlandı. Bu malzemelerin başında karbon fiberler, karbon-karbon kompozit malzemeler ve karbon köpük gelmektedir. 1990'lı yıllarda Wright

Patterson Hava Kuvvetleri Laboratuarları tarafından çok önemli bir endüstriyel madde olan mezofaz zift tabanlı karbon köpük üretildi [49,50].

Mezofaz zift yüksek ölçüde düzenli bir anizotropik sıvı-kristal sistemidir ve küresel formdadır [17,51,52].

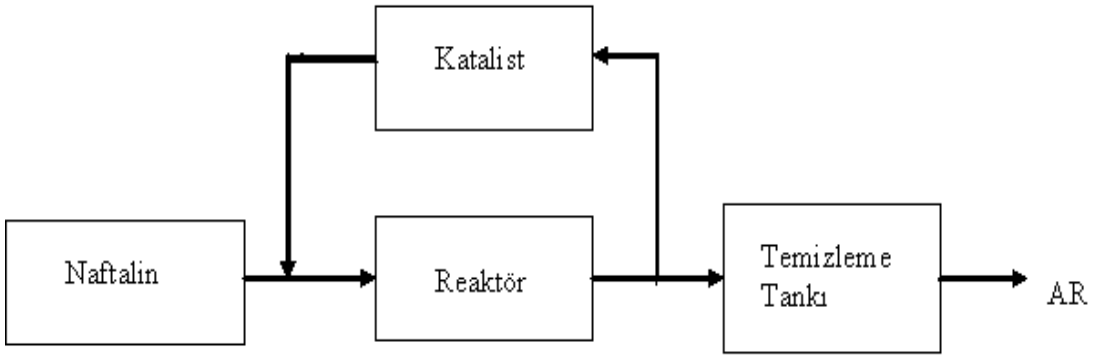
Mezofaz ziftin katran ve petrol ziftlerinden eldesi süper kritik sıvı ekstraksiyonu (SFE) ile sağlanmaktadır. Geleneksel mezofaz zift üretimi başlangıçta katran ve petrol ziftlerindeki düşük moleküler ağırlıktaki parçacıklar ihtiva etmektedir. Daha sonradan geri kalan kısım polimerizasyon sürecine göre mezofaz zifte dönüşmektedirler. SFE ile mezofaz zift üretim prosesinde asıl amaç moleküler ağırlıkları hafif olan maddeler içermesidir. Petrol ve katran ziftleri çok karmaşık aromatik moleküller içermektedirler. Bu moleküllerin molekül ağırlıkları 200 ile 800 arasında değişirken mezofaz ziftin moleküler ağırlığı 1200-1300 arasındadır. Üretim sırasında sıcaklık ve basıncı ayarlayabilmek için sisteme toluen, pentan, heptan ve metanol beslenmektedir [53].Ancak bu yöntem ile elde edilen mezofaz zift, içerisinde safsızlıklar barındırdığından, günümüzde naftalinin, alkil-naftalinin asit katalizörü ile polimerizasyon işlemine tabi tutulmasıyla üretilmesi yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde naftalin geri dönen HF ve BF_3 ile beraber karıştırıcılı reaktöre beslenmektedir. Reaktörde HF-BF_3 kompleksi oluşmaktadır. Bu kompleks naftalinle beraber reaksiyona girerek AR/HF-BF_3 birleşimini oluşturmaktadır. AR/HF-BF_3 birleşimi polimerizasyon reaksiyonundan sonra diğer bir karıştırıcılı reaktöre beslenerek HF ve BF_3' ten ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırılmış HF ve BF_3, hafif yağ (%100 anizotrop) ile birlikte birinci reaktöre geri beslenmektedir. Daha sonra reaktörden çıkan akım temizlenmek ve gaz kirliliklerini arındırma için azot beslenen bir temizleme tankına gönderilir. Temizlemeden çıkan naftalin reçinesi filtre edilerek saflık yüzdesi çok fazla olan pelletler haline getirilirler. Şekil 2.9'da Mitsubishi AR ve petrol ve katran ziftlerinden üretilmiş mezofaz ziftlerinin yapısı gösterilmiştir [54].

Mitsubishi AR firması tarafından üretilen % 100 anizotropik mezofaz ziftin blok diyagramı ve proses akım şeması Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de belirtilmiştir [54,56].

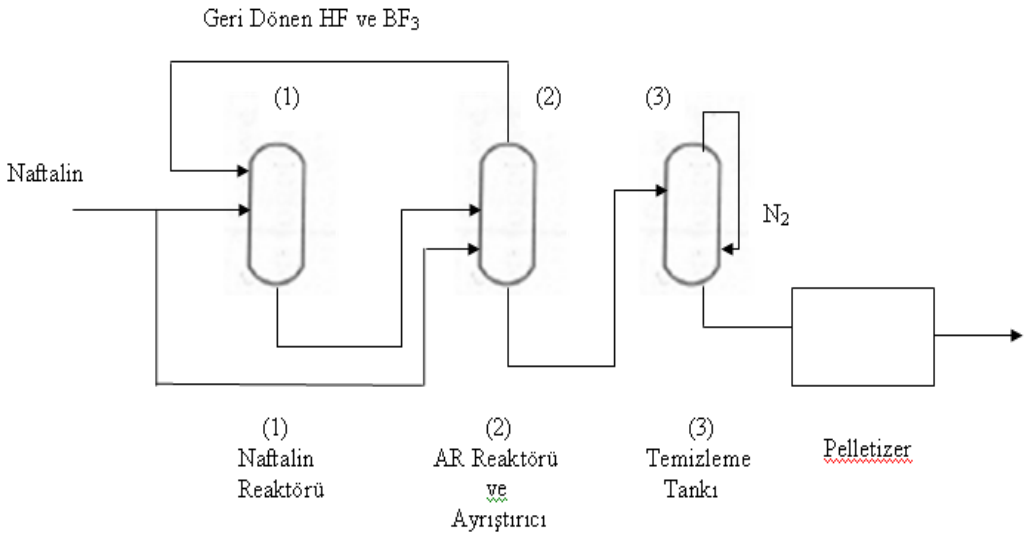


AR Mezofaz Petrol Türevli Mezofaz

Şekil 2.9: Mezofaz ziftlerin Yapısı [54,55]



Şekil 2.10: AR Mezofaz Zifti Üretimi Blok Diyagramı [54,56]



Şekil 2.11: AR Mezofaz Zifti Üretimi Akım Şeması Diyagramı.[54,56]

Mezofaz zift bazlı karbon köpüğünün üretim aşaması özetlenecek olursa; zift alüminyum bir kalıp içerisinde reaktöre konur ve erime noktasının 10-40 K üzerinde

ısıtılarak basınç altında tutulur. Daha sonra inert bir gaz (azot) ile basınç 6.89 MPa civarına 10-14 dakika arası beklemeye alınır. Sistemdeki basınç atmosfer basıncına düşürülerek gözenekli yapıdaki köpük elde edilir. Daha sonra stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon işlemlerine tabi tutulur [54,57].

Araştırmalar mezofaz zifti kullanılarak üretilen karbon köpüğü üzerinde yoğunlaşsa da farklı üretim yöntemleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemler arasında çözücü ilavesi ile karbon köpüğü üretim yöntemi de bulunmaktadır. Bu yöntemde yüksek yoğunlaşma noktasına (623 K'den büyük olanlar) sahip olan mezofaz ziftlerinde bu yoğunlaşma noktasını düşürmek için bir çözücü kullanılır. Bu çözücü eklenmiş mezofaz zift eritilmek üzere ısıya tabi tutulur. Bu işlem sırasında açık hücreli karbon köpüğü oluşur. Vakum yardımıyla çözücü dışarı alındıktan sonra karbonizasyon işlemi uygulanır. Bu yöntemde stabilzasyon işlemi uygulanmaz [58,59].

2.6.2 Kömür bazlı karbon köpüğü

Kömür bazlı karbon köpük prosesi bir koklaştırma prosesidir. Bu proseste bitümlü kömürlerden külsüzleştirme ve hidrojenleme yöntemiyle koklaştırma prosesi için hammadde elde edilir. Proseste öncelikle bitümlü kömüre hidrojenleme uygulanır. Hidrojenleme yöntemi yüksek basınç altında bir katalizör yardımıyla hidrojen ile kömürün tepkimeye sokulmasıyla gerçekleşir [6]. Hidrojenlemeden sonra kömürün bünyesindeki kül değerinin düşürülmesi için hidrojenlenmiş kömür bazı aşamalarla uygun bir sırayla uygun çözücülerle çözünür.

Hidrojenlenmiş ve daha sonra külü belli bir değere kadar giderilmiş olan kömür bir otoklav içerisine konularak sıcaklığı 598 K-773 K arasına ve basıncı 0.1 MPa (atmosfer basıncı) ile 10 MPa arasında bir değere getirilerek 10 dakikadan 8 saate kadar ısıtılır. Isıtma sonucunda kömürün içerisindeki uçucu gazların uzaklaştırılması sağlanır ve otoklav tekrar oda şartlarına döndürüldüğünde anizotropik karbon köpük elde edilmiş olur. Şekil 2.12'de kömür tabanlı karbon köpüğün SEM fotoğrafı gösterilmektedir [60].

Koklaştırma sonucunda elde edilen karbon köpük bünyesindeki kalıntı uçucu maddelerinde uzaklaştırılması için koklaştırma sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta kalsine edilir. Kalsine işleminde uygulan sıcaklık 1198 K ile 1298 K aralığında değişmektedir ve bu işlem maddenin her tarafı aynı sıcaklığa ulaşana

kadar sürmelidir [28]. Kalsinasyondan sonra karbon köpüğün kullanım alanına göre çok yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve iyi bir elektrik iletken olarak kullanılabilmesi için grafitizasyon işlemi uygulanmalıdır [6]. Grafitizasyon işlemi genellikle 2873 K ile 3473 K arası sıcaklıklarda uygulanır [62].



Şekil 2.12: Kömür Bazlı Karbon Köpüğüğün SEM görüntüsü [61]

Kömürden elde edilen karbon köpüğü termal işlemlerde, elektrik iletkenliğinde, elektronik sanayiinde ve özellikle yüksek mekanik dayanımıyla oldukça kullanışlı bir malzemedir [24]. En önemli özelliği maliyetinin ucuz olmasıdır. Yoğunluğu 160–800 kg/m^3, basınç direnci 13.5-20 MPa, gerilme kuvveti 2–7 MPa, çekme kuvveti 2 MPa civarındadır. Isı iletimi katsayısı (oda şartlarında) 0.2–20 W/mK'dir [61].

2.6.3 Petrol veya katran zifti bazlı karbon köpüğü

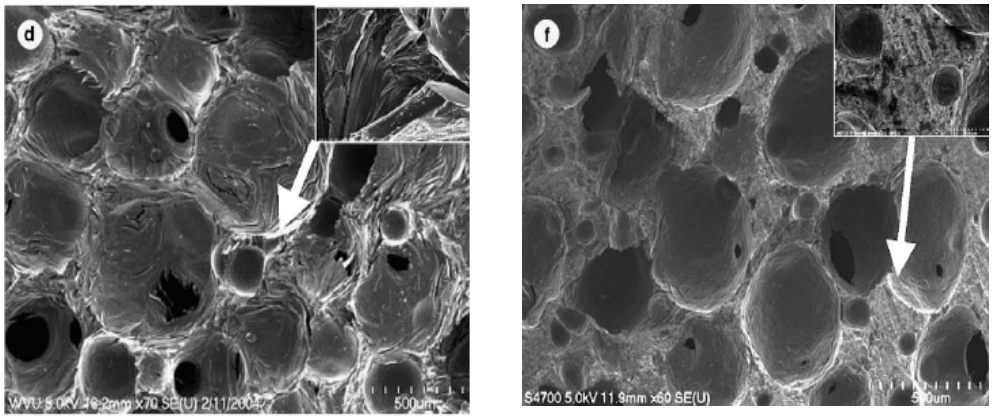
İzotropik yapıdaki katran ve petrol ziftinden karbon köpük eldesinde, zift bir kaba konulur ve yumuşama sıcaklığında daha yüksek bir sıcaklığa kontrollü bir şekilde tercihen 573 K-673 K'e ısıtılır. Isıtma işlemi atmosferik basınç altında yapılır. Sistem belirlenen son sıcaklığa ulaştıktan sonra o sıcaklıkta 10 dakika ile 1 saat arasında bekletilir ve daha sonra kontrollü bir şekilde soğutulur.

Katran ve petrol ziftinden karbon köpük elde etmek için iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu metodlar, Singer metodu ile Riggs ve Diefendorf'un metodlarıdır. Singer metoduna göre izotropik petrol zifti bir kalıbın içerisine konulduktan sonra 673 K ile 773 K aralığında belirlenen bir değere kadar ısıtılır. Bu ısıtma işlemi atmosferik basınç altında 40 saat devam etmektedir. Singer metodunda izotropik fazın %50'si anizotropik faza dönüşür. Bu dönüşümün sebebi yoğunluğu yüksek olan maddelerin tankın altında toplanmasıdır. Riggs ve Diefendorf tekniğine göre ise zifte bir çözücü eklenip ziftin mezofaz malzemeye dönüşümü sağlanır ve daha sonra bu

malzeme 503 K ile 673 K aralığında sadece 10 dakika ısıtılmasıyla gerçekleşmektedir. Her iki metot da erime noktası 513K-553 K arasında olan petrol veya katran ziftleriyle başlar [63].

Bu yöntemlerde uygulan sıcaklık değeri seçilirken o sıcaklıkta kimyasal bozunmanın olup olmayacağına dikkat edilir [27]. Katran ve petrol ziftinden elde edilen karbon köpük gözenekli ve düşük yoğunlukludur(100 kg/m^3 -800 kg/m^3). Elde edilen karbon köpük uygulan proses parametrelerine göre geniş bir aralıkta fiziksel özellikler gösterebilir ve şekillenebilirdir. Burada elde edilen köpük maliyeti de ucuzdur çünkü hammaddesi ucuzdur [54].

Katran ve petrol zifti türevli karbon köpük gözenek yapısı, açık gözenekli ve kapalı gözenekli olmak üzere iki şekilde olabilir. Gözenek yapısı uygulan basınç değeriyle ilgili bir olaydır. Katran ve petrol zifti türevli karbon köpük istenirse grafitizasyon işlemine tabii tutularak grafitik köpük elde edilebilir. Katran ve petrol zifti türevli karbon köpük ısı yalıtımında, katalitik konvertörlerde, korozif maddeler için filtre olarak, zemin kaplanmasında, yalıtkanlarda ve güneş enerjisinin toplanmasında kullanılan panellerde kullanılabilirler [27]. Şekil 2.13'de katran ve petrol zifti türevli karbon köpüğün SEM fotoğrafları gösterilmektedir [60].



Şekil 2.13: (d) Petrol Zifti Karbon Köpüğü (f) Katran Zifti Karbon Köpüğü

2.6.4 Diğer üretim yöntemleri

Bu yöntemde elde edilen karbon köpük için kullanılan hammadde, en az bir alkali metal içeren çözelti içinde poliakrilonitrilin faz dönüşümü ile sağlanılır. PAN tabanlı karbon köpük üretimi poliakrilonitrilin ısıtılmış bir çözeltide çözünmesi adımıyla başlar. Faz dönüşüm yoluyla poliakrilinitrilin sıvı-jel formunu oluşturmak için PAN ısıtılmış bir çözeltide çözünür ve daha sonra çözelti soğutulur. PAN'ın sıvı jel formundan çözülmüş alkali metal ayrıldığı zaman ve sistem yüksek bir sıcaklığa

çıkartılıp son çözelti artıklarıda vakum altında uzaklaştırıldıktan sonra PAN'ın gözenekli köpüğü elde edilmiş olur.

Elde edilen gözenekli PAN köpük inert ortamda yapılan karbonizasyon işlemi sonunda mikrohücreli karbon köpük elde edilmiş olur. Bu metodla elde edilmiş karbon köpüğün hücre boyutu ve açık gözeneklilik yapısı homojen bir şekilde dağılmıştır. PAN tabanlı karbon köpük absorbanslarda, katalizör destekleyicilerde, filtre ve elektrotlarda kullanılmaktadır [29].

Vinilidin klorit polimeri yapısındaki klorürün %50'sini uzaklaştırmak için reaksiyon verdiği amonyakla karıştırılırak sigara filtrelerinde kullanılan karbon köpükleri imal edilmektedir. Reaksiyon sonucu oluşan amonyum klorürün uzaklaşması için ve köpük oluşumu için sistem belirlenen bir sıcaklık değerine ısıtılır. Isıtma sonucunda yeterli büyüklükte gözenekli karbon köpük elde edilir. Üretim sırasında köpüğün hücrelerinin yüzey alanında küçülmeler gözlemlenmektedir. Karbonizasyon sonrasında açığa çıkan köpükte hücreler küçüldüğü için alan spesifik bir halde bulunmaktadır. Spesifik bir alana sahip olan karbon köpüğü geçirgenliği oldukça düşüktür ve sigara dumanı içindeki granülleri tutmada oldukça etkindir [39].

Polimerize edilmemiş alkolle poliüretanin karıştırılmasıyla camsı karbon köpük elde edilir. Bu köpük diğer karbon köpüklerinden farklıdır, ısı iletimi ve dayanıklılığı düşüktür. Bu metot karbon köpüğünün geometrisinin tekrar şekillenebilmesine olanak sağlamaktadır. Daha sonra ürüne karbonizasyon işlemi uygulanılır. Üretim aşamalarından biri olan karbonizasyon çok kısa sürmektedir. Köpük karbonizasyondan sonra soğutulmaya alınmaktadır [44].Karbonizasyon işlemiyle köpük yapısına zarar veren gerilim kuvveti minimum değere düşürülerek karbon köpüğün plastiklik özelliğide önemli bir şekilde artmış olur. Bu metodla üretilen karbon köpükler düşük yoğunluk ve düşük dayanıma sahiptirler ve plastiklik özellikleri yüksektirler ve sahip olduğu bu fiziksel özelliklere uygun alanlarda kullanılırlar [64].

Çizelge 2.4'de farklı hammaddelerden üretilen karbon köpüklerin genel fiziksel özellikleri verilmiştir.

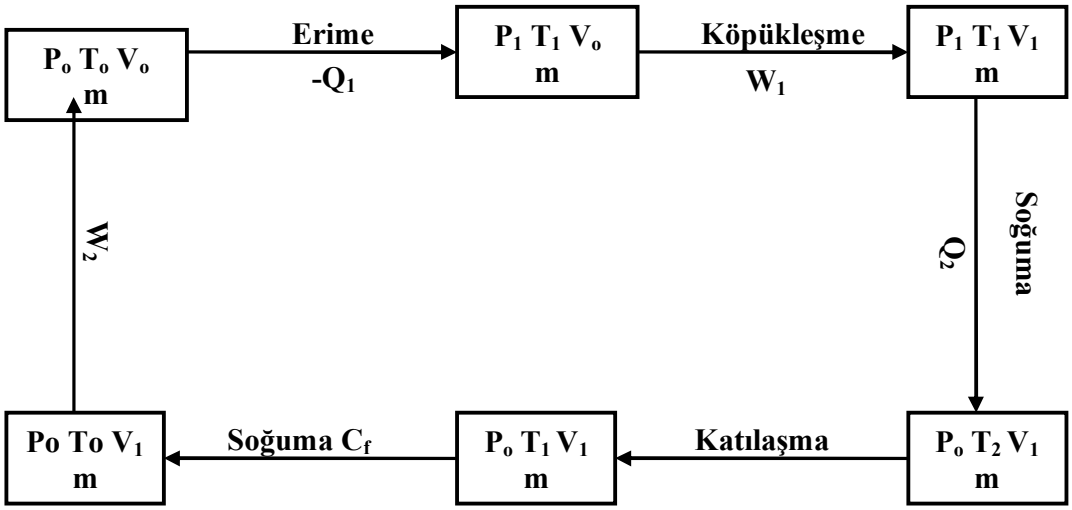
Çizelge 2.4: Çeşitli başlatıcı malzemelerden elde edilen köpüklerin özellikleri ve uygulama alanları [57]

Karbon köpüğün hammaddesi	Yoğunluk (kg/m^3)	Gözeneklilik (%)	Açık gözeneklilik (%)	Dayanım (MPa)
Kömür	160-800	79.3 -87	39.1-98.4	2.5-18.7
Katran Zifti	560-670	64.8-72	83.5-98.2	8-18.2
Petrol Zifti	340	82.9	97.2	3.9
AR Mezofaz Zift	200-600	73-82	90-98	1-4
Vinilidin Klorit Polimeri	Düşük yoğunluklu	Yüksek gözenek	Açık gözenekli	Dayanım oldukça düşük
PAN	300-1000	Yüksek gözenek	Açık gözenekli	Dayanım oldukça düşük
Fenolik Reçine	265	Yüksek gözenekli	Açık gözenekli	1.385

2.7 Karbon Köpüğü Üretim Aşamaları ve Köpükleşme Mekanizması

2.7.1 Karbon köpük oluşum prosesi

Karbon köpük oluşurken sırasıyla; mezofaz ziftin erimesi, habbeciklerin oluşumu, basıncın boşaltılması, köpüğün katı forma dönüşmesi ve köpüğün oda sıcaklığına gelmesi aşamalarından geçmektedir. Şekil 2.14'de yüksek sıcaklık ve basınç altında karbon köpük oluşma prosesinin blok diyagramı görülmektedir. Köpük oluşumu sırasında sistemin kapalı sistem olduğu, reaktör ve çevre arasında kütle alışverişinin ve sistemde enerji kayıplarının olmadığı kabul edilir [64].



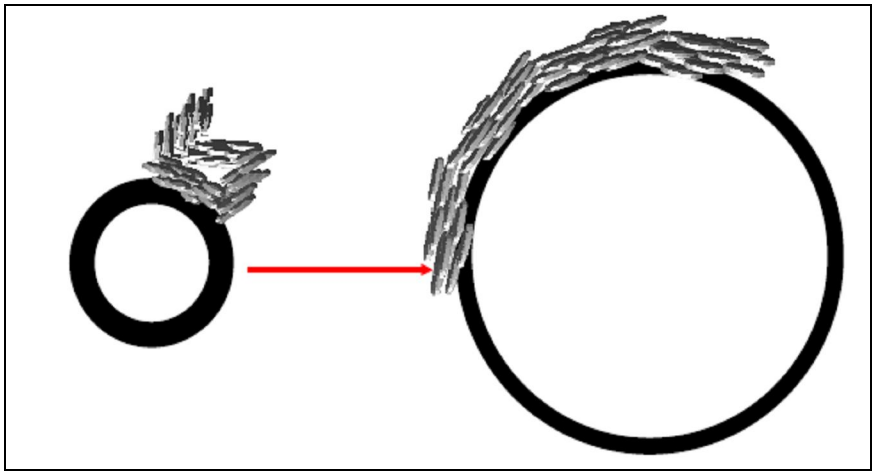
Şekil 2.14: Yüksek Sıcaklık ve Basınç Altında Karbon Köpük Oluşum Prosesi Blok Diyagramı

2.7.2 Köpükleşme mekanizması

Basınç altında mezofaz zift ısıtılırken, mezofaz zift molekülleri büyümeye ve zayıf hidrojen bağları da bozunmaya başlar. Sıcaklık arttıkça uçucu organik maddeler açığa çıkmaya başlar ve bu uçucu organikler birbirleriyle birleşerek gaz formda habbecikler oluşturur [3]. Daha sonraki aşamada genleşen mezofaz zifte göre daha düşük molekül ağırlıklı olarak oluşan bu uçucu bileşenler habbecikler halinde yapıyı terk etmektedirler. Bu habbelerin oluşturduğu basınç kuvvetleri etkisinde grafen tabakaları oryantasyona uğramakta ve daha yoğun bir yapı oluşmaktadır.

Köpük oluşurken uygulanan basınçla birlikte genişleyen habbeciklerin oluşturduğu kayma gerilmesi, Şekil 2.15'de de görüldüğü gibi mezofaz zift moleküllerinin habbecik yüzeyine paralel bir şekilde dizilmesine neden olur. Basınç altındaki habbeciklerin oluşumu sırasında zift akışkan haldedir [55,65]. Bileşiklerin yüksek molekül ağırlıkları ve sisteme verilen basınç nedeniyle habbeciklerin yüzeye çıkması engellenir. Basıncın kaldırılmasıyla, yapıdaki uçucu maddeler yapıyı terk etmekte ve gözenekli (poröz) bir yapı ortaya çıkmaktadır. Bu madde karbon köpüğü olarak bilinmektedir.

Karbon köpüğünün iskeletini oluşturan hücrelerin büyüklüğü ve sayısı, esas olarak viskozite, akışkanlık, kullanılan ham maddenin elastikiyeti, oluşan bir kısım uçucu organik maddelerin dilatasyonu (genleşmesi), uygulanan basınç ve sıcaklık tarafından kontrol edilebilen özelliklerdir [22,57,64,66,67,68].

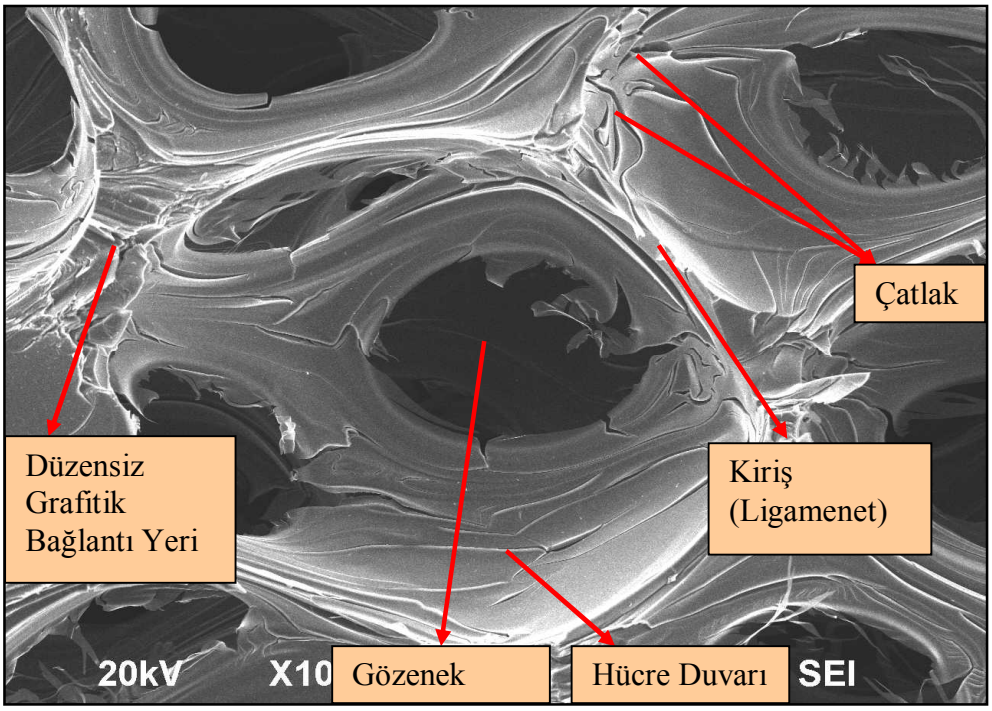


Şekil 2.15: Köpükleşme Mekanizması

Habbeciklerin oluşumu sırasındaki gerilme, habbeciklerin büyüme aşaması ve oluşan köpüğün hücre yapısının gelişmesi doğrudan viskozite ile ilgilidir [69,70]. Köpük oluşumu sırasında basınç ve viskozitenin etkisiyle mezofaz zift içerisindeki habbecikler basıncın azaldığı yöne doğru gelişme gösterirler. Kabarcık oluşması sırasında ve hücrelerin gelişmesinde başlangıç maddesinin viskozitesi önemlidir. Kabarcıkların genleşmesi sırasında düşük viskozitenin mezofaz moleküllerinin sıralanmasında olumlu etkisi vardır. Eğer mezofaz ziftin viskozitesi çok yüksek ise mezofaz zift içerisindeki moleküllerin hareketliliği azalarak habbeciklerin genişlemesi ve birbiriyle teması engellenir ve zift içerisindeki habbecikler homojen olmayan bir şekilde büyür ve basıncın boşaltılmasından sonra oluşan porların duvarları kalınlaşır bu da porozitenin azalmasına neden olur [22,64,66,67,68].

Köpük oluşumu sırasında porlar genişleyerek birbirlerine temas ederler. Bu aşamada oluşan gerilim sonucunda hücre duvarı incelir ve zayıflar. Eğer bu gerilim çok yüksekse hücre duvarı kırılır ve gözenekler birbirine bağlanır. Bunun sonucunda açık gözenekli porlar oluşur. Bazı hücreler birbirleriyle temas edemez bunu sucunda kapalı gözenekler oluşur [64].

Karbon köpüklerin hücre yapısını ve gözenekliliğini daha iyi açıklayabilmek için Şekil 2.16' da gösterilen ligament (iki hücre duvarının birleştiği çizgi), bağlantı noktası (en az üç hücrenin birleştiği nokta) ve çatlak terimleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.16: Karbon Köpüğün Yapısının Analizinde Kullanılan Terimler

2.7.3 Stabilizasyon

Karbon köpük üretiminde önemli aşamalardan biri olan stabilizasyon işlemi sırasında oksijen difüzyon yolu ile iç kısımlara doğru ilerleyerek, son yapıda homojen bir yapı sağlar. Uzun süreli stabilizasyon işleminde, yapı tamamen oksijen ile difüze olabilmekte ve homojen bir yapı meydana gelmektedir fakat kısa süreli ve çok büyük boyuttaki yapılarda işlem sırasında son yapıda üniform olmayan materyal özellikleri ve bazı kusurlar oluşabilmekte ve homojen yapı bozulabilmektedir [71].

Oksidasyon işlemi sonucunda mezofaz gibi termoplastik maddelerin karbon zincirlerinin birbirleriyle kesişmesi sağlanır böylece maddeler sıcaklığa karşı direnç kazanırlar. Bu durumda yüksek sıcaklıkta gerçekleşen karbonizasyon aşamasında ziftin erime riski ortadan kalkmış olur [32,72,73].

Stabilizasyon işlemi mezofaz ziftin erime sıcaklığının 10–40 K üzerinde gerçekleşir. Sıcaklık istenen seviyenin altında olursa oksidasyon işlemi yetersiz kalarak, karbonizasyon sırasında karbon köpüğün yapısındaki porların kapanmasına neden olabilir. Bu sıcaklığın aşılması durumunda ise oksitlenmiş tabaka kalınlaşarak köpüğün bozulmasına neden olur. Stabilizasyon işlemi ortama saf oksijen yada kuru hava beslenerek 8–24 saat arası bir sürede gerçekleşir ve köpük ağırlığının % 5–10

artması ile son bulur. Stabilizasyon işlemine tutulan köpük daha sonra oda sıcaklığına soğutularak karbonizasyon işlemi için hazır hale gelir [27,74,75,76].

Fakat bu işlem hem zaman harcayıcı hem de kullanılan ekipmana bağlı olarak pahalı bir yöntemdir. Mezofaz zift bazlı karbon köpüklerin oluşumunda Klett ve arkadaşları bahsi geçen engelleri ortadan kaldıran yeni bir yöntem geliştirdiler. Bu yöntemde oksidasyon/stabilizasyon işlemini gerçekleştirmeden de oldukça yüksek grafitik özelliklere sahip mezofaz zift bazlı karbon köpük ürettiler [31,32,35,43,77].

2.7.4 Karbonizasyon

Yüksek sıcaklıklarda karbon köpüğün içindeki safsızlıkları ortadan kaldırmak için uygulanan karbonizasyon olayı 1073 K–1773 K arasında bir sıcaklıkta gerçekleşir. Karbon köpüğün dağılmaması amacıyla aynı zamanda ortama azot, argon veya helyum gazlarından bir tanesi beslenir. Oldukça karmaşık yapıya sahip olan karbonizasyon işlemi; izomerizasyon, dehidrojenerasyon ve yoğunlaşma gibi kimyasal olayları içermektedir [65,75].

Köpük üzerinde çatlaklara neden olabilecek ısıl gerilmelerin yaşanmaması için sıcaklığın kontrollü bir şekilde arttırılması önemlidir. Buna göre ısıtma hızı 1 K/dk – 5 K/dk arasında seçilmelidir. Elde edilen karbon köpüğünün en az 1 saat süreyle yüksek sıcaklıkta tutulması gerekmektedir. Bir saatlik karbonizasyon işlemi sonrasında köpük aynı şekilde yavaşça oda sıcaklığında soğutulmalıdır [74,78].

2.7.5 Grafitizasyon

Karbon köpük, karbonizasyon aşamasından sonra 1973 K–3273 K arasında, inert ortamda ısıtılarak grafitize olması sağlanır [79]. Uygulanan ısıl işlem sırasında karbon köpük içerisinde kalan az miktardaki hidrojen uzaklaştırılmış olur. İnert ortamı sağlamak için karbonizasyon aşamasında kullanılan inert gaz kullanılabilir [75]. Grafit yapıda olan karbon köpüğü atomlarının dizilişleri daha düzgün olduğundan elektrik ve ısı iletkenlikleri daha yüksektir [65].

2.8 Karbon Köpüğünün Kullanım Alanları

Yeni bir ileri teknoloji malzemesi olan karbon köpük, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, ısı yalıtkanlık veya iletkenlik gibi benzersiz özelliklerinden dolayı pek çok uygulama alanı için cazip bir aday olmuştur [4].

Karbon köpüğü kullanım alanı bakımından havacılık ve uzay, otomotiv, enerji, ticari, medikal, askeri, gemi sanayisi olarak yedi ana başlık altında incelenebilmektedir [80,81]. Karbon köpüğünün potansiyel uygulama alanları Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

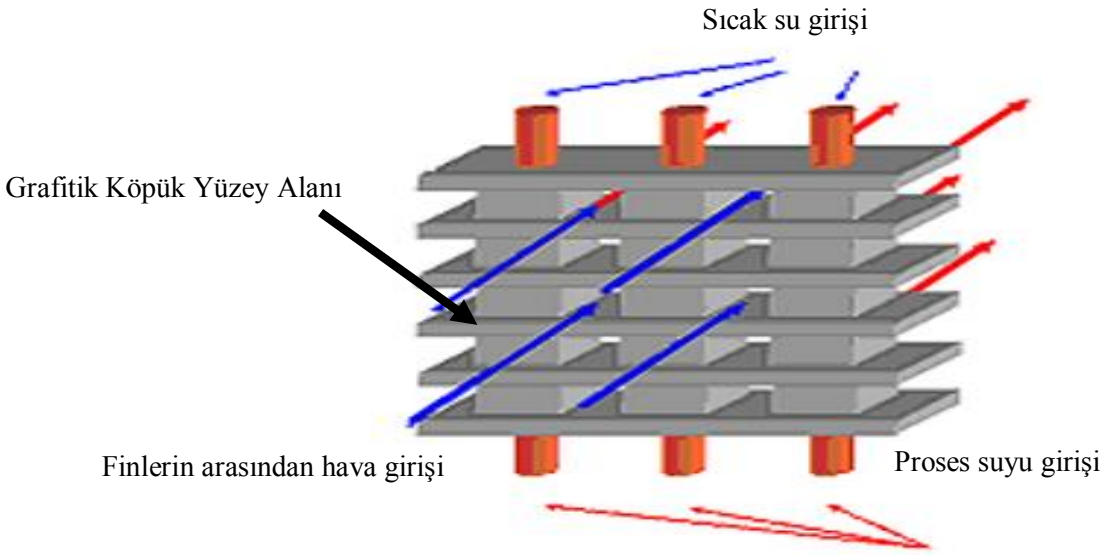
Çizelge 2.5: Karbon Köpüğün Uygulama Alanları [4]

Uzay teknolojisi	• Anten sistemlerinde • Kompozit malzemelerde • Hafif aynalarda • Optik araçlarlarda • Roket başlıklarında • Termal korunma sistemlerinde • Roket motorlarında
Otomotiv	• Tamponlarda (darbe koruyucu malzeme) • Fren disklerinde • Katalitik konvertörlerde • Radyatörlerde • Pistonlarda • Motor parçalarında
Enerji	• Pil elektrotları • Yakıt hücrelerinde
Ticari	• Aşındırıcı malzemelerde (zımpara) • Ses yalıtım sistemlerinde • Sıcaklık yalıtım malzemesinde • Yanmaya dirençli malzemelerde • Filtrelerde • Güvenlik duvarlarında
Tıp	• Kemik yapımında • Diş dolgu malzemelerinde
Askeri	• Hafif zırh yapımında • Isı değiştiricilerde • Isı alıcılarda • Radar önleyici malzemelerde • Yüksek sıcaklık mermilerinde • Hassas mühimmatlarda
Gemi yapımında	• Yapısal yalıtım panelleri • Gemi duvarlarında

2.8.1 Isı değiştiriciler

Karbon köpüklerinin ısıl iletkenliğinin yüksek olması, farklı amaçlarla ısı değiştiricilerinde kullanılmasını mümkün kılmıştır. Örnek olarak otomotiv ve

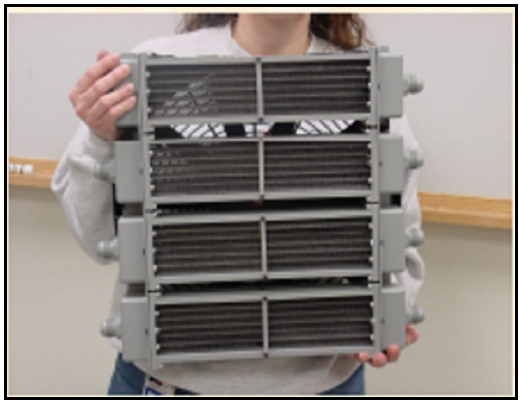
havacılık sektöründe otomobil ve uçaklarda radyatörlerde kullanılması gösterilebilir. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi yapılan ısı değiştiricide yüzey alanını artırmak için finler kullanılmıştır. Yüzey alanının arttırılmasındaki asıl amaç ise basınç düşüşünü engellemektir. Bu sistemdeki basınç düşüşü 0.03 Kpa/cm'dir ve bu basınç düşüşü sistem için idealdir. Finler sayesinde yüzey alanı arttırmasının bir faydası daha toplam alanı küçültmektir. Sitemde şekillendirilmiş olan köpüğün içerisinden sıcak su geçmektedir. Dışardan ise normal koşullardan hava vardır. Toplam Finlerin yüzeysel alanı 7561 cm^2 ve çapı 0,782 cm olan alüminyum tüplerin alanı ise 6061 cm^2'dir. Karbon köpüğünden yapılan ısı değiştiricinin boyutları ise 22,9 cmx17,78 cmx15,27 cm'dir. Bu boyut kullanılan diğer radyatörlerden daha küçüktür bundan dolayı karbon köpüğüyle yapılan ısı değiştiriciler kullanımı daha avantajlıdır. Sadece boyutu bakımından değil ısıl iletkenliği de diğer materyallere göre daha üstündür. Isı transfer katsayısı 977 $W/m^2.K$ olarak hesaplanmıştır [82].



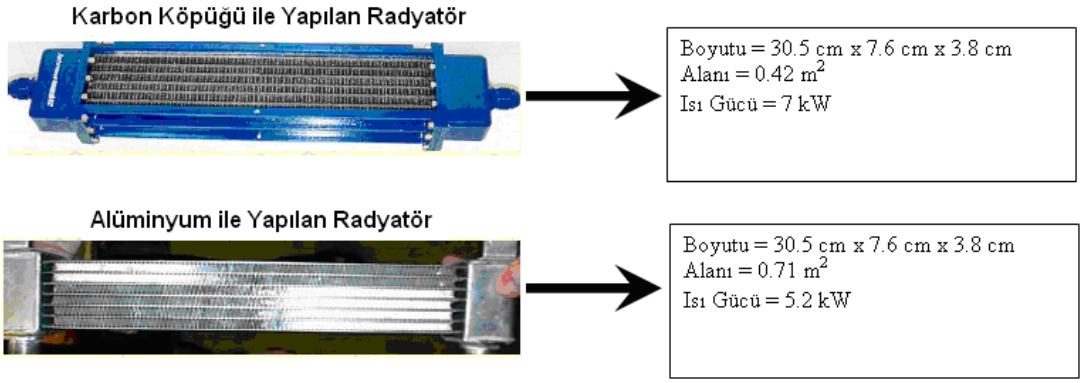
Şekil 2.17: Isı Değiştiricinin Şematik Gösterimi [82]

Şekil 2.18'de karbon köpüğünden yapılmış tam boy Nascar marka araçlarının radyatörü gösterilmiştir.

Karbon köpüğü ayrıca günlük hayatta da evlerde veya iş yerlerinde kullandıkları elektrikle çalışan radyatörlerde kullanılmaktadır. Bu radyatörlerde alüminyum kullanımdan daha avantajlı olan karbon köpüğü kullanımı son günlerde yaygınlaşmaktadır. Şekil 2.19'da da karbon köpüğünden ve alüminyumdan yapılan radyatör örnekleri verilmektedir [83].



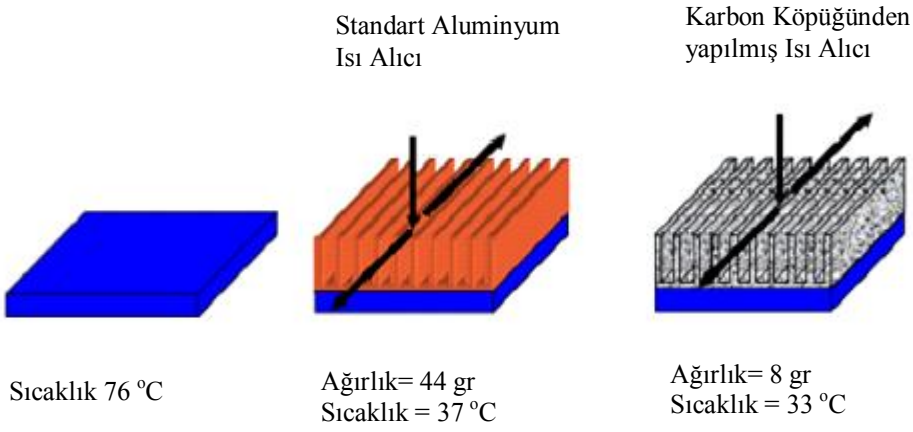
Şekil 2.18: Radyatör [82]



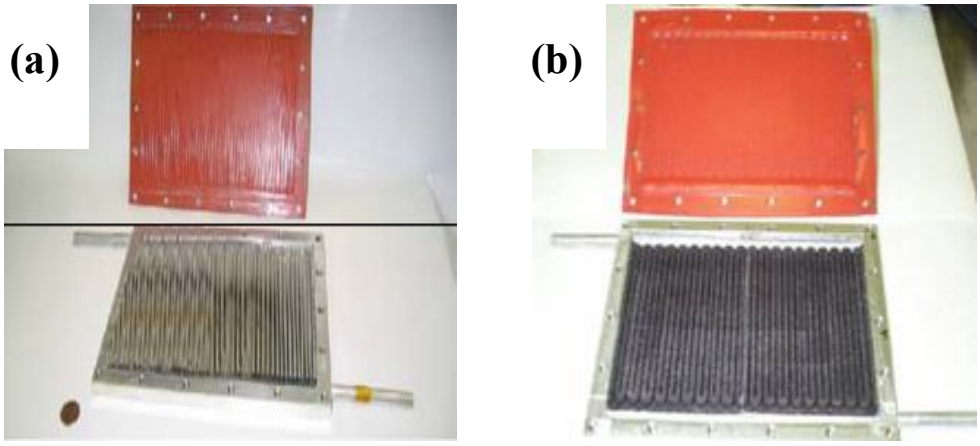
Şekil 2.19: Günlük Hayatta Kullanılan Radyatörlere Örnekler [83]

2.8.2 Soğutucular (Heat Sinks)

Özellikle bilgisayar teknolojisinde kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar çalışmaya başladıktan sonra ana kart gibi bilgisayar parçalarının sıcaklıkları artmaya başlar. Bu sıcaklık artışı parçaların bozulmasına neden olmaktadır. Bu ısınmayı azaltmak için fanlar kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyumdan yapılan ısı alıcıları kullanılmaya başlanmıştır. Karbon köpüklerinin kullanımıyla ağırlık dörtte birine düşmüştür. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi normal bir ana kartın sıcaklığı 76 ^{o}C'lere kadar çıkabilmektedir. Fakat alüminyum ve kullanılan ve finlere sahip olan ısı alıcıda sıcaklık 37 ^{o}C düşmektedir. Karbon köpüğü kullanılan ısı alıcıda ise sıcaklık alüminyum kullanılan ısı alıcıdan pek farklı olmadığı fakat ağırlık bakımından çok büyük fark olduğu görülmektedir (Şekil 2.21a ve Şekil 2.21b) [82].



Şekil 2.20: Karbon Köpüğünden Ve Alüminyumdan Yapılmış Isı Alıcılar [82]



Şekil 2.21: a) Alüminyumdan Yapılmış Bir Isı Alıcı **b)** Karbon Köpüğünden Yapılmış Bir Isı Alıcı [84]

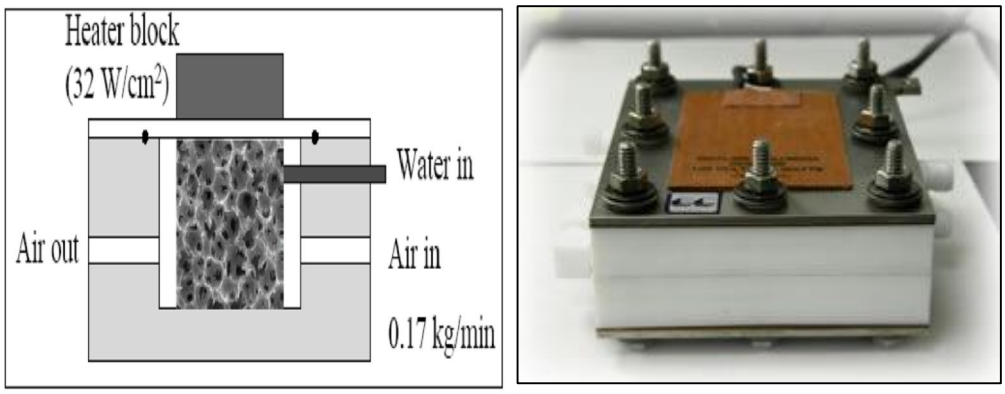
2.8.3 Yakıt hücresi elektrotları

Proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde iki yanı karbon ve platinle kaplanmış bir zar elektrot membran yapısı vardır. Burada oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik akımı elde edilir. Dışarıdan hava yoluyla alınan oksijen de binaya geçen hidrojen ile birleşerek su oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda ısıda üretilir. Hidrojen, zar elektrod membran ünitesinin sağında ve solunda akış kanalları bulunan grafitik yapılardan geçiş sağlar. Buradaki grafitik köpüklerin iyi ısı iletim özelliklerinden yararlanılarak reaksiyon sırasında ısınan hücrelerin çalışabilir halde kalması için akış kanallarında dolaşan su ile gerekli soğutmayı sağlamakta kullanılır [85].

Bir yakıt hücresinde giriş akımının yeterince nemli olmaması yakıt hücresindeki membranda kuru bölgelerin kalmasına neden olur bu da voltajda ve enerji veriminde

düşüşe neden olur. Yakıt pilinden iyi verim alınabilmesi için giriş akımının nemli olması gerekir. Bunun için de giriş akımı uygun bir sıcaklıkta olmalıdır [86].

Karbon köpük yakıt pillerinde elektrolit olarak kullanılabilir ve kullanılan diğer malzemelere göre çok daha avantajlıdır. Karbon köpüğün yüksek termal iletkenliği ve geniş yüzey alanı sayesinde ortam şartları ne olursa olsun yakıt piline giren akımın nemli olması sağlanmış olur. Karbon köpüğün birçok kimyasal reaktife karşı çok iyi korozif direnç göstermesi de yakıt pillerinde kullanılmasında başka bir avantaj sağlar [87]. Şekil 2.22'de yakıt pilinin yapısı ve karbon köpük elektrod kullanılarak yapılan hücre modeli görülmektedir.



Şekil 2.22: Yakıt hücresinin yapısı [4,87]

2.8.4 Uzay teknolojisi ve uzay sanayi

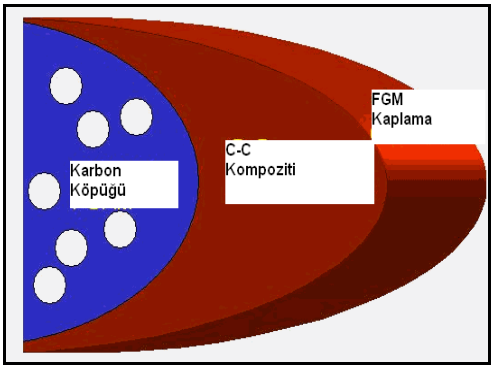
Karbon köpüğü, ekonomik olması ve elektrik direnci özelliğinin bulunmasının yanı sıra yüksek sıcaklıklarda uzay şartlarına elverişlilik göstermesi özelliği nedeniyle radar sistemlerinde de tercih edilmektedir. Hafiflik ve dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle teleskoplarda da kullanılmaktadır.

Roket motoruna gönderilen gazlar bir nozül yardımıyla sıkıştırılarak gönderilmektedir. Bu nozüller daha çok metal bileşimlerinden yapılmakta fakat çok ağır ve yüksek maliyetli olmaktadır. Karbon köpüğünün yukarıda belirtilmiş düşük ağırlığa sahip olması, dayanıklılığı, ucuzluğu ve ısıya dayanmasından dolayı roket motorlarında kullanılan nozül yapımında kullanılmaktadır [4]. Şekil 2.23'de roket modülü örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.23: Nozül Yapımında Kullanılan Karbon Köpükler [4]

Uzay araçlarının yapımında kullanılan malzemeler yüksek sıcaklıklarda özelliklerini korumaları gerekir. Ayrıca çalışmalar bu malzemelerin aracın manevra kabiliyetine de etkileri olduğunu göstermektedir. Manevra kabiliyetini yüksek olması için kanatlar üzerinde çalışmalar bazı sonuçlar vermiştir. Fakat malzeme seçiminde yüksek sıcaklıklara dayanıma da dikkat edilmelidir. Bu yüzden çalışmalar karbon-karbon birleşimlerinden bir malzemenin uzay teknolojisinde kullanılmasının daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Şekil 2.24'de gösterildiği gibi malzeme sandviç şeklindedir içeri kısımda karbon köpüğü bulunmaktadır. Çekirdek kısmın yanı sıra kenar kısımda karbondan yapılmıştır ve bu yapı malzeme yüksek sıkıştırma sağladığı için dayanıklılığı çok fazladır [88].



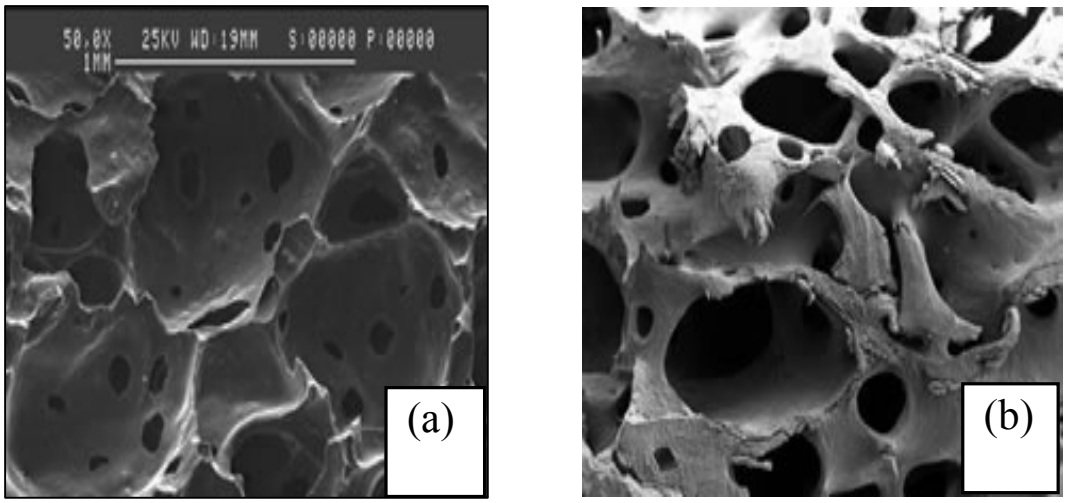
Şekil 2.24: Uzay Mekiğinin Yapısı [88]

2.8.5 Diğer alanlar

Tıp sektörü dünyada en dikkat çeken, etkileyici ve gelişen endüstridir. Mikro elektronik, telekomünikasyon, biyoteknoloji ve farmakoloji gibi birçok endüstriden yararlanmaktadır. Artoplasti, kalça bölgesinde hasta bölgenin değişimi üzerine çalışılan bir tıbbı işlemdir. Bu işlem kemik implantların da kullanılmaktadır. Bu yöntem gelişimini tamamladığından artık yeni yöntemler aranmaktadır. Bu

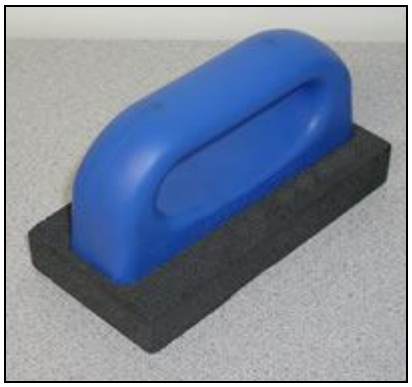
çalışmalardan sonra karbon köpüğü de tıp da kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca THR (komple kemik değişimi) gibi cerrahi yöntemlerle yapılan kemik değişimi operasyonlarında büyük ses getirmiştir [89].

Gözenekli ve sağlam yapıda olması insan kemiği ile benzerlik göstermektedir. Bu yüzden ortopedi alanında kemik yerine kullanılmaktadır. Bu alanda çalışmalar devam etmektedir [4,89]. Şekil 2.25'de karbon köpük ve kemik yapısının benzerliğini göstermek amacıyla karbon köpüğe ve kemiğe ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.25: (a) Karbon Köpük Yapısı **(b)** Kemik Yapısı

Zımpara üretiminde karbonun inorganik formu kullanılarak karbon köpüğü üretilir ve bu karbon köpüğü çok yüksek sertliğe sahiptir. Yüksek aşındırma gücüne sahip olduğu için cam ve metal parlatılmasında ve ayrıca boyaların kazınmasında kullanılmaktadır [4]. Şekil 2.26'da karbon köpüğünden üretilmiş bir zımpara görülmektedir.



Şekil 2.26: Karbon Köpüğünden Yapılmış Bir Zımpara [4]

Karbon köpüğünün gözenekli yapısıyla yüksek sıcaklıklarda izolasyon yapılabilme olanağı sunduğu için diğer izolasyon malzemelerine göre daha avantajlıdır. Termal özelliklerinden dolayı 3000 ^{o}C' ye kadar uygulanmaktadır [4].

Otomotiv sektöründe araçların tampon bölgelerinde kullanılarak çarpma anlarında darbe şiddetini emerek büyük zararın meydana gelmesini önlemesinden dolayı tercih edilmektedir. Şekil 2.27'de tampon sistemlerine silindirik bir şekilde ve polimerle sarılmış bir halde monte edilmektedir [4].

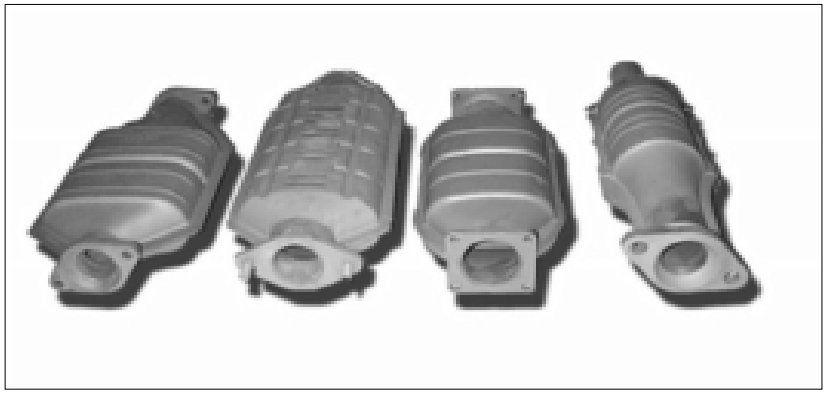


Şekil 2.27: Otomobillerde Tampon Bölgesinde Kullanılan Karbon Köpüğü [4]

Katalitik konvertör ya da katalitik dönüştürücüler motorların egzozlarındaki çevreye zararlı maddeleri daha az zararlı maddelere dönüştüren cihazlardır. En yaygın uygulaması otomobillerdedir [4].

Karbon köpük sahip olduğu açık gözenekli yapısıyla egzoz gazları için ideal geniş bir yüzey yaratır ve bu yüzdende katalitik konvertörlerin yapımında birçok malzemeden daha avantajlıdır [4].

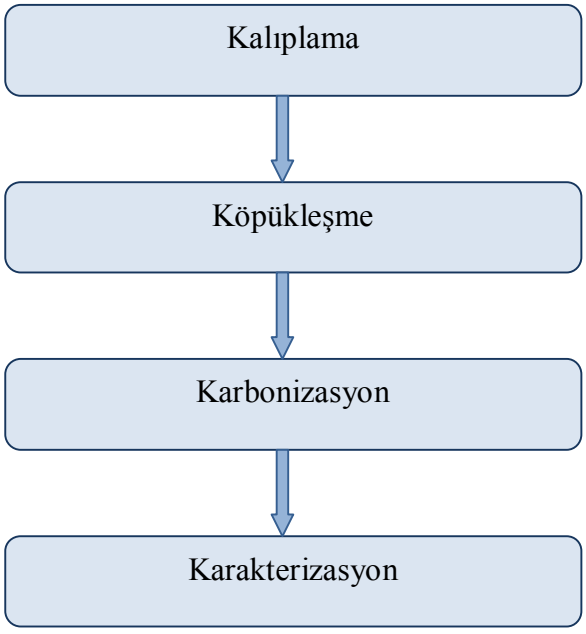
Şekil 2.28'de karbon köpükten yapılan katalitik konvertörler gösterilmektedir [4].



Şekil 2.28: Karbon Köpükten Yapılan Katalitik Konvertörler

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada % 100 anizotropik naftalin bazlı AR mezofaz zift kullanılarak yüksek sıcaklıklarda (773 – 873 K) stabilizasyon aşaması atlanılarak karbon köpük üretimi yapılmıştır. Reaktör aşamasında uygulanan basınç, sıcaklık, basınç boşaltma süresi ve son sıcaklıkta bekleme süresinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra, ilk kez mezofaz zift ile doğal asfaltit karıştırılarak karbon köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm karbon köpük örnekleri 1323 K' de karbonizasyon işlemine tabi tutulmuş hallerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyonları yapılmış yoğunlukları ölçülmüş ve mekanik dayanım testleri gerçekleşmiştir. Karbon köpük üretiminde kullanılan prosesin blok akış diyagramı şekil 3.1'de gösterilmektedir.

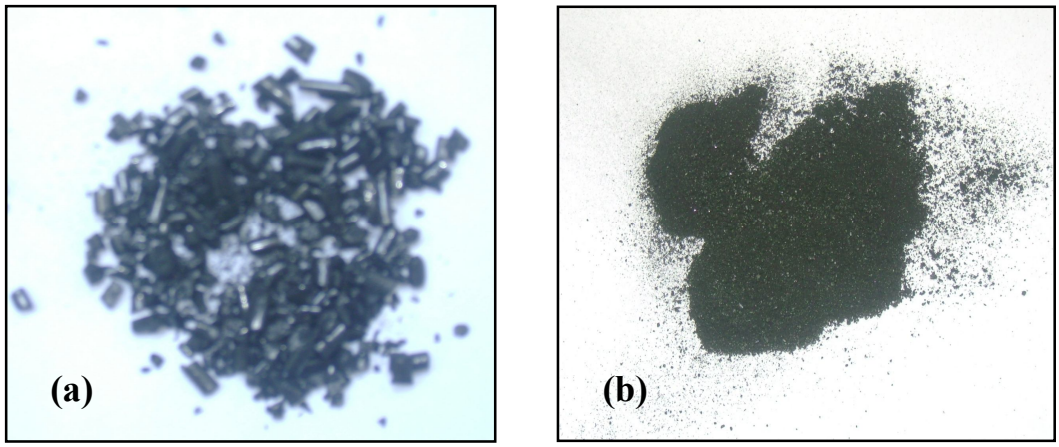


Şekil 3.1: Karbon Köpük Hazırlama ve Oluşum Şeması

3.1 Mezofaz Zift

Karbon köpük üretiminde Mitsubishi Gas Chemical Corp. Tokyo, Japonya'dan temin edilen AR mezofaz zift hammadde olarak kullanılmıştır. % 100 anizotropik olan AR

mezofaz zift, nafatlinin HF–BF_3 katalizörü eşliğinde katalitik polimerizasyon ile üretilmiştir. Pelet ve toz halindeki mezofaz zift şekil 3.2'de görülmektedir.

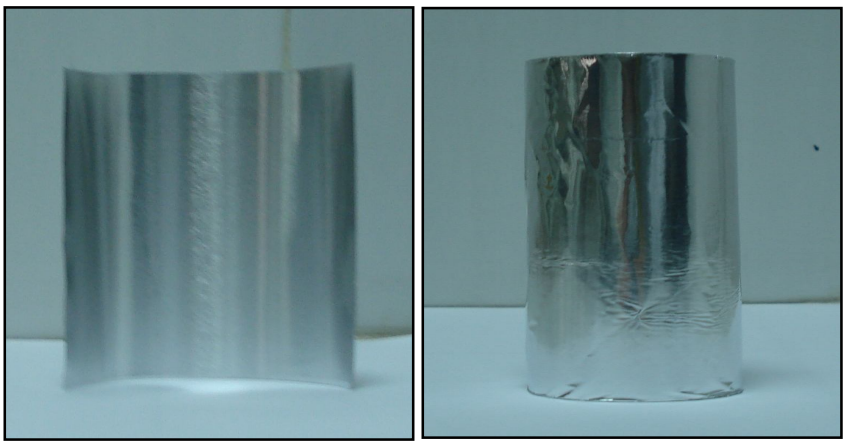


Şekil 3.2: (a) Pelet halindeki Mezofaz Zift **(b)** Toz hale getirilmiş Mezofaz zift

Mezofaz zift üretim prosesi daha önce ayrıntılı olarak Bölüm 2.6.1'de anlatılmıştır. Kullanılan mezofaz zifte ait ait fiziksel ve toksikolojik özellikler Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

3.2 Deneylerin Yapılışı

10 g ağırlığındaki mezofaz zift Şekil 3.3'de görülen 2 cm çapında ve 10 cm boyundaki alüminyum kalıba konularak, maksimum çalışma sıcaklığı 873 K ve maksimum çalışma basıncı 27.6 MPa olan yüksek ısı ve basınç reaktörüne yerleştirilir. Reaktörün sızdırmazlığı kontrol edildikten sonra ısıtma işlemine geçilir.

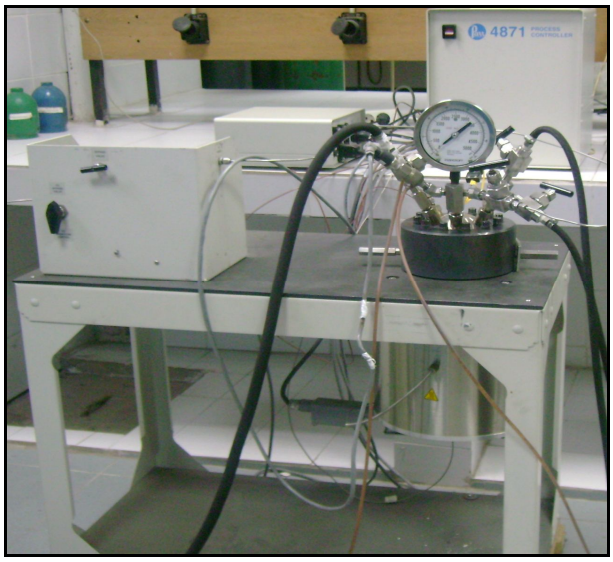


Şekil 3.3: Alüminyum Kalıp

Çizelge 3.1: Mezofaz Ziftin Fiziksel ve Toksikolojik Özellikleri [90]

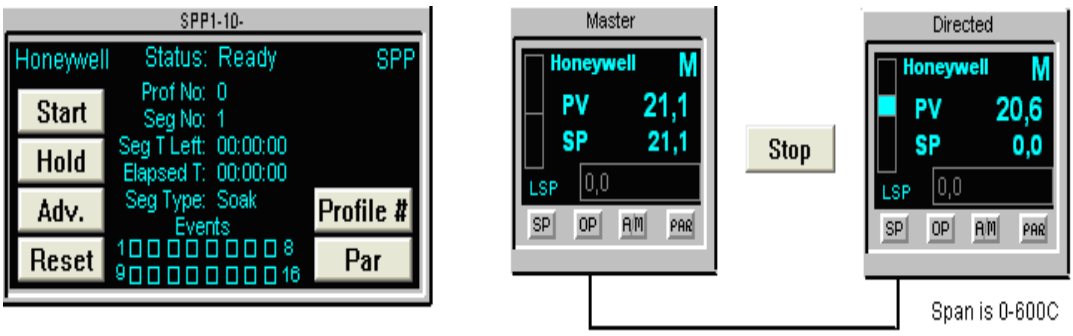
Fiziksel Özellikler	
Görünüş	Siyah tanecikler (25ºC)
Kütlesel Yoğunluk (g/cm³)	0.70 ± 0.3
Specifik Ağırlık (25ºC)	1.23
Specifik Isı (cal/g ·ºC)	0.65
Yumuşama Sıcaklığı (ºC)	275 ± 5
Mezofaz İçeriği (%)	100
Hidrojen/Karbon (atom/atom)	0.58-0.64
Alevlenme (Yanma) Noktası (ºC)	> 300
Kül (ppm)	< 20
Çözünebilirlik (%)	
Su içerisinde çözünürlüğü	0
Benzen içerisinde çözünürlüğü	35-44
Piridin içerisinde çözünürlüğü	40-50
Pişme Değeri (%) 1 saat, 600ºC	
1 atm	80-85
30 atm	90-95
Toksikolojik Özellikler	
Akut Oral LD60 (fare)	> 5000 mg/kg
Deri Tahribatı	Kısmen tahriş edici
Mutajenite (Salmonella)	negatif
Mutajenite (E.coli)	negatif

Reaktörde ısıtma işlemine geçilmeden önce reaktör sisteminde gaz kaçağı olup olmadığını anlamak için sisteme azot gazı beslenir ve 5 dakika boyunca sistemdeki gaz basıncı değeri kaskat kontrol sistemindeki dijital ekrandan ya da reaktörün üzerinde bulunan analog basınç göstergesinden takip edilir. Sistemde gaz kaçağı yoksa reaktör hacminde bulunan havayı uzaklaştırmak için reaktör birkaç kez azot gazı ile süpürülür ve daha sonra sistem vakuma alınır.



Şekil 3.4: Reaktör

Reaktördeki sıcaklık ve basınç kontrolü ısıtma hızına bağlı bir bilgisayar monitörü ile ile izlenebilmekte ve gerekli kontroller bilgisayar üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.5'de kullanılan bilgisayar yazılımının giriş menüsü verilmiştir.

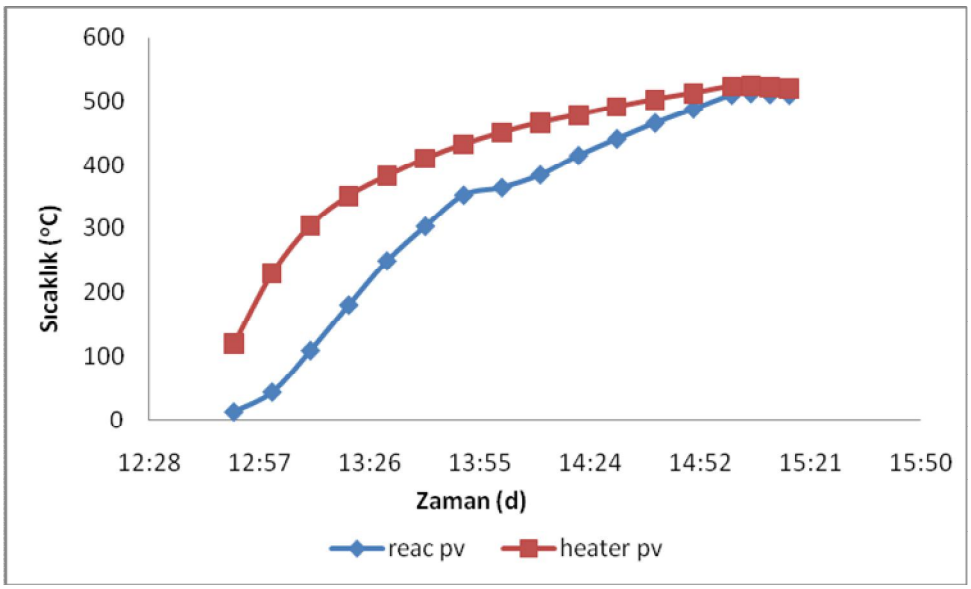


Şekil 3.5: Reaktör sıcaklık ve basınç kontrolünü sağlayan bilgisayar yazılımının giriş menüsü

Deneye başlarken sisteme bağlı azot tüpünün vanası açılarak deney için belirlenmiş azot basıncı verilir. Sistem için gerekli olan basınç değeri sağlandıktan sonra daha önceden belirlenmiş son sıcaklık değerine kadar sistem sıcaklığı dakikada 2.5 K

artacak şekilde programlanır. Sistem istenilen sıcaklık değerine geldikten sonra bu sıcaklıkta 15 dakika beklenir.

Şekil 3.6'da zamanla sistemin ulaştığı sıcaklık değeri ve son sıcaklıktaki bekleme süresi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Isıtıcı ve Reaktör Sıcaklıklarının Zamanla Değişimi

15 dakikalık bekleme süresi bittikten sonra sistem basıncı çok hızlı bir şekilde atmosfer basıncına düşürülür. Gazın hızlı boşaltılmasıyla mezofaz ziftteki uçucu maddeler karbon yapıdan uzaklaşarak hücreleri ve hücreleri birbirine bağlayan gözenekli bir yapı (karbon köpük) elde edilir. Gaz boşaltma işleminden sonra reaktör oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır. Soğuyan reaktörden çıkarılan karbon köpük örnekleri karbonizasyon işlemine tabi tutulur.

Karbonizasyon fırını olarak 0.05 m çapında ve 0.9 m uzunluğunda boru fırın kullanılmıştır. Karbonizasyon işlemi azot atmosferi altında gerçeklerştirilmiştir. Şekil 3.7'de karbonizasyon işleminin gerçekleştirildiği karbonizasyon fırını gösterilmiştir. Karbonizasyon işleminde köpüğün yüksek sıcaklıklarda dağılmasını önlemek ve açığa çıkan uçucu maddeleri süpürmek için dakikada 0,0005 m^3 akış hızına sahip azot gazı kullanılmıştır.

Karbonizasyon işleminde örnekler ilk olarak oda sıcaklığından, 5 K/d ısıtma hızıyla 523 K' e ısıtılarak bu sıcaklıkta 10 dakika bekletilir daha sonra tekrar 5 K/dk ısıtma hızıyla 783 K' e ısıtılarak bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilir. Bu aşamadan sonra 1 K/dk ısıtma hızla 1323 K'e çıkılarak bu sıcaklıkta 120 dakika beklenerek

karbonizasyon gerçekleştirilir. Geçen 120 dakikalık bekleme süresinden sonra 5 K/dk soğutma hızla sistem oda sıcaklığınına soğutulmuştur.



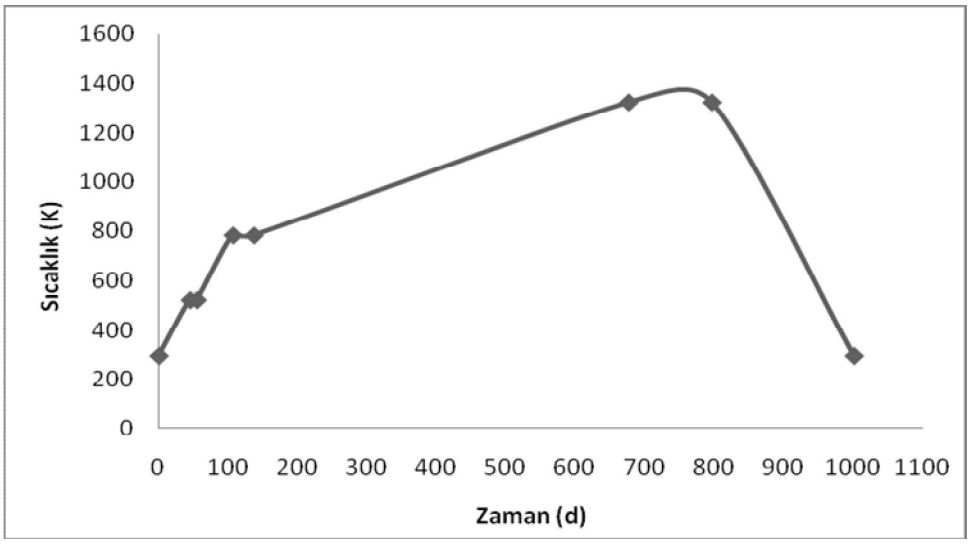
Şekil 3.7: Karbonizasyon İşleminin Uygulandığı Fırın

Çizelge 3.2'de karbonizasyon işleminin aşamaları gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Karbonizasyon İşlemi Aşamaları

Sıcaklık (K)	**Isıtma veya Soğutma Hızı (K /d)**	**Bekleme Süresi (d)**
523	5	10
783	5	30
1323	1	120
298	5	-

Şekil 3.8'de karbonizasyon işleminde sıcaklığın zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Karbonizasyon İşleminde Sıcaklığın Zamanla Değişimi

3.3 Karbon Köpük Üretiminde Farklı Proses Parametrelerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi, basınç boşaltma süresi ve hammaddeye ağırlıkça değişik yüzde oranlarında asfaltit eklenmesi gibi proses parametrelerin üretilen karbon köpük üzerine etkisi incelenmiştir.

3.3.1 Basıncın Etkisi

Yapılan çalışmada ilk olarak basınç parametresinin karbon köpük üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla sisteme basınç iki farklı şekilde beslenmiştir.

Uygulanılan ilk yöntemde oda sıcaklığında sisteme gaz beslenilerek sırasıyla 0.81, 1.50, 2.19, 3.57, 5.10, 6.9 MPa başlangıç basınçları oluşturulmuştur. Daha sonra sistem 783 K' e kadar ısıtılarak son sıcaklıkta 15 dakika beklenmiştir [32,50,77]. Boşaltma süresi de en hızlı boşaltma yapılacak şekilde 5–6 saniye olarak gerçekleştirilmiştir [91].

Diğer bir basınç etkisinin incelenmesi deney grubunda sistem mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığı olan 548 K' in 50-100 K üzerindeki bir sıcaklık olan 623 K ısıtılarak [32,50,77] sırasıyla sistemde 0.81, 1.50, 2.19, 3.57, 5.10, 6.9 MPa başlangıç basınçları oluşturulmuştur. Daha sonra son sıcaklık olan 783 K' e kadar ısıtılmış diğer basınç deney setine paralel olarak son sıcaklıkta 15 dakika beklenilmiştir. Diğer basınç deney setinde olduğu gibi boşaltma süreside en hızlı boşaltma yapılacak şekilde 5–6 saniye olarak belirlenmiştir [91].

3.3.2 Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklığın köpük oluşumu üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla sırasıyla 783, 823 K ve de 873 K son çalışma sıcaklıkları parametre olarak seçilmiştir.

3.3.3 Son Sıcaklıkta Bekleme Süresinin Etkisi

Bekleme süresinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisini araştırma amacıyla sırasıyla 900, 1800, 3600, 10800, 18000 ve 25200 saniye son sıcaklıkta bekleme süreleri parametre olarak seçilmiştir.

3.3.4 Basınç Boşaltma Süresinin Etkisi

Basınç bekleme süresinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla sırasıyla 3 s, 6 s, 9 s, 15s, 15 s ve de 29 s' lik boşaltma süreleri parametre olarak seçilmiştir.

3.3.5 Asfaltit Eklenmesi

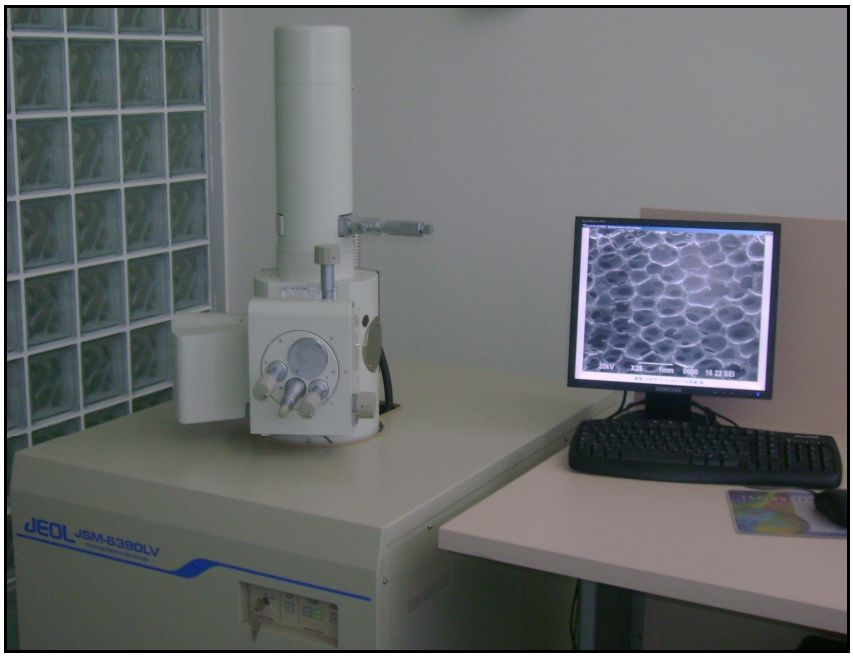
Bu çalışmada optimum basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi ve gaz boşaltma süreleri belirlenen % 8 kül içeriğine sahip asfaltit numunelerinden ağırlıkça % 2, % 5 ve % 10 oranlarında hammaddeye katılarak oluşturulan karbon köpüklerde asfaltit karışım yüzdesinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ayrıca % 26 ve % 41 kül içeriğine sahip asfaltitler ağırlıkça % 5 oranında hammaddeye karıştırılarak asfaltit içeriğindeki kül miktarının karbon köpük yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.4. Karakterizasyon Ekipmanları

3.4.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Yapılan bu çalışmada üretilen karbon köpüğün yapısını incelemede özellikle de köpüğün gözeneklerin ve hücre duvarlarının yapılarının ve hücrelerin birbiriyle bağlantılarının incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobundan faydalanılmıştır.

Karbon köpük yapısının elektron mikroskobu ile incelenmesi yapısal çalışmalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıclarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [92]. Maddelerin karakterizasyonunda en çok kullanılan ekipmandır. Bu çalışmada Şekil 3.9'da JEOL JSM-6390 LV elektron mikroskobu kullanılmıştır.

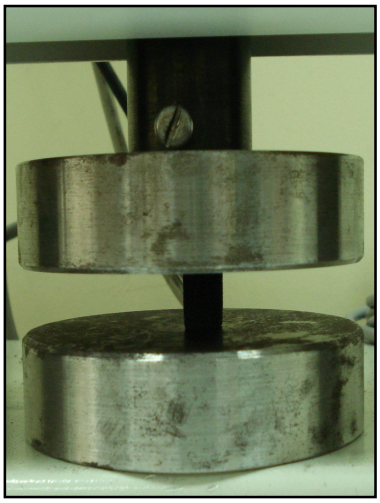


Şekil 3.9: Taramalı Elektron Mikroskobu

3.4.2 Dayanım Testi

Dayanım testi, malzemenin iki plaka arasına sıkıştırılarak, malzemenin ne kadar basınca dayanabileceğini saptamak amacıyla uygulanır. Malzemenin sıkışma dayanımı, malzemeye uygulan kuvvet miktarının malzemenin yüzey alanına bölünmesiyle bulunur. Bu çalışmada dayanım testleri için Autograph firmasının AGS-J SHIMAOZU Çekme/Basma test ekipmanı kullanılmıştır. Kullanılan modelde 10 kN'a kadar kuvvet uygulanabilmektedir. Şekil 3.10'da bu çalışmada kullanılan dayanım testi ekipmanı gösterilmiştir.

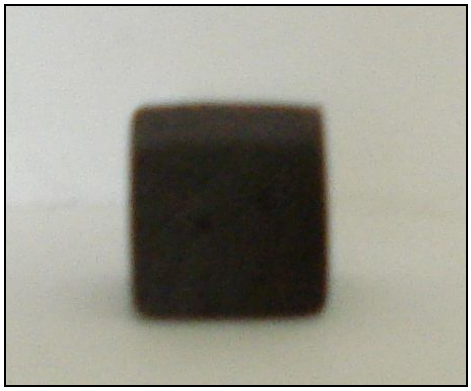




Şekil 3.10: Dayanım Testi Ekipmanı

3.4.3 Yoğunluk Hesaplanması

Köpük örnekleri Şekil 3.11'de gösterilen küp ya da dikdörtgenler prizması formunda şekillendirildikten sonra boyutları ölçülerek hacim hesabı yapılmış, hacmi ve ağırlıkları bilinen köpüklerin daha sonra yoğunlukları hesaplanmıştır.



Şekil 3.11: Küp biçiminde şekillendirilen karbon köpük örneği

3.4.4 Porozite

Bölüm 3.4.3' de kütlesel yoğunlukları (d) (bulk density) hesaplanan karbon köpük numunelerinin daha sonra şekil 3.12' de görülen Hook tarzı Mettler marka yoğunluk ölçme cihazı ile gerçek yoğunlukları (d*) ölçülmüştür ve daha sonra formül 3.1'de bulunan bu değerler yerine konularak porozite hesaplaması yapılmıştır [22,64,93].

$$P = \left(1 - \frac{d}{d*}\right) \times 100 \qquad \textbf{(3.1)}$$



Şekil 3.12: Hook Tarzı Mettler Marka Yoğunluk Ölçme Cihazı [94]

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında deneysel sonuçlar ve bu sonuçların yorumları verilmiştir. Proses parametrelerinin yani basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi, basınç boşaltma süresinin ve asfaltit ilavesinin üretilen karbon köpüklerin yapısına ve özelliklerine nasıl etki ettiği incelenmiştir.

Çalışmalarda tüm karbon köpüklerin yapısının aydınlatılması amacıyla taramalı elektron mikroskobunda (SEM) 25(X25), 50(X50), 100(X100), 200(X200), 300(X300)ve 400(X400) defa büyütülmüş görüntüleri çekilmiştir. Tüm karbon köpük örneklerinin dayanım testi sonucu sıkışma dayanımları belirlenmiş ve yoğunlukları hesaplanmıştır.

4.1 Proses Basıncının Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi

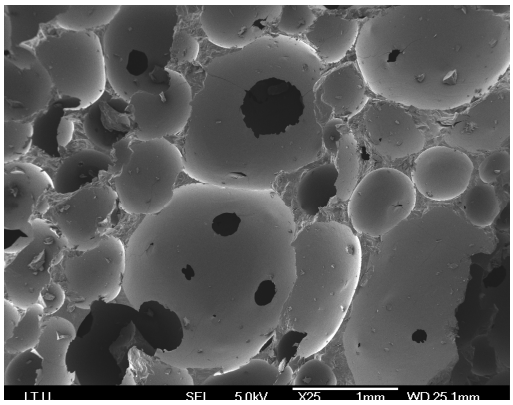
4.1.1 Atmosferik Basınç Altında Gerçekleştirilen Deney Setlerinin İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında ise basınç olmaksızın üretilen karbon köpüklerin yapısında sıcaklık artması ile meydana gelen değişiklikler gözlenerek köpükleşme mekanizmasının daha iyi aydınlatılmasına çalışılmıştır.

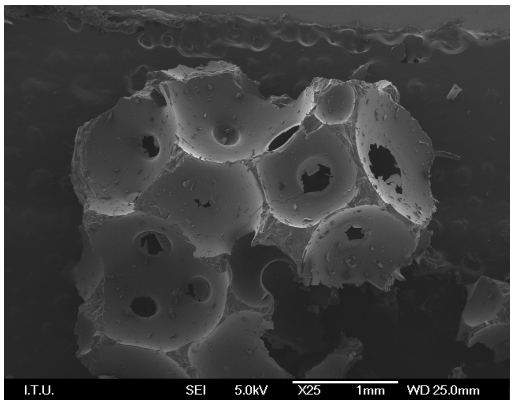
Bu deney gurubunda; sistem basınç oluşturulmadan sırasıyla 548 K ve 573 K sıcaklarına ısıtılarak bu son sıcaklıklarda 15 dakika beklenilmiş daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Üretilen karbon köpüklerin gözenekli yapıları taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Sistemde basınç olmaksızın elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobunda çekilmiş görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

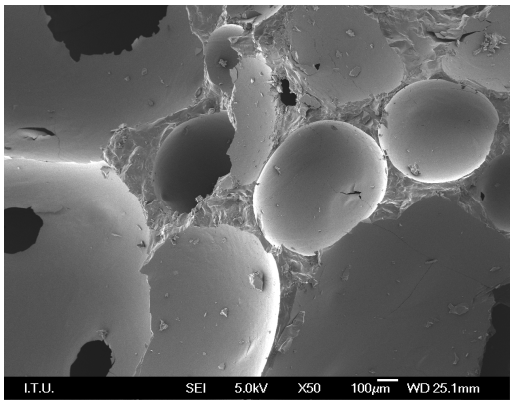
Yapılan gözlemler sonucunda uçucu organik madde oluşumuna bağlı olarak köpürme meydana geldiği ve buna bağlı olarak da hacim artışı olduğu ve hücrelerin oluşmaya başladığı tespit edilmiştir. Ancak meydana gelen hücrelerin birbiri ile ilişkili olmadığı ve karbon köpükte gözlenen yapının oluşmadığı ve dayanımın ölçülemeyecek kadar düşük olduğu tespit edilmiştir.



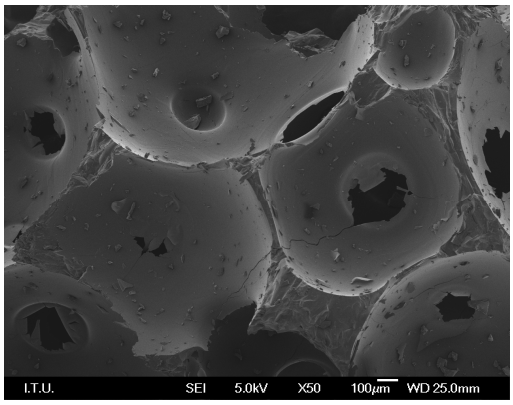
T=548 K X 25



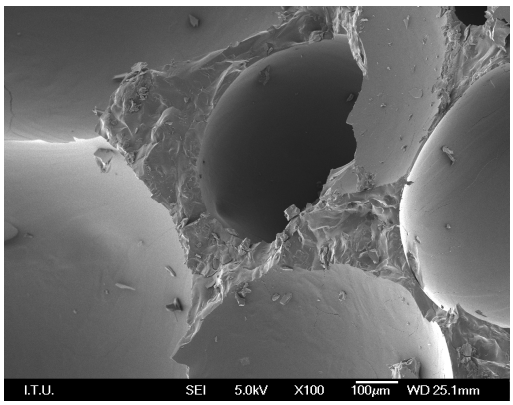
T=573 K X 25



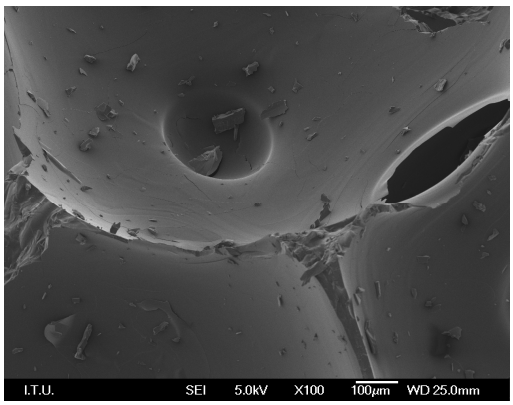
T=548 K X 50



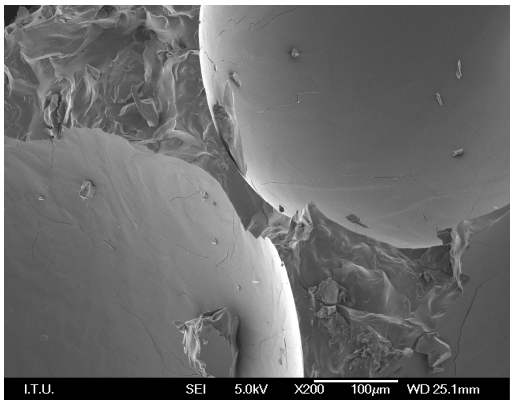
T=573 K X 50



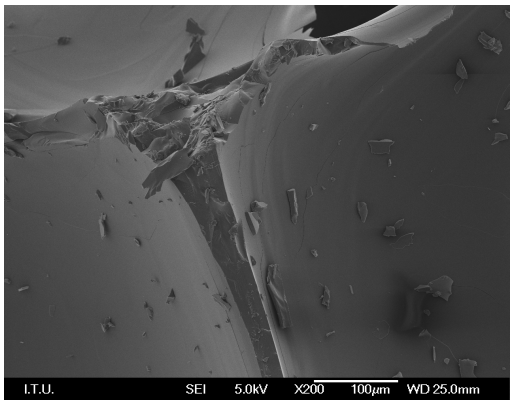
T=548 K X 100



T=573 K X 100



T=548 K X 200

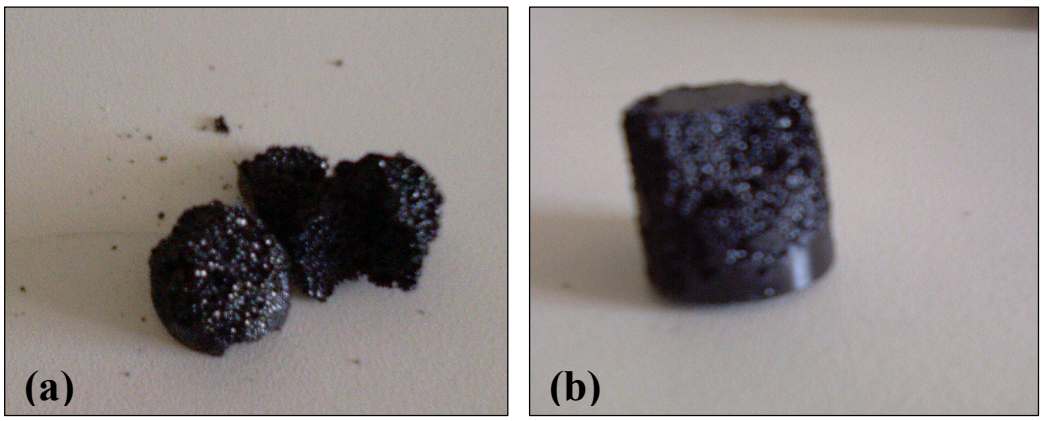


T=573 K X 200

Şekil 4.1: Atmosferik Basınçta, Farklı Sıcaklıklarda Üretilen Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Basıncın karbon köpük yapısı ve özellikleri üzerindeki etkilerinin gözlemlendiği daha önceki deney setlerinde basıncın var olması, karbon köpük yapısındaki hücreler arası bağlantı noktalarını ve ligamentleri oluşmasına ve sağlamlaşmasına sebebiyet vermiştir. Buda basınç altında üretilen karbon köpüklerin daha yoğun ve daha kompakt bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Bu sonuç dayanım testleri sonuçlarıyla da desteklenmiştir.

Şekil 4.2'de basınç olmaksızın 548 K ve 573 K sıcaklıklarında üretilen karbon köpüklerin resimleri yer almaktadır.



Şekil 4.2: Farklı iki sıcakıkta üretilen karbon köpüklerin fotoğrafları
(a) 548 K'de (b) 573 K' de

4.1.2 Sistemde Basınç Oluşturularak Gerçekleştirilen Deney Setlerinin İncelenmesi

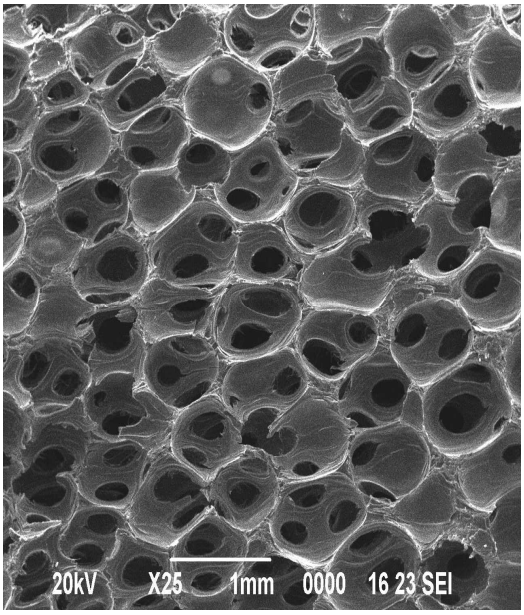
Yapılan çalışmada ilk olarak basınç parametresinin karbon köpük üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla sisteme basınç iki farklı şekilde beslenmiştir.

Uygulanılan ilk yöntemde oda sıcaklığında sisteme gaz beslenilerek sırasıyla 0.81, 1.50, 2.19, 3.57, 5.10, 6.9 MPa başlangıç basınçları oluşturulmuştur. Daha sonra sistem 783 K'e kadar ısıtılarak son sıcaklıkta 15 dakika beklenmiştir [32,50,77]. Boşaltma süreside en hızlı boşaltma yapılacak şekilde 5–6 saniye olarak gerçekleştirilmiştir [91].

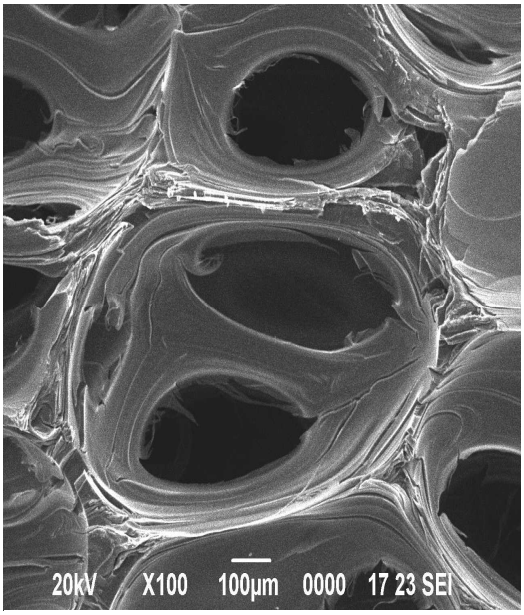
Diğer bir basınç etkisinin incelenmesi deney grubunda sistem mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığı olan 548 K' in 50-100 K üzerindeki bir sıcaklık olan 623 K ısıtılarak [32,50,77] sırasıyla sistemde 0.81, 1.50, 2.19, 3.57, 5.10, 6.9 MPa başlangıç basınçları oluşturulmuştur. Daha sonra son sıcaklık olan 783 K'e kadar ısıtılmış diğer basınç deney setine paralel olarak son sıcaklıkta 15 dakika beklenilmiştir. Diğer

basınç deney setinde olduğu gibi boşaltma süresi de en hızlı boşaltma yapılacak şekilde 5–6 saniye olarak belirlenmiştir [91]. Elde edilen karbon tüm karbon köpük örnekleri 1323 K' de karbonizasyon işlemine tabi tutulmuştur.

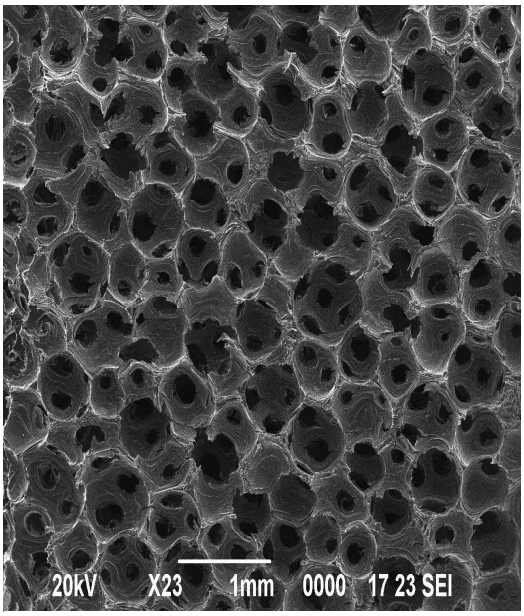
Üretilen karbon köpüklerin gözenekli yapıları taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Oda sıcaklığında basınç uygulanarak elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobunda çekilmiş görüntüleri Şekil 4.3'de verilmiştir.



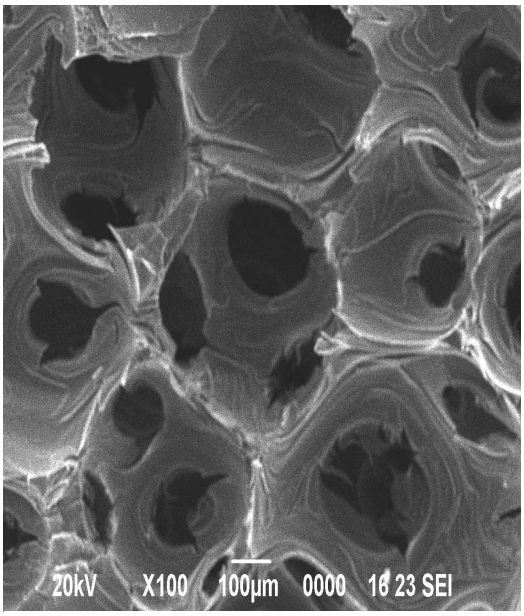
P_i=0.81 MPa P_s=2.24 MPa X 25



P_i=0.81 MPa P_s=2.24 MPa X 100

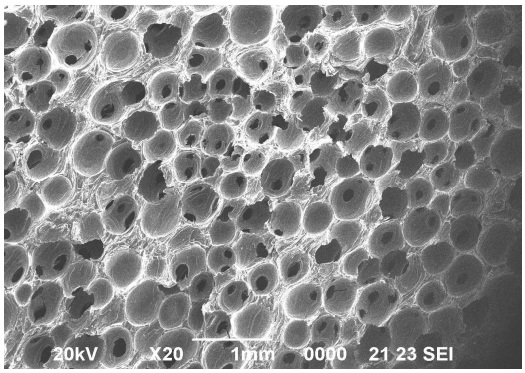


P_i=1.5 MPa P_s=3.89 MPa X 25

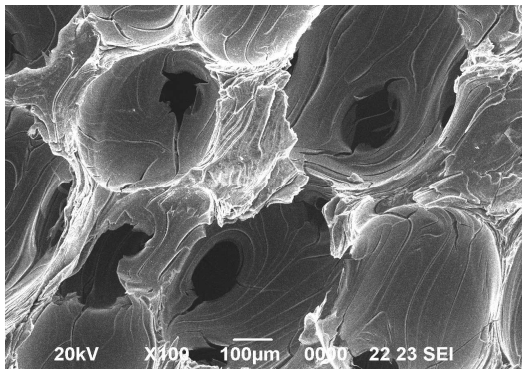


P_i=1.5 MPa P_s=3.89 MPa X 100

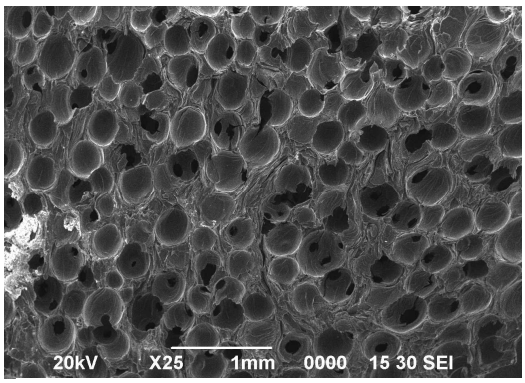
Şekil 4.3: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri



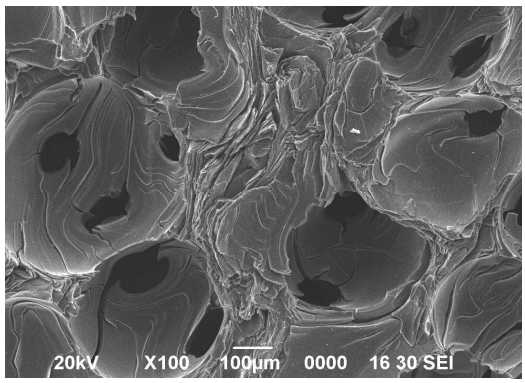
P_i=2.19 MPa P_s=5.65 MPa X 25



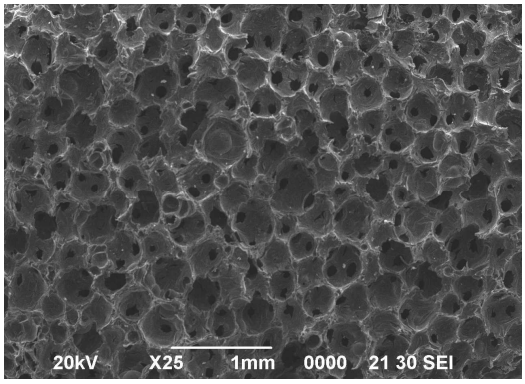
P_i=2.19 MPa P_s=5.65 MPa X 25



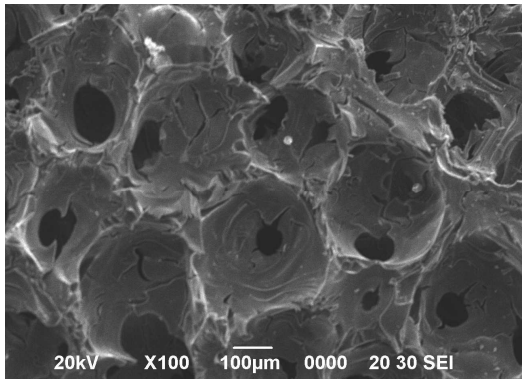
P_i=3.57 MPa P_s=9.63 MPa X 25



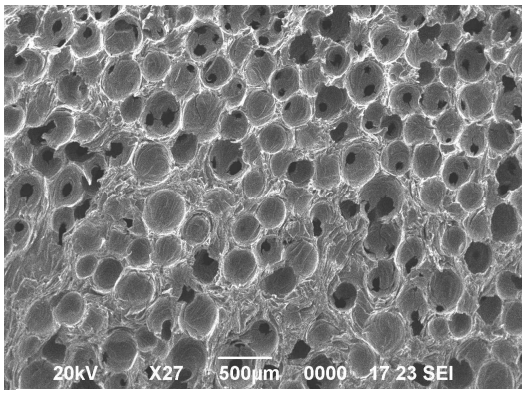
P_i=3.57 MPa P_s=9.63 MPa X 100



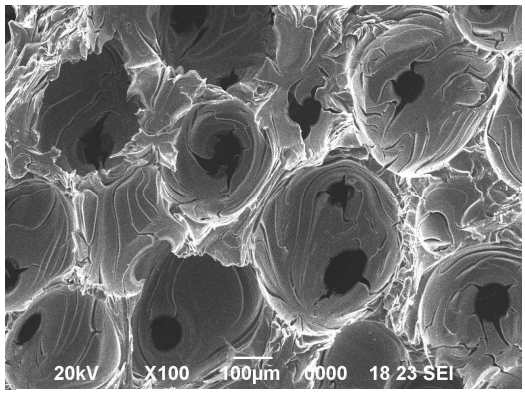
P_i=5.10 MPa P_s=13.42 MPa X 25



P_i=5.10 MPa P_s=13.42 MPa X 100



P_i=6.9 MPa P_s=18.40 MPa X 25



P_i=6.9 MPa P_s=18.40 MPa X 100

Şekil 4.3 (Devam): Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Oda sıcaklığında reaktör ısıtılmaya başlanmadan 0.81 MPa giriş basıncı verilerek yapılan deney sonucunda elde edilen köpükte hücre şekillerinin daha çok elips şeklinde olduğu fakat grafitik bağlantı noktalarının ve ligamentlerin oluştuğu görülmüştür. Bunun yanı sıra açık gözenek sayısının fazlalığı da dikkat çekmektedir. Başlangıç basıncının 1.5 MPa'a çıkarılması sonucu elde edilen karbon köpüklerin SEM görüntüleri 0.81 MPa' daki görüntülere yakın sonuçlar vermektedir. Başlangıç basıncı 1.5 MPa olana örneklerde gözeneklerin biraz daha küçülmüş olduğu ve hücrelerin şekillerinin daha küresel forma yaklaştığı gözlenmiştir. Bağlantı noktaları 0.81 MPa başlangıç basınçlı örneklerine kıyasla daha az belirgin olduğu tespit edilmiştir.

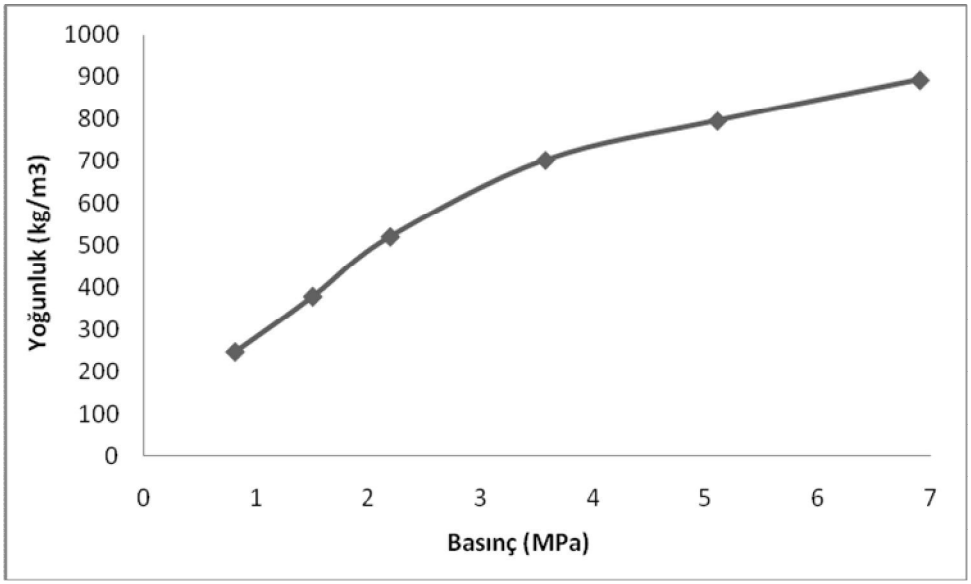
Başlangıç basıncı 2.19 MPa çıkarıldığında ise köpük yapısında önemli ölçüde değişlikler olduğu gözlenmiştir. Basıncın artmasıyla birlikte hücrelerin küreselliğin ve ligament oluşumunun arttığı gözlenmiştir ayrıca hücreler arası sınırların daha belirginleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra daha kalın bağlantı noktaları oluşumu göze çarpmaktadır. Gözenek sayısında ve hücre duvarlarındaki çatlaklarda azalma gözlenmiştir. Giriş basıncının 3.57 MPa'a çıkarılmasıyla elde edilen karbon köpük örnekleri 2.19 MPa'da elde edilenlerle benzerlik göstermektedir.

Basıncın 5.10 MPa'a çıkarılmasıyla elde edilen karbon köpük örneklerinde ise hücre şekilleri küresel formda olmasına rağmen açık gözenek sayısının daha da azaldığı, düşük basınçlarda elde edilen karbon köpük örneklerinde görülen birbiriyle ilişkili hücre yapısının da azaldığı saptanmıştır. Ayrıca SEM görüntülerin incelenmesinden daha düşük basınç uygulanan proses örneklerine kıyasla bağlantı noktalarının kalınlaştığı gözlenmiştir. Giriş basıncı 6.9 MPa'a çıkarıldığında da 5.10 MPa'daki örneklerin yapısına benzer görüntüler elde edilerek kapalı hücre sayısının arttığı gözlenmiştir.

Özetle taramalı elektron mikroskobundan her basınç parametresi için alınan iki farklı boyuttaki görüntüler incelenmiş giriş basıncının artışına bağlı olarak gözenek ve hücre boyutu küçültmüş ve köpüğün gözenekliliğini azaltmıştır. Basıncın artması ile hücre içerisinde toplanan ve hücreyi oluşturan uçucu maddeler hücre duvarlarına daha yüksek bir gerilim uyguladığı için porlar arası teması azaltarak kapalı gözenek oluşumuna ve bunun yanında gözenek boyutlarının küçülmesine neden olmuştur. Düşük basınç altında uçucu maddeler daha rahat hareket ettiği için birbirleriyle temasa geçip birleşerek büyük gözeneklerin oluşumuna sebep olmuştur.

Basınç artışı ile hücreler arasında daha sağlam bağlantı noktaları ve ligamentlerin oluşumu meydana gelirken hücre duvarlarındaki çatlaklarda azalmıştır.

Ek A.1'de oda sıcaklığında reaktör ısıtılmaya başlanmadan uygulanan farklı giriş basıncı değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.4'de bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.

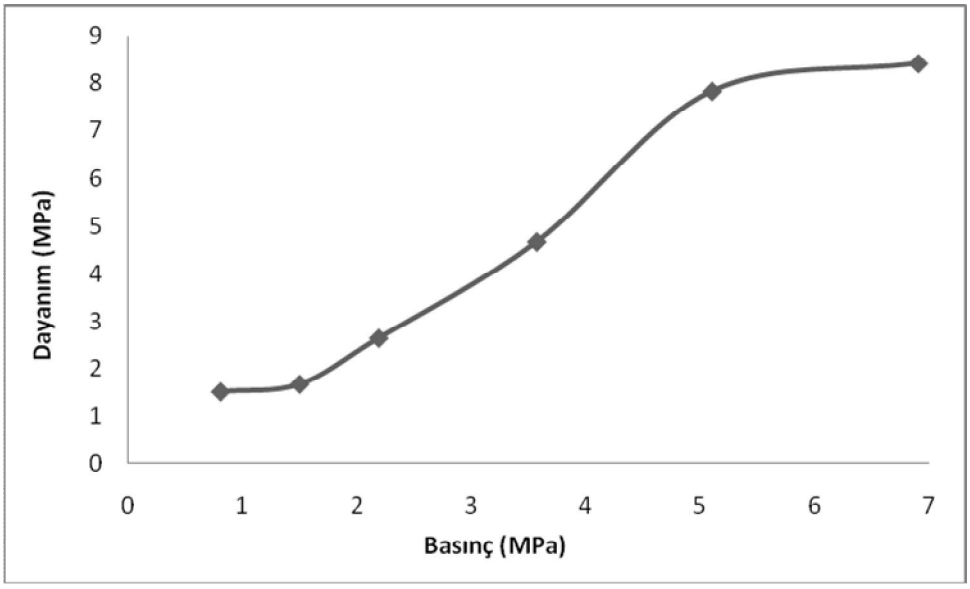


Şekil 4.4: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpük Yoğunluklarının Basınçla Değişimi

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi basınç artışıyla birlikte üretilen karbon köpüklerin yoğunluğu artmaktadır. Basınç artışı yoğunluğu direk değiştirebilen bir parametredir. Basıncın artırılması ile artan sıkıştırma mezofaz moleküllerinin daha fazla sıkışmasını sağlayarak daha kompakt bir yapı oluşturmaktadır [57,64,65,66,91]. Dayanım testi sonuçları da bu gözlemi desteklemektedir.

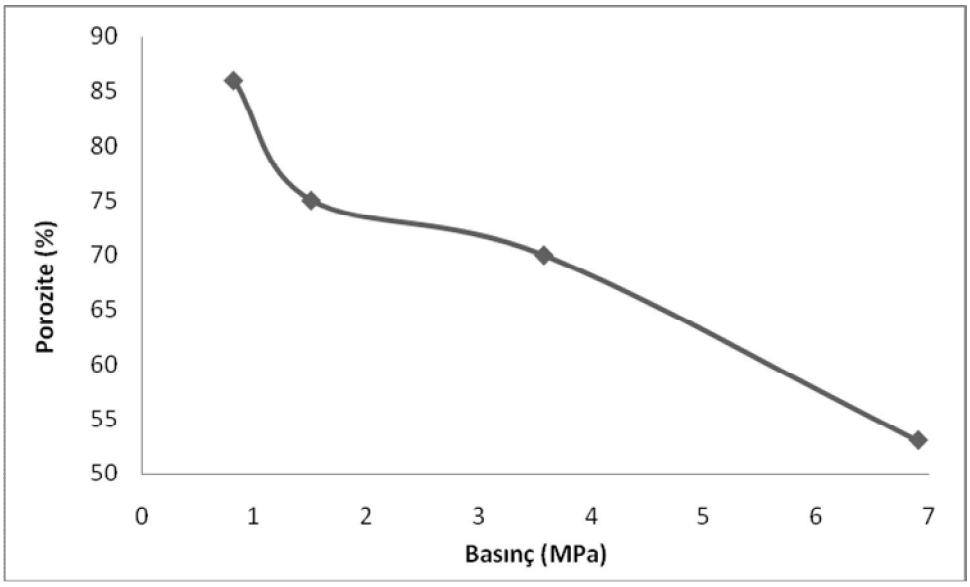
Ek A.2'de oda sıcaklığında reaktör ısıtılmaya başlanmadan uygulanan farklı giriş basıncı değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin dayanım testi sonuçları verilerek, Şekil 4.5'de bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi basınç arttıkça üretilen karbon köpüklerin dayanımları da artmıştır. Basıncın artmasıyla karbon köpük yapısındaki hücreler arası bağlantı noktaları ve ligamentler fazlalaşmış ve sağlamlaşmıştır. Buda yüksek basınçlarda üretilen karbon köpüklerin dayanımlarının artmasına neden olmuştur. Bu sonuç literatür bilgileriyle de paralellik göstermektedir [57,65,91].



Şekil 4.5: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Basınçla Değişimi

Ek A.3'de oda sıcaklığında reaktör ısıtılmaya başlanmadan uygulanan farklı giriş basıncı değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek, Şekil 4.6'da bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.

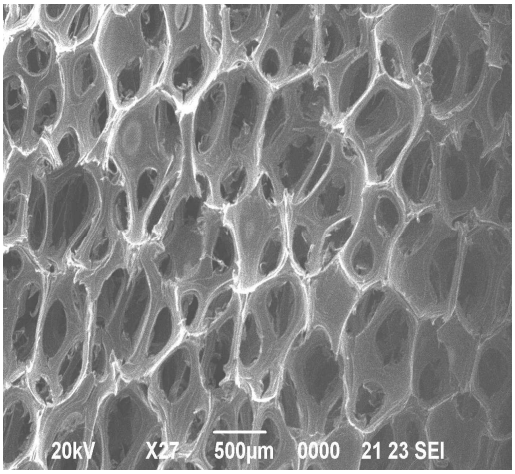


Şekil 4.6: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Basınçla Değişimi

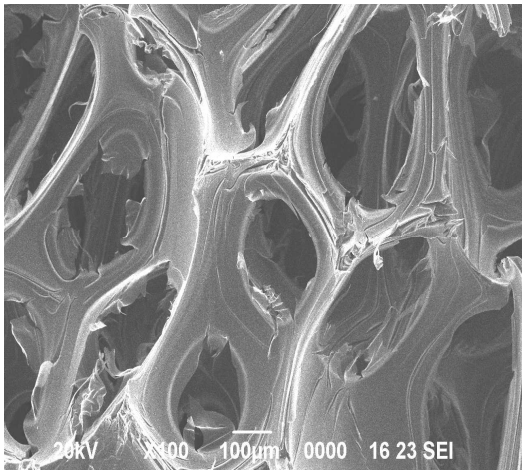
Şekil 4.6'da görüldüğü üzere basınç arttıkça üretilen karbon köpüklerin porozite değerleri azalmıştır. Bölüm 2.7.2'de bahsedilen köpükleşme mekanizmasında açıklandığı gibi uçucu organik maddeler genleşerek hücreleri oluştururlar, hareket halinde olan ve gittikçe artan hacimleri ile iki hücreler arasındaki duvarlar incelir,

zayıflar ve iki hücre arasındaki duvar kırılarak birbiri ile bağlantılı hücreler oluşur. Basıncın bu mekanizmada gözenekli yapının oluşturulmasında önemli etkisi vardır. Örneğin düşük basınç altında hücrelerin hacimleri daha rahat genişler, aynı zamanda hareket yetenekleri de artar. Böylece birbirleriyle daha kolay temas ederek açık gözenekli köpüklerin oluşmasına neden olurlar. Buna karşın yüksek basınç altında hücrelerin hareket yetenekleri azaldığından birbirleriyle kolay temas edemezler ve kapalı gözenekli hücreler oluşur. Elde edilen sonuçlar literatürde belirtilen açıklamalar ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle de paralellik göstermektedir [64,66,67].

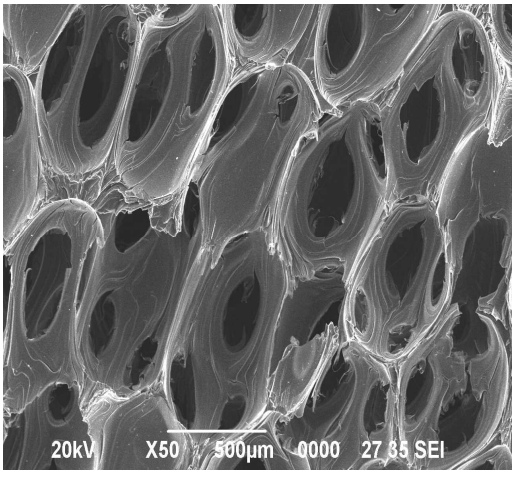
Reaktör vakum altında 623 K' e ısıtıldıktan sonra basınç beslemesi yapılan karbon köpük örneklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.7'de verilmiştir.



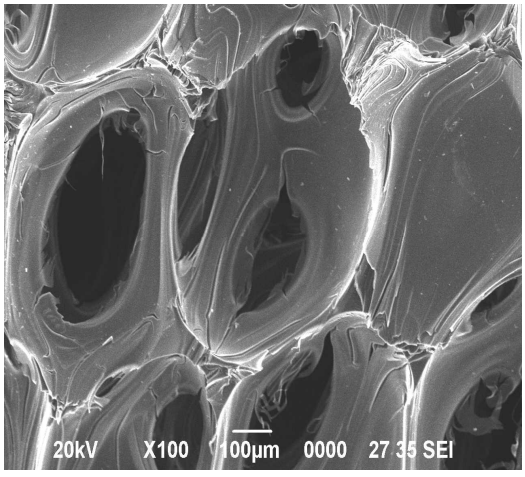
P_i=0.81 MPa P_s=1.9 MPa @ 623 K X 25



P_i=0.81 MPa P_s=1.9 MPa @ 623 K X 100

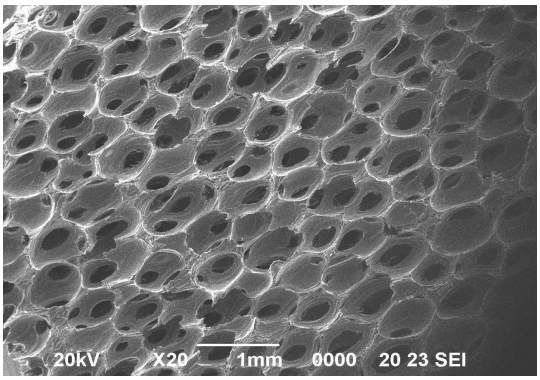


P_i=1.5 MPa P_s=2.03 MPa @ 623 K X 25

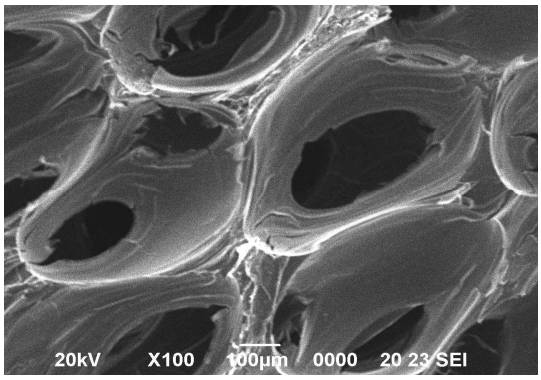


P_i=1.5 MPa P_s=2.03 MPa @ 623 K X 100

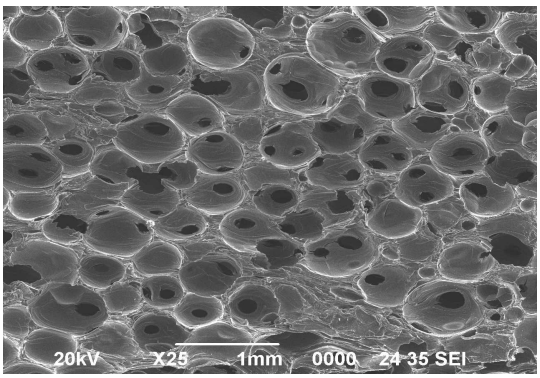
Şekil 4.7: 623 K Sıcaklığında Uygulanan Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri



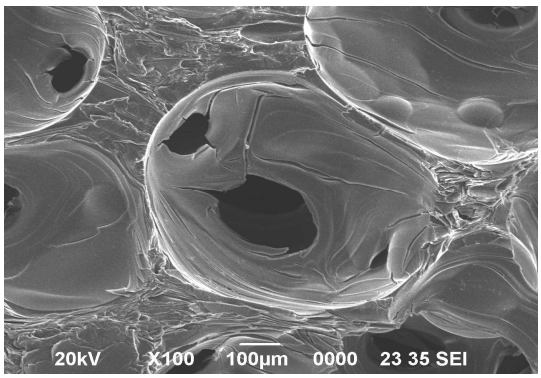
P_i=2.19 MPa P_s=2.97 MPa @ 623 K X 25



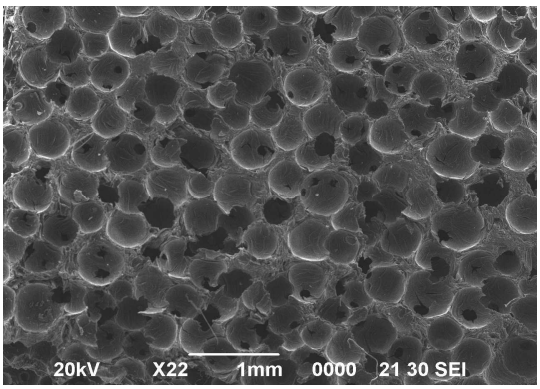
P_i=2.19 MPa P_s=2.97 MPa @ 623 K X 100



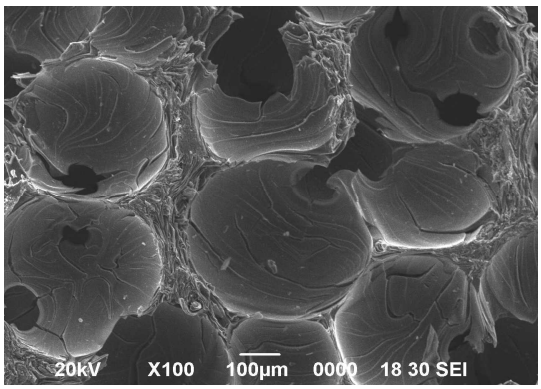
P_i=3.57 MPa P_s=4.84 MPa @ 623 K X 25



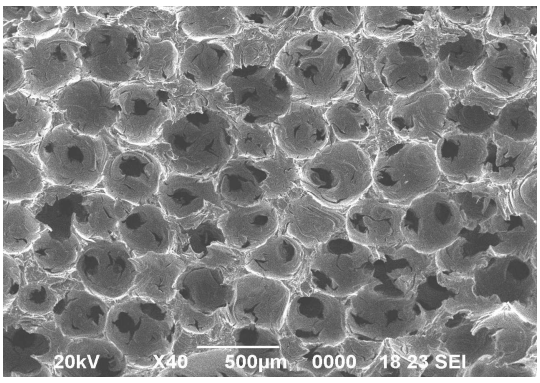
P_i=3.57 MPa P_s=4.84 MPa @ 623 K X 100



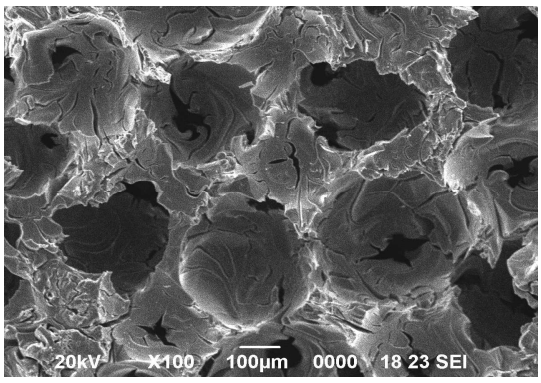
P_i=5.10 MPa P_s=6.98 MPa @ 623 K X 25



P_i=5.10 MPa P_s=6.98 MPa @ 623 K X 100



P_i=6.9 MPa P_s=9.85 MPa @ 623 K X 25



P_i=6.9 MPa P_s=9.85 MPa @ 623 K X 100

Şekil 4.7 (Devam): 623 K Sıcaklığında Uygulanan Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri

Vakum altında reaktör ısıtılmaya başlandıktan sonra mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığı olan 548 K'den 50–100 K daha yüksek bir sıcaklık olan 623 K sıcaklığında 0.81 MPa giriş basıncı verilerek yapılan deney sonucunda elde edilen karbon köpüklerin kırılgan ve çapaklı bir yapıda olduğu ve hemen hemen retiküle karbon köpük yapısında olduğu gözlenmiştir. Hücreler arası sınırlar belirsiz olup hücre duvarları incedir. Bir sonraki çalışma olan 1.5 MPa'da ise porların biraz daha küçülerek hücre sınırlarının belirginleştiğini ve retiküle karbon köpük yapısının devam ettiği görülmektedir.

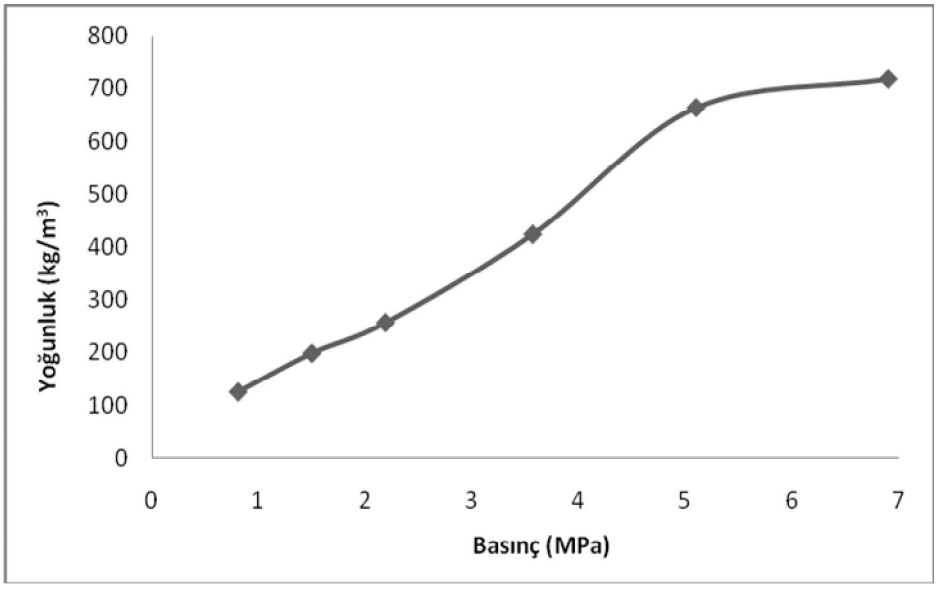
Giriş basıncı 2.19 MPa'a çıkarıldığında ise hücre yapıları çok daha belirgin hale gelerek çapaklı görünüm biraz daha azalmıştır. Hücre şekilleri küresele yakın bir forma dönüşmüştür. Hücre duvarlarındaki yırtık ve çatlaklar daha azalmıştır. Bunun yanında porların miktarında da bir azalma söz konusudur. Daha önce uygulanan iki basınçta olduğu gibi düzenli bağlantı noktaları ve ligamentler mevcuttur.

Basıncın 3.57'ye çıkarılmasıyla hücre sınırlarının belirgin hale geldiği, hücre şekillerinin küresele yakın olduğu bunun yanında bağlantı noktalarında kalınlaşmaların olduğu görülmüştür. Açık gözeneklilik azalırken hücre duvarlarındaki çatlak ve kırıklar azalmaktadır. Daha önceki basınçlarda görülen retiküle karbon köpük yapısı görülmemektedir. Giriş basıncının 5.10 MPa'a çıkarılmasıyla elde edilen karbon köpük örnekleri 3.57 MPa'da elde edilenlerle benzerlik göstermektedir.

Basıncın 6.9 MPa'a çıkarılmasıyla elde edilen karbon köpük örneklerinde ise hücre şekilleri küresel formda olmasına rağmen açık gözenek yapısının azaldığı, düşük basınçlarda elde edilen karbon köpük örneklerinde görülen ağsı yapının oluşmadığı, yırtık ve çatlakların azaldığı görülmektedir. Ayrıca bağlantı noktalarının diğer örneklere göre kalınlaştığı gözlenmiştir.

Basınçların oda sıcaklığında verildiği örneklerde olduğu gibi giriş basıncının artışı, gözenek ve hücre boyutunu küçültmüş ve köpüğün gözenekliliğini azaltmıştır.

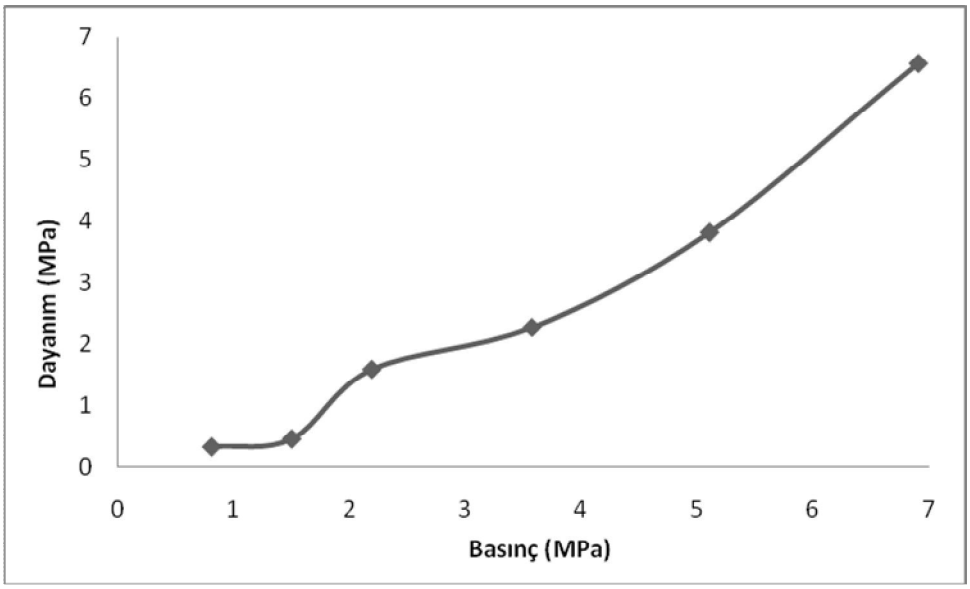
Ek A.4'de 623 K sıcaklığında farklı giriş basınçları uygulanılarak elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.8'de bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunluklarının Basınçla Değişimi

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi 623 K' de basınç uygulayarak elde edilen köpüklerin yoğunluğu, basınçların baştan oda sıcaklığında verilerek elde dilen karbon köpük örneklerinin yoğunluğunda olduğu gibi basınç artışıyla birlikte arttığı gözlenmektedir [57,64,65,66,91].

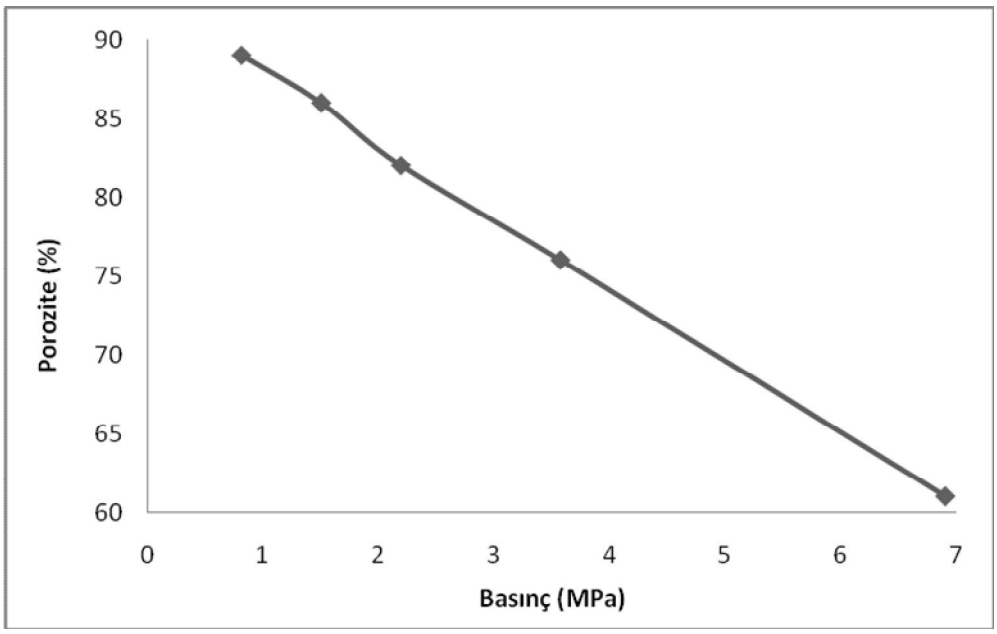
Ek A.5'de 623 K sıcaklığında farklı giriş basınçları uygulanılarak elde edilen karbon köpüklerin dayanım değerleri verilerek Şekil 4.9'da bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.9: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Basınçla Değişimi

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi 623 K' de basınç uygulayarak elde edilen köpüklerin yoğunluğu, basınçların baştan oda sıcaklığında verilerek elde dilen karbon köpük örneklerinin dayanımında olduğu gibi basınç artışıyla birlikte arttığı gözlenmektedir [57,65,91].

Ek A.6'da 623 K sıcaklığında farklı giriş basınçları uygulanılarak elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.10'da bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.

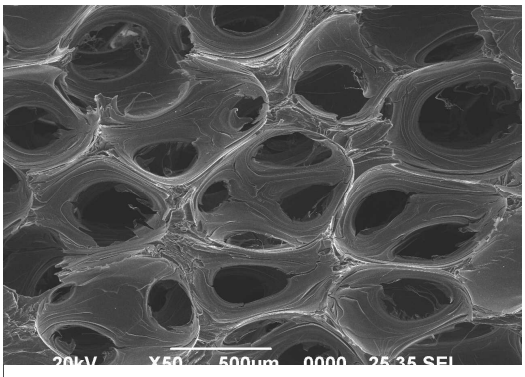


Şekil 4.10: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Basınçla Değşimi

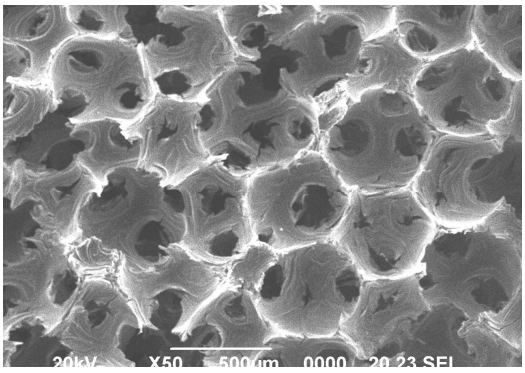
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 623 K' de basınç uygulayarak elde edilen köpüklerin porozitesi, basınçların baştan oda sıcaklığında verilerek elde dilen karbon köpük örneklerinin porozite değerlerinde olduğu gibi basınç artışıyla birlikte azaldığı gözlenmektedir. Bu sonuç literatür bilgileriyle ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle de paralellik göstermektedir [64,66,67].

Oda sıcaklığında uygulanan basınçlar ile mezofaz zift 623 K sıcaklığına ısıtıldıktan sonra aynı giriş basınçları uygulanarak elde edilen karbon köpük örneklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kıyaslandığında baştan basınç uygulanarak elde edilen örneklerin yapılarının çok daha düzgün ve çapaksız olduğu görülmüştür. Bununla birlikte basıncın baştan uygulandığı örneklerin yoğunluk ve dayanımlarının, basıncın 623 K'de uygulanan örneklere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Şüphesiz ki bunun tek sebebi olarak baştan basınç uygulanılarak elde edilen

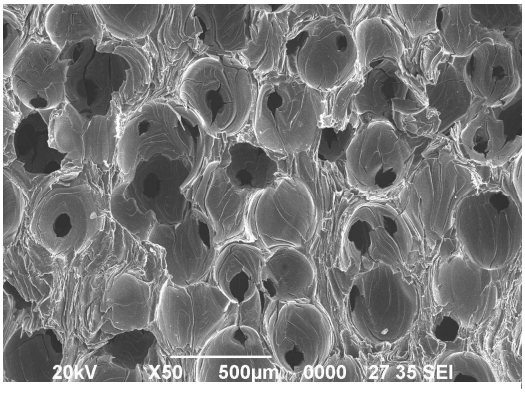
örneklerin yapılarının daha düzgün ve hücrelerdeki kırık ve çatlakların az olmasına bağlamak hata olur. Oda sıcaklığında uygulanan basınçların son çalışma sıcaklığına erişildiğinde ulaştıkları basınç değerleri, 623 K sıcaklığa ısıtıldıktan sonra gaz yüklemesi ile basınç oluşturulan örneklerin geldiği son basınçlardan çok daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı giriş basıncına sahip karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerine de bakarak son basınçlarının farklı olması sebebiyle yapılarının çok farklı olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında birinci yöntemdeki son basınçların ikinci yöntemdeki son basınçlardan çok daha yüksek olması nedeniyle yoğunluk ve dayanım değerleri yüksek çıkmaktadır. Karbon köpük oluşumunda giriş basıncından daha çok boşaltım basıncının etkili olduğu görülmektedir. Bu yüzden basıncın oda sıcaklığında ya da mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra ortama beslenmesinin karbon köpük yapısı üzerindeki etkilerini daha iyi görebilmek için aynı son basınca sahip örneklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmektedir.



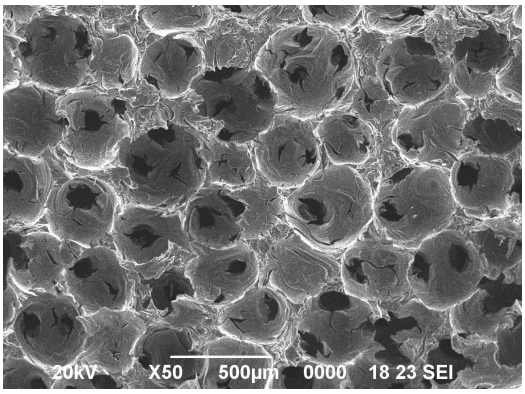
Ts = 783 K @ P_s= 2.12 MPa X 50
Baştan Basınç Uygulaması



Ts = 783 K @ P_s= 2.12 MPa X 50
623 K Sıcaklıkta Basınç Uygulaması

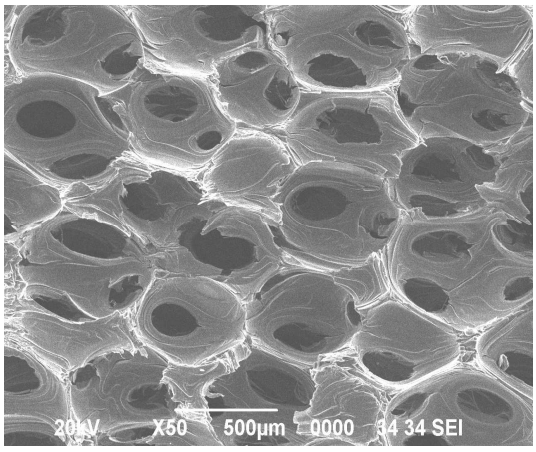


Ts = 783 K @ P_s= 9.74 MPa X 50
Baştan Basınç Uygulaması

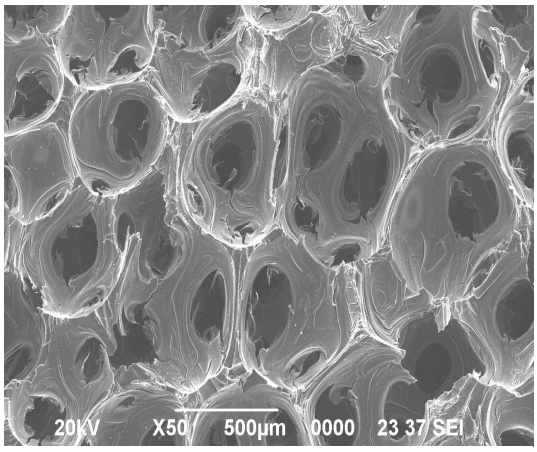


Ts = 783 K @ P_s= 9.74 MPa X 50
623 K Sıcaklıkta Basınç Uygulaması

Şekil 4.11: T=783 K Sıcaklıkta Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin SEM Fotoğrafları



Ts = 823 K @ P_s= 2.97 MPa X 50
Baştan Basınç Uygulaması



Ts = 823 K @ P_s= 2.97 MPa X 50
623 K Sıcaklıkta Basınç Uygulaması

Şekil 4.12: T=823 K Sıcaklıkta Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin SEM Fotoğrafları

Basıncın baştan ya da mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığının üzerinde verilmesinin karbon köpük üzerindeki etkilerini görebilmek için 783 K ve 823 K' de son basınçları aynı olacak şekilde yapılan deneylerin taramalı elektron mikroskobu sonuçlarından basıncın baştan ve 623 K' de uygulandığı örneklerde yaklaşık olarak benzer sayıda gözenek görülürken, basıncın baştan uygulandığı örneklerdeki gözenekler daha büyük çaplıdır. Aynı şekilde basıncın baştan verildiği örnekler çok daha düzgün, çapaksız, daha küresel ve daha belirgin sınırlara sahip hücreler ve gözeneklere sahipken, basıncın 623 K' de uygulandığı örneklerde hücre duvarlarının belirsizleştiği, ligamentlerin hasar gördüğü, porların da benzer şekilde sınırlarının daha düzensiz kırıklar ve çatlaklar gösterdiği ve küresel yapısının bozulduğu gözlenmiştir.

Tablo 4.1'de son basınçları aynı olan bu örneklerin yoğunluk ve dayanımları gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı Sıcaklıklarda Son Basınçları aynı İki Farklı Basınç Uygulaması İle Elde Edilen Karbon Köpüklerin Yoğunluk ve Dayanım Sonuçları

SICAKLIK (K)	SON BASINÇ (Mpa)	YOĞUNLUK (kg/m^3)		DAYANIM (Mpa)	
		Oda Sıcaklığında Basınç Uyg.	623 K' de Basınç Uyg.	Oda Sıcaklığında Basınç Uyg.	623 K' de Basınç Uyg.
783	5.01	231.2	201.9	1.48	1.20
	1.80	709.8	702.3	6.03	5.01
823	2.97	262.2	260.3	1.83	1.80

Tablo 4.1'den de görüldüğü üzere son basınçların aynı olduğu durumlarda bile basıncın baştan verildiği örneklerin yoğunluk ve dayanım sonuçları basıncın 623 K' de verilenlere göre daha yüksek çıkmıştır.

Sistem 623 K sıcaklığına ısıtılırken, sıcaklık arttıkça uçucu organik maddeler oluşmaya başlar ve bu uçucular belli bir hacme gelince bir şekilde içinde bulundukları karbon yapıyı terk ederler. 623 K sıcaklığında basınç uygulanınca uçucuların geri itilerek mevcut yerlerinde tutulmasına neden olur. Uçucuların geri itilmesi ile kırıklı ve çapaklı bir yapının elde edilmesine neden olur. Buda yapının mukavemetinin düşmesine ve dayanımın azalmasına neden olur.

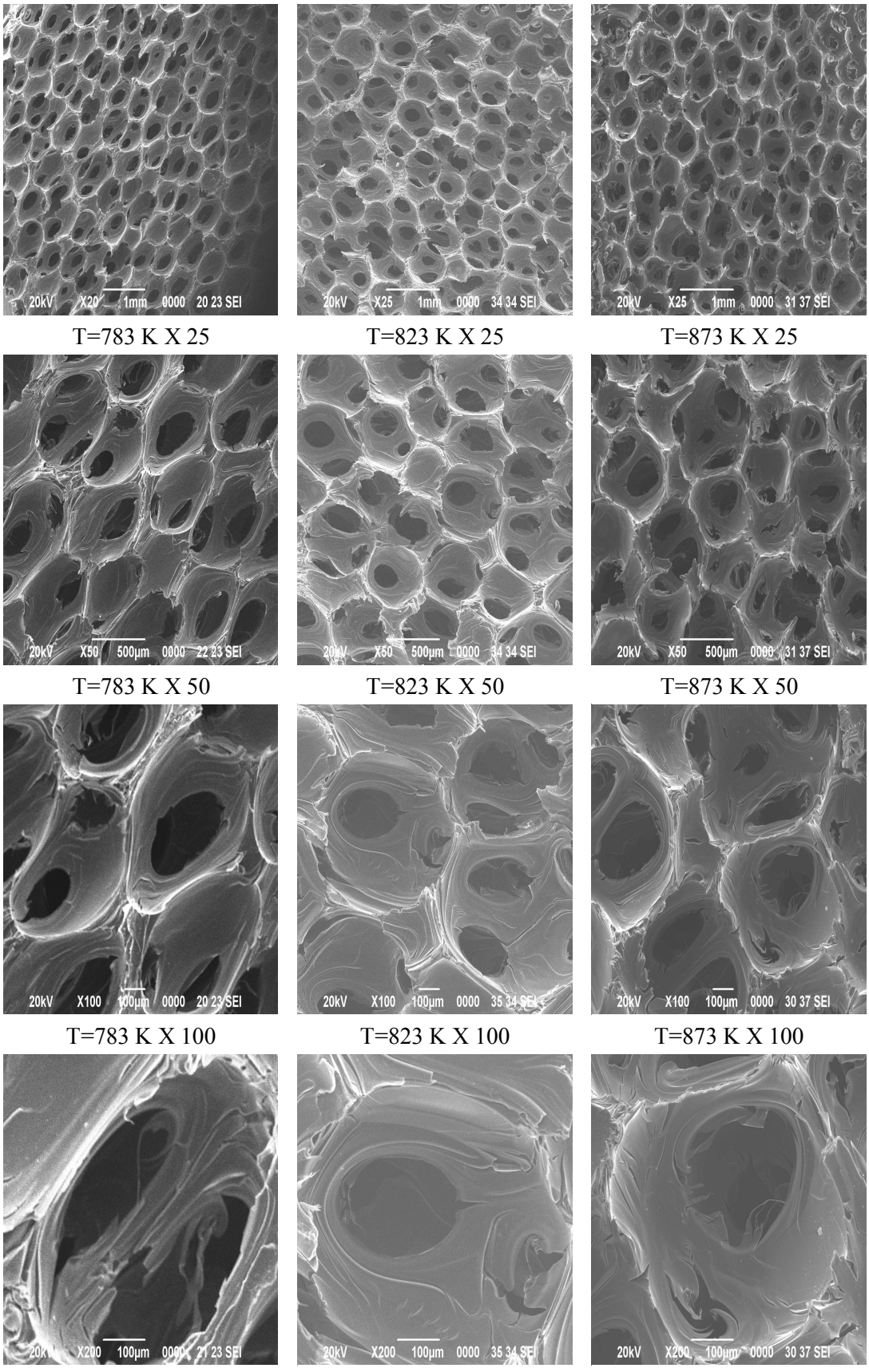
Basınç deneyleri sonrası elde edilen karbon köpük numuneleri üzerinde yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda basınçlı ortamda ve basıncın sisteme oda sıcaklığında uygulanmasına karar verilerek, son basıncı 2.97 MPa olan karbon köpüğünün özellikle taramalı elektron mikroskobu görüntüleri baz alınarak gözenek miktarının fazla oluşu ve diğer gözenekli köpüklere göre dayanımının daha fazla olması sebebiyle basınç deneyleri arasında uygun değer seçilmiştir.

Bu aşamadan sonra sabit basınç (2.97 MPa), sabit basınç boşaltma süresi (3-4 sn) ve son sıcaklıkta sabit bekleme süresi (15 dk) seçilip ikinci parametre olan sıcaklığın incelenmesine geçilmiştir.

4.2 Proses Sıcaklığının Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi

Proses sıcaklığının karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 2.97 MPa sabit basınç ve sırasıyla 783 K, 823 K ve 873 K proses sıcaklıkları olarak seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık deneylerinde de basınç deneylerinde olduğu gibi son sıcaklıkta 15 dakika beklenerek basınç boşaltım süresi 3–4 sn olarak seçilmiş ve köpükler 1323 K'de karbonizasyon işlemine tabi tutulmuştur.

Üretilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobunda dört farklı büyütme oranıyla (X25, X50, X100, X200) çekilmiş fotoğrafları Şekil 4.13'de verilmiştir.



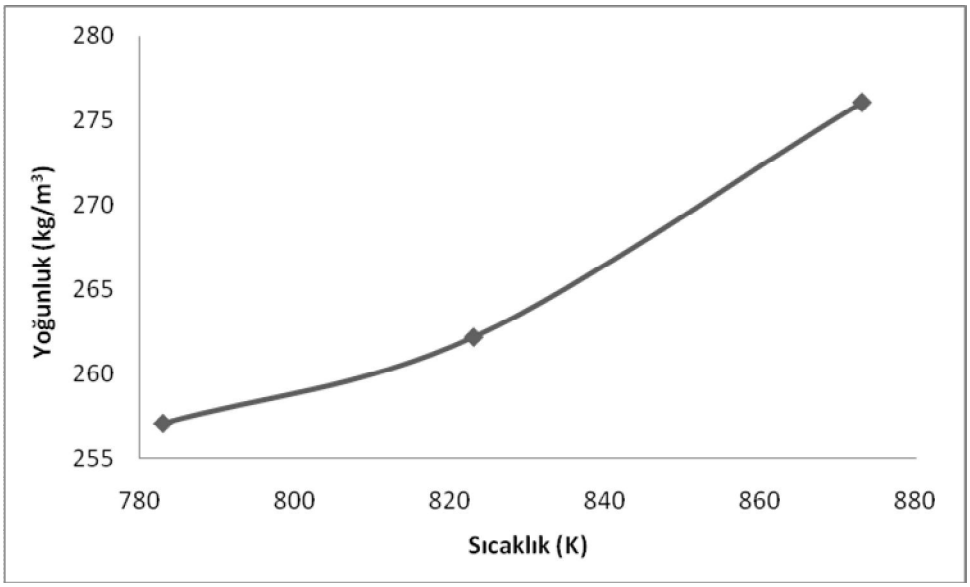
Şekil 4.13: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dört Farklı Boyuttaki Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Şekil 4.13'de görüldüğü üzere 783 K proses sıcaklığının seçildiği deneyler sonucu elde edilen SEM görüntülerinden saptandığı gibi hücre sınırları belirgin olmasına rağmen hücrelerin geometrik şekillerinin küresel olmadığı gözlenmektedir. Bağlantı noktaları ve ligament oluşumları görülmektedir ve çok sayıda açık gözenekli hücre oluştuğu saptanmıştır. Taramalı elekton mikroskobu görüntülerine bakılarak oluşan porların çok geniş olduğu tespit edilmiştir.

Sıcaklık 823 K' e çıkarıldığında yine 783 K proses sıcaklığında yapılan deney sonucu elde edilen örneklerde olduğu gibi hücre sınırlarının belirgin olduğu, hücre ve por geometrisinin daha küreselleştiği saptanmıştır, bağlantı noktası ve ligament oluşumlarının daha belirgin bir hale geldiği görülmektedir. Hücre iç duvarındaki çatlakların azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çok sayıda açık gözenekli hücre oluştuğu ancak 723 K sıcaklıkta oluşan köpüklerden farklı olarak bu sıcaklıkta oluşan porların boyutlarının küçüldüğü görülmüştür.

Sıcaklık parametresi ile ilgili son çalışma da deneyler 873 K'de gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıkta elde edilen karbon köpüğün yapısı 823 K'de elde edilen köpükle benzerlik göstermektedir. Aralarındaki benzerliğe rağmen 873 K'de elde edilen karbon köpüğün hücre duvarlarındaki çatlaklarda azalma görünmektedir.

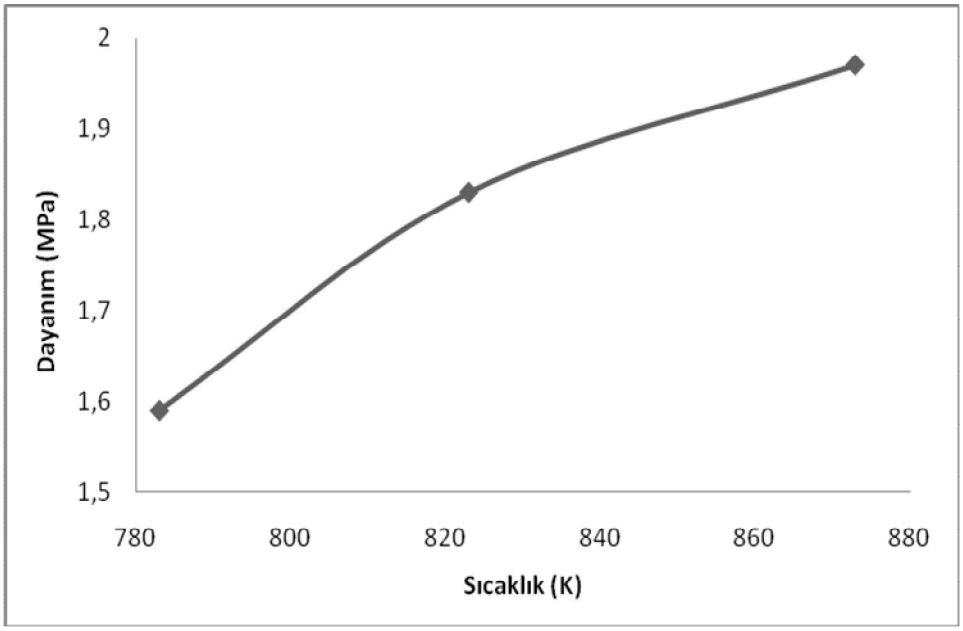
Ek A.7'de sistemin ulaştığı son sıcaklık değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.14'de bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunluklarının Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.14'de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça üretilen karbon köpüklerin yoğunlukları da artmaktadır [57,64,65,66,91]. Fakat sıcaklık etkisi yoğunluk üzerinde basınç kadar etkili bir parametre değildir.

Ek A.8'de farklı sıcaklık değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin dayanım ölçümleri verilmiş Şekil 4.15'de ise bu değerlerin grafik üzerinde gösterimi görülmektedir.

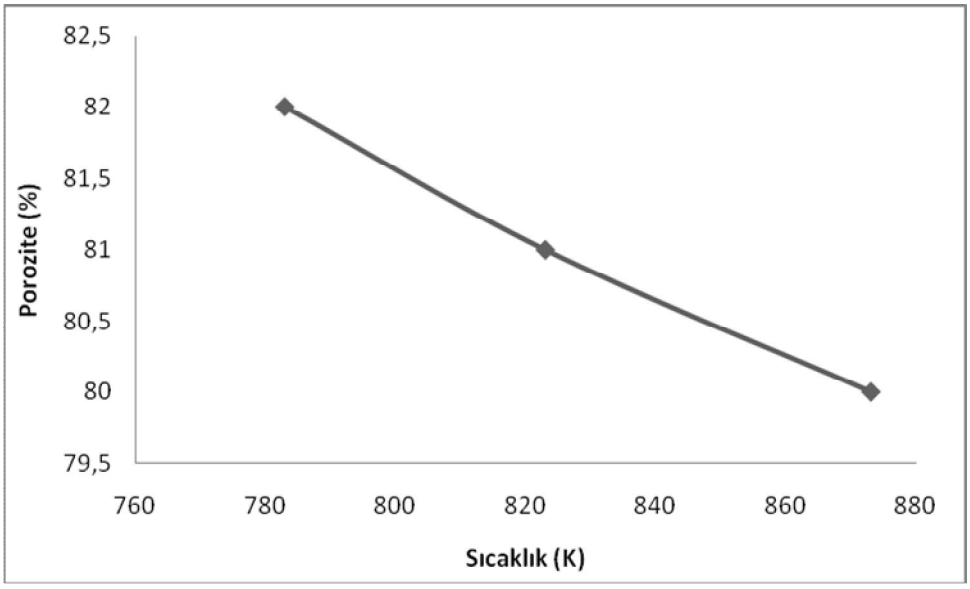


Şekil 4.15: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımlarının Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.15'de görüldüğü üzere yoğunluk değerlerinde olduğu gibi sıcaklık artışı üretilen karbon köpüklerin dayanım değerlerinde de değişikliğe neden olmakta, sıcaklık arttıkça üretilen karbon köpüklerin dayanımları arttırmaktadır [57,65,91].

Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile de elde edilen sonuçlar paralellik göstermektedir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde sıcaklık artmasıyla hücre şekillerinin küresel forma gelerek bağlantı noktalarının ve ligamentlerin oluşumundaki artışın yapıyı güçlendirmesi dayanımında artmasına sebep olmaktadır.

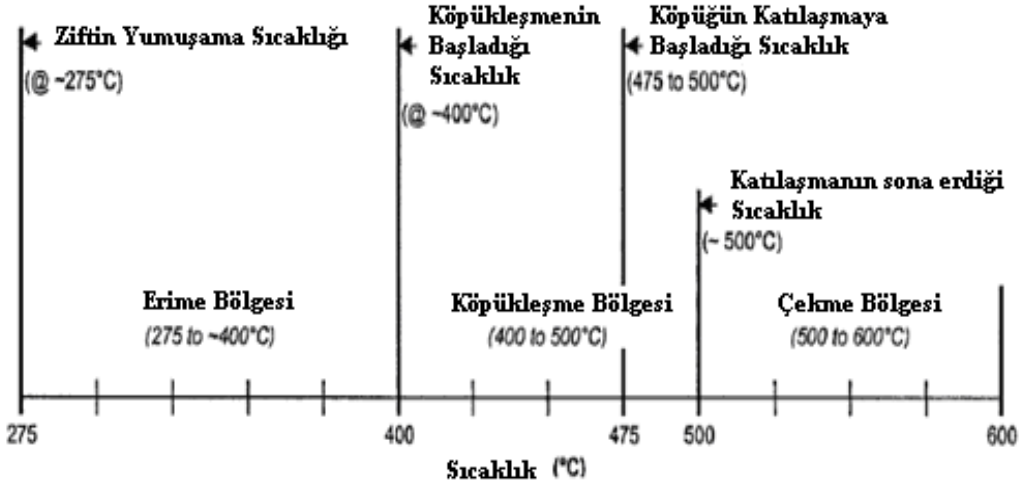
Ek A.9'da sistemin ulaştığı son sıcaklık değerlerinde elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.16'da bu değerler grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi aynı yoğunlukta ve dayanımda olduğu gibi sıcaklık artışı üretilen karbon köpüklerin porozite değerlerinde büyük ölçüde değişikliğe neden olmamıştır. Sıcaklık arttıkça üretilen karbon köpüklerin porozite değerlerinde çok az bir azalma söz konusudur. Sıcaklık 783 K' den 873 K' e çıkarken porozite değerlerinde sadece % 2'lik bir azalma gözlenerek 82'den 80'e azalmıştır. Sıcaklığın artmasına rağmen porozitenin büyük oranlarda artmamış olması Şekil 7.17'de verilen mezofaz ziftin 773 K–873 K çalışma sıcaklıkları arasındaki özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir [66,67,90,91]. Çalışılan sıcaklık aralığında sıcaklık arttıkça mezofaz ziftin vizkozitesi artma gösterdiği için bir kısım uçucu organik maddelerin oluşturduğu hücrelerin hareket yetenekleri kısıtlanır bu sebeple hücreler rahat hareket edemeyerek birbirleriyle temas edemezler böylece kapalı gözenekli hücreler oluşur. Bu sonuç kullanılan sıcaklık aralığı için literatürdeki bilgilerle de desteklenmektedir [22,57,66,67,68]

Yapılan sıcaklık deneyleri sonrasında elde edilen karbon köpükler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları sonucunda yapıyı ortaya koyan dayanım ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden 823 K optimum çalışma sıcaklığı seçilebileceği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.17: Mezofaz Ziftin Köpükleşme Profili

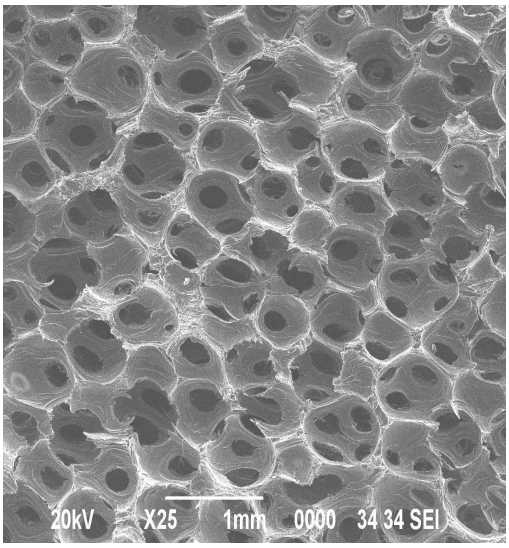
4.3 Son Sıcaklıkta Bekleme Süresinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi

Son sıcaklıkta bekleme süresinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 2.97 MPa sabit basınç ve 823 K sabit proses sıcaklığında sırasıyla 15 dk, 30 dk, 60 dk, 180 dk, 300 dk ve de son olarak 420 dakika bekleme süresi olarak seçilmiştir. Basınç boşaltma süresi olarak 3–4 saniyede seçilmiş olup tüm karbon köpükler örnekleri 1323 K' de karbonizasyon işlemine tabi tutulmuştur.

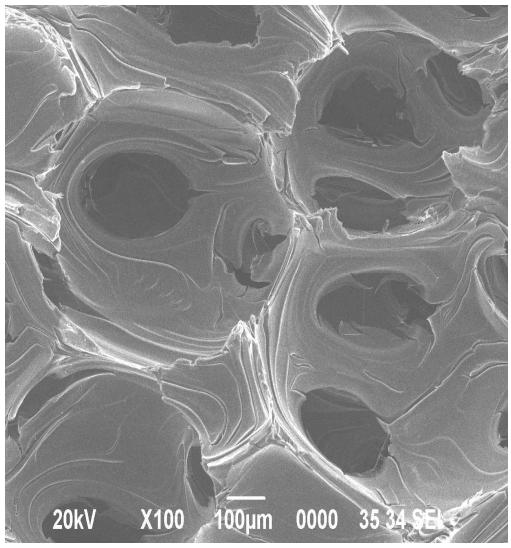
Üretilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobunda iki farklı büyütme oranıyla (X25, X100) çekilmiş fotoğrafları Şekil 4.18'de verilmiştir.

Şekil 4.18'deki farklı bekleme sürelerinde üretilmiş karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde 15 dakikalık bekleme süresinde hücre şekillerinin küresel forma yakın ve hücre sınırlarının belirsiz olduğu ve belirgin sınırları olan porların varlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca bağlantı noktaları ve ligament oluşumları tam olarak belirgin değildir.

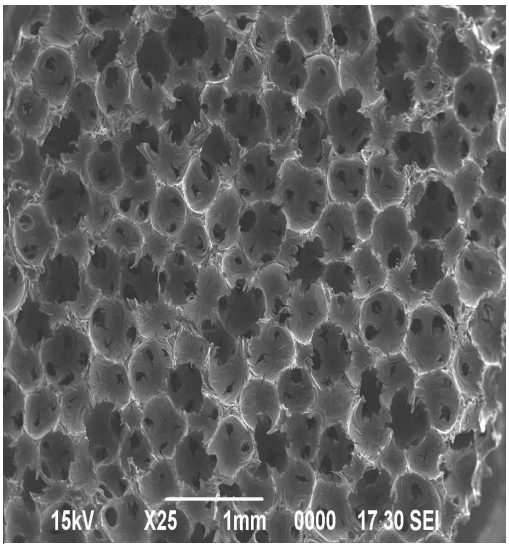
Bekleme süresi 30 dakikaya çıkarılarak elde edilen köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde ise hücre şekillerinin küreselliğinin arttığı, hücre sınırlarının belirginleştiği, bağlantı noktaları ve ligament oluşumlarının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Ancak 15 dakikalık bekleme süresinden farklı olarak çok daha fazla sayıda fakat küçük çaplı por oluşumları gözlenmiş olmakla birlikte por sınırlarında çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir.



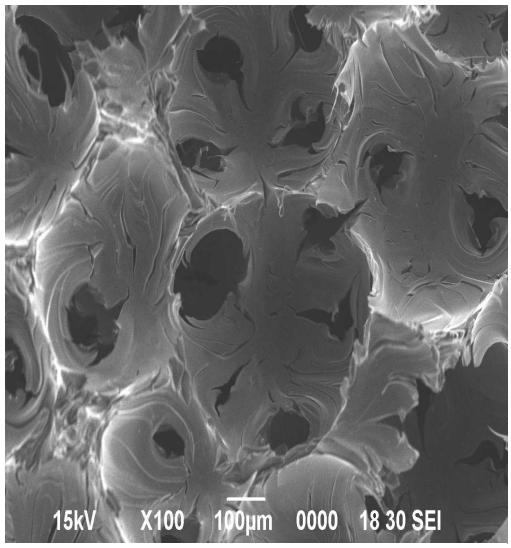
15 dk X 25



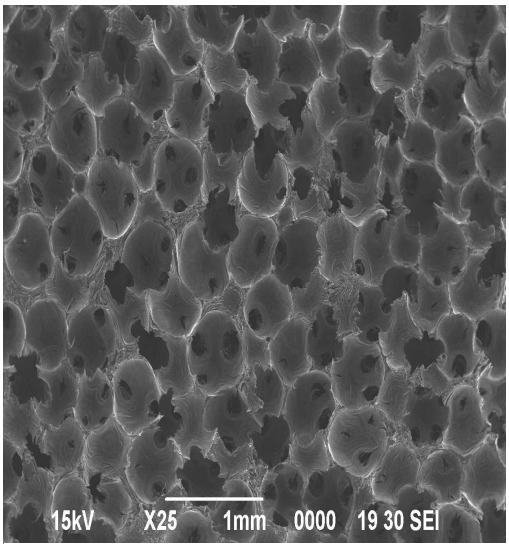
15 dk X 100



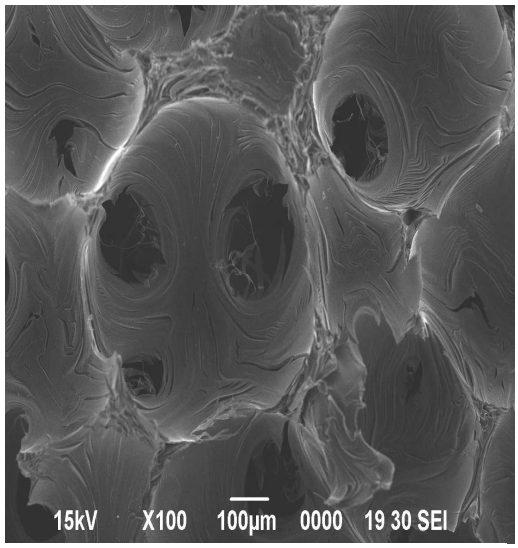
30 dk X 25



30 dk X 100

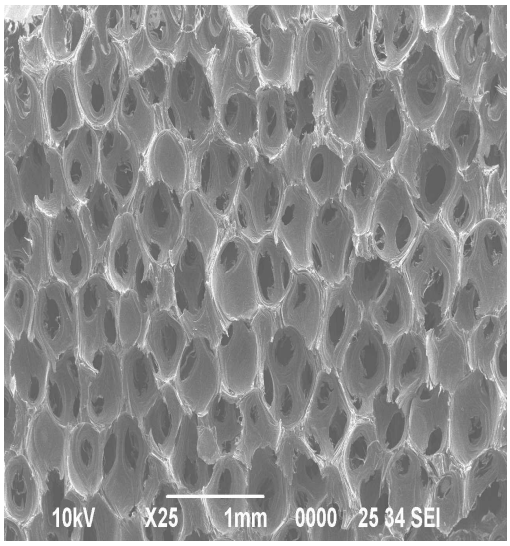


60 dk X 25

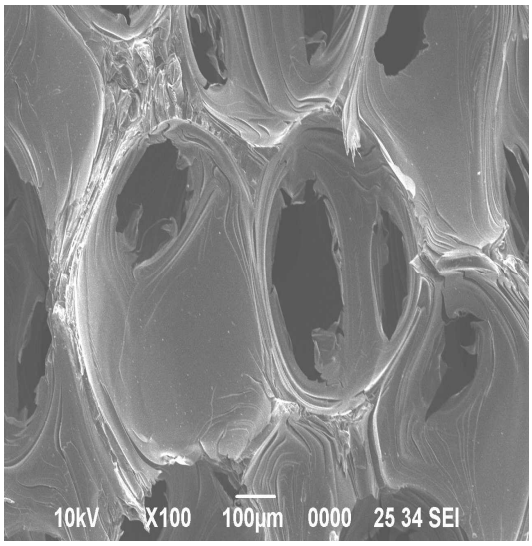


60 dk X 100

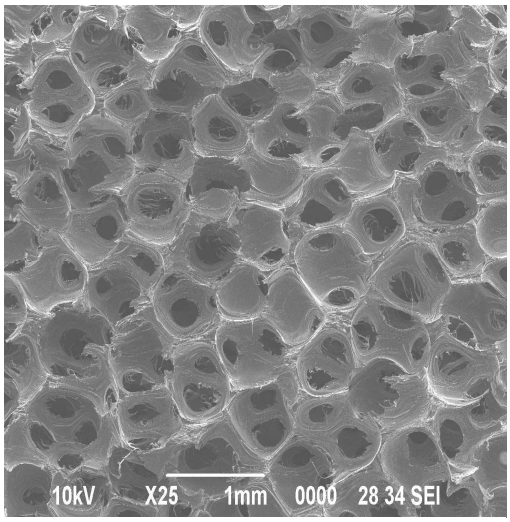
Şekil 4.18: Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri



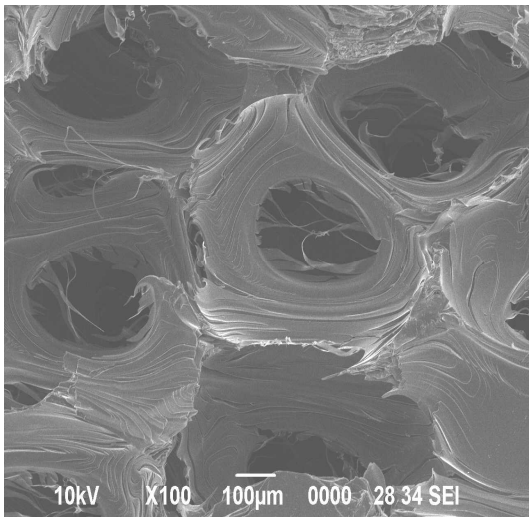
180 dk X 25



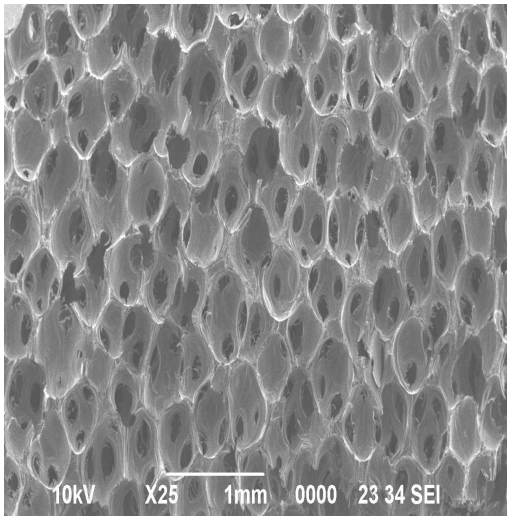
180 dk X 100



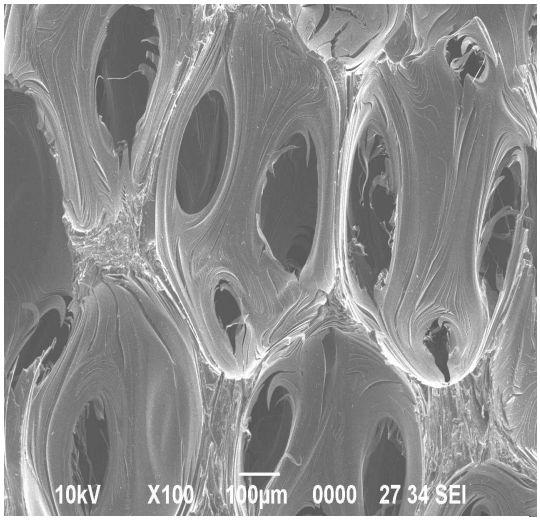
300 dk X 25



300 dk X 100



420 dk X 25



420 dk X 100

Şekil 4.18 (Devam): Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Son sıcaklıkta bekleme süresi 60 dakikaya çıkartıldığında hücre geometrisinin daha da küreselleştiği ve sınırların belirginleştiği görülmüştür. Ayrıca 30 dakikalık bekleme süresine sahip karbon köpüklere ait taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden farklı olarak hücre duvarlarındaki çatlakların azaldığı görülmekte por boşluklarında ipliksi oluşumlar gözlenmektedir.

Bekleme süresi 180 dakikaya çıkarılarak üretilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde bir önceki örneklere nazaran hücre yapısının dağılmaya başlayarak hücre geometrisinin küresel formdan uzaklaştığını ve hücre sınırlarının belirginsizleştiği fark edilmektedir. Bağlantı noktası ve ligament oluşumlarında da bozulmalar saptanmıştır. Ayrıca por geometrisinin de küresellikten uzaklaştığı gözlenmiştir.

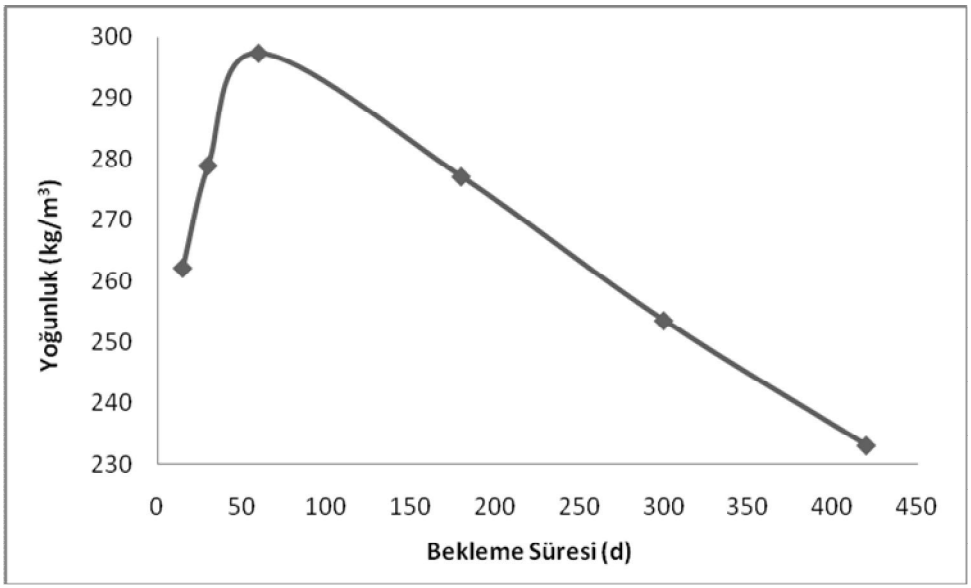
Bekleme süresi 300 dakikaya çıkarıldığında ise hücre şekillerinin bozulduğu, hücre sınırların belirginsizleştiği gözlenmiştir. Ayrıca por sayısı azalarak por çaplarının genişlediği, porlarda da ipliksi yapıların oluştuğu ve yapının dağıldığı saptanmıştır.

Son sıcaklıkta bekleme süresinin 420 dakikaya çıkarılması ile elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 300 dakika beklenilerek elde edilen köpük örneklerine benzemektedir. Burada da hücre şekillerinin bozuk, sınırlarının belirsiz olduğu fakat hücre duvarındaki çatlakların azaldığı görülmüştür. Ayrıca daha geniş ve çok sayıda gözenek oluşumu gözlenerek ve bu gözeneklerdeki ipliksi yapıların varlığı dikkat çekmektedir.

Ek A.10'da son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.19'da bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

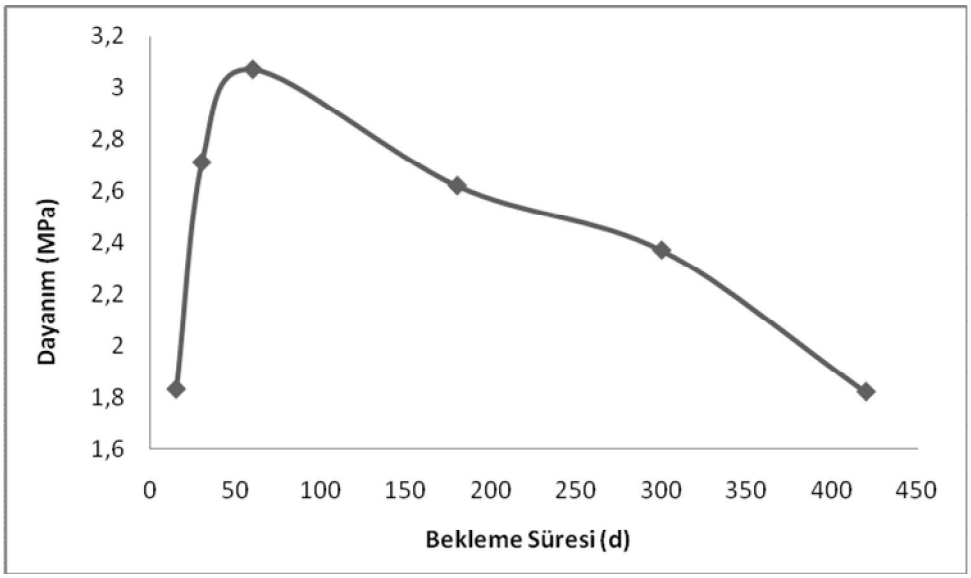
Şekil 4.19 incelendiğinde son sıcaklıkta bekleme süresi 15 dakika, 30 dakika ve 60 dakika olan köpük örneklerinin yoğunluklarının arttığı 60 dakikada en yüksek değeri aldığı ve bu dakikadan sonraki sırasıyla 180 dakika, 300 dakika ve de 420 dakikalık bekleme sürelerinde yoğunlukların azaldığı gözlenmiştir. Bu sonucun taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülerle paralellik gösterdiği 60 dakikaya kadar olan bekleme sürelerinde hücrelerin şekillenmeye başladığı ve gözenek çaplarının azaldığı görülmüş, 60 dakikadan sonraki son sıcaklıkta bekleme sürelerinde hücre geometrilerinin bozulmaya başladığı, por çaplarının genişlemeye başladığı gözlenmiştir. 60 dakikaya kadar reaksiyonun ve buna bağlı olarak da sistemde uçucu organik madde oluşumunun devam ettiği bu nedenle de sıkışmanın

artarak yoğunluk ve dayanım değerlerini arttırdığı düşünülmektedir. 60 dakikaya kadar devam eden reaksiyonun bu süreden sonra sönümlendiği buna bağlı olarak da ortamdaki uçucu organik madde oluşumunun durduğu, kompaktlaşmanın azaldığı buna bağlı olarak da yoğunluk ve dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.19: Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Bekleme Süresiyle Değişimi

Ek A.11'de son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin dayanım testi sonuçları verilerek Şekil 4.20'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



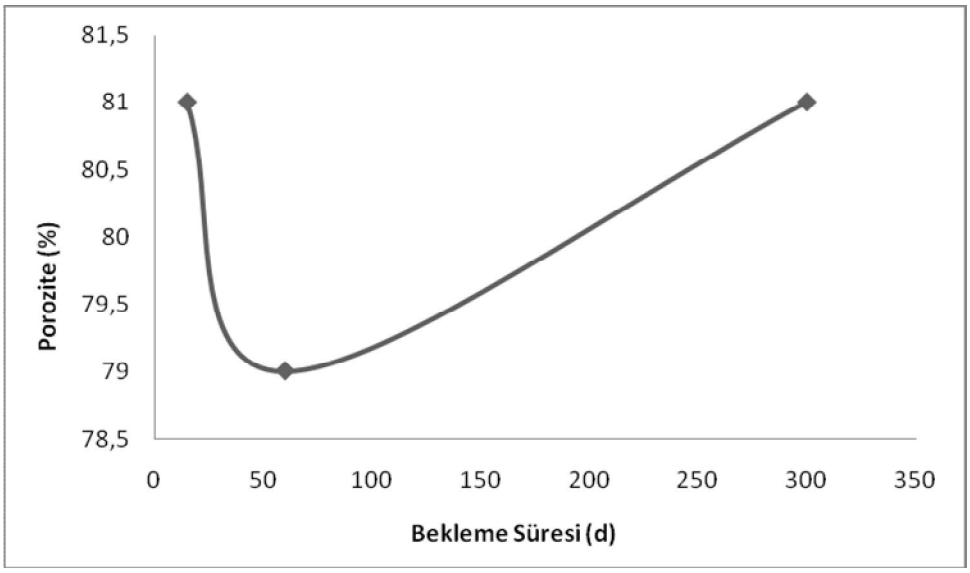
Şekil 4.20: Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Bekleme Süresi ile Değişimi

Şekil 4.20'de görüldüğü üzere yoğunluklarda olduğu gibi 60 dakikaya kadar olan son sıcaklıkta bekleme sürelerinde dayanım artmış, 60 dakikada maksimum değerine ulaşarak bu dakikadan sonraki bekleme sürelerinde azalma göstermiştir. Bu sonucun

da taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülerle örtüştüğü görülmektedir. Son sıcaklıkta bekleme süresi 60 dakikaya gelende kadarki bekleme sürelerindeki görüntülerde hücre geometrisinin küreselleşmesi, bağlantı noktası ve ligament oluşumlarının artması yapıyı güçlendirerek dayanımı arttırmıştır. Fakat bekleme süresi 60 dakikayı geçen örneklerin hücre geometrisinin bozulmaya başlaması, hücre sınırların ortadan kalkması ligamentlerin genişleyerek por çaplarının artması ve ipliksi yapıların oluşumu yapının dağılmasına neden olduğu ve dayanımı düşürdüğü düşünülmektedir. Ölçülen yoğunlukta bu sonucu desteklemektedir.

Ek A.12'de son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.21'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.21 incelendiğinde son sıcaklıkta bekleme süresi 15 dakikadan 60 dakikaya yükselirken porozite yoğunluk ve sıcaklıktan farklı olarak 81'den 79'a % 2'lik bir azalma göstermiştir. Bu dakikadan sonra 300 dakikalık bekleme süresinde ise gözeneklilik % 2'lik bir artış göstererek 81 olmuştur.



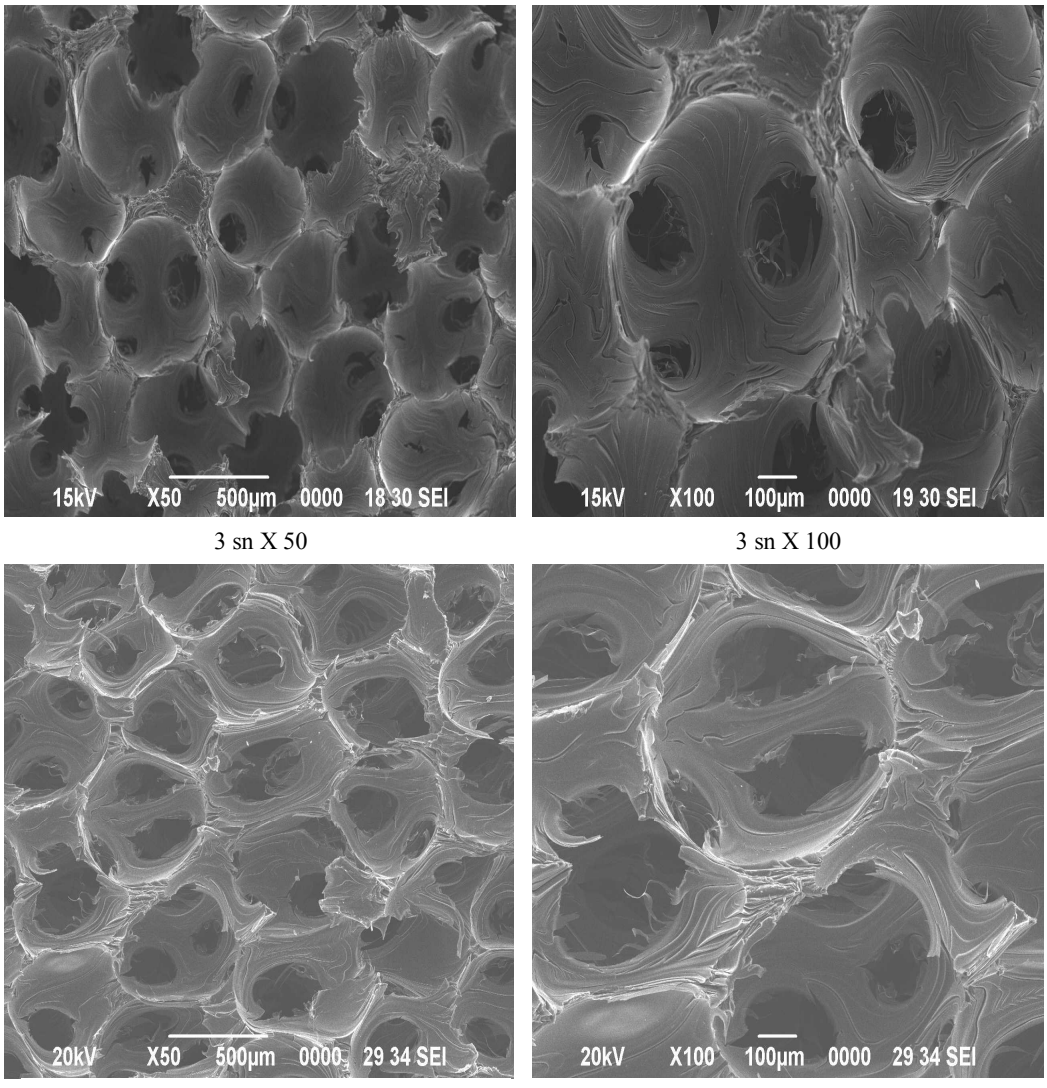
Şekil 4.21: Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Bekleme Süresi ile Değişimi

Yapılan son sıcaklıkta bekleme süresi deneyleri sonrasında elde edilen karbon köpükler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları sonucunda dayanım ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden çıkarılan sonuçlar neticesinde sistemin 60 dakikada dengeye geldiği tespit edilerek optimum son sıcaklıkta bekleme süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir.

4.4 Basınç Boşaltma Süresinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi

Sabit basınç değeri 2.97 MPa, optimum sıcaklık değeri 823 K ve optimum son sıcaklıkta bekleme süresi 60 dakika olarak belirlendikten sonra dördüncü parametre olarak sistemin son basınç değerinden ortam basıncına düşürülmesi süresinin karbon köpük oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bunun için de sırasıyla 3 sn, 7 sn, 9 sn, 15 sn ve de 29 sn' lik boşaltma sürelerinde karbon köpükler üretilmiştir.

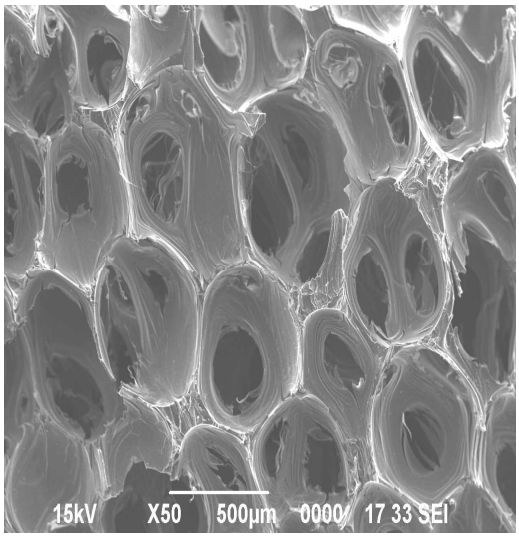
Üretilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobunda altı farklı büyütmeyle (X25, X50, X100, X200, X300, X400) çekilmiş görüntüleri şekil 4.22'de verilmiştir.



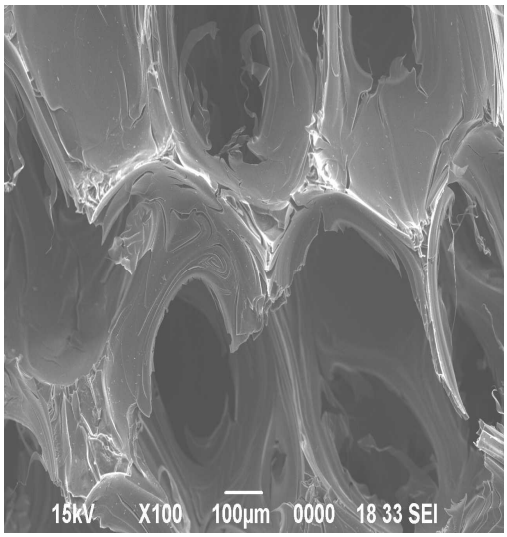
3 sn X 50 — 3 sn X 100

7 sn X 50 — 7 sn X 100

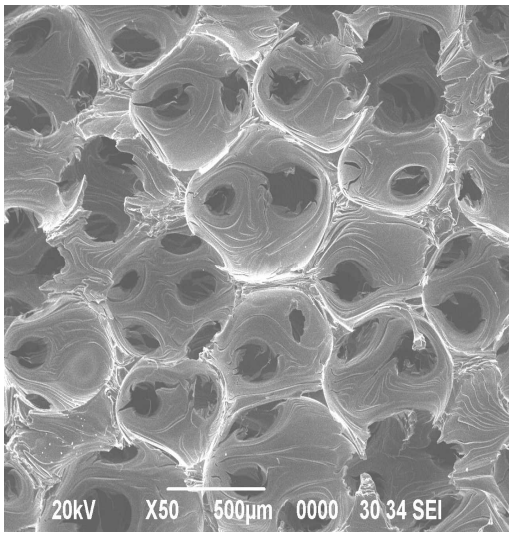
Şekil 4.22: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri



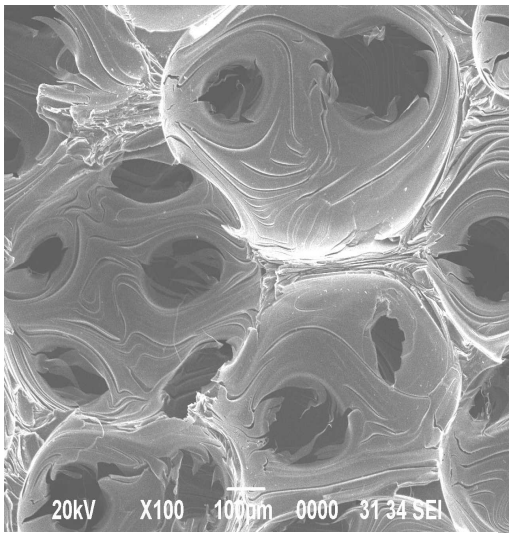
9 s X 50



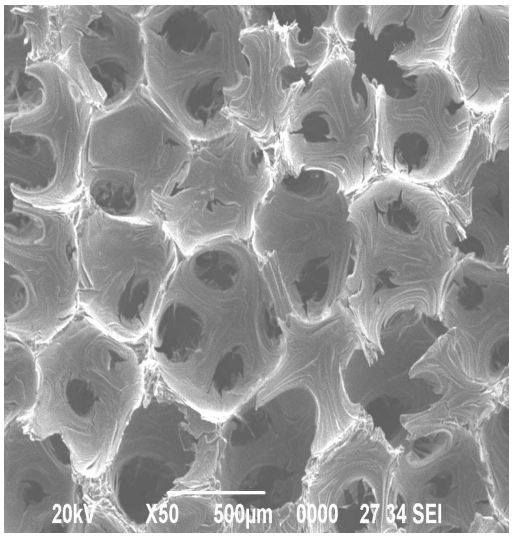
9 s X 100



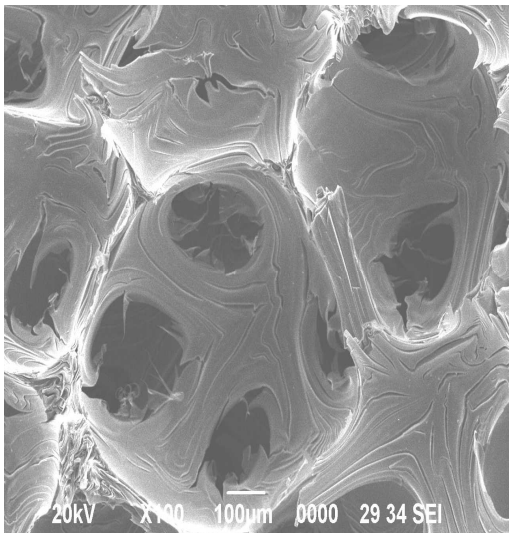
15 s X 50



15 s X 50



29 s X 50



29 s X 100

Şekil 4.22 (Devam): Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Basınç, sıcaklık ve son sıcaklıkta bekleme süresi parametreleri incelenirken basınç boşaltma süresi 3 saniye olarak kullanılmıştır. Gaz boşaltımının 7 saniyede yapılması ile üretilen karbon köpüklerin şekil 4.22'deki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile boşaltma süresinin 3 saniye olduğu deneyler sonucunda üretilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kıyaslandığında hücre geometrilerinin birbirine benzediği ancak hücre sınırlarının belirginliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca por sayısının daha fazla olduğu gözlenerek hücre duvarlarındaki çatlakların arttığı saptanmıştır.

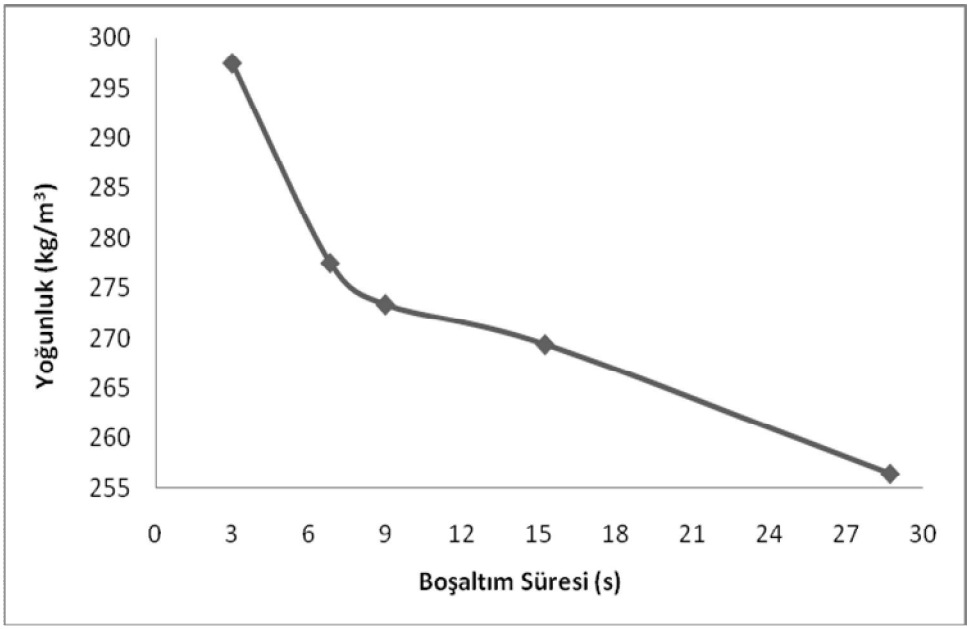
Basıncın 9 saniyede boşaltılmasıyla elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde ise hücrelerin küreselliğinin kaybolduğu, hücrelerin ve porların daha eliptik bir forma dönüştüğü gözlenmiştir. Geometrisinin bozulduğu ve hücre şekillerinin küresel olmadığı görülür. Hücre sınırları belirginsizleşerek çapaklı ve kırıklı bir ligament yapısının ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Gaz boşaltım süresi 15 saniyeye çıkarıldığında hücre geometrisinin 7 saniyelik boşaltım süresi sonucunda elde edilen görüntülere oldukça benzer olduğu gözlenmiştir. Por sayısı artmış bazı hücrelerde dörtten fazla por oluştuğu gözlenmiştir.

Basıncın 29 saniye de boşaltılmasıyla elde edilen karbon köpük örneklerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri basıncın 15 saniyede boşaltılmasıyla elde edilen köpüklerin görüntülerine çok benzemektedir. Bunlarda da çapaklı ve kırılgan bir görünüm vardır.

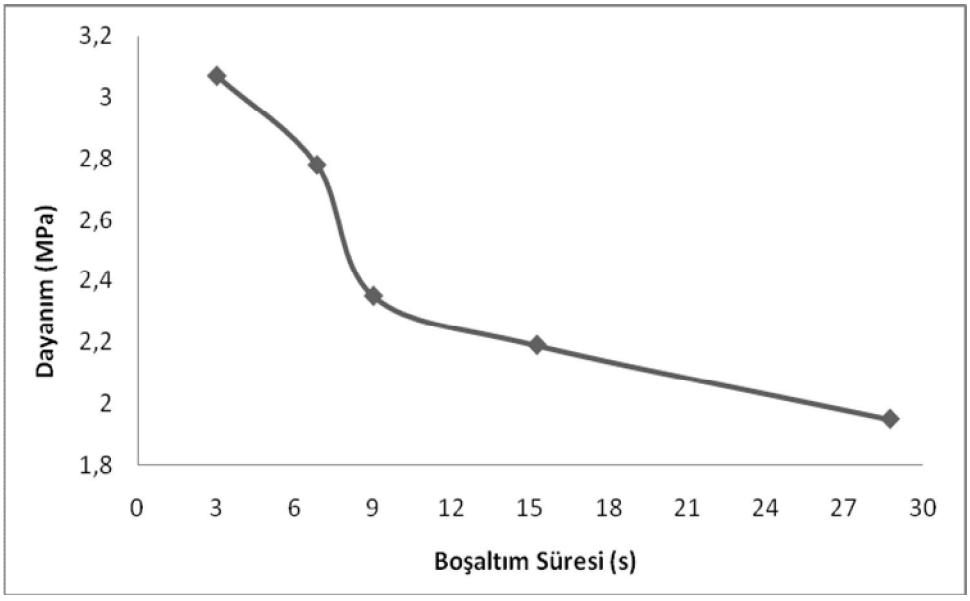
Ek A.13'de son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.23'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.23'de görüldüğü üzere basınç boşaltım süresinin 3 sn'den 29 sn'e yükseltilmesi ile birlikte oluşturulan karbon köpüklerin yoğunluğu 297.4 kg/m^3 değerinden 256.5 kg/m^3 değerine düşmüştür. Ölçülen yoğunluk aralığı literatürde belirtilen yoğunluk değerleri ile örtüşmektedir [25,31,32,35]. Gaz boşaltım süresi arttıkça elde edilen karbon köpüklerin yoğunlukları da azalmaktadır. Bu sonuç literatür bilgileriyle de paralellik göstermektedir [91].



Şekil 4.23: Karbon Köpüklerin Yoğunlarının Boşaltım Süresi ile Değişimi

Ek A.14'de son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin dayanım değerleri verilerek Şekil 4.24'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Boşaltım Süresi ile Değişimi

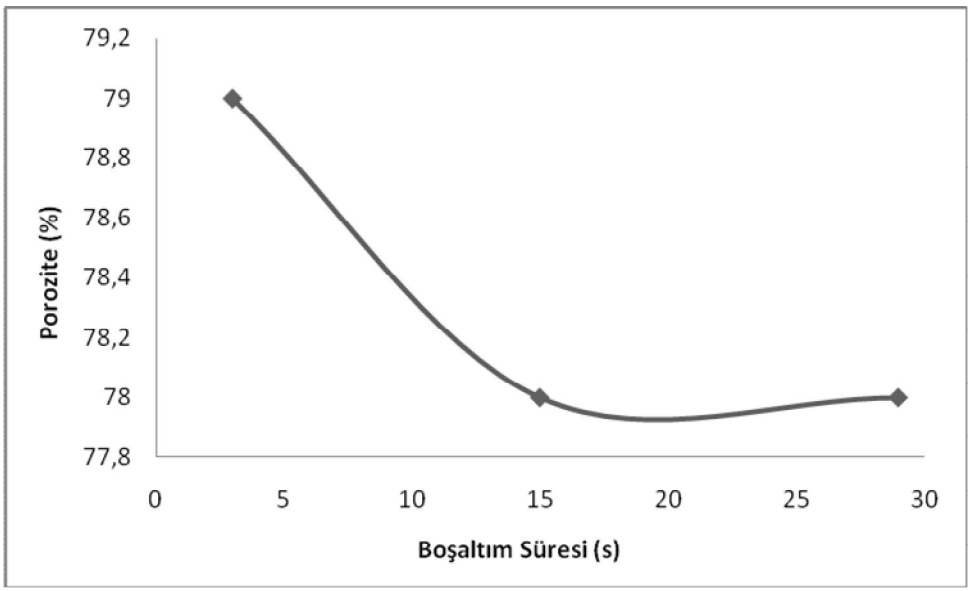
Şekil 4.24'de görüldüğü üzere basınç boşaltım süresi 3 sn seçildiğinde oluşturulan karbon köpüğüm dayanımı 3.07 MPa, basınç boşaltım süresi 29 sn iken oluşturulan karbon köpüğün dayanımı ise 1.95 MPa olarak ölçülmüştür. Gaz boşaltım süresi arttıkça aynen yoğunlukta olduğu gibi elde edilen karbon köpüklerin dayanımları da azalmaktadır. Bu sonuç yukarıdaki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve literatür bilgileriyle de desteklenmektedir [64,65,91]. Boşaltım süresi uzadıkça hücre

şekillerinin bozulması, ligamentlerin ve bağlantı noktalarının zayıflaması ve hücre duvarındaki aratn çatlaklar yapıyı zayıflaştırarak dayanımı azaltmaktadır.

Ek A.15'de son sıcaklıktaki farklı bekleme sürelerinde elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.25'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.25'de görüldüğü üzere basınç boşaltım süresi 3 saniye iken porozite % 79, 15 saniye ve 25 saniye iken porozite % 78 olarak ölçülmüştür. Boşaltım sürelerine bağlı olarak porozite değerlerinden önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Şimdiye kadar elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde yoğunluk ve dayanım arasında doğru orantılı [57,65,91], porozite ile ters orantılı bir ilişki [64,66] olduğu söylenebilir ve bu sonuç literatür verileri ile uyumludur.



Şekil 4.25: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafiksel Gösterimi

Gaz boşaltımı ne kadar hızlı olursa köpük yapısını yani hücre, ligament, porları ve hücrelerin birbiri ile bağlantısını oluşturan ucucu maddeler daha fazla itici güç bularak yapıyı terk eder bu durum yoğunluk, dayanım, hücre yapısı gibi özellikleri etkileyerek daha kısa sürede genleşerek daha etkin bir sıkıştırma meydana getirmekte bunun sonucunda da daha yoğun ve dayanıklı karbon köpük meydana gelmesine sebeb olmaktadır.

Kısa basınç boşaltım süresinde uçucu organik maddeler daha fazla itici gücü tazyik ederek daha gözenekli karbon köpük oluşumuna neden olurlarken, basınç boşaltım

süresi uzadığında itici güç azalmakta ve uçucu organik maddeler tek bir kaçış yolunu seçerek gözenekliliğin azalmasına neden olmaktadırlar [57,91].

Taramalı elektron mikroskobu görüntülerine ve dayanım testi sonuçlarına bakılarak optimum gaz boşaltım süresi olarak 3 saniye seçilmiştir.

4.5 Hammaddeye Ağırlıkça Belirli Yüzdelerde Asfaltit İlavesinin Karbon Köpük Yapısı ve Özelliklerine Etkisi

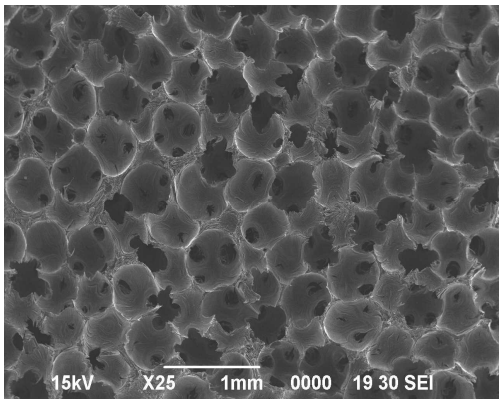
Hammaddeye ağırlıkça % 2, % 5, % 10 oranlarında % 8 kül içeriğine sahip asfaltit numunesi eklenerek 2.97 MPa sabit basınç, 823 K sabit sıcaklık, 60 dakika son sıcaklıkta bekleme süresi ve 3 saniye gaz boşaltma süresi parametrelerinde uygulama gerçekleştirilen asfaltit eklenmesinin karbon köpük yapısı ve özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Ağırlıkça % 2, % 5, % 10 oranlarında % 8 kül içeriğine sahip asfaltit eklenen numunelerden elde edilen karbon köpük örneklerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.26'da verilmiştir.

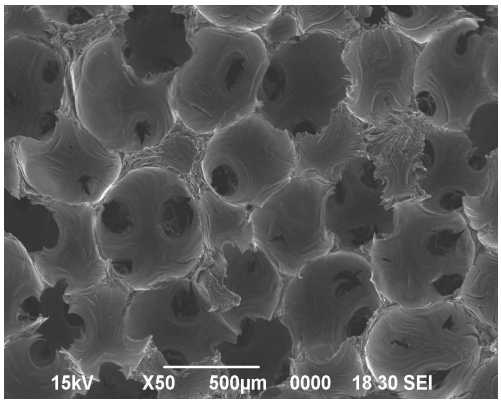
Şekil 4.26'daki taramalı elektron mikroskobu görüntülerine baktığımızda % 100 asfaltitten elde edilen karbon köpük ile içerisine % 2 oranında kül içeriği % 8 olan asfaltit ilave edilerek elde edilen karbon köpük arasında çok büyük yapısal farkların oluşmadığını görülmektedir. Ancak ağırlıkça % 2 oranında asfaltit eklenerek üretilen karbon köpükte por sayılarının ve hücre duvarlarındaki çatlakların artması dikkat çekicidir.

Asfaltit içeriği ağırlıkça % 5'e çıkarıldığında hem mezofaz içeren hammaddeden hem de ağırlıkça % 2 asfaltit içeren karbon köpüklere kıyasla hücre geometrisinin bozulmaya başladığı, hücre sınırlarının belirginsizleştiği, por çaplarının arttığı bunun yanı sıra ligament ve bağlantı noktası oluşumlarının belirsizleştiği, porların içerisinde ipliksi yapıların oluştuğu, porların kırklı ve çapaklı bir görünümünün olduğu görülmektedir.

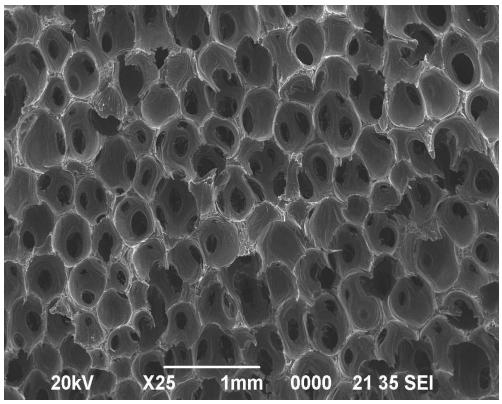
Asfaltit içeriği % 10'a çıkarılarak elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile ağırlıkça % 5 asfaltit içeriğine sahip karbon köpüğün görüntüleri arasında paralellikler mevcuttur. Burada da bağlantı noktaları ve ligament oluşumlarındaki düzensizlikler, yapının kırılgan ve çapaklı görüntüsü ve ipliksi yapıların varlığı gözlenmektedir.



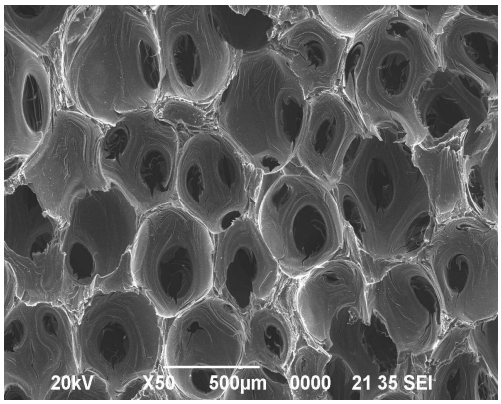
% 100 Mezofaz Zift X 25



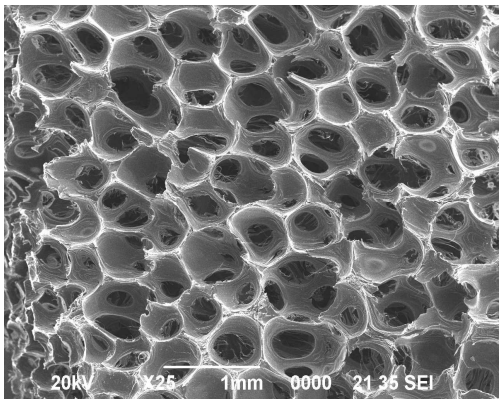
% 100 Mezofaz Zift X 50



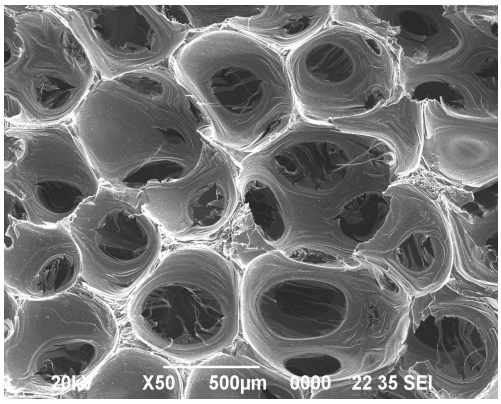
% 2 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 25



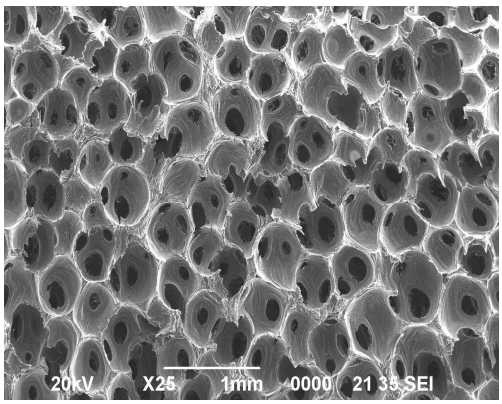
% 2 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 50



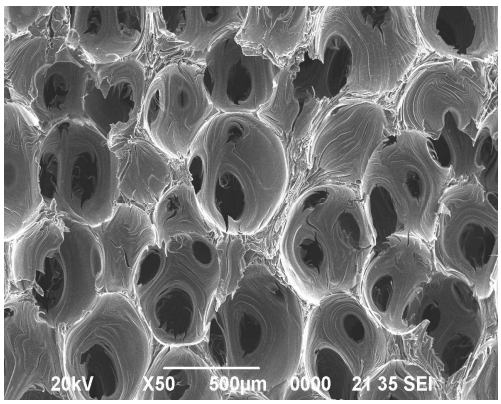
% 5 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 25



% 5 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 50

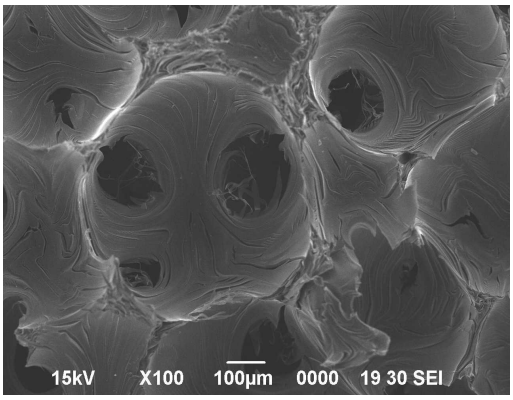


% 10 Asfaltit - % 90 Mezofaz Zift X 25

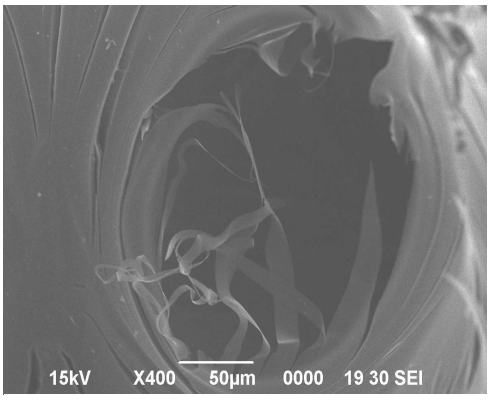


% 10 Asfaltit - % 90 Mezofaz Zift X 50

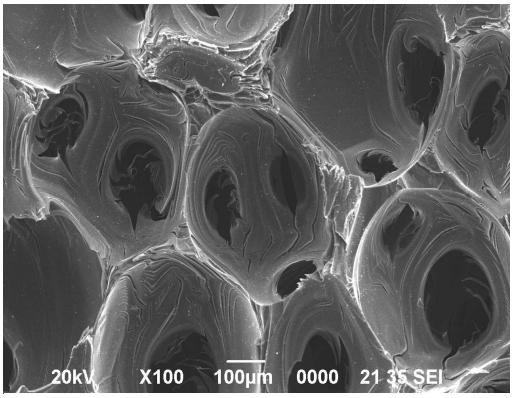
Şekil 4.26: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri



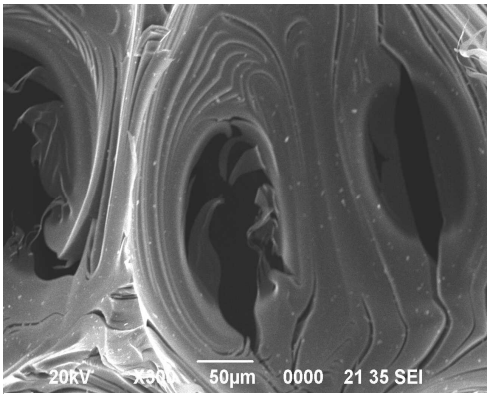
% 100 Mezofaz Zift X 100



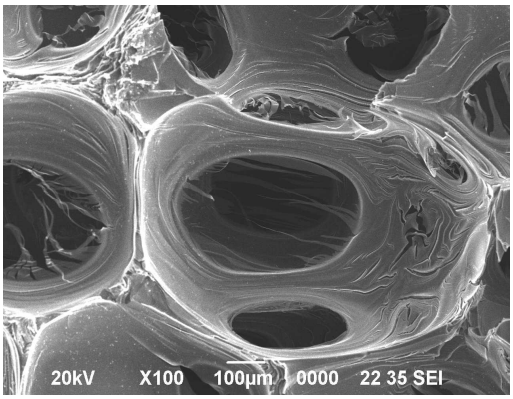
% 100 Mezofaz Zift X 300



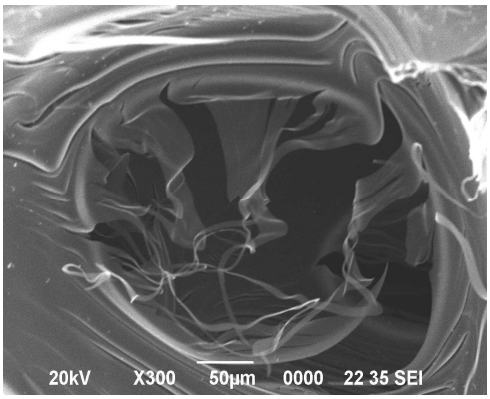
% 2 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 100



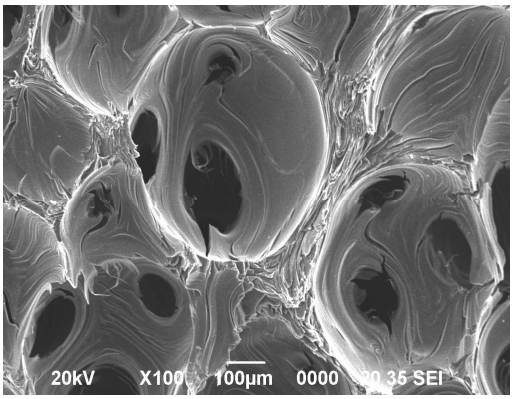
% 2 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 300



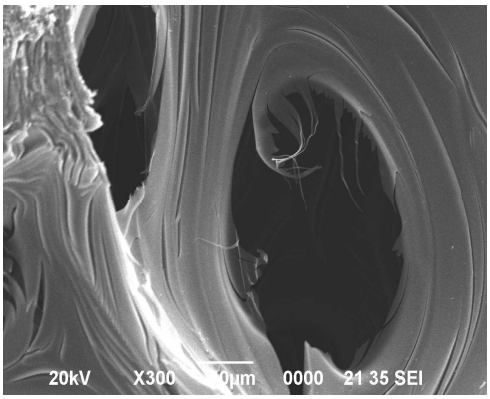
% 5 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 100



% 5 Asfaltit - % 98 Mezofaz Zift X 300



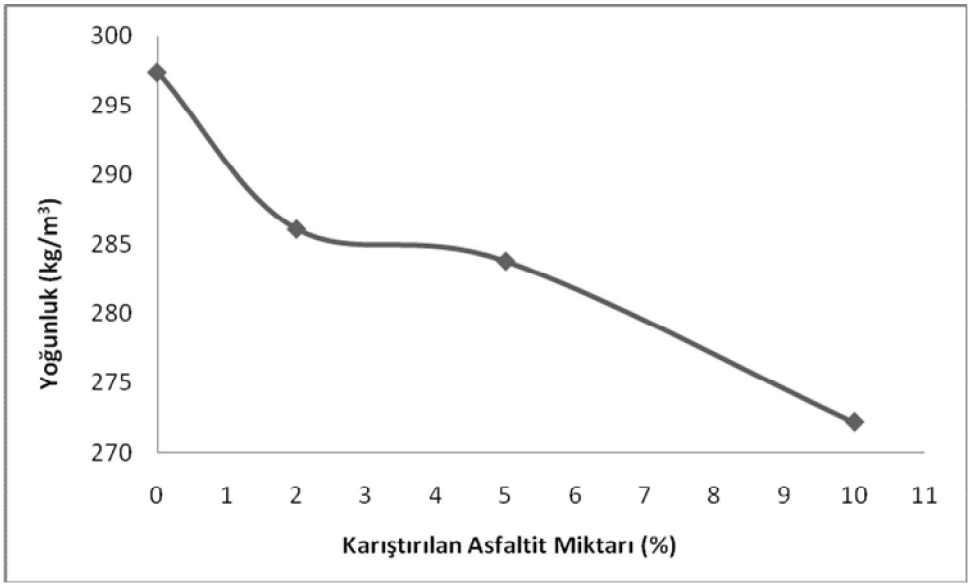
% 10 Asfaltit - % 90 Mezofaz Zift X 100



% 10 Asfaltit - % 90 Mezofaz Zift X 300

Şekil 4.26 (Devam): Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin SEM Görüntüleri

Ek A.16'da mezofaz zifte farklı oranlarda % 8 kül içeriğe sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.27'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



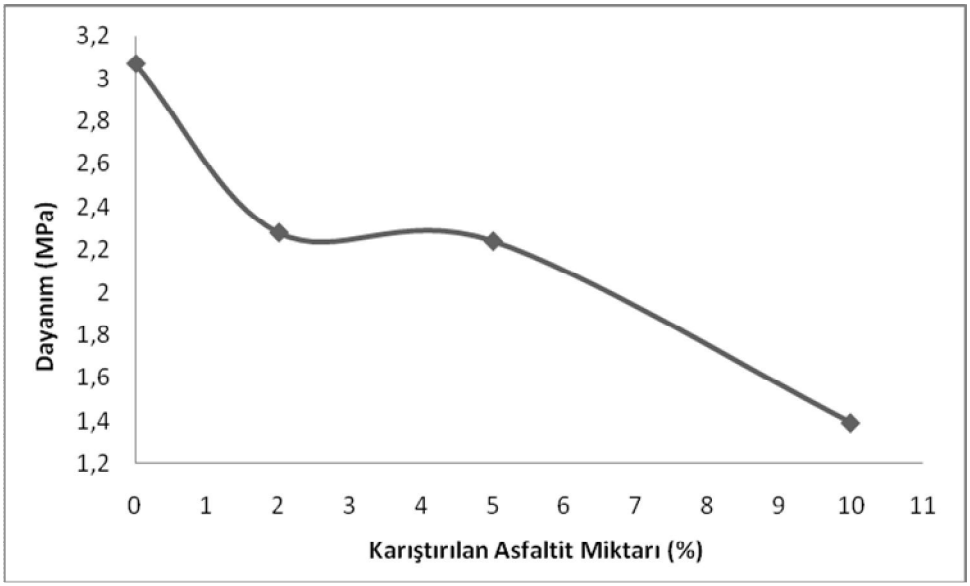
Şekil 4.27: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Grafik Üzerinde Gösterimi

Şekil 4.27'den de görüldüğü üzere saf mezofaz zifte eklenen asfaltit miktarı arttıkça yoğunluk azalmaktadır. Bu durumun köpükleşme mekanizmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Yumuşama sıcaklığı farklı bir madde ilave maddesi köpükleşme mekanizmasının oluşmasını engelleyerek yapıda bozukluklara düzensiz hücre oluşumlarına neden olur buda yoğunluğun azalmasına sebep olur.

Ek A.17'de mezofaz zifte farklı oranlarda % 8 kül içeriğe sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüklerin dayanım değerleri verilerek Şekil 4.28'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

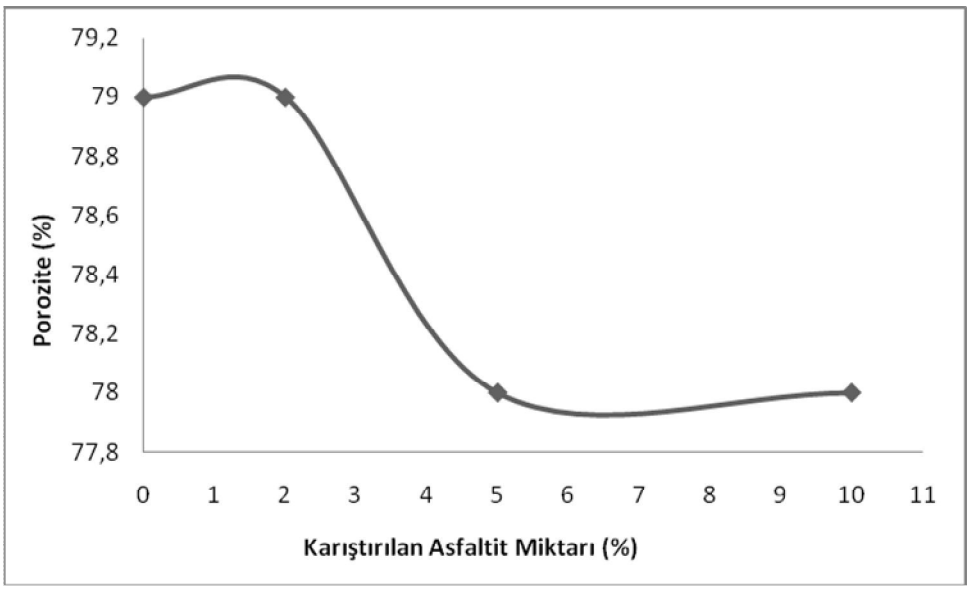
Şekil 4.28'de de görüldüğü üzere saf mezofaz zifte eklenen asfaltit miktarı arttıkça yoğunlukta olduğu gibi dayanım değerlerinde de bir azalma söz konusudur. Benzer şekilde sıkışmanın etkin olmaması hem yoğunluğu hem de dayanımı etkilemekte buna ilave olarak karbon köpüklerin yapısal görüntüleri yoğunluk ve dayanım sonuçları ile paralellik göstermektedir. Mezofaz zifte asfaltit eklenmesi ile hücre geometrisi bozulup, birbirine bağlı hücre ve ligament oluşumları olumsuz yönde etkilenerek yapının zayıflamasına neden olur ki buda dayanımın azalmasına sebep olur.

Ayrıca asfaltit ve mezofaz ziftin birbiri içerisinde etkin karışmaması homojen bir yapının elde edilmesini zorlaşır bununda çatlakların oluşumuna neden olabileceği göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.28: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Grafik Üzerinde Gösterimi

Ek A.18'de mezofaz zifte farklı oranlarda % 8 kül içeriğe sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.29'da bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.29: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafik Üzerinde Gösterimi

Şekil 4.29'dan da görüldüğü üzere ham maddede porozitesi % 79 olarak ölçülmüş, hammaddeye ağırlıkça % 2 oranında asfaltit eklenmesi porozite değerinde değişikliğe neden olmamıştır. Eklenilen asfaltit oranı % 5 ve % 10 olduğunda ise üretilen karbon köpüğün porozitesi % 78 olarak ölçülmüştür. Bu durumun köpükleşme mekanizmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Yumuşama sıcaklığı farklı bir katkı maddesinin ilavesi ile viskozite artacağından akışkanlık azalır ve bir kısım uçucu organik maddelerin oluşturduğu hücreler rahat hareket edemeyerek birbirleriyle temasa geçemez ve böylece daha az gözenekli karbon köpük elde edilir [68].

Eklenen asfaltit numunesindeki kül oranının yapı ve diğer özellikler nasıl etkilediğini ortaya çıkartmak amacı ile % 10, % 26, % 41 kül içeren asfaltit numuneleri ağırlıkça % 5 oranında mezofaz hammaddeye eklenerek yapılan deneylerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir.

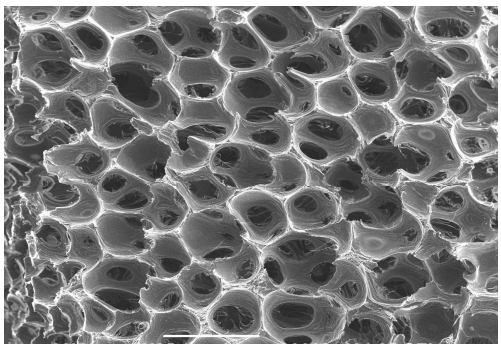
Şekil 4.26'daki % 100 Mezofaz zifften elde edilen karbon köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle Şekil 4.30'daki Mezofaz zifte ağırlıkça % 5 oranında % 8 kül ihtiva eden asfaltit karıştırılarak üretilen karbon köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri karşılaştırıldığında hücre geometrisinin bozulmaya başladığı, hücre sınırlarının belirginsizleştiği, por çaplarının arttığı bunun yanı sıra ligament ve bağlantı noktası oluşumlarının belirsizleştiği, porların içerisinde ipliksi yapıların oluştuğu, porların kırklı ve çapaklı bir görünümünün olduğu görülmektedir.

% 10 kül içeriğine sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile % 8 kül içeriğine sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüklerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kıyaslandığında % 10 kül içeriğine sahip asfaltit ilaveli köpüklerin hücre geometrisinin daha da bozulduğu, hücre sınırlarının biraz daha belirginsizleştiği görülmektedir.

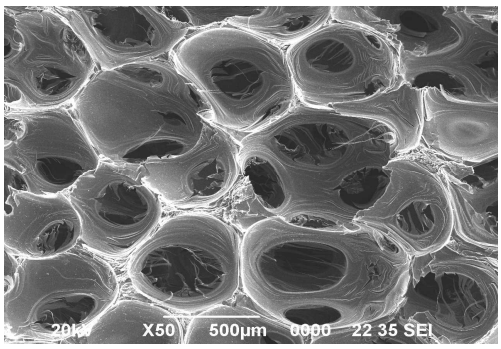
% 26 kül ihtiva eden asfaltit ilavesi ile elde edilen karbon köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile %10 ve % 8 kül içeriğine sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpük numunelerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kıyaslandığında hücre geometrisinin biraz daha küresel forma dönüştüğü, kırıklı ve çapaklı görünümün ve hücre duvarındaki çatlakların azaldığı gözlenmiştir.

% 41 kül içeriğine sahip asfaltit eklenerek elde edilen karbon köpüklerin SEM görüntüleri ile % 8, % 10 ve % 26 kül içeriğine sahip asfaltit eklenerek üretilen

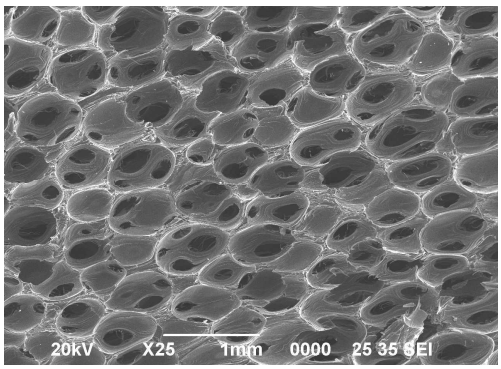
köpüklere ait SEM görüntüleri kıyaslandığında hücre geometrisinin küresel forma dönüştüğü, hücre duvarlarındaki çatlakların azaldığı gözlenmiştir.



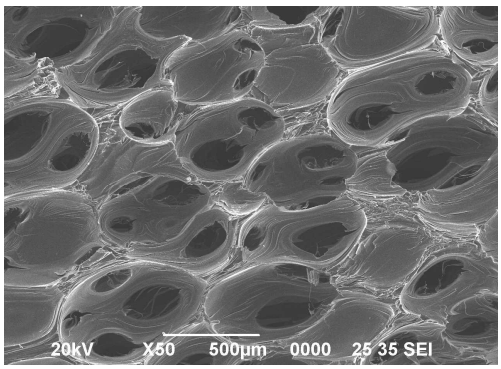
% 8' lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 25



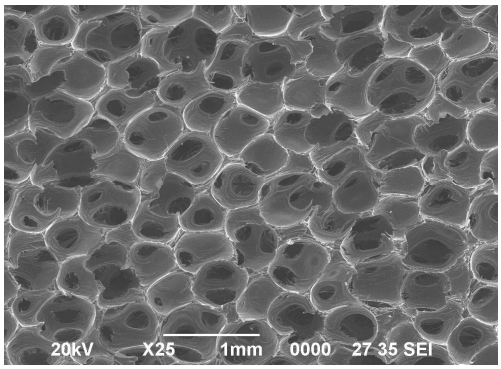
% 8' lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 50



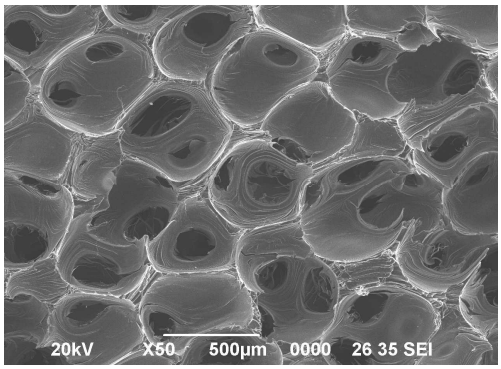
% 10' luk Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 25



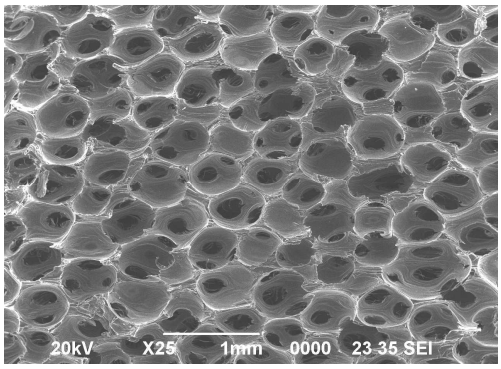
% 10' luk Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 50



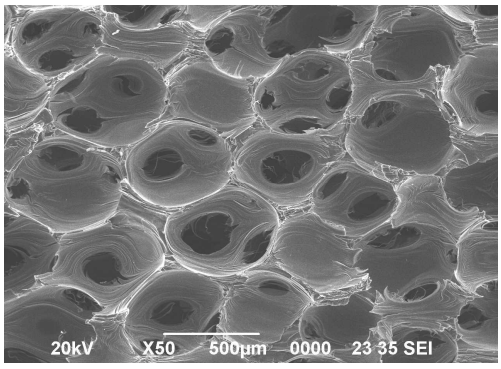
% 26' lık Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



% 26' lık Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X

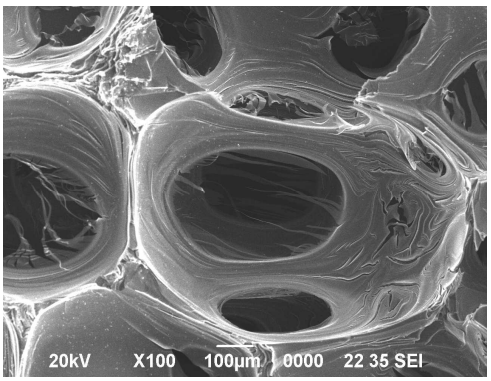


% 41' lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 25

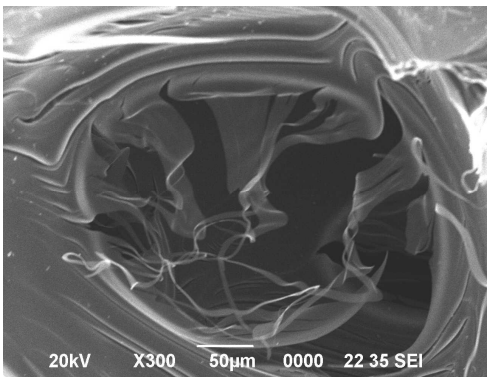


% 41' lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 50

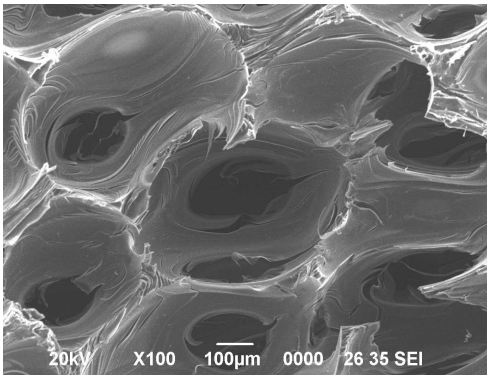
Şekil 4.30: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri



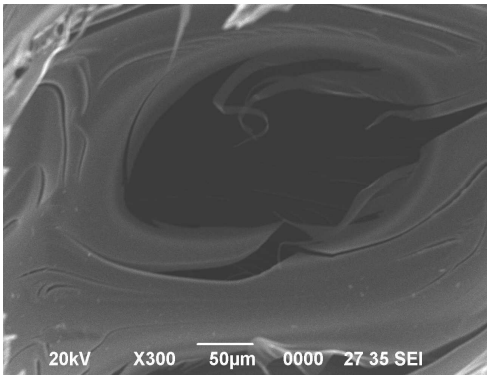
% 8’ lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X 100



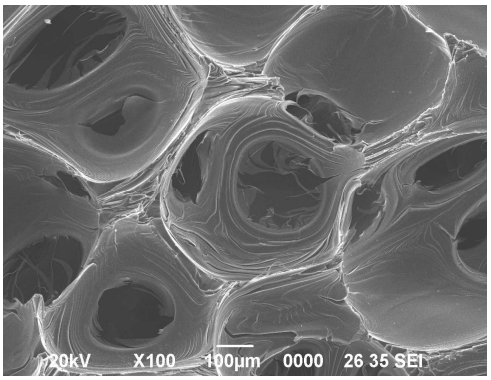
% 8’ lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



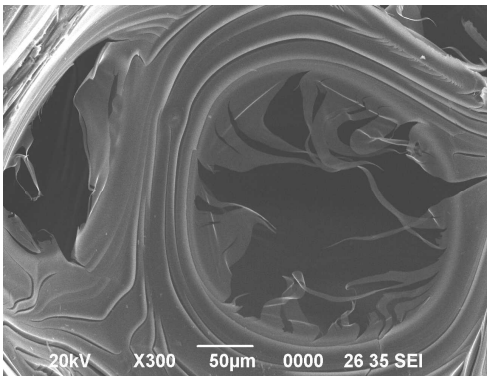
% 10’ luk Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



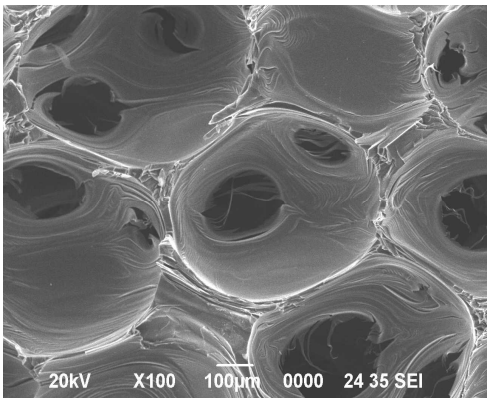
% 10’ luk Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



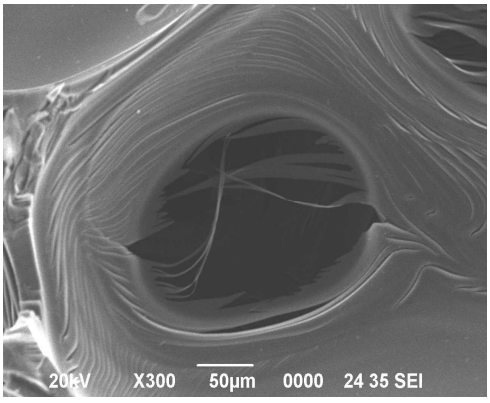
% 26’ lık Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



% 41’ lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



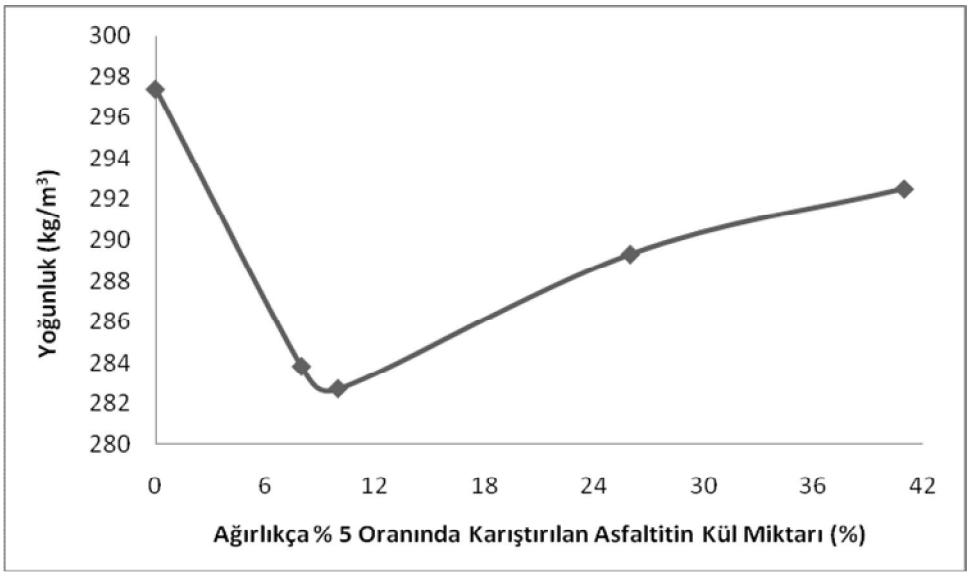
% 41’ lik Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X



% 26’ lık Kül Değ. Asf. – Mezofaz Zift X

Şekil 4.30 (Devam): Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Ek A.19'da mezofaz zifte ağırlıkça % 5 oranında çeşitli kül içeriğine sahip asfaltitlerden karıştırılarak üretilen karbon köpüklerin yoğunluk değerleri verilerek Şekil 4.31'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



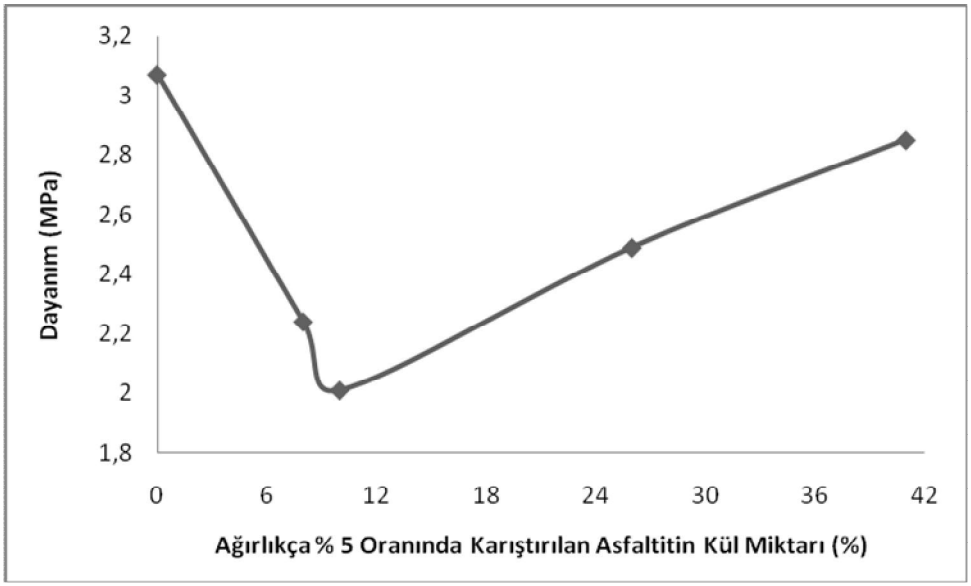
Şekil 4.31: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunluklarının Grafiksel Gösterimi

Şekil 4.31'de de görüldüğü üzere % 100 mezofaz ziften üretilen karbon köpüğün yoğunluk değeri en yüksek iken içerisine ağırlıkça % 5 oranında çeşitli kül içeriğine sahip asfaltit eklenmesi sonucunda köpükleşme mekanizması etkilenerek yoğunluğun düşmesine sebep olmuştur. Bunun yanında sırasıyla % 41, % 26, %10 ve %8 kül içeriğine sahip asfaltitten ağırlıkça % 5 oranında eklenilerek elde edilen karbon köpüklerinin yoğunlukları içerdikleri kül miktarlarıyla orantılı olarak artış gözlenirken kül miktarı % 8'den % 10'a çıkarken yoğunlukta bir azalma görülmektedir.

Ek A.20'de mezofaz zifte % 5 oranında çeşitli kül içeriğine sahip asfaltitlerden karıştırılarak üretilen karbon köpüklerin dayanım değerleri verilerek Şekil 4.32'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.

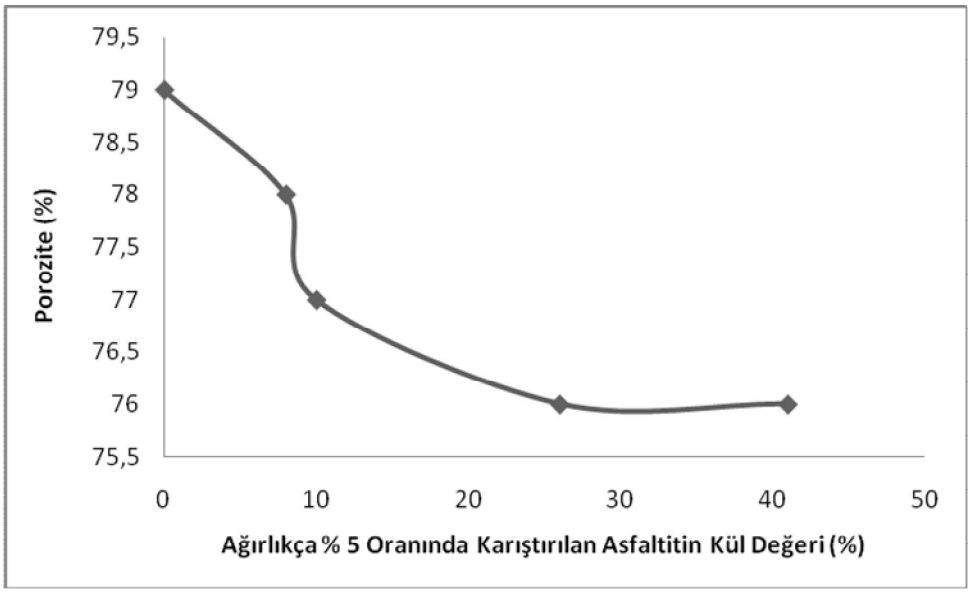
Şekil 4.32'de de görüldüğü üzere aynen yoğunlukta olduğu gibi % 100 mezofaz ziften üretilen karbon köpüğün dayanım değeri en yüksek iken içerisine ağırlıkça % 5 oranında çeşitli kül içeriğine sahip asfaltit eklenmesi yapının homojenliğinin bozulmasına ve dayanımın azalmasına neden olmuştur. Bunun yanında sırasıyla % 41, % 26, %10 ve %8 kül içeriğine sahip asfaltitten ağırlıkça % 5 oranında

eklenilerek elde edilen karbon köpüklerinin dayanımları içerdikleri kül miktarlarıyla orantılı olarak artış gözlenirken kül miktarı % 8'den % 10'a çıkarken dayanımda bir azalma görülmektedir.



Şekil 4.32: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımlarının Grafiksel Gösterimi

Ek A.21'de mezofaz zifte ağırlıkça % 5 oranında çeşitli kül içeriğine sahip asfaltitlerden karıştırılarak üretilen karbon köpüklerin porozite değerleri verilerek Şekil 4.33'de bu değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.33: Mezofaz Zifte Ağırlıkça % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerlerinin Grafiksel Gösterimi

Şekil 4.33'de de görüldüğü mezofaz zifte %8 kül içeriğine sahip asfaltitten ağırlıkça % 5 oranında eklenilerek elde edilen karbon köpüklerin porozite değeri % 78 olarak ölçülürken, mezofaz zifte % 10 kül içeriğine sahip asfaltit ilave edilerek üretilen karbon köpüklerde % 77 olarak ölçülmüştür. Asfaltit içeriğindeki kül miktarı % 26 ve % 41 oranlarında arttırıldığında ise porozite değerinin % 1'lik azalma göstererek 76'ya düştüğü görülmüştür.

Ham maddeye asfaltit katkı maddesinin eklenmesi, hücre yapısını olumsuz yönde etkilediği ve homojenliğini bozduğundan dolayı % 100 mezofaz zifttten üretilmiş karbon köpüklerin yoğunluk ve dayanım değerleri asfaltit katkı maddeli karbon köpüklere kıyasla daha yüksektir.

İlave edilen asfaltitin yapısındaki kül içeri arttıkça üretilen karbon köpüklerin yoğunluk ve dayanım değerlerinde de artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar daha önce İTÜ Kimya mühendisliği karbon laboratuarlarında gerçekleştirilen demineralize asfaltitten karbon köpük üretimindeki sonuçlar ve litaratür bilgileriyle paralellik göstermektedir [68,95,96].

5. GENEL SONUÇLAR

Stabilizasyon aşaması atlanılarak mezofaz zifften tek aşamada üretilmiş karbon köpüklerle ilgili genel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

Sistemde basınç olmaksızın yapılan deneylerde uçucu organik madde oluşumuna bağlı olarak köpürme meydana geldiği ancak ortamda basınç olmamasından ve yeterli sıkışmanın sağlanamamasından dolayı bağlantı noktaları ve ligamentlerin oluşmadığı bunun sonucunda da özgün karbon köpük yapısının oluşmadığı ve dayanımın ölçülemeyecek kadar düşük olduğu görülmüştür.

Sisteme uygulan basıncın artması ile üretilen karbon köpüğün gözenekliliği azaltırken, yoğunluk ve basma dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra karbon köpüğün yapısındaki hücre bağlantı noktaları ve ligamentlerin oluşumunda artışı gözlenmiş, basınç artışıyla birlikte hücre duvarlarındaki çatlakların azaldığı görülmüştür.

Sisteme aynı giriş basınçlarında fakat iki farklı şekilde besleme yapılarak elde edilen karbon köpükler birbirleriyle kıyaslanmış, karbon köpüğün yapısının oluşmasında en büyük etkenin giriş basıncından daha çok boşaltım basıncı olduğu görülmüştür.

Son basınçları aynı olacak şekilde basıncın oda sıcaklığında beslenmesi ile basıncın mezofaz ziftin yumuşama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta beslenmesinin (623 K) karbon köpük üzerindeki etkilerini araştırmak için yapılan incelemeler sonucunda basıncın oda sıcaklığında beslendiği karbon köpüklerin yapılarının daha homojen, daha düzgün ve çapaksız olduğu, yoğunluk ve dayanım değerlerinin yumuşama sıcaklığından sonra sisteme basınç verilerek elde edilen köpüklere oranla daha yüksek olduğu görülmüştür.

Proses sıcaklığının artırılması hücre geometrisinin daha küresel forma dönüşmesine, bağlantı noktası ve ligament oluşumlarının artmasına neden olmuşdur. Bunun yanında sıcaklık artışı ile üretilen köpüğün yoğunluk ve dayanım değerleri artarken, gözeneklilik de azalma meydana gelmiştir.

Son sıcaklıkta bekleme süresinin etkisini inceleyebilmek için yapılan deneylerin birlikte değerlendirilmesinden zaman ile önce olumlu gelişme gösteren karbon köpük yapısı belli bir süreden sonra bozunmaya başlamıştır. 60 dakikaya kadar olan bekleme sürelerinde karbon köpük yapısında olumlu gelişmeler gözlenerek dayanım ve yoğunluk değerlerinin arttığı fakat gözenekliliğin azaldığı görülmüştür. 60 dakikayı geçen bekleme sürelerinde ise yapının bozulmaya başladığı, dayanım ve yoğunluğun azaldığı fakat gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir.

Basınç boşaltma süresi artmasıyla karbon köpüğün yoğunluk, dayanım ve porozite değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Mezofaz zifte % 8 kül içeriğine sahip ağırlıkça farklı oranlarda asfaltit ilave edilerek üretilen karbon köpüklerin yoğunluk, dayanım ve porozite değerlerinin ilave edilen asfaltitin ağırlıkça miktarı arttıkça, azaldığı gözlenmiştir. Karbon köpüğü yapısında en fazla deformasyon ağırlıkça % 10 asfaltit ilave edilerek üretilen karbon köpük numunelerinde gerçekleşmiştir.

Ağırlıkça % 5 oranında farklı kül içeriğine sahip asfaltitlerin mezofaz zifte karıştırılmasıyla üretilmiş karbon köpüklerin dayanım ve yoğunlukların artan kül içeriğiyle arttığı gözlenirken, porozite değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

Genelde yoğunluk ve dayanımlar arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu gözlenmiştir.

6. ÖNERİLER

Bu projede; yüksek sıcaklıklarda mezofaz ziftden elde edilen karbon köpüğü, stabilizasyon aşaması atlanarak, 1323 K'de karbonize edilerek daha önceleri iki aşamada gerçekleştirilen prosesin (stabilizasyon, karbonizasyon) stabilizasyonun kaldırılmasıyla tek aşamada gerçekleşmesi sağlanmıştır. Ayrıca karbon köpüğünün yapısını ve özelliklerinin belirlenmesi açısından reaktör aşamasında uygulanan basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi ve basınç boşaltma süresi temel parametreler olarak değiştirilerek optimum ürün özelliklerine gidilmiştir. Diğer taraftan mezofaz ziftin Japonya'dan tedarik edilmesi nedeni ile teknolojik olarak söz konusu olan dışa bağımlılık Doğu Anadolu Asfaltitlerinin katkı maddesi olarak kullanılması yoluyla azaltılması araştırmaları yapılmıştır.

Bölüm 5' de elde edilen sonuçlar çerçevesinde; ileride karbon köpüğü ile ilgili yapılacak çalışmalar konusunda aşağıda yer alan öneriler oluşturulmuştur:

1. Köpüklere grafitizasyon işlemi uygulanarak grafitik yapılar arasındaki farklar incelenebilir.
2. Basınç, sıcaklık, son sıcaklıkta bekleme süresi, basınç boşaltma süresi ve asfaltit ilavesinin karbon köpüklerin ısıl ve elektriksel iletkenliğini ne yönde etkilediği araştırılabilir.
3. Porozite ölçümü yapılarak örneklerin gözenekli yapıları arasındaki farklar araştırılabilir.
4. Elde edilen karbon köpüklerin herhangi bir uygulama alanındaki kullanılabilirlik performansı araştırılabilir.
5. Asfaltit ilavesiyle ilgili daha fazla çalışma yapılarak üretilen köpüklerin özellikleri daha optimum değerlere ulaştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] History of foams, http://www.ms.ornl.gov/researchgroups/cmt/foam/history_of_foams.html, 20.03.2008

[2] **Chung, D.L. D.,** 1994. Carbon Fiber Compozites, Butterworth-Heinemann, Boston

[3] Carbon Materials Technology Group Metarihttp://www.ms.ornl.gov/researchgroups/CMT/foam/Graphite_Foams.pdf , 15.03.2008

[4] Touchstone araştırma laboratuarı, http://www.cfoam.com, 02.04.2008.

[5] Paco Graphite, http://www.poco.com/ , 16.03.2008

[6] Karbon Wikipedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon, 01.04.2008

[7] **Marsh, H.,** 1997, Carbon materials: an overview of carbon artifact, *Introduction to Carbon Technologies*, pp 1-34, Eds. Marsh, H., Heintz, E.A., and Rodriguez-Reinoso, F., Universaded de Alicante, Secretariade de Publicaciones.

[8] Carbon, Graphite, Diamond, Fullerene, http://www.nyu.edu/pages/mathmol/modules/carbon/carbon1.html, 15.03.2008

[9] Tüm Minerallerin Sertlik Şampiyonu Elmas, http://www.populerbilgi.com/genel/res_kkk/elmas-2.jpg, 15.03.2008

[10] **Burchell,T**., 1999. Structure and Bonding in Carbon Materials, *Carbon Materials for Advanced Technologies*, p1-29, Amsterdam, New York, Pergamon

[11] Karbon, http://www.kimyaevi.org/elementler/karbon/karbon.asp

[12] Diamond, http://www.bris.ac.uk/depts/chemistry/MOTM/diamod/diamond.htm

[13] Fullerene, http://www.kimyasanal.net/konugoster.php?yazi=b00o4bmyva

[14] Bucky Balls, www.firstscience.com/SITE/ ARTICLES/bucky.asp

[15] Fullerene, wunmr.wustl.edu/EduDev/Fullerene/ structure.html

[16] **Marsh,H.,** 1989. Carbon Forms, Introduction to Carbon Science, pp10-15, Butterworth&Co.Ltd, England.

[17] **Savage, G.,** 1993. Carbon-Carbon Composites, pp. 1-29, Chapman & Hall, London, UK.

[18] **Figueiredo, J.L. and Moulijn, J.A.,** 1986. Carbon and Coal Gasification, pp.33-35, Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands.

[19] **Edwards, I.A.S.,** 1989. Structure in carbons and carbon forms, Introduction to Carbon Science, pp.1-36, Ed. Marsh, H., Butterworths, London

[20] **Bourrat, X.,** 2000. Structure in carbon and carbon artifacts, Science of Carbon Materials, pp.1-97, Eds. Marsh., Rodriguez-Reinoso, F., Universaded de Alicante, Secretariade de Publicaciones.

[21] **Edwards, I.A.S.,** 1989. Mechanism of formation of isotropic and anisotropic carbons, Introduction to Carbon Science, pp.1-36, Ed. Marsh, H., Butterworths, London.

[22] **Chong,C. and Eliot, B.,** 2006. Carbon foam derived from various precursors, Department of Chemical Engineering, West Virginia University.

[23] **Droege, M. W.,** 1999. Low density open cell organic foams, low density open cell carbon foams, and methods for preparing same, *United States Patent,* No: 5945084 dated Agust 31, 1999.

[24] **Calvo, M., Garcia, R., Arenillas, A., Suarez, I. and Moinelo. S.,** 2005. Carbon foams from coals, A preliminary study, Fuel, **84**, 2184-2189.

[25] **Kearns, K. M.,** 1999. Pitch foam products*, United States Patent*, No: 5961814 dated October 5, 1999.

[26] **Murdie, N., Parker, C. A., Pigford, J. F., Narasimhan, D., Dillon, F.**, 2000. Process of making carbon-carbon composite material made from densified carbon foam, *United States Patent*, No: 6077464 June 20, 2000.

[27] **Bonzom, A., Crepaux, A. P., Moutard, A. E. J. .,** 1981. Process for preparing pitch foams and products so produced, *United States Patent*, No: 4276246 dated June 30, 1981.

[28] **Stiller, A. H., Stansberry, P. G.**, **Zondlo J. W.,** 2002. Method of making a carbon foam material and resultant product, *United States Patent*, No: 6346226 dated February 12, 2002.

[29] **Simandl, Ronald F., Brown, John D.,** 1994. Microcellular carbon foam and method, *United States Patent,* No: 5300272 dated April 05, 1994.

[30] Carbon Materials Technology, http://www.ms.ornl.gov/researchgroups/CMT/FOAM/Carbon99-1. 15.04.2008

[31] **Klett, J.,** 2000. Method for extruding pitch based foam, *United States Patent*, No: 6344159 dated February 05, 2002.

[32] **Klett, J.,** 2000. Process for making carbon foam, *United States Patent*, No: 6033506 dated March 7, 2000

[33] **Labuschagne F.W.,** 2004. Metal catalysed intumescence of polyhydroxyl compounds, *Doktora Tezi*, Pretoria Üniversitesi, Kimya mühendisliği.

[34] **Sarkisian P. and Rockenfeller U.,** 2000.Golf ball heater appliance, *United States Patent,* No: 6130411 dated October 10, 2000.

[35] **Klett, J.W.,** 1999. High thermal conductivity mesophase pitch – derived carbon foams, *composites in manufacturing*, **14(4),** 1-19

[36] **Klett, J.,** High Thermal Conductivity Graphite Foam. Oak Ridge National Laboratory, http://www.ms.ornl.gov/researchgroups/CMT/FOAM/foams.htm, 15.03.2008

[37] **Ford, W.,** 1964. Method of making cellular refractory thermal insulating material, *United states Patent*, No: 3121050 dated February 11, 1964.

[38] **Googin, J., Napier and Scrivner, J.M.**, 1967. Method for manufacturing foam carbon products, *United States Patent*, No: 3345440 dated October 3, 1967.

[39] **Raley, Jr., Charles, F. and Asher, D. R.,** 1976. Process for preparing macroporous open-cell carbon foam from normally crystalline vinylidene chloride polymer, *United States Patent*, No: 3960770 dated June 1, 1976.

[40] **Vinton,C. and Franklin, C.,** 1975. Method for the Preparation of Carbon Structures, *United States Patent*, No: 3927186 dated December 16, 1975

[41] **Arnold, Jr., Aubert, J. H., Clough, R. L., Rand, P. B. and Sylwester, A.P.,** 1999. Low density microcellular carbon foams and method of preparation, *United States Patent*, No: 4832881 dated May 23, 1989.

[42] **Hopper, R. W. and Pekala, R. W.,** 1988. Low Density Microcellular Carbon or Catalytically impregnated carbon foams and process for their preparation, *United States Patent*, No: 4756898 dated July 12, 1988.

[43] **Klett, J. and Burchell, T.,** 2002. Pitch based carbon foam heat sink with phase change material, *United States Patent*, No: 6399149 dated June 4, 2000.

[44] **Vinton, C.S. and Franklin, C.H.,** 1977. Method for the preparation of vitreous carbon foams, *United States Patent*, No: 4022875 dated May 10, 1977

[45] **Luhleich, H., Nickel, H., and Dias, F.,** 1975. Method of making carbonaceous bodies, *United States Patent,* No: 3927187 dated December 16, 1975.

[46] **Klett, J.,** 2001. Pitch-based carbon foam and composites, *United States Patent*, No: 6261485 dated July 17, 2001.

[47] **Brooks, J. D. and Taylor, G.H.,** 1965. The formation of grapihitizing carbons from the liquid phase, Carbon, 3, 185-193.

[48] **McNaught A. D.,** 1997. IUPAC Compendium of Chemical Terminology, IUPAC, Online Book,

[49] **Hager, J. W.,** 1992. *Materials Research Society Symposium Proceedings* 270, 41-46.

[50] **Kearns, K. M.,** 1999. Process for Preparing Pitch Foams, *United States Patent*, No: 5868974 dated February 9, 1999

[51] **Edie, D.D.,** 1990. Carbon Fibers, Filaments and Composites, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

[52] **Burchell, T.D.,** 1999. Carbon Materials for Advanced Technologies, pp.123-127, Elsevier Science, The Netherlands

[53] **Özel, M., Bartle, K. D.,** Production of Mesophase Pitch from Coal Tar and Petroleum Pitches using Supercritical Fluid Extraction, *Tübitak,* **26**, pp.417-424, 2001

[54] **Mochida, I., Yoon, S.H., Korai, Y., Kanno, K., Sakai, Y., and Komatsu E.,** 2000. Mesophase pitch from aromatic hydrocarbons, *Science of Carbon Materials*, pp.1-97, Eds. Marsh., Rodriguez-Reinoso, F., Universaded de Alicante, Secretariade de Publicaciones.

[55] **Klett, J.,** 2003. ORNL High Conductivity Graphitic Foams, Oak Ridge Ulusal Laboratuarı, Tennesse.

[56] **Mochida, I., Korai, Y., Ku, C. H., Watanabe F., and Sakai Y**., 2000. Chemistry of synthesis, structure, preparation and application of aromatic-derived mesophase pitch, Carbon, 38, 2 , 305-328

[57] **Eksilioglu, A., Gencay, N., Yardim, M.F., Ekinci, E.,** 2006. Mesophase AR Pitch derived carbon Foam: Effect of Temperature, Pressure and Pressure Release Time, *Journal of Material Science*, **41 (10):** 2743-2748

[58] **Wood, Michael D., Murdie, N.,** 2001. Method for making a pitch-based foam, *United States Patent*, No: 6315974, dated November 13, 2001.

[59] **Murdie, N., Pigford, J. F., Wood, M. D., Dillon, F., Parker, C. A., Hemstad, S. N.,** 2001. Method of making pitch-based carbon foam. *United States Patent,* No: 6315974 dated November 13, 2001

[60] **Chen, C., Kennel, E. B., Stiller A. H., Stransberry, P. G. and Zondlo, J. W.,** 2006. Carbon foam derived from various precursors, *Carbon,* **44,** 1535-1543.

[61] **Darren, K. R., Plucinski, J. W. and Handley, R. A.,** 2001. Preperation and Graphitization of high performance carbon foams from coal, Touchstone Araştırma Laboratuarı, USA.

[62] **Stiller, A. H., Stansberry, P. G. and Zondlo, J. W.,** 1999. Method of making a carbon foam material and resultant product, *United States Patent,* No: 5888469 dated 30.3.1999.

[63] **Darren K. R.,** 2004, Petroleum pitch-based carbon foam, *United States*, Patent, No: 6833012, 21.12.2004

[64] **Wang X., Zhong J., Wang Y., Yu M. and Wang Y.,** 2006 The Sytudy on Formation of Carbon Foams, Material Science and Engineering College, Donghua University, No. 1982 Yan^an road (west).shanghai, PRC, 200051 741-746

[65] **Ekşilioğlu,A.,** 2003. Effect of temperature, solvent type, and additives on the properties of mesophase pitch, *M.Sc. Thesis*, ITU, Institute of Science and Technology, Istanbul.

[66] **Wang, M., Wang, C., Li, T., Hu, Z.,** 2008. Preparation of mesophase-pitch-based carbon foams at low pressures, *Carbon*, **46,** 84-91

[67] **Hardcastle., et al,** 2003. Process for making carbon foam induced by process deppessurization, *United States Patent*, No: 6576168 dated June 10, 2003.

[68] **Li, S., Song, Y., Song, Y., Shi, J., Liu, L., Wei, X., Guo, Q.,** 2007. Carbon foams with high compressive strength derived from mixtures of mesocarbon microbeads and mesophase pitch, *Carbon*, **45,** 2092–2097

[69] **Klett, J.W.,** 2003. ORNL High Conductivity Graphitic Foams, Oak RidgeNational Laboratory, Metals and Ceramic Division internal report, Tennessee, USA

[70] **Klett, J.W., Gallego, N.C. and McMillan, A.D.,** 2002. Effects of processing conditions on properties of graphite foams, *Proceedings of the International Conference on Carbon*, Beijing, China, September.

[71] **Seng, T.,** 2001. Rapid oxidation/stabilization technique for carbon foams carbon fibers and C/C composites, *United States Patent*, No: 6733737, dated Agust 29, 2001.

[72] **Klett, J.,** 2000. Process for making carbon foam, *United States,* Patent, No: 08/921,875 dated March 7, 2000.

[73] **Drbohlav, J., and Stevenson W. T. K,** 1995. The Oxidative stabilization and carbonization of a synthetic mesophase pitch, part I: the oxidative stabilization process, *Carbon*, **33(5)**, 693-711.

[74] **Thoeni, A.K. and Baker G.K.,** 1971**.** Preparation and Properties of Carbon Foam, Journal of Cellular Plastics, **7**, pp. 294-301.

[75] **Kearns, K. M.,** 1999. Pitch foam products, *United States Patent*, No: 5961814 dated October 5, 1999.

[76] **Tan, S. C.,** 2002. Microcellular carbon foams and microcellular C/C composites fabricated therefrom. *United States Patent,* No: 6339031 dated January 15, 2002.

[77] **Klett, J.,** 2001. Pitch based foam with particulate, *United States,* Patent, No: 6287385.

[78] **Hugh O.,** 1993, Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications. Noyes Publications, NJ, USA.

[79] **Rogers, D. K. and Plucinski, J.W.,** 2003. Coal-based carbon foam, *United States Patent*, 6656238 dated December 2, 2003.

[80] Wright Materials Company, http://www.wrightmat.com,10.01.2008.

[81] **Liu, M., Gan, L., Zhao, F., Xu, H., Fan, X., Tian, C., Wang, X., Hao, Z., Chen, L.,** 2007. Carbon foams prepared by an oil-in-water emulsion method, Department of Chemistry, Tongji University, *Carbon*, **45-13**, p. 2710-2712

[82] **Klett, J. and Conway, B.,** 2000. Thermal Management Solutions Utilizing High Thermal Conductivity Graphite Foams, *Proceedings of the 45th International Sample Symposium and Exhibition*, Long Beach, CA, Mayıs 21-25.

[83] **Klett, J.,** 2003.High Conductivity Graphitic Foams. ORNL internal report, Oak Ridge, USA.

[84] **Klett, J. and Stouder, R.,** 2005. Energy Efficiency and Renewable Energy Program, Oak Ridge Ulusal Laboratuarı, USA.

[85] Ekoloji, http://ekolojimagazin.com/?:d=190&s=magazin, 22.03.2008

[86] **Murdie, N., Pigford, J. F., Wood, M. D., Dillon, F., Parker, C. A.**, **Hemstad, S. N.,** 1978. Carbon foam fuel cell components, *United States Patent,* No: 6315974 dated November 14,1978.

[87] **Kline, R.,** 2003. Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies, FY Progress Report.

[88] High Temperature Stractures, http://sdcmr.sdsu.edu/high_temperature_structures.htm, San Diego State University Dept. of Mechanical Engineering, 01.05.2007

[89] **Turgut, G., Ekşilioğlu, A., Gençay, N., Gonen. E., Hekim N., Yardım, M. F., Sakiz. D. and Ekinci, E.,** 2008. Pore structure engineering for carbon foams as possible bone implant material, *Journal of Biomedical Materials Research,* **85A,** 588-596.

[90] Mitsubishi Gas Chemical, America, Inc., http://www.mgc-a.com/newProducts/media/ARBrochure.pdf 25.04.2008

[91] **Gençay, N.,** 2003. A mesophase pitch derived carbon foam; effect of pressure and release time, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[92] Akademik, http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm, 02.04.2008

[93] **Kanno, K., Tsuruya, H., Fujiura, R., Koshikawa, T., Watanabe, F.,** 2004.*Carbon foam,* graphite foam and production processes of these, United *States Patent,* 6, 689,336 dated February 10, 2004.

[94] Metler Toledo, http://us.mt.com/mt/filters/products-applications_laboratory-eighing_software-accessories_Density-determination/Density_FilterHierarchy-ProductFamily_1142260371408.jsp

[95] **Sihna, S. and Roy, A.K.,** 2004. Modeling and Prediction of bulk properties of open-cell carbon foam. *J Mech Phys Solids*, **52**:167-91.

[96] **Sertakar, G.A.,** 2008. Deminaralize Asfaltitten Karbon Köpük Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

Çizelge A.1: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları

BASINÇ (MPa)		YOĞUNLUK (kg/m^3)
Başlangıç Basıncı	**Son Basınç**	
0.81	2.24	247.1
1.50	3.89	378.6
2.19	5.65	520.9
3.57	9.63	702.2
5.10	13.42	796.5
6.90	18.40	893.1

Çizelge A.2: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları

BASINÇ (MPa)		DAYANIM (MPa)
Başlangıç Basıncı	**Son Basınç**	
0.81	2.24	1.51
1.50	3.89	1.67
2.19	5.65	2.65
3.57	9.63	4.67
5.10	13.42	7.83
6.90	18.40	8.42

Çizelge A.3: Oda Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri

BASINÇ (MPa)		POROZİTE (%)
Başlangıç Basıncı	**Son Basınç**	
0.81	2.24	86
1.50	3.89	75
3.57	9.63	70
6.90	18.40	53

Çizelge A.4: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları

BASINÇ (Mpa)		YOĞUNLUK (kg/m^3)
Başlangıç Basıncı	Son Basınç	
0.81	1.90	124.9
1.50	2.03	198.6
2.19	2.97	257.1
3.57	4.84	423.6
5.10	6.98	662.4
6.90	9.85	717.3

Çizelge A.5: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları

BASINÇ (MPa)		DAYANIM (MPa)
Başlangıç Basıncı	Son Basınç	
0,81	1,9	0,33
1,5	2,03	0,46
2,19	2,97	1,59
3,57	4,84	2,28
5,1	6,98	3,82
6,9	9,85	6,57

Çizelge A.6: 623 K Sıcaklığında Verilen Farklı Basınçlar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri

BASINÇ (MPa)		POROZİTE (%)
Başlangıç Basıncı	Son Basınç	
0.81	1.90	89
1.50	2.03	86
2.19	2.70	82
3.57	4.84	76
6.90	9.85	61

Çizelge A.7: Farklı Proses Sıcaklıkları Uygulanarak Üretilmiş Karbon Köpüklerin Yoğunlukları

SICAKLIK (K)	YOĞUNLUK (kg/m^3)
783	257.1
823	262.2
873	276.1

Çizelge A.8: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları

SICAKLIK (K)	DAYANIM (MPa)
783	1.59
823	1.83
873	1.97

Çizelge A.9: Farklı Sıcaklıklar Sonucunda Üretilmiş Köpüklerin Porozite Sonuçları

SICAKLIK (K)	POROZİTE (%)
783	82
823	81
873	80

Tablo 4.10: Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları

BEKLEME SÜRESİ (d)	YOĞUNLUK (kg/m^3)
15	262.2
30	278.9
60	297.4
180	277.1
300	253.5
420	233.1

Tablo 4.11: Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları

BEKLEME SÜRESİ (d)	DAYANIM (MPa)
15	1.83
30	2.17
60	3.07
180	2.62
300	2.37
420	1.82

Tablo 4.12: Farklı Bekleme Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri

BEKLEME SÜRESİ (d)	POROZİTE (%)
15	81
60	79
300	81

Tablo 4.13: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Yoğunlukları

BOŞALTIM SÜRESİ (s)	YOĞUNLUK (kg/m^3)
3	297.4
7	277.5
9	273.4
15	269.4
29	256.5

Tablo 4.14: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Dayanımları

BOŞALTIM SÜRESİ (s)	DAYANIM (MPa)
3	3.07
7	2.78
9	2.35
15	2.19
29	1.95

Tablo 4.15: Farklı Basınç Boşaltma Sürelerinde Üretilmiş Köpüklerin Porozite Değerleri

BOŞALTIM SÜRESİ (s)	POROZİTE (%)
3	79
15	78
29	78

Çizelge A.16: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunlukları

KARIŞTIRILAN ASFALTİT (%)	YOĞUNLUK (kg/m^3)
0	297.4
2	286.1
5	283.8
10	272.2

Çizelge A.17: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımları

KARIŞTIRILAN ASFALTİT (%)	DAYANIM (MPa)
0	3.07
2	2.28
5	2.24
10	1.39

Çizelge A.18: Çeşitli Oranlarda % 8 Kül İçeriğine Sahip Asfaltit Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Sonuçları

KARIŞTIRILAN ASFALTİT MİKTARI (%)	POROZİTE (%)
0	79
2	79
5	78
10	78

Çizelge A.19: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Yoğunlukları

AĞIRLIKÇA % 5 ORANINDA KARIŞTIRILAN ASFALTİTİN KÜL DEĞERLERİ	YOĞUNLUK (kg/m^3)
% 8 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	283.8
% 10 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	282.7
% 26 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	289.3
% 41 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	292.5
Ham Mezofaz Zift	297.4

Çizelge A.20: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Dayanımları

AĞIRLIKÇA % 5 ORANINDA KARIŞTIRILAN ASFALTİTİN KÜL DEĞERLERİ	Dayanım (MPa)
% 8 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	2.24
% 10 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	2.01
% 26 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	2.49
% 41 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	2.85
Ham Mezofaz Zift	3.07

Çizelge A.21: Mezofaz Zifte % 5 oranında Çeşitli Kül İçeriğine Sahip Asfaltitlerden Karıştırılarak Üretilen Karbon Köpüklerin Porozite Değerleri

AĞIRLIKÇA % 5 ORANINDA KARIŞTIRILAN ASFALTİTİN KÜL DEĞERLERİ	POROZİTE (%)
% 8 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	78
% 10 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	77
% 26 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	76
% 41 Kül Oranında Asfaltit + Mezofaz Zift	76
Ham Mezofaz Zift	79

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad	**:** Esra Işıksal
Doğum Yeri ve Tarihi	**:** Bursa, 1981
Adres	**:** Şehit Ahmet Sok. Selvi Apt. No:28 Daire:10 Şişli,İstanbul
Lisans Üniversite	**:** Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği